

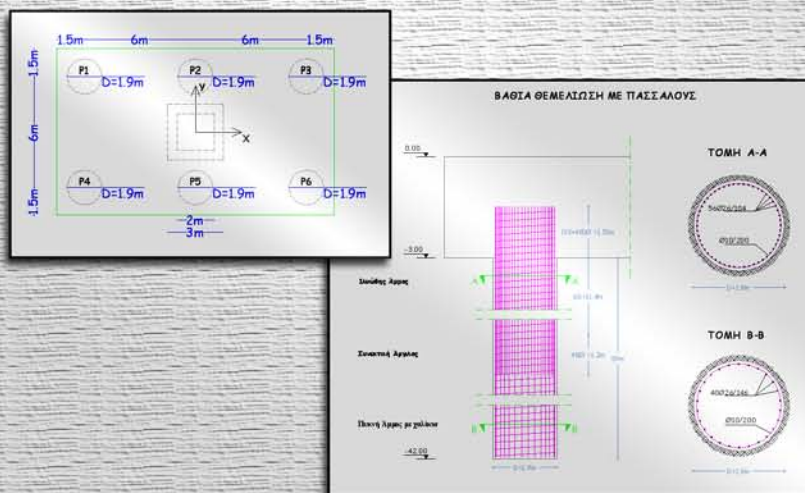
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»

**A.S.T.E.V**

**Αντισεισμικός Σχεδιασμός Θεμελιώσεων,  
Αντιστηρίξεων και Γεωκατασκευών**

Υπεύθυνος:  
Κ. Πιπλιάκης

Θέμα:  
Βαθιά Θεμελίωση Μεσόβαθρου Γέφυρας



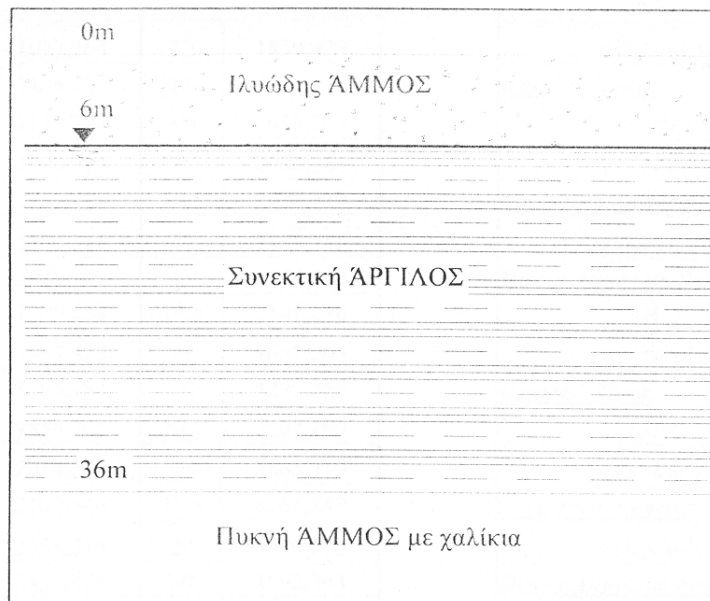
Όνομα φοιτητών:  
**Μουρελάτος Ηλίας**  
**Οικονόμου Θεμιστοκλής**

Δευτέρα, 9 Ιουνίου 2003

**ΒΑΘΕΙΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ ΓΕΦΥΡΑΣ**

Βάθρο γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος, πρόκειται να θεμελιωθεί στο εδαφικό προφίλ του ακόλουθου σχήματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα που παρατίθενται στις επόμενες σελίδες, να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός της βαθιάς θεμελίωσης του βάθρου.



**«ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ, ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΕΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**

**Αντισεισμικός Σχεδιασμός Βαθειών Θεμελιώσεων**

<i>Μεταβολή <math>q_c</math> (KN/m<sup>2</sup>) με βάθος</i>			
<b>A</b>		<b>B</b>	
H (m)	$q_c$ (KN/m <sup>2</sup> )	H (m)	$q_c$ (KN/m <sup>2</sup> )
6	981,23	6	1680,252
6,2	1009,1454	6,2	1718,265
6,5	1027,352	6,5	1772,359
6,8	1042,658	6,8	1802,254
7	1059,264	7	1835,265
7,3	1077,264	7,3	1859,879
7,8	1108,265	7,8	1935,265
8,5	1150,223	8,5	2018,265
9	1200,221	9	2068,265
10,5	1254,221	10,5	2258,349
12	1361,548	12	2489,256
13	1421,365	13	2584,268
14,5	1500,253	14,5	2801,598
17	1657,215	17	3087,265
19	1795,264	19	3299,255
20,5	1854,265	20,5	3507,269
23	2014,253	23	3865,219
25,5	2109,546	25,5	4165,249
28	2255,215	28	4359,216
30	2415,326	30	4592,364
33	2589,215	33	5049,526
36	2785,215	36	5398,221

Όπου  $q_c$  προκύπτει από την δοκιμή διείσδυσης κώνου CPT  
 $q_c = 16c_u$  - (βάρος υπερκείμενου εδάφους)

<i>Εδαφικές ιδιότητες</i>		
<i>Ιλυώδης Άμμος</i>		<b>A</b>
$N_{SPT}$	8	
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	17	
<i>Συνεκτική Αργίλος</i>		
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	18	<b>B</b>
<i>Πυκνή Άμμος με Χαλίκια</i>		
$N_{SPT}$	45	
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	21	
<i>Ιλυώδης Άμμος</i>		<b>B</b>
$N_{SPT}$	10	
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	16,5	
<i>Συνεκτική Αργίλος</i>		
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	19	<b>B</b>
<i>Πυκνή Άμμος με Χαλίκια</i>		
N	40	
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	20	
<i>Ιλυώδης Άμμος</i>		<b>Γ</b>
$N_{SPT}$	6	
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	17	
<i>Συνεκτική Αργίλος</i>		
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	17,5	<b>Γ</b>
<i>Πυκνή Άμμος με Χαλίκια</i>		
$N_{SPT}$	38	
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	21	
<i>Ιλυώδης Άμμος</i>		<b>Δ</b>
$N_{SPT}$	8	
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	16	
<i>Συνεκτική Αργίλος</i>		
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	18,5	<b>Δ</b>
<i>Πυκνή Άμμος με Χαλίκια</i>		
$N_{SPT}$	35	
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	19	

**«ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ, ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΕΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**

**Αντισεισμικός Σχεδιασμός Βαθειών Θεμελιώσεων**

<i>ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥΝ ΣΤΗΝ ΒΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΡΟΥ</i>					
<b>Φορτία λειτουργίας</b>					
Συνδυασμός	N (KN)	Vx (KN)	Vy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
I	23000	70	600	18000	700
II	20000	180	8	80	7000
<b>Σεισμικά φορτία</b>					
Συνδυασμός	N (KN)	Vx (KN)	Vy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
I	18000	700	3700	55000	19000
II	24000	4500	1300	38000	70000
<b>A</b>					
<b>Φορτία λειτουργίας</b>					
Συνδυασμός	N (KN)	Vx (KN)	Vy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
I	21000	110	580	20000	550
II	18000	220	15	110	8200
<b>Σεισμικά φορτία</b>					
Συνδυασμός	N (KN)	Vx (KN)	Vy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
I	23000	680	4200	58000	22000
II	22500	4480	1500	35000	68000
<b>B</b>					
<b>Φορτία λειτουργίας</b>					
Συνδυασμός	N (KN)	Vx (KN)	Vy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
I	24000	65	650	21000	800
II	19000	210	18	75	6500
<b>Σεισμικά φορτία</b>					
Συνδυασμός	N (KN)	Vx (KN)	Vy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
I	19500	800	3500	53500	19000
II	2350	3800	1500	37800	70000
<b>Γ</b>					
<b>Φορτία λειτουργίας</b>					
Συνδυασμός	N (KN)	Vx (KN)	Vy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
I	30000	140	1000	32000	1100
II	25000	300	10	250	8500
<b>Σεισμικά φορτία</b>					
Συνδυασμός	N (KN)	Vx (KN)	Vy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
I	22000	1400	45000	75000	25000
II	30000	8000	2200	42000	89000
<b>Δ</b>					
<b>Φορτία λειτουργίας</b>					
Συνδυασμός	N (KN)	Vx (KN)	Vy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
I	31500	130	880	29500	1200
II	24800	250	15	280	9400
<b>Σεισμικά φορτία</b>					
Συνδυασμός	N (KN)	Vx (KN)	Vy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
I	19500	1580	43000	74000	24800
II	28500	7200	2500	41000	85000
<b>E</b>					
<b>Φορτία λειτουργίας</b>					
Συνδυασμός	N (KN)	Vx (KN)	Vy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
I	31000	150	1100	33000	1300
II	23500	280	20	240	9000
<b>Σεισμικά φορτία</b>					
Συνδυασμός	N (KN)	Vx (KN)	Vy (KN)	Mx (KNm)	My (KNm)
I	23000	13500	4400	75500	26000
II	31000	7000	1900	41500	86000
<b>Z</b>					

**«ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ, ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΕΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**  
**Αντισεισμικός Σχεδιασμός Βαθειών Θεμελιώσεων**

<b>ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΜΕ ΠΑΣΣΑΛΟΥΣ</b>			
<i>A/A ΑΣΤΕ</i>	<i>Μεταβολή q<sub>c</sub> (KN/m<sup>2</sup>) με βάθος</i>	<i>Συνδυασμός φορτίων</i>	<i>Εδαφικές ιδιότητες</i>
1	A	A	A
2	A	B	B
3	A	Γ	Γ
4	A	A	Δ
5	A	B	Δ
6	A	Γ	B
7	A	A	B
8	A	B	A
9	A	Γ	Δ
10	A	A	Γ
11	B	Δ	A
12	B	E	B
13	B	Z	Γ
14	B	Δ	Δ
15	B	E	Δ
16	B	Z	B
17	B	Δ	B
18	B	E	A
19	B	Z	Δ
20	B	Δ	Γ

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Πολυτεχνική Σχολή  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών  
«Αντισεισμικός Σχεδιασμός Τεχνικών Έργων»

**Μάθημα: «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Θεμελιώσεων,  
Αντιστηρίξεων και Γεωκατασκευών»  
(Α.Σ.Τ.Ε. 5)**

**ΘΕΜΑ ΕΞΑΜΗΝΟΥ**

***«Βαθιά Θεμελίωση Μεσόβαθρου Γέφυρας»***

**Υπεύθυνος Θέματος:**  
Πιτιλάκης Κυριαζής

**Μεταπτυχιακοί Φοιτητές:**  
Μουρελάτος Ηλίας  
Οικονόμου Θεμιστοκλής

## 1 ΓΕΝΙΚΑ–ΠΡΟΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ.

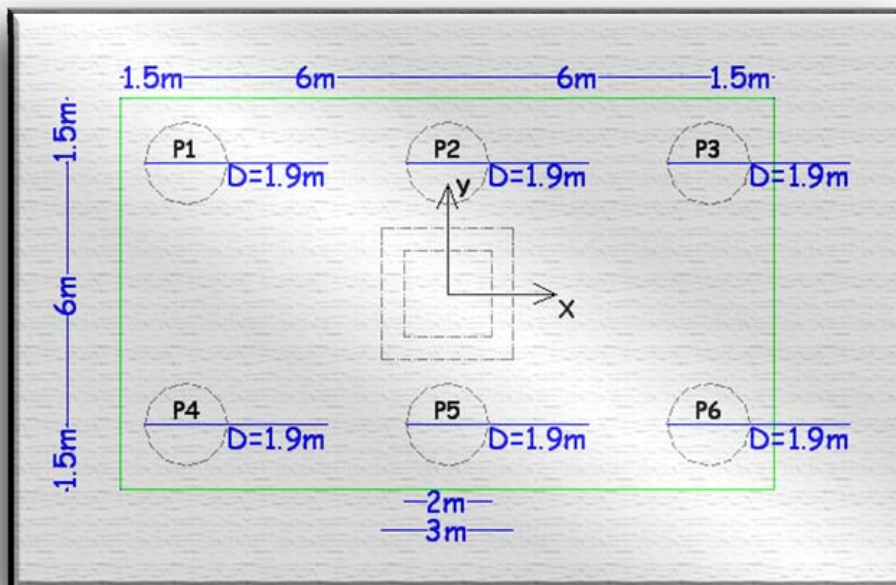
Η ύπαρξη της επιφανειακής χαλαρής εδαφικής στρώσης ιλυώδους άμμου καθιστά την επιφανειακή θεμελίωση του μεσοβάθρου ανεπαρκή, τόσο ως προς τη φέρουσα ικανότητα όσο και ως προς τις αναπτυσσόμενες καθιζήσεις. Επιπρόσθετα είναι πιθανό να αναπτυχθεί στην στρώση αυτή και ρευστοποίηση, φαινόμενο αποφευκτέο. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται η λύση της βαθιάς θεμελίωσης του μεσοβάθρου με πασσάλους.

Λόγω του μεγέθους των φορτίων που δέχεται το μεσόβαθρο, οι πάσσαλοι που εφαρμόζονται λειτουργούν τόσο με την αιχμή τους όσο και με την πλευρική τριβή τους. Μετά από δοκιμές της φέρουσας ικανότητας διατάξεων με τέσσερις και εννέα πασσάλους με μορφή καννάβου 2×2 και 3×3 αντίστοιχα, προέκυψε ότι η πλευρική και η αντίσταση αιχμής που μπορεί να προσδώσει το στρώμα αργίλου δεν επαρκούν ούτε με τις οριακές τους τιμές για την παραλαβή των σεισμικών φορτίων που δέχονται οι πάσσαλοι, Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε η εφαρμογή πασσάλων με αιχμή στο στρώμα πυκνής άμμου.

Ως βέλτιστη λύση, επιλέχθηκε σύστημα έξι πασσάλων, σε διάταξη καννάβου 2×3 σε αποστάσεις  $s = 6,00m$  με τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Αυτό γιατί τα σεισμικά φορτία κατά την διεύθυνση  $x-x'$ , είναι κατά πολύ μεγαλύτερα από αυτά κατά τη διεύθυνση  $y-y'$ . Έτσι έχουμε :

$$\begin{aligned} \text{Διάμετρος: } D &= 1,90m \\ \text{Μήκος: } L &= 39,00m \end{aligned}$$

Το πάχος του κεφαλόδεσμου επιλέχθηκε  $h = 3,00m$  ( $=s/2$ ), ενώ τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δίνονται στο σχήμα που ακολουθεί. Ο κεφαλόδεσμος προβλέπεται να κατασκευαστεί εγκαθωπισμένος στο έδαφος με την άνω παρεία του στη στάθμη του εδάφους.



Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συστήματος πασσαλοθεμελίωσης.

Για τον κεφαλόδεσμο του συστήματος των πασσάλων έγινε η παραδοχή ότι λειτουργεί ως άστρεπτος, οπότε η κατανομή της αξονικής καταπόνησης των πασσάλων έγινε σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$N_i = \frac{N}{n} + M_{y,ολ} \times \frac{x_i}{\sum x_i^2} + M_{x,ολ} \times \frac{y_i}{\sum y_i^2}$$

όπου:  $n = 6$  ο αριθμός των πασσάλων.

$x_i, y_i$  οι συντεταγμένες του πασσάλου  $i$ , σύμφωνα με το σχ.2.1.

$M_{y,ολ} = M_y + V_x \times h$ , η συνολική καμπτική ροπή κατά  $y$  στη στάθμη της κεφαλής των πασσάλων.

$M_{x,ολ} = M_x + V_y \times h$ , η συνολική καμπτική ροπή κατά  $x$  στη στάθμη της κεφαλής των πασσάλων.

$N, V_x, V_y, M_x, M_y$ , τα φορτία διατομής στη βάση του μεσοβάθρου.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές των αξονικών φορτίων των πασσάλων για τους στατικούς και σεισμικούς συνδυασμούς φόρτισης σχεδιασμού.

Πάσσαλος	1	2	3	4	5	6
$x_i$ (m)=	-6,0	0,0	6,0	-6,0	0,0	6,0
$y_i$ (m)=	3,0	3,0	3,0	-3,0	-3,0	-3,0
$x_i/\sum x_i^2 =$	-0,041667	0,000000	0,041667	-0,041667	0,000000	0,041667
$y_i/\sum y_i^2 =$	0,020833	0,020833	0,020833	-0,020833	-0,020833	-0,020833
<b>Φορτία λειτουργίας</b>						
Συνδυασμός	$N_1$ (kN)	$N_2$ (kN)	$N_3$ (kN)	$N_4$ (kN)	$N_5$ (kN)	$N_6$ (kN)
I	4436,667	4478,125	4519,583	3480,417	3521,875	3563,333
II	2872,271	3169,354	3466,438	2866,806	3163,979	3461,063
<b>Σεισμικά φορτία</b>						
Συνδυασμός	$N_1$ (kN)	$N_2$ (kN)	$N_3$ (kN)	$N_4$ (kN)	$N_5$ (kN)	$N_6$ (kN)
I	3691,667	4583,333	5475,000	1025,000	1916,667	2808,333
II	1406,250	4797,917	8189,583	-356,250	3035,417	6427,083

#### Αξονικά πασσάλων.

Ο κάθε πάσσαλος εκτείνεται εντός του ανώτερου στρώματος άμμου  $L_{SM} = 3m$ , εντός του αργιλικού στρώματος  $L_{CL} = 30m$  και  $L_s = 6m$  ( $>2,5m$ ) εντός του κατώτερου στρώματος άμμου και έτσι έχει συνολικό μήκος  $L_{ολ} = 39 m$ .



## 2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΠΑΣΣΑΛΩΝ.

Για τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας του συστήματος των πασσάλων εφαρμόζεται το *DIN4014(1990)* σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις του οποίου θα πρέπει:

- (1) Το φορτίο που δέχεται κάθε πάσσαλος από την ανωδομή δεν πρέπει να υπερβαίνει το οριακό φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο πάσσαλος, μέσω μηχανισμού τριβής ή αιχμής, το οποίο λαμβάνεται μειωμένο με ένα συντελεστή ασφαλείας  $f_s = 2,0$  για στατικές φορτίσεις, ενώ για σεισμικούς συνδυασμούς φόρτισης  $f_d = 1,5$ .
- (2) Το φορτίο που δέχεται κάθε πάσσαλος από την ανωδομή δεν πρέπει να υπερβαίνει το φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο πάσσαλος, μέσω μηχανισμού τριβής ή αιχμής, το οποίο αναπτύσσεται για καθίζηση ίση με την επιτρεπόμενη καθίζηση της ανωδομής.

Κατά συνέπεια, ο έλεγχος της φέρουσας ικανότητας του συστήματος των πασσάλων θα γίνει τόσο για την ανάπτυξη της μέγιστης φέρουσας ικανότητας των πασσάλων για το προδιαγεγραμμένο επίπεδο μετακινήσεων που προβλέπεται από το *DIN4014* όσο και για την φέρουσα ικανότητα που αναπτύσσεται για το επίπεδο της επιτρεπόμενης καθίζησης.

Δεδομένου ότι η έμπηξη των πασσάλων γίνεται σε πολυστρωματικό έδαφος με μη συνεκτικό έδαφος στην αιχμή, ο έλεγχος της φέρουσας ικανότητας του συστήματος των πασσάλων αρκεί να γίνει μόνο για αστοχία μεμονωμένων πασσάλων της ομάδας λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή αποδοτικότητας  $\lambda$  της ομάδας των πασσάλων για την εκτίμηση μόνο της φέρουσας ικανότητας που προσδίδει το αργλικό στρώμα μέσω του μηχανισμού τριβής. Ο συντελεστής αποδοτικότητας δίνεται από την ακόλουθη προκύπτει:

$$\lambda = 1 - \frac{(n_1 - 1) \times n_2 + (n_2 - 1) \times n_1}{n_1 \times n_2} \times \frac{\xi}{90^\circ} = 1 - \frac{(2 - 1) \times 3 + (3 - 1) \times 2}{2 \times 3} \times \frac{17,571^\circ}{90^\circ} = 0,769$$

όπου:  $n_1 = 2$  ο αριθμός των σειρών της διάταξης των πασσάλων.

$n_2 = 3$  ο αριθμός των στηλών της διάταξης των πασσάλων.

$\xi = \arctan(D/s) = \arctan(1,9/6) = 17,571^\circ$ .

Για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας που προσδίδουν το ανώτερο στρώμα χαλαρής ιλυώδους άμμου και το κατώτερο στρώμα πυκνής άμμου μέσω μηχανισμού τριβής το πρώτο και μέσω μηχανισμού τριβής και κυρίως αιχμής το δεύτερο, ο συντελεστής αποδοτικότητας λαμβάνεται συντηρητικά ίσος με τη μονάδα.

## 2.1 Έλεγχος οριακής φέρουσας ικανότητας πασσάλων.

### 2.1.1 Υπολογισμός οριακής αντίστασης αιχμής πασσάλων.

Η οριακή αντίσταση αιχμής αναπτύσσεται για καθίζηση  $s_g = 0,10 \times D = 0,190\text{m}$  και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_{s,\max} = (\pi \times D^2/4) \times \sigma_{s,\max}$$

όπου:  $\sigma_{s,\max}$  η οριακή αντίσταση αιχμής ανά μονάδα επιφάνειας του εδάφους αιχμής.

Ο λόγος της αντίστασης της αιχμής  $q_c$  στατικού πενετρομέτρου (CPT) προς τον αριθμό των κτύπων  $N_{SPT}$  της πρότυπης δοκιμής πενετρομέτρου για την άμμο του στρώματος αιχμής ορίζεται, σύμφωνα με το DIN4014:  $q_c/N_{SPT} \approx 0,55 \Rightarrow q_c = 0,55 \times 45 = 24,75 \text{ MN/m}^2$ .

Για τη δεδομένη τιμή  $q_c$ , προκύπτει:  $\sigma_{s,\max} = 3975 \text{ kN/m}^2$  (Σημειώσεις Α.Σ.Τ.Ε. 5 με γραμμική παρεμβολή για τις τιμές  $q_c=20 \text{ MN/m}^2 \rightarrow 3,5 \text{ MN/m}^2$  και  $q_c=25 \text{ MN/m}^2 \rightarrow 4 \text{ MN/m}^2$ ) οπότε η οριακή αντίσταση αιχμής προκύπτει:

$$Q_{s,\max} = (\pi \times 1,90^2/4) \times 3975 = 11270,267 \text{ kN}$$

### 2.1.2 Υπολογισμός οριακής αντίστασης τριβής πασσάλων

Η συνολική οριακή αντίσταση πλευρικής τριβής λόγω και των τριών στρωμάτων δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{r,\max} = (\pi \times D) \times [L_{SM} \times \tau_{mf,SM} + L_{CL} \times (\lambda \times \tau_{mf,CL}) + L_S \times \tau_{mf,S}]$$

όπου:  $\tau_{mf,i}$  η οριακή πλευρική τριβή ανά μονάδα επιφάνειας στο στρώμα  $i$ .

Η οριακή πλευρική τριβή ανά μονάδα επιφάνειας στο στρώμα αργίλου είναι συνάρτηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού. Από τα δεδομένα της άσκησης υπολογίζεται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου βάσει του τύπου:  $q_c=16 \times C_u$ -βάρος υπερκείμενης εδαφικής στρώσης. Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζεται ο υπολογισμός της  $C_u$

Βαθιά θεμελίωση			
H(m)	q	Υπερκ. Βάρος	c <sub>u</sub>
6,0	981,230	102,0	67,702
6,2	1009,145	103,6	69,547
6,5	1027,352	106,0	70,835
6,8	1042,658	108,4	71,941
7,0	1059,264	110,0	73,079
7,3	1077,264	112,4	74,354
7,8	1108,265	116,4	76,542
8,5	1150,223	122,0	79,514
9,0	1200,221	126,0	82,889
10,5	1254,221	138,0	87,014
12,0	1361,548	150,0	94,472
13,0	1421,365	158,0	98,710
14,5	1500,253	170,0	104,391
17,0	1657,215	190,0	115,451
19,0	1795,264	206,0	125,079
20,5	1854,265	218,0	129,517
23,0	2014,253	238,0	140,766
25,5	2109,546	258,0	147,972
28,0	2255,215	278,0	158,326
30,0	2415,326	294,0	169,333
33,0	2589,215	318,0	181,701
36,0	2785,215	342,0	195,451
M.O.	1575,842	M.O.	109,8

$q_c = 16 \times c_u - W$

### Εύρεση C<sub>u</sub>.

Η τελική τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής είναι  $C_u = 109,8 \text{ kN/m}^2$  και συνεπώς :

$$\tau_{mf,CL} = 42 \text{ kN/m}^2.$$

Ο λόγος της αντίστασης της αιχμής  $q_c$  στατικού πενетроμέτρου (CPT) προς τον αριθμό των κτύπων  $N_{SPT}$  της πρότυπης δοκιμής πενетроμέτρου για την άμμο του ανώτερου στρώματος ορίζεται, σύμφωνα με το DIN4014:  $q_c / N_{SPT} \approx 0,35 \Rightarrow q_c = 0,35 \times 8 = 2,8 \text{ MN/m}^2$ .

Η οριακή αντίσταση τριβής για κάθε ένα από τα τρία στρώματα αναπτύσσεται για καθίζηση που δίνεται από την παρακάτω σχέση:  $s_{r,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \times Q_{r,max} + 0,5 \\ 3,00 \text{ cm} \end{array} \right\}$

Η οριακή πλευρική τριβή ανά μονάδα επιφάνειας στα στρώματα άμμου είναι συνάρτηση της αντίστασης της αιχμής  $q_c$  στατικού πενетроμέτρου και έχει τις παρακάτω τιμές:

$$\tau_{mf,SM} = 22,4 \text{ kN/m}^2.$$

$$\tau_{mf,S} = 120 \text{ kN/m}^2.$$

Οπότε, η συνολική οριακή αντίσταση πλευρικής τριβής κάθε πασσάλου προκύπτει:

$$Q_{r,max} = (\pi \times 1,9) \times [3 \times 22,4 + 30 \times (0,769 \times 42) + 6 \times 120] = 10482,445 \text{ kN}$$

και αναπτύσσεται για επίπεδο καθίζησης:

$$s_{r,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \times Q_{r,max} + 0,5 = 5,74 \text{ cm} \\ 3,00 \text{ cm} \end{array} \right\} = 3,00 \text{ cm}$$

Οριακή πλευρική τριβή			
Στρώμα	$\tau_{m}(kN/m^2)$	$Q_{m}(kN)$	$\lambda \times Q_{m}(kN)$
SM	22,400	401,119	401,119
CL	42,000	7520,973	5783,628
S	120,000	4297,699	4297,699
		Σύνολο	10482,445

**Οριακή αντίσταση πλευρικής τριβής.**

### 2.1.3 Έλεγχος οριακής φέρουσας ικανότητας πασσάλων.

Η συνολική φέρουσα ικανότητα κάθε πασσάλου για στατικές και σεισμικές συνθήκες προκύπτει:

*Στατικές φορτίσεις:*

$$Q_{u,s} = (Q_{s,max} + Q_{r,max})/2 = (11270,267 + 10482,445)/2 = 10876,356 \text{ kN} > \max N_{s,i} = 4519,583 \text{ kN}$$

*Σεισμικές φορτίσεις:*

$$Q_{u,d} = (Q_{s,max} + Q_{r,max})/1,5 = (11270,267 + 10482,445)/1,5 = 14501,809 \text{ kN} > \max N_{d,i} = 8189,583 \text{ kN}$$

Οριακή φέρουσα ικανότητα πασσάλων			
Φορτία	$Q_u$	$\max N_{d,i}$	SF
Λειτουργίας	10876,356	4519,583	2,406
Σεισμικά	14501,808	8189,583	1,771

**Έλεγχος οριακής φέρουσας ικανότητας πασσάλων.**

## 2.2 Έλεγχος φέρουσας ικανότητας πασσάλων για το επίπεδο της επιτρεπόμενης καθίζησης.

### 2.2.1 Υπολογισμός αντίστασης αιχμής πασσάλων.

Ως επιτρεπόμενη καθίζηση για τη θεμελίωση του μεσοβάθρου ορίζεται η τιμή  $s_{επ} = 5\text{cm}$  (όπως έχει υπολογιστεί στα πλαίσια της εργασίας για την επιφανειακή θεμελίωση). Η αντίσταση αιχμής ανά μονάδα επιφάνειας του εδάφους αιχμής, αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση της καθίζησης μέχρι αυτή να φτάσει την τιμή  $s_g = 0,10 \times D = 0,190\text{m}$ , με χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος αύξησης τις τιμές καθίζησης  $s_1 = 0,02 \times D = 0,038\text{m}$  και  $s_2 = 0,03 \times D = 0,057\text{m}$  για τις οποίες οι αντίστοιχες τιμές αντίστασης αιχμής, για τη δεδομένη τιμή  $q_c = 24,75 \text{ MN/m}^2$  του αμώδους στρώματος, είναι (γραμμική παρεμβολή όπως προηγουμένως):

$$s_1 = 0,02 \times D = 0,038\text{m}$$

$$\sigma_{s,1} = 1732,5 \text{ kN/m}^2$$

$$s_2 = 0,03 \times D = 0,057\text{m}$$

$$\sigma_{s,2} = 2227,5 \text{ kN/m}^2$$

Επομένως, εφόσον  $s_1 < s_{επ} < s_2$ , με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών  $\sigma_{s,1}$  και  $\sigma_{s,2}$ , η αντίσταση αιχμής ανά μονάδα επιφάνειας του εδάφους αιχμής και η αντίστοιχη συνολική αντίσταση αιχμής προκύπτουν:

$$\sigma_{s,επ} = 2045,132 \text{ kN/m}^2 \quad Q_{s,επ} = (\pi \times 1,90^2 / 4) \times 2045,132 = 5798,536 \text{ kN}$$

Αντίσταση αιχμής πασσάλων					
	Τύπος	s	$s_i/D$	$\sigma_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	
	$S_{0,02}$	0,0380	0,0200	1732,500	
Στρώμα	$S_{0,03}$	0,0570	0,0300	2227,500	$Q_{S,επ}$ (kN)
S	$S_{επ}$	0,0500	0,0263	2045,132	5798,536

### Υπολογισμός αντίστασης αιχμής πασσάλων.

### 2.2.2 Υπολογισμός αντίστασης τριβής πασσάλων.

Η πλευρική τριβή ανά μονάδα επιφάνειας αυξάνεται γραμμικά συναρτήσει της καθίζησης μέχρι την οριακή τιμή  $\tau_{mf}$  η οποία αναπτύσσεται όταν η καθίζηση φτάσει την τιμή  $s_{r,max}$  και στη συνέχεια παραμένει σταθερή. Εφόσον ισχύει  $s_{r,max} = 3\text{cm} < s_{επ} = 5\text{cm}$ , η πλευρική τριβή σε όλο το μήκος των πασσάλων έχει αναπτυχθεί πλήρως, οπότε η αντίστοιχη συνολική αντίσταση τριβής έχει την οριακή της τιμή:

$$Q_{r,επ} = Q_{r,max} = 10482,445 \text{ kN}$$

### 2.2.3 Έλεγχος φέρουσας ικανότητας πασσάλων για το επίπεδο της επιτρεπόμενης καθίζησης.

Η συνολική φέρουσα ικανότητα κάθε πασσάλου προκύπτει:

$$Q_{u, \text{σεπ}} = Q_{s, \text{σεπ}} + Q_{r, \text{σεπ}} = 5798,536 + 10482,445 = 16280,981 \text{ kN} > \max N_i = 8189,583 \text{ kN}$$

Επιπλέον, θα γίνει έλεγχος για ενδεχόμενη εξόλκευση εφελκυσμένου πασσάλου, εφόσον προκύπτει εφελκυσμός πασσάλων για σεισμικά φορτία για την αντίσταση των πασσάλων στο επίπεδο της αναπτυσσόμενης καθίζησης.

### 2.3 Έλεγχος καθιζήσεων.

Η συνολική καθίζηση που αναμένεται να υποστεί η ομάδα των έξι πασσάλων θα οφείλεται αποκλειστικά στην άμεση καθίζηση του αμμώδους στρώματος στο οποίο γίνεται η έμπηξη της αιχμής των πασσάλων.

Για τον υπολογισμό της καθίζησης του συστήματος των πασσάλων γίνεται η παραδοχή ότι ο κεφαλόδεσμος των πασσάλων είναι άκαμπτος οπότε οι πάσσαλοι παρουσιάζουν κοινή καθίζηση.

Αν συμβολίσουμε με  $p_g$  την κοινή καθίζηση των πασσάλων, τότε για την καθίζηση  $p_i$  κάθε πασσάλου  $i$  θα ισχύει:

$$p_i = p_g = p' \times P_i + p' \times \sum_{j=1, j \neq i}^n (P_j \times \alpha_{ij})$$

όπου:  $p'$  η καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου λόγω μοναδιαίου φορτίου

$p' \times P_i$  η καθίζηση του πασσάλου  $i$  λόγω του φορτίου του  $P_i$ .

$\alpha_{ij}$  ο συντελεστής αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων  $i$  και  $j$ .

$P_i \times \alpha_{ij}$  η καθίζηση του πασσάλου  $i$  λόγω του φορτίου  $P_j$  του πασσάλου  $j$ .

Για τον υπολογισμό της καθίζησης  $p'$  (m/kN) εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση:

$$p' = P \times I / (E_s \times D)$$

όπου:  $P = 1 \text{ kN}$ , το μοναδιαίο φορτίο.

$E_s = \frac{1}{L} \times \sum_{i=1}^n (E_{s,i} \times L_i)$ , ο βαρυκεντρικός μέσος όρος των μέτρων ελαστικότητας

των εδαφικών στρώσεων.

$D = 1,90 \text{ m}$  η διάμετρος των πασσάλων.

$I = I_0 \times R_k \times R_b \times R_v$ , συντελεστής καθίζησης για πασσάλους αιχμής, καθώς μεγαλύτερη συνεισφορά στην φέρουσα ικανότητα των πασσάλων προκύπτει ότι έχει η αντίσταση αιχμής του πασσάλου.

Το μέτρο ελαστικότητας του δύο αμμωδών στρωμάτων υπολογίζεται συναρτήσει της αντίστασης της αιχμής  $q_c$  στατικού πενετρομέτρου, σύμφωνα με τη ακόλουθη σχέση (Schmertmann, 1970):

$$E_s = 2 \times q_c$$

$$\begin{aligned} \text{Προκύπτει: } E_{s,SM} &= 2 \times q_c = 2 \times 2800 = 5600 \text{ kN/m}^2 \\ E_{s,S} &= 2 \times q_c = 2 \times 24750 = 49500 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Κατά συνέπεια, το μέσο μέτρο ελαστικότητας των εδαφικών στρώσεων προκύπτει:

$$\begin{aligned} E_s &= [L_{SM} \times E_{s,SM} + L_{CL} \times E_{s,CL} + L_S \times E_{s,S}] / L_{\text{πασσάλου}} = \\ &= [3 \times 5600 + 30 \times 30000 + 6 \times 49500] / 39 = 31123,078 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $R_i$ , θεωρούμε ότι για τη σκυροδέτηση των πασσάλων θα χρησιμοποιηθεί σκυρόδεμα C20/25,  $E_p = 29 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ , οπότε η ακαμψία του πασσάλου προκύπτει:

$$K = (E_p / E_s) \times R_A = (29 \times 10^6 / 31123,078) \times 1 = 932.$$

Ο συντελεστής  $R_A$  λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα για πλήρη διατομή πασσάλου (Θεμελιώσεις, σελ. 158).

Δεδομένου ότι το σύνολο σχεδόν του μήκους κάθε πασσάλου είναι εντός του υπόγειου υδροφορέα, ο συντελεστής Poisson λαμβάνεται  $\nu_s = 0,50$  οπότε  $R_v = 1,000$  (Θεμελιώσεις, σελ. 166).

Θεωρώντας ότι η διάμετρος  $D_b$  της αιχμής των πασσάλων είναι ίση με τη διάμετρο  $D$  του σώματος των πασσάλων, από σχετικά διαγράμματα προκύπτει:

$$\left. \begin{array}{l} D_b / D = 1 \\ L / D = 20,53 \end{array} \right\} I_o = 0,089 \text{ (Σημειώσεις θεμελιώσεων, σελ. 165)}$$

$$\left. \begin{array}{l} K = 932 \\ L / D = 20,53 \end{array} \right\} R_k = 1,100 \text{ (Σημειώσεις θεμελιώσεων, σελ. 166)}$$

$$\left. \begin{array}{l} K = 932 \\ L / D = 20,53 \\ E_{s,S} / E_s = 49500 / 31123,08 = 1,590 \end{array} \right\} R_b = 0,980 \text{ (Σημειώσεις θεμελιώσεων, σελ. 167)}$$

$$\text{Οπότε: } I = I_o \times R_k \times R_b \times R_v = 0,089 \times 1,100 \times 0,980 \times 1,000 = 0,0959$$

$$p' = P \times I / (E_s \times D) = 1 \times 0,0959 / (31123,08 \times 1,90) = 1,6225 \times 10^{-6} \text{ m/kN.}$$

Υπολογισμός συντελεστών $R_i$ ελέγχου καθιζήσεων							
$E_m$ (kN/m <sup>2</sup> )	$D_b/D$	$L/D$	$K$	$v_s$	$E_b/E_m$	Συν/τές	τιμή
31123,077	1,00	20,53				$I_o =$	0,089
		20,53				$R_A =$	1,000
		20,53	931,78			$R_k =$	1,100
			931,78	0,50		$R_v =$	1,000
		20,53	931,78		1,59	$R_b =$	0,980
						$I =$	0,095942
						$p'(m/MN) =$	0,001622

### Υπολογισμός συντελεστών $R_i$ καθιζήσεων.

Για τον υπολογισμό των συντελεστών αλληλεπίδρασης  $\alpha_{ij}$  εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση, δεδομένου ότι το έδαφος έδρασης των αιχμών των πασσάλων δεν είναι ασυμπύεστο.

$$\alpha_{ij} = \alpha_F - F_E \times (\alpha_F - \alpha_E)$$

Οι συντελεστές  $\alpha_F$ ,  $\alpha_E$  εξαρτώνται από την απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $i$  και  $j$  μέσω του λόγου  $s/D$ , όπου  $s_1 = 6m$  για διαδοχικούς μη διαγώνιους πασσάλους,  $s_2 = 12m$  για τη πασσάλους που παρεμβάλλεται άλλος μεταξύ τους,  $s_3 = \sqrt{2} \times 6m$  μεταξύ πασσάλων με διαγώνιο μεταξύ τους και τέλος  $s_4 = \sqrt{5} \times 6m$  για την απόσταση μεταξύ αντιδιαμετρικών ακριανών πασσάλων.

$$\left. \begin{array}{l} E_{S,S} / E_S = 1,590 \\ L/D = 20,53 \end{array} \right\} F_E = 0,075 \text{ (Σημειώσεις θεμελιώσεων, σελ 180)}$$

Από το βιβλίο θεμελιώσεων, σελ. 178 και 179, προκύπτουν τα εξής:

- $s_1$

$$\left. \begin{array}{l} K = 932 \\ L/D = 20,53 \\ s/D = 6/1,9 = 3,16 \end{array} \right\} \alpha_F = 0,480, \quad \alpha_E = 0,040$$

$$\text{Άρα, } \alpha_{s1} = 0,480 - 0,075 \times (0,480 - 0,040) = 0,44700$$

- $s_2$

$$\left. \begin{array}{l} K = 932 \\ L/D = 20,53 \\ s/D = 2 \times 6/1,9 = 6,32 \end{array} \right\} \alpha_F = 0,340, \quad \alpha_E = 0,020$$

$$\text{Άρα, } \alpha_{s2} = 0,340 - 0,075 \times (0,340 - 0,020) = 0,31600$$

- $s_3$

$$\left. \begin{array}{l} K = 932 \\ L/D = 20,53 \\ s/D = \sqrt{2} \times 6/1,9 = 4,47 \end{array} \right\} \alpha_F = 0,370, \quad \alpha_E = 0,030$$



$$\text{Άρα, } \alpha_{s1} = 0,370 - 0,075 \times (0,370 - 0,030) = 0,3445$$

- $s_4$

$$K = 932$$

$$L/D = 20,53$$

$$s/D = \sqrt{5} \times 6 / 1,9 = 7,06$$

$$\alpha_F = 0,320, \quad \alpha_E = 0,010$$

$$\text{Άρα, } \alpha_{s1} = 0,320 - 0,075 \times (0,320 - 0,010) = 0,29675$$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης					
L/D	K	s/D	Eb/Em	Συν/τέσ α	τιμή
20,5263	931,7845	3,1579		$\alpha_F(1s) =$	0,48
20,5263	931,7845	6,3158		$\alpha_F(2s) =$	0,34
20,5263	931,7845	4,4659		$\alpha_F(d1s) =$	0,37
20,5263	931,7845	7,0613		$\alpha_F(d2s) =$	0,32
20,5263	931,7845		1,5905	FE =	0,075
20,5263	931,7845	3,1579		$\alpha_E(1s) =$	0,04
20,5263	931,7845	6,3158		$\alpha_E(2s) =$	0,02
20,5263	931,7845	4,4659		$\alpha_E(d1s) =$	0,03
20,5263	931,7845	7,0613		$\alpha_E(d2s) =$	0,01
				$\alpha(1s) =$	0,44700
				$\alpha(2s) =$	0,31600
				$\alpha(d1s) =$	0,34450
				$\alpha(d2s) =$	0,29675

#### Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης πασσάλων.

Λόγω συμμετρίας της διάταξης των πασσάλων θα ισχύει:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = N_{ολ} / 6 = \begin{cases} 24000 / 6 = 6000kN \\ 19000 / 6 = 3116,6kN \end{cases}, \text{ για τους δύο στατικούς} \\ \text{συνδυασμούς I, II.}$$

Επομένως, η συνολική καθίζηση του συστήματος των πασσάλων προκύπτει:

$$p_g = p' \times (P_1 + P_2 \times \alpha_{12} + P_3 \times \alpha_{13} + P_4 \times \alpha_{14} + P_5 \times \alpha_{15} + P_6 \times \alpha_{16}) = \\ = p' \times (N_{ολ} / 6) \times (1 + 0,447 + 0,316 + 0,447 + 0,3445 + 0,29675) = \\ = \begin{cases} 0,0185m \\ 0,01465m \end{cases} < s_{επ} = 0,05m.$$

#### 2.4 Έλεγχος πασσάλων σε εξόλκευση.

Για την μικρότερη τιμή άμεσης καθίζησης του συστήματος των πασσάλων, ισχύει ότι  $p_g < s_i$ , οπότε, με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών 0 και  $\sigma_{s,i}$ , η αντίσταση αιχμής ανά μονάδα επιφανείας του εδάφους αιχμής και η αντίστοιχη συνολική αντίσταση αιχμής προκύπτουν:

$$\sigma_{s,pg} = 667,882 \text{ kN/m}^2 \quad Q_{s, \text{σεπ}} = (\pi \times 1,90^2 / 4) \times 667,882 = 1893,638 \text{ kN}$$

Αντίσταση αιχμής πασσάλων σε εξόλκευση					
	Τύπος	s	s <sub>i</sub> /D	σ <sub>s</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	
	S <sub>10,02</sub>	0,0380	0,0200	1732,500	
Στρώμα	S <sub>10,03</sub>	0,0570	0,0300	2227,500	Q <sub>s,10,03</sub> (kN)
S	S <sub>1,12</sub>	0,0146	0,0077	667,882	1893,638

#### Εξόλκευση–Αντίσταση αιχμής πασσάλων.

Ομοίως ισχύει  $p_g < s_{r,max}$ , οπότε, με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών 0 και  $\tau_{mf,i}$ , η αντίσταση τριβής ανά μονάδα επιφανείας κάθε εδαφικού στρώματος και οι αντίστοιχες συνολικές αντιστάσεις τριβής προκύπτουν:

$$\begin{aligned} \tau_{mf,SM} &= 10,938 \text{ kN/m}^2 & Q_{r,SM} &= (\pi \times 1,9) \times (3 \times 10,938) &= 195,867 \text{ kN} \\ \tau_{mf,CL} &= 20,509 \text{ kN/m}^2 & Q_{r,CL} &= (\pi \times 1,8) \times (30 \times 26,7) &= 3672,510 \text{ kN} \\ \tau_{mf,S} &= 58,509 \text{ kN/m}^2 & Q_{r,S} &= (\pi \times 1,8) \times (6 \times 89,1) &= 2098,577 \text{ kN} \end{aligned}$$

Οπότε, η συνολική οριακή αντίσταση πλευρικής τριβής κάθε πασσάλου προκύπτει:

$$Q_{r,pg} = Q_{r,SM} + \lambda \times Q_{r,CL} + Q_{r,S} = 5118,605 \text{ kN} > \max N_{s,i}(+) = 356,25 \text{ kN}.$$

Οριακή αντίσταση πλευρικής τριβής σε εξόλκευση						
Στρώμα	s <sub>sm</sub> (m)	s <sub>σεπ</sub> (m)	s <sub>τελ</sub> (m)	τ <sub>mf,στέλ</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	Q <sub>r,στέλ</sub> (kN)	λ × Q <sub>r</sub>
SM	0,030	0,050	0,014649	10,938	195,867	195,867
CL	0,030	0,050	0,014649	20,509	3672,511	2824,161
S	0,030	0,050	0,014649	58,596	2098,577	2098,577
maxN <sub>s,i</sub> (+)=	356,250				Σύνολο =	5118,605

#### Εξόλκευση–Οριακή αντίσταση πλευρικής τριβής.

### 3 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΣΣΑΛΩΝ.

Για τη διαστασιολόγηση των πασσάλων θα υπολογιστούν τα φορτία διατομής των πασσάλων κατά το μήκος τους λόγω της πλευρικής φόρτισης που δέχονται από τις σεισμικές τέμνουσες.

Η πλευρική αντίσταση που προβάλλει το έδαφος στην οριζόντια κίνηση των πασσάλων είναι μη γραμμική και επιπλέον γραμμικά μεταβαλλόμενη με το βάθος.

Προκειμένου να υπολογιστεί η εντατική κατάσταση των πασσάλων λόγω πλευρικής φόρτισης, η προσομοίωση του εδάφους γίνεται με οριζόντια ελατήρια μετακίνησης με γραμμικό νόμο συμπεριφοράς, μεταβλητά με το βάθος για τα αμμώδη στρώματα και σταθερά με το βάθος για το αργιλικό στρώμα.

Η διακριτοποίηση των πασσάλων έγινε με πεπερασμένα στοιχεία με οριζόντια ελατήρια και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις ανά 1,5m στο ανώτερο στρώμα άμμου, ανά 2,5m στο στρώμα αργίλου και ανά 2m στο κατώτερο στρώμα άμμου.

Ο δείκτης αντίστασης για το αργιλικό έδαφος είναι σταθερός ως προς το βάθος με τιμή:

$$K_{S,CL} = 67 \times C_u / D = 67 \times 109,80 / 1,9 = 3871,8947 \text{ kN/m}^3$$

Ο δείκτης αντίστασης για τα αμμώδη εδάφη μεταβάλλεται γραμμικά με το βάθος και υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις συναρτήσει της ενεργού κατακόρυφης τάσης στο αντίστοιχο βάθος (Terzaghi, 1955):

$$\begin{aligned} K_{S,SM} &= 200 \times \sigma'_v / (1,35 \times D) \\ K_{S,S} &= 1500 \times \sigma'_v / (1,35 \times D) \end{aligned}$$

Η αλληλεπίδραση των πασσάλων λόγω πλευρικής φόρτισης, σύμφωνα με το DIN4014, λαμβάνεται υπόψη μέσω των τροποποιημένων δεικτών αντίστασης  $K_{si}$  που δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

Για σταθερό δείκτη αντίστασης (αργιλικό έδαφος):

$$K_{si} = \begin{cases} \alpha_i^{1,33} \times K_s, & L/L_o \geq 4 \\ \alpha_i \times K_s, & L/L_o \leq 2 \end{cases},$$

όπου:

$$L_o = \sqrt[4]{\frac{E_p \times I_p}{K_s \times D}} = \sqrt[4]{\frac{290000000 \times \pi \times 1,9^4 / 64}{3871,8947 \times 1,9}} = 7,086 \text{ m} \Rightarrow L/L_o = 39/7,086 = 5,503 > 4$$

Για δείκτη αντίστασης γραμμικά μεταβαλλόμενο με το βάθος z (αμμώδη εδάφη):

$$K_{si} = \begin{cases} \alpha_i^{1,67} \times K_s, & L/L_o \geq 4 \\ \alpha_i \times K_s, & L/L_o \leq 2 \end{cases}, \text{ όπου: } L_o = \sqrt[5]{\frac{E_p \times I_p}{K_s \times D/z}}$$

Οι συντελεστές  $\alpha_i$  προκύπτουν από την ακόλουθη σχέση:  $\alpha_i = \alpha_L \times \alpha_Q$ , με  $\alpha_L, \alpha_Q$  συντελεστές που εξαρτώνται από το λόγο  $s/D = 6/1,9 = 3,158$  και τις σχετικές θέσεις των πασσάλων. Οι τιμές αυτές λαμβάνονται από τις σημειώσεις ΑΣΤΕ 5 (DIN 4014 – Ομάδα πασσάλων). Για σεισμό και στις δύο διευθύνσεις, ο δυσμενέστερος συνδυασμός είναι  $\alpha_i = \alpha_L \times \alpha_Q = 0,62 \times 1,0 \rightarrow \alpha_i = 0,62$  για όλους τους πασσάλους.

Οι αντίστοιχες σταθερές των ελατηρίων προκύπτουν με πολλαπλασιασμό των δεικτών αντίστασης με τα εκάστοτε εμβαδά επιρροής κάθε ελατηρίου (διάμετρος κυκλικής διατομής πασσάλου επί το αντίστοιχο μήκος επιρροής).

Στους κόμβους στη στάθμη των διεπιφανειών των διαφορετικών εδαφικών στρωμάτων εφαρμόστηκαν ελατήρια με δυστένεια ανάλογη των μηκών επιρροής των εκατέρωθεν στρωμάτων.

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι τιμές των ελατηριακών σταθερών που εφαρμόστηκαν σε κάθε βάθος.

Ελατηριακές σταθερές για εισαγωγή στο SAP					
Στρώμα	Στάθμη z(m)	$\sigma'_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	$K_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$L_o$ (m)	$K_{si}$ (kN/m <sup>3</sup> )
SM	-3,0	51,000	3976,608	5,935	1789,810
	-4,5	76,500	5964,912	5,935	2684,715
	-6,0	102,000	7953,216	5,935	3579,620
CL	-6,0	102,000	3871,895	7,086	2050,239
	-8,5	122,000	3871,895	7,086	2050,239
	-11,0	142,000	3871,895	7,086	2050,239
	-13,5	162,000	3871,895	7,086	2050,239
	-16,0	182,000	3871,895	7,086	2050,239
	-18,5	202,000	3871,895	7,086	2050,239
	-21,0	222,000	3871,895	7,086	2050,239
	-23,5	242,000	3871,895	7,086	2050,239
	-26,0	262,000	3871,895	7,086	2050,239
	-28,5	282,000	3871,895	7,086	2050,239
	-31,0	302,000	3871,895	7,086	2050,239
	-33,5	322,000	3871,895	7,086	2050,239
	-36,0	342,000	3871,895	7,086	2050,239
S	-36,0	342,000	200000,000	4,456	90016,913
	-38,0	364,000	212865,497	4,449	95807,475
	-40,0	386,000	225730,994	4,442	101598,037
	-42,0	408,000	238596,491	4,437	107388,598
Στρώμα	Στάθμη z(m)	A (m <sup>2</sup> )	$K_h$ (kN/m)	$K_h'$ (kN/m)	L/L <sub>o</sub>
SM	-3,0	1,425	2550,479	2550,479	6,571
	-4,5	2,850	7651,438	7651,438	6,571
	-6,0	1,425	5100,958	9970,276	6,571
CL	-6,0	2,375	4869,318	9738,635	5,503
	-8,5	4,750	9738,635	9738,635	5,503
	-11,0	4,750	9738,635	9738,635	5,503
	-13,5	4,750	9738,635	9738,635	5,503
	-16,0	4,750	9738,635	9738,635	5,503
	-18,5	4,750	9738,635	9738,635	5,503
	-21,0	4,750	9738,635	9738,635	5,503
	-23,5	4,750	9738,635	9738,635	5,503
	-26,0	4,750	9738,635	9738,635	5,503
	-28,5	4,750	9738,635	9738,635	5,503
	-31,0	4,750	9738,635	9738,635	5,503
	-33,5	4,750	9738,635	9738,635	5,503
	-36,0	2,375	4869,318	175901,453	5,503
S	-36,0	1,900	171032,135	364068,405	8,752
	-38,0	3,800	364068,405	364068,405	8,766
	-40,0	3,800	386072,540	386072,540	8,779
	-42,0	1,900	204038,337	204038,337	8,791

Υπολογισμός ελατηριακών σταθερών.

Από την ανάλυση του συστήματος των πασσάλων για τους στατικούς και σεισμικούς συνδυασμούς φόρτισης προέκυψαν οι ακόλουθες τιμές καμπτικών ροπών σε κάθε στάθμη. Η περιβάλλουσα των καμπτικών ροπών ταυτίζεται με το διάγραμμα ροπών του σεισμικού συνδυασμού II, ο οποίος δίνει και τη μέγιστη αξονική θλιπτική καταπόνηση πασσάλου με θλιπτικό φορτίο στην κεφαλή:

$$N = -8189,583 \text{ kN.}$$

Ως προς την εφελκυστική καταπόνηση των πασσάλων, ο σεισμικός συνδυασμός II δίνει το μέγιστο εφελκυστικό φορτίο στην κεφαλή:

$$N = 356,25 \text{ kN}$$

Περιβάλλουσα καμπτικών ροπών					
Στάθμη z(m)	Φορτία λειτουργίας		Σεισμικά φορτία		M <sub>max</sub> (kNm)
	I	II	I	II	
-3,0	572,240	184,635	3145,072	3578,758	3578,758
-4,5	417,872	134,827	2296,656	2613,351	2613,351
-6,0	289,811	93,508	1592,821	1812,461	1812,461
-8,5	130,831	42,213	719,058	818,212	818,212
-11,0	18,513	5,973	101,748	115,779	115,779
-13,5	-55,042	-17,759	-302,516	-344,231	-344,231
-16,0	-97,960	-31,607	-538,396	-612,638	-612,638
-18,5	-117,832	-38,019	-647,612	-736,914	-736,914
-21,0	-121,261	-39,125	-666,461	-758,362	-758,362
-23,5	-113,671	-36,676	-624,742	-710,890	-710,890
-26,0	-99,260	-32,027	-545,541	-620,767	-620,767
-28,5	-81,067	-26,157	-445,552	-506,991	-506,991
-31,0	-61,143	-19,728	-336,049	-382,388	-382,388
-33,5	-40,684	-13,127	-223,602	-254,435	-254,435
-36,0	-20,296	-6,549	-111,550	-126,932	-126,932
-38,0	-7,460	-2,407	-41,001	-46,655	-46,655
-40,0	-1,287	-0,415	-7,073	-8,048	-8,048
-42,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Περιβάλλουσα καμπτικών ροπών.

### 3.1 Διαστασιολόγηση σε κάμψη.

Ο ελάχιστος διαμήκης οπλισμός κάθε πασσάλου (όρια αποστάσεων μεταξύ διαμήκων ράβδων maxs=200mm, mins=100mm) για το ανώτερο τμήμα του μήκους (κρίσιμο μήκος)  $L = 6D = 6 \times 1,9 \approx 11\text{m}$  είναι:

$$A_{s,\min} = 10\% \times A_c = 0,010 \times \pi \times D^2/4 = 283,529\text{cm}^2$$

ενώ για το υπόλοιπο πάσσαλο:

$$A_{s,\min} = 5\% \times A_c = 0,005 \times \pi \times D^2/4 = 141,764\text{cm}^2$$

Από τον υπολογισμό του απαιτούμενου διαμήκη οπλισμού στην κεφαλή κάθε πασσάλου για τους ακόλουθους συνδυασμούς φόρτισης σύμφωνα με τη σχέση:

$$A_{s,απαιτ.} = \omega_{tot} \times A_c \times \frac{f_{cd}}{f_{yd}}, \text{ όπου: } \omega = f(v_{sd}, \mu_{sd}), \text{ με } v_{sd} = \frac{N_{sd}}{A_c \times f_{cd}}, \mu_{sd} = \frac{M_{sd}}{A_c \times D \times f_{cd}}$$

προκύπτουν οι ακόλουθες απαιτήσεις εντός και εκτός κρισίμου μήκους.

Διαστασιολόγηση σε κάμψη						
	M (kNm)	N (kNm)	$\mu_{sd}$	$v_{sd}$	$\omega_{tot}$	$A_{s,tot}$ (cm <sup>2</sup> )
Εντός κρισίμου	3145,072	-5475,000	0,044	-0,145	0,100	86,95
	3145,072		0,044		0,000	
	3578,758	-8189,583	0,050	-0,217	0,000	0,00
	3578,758	356,250	0,050	0,009	0,150	130,42
Εκτός κρισίμου	-666,461	-5475,000	0,009	-0,145	0,000	0,00
	-666,461		0,009		0,000	
	-758,362	-8189,583	0,011	-0,217	0,000	0,00
	-758,362	356,250	0,011	0,009	0,050	43,47
	$A_{s,min}$	$A_{s,τελ}$ (cm <sup>2</sup> )	n	Ø	s	$A_{s,τοποθ}$
Εντός κρισίμου	283,53	283,53	56	26	104	284,66
Εκτός κρισίμου	141,76	141,76	40	26	146	145,24

#### Διαστασιολόγηση σε κάμψη πασσάλων.

Κατά συνέπεια, τοποθετούνται ως ελάχιστος διαμήκης οπλισμός κάθε πασσάλου **56Ø26/104 (284,66 cm<sup>2</sup>)** εντός κρισίμου μήκους και **40Ø26/146 (125,24 cm<sup>2</sup>)** εκτός κρισίμου μήκους με επικάλυψη 6cm.

Για την περίσφιξη των πασσάλων απαιτείται ελάχιστος σπειροειδής οπλισμός **Ø10/200**.