

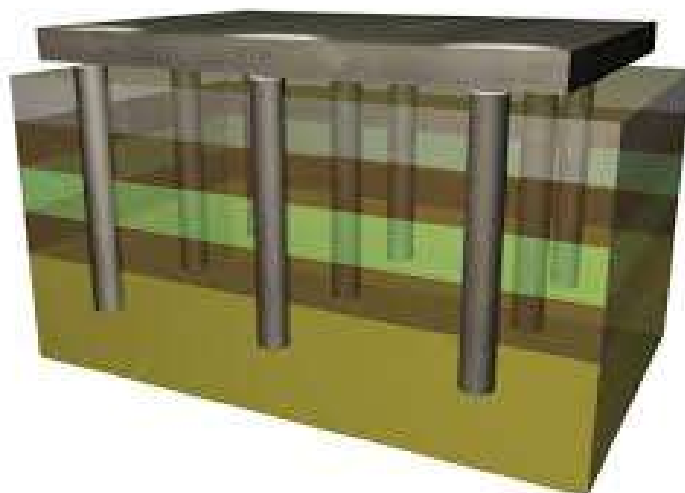
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
Τομέας Δομοστατικής  
**Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**Βελτιστοποίηση ομάδας πασσάλων**  
**σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 7**

**Αλούπης Χρήστος**

*Επιβλέπων: Νίκος Λαγαρός, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.*



Νοέμβριος 2016

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Λαγαρό για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και τη στήριξη και τη βοήθεια που μου παρείχε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με αντέχει και με στηρίζει και τους φίλους μου που με ανέχονται.



# Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή .....	5
1.1	Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας .....	5
1.2	Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	5
2.	Κανονιστικές διατάξεις πασσάλων .....	7
2.1	Βασικές αρχές.....	7
2.2	Γενικές αρχές σχεδιασμού των πασσάλων .....	9
2.3	Κανονιστικές διατάξεις από πίνακα Ελληνικών Τεχνικών Προδιαγραφών (Ε.Τε.Π.) .....	13
2.3.1	Πάσσαλοι δι' εκκαφής (ΠΕΤΕΠ 11-01-01) .....	15
2.3.2	Πάσσαλοι δι' εκτοπίσεως (ΠΕΤΕΠ 11-01-02).....	20
2.3.3	Κεφαλόδεσμος.....	26
2.4	Κανονιστικές διατάξεις από Eurocode7 (EC-7).....	27
2.5	Σύνοψη .....	32
3.	Φέρουσα ικανότητα πασσάλων .....	33
3.1	Γενικά .....	33
3.2	Φέρουσα ικανότητα έναντι αξονικής δύναμης .....	34
3.2.1	Πάσσαλοι εκτοπίσεως .....	34
3.2.2	Έγχυτοι πάσσαλοι.....	36
3.2.3	Εξόλκευση πασσάλου .....	37
3.2.4	Αρνητικές τριβές.....	38
3.3	Φέρουσα ικανότητα έναντι τέμνουσας δύναμης .....	39
3.3.1	Κοντοί – άκαμπτοι πάσσαλοι .....	39
3.3.2	Μακροί – εύκαμπτοι πάσσαλοι .....	41

3.4	Σύνοψη .....	45
4.	Χαρακτηριστικά ομάδας πασσάλων.....	47
4.1	Γενικά .....	47
4.2	Διαστασιολόγηση κεφαλόδεσμου.....	48
4.2.1	Δύσκαμπτος κεφαλόδεσμος.....	48
4.2.2	Έλεγχοι κεφαλόδεσμου .....	49
4.3	Κατανομή φορτίων ανωδομής στους πασσάλους.....	51
4.4	Αλληλεπίδραση μεταξύ πασσάλων .....	53
4.4.1	Συντελεστής αποδοτικότητας κατακόρυφων φορτίων.....	54
4.4.2	Συντελεστής αποδοτικότητας οριζόντιων φορτίων .....	58
4.5	Σύνοψη .....	62
5.	Βελτιστοποίηση ομάδας πασσάλων .....	63
5.1	Γενικά .....	63
5.2	Επιλογή βέλτιστου συνδυασμού πασσάλων .....	64
5.3	Επιλογή βέλτιστου πασσάλου ανά θέση.....	68
5.4	Σύνοψη .....	72
6.	Εφαρμογή.....	73
6.1	Περιγραφή της διαδικασίας που θα ακολουθηθεί.....	73
6.2	Εφαρμογή .....	78
7.	Συμπεράσματα.....	89
8.	Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	91

# 1

## Εισαγωγή

---

### 1.1 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας, για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού πασσάλων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε μια κατασκευή. Θεωρώντας ως δεδομένους όλους τους πιθανούς συνδυασμούς φόρτισης από την ανωδομή, καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους και σεβόμενοι τις απαιτήσεις του E.C.7 θα γίνεται η πλήρης διαστασιολόγηση του κεφαλόδεσμου και των πασσάλων για διαφορετικούς κάρναβους και η σύγκριση τους για την εύρεση της βέλτιστης λύσης.

### 1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Εν περιλήψει, οι επιμέρους εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας είναι οι ακόλουθες:

Στο **κεφάλαιο 2** πραγματοποιείται βιβλιογραφική αναδρομή στις κανονιστικές διατάξεις που προκύπτουν από τον πίνακα Ελληνικών Τεχνικών Προδιαγραφών (Ε.Τε.Π.) και από τον Ευρωκώδικα 7 (E.C. 7) και αφορούν τόσο την διαστασιολόγηση όσο και την κατασκευή των πασσάλων θεμελίωσης.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η αριθμητική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας μεμονωμένου πασσάλου καταπονούμενου από αξονική και τέμνουσα δύναμη και με βάση αυτήν η πλήρης διαστασιολόγηση του.

Στο **κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η διαδικασία μεταφοράς των φορτίων της ανωδομής μέσω δύοκαμπτου κεφαλόδεσμου στην κορυφή κάθε πασσάλου καθώς επίσης και η διαστασιολόγηση του κεφαλόδεσμου.

Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η διαδικασία εκλογής βέλτιστου πασσάλου και 3 διαφορετικές μέθοδοι βελτιστοποίησης της πασσαλο-ομάδας.

Στο **κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε 3 διαφορετικά σενάρια εδάφους και φορτίσεων ανωδομής για τις 3 διαφορετικές μεθόδους βελτιστοποίησης και η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

# 2

## Κανονιστικές διατάξεις πασσάλων

---

### 2.1 Βασικές αρχές

Οι εδαφοτεχνικές μελέτες στοχεύουν στην αποκόμιση στοιχείων για τεχνικά επαρκή και οικονομικό σχεδιασμό αλλά και εκτέλεση των κατασκευών. Ανάλογα με το είδος της κατασκευής το έδαφος πρέπει να εκτιμάται τόσο σαν έδαφος όσο και σαν δομικό υλικό(εξοκαφές). Έτσι η διάταξη των κτισμάτων πρέπει να ακολουθεί(στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό από τον πολεοδομικό κανονισμό) τα δεδομένα του εδάφους(παράκαμψη σημείων με πολύ νερό κλπ.). Η διαμόρφωση των θεμελίων εξαρτάται και από τη μορφή του κτιρίου. Εάν η ικανή να φέρει φορτία στρώση του εδάφους βρίσκεται σε μεγάλο βάθος, η θεμελίωση γίνεται σε **πασσάλους**.

Το μέσω του πασσάλου μεταβιβαζόμενο φορτίο μπορεί να μοιράζεται στο φέρον συνεκτικό ή μη έδαφος μέσω πλευρικής τριβής ή μέσω της πίεσης στον πόδα του πασσάλου ή και με τους δύο τρόπους ταυτόχρονα. Ο τρόπος της μετάδοσης του φορτίου εξαρτάται από το είδος του εδάφους θεμελίωσης και από το είδος των πασσάλων.

**Εδραζόμενοι πάσσαλοι:** Τα φορτία μεταβιβάζονται από την αιχμή του πασσάλου στο ανθεκτικό έδαφος και επιπρόσθετα λειτουργεί η πλευρική τριβή.

**Αιωρούμενοι πάσσαλοι:** Η αιχμή πασσάλου δε φτάνει στη φέρουσα στρώση του εδάφους. Οι μη ανθεκτικές σε φόρτιση στρώσεις του εδάφους ενισχύονται ταυτόχρονα με την έμπηξη των πασσάλων.

Διαχωρισμός των πασσάλων ανάλογα με την μεταβίβαση των φορτίων: **Πάσσαλοι τριβής**, οι οποίοι μεταβιβάζουν τα φορτία μέσω της πλευρικής τριβής στην περιμετρο σε στρώσεις του εδάφους. **Πάσσαλοι εδραζόμενοι** όπου το φορτίο του πασσάλου μεταβιβάζεται μέσω της πίεσης της αιχμής στο συνεκτικό ή μη έδαφος. Στην

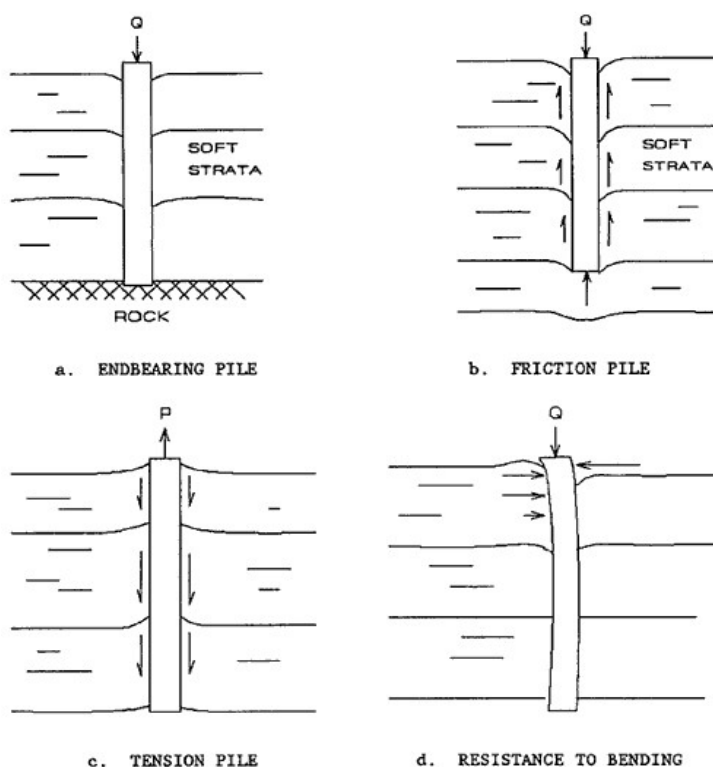


περίπτωση αυτή η πλευρική δύναμη είναι ασήμαντη. Η πίεση της αιχμής αυξάνεται σε μερικούς επιτόπια ενσφηνωμένους πασσάλους με διαπλάτυνσή τους.

Θέση των πασσάλων στο έδαφος: **Βυθισμένοι πάσσαλοι**, που βρίσκονται σε όλο τους το μήκος μέσα στο έδαφος. **Πάσσαλοι μεγάλου μεγέθους, ελεύθεροι πάσσαλοι**, που η αιχμή τους βρίσκεται στο έδαφος ενώ το πάνω τους τμήμα εξέχει με αποτέλεσμα να καταπονούνται και σε λυγισμό.

**Υλικά:** ξύλο, χάλυβας, μπετόν, οπλισμένο σκυρόδεμα και προεντεταμένο σκυρόδεμα.

Διάκριση ως προς την τοποθέτηση: **Πάσσαλοι δι' εκτοπίσεως**, εννοούνται οι πάσσαλοι οι οποίοι τοποθετούνται εντός του εδάφους με τη βοήθεια τεχνικών διείδουσης(π.χ. άσκηση επί της κεφαλής κρούσεων, δονήσεων, εξωτερικής πίεσης, περιστροφής ή συνδυασμό όλων των ανωτέρω), χωρίς την διενέργεια εκκαφής(πέραν κάποιας πιθανώς απαιτούμενης για την έναρξη της διαδικασίας της έμψηξης). Οι πάσσαλοι δι' εκτοπίσεως είναι προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία εμψηγνόμενα στο έδαφος ή δομικά στοιχεία έγχυτα επί τόπου(εντός οπής που προέκυψε από την έμψηξη κάποιου κοίλου στοιχείου-σωλήνωσης) ή συνδυασμός των ανωτέρω. Πάσσαλοι άνευ εκτοπίσεως(**δι' εκκαφής**), εννοούνται οι πάσσαλοι των οποίων η κατασκευή περιλαμβάνει αρχικά τη διάνοιξη κατάλληλης οπής εντός του



Σχήμα 2.1

- a) Εδραζόμενος θλιβόμενος πάσσαλος
- b) Ατωρόμενος θλιβόμενος πάσσαλος
- c) Εφελκούμενος πάσσαλος
- d) Πάσσαλος με οριζόντια καταπόνηση

εδάφους (με ή χωρίς την υποστήριξη των τοιχωμάτων της), και στη συνέχεια την πλήρωση της με άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα.

Διάκριση ως προς την καταπόνηση: Αξονικά καταπονούμενοι πάσσαλοι, **εφελκούμενοι** πάσσαλοι που μεταφέρουν την καταπόνηση στο έδαφος με πλευρική τριβή, πάσσαλοι καταπονούμενοι σε **θλίψη** που μεταφέρουν τα φορτία μέσω της πίεσης της αιχμής και της πλευρικής τριβής και τέλος πάσσαλοι καταπονούμενοι σε λυγισμό π.χ. **οριζόντια** καταπονούμενοι μεγάλοι πάσσαλοι.<sup>[1]</sup>

## 2.2 Γενικές αρχές σχεδιασμού των πασσάλων

Κατά τον σχεδιασμό των θεμελιώσεων δια πασσάλων θα πρέπει με κατάλληλους υπολογιστικούς ελέγχους, και κατά περίπτωση, να εξετάζονται τα ακόλουθα ενδεχόμενα, ώστε με την εφαρμογή των αντίστοιχων συντελεστών ασφαλείας και την λήψη των κατάλληλων μέτρων, συνολικώς οι θεμελιώσεις να είναι ασφαλείς και λειτουργικές.

α) Απώλεια της συνολικής ευστάθειας της κατασκευής (π.χ. θεμελιώσεις σε φυσικά ή τεχνητά πρανή)

β) Διατμητική αστοχία του εδάφους, λόγω υπέρβασης της φέρουσας ικανότητας έναντι θλιπτικής φορτίσεως, του συστήματος εδάφους-πασσάλου.

γ) Αντίστοιχη αστοχία του εδάφους, λόγω υπέρβασης της φέρουσας ικανότητας έναντι εφελκυστικής φορτίσεως (εξόλκευση)

δ) Διατμητική αστοχία του περιβάλλοντος εδάφους, λόγω οριζόντιας φόρτισης, με αστοχία κατά την παράπλευρη επιφάνεια, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον να συγκεντρώνει η ανώτερη εδαφική ζώνη.

ε) Αστοχία του πασσάλου ως δομικού στοιχείου, λόγω ορθών ή και διατμητικών τάσεων που οφείλονται σε αξονικά φορτία ή διατμητικά που δημιουργούν υψηλές καμπτικές ροπές ή τέλος λόγω λυγισμού.

στ) Συνδυασμός αστοχίας του πασσάλου και του εδάφους, με σύγχρονη καταστροφή τους.

ζ) Ανάπτυξη υπερβολικών καθιζήσεων, που δημιουργούν προβλήματα στις απαιτήσεις της άνωθεν κατασκευής.

η) Ανάπτυξη υπερβολικών ανυψώσεων, που όπως και σε ζ πρέπει να περιορίζονται στα όρια που απαιτούνται από την ανωδομή.

θ) Ανάπτυξη υπερβολικών πλευρικών μετατοπίσεων, που οφείλονται σε οριζόντια φορτία (π.χ. σεισμικά)

ι) Ανάπτυξη δονήσεων ή ταλαντώσεων κυρίως στη διεύθυνση που είναι κάθετη στην διεύθυνση των πασσάλων

Οι πιο πάνω έλεγχοι συνηθίζουν να χωρίζονται σε δύο μεγαλύτερες βασικές κατηγορίες οριακών καταστάσεων που μελετώνται χρησιμοποιώντας διαφορετικούς συντελεστές από τον Ευρωκώδικα EC - 7. Οι δύο αυτές κατηγορίες είναι οι Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας (ΟΚΑ), που περιλαμβάνουν τους ελέγχους υπέρβασης φέρουσας ικανότητας και αστοχίας είτε του εδάφους είτε του πασσάλου και οι Οριακές Καταστάσεις Λειτουργικότητας (ΟΚΛ), που περιλαμβάνουν μετατοπίσεις που ενδέχεται να αναπτυχθούν, οριζόντιες ή κατακόρυφες.

Στην παρούσα διπλωματική, επειδή εξετάζουμε ομάδες πασσάλων που συνδέονται μεταξύ τους με άκαμπτο κεφαλόδεσμο, ασχολούμαστε με τη διαστασιολόγηση με βάση τους ελέγχους σε ΟΚΑ, καθώς η πλαισιακή λειτουργία κεφαλόδεσμου-πασσάλων περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τις μετατοπίσεις που αναπτύσσονται, ειδικά στην περίπτωση που ο κεφαλόδεσμος εφάπτεται στην ανώτερη εδαφική ζώνη. Η φύση του εδάφους και η δυνατότητα του να παραμορφώνεται ανακατανέμοντας τις αναπτυσσόμενες τάσεις, μας επιτρέπει να θεωρούμε ότι ο δύσκαμπτος κεφαλόδεσμος μπορεί να δημιουργήσει τις κατάλληλες συνθήκες ώστε να λειτουργεί ως «οδηγός» που καθορίζει τις συνολικές μετατοπίσεις των πασσάλων.

Πέρα όμως από τις δύο αυτές κατηγορίες υπάρχουν και άλλοι έλεγχοι-κριτήρια, οι οποίοι καθορίζουν κυρίως τον τύπο του πασσάλου και λιγότερο τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά (μήκος, διάμετρο, οπλισμό κλπ) σε αντίθεση με τις κατηγορίες που προαναφέρθηκαν. Τα βασικά κριτήρια για την επιλογή συγκεκριμένου τύπου πασσάλου σε ένα έργο είναι:

- Η θέση, ο τύπος και οι φορτίσεις της ανωδομής
- Οι συνθήκες του υπεδάφους καθώς και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα
- Οι ειδικές επί τόπου συνθήκες (π.χ. οξείδια και άλατα προσβάλλουν τους πασσάλους που είναι κατασκευασμένοι από οπλισμένο σκυρόδεμα και πρέπει

να υπάρξει ιδιαίτερη μέριμνα στο πάχος επικάλυψης και στην ποιότητα του σκυροδέματος.

- Η διάρκεια ζωής του έργου.
- Οι δυνατότητες, το κόστος και η σπουδαιότητα της κατασκευής.

Στο σημείο αυτό θα έπρεπε επίσης να αναφερθούν περιληπτικά τα συγκριτικά πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα των διάφορων τύπων πασσάλων.

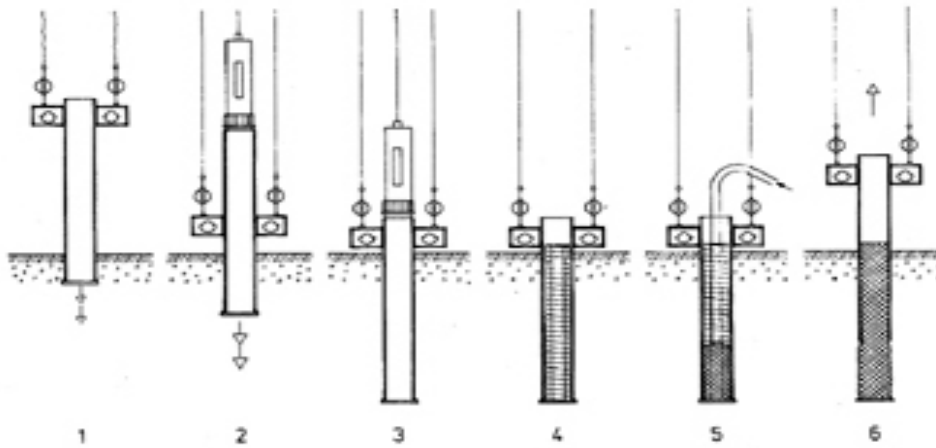
Εμπεγνυόμενοι - Προκατασκευασμένοι (Σχήμα 2.2): εμπεγνύονται σε προκαθορισμένη διάταξη, ελέγχονται πριν την έμψηξη, επανεμπεγνύονται σε περίπτωση ανυψώσεως, κατάλληλοι για θαλάσσιες κατασκευές, στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται η διατάραξη του εδάφους κατά την έμψηξη, ο κίνδυνος δομικής αστοχίας κατά την έμψηξη, ο οπλισμός εξαρτάται από τον τρόπο μεταφοράς και η έμψηξη είναι δύσκολη για μεγάλες διατομές.



Σχήμα 2.2

Διαδικασία τοποθέτησης εμπεγνυόμενου προκατασκευασμένου πασσάλου

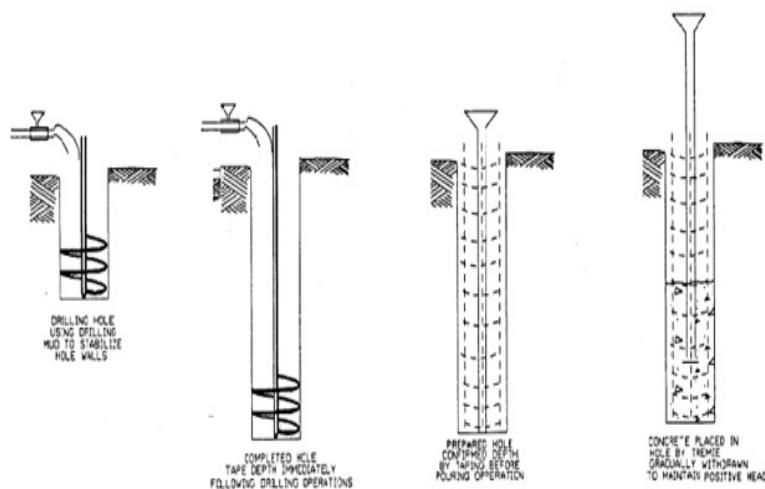
Εμπεγνυόμενοι - επί τόπου εγχυόμενοι (Σχήμα 2.3): το μήκος τους μπορεί να καθορισθεί κατά την έμψηξη, μπορούν να αποκτήσουν διευρυμένη βάση, ο οπλισμός τους καθορίζεται αποκλειστικά από τις ανάγκες σε φάση λειτουργίας, τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι η διατάραξη του περιβάλλοντος εδάφους, πιθανή ανύψωση γειτονικών πασσάλων και χρειάζεται έλεγχος της ακεραιότητάς τους.



Σχήμα 2.3

Διαδικασία τοποθέτησης εμπηγνόμενου επί τόπου εγχυόμενου πασσάλου

Πάσσαλοι εκσκαφής - επί τόπου εγχυόμενοι (Σχήμα 2.4): δεν επηρεάζουν περιβάλλον έδαφος, το μήκος τους μπορεί να προσαρμοστεί κατά την τοποθέτηση, επιτυγχάνονται μεγάλα μήκη και μεγάλες διαμέτρους, οπλίζονται για φορτίσεις από φάση λειτουργίας της κατασκευής και δεν επηρεάζουν υπάρχουσες κατασκευές, ωστόσο η διαδικασία διάτρησης μπορεί να χαλαρώσει τα μη-συνεκτικά εδάφη, εμφανίζονται δυσκολίες κατά την σκυροδέτηση κάτω από το νερό και την επίτευξη της προδιαγεγραμμένης ποιότητας του σκυροδέματος από τυχόν εισροή νερού στο σωλήνα και τέλος απαιτείται έλεγχος ακεραιότητας του πασσάλου.[2]



Σχήμα 2.4  
Διαδικασία τοποθέτησης  
πασσάλου εκσκαφής

## **2.3 Κανονιστικές διατάξεις από πίνακα Ελληνικών Τεχνικών Προδιαγραφών (Ε.Τε.Π.)**

Οι Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές όπως συντάχθηκαν το Μάιο του 2006 και αφορούν τους πασσάλους είναι οι 11(Γεωτεχνικά Έργα) - 01(Βαθιές Θεμελιώσεις) -01(Πάσσαλοι δι' εκσκαφής (Έγχυτοι πάσσαλοι) και κεφαλόδεσμοι) και 11 - 01 - 02(Πάσσαλοι δι' εκτοπίσεως (Εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι). Οι εργασίες που προδιαγράφονται στις άνωθεν ΠΙΕΤΕΠ καθορίζουν τις βασικές αρχές για την κατασκευή των πασσάλων και του κεφαλόδεσμου.

Οι ειδικές απαιτήσεις πριν και κατά τη διάρκεια κατασκευής των πασσάλων δι' εκσκαφής ή εκτοπίσεως περιλαμβάνουν:

- 1) Επαρκή στοιχεία εκ της γεωτεχνικής διερεύνησης των απαντώμενων σχηματισμών στην περιοχή κατασκευής των πασσάλων. Επισημαίνεται ότι η απαιτούμενη γεωτεχνική έρευνα θα πρέπει να εκτελείται με τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρει τις αναγκαίες πληροφορίες για τη φύση του υπεδάφους σε βάθος το οποίο να περιλαμβάνει το συνολικό προβλεπόμενο μήκος των πασσάλων, την περιοχή της στάθμης έδρασης των πασσάλων, αλλά και ικανό βάθος κάτω από αυτή, έτσι ώστε να είναι εφικτές οι ασφαλείς εκτιμήσεις της φέρουσας ικανότητάς των, αλλά και των αναμενόμενων καθιζήσεων κατά τη φάση ανάληψης φορτιών.
- 2) Γνώση των επικρατούσων συνθηκών στην περιοχή κατασκευής των πασσάλων, δηλ. έκταση και όρια της περιοχής, τοπογραφική αποτύπωση της περιοχής με αναφορά στις επικρατούσες κλίσεις και στους περιορισμούς προσβασιμότητας της.
- 3) Πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη, την ακριβή θέση και την κατάσταση παρακείμενων υφιστάμενων κατασκευών (π.χ. κτίρια, δρόμοι, δίκτυα κοινής ωφέλειας), υπογείων κατασκευών και στοιχείων θεμελίωσης, αρχαιολογικών αντικειμένων.
- 4) Πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη ρυπογόνων ουσιών εντός των γεωδλικών ή με πιθανούς κινδύνους, οι οποίοι είναι δυνατόν να επηρεάσουν την μέθοδο κατασκευής των πασσάλων, τις επιλογές ως προς την απόρριψη των υλικών εκσκαφής από την περιοχή κατασκευής των, καθώς και την ασφάλεια του προσωπικού.

- 5) Ικανοποίηση των νομικών περιορισμών και των περιβαλλοντικών περιορισμών (π.χ. μόλυνση ή περιορισμοί του υπερβολικού θορύβου, των προκαλούμενων ταλαντώσεων και της γενικότερης όχλησης στα γειτονικά κτίσματα).
- 6) Μελέτη των πασσάλων με το σύνολο των αναγκαίων υπολογισμών και των σχετικών απαραίτητων κατασκευαστικών σχεδίων.
- 7) Περιγραφή της μεθοδολογίας εκτέλεσης των εργασιών κατασκευής με σαφή και λεπτομερή αναφορά: (α) στον κατάλογο των μηχανημάτων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, (β) στη σύνθεση του τεχνικού προσωπικού, με ορισμό του επικεφαλής, ο οποίος θα πρέπει να είναι εργοδηγός βεβαιωμένης πείρας σε εργασίες πασσάλων, καθώς και του αντικαταστάτη αυτού, ο οποίος θα πρέπει να έχει τα ίδια προσόντα και (γ) στο πρόγραμμα διαδοχής και χρονικής διάρκειας εκοκαφής και σκυροδέτησης των πασσάλων, κατά τρόπον που να αποφεύγεται η βλάβη γειτονικών (ήδη κατασκευασθέντων) πασσάλων .
- 8) Πληροφορίες σχετικά με παράλληλες δραστηριότητες οι οποίες είναι δυνατόν να επηρεάσουν τις εργασίες κατασκευής των πασσάλων (π.χ. αποστραγγίσεις, υπόγειες εκοκαφές, ανοικτές εκοκαφές).
- 9) Απαιτήσεις σχετικά με την επίβλεψη, καταγραφή και τον ποιοτικό έλεγχο των εργασιών κατασκευής των πασσάλων (π.χ. έλεγχος συνεχείας της σκυροδέτησης των κατασκευασμένων πασσάλων). Ειδικότερα επισημαίνεται ότι για κάθε κατασκευαζόμενο πάσσαλο πρέπει να τηρείται λεπτομερές μητρώο με όλα τα σχετικά στοιχεία του πασσάλου, το οποίο θα θεωρείται ουσιώδες επιμετρητικό στοιχείο κατά την πιστοποίηση των εργασιών πασσάλων.
- 10) Απαιτήσεις ικανοποιητικής στεγάνωσης των κατασκευαστικών αρμών των πασσαλοτοιχιών.
- 11) Καθορισμό της θέσης των πλέον αξιόπιστων γραμμών (σύμφωνα με τη Μελέτη) για την εξάρτηση της χάραξης των αξόνων των πασσάλων. Επισημαίνεται ότι για πασσάλους γεφυρών η χάραξη των πασσάλων συνήθως εξαρτάται από τον άξονα χάραξης της οδού, ενώ για οικοδομικά έργα η χάραξη των πασσάλων συνήθως εξαρτάται από τις οικοδομικές - ρυμοτομικές γραμμές.
- 12) Πραγματική θέση του κέντρου του πασσάλου μετά την κατασκευή και την αποκοπή να μην διαφέρει από το θεωρητικό κέντρο περισσότερο από 75 mm σε κάθε

κατεύθυνση, ενώ η διάμετρος των πασσάλων δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από την προδιαγραφόμενη στη Μελέτη

13) Μη βίαη και εκ των υστέρων επιδιόρθωση κατασκευασμένων πασσάλων.<sup>[3] [4]</sup>

### **2.3.1 Πάσσαλοι δι' εκσκαφής (ΠΕΤΕΠ 11-01-01)**

Οι πάσσαλοι, οι οποίοι αποτελούν το αντικείμενο της συγκεκριμένης ΠΕΤΕΠ είναι δυνατόν να εκσκαφθούν με συνεχείς μεθόδους, ή κατά φάσεις, εφόσον εξαιτίας των γεωτεχνικών συνθηκών απαιτηθεί η εφαρμογή τεχνικών υποστήριξης των τοιχωμάτων του κατακόρυφου φρέατος. Η διάμετρος της κυκλικής διατομής πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των 30 εκατοστών και των 3 μέτρων.

Τα υλικά τα οποία ενσωματώνονται στους πασσάλους δι' εκσκαφής περιγράφονται στις αμέσως επόμενες παραγράφους. Επισημαίνεται ότι τα υλικά αυτά θα πρέπει να ικανοποιούν τα αντίστοιχα ευρωπαϊκά πρότυπα και τις απαιτήσεις που απορρέουν από τα αναφερόμενα στην παρούσα ΠΕΤΕΠ. Κάθε πρόθεση για αλλαγή των αρχικώς εγκεκριμένων πηγών τροφοδοσίας των ενσωματούμενων υλικών θα πρέπει να δηλώνεται εγκαίρως και να αιτιολογείται καταλλήλως. Υλικά τα οποία έχουν απορριφθεί μετά τη διενέργεια των σχετικών ελέγχων καταλληλότητας θα πρέπει να απομακρύνονται από την περιοχή των εργασιών.

1) Τοιμέντο: Οι δυνάμενοι να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή των πασσάλων τύποι τοιμέντου ορίζονται στο EN 197-1:2000, 5.1 και είναι: CEM I, CEM II/A-S και II/B-S, CEM II/A-D, CEM II/AV και II/B-V, CEM III/A, III/B και III/C. Ο εκάστοτε χρησιμοποιούμενος τύπος τοιμέντου θα προσδιορισθεί από την μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος βάσει αιτιολογημένης πρότασης.

2) Αδρανή: Τα αδρανή πρέπει να είναι σύμφωνα με τα EN 12620:2002 και EN 204:2001, 4.2. Ο μέγιστος κόκκος των χρησιμοποιούμενων αδρανών δεν θα πρέπει να έχει διάμετρο μεγαλύτερη από τριάντα δύο (32) mm. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στρογγυλεμένα αδρανή (όχι θραυστά), που να τηρούν όμως τις υπόλοιπες ιδιότητες των αδρανών των EN 12620:2002 και EN 204:2001, 4.2, σύμφωνα με την αιτιολογημένη πρόταση της μελέτης σύνθεσης του σκυροδέματος.



3) Ύδωρ: Οι ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου ύδατος πρέπει να είναι σύμφωνες με όσα σχετικώς αναφέρονται στο EN 1008:2002 και EN 206-1:2000, 4.3. Η ψύξη του νερού είναι δυνατή για την μείωση της θερμοκρασίας του «νεαρού» σκυροδέματος σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος.

4) Πρόσθετα και Πρόσμικτα: Τα πρόσθετα και πρόσμικτα πρέπει να είναι σύμφωνα με το EN 206- 1:2000, 4.4 και 4.5 και εφόσον απαιτηθεί η χρήση τους, αυτά θα προσδιορισθούν από τη μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος των πασσάλων. Επισημαίνεται ότι η χρησιμοποίηση ακατάλληλων πρόσθετων και πρόσμικτων είναι δυνατόν να προκαλέσει ζημιές.

5) Σκυρόδεμα: Το σκυρόδεμα κατασκευής των πασσάλων θα είναι κατηγορίας χαρακτηριστικής αντοχής μεταξύ C20/25 και C30/37, εκτός εάν άλλως προδιαγράφεται. Ειδικότερα για τους κεφαλόδεσμούς πασσάλων, αλλά και για τους οπλισμένους πασσάλους πασσαλοτοιχίας αλληλοτεμνόμενων πασσάλων είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σκυρόδεμα κατηγορίας μικρότερης χαρακτηριστικής αντοχής από την προαναφερόμενη, αναλόγως των απαιτήσεων της Μελέτης.

6) Διατρητικό υγρό: Για την εξασφάλιση της ευστάθειας των τοιχωμάτων της οπής του πασσάλου είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σαν διατρητικό υγρό αιώρημα μπεντονίτη (BENTONITE). Γενικώς η προετοιμασία, η διατήρηση και ο έλεγχος των διατρητικών υγρών αιωρημάτων μπεντονίτη πρέπει να ακολουθούν τα σχετικώς αναφερόμενα στο EN 1538:2000. Ο μπεντονίτης που θα προσκομισθεί στο εργοτάξιο και πριν να αναμιχθεί με νερό θα είναι σύμφωνος με την προδιαγραφή DFCP 4 του Συνδέσμου Υλικών Εταιρειών Πετρελαιοειδών (OIL COMPANIES MATERIALS ASSOCIATION). Η προσκόμιση στο εργοτάξιο της σκόνης μπεντονίτου πρέπει απαραίτητως να συνδυάζεται και με την προσκόμιση πιστοποιητικού ποιότητας από τον προμηθευτή του, το οποίο να δείχνει τις ιδιότητες κάθε παραλαμβανόμενης ποσότητας μπεντονίτη στο εργοτάξιο. Τα παραπάνω πιστοποιητικά ποιότητας θα κατατίθενται στην Υπηρεσία. Οι ιδιότητες που θα αναφέρονται στο πιστοποιητικό ποιότητας του προμηθευτή είναι το εύρος διακόμενου φαινομένου ιξώδους και το εύρος διακόμενου της αντοχής πήγματος (GEL STRENGTH) για σωματίδια στο ύδωρ.

7) Σιδηροί οπλισμοί: Οι σιδηροί οπλισμοί των πασσάλων (δηλ. μεταλλικές ράβδοι, μεταλλικά πλέγματα, σιδηροσωλήνες) πρέπει να ακολουθούν τα καθοριζόμενα στα

prENV 10081-4:2002, EN 10210- 1:1994 και EN 10025-1:2004. Η ποιότητα των σιδηρών οπλισμών θα είναι αυτή που καθορίζεται στη Μελέτη, η δε επιλογή της θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη δυνατότητα κατασκευής του κλωβού. Σε περιπτώσεις χρησιμοποίησης διατρητικών υγρών για την εξασφάλιση της ευστάθειας της οπής των πασσάλων, οι μεταλλικοί σωλήνες για τη διενέργεια των δοκιμών θα πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από μη γαλβανισμένο σίδηρο εξαιτίας κυρίως του κινδύνου ηλεκτροχημικής διάβρωσης των οπλισμών.

### Οπλισμός πασσάλου

Οι σιδηροί οπλισμοί των πασσάλων πρέπει να είναι της κατηγορίας χάλυβος, διαμέτρων, διαστάσεων και μορφής όπως ορίζονται στην Μελέτη. Εκτός εάν προδιαγράφεται διαφορετικά στη Μελέτη οι ελάχιστες ποσότητες διαμήκους σιδηρού οπλισμού των πασσάλων (όπου αυτός απαιτείται) δίνονται αναλυτικά στον πίνακα 2.1. Επισημαίνεται ότι ο ελάχιστος διαμήκης οπλισμός θα συνίσταται από τέσσερις (4) ράβδους Φ12.

Επιφάνεια διατομής πασσάλου: $A_c$	Επιφάνεια διαμήκους οπλισμού: $A_s$
$A_c \leq 0.5 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0.5\% A_c$
$0.5 \text{ m}^2 \leq A_c \leq 1.0 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0.0025 \text{ m}^2$
$A_c > 1.0 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0.25\% A_c$

Πίνακας 2.1 Ελάχιστες ποσότητες διαμήκους οπλισμού πασσάλων

Είναι ουσιαστικής σημασίας η διατήρηση κάποιας μέγιστης και ελάχιστης απόστασης μεταξύ των ράβδων του διαμήκους οπλισμού των πασσάλων για να μπορεί το σκυρόδεμα που εκχύνεται να καλύψει πλήρως τον κλωβό οπλισμό και να έλθει σε πλήρη επαφή με τις εδαφικές παρειές της οπής. Έτσι το μέγιστο κενό μεταξύ των διαμήκων ράβδων είναι 40 cm, ενώ το ελάχιστο είναι 10 cm. Για την περίπτωση όπου ο μέγιστος κόκκος αδρανών σκυροδέματος είναι 2 cm, το ελάχιστο κενό είναι δυνατόν να μειωθεί στα 8 cm. Η τοποθέτηση ομόκεντρων στρώσεων διαμήκους οπλισμού θα πρέπει να αποφεύγεται όπου αυτό είναι δυνατόν. Ωστόσο στην περίπτωση χρήσης τέτοιων στρώσεων επισημαίνονται τα εξής: 1) μέγιστος αριθμός τους είναι 2. 2) Οι ράβδοι των στρώσεων θα πρέπει να τοποθετούνται ακτινικά η μία πίσω από την άλλη. 3) Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των στρώσεων θα είναι η μέγιστη εκ των παρακάτω τιμών: το διπλάσιο της διαμέτρου της χρησιμοποιούμενης ράβδου οπλισμού ή 1.5 φορά του χρησιμοποιούμενου μεγίστου κόκκου αδρανών σκυροδέματος.

Ο σχεδιασμός των εγκαρσίων οπλισμών θα γίνεται σύμφωνα με τα προδιαγραφόμενα στο EN 1992-1-1:2004. Οι διαμέτροι αυτών των οπλισμών θα πρέπει να είναι  $\geq 6$  mm και  $\geq \frac{1}{4}$  της διαμέτρου της διαμήκου ράβδου οπλισμού. Όσον αφορά την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των στοιχείων εγκαρσίου οπλισμού αυτή δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από τις αποστάσεις που δίνονται προηγουμένως για τον κύριο οπλισμό.

Οι οπλισμοί των πασσάλων πρέπει να φυλάσσονται σε τέτοιες συνθήκες, έτσι ώστε κατά τη διαδικασία τοποθέτησης των να είναι καθαροί και χωρίς την επιφανειακή χαλαρή σκωρίωση. Ο κλωβός του οπλισμού, προκατασκευασμένος σε όλο το μήκος, τοποθετείται αμέσως μετά το τέλος της εκσκαφής. Οι σιδηροί οπλισμοί των πασσάλων πρέπει να εξέλθουν πάνω από την οριστική στάθμη των κεφαλών των πασσάλων (μετά την αποκοπή της κεφαλής) τουλάχιστον κατά το μήκος πρόσφυσης των οπλισμών, για την αγκύρωση του κάθε πασσάλου μέσα στον κεφαλόδεσμο. Το πάχος επικάλυψης των οπλισμών με σκυρόδεμα θα πρέπει να είναι σύμφωνο με τα προδιαγραφόμενα στο EN 1992-1-1:2004 και δεν πρέπει να είναι μικρότερο από: 1) 6 cm, για πασσάλους διαμέτρου  $D > 0.6$  m 2) 5 cm, για πασσάλους διαμέτρου  $D \leq 0.6$  m εκτός εάν άλλως έχει συμφωνηθεί. Ωστόσο, το ελάχιστο πάχος επικάλυψης των οπλισμών με σκυρόδεμα είναι δυνατόν να αυξηθεί σε 7.5 εκ. στις ακόλουθες περιπτώσεις: 1) Τοποθέτηση πασσάλου εντός μαλακού εδαφικού σχηματισμού, όπου η οπή έχει διανοιχτεί χωρίς τη χρήση σωλήνωσης. 2) Σκυροδέτηση κάτω από το νερό με μέγιστο κόκκο αδρανών 3.2 cm. 3) Η τοποθέτηση του οπλισμού γίνεται μετά την σκυροδέτηση. 4) Οι επιφάνειες των τοιχωμάτων της οπής είναι ανώμαλες.

### **Σκυροδέτηση πασσάλων**

Η σκυροδέτηση του πασσάλου πρέπει να αρχίζει το συντομότερο δυνατό μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής και την τοποθέτηση του οπλισμού. Πριν την έναρξη της σκυροδέτησης θα ελέγχεται η καθαριότητα της διανοιχθείσης οπής. Η σκυροδέτηση του πασσάλου πρέπει να γίνεται χωρίς διακοπή με μία συνεχή διάστρωση, απαγορευόμενων των αρμών διακοπής. Σε περίπτωση κατ' εξαίρεση μικρής διακοπής της διάστρωσης πρέπει να χρησιμοποιούνται επιβραδυντικά πήξης για να αποφεύγονται βλαπτικές επιδράσεις. Απαγορεύεται η έναρξη της σκυροδέτησης, αν για οποιονδήποτε λόγο είναι αμφίβολη η ολοκλήρωσή της, εκτός αν υπάρχει σαφής εντολή της Υπηρεσίας. Για τον ίδιο λόγο η Υπηρεσία είναι δυνατόν να απαγορεύσει ρυθμό διατρήσεων ταχύτερο από εκείνο της σκυροδέτησης. Σε κάθε περίπτωση,

δηλαδή εν ξηρώ ή κάτω από το ύδωρ, ο Ανάδοχος πρέπει να υποβάλει προς έγκριση από την Υπηρεσία λεπτομερή περιγραφή του τρόπου σκυροδέτησης. (βλέπε παράγραφο 4). Κατά την διάστρωση του σκυροδέματος πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η προβλεπόμενη σύνθεση με το προβλεπόμενο εργάσιμο φτάνει μέχρι τον πυθμένα της διάστρωσης, ότι δεν δημιουργείται απόμιξη ή ρύπανση του σκυροδέματος και ότι η στήλη του σκυροδέματος δεν διακόπτεται και δεν υπάρχουν στενώσεις. Γι' αυτόν τον λόγο πρέπει, ακόμα και σε διατρήσεις εν ξηρώ, να χρησιμοποιηθεί σωλήνας διάστρωσης ή σωλήνας αντλίας που να φτάνει, κατά την έναρξη της διάστρωσης, στον πυθμένα της διάτρησης.

Η σκυροδέτηση θα συνεχίζεται και πάνω από την οριστική κεφαλή των πασσάλων σε μήκος τουλάχιστον 0,30 m έως 0,60 m, (δεδομένου ότι η τελευταία ποσότητα του σκυροδέματος παραμένει ουσιαστικά ασυμπύκνωτη, ανομοιόμορφη και ελαττωματική από κάθε άποψη), για συσσώρευση του ακαταλλήλου σκυροδέματος που μελλοντικά θα καθαιρεθεί. Στην περίπτωση κατά την οποία η οριστική στάθμη της κεφαλής των πασσάλων, όπως ορίζεται στην μελέτη, βρεθεί κάτω από την επιφάνεια του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, τότε ο Ανάδοχος είναι υποχρεωμένος να υποβάλει στην Υπηρεσία προτάσεις επίλυσης του θέματος πριν από την έναρξη της σκυροδέτησης. Η σκυροδέτηση του πασσάλου θα προχωρήσει μέχρι στάθμης τέτοιας, ώστε το απομένον τμήμα μετά την αποκοπή του άνω τμήματος της κεφαλής να βρίσκεται πάνω από την στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, εκτός αν έχουν παρθεί από τον Ανάδοχο και έχουν εγκριθεί από την Υπηρεσία, κατάλληλα μέτρα.

Η ανέλκυση της προσωρινής σωλήνωσης προστασίας θα γίνεται σταδιακά και κατά την περίοδο που το σκυρόδεμα είναι αρκετά εργάσιμο για την αποφυγή παράσυρσης και σκυροδέματος κατά την ανέλκυση. Επίσης η ανέλκυση θα πρέπει να γίνεται βραδέως, ομοιόμορφα και με την πρέπει προσοχή ώστε να μην σχηματίζονται καθ' οιονδήποτε τρόπο κενά στην μάζα του σκυροδέματος, σπάσιμο της στήλης του σκυροδέματος ή στενώσεις της διατομής του πασσάλου. Κατά την διάρκεια της ανέλκυσης πρέπει να παραμείνει αρκετή ποσότητα σκυροδέματος μέσα στον σωλήνα (τουλάχιστον 1 m) ώστε να υπερνικάται η πίεση από το έδαφος, το υπόγειο ύδωρ ή και το διατρητικό αιώρημα και έτσι να αποφεύγεται η δημιουργία λαϊμού στην διατομή του σκυροδέματος και ανάμιξη του σκυροδέματος με λάσπη ή άλλο εδαφικό υλικό. [3]

### 2.3.2 Πάσσαλοι δι' εκτοπίσεως (ΠΕΤΕΠ 11-01-02)

Οι εργασίες που προδιαγράφονται στην παρούσα ΠΕΤΕΠ καθορίζουν τις βασικές αρχές για την κατασκευή πασσάλων δι' εκτοπίσεως εδαφικού υλικού (εμπηγνύμενοι πάσσαλοι). Με τον όρο πάσσαλοι δι' εκτοπίσεως (εμπηγνύμενοι πάσσαλοι) εννοούνται οι πάσσαλοι, οι οποίοι τοποθετούνται εντός του εδάφους με τη βοήθεια τεχνικών διεϊσδυσης (π.χ. άσκηση επί της κεφαλής κρούσεων, δονήσεων, εξωτερικής πίεσης, περιστροφής ή συνδυασμό όλων των ανωτέρω), χωρίς την διενέργεια εκκαφής (πέραν κάποιας πιθανώς απαιτούμενης για την έναρξη της διαδικασίας έμψηξης). Οι πάσσαλοι δι' εκτοπίσεως είναι προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία εμπηγνύμενα στο έδαφος ή δομικά στοιχεία έγχυτα επιτόπου (εντός οπής που προέκυψε από την έμψηξη κάποιου κοίλου στοιχείου - σωλήνωσης) ή συνδυασμός των ανωτέρω.

Τα υλικά τα οποία ενσωματώνονται στους πασσάλους δι' εκτοπίσεως περιγράφονται στις αμέσως επόμενες παραγράφους. Επισημαίνεται ότι τα υλικά αυτά θα πρέπει να ικανοποιούν τα αντίστοιχα ευρωπαϊκά πρότυπα και τις απαιτήσεις που απορρέουν από τα αναφερόμενα στην παρούσα ΠΕΤΕΠ. Κάθε πρόθεση για αλλαγή των αρχικώς εγκεκριμένων πηγών τροφοδοσίας των ενσωματωμένων υλικών θα πρέπει να δηλώνεται εγκαίρως και να αιτιολογείται καταλλήλως. Υλικά τα οποία έχουν απορριφθεί μετά τη διενέργεια των σχετικών ελέγχων καταλληλότητας θα πρέπει να απομακρύνονται από την περιοχή των εργασιών.

#### 1. Προκατασκευασμένοι Πάσσαλοι δι' εκτοπίσεως

α) Πάσσαλοι εκ σκυροδέματος Τα υλικά και η μέθοδος κατασκευής των πασσάλων εκ σκυροδέματος (συμπεριλαμβανομένων και των αρμών) θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του prEN 12724.

β) Μεταλλικοί πάσσαλοι Τα υλικά και η μέθοδος κατασκευής των μεταλλικών πασσάλων θα πρέπει κατ' ελάχιστον να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του prEN 1993-5. Επαναχρησιμοποιούμενοι πάσσαλοι θα πρέπει αφενός να ικανοποιούν τις απαιτήσεις και τα κριτήρια της Μελέτης όσον αφορά τον τύπο, τις ανοχές, και την ποιότητα χάλυβα, κι αφετέρου να μην παρουσιάζουν ζημιές και ενδείξεις οξείδωσης (σκουριάς), οι οποίες είναι δυνατόν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά της μηχανικής τους αντοχής.

2. Επιτόπου έγχυτοι Πάσσαλοι δι' εκτοπίσεως Τα ενσωματωμένα υλικά των επιτόπου εγχύτων πασσάλων πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της ΠΕΤΕΠ: 11-01-01-00:Ε1/2004: «Πάσσαλοι δι' εκτοπίσεως (Έγχυτοι πάσσαλοι) και Κεφαλόδεσμοι». Ειδικότερα για το σκυρόδεμα κατασκευής των πασσάλων αυτό θα είναι κατηγορίας ελάχιστης χαρακτηριστικής αντοχής C25/30, η δε περιεκτικότητά του σε τσιμέντο δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 350 kg/m<sup>3</sup> σκυροδέματος.

3. Ένεμα Οι διαδικασίες προετοιμασίας (π.χ. σύνθεση) και εφαρμογής των ενεμάτων (π.χ. ενεμάτωση των εξωτερικών παρειών ή της βάσης των προκατασκευασμένων πασσάλων κλπ.) στις εργασίες κατασκευής πασσάλων δι' εκτοπίσεως θα εκτελούνται λαμβάνοντας υπόψη τις εδαφικές συνθήκες και με σύμφωνη γνώμη της Υπηρεσίας. Η χρησιμοποιούμενη αναλογία νερού/τσιμέντου (W/C) θα καθορίζεται με βάση τις επικρατούσες γεωτεχνικές συνθήκες. Ως τυπικό εύρος τιμών της αναλογίας νερού/τσιμέντου προτείνεται ενδεικτικά: W/C = 0.40 - 0.55. Δεν αποκλείεται η χρήση πρόσμικτων με σκοπό τη διευκόλυνση της αντλησιμότητας των ενεμάτων.

4. Μανδύες, Υλικά αντιδιαβρωτικής προστασίας Οι μανδύες απομείωσης των παράπλευρων τριβών θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις της παρούσης ΠΕΤΕΠ. Τα υλικά αντιδιαβρωτικής προστασίας πρέπει να ικανοποιούν τις σχετικές απαιτήσεις της Μελέτης και θα εφαρμόζονται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.

Πριν την έναρξη των εργασιών κατασκευής των πασσάλων θα πρέπει να υπάρχει εγκεκριμένη περιγραφή της μεθοδολογίας που θα περιλαμβάνει πλήρη, σαφή και λεπτομερή αναφορά : α) στον κατάλογο των μηχανημάτων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, β) στη σύνθεση του τεχνικού προσωπικού, με ορισμό του επικεφαλής, ο οποίος θα πρέπει να είναι εργοδηγός βεβαιωμένης πείρας σε εργασίες πασσάλων, καθώς και του αντικαταστάτη αυτού, ο οποίος θα πρέπει να έχει τα ίδια προσόντα και γ) στο πρόγραμμα διαδοχής και χρονικής διάρκειας των εργασιών. Η χρονική αλληλουχία των επιμέρους εργασιών κατά τη διεύθυνση των πασσάλων εντός του εδάφους πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα παρακάτω:

- Την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων από τις όποιες πιθανές να πραγματοποιηθούν κατακόρυφες ή πλευρικές μετακινήσεις των πασσάλων (π.χ. απομείωση της φέρουσας ικανότητας ήδη τοποθετημένων πασσάλων). Επισημαίνεται ότι στις περιπτώσεις όπου οι πάσσαλοι έχουν μετακινηθεί σε σημαντικό βαθμό από

την αρχικώς προβλεπόμενη θέση τους, θα πρέπει να γίνεται επανεκτίμηση της συνολικής τους λειτουργίας ως φερόντων στοιχείων.

- Την απαίτηση το έδαφος στην περιοχή ενός τοποθετημένου πασσάλου να μην έχει τέτοιο βαθμό συμπίκνωσης, έτσι ώστε η διείσδυση των υπολοίπων πασσάλων να μην είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί επιτυχώς.
- Την ελαχιστοποίηση της επίδρασης των δονήσεων κατά τη φάση διείσδυσης των πασσάλων επί των πλησιέστερων πασσάλων, οι οποίοι έχουν πρόσφατα σκυροδετηθεί και το σκυρόδεμά τους είναι ακόμα εργάσιμο.

Στις περιπτώσεις όπου είναι δυνατή η εκτέλεση δοκιμαστικών διεισδύσεων (προκαταρκτικοί πάσσαλοι) οι θέσεις των πασσάλων αυτών πρέπει να βρίσκονται πλησίον των θέσεων των υφιστάμενων γεωτρήσεων, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, σχετικά με την καταλληλότητα του επιλεγέντος τύπου πασσάλου ή/ και την επιβεβαίωση της επάρκειας του γενικού σχεδιασμού του, δηλαδή των διαστάσεων και της φέρουσας ικανότητας. Κατά τη διάρκεια κατασκευής των πασσάλων θα πρέπει να λαμβάνονται όλα τα αναγκαία μέτρα για την εξασφάλιση του ελάχιστου δυνατού κινδύνου εκδήλωσης βλαβών σε γειτονικές κατασκευές από τις δημιουργούμενες δονήσεις.

### **Εξοπλισμός**

Για την εκτέλεση των εργασιών κατασκευής διαφραγματικών τοίχων είναι απαραίτητος ο παρακάτω εξοπλισμός (κατά περίπτωση, αναλόγως του τύπου του πασσάλου), ο οποίος θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του EN 996:1995:

**1. Κρουστική σφύρα:** Πάσσαλοι και σωληνώσεις προωθούνται εντός του εδάφους μέχρι το προκαθορισμένο βάθος με τη χρήση κατάλληλης σφύρας και με περιορισμό των περιβαλλοντικών οχλήσεων και χωρίς την πρόκληση βλαβών. Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της επιβαλλόμενης κρούσεως (δηλ. ταχύτητα κρούσης, βάρος σφύρας, ενέργεια κρούσης κλπ.) έτσι ώστε να μην δημιουργούνται συνθήκες υπερφόρτισης των πασσάλων αποτελεί αντικείμενο της Μελέτης. Για κάθε τύπο πασσάλου τα όρια της επιβαλλόμενης κρουστικής ενέργειας καθορίζονται επί τη βάση των επιτρεπόμενων τιμών των τάσεων, οι οποίες είναι δυνατόν να αναπτυχθούν σε όλο το μήκος του πασσάλου κατά τη διαδικασία εμπήξεώς τους. Οι επιτρεπόμενες τιμές των τάσεων για κάθε τύπο πασσάλου καθορίζονται ως εξής:

α) Προκατασκευασμένοι πάσσαλοι από σκυρόδεμα: Επιτρεπόμενη τάση σε θλίψη =  $0.8 \times$  χαρακτηριστική τιμή της αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος τη στιγμή της έμπηξης.

β) Μεταλλικοί πάσσαλοι: Επιτρεπόμενη τάση =  $0.9 \times$  χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής του χάλυβα κατασκευής.

**2. Δονητική σφύρα:** Εναλλακτικά η προώθηση πασσάλων και σωληνώσεων εντός του εδάφους έως του προκαθορισμένου βάθους είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τη χρήση δονητικής σφύρας και με περιορισμό των περιβαλλοντικών οχλήσεων και χωρίς την πρόκληση βλαβών. Η δονητική σφύρα θα πρέπει να τοποθετείται κεντρικώς επί της σωληνώσεως ή της κεφαλή του πασσάλου. Η επιλογή των χαρακτηριστικών της επιβαλλόμενης δόνησης (δηλ. συχνότητα, εύρος μετατόπισης κλπ.) θα γίνεται αναλόγως των χαρακτηριστικών του πασσάλου και των εδαφικών ιδιοτήτων. Είναι δυνατή η συνδυασμένη χρήση δονητικής σφύρας και κρουστικής σφύρας, κατά τρόπον ώστε η αρχική τοποθέτηση των πασσάλων να πραγματοποιείται με εφαρμογή δονήσεων, ενώ η έμπηξη τους, στη συνέχεια, να γίνεται με την άσκηση κρούσης.

**3. Εξοπλισμός εμπηγνόμενων πασσάλων δια περιστροφής:** Η επιλογή της επιβαλλόμενης στρέψης και πίεσης θα βασίζεται στην αναγκαιότητα οι πάσσαλοι να εισχωρήσουν εντός του εδάφους έως του προκαθορισμένου βάθους χωρίς να προκληθεί σημαντική εδαφική διατάραξη.

**4. Εξοπλισμός εμπηγνόμενων πασσάλων με τη βοήθεια γρύλλων:** Οι επιλογές που αφορούν την επιβαλλόμενη πίεση, αλλά και το σύστημα άσκησης της (δηλ. τύπος γρύλλου) πρέπει να βασίζονται στην απαίτηση εισχώρησης των πασσάλων εντός του εδάφους έως του προκαθορισμένου βάθους, χωρίς την πρόκληση ζημιών σε αυτούς και στο γρύλλο.

**5. Σωλήνας διεισδύσεως:** Ο σωλήνας διεισδύσεως θα είναι ομοιόμορφης διαμέτρου σε όλο το μήκος του, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ορθή κατασκευή του πασσάλου.

### **Οπλισμοί πασσάλων**

Οι χαλύβδινοι οπλισμοί των πασσάλων πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της μελέτης ως προς την κατηγορία χάλυβος, διάμετρο, διαστάσεις και μορφή. Ο κλωβός



του οπλισμού θα μορφώνεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη αντοχή του κατά τη διάρκεια λειτουργίας, αλλά και να είναι επαρκώς ισχυρός ώστε να μην παραμορφώνεται κατά τη μεταφορά και τοποθέτηση του. Επιπλέον θα πρέπει να στηρίζεται με κατάλληλα στηρίγματα για την διατήρηση της σωστής θέσης τους κατά την σκυροδέτηση. Η ποιότητα των αναγκαίων συγκολλήσεων για την κατασκευή των κλωβών οπλισμού θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η ανάληψη των φορτίων με απόλυτη ασφάλεια. Επιπλέον οι εν λόγω συγκολλήσεις θα υλοποιούνται σύμφωνα με τις οδηγίες του prEN 1992-3. Η τοποθέτηση των οπλισμών θα προηγείται της φάσης σκυροδέτησης. Σε ειδικές περιπτώσεις όπου υπάρχει επαρκής σχετική εμπειρία (σε συγκρίσιμες συνθήκες δοκιμαστικών πασσάλων) είναι δυνατόν οι οπλισμοί να τοποθετούνται αμέσως μετά την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης, εφόσον τούτο προβλέπεται στη Μελέτη.

Εκτός εάν προδιαγράφεται διαφορετικά στη Μελέτη οι οπλισμοί των επιτόπου εγχύτων πασσάλων θα τοποθετούνται σε όλο το μήκος των πασσάλων και οι ελάχιστες ποσότητες διαμήκους σιδηρού οπλισμού καθορίζονται ως ακολούθως :

- ποσοστό 0.5% της επιφάνειας διατομής των πασσάλων
- Ο ελάχιστος διαμήκους οπλισμός θα συνίσταται από 4 ράβδους διαμέτρου  $\Phi 12$  mm.

Είναι ουσιαστικής σημασίας η διατήρηση κάποιας μέγιστης και ελάχιστης απόστασης μεταξύ των ράβδων του διαμήκους οπλισμού των πασσάλων για να μπορεί το σκυρόδεμα να καλύψει πλήρως τον κλωβό οπλισμού και να έλθει σε πλήρη επαφή με τις εδαφικές παρειές της οπής. Έτσι το ελάχιστο κενό μεταξύ των διαμήκων ράβδων του οπλισμού πρέπει να είναι 10 εκατοστά, ενώ στην περίπτωση όπου ο μέγιστος κόκκος αδρανών σκυροδέματος είναι 20 χλστ, το ελάχιστο κενό μπορεί να μειωθεί στα 8 εκ.

Ο εγκάρσιος οπλισμός θα ικανοποιεί τις παρακάτω ελάχιστες απαιτήσεις:

- Ελάχιστη διάμετρος ράβδων: 5 mm.
- Ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ράβδων: όπως καθορίζεται στην προηγούμενη παράγραφο για τους διαμήκους οπλισμούς.

Το πάχος επικάλυψης των οπλισμών δεν πρέπει να είναι μικρότερο από:

- 5 cm, για πασσάλους με προσωρινή σωλήνωση.
- 7.5 cm, εφόσον η τοποθέτηση των οπλισμών ακολουθεί την φάση σκυροδέτησης.

- 4 cm από την εσωτερική επιφάνεια της μόνιμης σωλήνωσης.

### **Σκυροδέτηση πασσάλων**

Η εν-ξηρώ (δηλαδή πάνω από τη στάθμη του νερού) σκυροδέτηση επιτόπου εγχύτων πασσάλων δι' εκτοπίσεως θα πραγματοποιείται με μία εκ των παρακάτω μεθόδων:

1. Με τη χρήση σκυροδέματος υψηλού εργάσιμου, του οποίου η έκχυση εντός του σωλήνα διεισδύσεως (σκυροδέτησης) θα γίνεται σε επαρκή ποσότητα πριν από και κατά τη διάρκεια ανέλκυσης του εν λόγω σωλήνα.
2. Με αντλούμενο εντός του σωλήνα διεισδύσεως σκυρόδεμα υψηλής εργασιμότητας (slump).
3. Με προσθήκη μικρών ποσοτήτων ημίρρευστου σκυροδέματος εντός του σωλήνα σκυροδέτησης, καθεμία εκ των οποίων θα συμπυκνώνεται καταλλήλως κατά τη διαδικασία σταδιακής ανέλκυσης του προαναφερθέντος σωλήνα.
4. Με χρήση μεταλλικού «εμβαπτισμένου» σωλήνα (TREMIE PIPE). Σκυροδετήσεις κάτω από τη στάθμη του νερού θα γίνονται οπωσδήποτε με χρήση μεταλλικού «εμβαπτισμένου» σωλήνα (TREMIE PIPE).

Κατά την διάστρωση του σκυροδέματος πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η προβλεπόμενη σύνθεση με το προβλεπόμενο εργάσιμο φτάνει μέχρι τον πυθμένα της διάστρωσης, ότι δεν δημιουργείται απόμιξη ή ρύπανση του σκυροδέματος και ότι η στήλη του σκυροδέματος δεν διακόπτεται και δεν υπάρχουν στενώσεις. Επιπλέον πρέπει να λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα ώστε να αποφευχθεί διαχωρισμός των συστατικών του σκυροδέματος ή έκπλυση των αδρανών. Η στάθμη του σκυροδέματος θα πρέπει να διατηρείται πάνω από τον πυθμένα του σωλήνα σκυροδέτησης κατά τη διάρκεια της σταδιακής ανέλκυσης αυτού. Κατά τη σκυροδέτηση θα πρέπει να ελέγχονται και να καταγράφονται συστηματικά η στάθμη και όγκος του σκυροδέματος που τοποθετείται εντός του σωλήνα, και να συγκρίνονται ως προς τις διαστάσεις και τον τύπο του υπό κατασκευή πασσάλου, αλλά και να συνδυάζονται με τις επιτόπου γεωτεχνικές συνθήκες. Σε συνθήκες ψυχρού καιρού με θερμοκρασία περιβάλλοντος μικρότερη των 3 0 C θα πρέπει να λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα προστασίας των κεφαλών των προσφάτως κατασκευασμένων πασσάλων έναντι παγετού. Επισημαίνεται ότι ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται έτσι ώστε να εξασφαλισθεί η καλή ποιότητα του σκυροδέματος στις κεφαλές των πασσάλων. Η ύπαρξη κακής ποιότητας σκυροδέματος στις εν λόγω

περιοχές πρέπει να αντιμετωπίζεται απαραίτητως αφενός με αφαίρεση του κί-αφετέρου με εκ νέου σκυροδέτηση, η οποία όμως θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από πολύ καλή συνάφεια με το ήδη υπάρχον σκυρόδεμα.<sup>[4]</sup>

### **2.3.3 Κεφαλόδεσμος**

#### **Οπλισμοί**

Οι σιδηροί οπλισμοί των σκυροδεμάτων πρέπει να είναι της κατηγορίας χάλυβος, διαμέτρων, διαστάσεων και μορφής, όπως ορίζονται στη Μελέτη. Η τοποθέτηση οπλισμού θα γίνεται μόνο μετά την παραλαβή των ξυλότυπων. Οι οπλισμοί θα τοποθετούνται με φροντίδα και έντεχνα και θα συνδέονται στερεά σε όλες τις διασταυρώσεις με κατάλληλο σύρμα Νο 5 ή μεγαλύτερου πάχους, ανάλογα με την διάμετρο και τη θέση του οπλισμού. Τα άγκιστρα του οπλισμού, εφόσον απαιτούνται, θα είναι κανονικά και ευμεγέθη. Ιδιαίτερη φροντίδα θα λαμβάνεται για την ευθυγράμμιση των ράβδων του οπλισμού, την ακριβή και στερεή τοποθέτηση αυτών, τη διατήρηση σε σταθερή θέση κατά τη διάστρωση και κοπάνισμα του σκυροδέματος, ιδίως στις θέσεις αρνητικού οπλισμού και κατά την κάλυψη αυτών με σκυρόδεμα. Όπου κρίνεται απαραίτητο, θα τοποθετούνται πρόχειρα ή μόνιμα υποστηρίγματα (καβίλιες ή υποστηρίγματα). Όλοι οι προβάλλοντες οπλισμοί αναμονής θα πρέπει να προστατεύονται με ειδική βαφή.

#### **Σκυροδέτηση κεφαλόδεσμου**

Στον οριζόντιο (ή βαθμιδωτό) και στεγανό πυθμένα του σκάμματος της εκοκαφής διαστρώνεται στρώση αόπλου σκυροδέματος χαρακτηριστικής αντοχής Β5, ελαχίστου πάχους 0.10 m, που θα χρησιμεύει σαν δάπεδο εργασίας για την κυρίως σκυροδέτηση του κεφαλόδεσμου. Μετά την σκλήρυνση της στρώσης αυτής ακολουθεί, σύμφωνα με τη μελέτη η τυχόν στεγανωτική στρώση της άνω επιφανείας της.

Η διάστρωση του σκυροδέματος θα αρχίσει μόνον μετά την παραλαβή των ξυλότυπων και του οπλισμού από την Υπηρεσία. Απαραίτητα, κατά τη διάστρωση του σκυροδέματος, πρέπει να παρευρίσκεται ένας σιδηρουργός για τυχόν διορθώσεις οπλισμών. Πριν από την διάστρωση του σκυροδέματος (επί του υπάρχοντος δαπέδου εξομαλυντικού σκυροδέματος) πρέπει το δάπεδο να καθαρισθεί και να καταβρεχτεί επαρκώς. Η διάστρωση θα βοηθείται και με συχνά κτυπήματα της εξωτερικής

επιφανείας των ξυλότυπων. Διακοπές διάστρωσης σκυροδεμάτων θα πρέπει να αποφεύγονται και θα γίνονται μόνο μετά από έγκριση της Υπηρεσίας που θα υποδεικνύει την θέση διακοπής, τον χρόνο διάρκειας αυτής και τον τρόπο σύνδεσης του νωπού σκυροδέματος, που γενικά θα γίνεται με απόξεση της διαστρωθείσας επιφανείας, απομάκρυνση των αποσυντεθέντων υλικών, πλήση με άφθονο νερό κλπ. όπως σχετικά αναφέρεται στην παράγραφο 14.3 του ΚΤΣ ' 97. Η συμπίκνωση θα γίνει με χρήση δονητών, εκτός αν ο Ανάδοχος, μετά από έγκριση της Υπηρεσίας, θεωρήσει ότι υπάρχει κίνδυνος απόμιξης του σκυροδέματος για την εκλεγείσα περιοχή εργασίμου. Η συμπίκνωση θα υποβοηθείται με κοπάνισμα με ράβδο ή κόπανο, με κτύπημα των ξυλότυπων κλπ. Η άνω επιφάνεια των κεφαλόδεσμων θα πρέπει διαμορφώνεται καταλλήλως, π.χ. με τελείωμα πλαστικού τύπου ΠΑ.

Επισημαίνεται ότι στις περιπτώσεις που κρίνεται αναγκαία, σύμφωνα με την Μελέτη, να εμποδιστεί η άνοδος τυχόν υπάρχοντος υπόγειου ύδατος δια μέσου των κεφαλόδεσμων και της ανωδομής των βάθρων προς τα υποστυλώματα κλπ., τότε όλες οι εξωτερικές επιφάνειες των κεφαλόδεσμων, μετά την αφαίρεση των ξυλότυπων, μονώνονται με υλικό σύμφωνο με την Μελέτη.<sup>[3]</sup>

## **2.4 Κανονιστικές διατάξεις από Eurocode7 (EC-7)**

Στον Ευρωκώδικα 7 που ασχολείται με γεωτεχνικά θέματα, το κεφάλαιο 7 ασχολείται με τους πασσάλους. Ο Ευρωκώδικας αναλύει τους τρόπους που υπολογίζεται η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου, οι συντελεστές ασφαλείας που πρέπει να χρησιμοποιούνται και τέλος οι έλεγχοι που πρέπει να γίνονται σε έναν πάσσαλο.

Κατά τον σχεδιασμό θεμελιώσεων με πασσάλους απαιτείται ο έλεγχος έναντι

οριακών καταστάσεων, βασικοί τύποι των οποίων είναι οι ακόλουθοι :

### **Οριακές καταστάσεις αστοχίας :**

- Τύπου GEO : Αστοχία στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους λόγω υπέρβασης της θλιπτικής αξονικής φέρουσας ικανότητας του πασσάλου
- Τύπου GEO : Εξόλκευση πασσάλου λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αξονικής φέρουσας ικανότητας

- Τύπου GEO : Αστοχία του εδάφους γύρω από τον πάσσαλο λόγω εγκάρσιων φορτίων
- Τύπου STR : Δομικού τύπου αστοχία του πασσάλου σε θλίψη, εφελκυσμό ή κάμψη
- Συνδυασμένη αστοχία εδάφους και πασσάλου
- Απώλεια συνολικής ευστάθειας του εδάφους που περιβάλλει τον πάσσαλο (π.χ. μέσω κύκλου ολισθήσεως)

#### **Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας :**

- Υπερβολικές καθιζήσεις ή ανυψώσεις μεμονωμένου πασσάλου ή πασσαλο-ομάδας
- Πλευρικές μετατοπίσεις πέραν των ανεκτών ορίων
- Μη αποδεκτές ταλαντώσεις

Στους πασσάλους, οι οριακές καταστάσεις STR και GEO αποτελούν τις συνηθέστερες και σπουδαιότερες οριακές καταστάσεις αστοχίας, εξετάζονται δε παραλλήλως - συγχρόνως, δεδομένου ότι δεν είναι πάντα σαφές αν κατά τη συνεχή αύξηση π.χ. των εξωτερικών φορτίσεων επί της θεμελιώσεως θα προηγηθεί αστοχία του εδάφους, ή αστοχία της θεμελιώσεως ως δομικού στοιχείου, ή συγχρόνως θα αστοχήσει και το έδαφος και το δομικό στοιχείο.

#### **Τύπου GEO (αστοχία αξονικού φορτίου)**

Για μεμονωμένο πάσσαλο φορτιζόμενο από θλιπτική ή εφελκυστική, αξονική φόρτιση ή και για ομάδα πασσάλων, ο έλεγχος επάρκειας έναντι οριακής κατάστασης αστοχίας γίνεται μέσω της σχέσης :

$$F_{c,d} \leq R_{c,d} \quad (2.1)$$

όπου:  $F_{c,d}$ : η τιμή σχεδιασμού του αξονικού θλιπτικού φορτίου στην κεφαλή του πασσάλου.

$R_{c,d}$ : η τιμή σχεδιασμού της αντίστασης (φέρουσας ικανότητας) του πασσάλου

Η αντίσταση σχεδιασμού  $R_{c,d}$  υπολογίζεται από την χαρακτηριστική τιμή της αντίστασης ( $R_{c,k}$ ) με εφαρμογή των κατάλληλων συντελεστών  $\gamma_R$  που δίδονται στους Πίνακες 2.2 και 2.3. δηλαδή :  $R_{c,d} = R_{c,k} / \gamma_R$  . Στην Ελλάδα, η ανάλυση των θεμελιώσεων με πασσάλους γίνεται με τον Τρόπο Ανάλυσης 2\* (DA-2\*) κατά τον οποίο γίνεται χρήση της στήλης «R2» στους ανωτέρω Πίνακες. Η χαρακτηριστική αντοχή  $R_{c,k}$  επέχει ουσιαστικώς τη θέση του οριακού φορτίου υπό θλιπτική φόρτιση,

αλλά σύμφωνα με τη λογική επιλογής των χαρακτηριστικών τιμών απαιτείται προσεκτική-συντηρητική επιλογή του μεγέθους αυτού. Όπως λοιπόν είναι σαφές, προκειμένου να ελεγχθεί η ισχύς της ανωτέρω ανισώσεως απαιτείται η εκτίμηση της χαρακτηριστικής αντοχής,  $R_{c,k}$ . Η εκτίμηση αυτή μπορεί να γίνει:

- Από στατικές δοκιμαστικές φορτίσεις πασσάλων
- Από αξιολόγηση αποτελεσμάτων δοκιμών δυναμικών φορτίσεων
- Με υπολογισμούς που έχουν ως βάση αποτελέσματα γεωτεχνικών δοκιμών και συγκεκριμένα :
  - Από άμεσες συσχετίσεις με αποτελέσματα επί τόπου δοκιμών (SPT, CPT, PT)
  - Βάσει των χαρακτηριστικών τιμών των εδαφικών παραμέτρων (π.χ.  $c_{uk}$ ), με συνεκτίμηση εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών.

Επί μέρους συντελεστές επί της αντοχής ( $\gamma_R$ ) για εμπηγνυομένους πασσάλους					
Αντοχή	Συμβολισμός	Ομάδα Συντελεστών			
		R1	R2	R3	R4
Αιχμής	$\gamma_b$	1,00	1,10	1,00	1,30
Εκ πλευρικών τριβών (θλιπτικά φορτία)	$\gamma_s$	1,00	1,10	1,00	1,30
Συνολική (θλίψη)	$\gamma_t$	1,00	1,10	1,00	1,30
Εκ πλευρικών τριβών - Εφελκυσμός	$\gamma_{s,t}$	1,25	1,15	1,10	1,60

Πίνακας 2.2 Συντελεστές πασσάλων εκτοπίσεως.

Επί μέρους συντελεστές επί της αντοχής ( $\gamma_R$ ) για πασσάλους εκσκαφής					
Αντοχή	Συμβολισμός	Ομάδα Συντελεστών			
		R1	R2	R3	R4
Αιχμής	$\gamma_b$	1,25	1,10	1,00	1,60
Εκ πλευρικών τριβών (θλιπτικά φορτία)	$\gamma_s$	1,00	1,10	1,00	1,30
Συνολική (θλίψη)	$\gamma_t$	1,15	1,10	1,00	1,50
Εκ πλευρικών τριβών - Εφελκυσμός	$\gamma_{s,t}$	1,25	1,15	1,10	1,60

Πίνακας 2.3 Συντελεστές πασσάλων εκσκαφής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με την τελευταία κατηγορία, καθώς οι άλλες δυο μέθοδοι μπορούν να μας δώσουν στοιχεία για πάσσαλο συγκεκριμένων διαστάσεων. Παρότι τα αποτελέσματα των άλλων δυο μπορεί να δώσουν μεγαλύτερη ακρίβεια, εντούτοις απαγορεύουν πρακτικά την βελτιστοποίηση καθώς θα έπρεπε ουσιαστικά να κάνουμε δοκιμές με κάθε πιθανό πάσσαλο για να επιλέξουμε τον κατάλληλο. Λόγω αυτού του περιορισμού που υπάρχει οι δύο αυτές

μέθοδοι περιορίζονται στον έλεγχο κατά την τοποθέτηση των πασσάλων για επιβεβαίωση όσων έχουν υπολογιστεί.

Αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις γεωτεχνικών δοκιμών (ground tests), από τα αποτελέσματα των οποίων είναι δυνατή η εκτίμηση της χαρακτηριστικής αντοχής του μεμονωμένου πασσάλου υπό θλιπτική φόρτιση, είναι οι επί τόπου δοκιμές στατικής πενετρομετρήσεως (CPT), πρεσσιομετρήσεως (PT) και προτύπου δοκιμής διεισδύσεως (SPT) με ή χωρίς συνεκτίμηση εργαστηριακών δοκιμών. Η αξιοποίηση τέτοιων αποτελεσμάτων περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής τιμής της μοναδιαίας αντίστασης βάσης του πασσάλου, ( $q_{b,k}$ ) (δηλαδή της αντίστασης βάσεως ανά μονάδα επιφανείας βάσεως), καθώς και των χαρακτηριστικών τιμών της οριακής τάσεως συνάφειας ( $q_{s,i,k}$ ) (δηλαδή της ανά μονάδα επιφανείας αντοχής πλευρικών τριβών), σε κάθε στρώση  $i$ . Η επιλογή των χαρακτηριστικών τιμών αντοχής βάσεως  $R_{b,k}$ , αντοχής πλευρικών τριβών  $R_{s,k}$  και συνολικής αντοχής  $R_{c,k}$ , μπορεί να γίνει με τη μεθοδολογία των συντελεστών συσχέτισεως  $\xi$  ή ανεξαρτήτως αυτής, ως εξής:

Οι χαρακτηριστικές τιμές  $q_{b,k}$  και  $q_{s,i,k}$  και οι βάσει αυτών τιμές  $R_{b,k}$ ,  $R_{s,k}$  υπολογίζονται βάσει των αποτελεσμάτων επί τόπου ή εργαστηριακών δοκιμών με διαδικασία έμμεσης εκτιμήσεως είτε την εφαρμογή στατικών τύπων. Συνήθως, τούτο γίνεται με τη θεώρηση μιας μέσης, αντιπροσωπευτικής, γεωτεχνικής τομής που συνοδεύεται από αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα επί τόπου δοκιμών, καθώς και αντίστοιχα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών.

Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών τιμών αντοχής  $R_{b,k}$ ,  $R_{s,k}$  καθώς και της αντοχής σχεδιασμού  $R_{c,d}$  γίνεται ως κατωτέρω :

$$R_{b,k} = A_b * q_{b,k} \quad (2.2)$$

$$R_{s,k} = \sum R_{s,i} = \sum (A_{s,i} * q_{s,i,k}) \quad (2.3)$$

$$R_{c,d} = (1 / \gamma_m) [ R_{b,k} / \gamma_b + R_{s,k} / \gamma_s ] \quad (2.4)$$

Όπου:  $q_{b,k}$  = χαρακτηριστική τιμή της μοναδιαίας αντίστασης αιχμής του πασσάλου

$A_b$  = εμβαδόν αιχμής του πασσάλου

$q_{s,i,k}$  = χαρακτηριστική τιμή της τάσεως συναφείας στην παράπλευρη επιφάνεια της  $i$  στρώσεως

$A_{s,i}$  = εμβαδόν της παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου στη στρώση (i)

$\gamma_m$  = συντελεστής προσομοίωσης (καλύπτει τις πρόσθετες αβεβαιότητες που εισάγονται μέσω των μεθόδων εκτιμήσεως και υπολογισμών)

Τιμές του συντελεστή προσομοίωσης  $\gamma_m$  κατά το Εθνικό Προσάρτημα του EN1997-1 προκύπτει από τον πίνακα 2.4:

Τρόπος υπολογισμού χαρακτηριστικών αντοχών	Προτεινόμενη τιμή
* $q_{b,k}$ , $q_{s,k}$ μέσω συντελεστών συσχέτισης $\xi$ (π.χ από δοκιμές SPT, CPT κ.λ.π)	$\gamma_m = 1,00$
* $q_{b,k}$ , $q_{s,k}$ υπολογίζονται από εργαστηριακές δοκιμές είτε επί τόπου χωρίς συντελεστές συσχέτισης	$\gamma_m = 1,30$

Πίνακας 2.4 Συντελεστής προσομοίωσης.

### Τύπου GEO (αστοχία εγκάρσιου φορτίου)

Ο έλεγχος επάρκειας έναντι οριακών καταστάσεων αστοχίας στην περίπτωση εγκάρσιας φορτίσεως γράφεται:

$$F_{tr,d} \leq R_{tr,d} \quad (2.5)$$

Όπου  $F_{tr,d}$  και  $R_{tr,d}$  είναι η εγκάρσια δύναμη (δράση) σχεδιασμού και η αντίστοιχη αντοχή σχεδιασμού. Η τιμή σχεδιασμού  $R_{tr,d}$  μπορεί να υπολογισθεί μέσω της χαρακτηριστικής τιμής από τη σχέση :

$$R_{tr,d} = R_{tr,k} / \gamma_{tr} \quad (2.6)$$

Στο Παράρτημα Α του EC-7 δεν περιλαμβάνονται Πίνακες ή συστάσεις για τον επί μέρους συντελεστή επί της αντοχής πασσάλων σε εγκάρσια φόρτιση  $\gamma_R = \gamma_{tr}$ . Κατ' αναλογία προς την παθητική αντίσταση τοίχων αντιστηρίξεως πακτωμένων στο έδαφος, προτείνεται να λαμβάνεται  $\gamma_{tr} = 1.40$ . Η χαρακτηριστική αντοχή  $R_{tr,k}$ , μπορεί να μετρηθεί με δοκιμαστικές φορτίσεις ή να υπολογισθεί βάσει αποτελεσμάτων γεωτεχνικών δοκιμών σε συνδυασμό με τις παραμέτρους αντοχής του πασσάλου, ως δομικού στοιχείου. Στην πρώτη περίπτωση, δηλαδή των δοκιμαστικών φορτίσεων κατά την οριζόντια διεύθυνση, θα πρέπει να γίνει κατάλληλη ερμηνεία των αποτελεσμάτων της δοκιμής, που δεν είναι απαραίτητο να συνεχιστεί μέχρι την αστοχία, καθώς και κατάλληλη αναγωγή στο πραγματικό πρόβλημα με διαφορετικές, ενδεχομένως, οριακές συνθήκες.



Στη δεύτερη περίπτωση, η υπολογιστική διαδικασία σύμφωνα με την παράγραφο 7.71(3) του EC-7 βασίζεται στη θεώρηση ενός εκ των πιθανών ακραίων μηχανισμών αστοχίας, δηλαδή του κοντού ή του μακρού πασσάλου. (α) “Κοντού” πασσάλου όπου αστοχεί το έδαφος: Μετατοπίσεις είτε στροφή του σώματος του πασσάλου, ως άκαμπτου. (β) “Μακρού” πασσάλου, όπου αστοχεί ο πάσσαλος ως δομικό στοιχείο, σε συνδυασμό ενδεχομένως και με διατμητική αστοχία του εδάφους στην περιοχή της κεφαλής.<sup>[5]</sup>

## 2.5 Σύνοψη

Τα κύρια σημεία τα οποία θα χρησιμοποιηθούν και στη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αφενός τα χαρακτηριστικά των πασσάλων (εύρος διαμέτρων και περιορισμοί στο μήκος), του οπλισμού (ελάχιστος οπλισμός και ελάχιστες αποστάσεις) και της σύνδεσης κεφαλόδεσμου-πασσάλου (ο πάσσαλος πακτώνεται στον κεφαλόδεσμο, από τη στιγμή που ο οπλισμός του πασσάλου εισέρχεται εντός του κεφαλόδεσμου κατά 30 με 60 εκατοστά) τα οποία προκύπτουν από τους Ε.Τε.Π. και αφετέρου τους ελέγχους οι οποίοι πρέπει να ικανοποιούνται (χωρίς ωστόσο να καθορίζεται η μέθοδος που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των φερουσών ικανοτήτων, αφήνοντας στον μελετητή να επιλέξει όποια επιστημονικά αποδεκτή μέθοδο προτιμά) όπως αυτοί καθορίζονται από τον EC-7.

# 3

## Φέρουσα ικανότητα πασσάλων

---

### 3.1 Γενικά

Για την επίλυση των προβλημάτων θεμελιώσεων με πασσάλους απαιτείται η κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος πάσσαλος - έδαφος και κυρίως η κατανόηση του μηχανισμού μεταβιβάσεως των φορτίων από τον πάσσαλο στο έδαφος.

Κατά τον ποσοτικό προσδιορισμό της αξονικής φέρουσας ικανότητας - οριακού αξονικού φορτίου -  $P_u$ , ενός πασσάλου δεχόμαστε ότι το φορτίο της ανωδομής μεταβιβάζεται στο έδαφος μέσω του πασσάλου με 2 τρόπους, μέσω της αντοχής εκ πλευρικών τριβών ( $Q_s$ ) και μέσω της αντοχής της αιχμής του πασσάλου ( $Q_b$ ). Η  $\Phi.I.$  του πασσάλου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το υλικό, η μορφή, ο τρόπος κατασκευής του πασσάλου και το είδος του περιβάλλοντος εδάφους. Στην πράξη ο ποσοτικός προσδιορισμός της αξονικής  $\Phi.I.$  γίνεται υπό την παραδοχή ότι οι 2 αντοχές είναι ανεξάρτητες και η μια δεν επηρεάζει την άλλη, επομένως υπολογίζονται ξεχωριστά και τελικά έχουμε ότι:

$$P_u = Q_s + Q_b \quad (3.1)$$

Οι κατακόρυφοι πάσσαλοι αναλαμβάνουν τις οριζόντιες δυνάμεις με σύγχρονη κάμψη και πλευρική μετατόπιση, ενεργοποιώντας έτσι τόσο την αντοχή τους όσο και την αντοχή του εδάφους που τους περιβάλλει. Ο έλεγχος λοιπόν της φέρουσας ικανότητας πασσάλων σε οριζόντια φόρτιση θα πρέπει να περιλαμβάνει α) τη φέρουσα ικανότητα του περιβάλλοντος τον πάσσαλο εδάφους και β) τον έλεγχο της αντοχής του πασσάλου ως φέροντος στοιχείου σε κάμψη λόγω των πλευρικών επιπονήσεων.

### 3.2 Φέρουσα ικανότητα έναντι αξονικής δύναμης

Η φέρουσα ικανότητα των πασσάλων προκύπτει ως το άθροισμα της αντοχής της αιχμής του πασσάλου και της αντοχής της πλευρικής τριβής.

$$P_u = Q_s + Q_b \quad (3.2)$$

$$Q_s = \pi * D * \sum_i f_{su} * \Delta z_i \quad (3.3), \quad Q_b = A_p * q_{pu} \quad (3.4)$$

$f_{su}$  = οριακή πλευρική τριβή

$D$  = διάμετρος πασσάλου

$q_{pu}$  = οριακή μοναδιαία αντίσταση αιχμής

$A_p$  = εμβαδόν αιχμής πασσάλου

Οι τιμές των δυο αυτών συντελεστών εξαρτώνται από το υλικό και τα χαρακτηριστικά του πασσάλου, τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εδάφους και το είδος του πασσάλου. Αναλόγως με το αν ασχολούμαστε με πασσάλους εκτοπίσεως ή πασσάλους εκσκαφής διαφοροποιούνται οι μέθοδοι υπολογισμού αυτών των συντελεστών.<sup>[6]</sup>

#### 3.2.1 Πάσσαλοι εκτοπίσεως

Για τους πασσάλους εκτοπίσεως χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Terzaghi για τον υπολογισμό της οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής, ενώ για την οριακή πλευρική τριβή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Tomlinson για συνεκτικά εδάφη και η μέθοδος του API (American Petroleum Institute) για μη συνεκτικά εδάφη. Οι δύο αυτές μέθοδοι χρησιμοποιούν πρακτικά τον ίδιο τύπο μιας και η ενεργός συνοχή, που τους διαφοροποιεί, συνήθως αμελείται λόγω διατάραξης της αργίλου στην περιφέρεια του πασσάλου. Η χρήση και των δύο μεθόδων έγκειται στη χρήση των συντελεστών οριζόντιας πίεσης γαιών (Σχήμα 3.1).

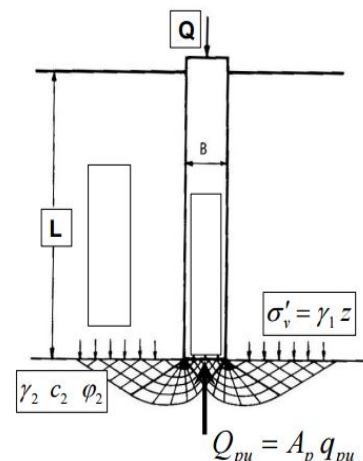
Μέθοδος Terzaghi<sup>[7]</sup>:

$$q_{pu} = 1.3 * c_2 * N_c + \sigma'_v * N_q + 0.3 * \gamma_2 * B * N_\gamma \quad (3.5)$$

$$N_q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} * e^{\pi * \tan \varphi} \quad (3.6)$$

$$N_c = (N_q - 1) * \frac{1}{\tan \varphi} \quad (3.7)$$

$$N_\gamma = 2 * (N_q - 1) * \tan \varphi \quad (3.8)$$



Σχήμα 3.1 Μηχανισμός θραύσεως στην αιχμή κατά Terzaghi

Μέθοδος του API(American Petroleum Institute)<sup>[8]</sup> :

$$f_{su} = K * \sigma'_v * \tan\delta \quad (3.9)$$

Μέθοδος Tomlinson<sup>[9]</sup> :

$$f_{su} = a * c' + K * \sigma'_v * \tan\delta \quad (3.10)$$

$a$  = συντελεστής συνοχής :

Μαλακές άργιλοι :  $a = 1$

Μέσης συνεκτικότητας άργιλοι :  $a = 0.75$

Στιφρές και σκληρές άργιλοι :  $a = 0.50$

$c'$  = 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 :  $K = 1.00$

Χαλαρές άμμοι :  $K = 0.50 - 0.80$

Μέσης πυκνότητας άμμοι :  $K = 1.00$

Πυκνές άμμοι :  $K = 1.20 - 1.50$

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

$\delta$  = γωνία τριβής στην διεπιφάνεια πασσάλου εδάφους

Προκατασκευασμένοι πάσσαλοι από σκυρόδεμα :  $\delta = 0.5 * \varphi$

Στη διεπιφάνεια χαλυβδινού πασσάλου εδάφους :

Σε αργίλους :  $\delta = 15^\circ - 20^\circ$

Σε άμμους οι τιμές προκύπτουν από τον πίνακα 3.1.

Είδος αμμώδους εδάφους	Συνιστώμενη τιμή του $\delta$ (°)
Πολύ χαλαρή άμμος – Χαλαρή αμμώδης ιλύς	15
Χαλαρή άμμος – Μέσης πυκνότητας αμμώδης ιλύς	20
Άμμος μέσης πυκνότητας – Πυκνή αμμώδης ιλύς	25
Πυκνή άμμος – Πολύ πυκνή αμμώδης ιλύς	30
Πολύ πυκνή άμμος – πυκνό αμμοχάλικο	35

Πίνακας 3.1 Συνιστώμενη τιμή γωνίας τριβής στη διεπιφάνεια χαλύβδινου πασσάλου - άμμου

### 3.2.2 Έγχυτοι πάσσαλοι

Για τους έγχυτους πάσσαλους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος DIN 4014. Στη συγκεκριμένη μέθοδο για τον υπολογισμό των συντελεστών αυτών απαιτούνται συγκεκριμένες χαρακτηριστικά του εδάφους, ανάλογα με το είδος του. Στα μη-συνεκτικά εδάφη απαιτείται η αντοχή αιχμής κώνου στη δοκιμή CPT ( $q_c$ ), στα συνεκτικά εδάφη απαιτείται η αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $c_u$ ), ενώ σε αντίθεση με τους πασσάλους εκτοπίσεως, οι έγχυτοι πάσσαλοι μπορούν να θεμελιώσουν σε βραχώδη πετρώματα. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται η μονοαξονική αντοχή του βράχου ( $q_u$ ).

Μη – συνεκτικά εδάφη :

Τιμές της οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής από πίνακα 3.2 :

$q_c$ (MPa)	$q_{pu}$ (MPa)
$\leq 10$	0 (αμελείται)
10	2
15	3
20	3.5
$\geq 25$	4

Πίνακας 3.2 Οριακή μοναδιαία αντίσταση αιχμής από αντοχή αιχμής κώνου από δοκιμή CPT

Τιμές της οριακής πλευρικής τριβής από πίνακα 3.3 :

$q_c$ (MPa)	$f_{su}$ (kPa)
0	0
5	40
10	80
$\geq 15$	120

Πίνακας 3.3 Οριακή πλευρική τριβή από αντοχή αιχμής κώνου από δοκιμή CPT

Συνεκτικά εδάφη :

Τιμές της οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής από πίνακα 3.4:

$c_u$ (kPa)	$q_{pu}$ (MPa)
0	0
100	0.8
$\geq 200$	1.5

Πίνακας 3.4 Οριακή μοναδιαία αντίσταση αιχμής από αστράγγιστη διατμητική αντοχή

Τιμές της οριακής πλευρικής τριβής από πίνακα 3.5 :

$c_u$ (kPa)	$f_{su}$ (kPa)
25	25
100	40
$\geq 200$	60

Πίνακας 3.5 Οριακή πλευρική τριβή από αστράγγιστη διατμητική αντοχή

Τιμές της οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής και της οριακής πλευρικής τριβής έγχυτων πασσάλων σε βράχους από πίνακα 3.6 :

$q_u$ (MPa)	$f_{su}$ (kPa)	$q_{pu}$ (MPa)
< 0.5	Υπολογισμός για εδαφικό σχηματισμό	
0.5	80	1.5
5	500	5
20	500	10

Πίνακας 3.6 Οριακή μοναδιαία αντίσταση αιχμής και πλευρική τριβή από μονοαξονική αντοχή βράχου

Για ενδιάμεσες τιμές οι συντελεστές προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή.<sup>[10]</sup>

### 3.2.3 Εξόλκευση πασσάλου

Οι παράγραφοι 3.2.1 και 3.2.2 αφορούσαν την φέρουσα ικανότητα του πασσάλου έναντι θλιπτικής αξονικής δύναμης. Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις οι δυνάμεις που ασκούνται στον πάσσαλο μπορεί να είναι και εφελκυστικές. Αυτό συμβαίνει είτε για μόνιμες εφελκυστικές φορτίσεις (π.χ. πάσσαλοι αγκυρώσεως), είτε προκύπτει από

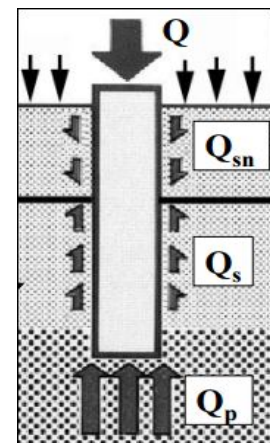
τα κινητά φορτία. Συνιθέστερη περίπτωση είναι η εφελκυστική φόρτιση που προκαλεί σε ορισμένους πασσάλους μιας κατασκευής, οι οποίοι υπό κανονικές συνθήκες φορτίζονται με θλιπτικά φορτία, κάποια σεισμική φόρτιση. Οι υψηλές σεισμικές ροπές συνεπάγονται ανακατανομές των αξονικών φορτίων, ώστε ορισμένοι πάσσαλοι να δέχονται εναλλασσόμενα θλιπτικά ή εφελκυστικά φορτία.

Το οριακό εφελκυστικό φορτίο υπολογίζεται όπως και το οριακό θλιπτικό φορτίο παραλείποντας τον όρο του οριακού φορτίου αιχμής. Πρακτικά λαμβάνεται ίσο προς το υπολογιζόμενο οριακό φορτίο πλευρικών τριβών. Όπως φαίνεται και στο κεφάλαιο 2 οι συντελεστές για εφελκυστική φέρουσα ικανότητα είναι συντηρητικότεροι.<sup>[2] [6]</sup>

$$R_u = Q_s = \Sigma(f_s * A_s) \quad (3.11)$$

### 3.2.4 Αρνητικές τριβές

Η παρουσία επιφανειακής φόρτισης πλησίον του πασσάλου, ενδέχεται να οδηγήσει σε επικίνδυνες καταστάσεις. Σε περίπτωση που έχουμε περισσότερες από μια εδαφικές ζώνες, με πολύ μαλακή την ανώτερη και ανθεκτικότερο έδαφος σε μεγαλύτερα βάθη, υπάρχει κίνδυνος να αναπτυχθούν πλευρικές τριβές στον πάσσαλο με ίδια φορά με την αξονική φόρτιση (Σχήμα 3.2). Σε αυτήν την περίπτωση αυτές οι πλευρικές τριβές πρέπει να αφαιρούνται από την συνολική φέρουσα ικανότητα του πασσάλου.



Σχήμα 3.2 Αρνητικές πλευρικές τριβές επί πασσάλου

$$R_u = Q_s + Q_b - Q_{sn} \quad (3.12)$$

Πρακτικά θεωρείται ότι αρνητικές πλευρικές τριβές αναπτύσσονται όταν η καθίζηση μίας εδαφικής ζώνης λόγω του επιφανειακού φορτίου είναι μεγαλύτερη από την συνολική καθίζηση του πασσάλου.

Το οριακό φορτίο των αρνητικών τριβών υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που θα υπολογιζόταν και το αντίστοιχο οριακό φορτίο τριβών.<sup>[2]</sup>

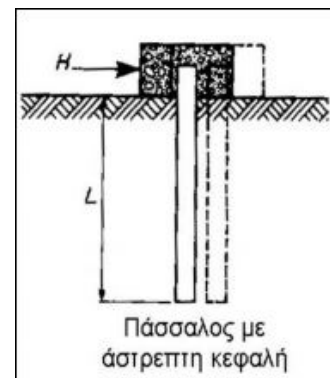
### 3.3 Φέρουσα ικανότητα έναντι τέμνουσας δύναμης

Η συμπεριφορά των πασσάλων σε οριζόντιες φορτίσεις, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως: την ευκαμψία των πασσάλων των πασσάλων σε σχέση με την ακαμψία του περιβάλλοντος εδάφους – κυρίως των ανωτέρων στρωμάτων-, τη σχέση τάσεων παραμορφώσεων και την αντοχή του εδάφους, καθώς επίσης και τις συνθήκες δέσμευσης ή όχι της κεφαλής του πασσάλου. Στην παρούσα διπλωματική ασχοληθήκαμε με πασσάλους πακτωμένους στον κεφαλόδεσμο.

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων οριζόντιων φορτίων-μετατοπίσεων ολόκληρου του πασσάλου, οι πάσσαλοι μπορούν να χαρακτηρισθούν α) ως άκαμπτοι (κοντοί) στην περίπτωση που περιστρέφονται, χωρίς ουσιαστική παραμόρφωση τους περί τον άξονα συμμετρίας τους και β) ως εύκαμπτοι (μακροί) εφόσον η συμπεριφορά τους κατά την οριζόντια φόρτιση μπορεί να παρομοιασθεί με αυτή μιας ελαστικής δοκού εντός ελαστικού εδάφους.<sup>[12]</sup>

#### 3.3.1 Κοντοί - άκαμπτοι πάσσαλοι

Ο έλεγχος κοντού πασσάλου εξαρτάται από την αντίσταση του περιβάλλοντος εδάφους και άρα από το μήκος έμπηξης του πασσάλου και είναι ανεξάρτητη της ροπής αστοχίας του πασσάλου. Λόγω της πακτωμένης κεφαλής, ο πάσσαλος προσπαθεί να μετατοπιστεί κάθετα στον άξονά του. Ο έλεγχος επομένως του κοντού πασσάλου αφορά την εξισορρόπηση της οριζόντιας δύναμης που ασκείται στην κορυφή του πασσάλου με τις αντιδράσεις του εδάφους.



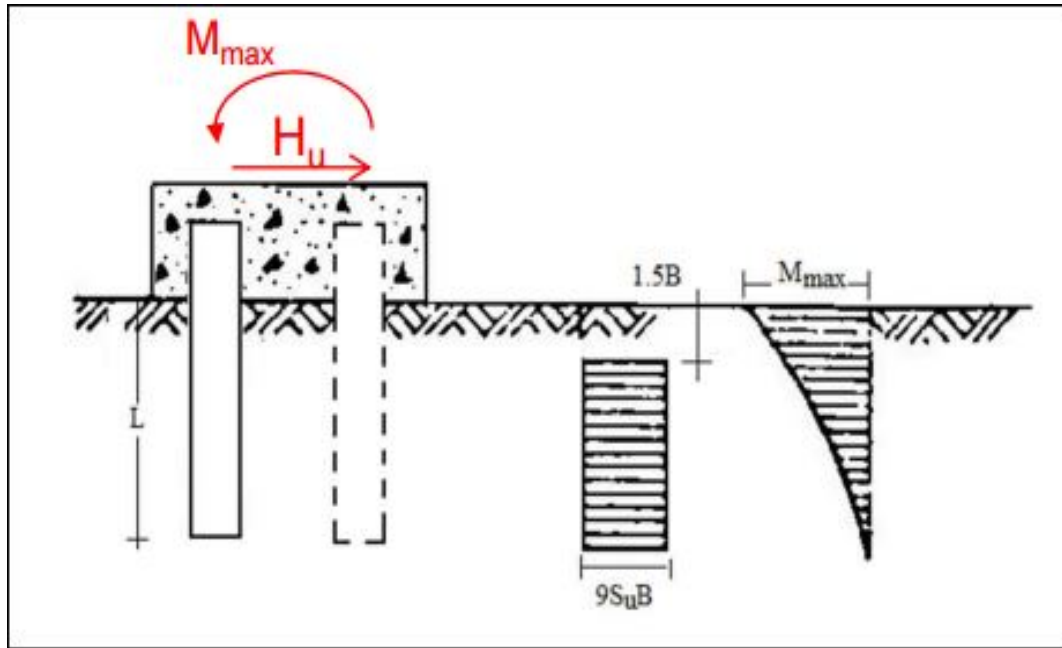
Σχήμα 3.3 Κίνδυνος αστοχίας κοντού πασσάλου με πακτωμένη κορυφή

Για τους κοντούς πασσάλους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος BROMS. Ο Broms έλυσε στατικά το πρόβλημα θεωρώντας την ισορροπία όλων των δυνάμεων επί του πασσάλου με απλοποιητικές παραδοχές ως προς τον μηχανισμό θραύσεως και την κατανομή των τάσεων στο έδαφος. Σύμφωνα με την κύρια παραδοχή της μεθόδου Broms, σε κοντούς πασσάλους η οριακή παθητική αντίσταση του εδάφους σε οριζόντια φόρτιση καθορίζει την αστοχία του συστήματος πάσσαλος-έδαφος.



Ο τρόπος υπολογισμού της αντίστασης του εδάφους ποικίλει, ανάλογα με το είδος του εδάφους. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα διαγράμματα τάσεων για να υπολογιστεί η δύναμη που ασκεί το έδαφος στον πάσσαλο.

Για συνεκτικά εδάφη:



Σχήμα 3.4 Αντίδραση συνεκτικού εδάφους σε πάσσαλο με άστρεπτη κεφαλή για έλεγχο κοντού πασσάλου

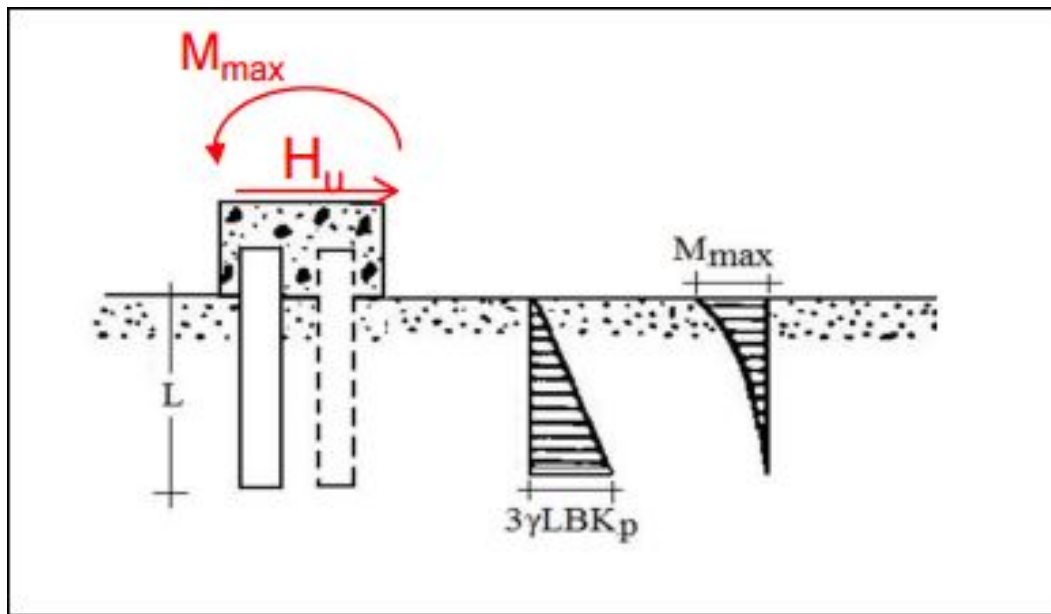
$$F_{εδ} = 9 * S_u * B * (L - 1.5 * B) \quad (3.13)$$

όπου :  $S_u$  = συντελεστής αστράγγιστης διατμητικής αντοχής

$B$  = διάμετρος πασσάλου

$L$  = μήκος πασσάλου εντός του συνεκτικού εδάφους

Για μη-συνεκτικά εδάφη :



Σχήμα 3.5 Αντίδραση μη-συνεκτικού εδάφους σε πάσσαλο με άστρεπτη κεφαλή για έλεγχο κοντού πασσάλου

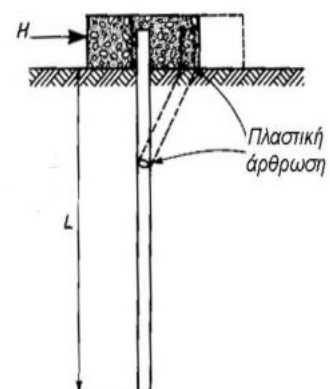
$$F_{εδ} = 1.5 * K_p * \gamma * B * L^2 \quad (3.14)$$

Όπου πρακτικά υπολογίζεται η οριζόντια παθητική τάση του εδάφους, μιας και  $K_p$  είναι ο συντελεστής παθητικής φόρτισης.

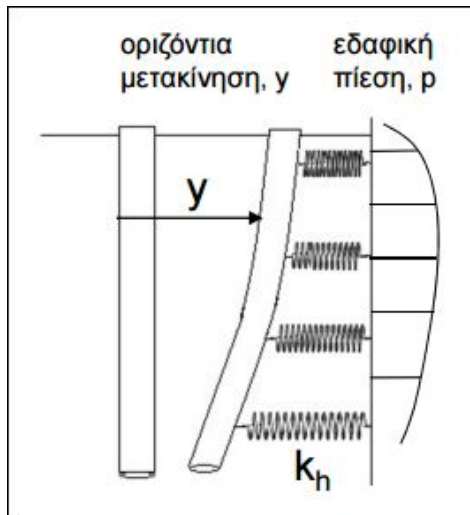
Σε περίπτωση που υπάρχουν περισσότερες από μια εδαφικές στρώσεις, σχεδιάζεται το διάγραμμα τάσεων κάθε στρώσης και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με την επιφάνεια που ασκείται.<sup>[12] [13]</sup>

### 3.3.2 Μακροί - εύκαμπτοι πάσσαλοι

Ο έλεγχος του μακρού πασσάλου εξαρτάται από την ροπή αστοχίας του πασσάλου  $M_y$  και είναι ανεξάρτητη του μήκους έμψηξης του πασσάλου. Πρακτικά στον έλεγχο μακρού πασσάλου εξετάζεται, αν στο σημείο που αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή κατά μήκος του πασσάλου δημιουργείται πλαστική άρθρωση (Σχήμα 3.6), αν δηλαδή η μέγιστη ροπή υπερβαίνει την ροπή αστοχίας του πασσάλου.



Σχήμα 3.6 Έλεγχος μακρού πασσάλου



Σχήμα 3.7 Στατικό προσομοίωμα με χρήση ελατηρίων Winkler

Για τον έλεγχο του μακρού πασσάλου επελέγη η δημιουργία ενός στατικού προσομοιώματος με ελατήρια Winkler (Σχήμα 3.7) το οποίο μέσω ενός προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων μας οδηγεί στη μέγιστη ροπή που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου. Απαραίτητες για αυτήν την στατική επίλυση είναι η καμπύλες  $p-y$  των διάφορων ελατηρίων. Οι καμπύλες  $p-y$  βασίζονται στο ελατηριωτό προσομοίωμα του εδάφους αλλά τα ελατήρια θεωρούνται μη-γραμμικά. Η χάραξη τους

βασίζεται σε επί τόπου δοκιμές και το σχήμα τους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά αντοχής του εδάφους και την τάση περισφίξης του περιβάλλοντος εδάφους.<sup>[12]</sup>

#### α) για συνεκτικά εδάφη<sup>[14]</sup>

Για στατικά φορτία η καμπύλη  $p-y$  που προτάθηκε από τον Matlock (1970) είναι η ακόλουθη:

$$p = \begin{cases} 0.5 * p_u * \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^{1/3} & , \quad \text{για } y \leq 8 * y_{50} \\ p_u & , \quad \text{για } y > 8 * y_{50} \end{cases} \quad (3.15)$$

Su	<24	24-48	48-96	96-192	>192
ε <sub>50</sub>	0.02	0.01	0.006	0.005	0.004

Πίνακας 3.7 Υπολογισμός τιμής ε<sub>50</sub> από συντελεστή αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.

$$y_{50} = 2.5 * \varepsilon_{50} * B \quad (3.16)$$

$$p_u = \begin{cases} \left(3 + \frac{\sigma'_v}{S_u} + J * \frac{z}{B}\right) & , \quad \text{για } z < z_{cr} \\ 9 * S_u * B & , \quad \text{για } z \geq z_{cr} \end{cases} \quad (3.17)$$

όπου :  $\sigma'_v$  = οριζόντια ενεργή τάση

$S_u$  = συντελεστής αστράγγιστης διατμητικής αντοχής

$J$  = εμπειρική παράμετρος 0.5 για μαλακές και 0.25 για μέτριες και σφιχτές αργίλους

$z_{cr}$  = κρίσιμο βάθος

$$z_{cr} = \frac{6 * B}{B * \frac{\gamma}{\sigma_u} + J} \geq 2.5 * B \quad (3.18)$$

**β) για μη-συνεκτικά εδάφη<sup>[14]</sup>**

Για μη-συνεκτικά εδάφη η καμπύλη p-y που χρησιμοποιήθηκε, στηριζόμενη και στις σχέσεις του API (2002)

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{ini} * z} + \frac{y}{p_{ult}}} \quad (3.19)$$

$k_{ini}$  = δείκτης αρχικής δυσκαμψίας

$$k_{ini} = k_{ini,0} * \left(1 - \frac{z/D}{1 + z/D}\right) * \left(\frac{D}{0.6}\right)^{-0.35} \quad (3.20)$$

όπου :  $k_{ini,0}$  : Δείκτης αρχικής δυσκαμψίας στην επιφάνεια του εδάφους σύμφωνα με τον πίνακα 3.8.

Σχετική Ποκνότητα	Χαλαρές Αμμοι	Άμμοι Μέσης Ποκνότητας	Ποκνές Αμμοι
$k_{ini,0}$ (kPa/m)	18000	30000	45000

Πίνακας 3.8 Δείκτης αρχικής δυσκαμψίας στην επιφάνεια του εδάφους.

$z$  : Βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

$D$  : Διάμετρος πασσάλου

$p_{ult}$  = οριακή εδαφική αντίδραση

$$\frac{p_{ult}}{\sigma'_{v0} * D} = \begin{cases} \min \left\{ \begin{array}{l} C_1 * \frac{z}{D} + C_2 \\ C_3 \end{array} \right. & , \text{για } z/D \leq z/D_{cr} \\ \text{σταθερό αυτό που ισχύει για } z/D = z/D_{cr} & , \text{για } z/D > z/D_{cr} \end{cases} \quad (3.21)$$

Όπου ο όρος  $(z/D)_{cr}$  αντιστοιχεί στο βάθος αλλαγής του μηχανισμού αστοχίας και μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$z/D_{cr} = (6 \div 7) * \left(\frac{D_r}{50\%}\right) * \left(\frac{D}{0.6}\right)^{-0.64} \quad (3.22)$$

Και οι  $C_1$ ,  $C_2$  και  $C_3$  αποτελούν συντελεστές συναρτήσεως της γωνίας τριβής του εδάφους και υπολογίζονται:

$$C_1 = 0.115 * 10^{0.0405 * \varphi} \quad (3.23)$$

$$C_2 = 0.571 * 10^{0.022*\varphi} \quad (3.24)$$

$$C_3 = 0.646 * 10^{0.0555*\varphi} \quad (3.25)$$

Επειδή όμως η χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων με καμπύλες p-y θα αύξανε το χρόνο που θα χρειαζόταν το πρόγραμμα, ειδικά απ τη στιγμή που όπως θα παρουσιαστεί και εκτενέστερα στο κεφάλαιο 5.2 (Επιλογή βέλτιστου πασσάλου ανά θέση) για κάθε θέση θα χρειαστούν πολλές δοκιμές για διαφορετικούς συνδυασμούς διαμέτρου-μήκους, επελέγη στο κομμάτι της προδιαστασιολόγησης να χρησιμοποιηθούν τα γραμμικά διαγράμματα p-y και η μέγιστη ροπή να υπολογιστεί μέσω κώδικα.

Για τον υπολογισμό του δείκτη εδάφους  $k_h$  των γραμμικών διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Broms.<sup>[12]</sup>

**α) για συνεκτικά εδάφη:**

\*Οι εδαφικές αντιδράσεις στην οριζόντια φόρτιση του πασσάλου για βάθος 1.5B θεωρούνται μηδενικές, επομένως σε αυτό το τμήμα τοποθετούνται ελατήρια με δείκτη εδάφους ίσο με 0.

$$k_h = 0.4 * \frac{k}{B} \quad (3.26)$$

Su (kN/m <sup>2</sup> )	50-100	100-200	200-400
k (MN/m <sup>3</sup> )	8	16	32

Πίνακας 3.9 Δείκτης εδάφους k κατά Broms για συνεκτικά εδάφη

**β) για μη-συνεκτικά εδάφη:**

$$k_h = n_h * \frac{z}{B} \quad (3.27)$$

D <sub>r</sub> (%)	<50	50-75	75-100
n <sub>h</sub> (MN/m <sup>3</sup> )	2.5	7.5	20

Πίνακας 3.10 Συντελεστής n<sub>h</sub> κατά Broms για μη-συνεκτικά εδάφη

\*οι τιμές αυτές των μη-συνεκτικών εδαφών ισχύουν για ξηρή άμμο, σε περίπτωση υγρής απομειώνονται στο 60%.

### 3.4 Σύνοψη

Συνοψίζοντας, οι κίνδυνοι απ' τους οποίους πρέπει να προφυλαχθεί ένας πάσσαλος είναι οι ακόλουθοι τέσσερις. Κίνδυνος βύθισης του πασσάλου, κίνδυνος εξόλκευσης του πασσάλου, κίνδυνος αστοχίας του περιβάλλοντος εδάφους λόγω κάθετης μετατόπισης του πασσάλου, χωρίς το έδαφος να μπορεί να την εμποδίσει(αστοχία κοντού πασσάλου) και τέλος δομική αστοχία του πασσάλου(αστοχία μακρού πασσάλου). Οι τρεις πρώτοι κίνδυνοι αντιμετωπίζονται μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά του πασσάλου(διάμετρος - μήκος) αυξάνοντας τις επιφάνειες του πασσάλου που αλληλεπιδρούν με το έδαφος, ενώ ο τέταρτος με τοποθέτηση κατάλληλου οπλισμού στον πάσσαλο για να αυξήσουμε την καμπτική του αντοχή.



# 4

## Χαρακτηριστικά ομάδας πασσάλων

---

### 4.1 Γενικά

Η διαστασιολόγηση της ομάδας πασσάλων χωρίζεται σε δυο μεγάλα κομμάτια: αφενός τη διαστασιολόγηση του κεφαλόδεσμου και αφετέρου την τοποθέτηση των πασσάλων.

Ο κεφαλόδεσμος συμπεριφέρεται ως πλάκα επί της οποίας ασκούνται “σημειακά” φορτία και ως τέτοια διαστασιολογείται. Ως “σημειακά” φορτία αναφέρονται αυτά της ανωδομής αλλά και οι αντιδράσεις στήριξης στις θέσεις που έχουν τοποθετηθεί οι πάσσαλοι. Ο κεφαλόδεσμος ανάλογα με τη συμπεριφορά του διακρίνεται σε εύκαμπτο και δύσκαμπτο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε αποκλειστικά και μόνο με δύσκαμπτους κεφαλόδεσμους. Το αν ο κεφαλόδεσμος μπορεί να θεωρηθεί δύσκαμπτος, εξαρτάται από το πάχος του, τη σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας του συγκριτικά με το μέτρο ελαστικότητας της ανώτερης εδαφικής στρώσης και τέλος την απόσταση μεταξύ των πασσάλων.

Πέρα όμως απ’ αυτό η θέση των πασσάλων έχει άμεση σχέση και με τα φορτία που εν τέλει αντιστοιχούν σε κάθε πάσσαλο, καθώς και με ενδεχόμενη αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Όπως γίνεται αντιληπτό η τοποθέτηση των πασσάλων αποτελεί ίσως το κρισιμότερο κομμάτι της Διαστασιολόγησης, η ακριβής διάταξή τους όμως είναι ένα κομμάτι που θα μας απασχολήσει σε επόμενο κεφάλαιο, στο κομμάτι της βελτιστοποίησης. Προς το παρόν θα ασχοληθούμε με τους κινδύνους που ενδέχεται να δημιουργηθούν και με το πώς αυτοί θα αντιμετωπιστούν, καθώς επίσης και με την διαδικασία μεταφοράς των φορτίων της ανωδομής στους πασσάλους και ο υπολογισμός των φορτίων που αντιστοιχεί σε κάθε πάσσαλο.



## 4.2 Διαστασιολόγηση κεφαλόδεσμου

Η διαστασιολόγηση του κεφαλόδεσμου θα γίνει σε δυο φάσεις. Αρχικά θα γίνει η επιλογή του κατάλληλου πάχους, έτσι ώστε ο κεφαλόδεσμος να είναι σχεδόν άκαμπτος και επομένως να συμπεριφέρεται ως στερεό σώμα το οποίο έχει τη δυνατότητα να κινείται χωρίς να μεταβάλλει τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά. Εν συνεχεία θα γίνουν όλοι οι έλεγχοι που απαιτούνται για να εντοπιστεί ο απαιτούμενος οπλισμός, θεωρώντας τον κεφαλόδεσμο ως πλάκα.

### 4.2.1 Δύσκαμπτος κεφαλόδεσμος

Οι κεφαλόδεσμοι ανάλογα με τη δυσκαμψία τους διακρίνονται σε εύκαμπτους ή δύσκαμπτους. Στους εύκαμπτους κεφαλόδεσμούς οι πάσσαλοι τοποθετούνται έτσι ώστε να αναλαμβάνουν φορτία της ανωδομής που βρίσκονται πλησίον τους. Μιας και ο κεφαλόδεσμος δεν διασφαλίζει την κίνηση όλων των πασσάλων ως στερεού σώματος κάθε πάσσαλος καθιζάνει ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους. Η λογική της σχεδίασης εύκαμπτου κεφαλόδεσμου, πέρα από την απαίτηση για ικανοποίηση της φέρουσας ικανότητας κάθε πασσάλου, προϋποθέτει ότι όλοι οι πάσσαλοι θα οδηγηθούν σε κοινές(ή έστω παραπλήσιες) καθιζήσεις. Κάτι τέτοιο μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο για συγκεκριμένη φόρτιση ή συνδυασμό φορτίσεων. Σε περίπτωση που η κατασκευή καταπονηθεί με διαφορετική φόρτιση από αυτήν που διαστασιολογήθηκε το αποτέλεσμα θα είναι οι πάσσαλοι να οδηγηθούν σε διαφορετικές καθιζήσεις, θέτοντας σε κίνδυνο τον κεφαλόδεσμο, ακόμα και την ίδια την κατασκευή. Για το λόγο αυτό συνηθίζεται η χρήση δύσκαμπτων κεφαλόδεσμων.

Οι δύσκαμπτοι κεφαλόδεσμοι δεν παραμορφώνονται, αυτό σημαίνει ότι σε αυτήν την περίπτωση κεφαλόδεσμος και πάσσαλοι συνθέτουν ένα στερεό σώμα το οποίο έχει τη δυνατότητα είτε να περιστρέφεται είτε να μετακινείται χωρίς να αλλάζει η γεωμετρία του. Για οποιοδήποτε συνδυασμό φόρτισης λοιπόν η βάση στην οποία θα στηριχτεί η ανωδομή παραμένει επίπεδη και διασφαλίζει το σύνολο της κατασκευής, αρκεί να διασφαλίζεται η φέρουσα ικανότητα κάθε μεμονωμένου πασσάλου.

Το πάχος του κεφαλόδεσμου για την επίτευξη της απαραίτητης δυσκαμψίας ώστε να μπορεί ο κεφαλόδεσμος να θεωρείται άκαμπτος εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο

από το πάχος των πάσσαλων. Έτσι σύμφωνα με τον Reynolds το πάχος που προτείνεται ανάλογα με το πάχος των πασσάλων  $d$  είναι:

$$h = \begin{cases} 2 * d + 100 & , \text{ για } d \leq 550\text{mm} \\ 8 * \frac{(d - 100)}{3} & , \text{ για } d > 550\text{mm} \end{cases} \quad (4.1)$$

Η σχέση αυτή είναι προσεγγιστική, ωστόσο έχει πειραματικά αποδειχθεί ότι για αυτά τα χαρακτηριστικά κεφαλόδεσμου, τα φορτία που διανέμονται σε κάθε πάσσαλο προσεγγίζουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό τα φορτία που προκύπτουν από την ακόλουθη μέθοδο. Προκύπτει επίσης ότι για την ελάχιστη και τη μέγιστη διάμετρο που λαμβάνει ένας πάσσαλος το πάχος του κεφαλόδεσμου ξεκινάει από 70cm και φτάνει πάνω από 7.50 m.<sup>[15]</sup>

#### 4.2.2 Έλεγχοι κεφαλόδεσμου

Οι έλεγχοι που πρέπει να γίνουν σε έναν κεφαλόδεσμο στόχο έχουν τον υπολογισμό του απαιτούμενου οπλισμού. Οι έλεγχοι αφορούν τις φορτίσεις από την ανωδομή καθώς και αυτές από τους πασσάλους.<sup>[16]</sup>

##### α) Έλεγχος σε κάμψη και τέμνουσα

Ο έλεγχος σε κάμψη και τέμνουσα ακολουθεί την κλασσική διαδικασία όπλισης πλάκας. Με βάση τα φορτία της ανωδομής και με τις αντιδράσεις στήριξης στις θέσεις των πασσάλων δημιουργούμε τα διαγράμματα καμπτικών ροπών και τεμνουσών δυνάμεων. Χρησιμοποιώντας αυτά τα διαγράμματα υπολογίζονται οι οπλισμοί που πρέπει να τοποθετηθούν στη βάση και στην οροφή του κεφαλόδεσμου. Ο συνήθης τρόπος όπλισης του κεφαλόδεσμου είναι η χρήση εσχάρας.<sup>[16]</sup>

##### β) Έλεγχος έναντι διάτρησης

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει ο έλεγχος έναντι διάτρησης, μιας και η “πλάκα” που εξετάζουμε δέχεται συγκεντρωμένα φορτία και δεν διαθέτει δοκούς να τα αναλάβουν.

Όσον αφορά τον έλεγχο για τα φορτία από τους πασσάλους θα θεωρήσουμε τους πασσάλους ως υποστυλώματα. Σύμφωνα με τον EC2 ο έλεγχος σε διάτρηση περιλαμβάνει τρεις βασικούς ελέγχους:

- Στην περίμετρο του υποστυλώματος - πασσάλου(ή αλλιώς στην περίμετρο του φορτίου) δεν επιτρέπεται η υπέρβαση της μέγιστης αντοχής σε διάτρηση, σε περίπτωση υπέρβασης απαιτείται αλλαγή του πάχους της πλάκας

$$v_{Ed} < v_{Rd,max}, \text{ όπου } v_{Rd,max} = 0.5 * v * f_{cd} \quad (4.3) \text{ και } v = 0.6 * \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (4.2)$$

ενώ η περίμετρος του φορτίου ορίζεται ίση με  $u_0 = 2 * \pi * R$

- Στην βασική περίμετρο ελέγχου  $u_1$ , σε απόσταση  $2d$  από την παρειά του υποστυλώματος - πασσάλου πρέπει η αντοχή της πλάκας έναντι διάτρησης  $v_{Rd,c}$  (χωρίς οπλισμό διάτρησης) να είναι μικρότερη από την δρώσα τάση

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_1 * f_{ck})^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 * \sigma_{cp}) \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \text{όπου } f_{ck} \text{ σε MPa} \quad v_{min} &= 0.0035 * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2} \quad C_{Rd,c} = 0.18 / \gamma_c \\ k_1 &= 0.1 \quad k = 1 + \sqrt{200/d}, d \text{ σε mm} \quad \rho_1 = \sqrt{\rho_{1z} * \rho_{1y}} \leq 0.02 \\ \sigma_{cp} &= (\sigma_{cy} + \sigma_{cz}) / 2 \end{aligned}$$

Οι  $\rho_{1z}$  και  $\rho_{1y}$  αναφέρονται στον εφελκόμενο οπλισμό με συνάφεια στις διευθύνσεις  $y$  και  $z$ , αντιστοίχως και πρέπει να υπολογίζονται ως μέσες τιμές, θεωρώντας ένα πλάτος πλάκας ίσο προς το πλάτος του υποστυλώματος συν  $3d$  σε κάθε πλευρά. Ενώ οι  $\sigma_{cy}$  και  $\sigma_{cz}$  είναι οι ορθές τάσεις στο σκυρόδεμα της κρίσιμης διατομής στις διευθύνσεις  $y$  και  $z$  (σε MPa, θετικές για θλίψη).

Η περίμετρος του φορτίου ορίζεται  $u_1 = 2 * \pi * (R + 2d)$

- Τέλος όταν  $v_{Ed} > v_{Rd,c}$  τότε απαιτείται οπλισμός διάτρησης τέτοιος ώστε η συνολική του αντοχή να ισούται με:

$$v_{Rd,cs} = 0.75 * v_{Rd,c} + 1.5 * \frac{d}{s_r} * A_{sw} * f_{ywd,ef} * \frac{1}{u_1 * d} * \sin a \quad (4.4)$$

όπου:  $A_{sw}$  = το εμβαδόν του οπλισμού διάτμησης κατά μήκος μιας από τις περιμέτρους γύρω από το υποστυλόμετρο (σε mm<sup>2</sup>)

$s_r$  = η αξονική απόσταση των περιμέτρων του οπλισμού διάτμησης (σε mm)

$f_{ywd,ef}$  = η δρώσα τιμή σχεδιασμού της αντοχής του οπλισμού διάτμησης σύμφωνα με τη σχέση  $f_{ywd,ef} = 250 + 0.25d \leq f_{ywd}$  (σε MPa)

$d$  = ο μέσος όρος των στατικών υψών σε δυο κάθετες διευθύνσεις (σε mm)

$\alpha$  = η γωνία που σχηματίζει ο οπλισμός διάτμησης με το επίπεδο της πλάκας

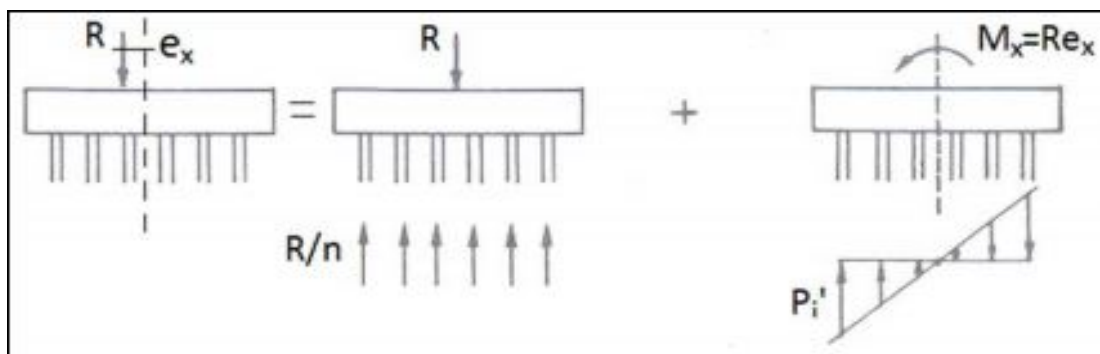
Η περιμετρος του φορτίου ορίζεται όπως και πριν  $u_1 = 2 * \pi * (R + 2d)$

Η δρώσα διατμητική τάση  $v_{Ed}$  (σε MPa) δίνεται από τη σχέση :  $v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{u_1 * d}$  (4.5)

[17] [18]

### 4.3 Κατανομή φορτίων ανωδομής στους πασσάλους

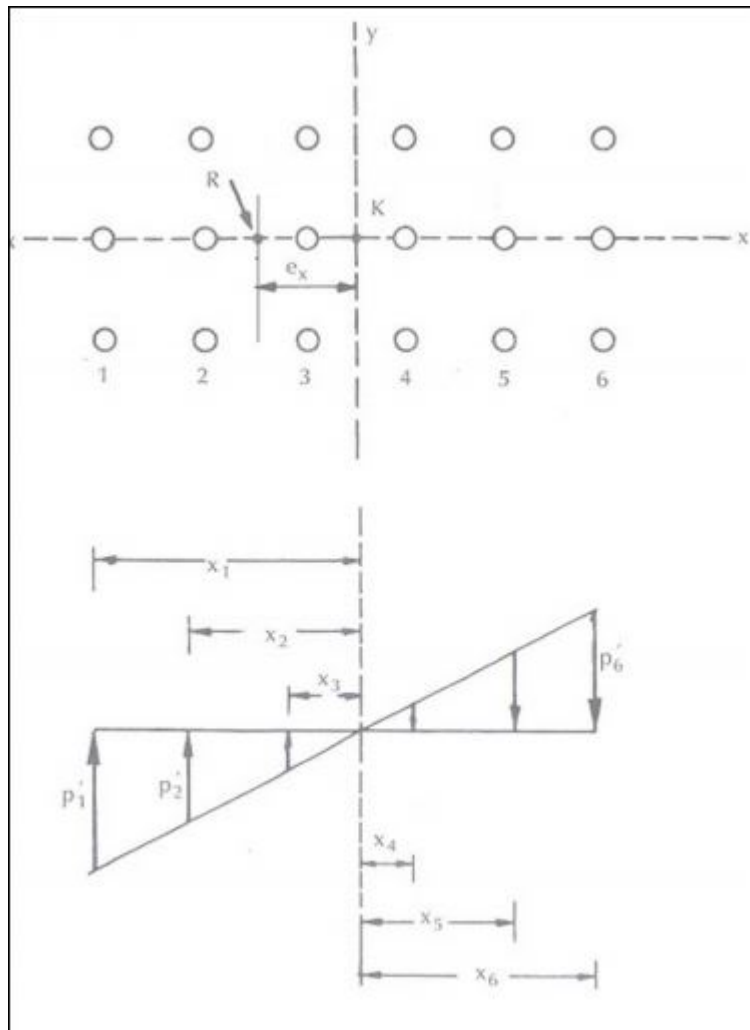
Σε έναν δύοκαμπτο κεφαλόδεσμο, τα κατακόρυφα φορτία που ασκούνται στο κέντρο βάρους της πασσαλο-ομάδας κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλους τους πασσάλους, τα οριζόντια φορτία κατανέμονται ανάλογα με το πάχος κάθε πασσάλου, ενώ οι συγκεντρωμένες ροπές αναλύονται σε αξονικές δυνάμεις στους πασσάλους ανάλογα με την απόσταση τους από το κέντρο βάρους. Αφού λοιπόν είναι γνωστή η ανάλυση των δυνάμεων αρκεί να ασκούνται στο κέντρο βάρους της πασσαλο-ομάδας μεταφέρουμε όλες τις δυνάμεις που ασκούνται στην ανωδομή στο κέντρο βάρους της πασσαλο-ομάδας και στη συνέχεια τους κατανέμουμε στους πασσάλους. Τα κατακόρυφα φορτία  $R$  με εκκεντρότητα  $e_x$  και  $e_y$  μεταφέρονται ως κατακόρυφα  $R$  και ως ροπές  $M_x = R * e_x$  και  $M_y = R * e_y$  (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Μεταφορά φορτίου στο κέντρο βάρους της πασσαλο-ομάδας

Αφού με αυτόν τον τρόπο μεταφερθεί το σύνολο των φορτίων της ανωδομής στο κέντρο του κεφαλόδεσμου, θα πρέπει να αναλύθουν στο σύνολο της πασσαλοομάδας, δίνοντας την φέρουσα ικανότητα με την οποία πρέπει να διαστασιολογηθεί κατόπιν ο κάθε πάσσαλος. Η αξονική που αντιστοιχεί σε κάθε πάσσαλο είναι ανάλογη της θέσης του πάσσαλου ως προς το κέντρο βάρους και αντιστρόφως ανάλογη του αθροίσματος των τετραγώνων των αποστάσεων όλων των πασσάλων από το κέντρο βάρους.

$$P_i = \frac{R}{n} + M_x * \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} + M_y * \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (4.6)$$



Σχήμα 4.2 Αντίδραση που αντιστοιχεί σε κάθε πάσσαλο λόγω ροπής από εκκεντρότητα

Με τον τρόπο αυτό για τους διάφορους συνδυασμούς φόρτισης υπολογίζονται οι διάφορες φορτίσεις που αναμένονται να αναπτυχθούν στην κορυφή του κάθε πασσάλου. Επομένως για να θεωρήσουμε ότι η πασσαλοομάδα (πάσσαλοι και

κεφαλόδεσμος) είναι ασφαλής, θα πρέπει οι πάσσαλοι που θα τοποθετηθούν σε κάθε θέση να έχουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που θα οδηγήσουν σε φέρουσες ικανότητες μεγαλύτερες ή ίσες από τις μέγιστες φορτίσεις που υπολογίστηκαν.<sup>[6]</sup>

#### 4.4 Αλληλεπίδραση μεταξύ πασσάλων

Η διαστασιολόγηση των πασσάλων που έγινε στο κεφάλαιο 3, αφορούσε μεμονωμένους πασσάλους. Όταν έχουμε περισσότερους από έναν πάσσαλο σε μικρή σχετικά απόσταση μεταξύ τους, όπως είναι αναμενόμενο αυτοί οι πάσσαλοι θα διαταράξουν την κατάσταση του εδάφους επηρεάζοντας πρακτικά ο ένας την τελική αντοχή του άλλου. Για τον ορθό σχεδιασμό μιας ομάδας πασσάλων, είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης τόσο των πασσάλων μεταξύ τους, όσο και της ομάδας με το περιβάλλον έδαφος.

Το πόσο θα επηρεαστούν οι πάσσαλοι από την συνύπαρξή τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με κυριότερους την μεταξύ τους απόσταση, το είδος και τα χαρακτηριστικά του εδάφους και κυρίως το είδος των πασσάλων και τον τρόπο που αυτοί τοποθετήθηκαν. Παραδείγματος χάριν, αν τοποθετήσουμε πασσάλους εκτοπίσεως, με χρήση δονητών για την έμπηξη τους, σε ένα αργιλικό έδαφος μικρής συνοχής, υπάρχει κίνδυνος να προκαλέσουμε περεταίρω μείωση της συνοχής του απομειώνοντας έτσι την αντοχή τριβής των κοντινών πασσάλων, αντιθέτως αν χρησιμοποιήσουμε την ίδια διαδικασία σε ένα μη-συνεκτικό έδαφος (π.χ. άμμο) η συμπίεση της άμμου θα οδηγήσει σε αύξηση της οριζόντιας ενεργού τάσης που ασκείται στην περιφέρεια του πασσάλου αυξάνοντας έτσι την αντοχή πλευρικής τριβής του πασσάλου.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων αφορά τόσο αξονικά φορτία όσο και διατμητικά φορτία. Ο υπολογισμός του συντελεστή της επιρροής μεταξύ των πασσάλων, ή όπως συχνότερα εμφανίζεται στη βιβλιογραφία ο συντελεστής αποδοτικότητας ( $E_f$ ) ενός πασσάλου δεν είναι τόσο εύκολο να προβλεφθεί. Το γεγονός ότι η συμπεριφορά του εδάφους δεν μπορεί να προβλεφθεί ακριβώς, λόγω των τόσων πολλών αβεβαιοτήτων που υπάρχουν δυσκολεύει τον ακριβή του υπολογισμό. Όσον αφορά τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης των πασσάλων μεταξύ τους έχουν διερευνηθεί κυρίως με πειραματικές διατάξεις σε ομοιώματα πασσάλων μικρών διαστάσεων. Αντίστοιχα στοιχεία από πραγματικές διατάξεις

πασσάλων είναι σχετικά περιορισμένα, λόγω της μεγάλης κλίμακας και του κόστους τέτοιων ερευνών και για τον λόγο αυτό κατά την διαστασιολόγηση χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από τα ομοιώματα πασσάλων.

Σε ορισμένες περιπτώσεις αυτές οι εμπειρικές σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον ορισμό των αποστάσεων μεταξύ των πασσάλων. Για πολύ μικρές αποστάσεις οι συντελεστές που προκύπτουν είναι πολύ μικροί και απομειώνουν την αντοχή των πασσάλων σε βαθμό που οδηγεί σε αντιοικονομικές λύσεις. Η αλληλεπίδραση λοιπόν των πασσάλων είναι αυτή που θα οδηγήσει τελικά στην επιλογή της ελάχιστης απόστασης μεταξύ τους.

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι επιρροή στο περιβάλλον έδαφος μπορεί να προκαλέσει και ο κεφαλόδεσμος όταν αυτός είναι σε επαφή με το έδαφος καθώς παρότι το αγνοούμε, αυτός αναλαμβάνει μέρος του φορτίου που ασκείται, συμπιέζοντας έτσι το έδαφος. Ωστόσο και αυτή η επιρροή του κεφαλόδεσμου αμελείται, μιας και οι συνθήκες που προκαλεί η αύξηση της οριζόντιας ενεργού τάσης είναι ευνοϊκές και αυξάνουν την αντοχή πλευρικής τριβής αλλά και την αντοχή αιχμής.<sup>[2]</sup>

#### **4.4.1 Συντελεστής αποδοτικότητας κατακόρυφων φορτίων**

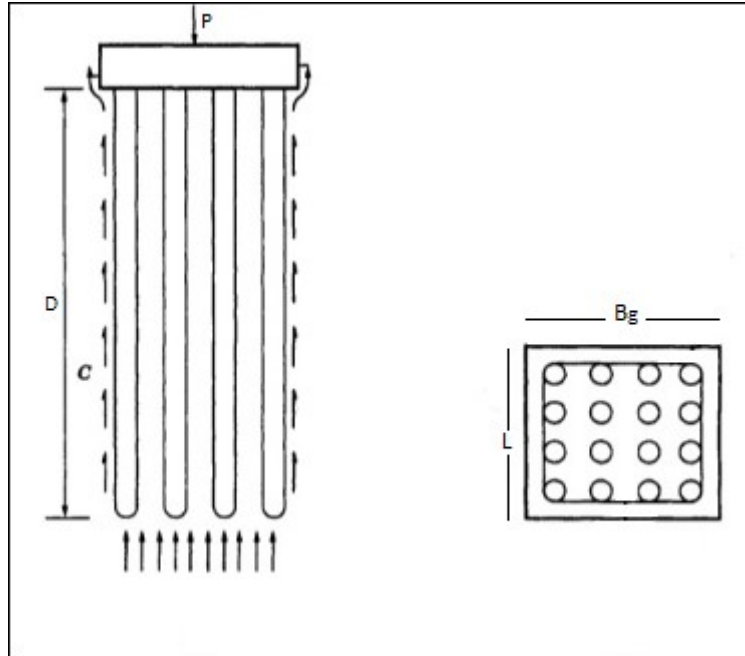
Κατά την κατακόρυφη φόρτιση ομάδας πασσάλων αναπτύσσονται δύο βασικοί μηχανισμοί αστοχίας σε αργλικά εδάφη. α) Θραύση τύπου βάρθρου, όπου το μεταξύ των πασσάλων έδαφος κινείται προς τα κάτω μαζί με τους πασσάλους ως να αποτελούσαν ένα ιδεατό ενιαίο βάρθρο και β) Διείσδυση των πασσάλων μεμονωμένα μέσα στο έδαφος.

##### **α) Θραύση τύπου βάρθρου**

Για αξονικές αποστάσεις των πασσάλων μικρότερες από  $2B$ , όπου  $B$  η διάμετρός τους, είναι πιθανότερη η ανάπτυξη μηχανισμού θραύσεως τύπου βάρθρου από την αστοχία των μεμονωμένων πασσάλων. Στην περίπτωση αυτή αντί να εξετάσουμε τους πασσάλους ξεχωριστά υπολογίζουμε τη φέρουσα ικανότητα της πασσαλο-ομάδας ως την αντοχή τριβής ενός κιβωτίου. Αντί λοιπόν να ελέγχουμε την περιφέρεια των πασσάλων και την συνολική τους επιφάνεια, ως επιφάνεια που αναπτύσσει την πλευρική τριβή θεωρούμε αυτή του ιδεατού κιβωτίου. Η φέρουσα ικανότητα αυτή εκτιμάται σύμφωνα με την σχετική πρόταση των Terzaghi-Peck(1948) κατά τη σχέση:

$$P_{gu} = B_g * L * S_c * d_c * N_c * c_u + 2 * D * (B_g + L) * \bar{c}_u \quad (4.7)$$

όπου:  $B_g$ ,  $L$ ,  $D$  = πλάτος, μήκος και βάθος θεμελιώσεων του ιδεατού βάρους που περιβάλλει η ομάδα των πασσάλων (Σχήμα 4.3)



Σχήμα 4.3 Τομή και κάτοψη ομάδας πασσάλων

$N_c$  = συντελεστής Φ.Ι. για συνθήκες  $\varphi_u = 0$  και μορφή θεμελίου λωρίδα

$S_c$  = διορθωτικός συντελεστής μορφής

$d_c$  = διορθωτικός συντελεστής βάθους

$c_u$  = η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους κάτω από τη βάση

$\bar{c}_u$  = η μέση αστράγγιστη διατμητική αντοχή καθ' ύψος των πασσάλων

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι αφού υπολογιστεί η φέρουσα ικανότητα από τον άνωθεν τύπο θα πρέπει να γίνει και ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας κάθε πασσάλου χωριστά και να βρούμε την αντοχή του συνόλου των πασσάλων. Αν αυτή είναι μικρότερη από αυτήν που προκύπτει από την σχέση των Terzaghi-Peck, τότε δεχόμαστε αυτήν ως φέρουσα ικανότητα της ομάδας.<sup>[19]</sup>

Η μεγάλη αυτή απομείωση της φέρουσας ικανότητας της ομάδας μας οδηγεί στην απόρριψη αυτών των λύσεων. Έτσι πρακτικά η θραύση τύπου βάρους θα



χρησιμοποιηθεί για να ορίσουμε την ελάχιστη απόσταση μεταξύ πασσάλων. Όπως έχει παρατηρηθεί από την πράξη (Burland, 1998) για αξονικές αποστάσεις πασσάλων  $e > 3B$  δεν είναι πιθανή η δημιουργία μηχανισμού θραύσεως τύπου βάρθρου.<sup>[11]</sup>

### β) Δεισδυση των πασσάλων

Η αποδοτικότητα μιας ομάδας πασσάλων ορίζεται από τη σχέση:

$$E_f = P_{gu} / \sum_{i=1}^n P_{ui} \quad (4.8)$$

όπου  $P_{ui}$  η φέρουσα ικανότητα του μεμονωμένου πασσάλου. Με βάση τον ανώτερο ορισμό η φέρουσα ικανότητα της ομάδας συνδέεται κατ' αρχήν με αυτήν του μεμονωμένου πασσάλου. Η αποδοτικότητα εντούτοις αφορά κυρίως το οριακό φορτίο του πασσάλου λόγω πλευρικών τριβών  $Q_s$ , διότι όπως έχει παρατηρηθεί η αντοχή αιχμής  $Q_b$  των πασσάλων μιας ομάδας δεν υπόκειται σε μείωση λόγω αλληλεπίδρασης μεταξύ τους.

Την παρατήρηση αυτή για την αντοχή αιχμής των πασσάλων έχει διατυπώσει ο Vesic(1977) σε πασσάλους με αξονικές αποστάσεις μεγαλύτερες των 2,5 διαμέτρων. Έτσι κατά τον υπολογισμό του οριακού φορτίου εδάφους της ομάδας ο συντελεστής αποδοτικότητας  $E_f$  θα εφαρμόζεται μόνο στην αντοχή λόγω πλευρικών τριβών. Συγκεκριμένα αν  $P_u = Q_b + Q_s$  το οριακό φορτίο του μεμονωμένου πασσάλου, τότε το οριακό φορτίο της ομάδας πασσάλων θα πρέπει να υπολογίζεται:

$$P_{gu} = \sum_{i=1}^n Q_b + E_f * \sum_{i=1}^n Q_s \quad (4.9)$$

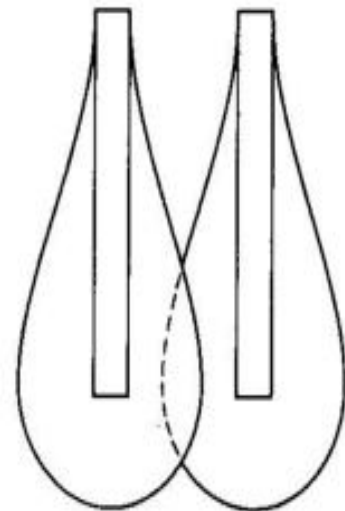
Για τη συνήθη χρησιμοποιούμενη στην πράξη αξονική απόσταση μεταξύ πασσάλων τριβής,  $e = 3B$ , τόσο από τις ανωτέρω διαπιστώσεις όσο και από παρατηρήσεις άλλων ερευνητών συνίσταται  $E_f \approx 0,7 - 0,8$  ενώ για  $e > 8B$  μπορούμε να θεωρούμε ότι χάνεται κάθε αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων και ο συντελεστής αποδοτικότητας λαμβάνεται ίσος με 1.<sup>[20]</sup>

### γ) Για μη-συνεκτικό έδαφος

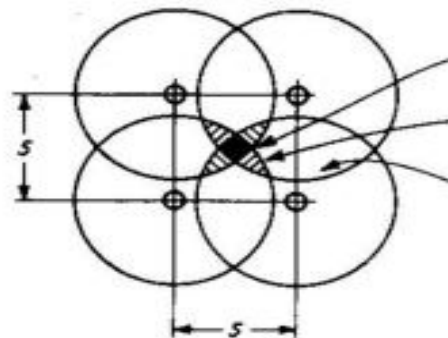
Οι γενικές αρχές υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας ομάδας πασσάλων σε άμμο είναι ανάλογες με αυτές για ομάδα πασσάλων σε άργιλο. Έτσι και στην άμμο κατά την έμπηξη των πασσάλων αλλοιώνεται η σύσταση του εδάφους και υπάρχει ανακατανομή των τάσεων εντός του εδάφους. Συνήθως αυτή η ανακατανομή λειτουργεί ευεργετικά υπέρ της αντοχής τριβής και επομένως δεν χρειάζεται υπολογισμός του συντελεστή αποδοτικότητας μιας και για τιμές μεγαλύτερες της μονάδας ο συντελεστής αμελείται.

Σε άμμους με χαλαρή έως μέση πυκνότητα, η έμπηξη μιας ομάδας πασσάλων έχει ως επακόλουθο την αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού μεταξύ των πασσάλων όσο και στην περιοχή που τους περιβάλλει. Αντιθέτως σε άμμο πυκνής διαστρώσεως, η κατασκευή των πασσάλων μπορεί να προκαλέσει χαλάρωση της δομής με συνέπεια η αποδοτικότητα της ομάδας να λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας.

Εργαστηριακά πειράματα επί ομοιωμάτων ομάδας κατακόρυφων πασσάλων σε άμμο (Vesic, 1969) έδειξαν ότι θραύση τύπου βάρους συμβαίνει για περιπτώσεις μικρών αξονικών αποστάσεων  $e$ , μεταξύ των πασσάλων, ενώ αντίθετα για μεγάλες τιμές της  $e$ , λαμβάνει χώρα διείσδυση των μεμονωμένων πασσάλων. Διαπιστώθηκε επίσης ότι η αύξηση της αποδοτικότητας των πασσάλων οφειλόταν κυρίως στην αύξηση των πλευρικών τριβών, ενώ αντίθετα η αποδοτικότητα της αιχμής ήταν σχεδόν πάντα ίση με τη μονάδα. Σύμφωνα με παρατηρήσεις του Broms (1975) η αντοχή αιχμής των εμπηγνυόμενων πασσάλων αυξάνει με την αύξηση του αριθμού τους στην ομάδα - σε σχέση με την αντοχή αιχμής του μεμονωμένου - λόγω της φαινόμενης αυξήσεως της πίεσεως εξ υπερκείμενων γαιών από την αλληλοτομή των βολβών πίεσεως των μεμονωμένων πασσάλων της ομάδας (όπως φαίνεται και στα σχήματα 4.4 και 4.5). Επίσης και



Σχήμα 4.4 Τομή βολβών τάσεων



Σχήμα 4.5 Κάτοψη βολβών τάσεων γύρω από πασσάλους

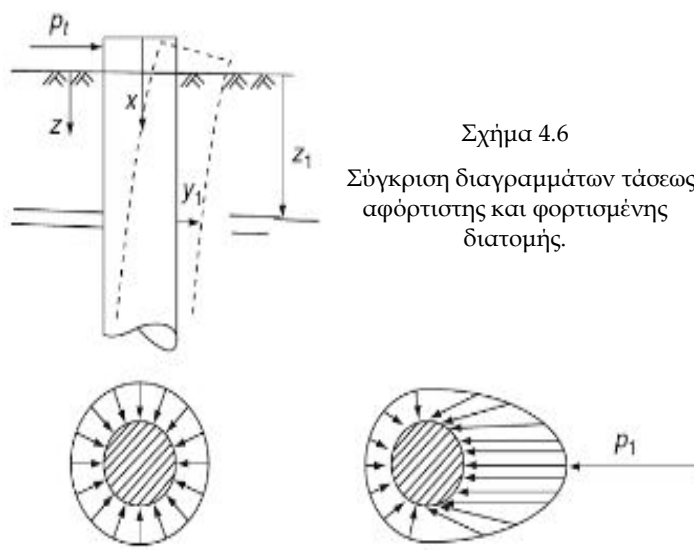
η πλευρική τριβή αυξάνει με την αύξηση του αριθμού των πασσάλων, λόγω αυξήσεως των πλευρικών εδαφικών πιέσεων από τις εμπήξεις.<sup>[20] [21]</sup>

#### 4.4.2 Συντελεστής αποδοτικότητας οριζόντιων φορτίων

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων από οριζόντιες φορτίσεις, σε αντίθεση με τις κατακόρυφες δεν είναι σταθερή, εξαρτάται από το φορτίο που επιβάλλεται και το πόσο ο προπορευόμενος πάσσαλος(στη φορά της φόρτισης) τείνει να συμπίσει το έδαφος που παρεμβάλλεται μεταξύ αυτού και των πασσάλων που ακολουθούν ή το πόσο οι ακόλουθοι πάσσαλοι αποσυμπιέζουν το περιβάλλον έδαφος. Επειδή ωστόσο δεν είναι εύκολος ο υπολογισμός του συναρτήσεως του φορτίου δεδομένων και των αβεβαιοτήτων που υπάρχουν στο έδαφος, έχει επικρατήσει ο υπολογισμός συντελεστή αποδοτικότητας στηριζόμενοι αποκλειστικά και μόνο στις αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων, την θέση τους και τη διάμετρο τους. Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αλληλεπίδρασης των πασσάλων και στην παρούσα διπλωματική, είναι η μέθοδος Van Impe. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος αφορά και συνεκτικά και μη-συνεκτικά εδάφη και είναι ανεξάρτητη από τον τρόπο τοποθέτησης των πασσάλων.

#### Μέθοδος Van Impe

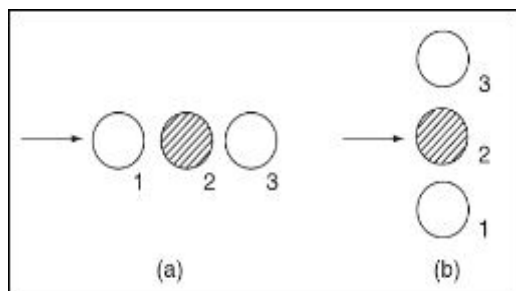
Η μέθοδος Van Impe υπολογίζει την επιρροή που έχει κάθε πάσσαλος της ομάδας σε κάθε πάσσαλο ξεχωριστά και τελικά υπολογίζει τον συντελεστή αποδοτικότητας κάθε πασσάλου ως το γινόμενο αυτών των επιρροών. Η θεώρηση αυτής της μεθόδου



Σχήμα 4.6  
Σύγκριση διαγραμμάτων τάσεως αφόρτιστης και φορτισμένης διατομής.

στηρίζεται στο πως θα συμπεριφερθεί το έδαφος από την προσπάθεια παράλληλης μετατόπισης ενός πασσάλου και στην αύξηση των τάσεων που θα αναπτυχθούν στο περιβάλλον έδαφος(Σχήμα 4.6).

Σύμφωνα με τον Van Impe η οριζόντια φόρτιση ενός πασσάλου επηρεάζει τόσο τους πασσάλους που βρίσκονται στην ίδια ευθεία με αυτόν στην διεύθυνση της φόρτισης



Σχήμα 4.7 Διάταξη πασσάλων για διαστασιολόγηση κατά Van Impe  
(α) Πάσσαλοι σε σειρά (β) Πάσσαλοι εν παραλλήλω

όσο και τους συνευθειακούς στην κάθετη διεύθυνση(Σχήμα 4.7). Επίσης θεωρεί ότι το αν ο πάσσαλος προηγείται ή αν ακολουθεί στην διεύθυνση που η δύναμη θέλει να μετακινήσει την ομάδα υπάρχει διαφορετική επιρροή. Στο Σχήμα 4.7 (α) ο πάσσαλος 3 προηγείται ενώ ο 1 ακολουθεί τον πάσσαλο 2.

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή ο συντελεστής αποδοτικότητας κάθε πασσάλου λόγω επιρροής κάποιου άλλου υπολογίζεται:

i) Για πλάγιους(side-by-side) πασσάλους:

$$e = 0.64 * \left(\frac{s}{b}\right)^{0.34} \quad \text{για } 1 \leq \frac{s}{b} \leq 3.75, \quad e = 1 \quad \text{για } \frac{s}{b} > 3.75 \quad (4.10)$$

ii) Για πασσάλους που προηγούνται(leading):

$$e = 0.70 * \left(\frac{s}{b}\right)^{0.26} \quad \text{για } 1 \leq \frac{s}{b} \leq 4.00, \quad e = 1 \quad \text{για } \frac{s}{b} > 4.00 \quad (4.11)$$

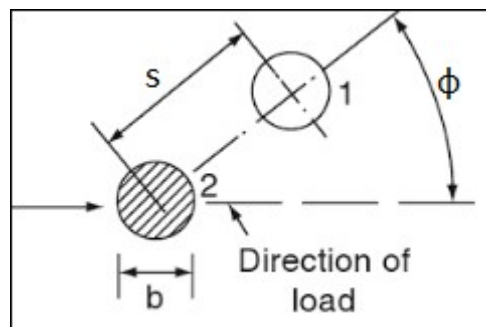
iii) Για πασσάλους που ακολουθούν(trailing):

$$e = 0.48 * \left(\frac{s}{b}\right)^{0.38} \quad \text{για } 1 \leq \frac{s}{b} \leq 7.00, \quad e = 1 \quad \text{για } \frac{s}{b} > 7.00 \quad (4.12)$$

όπου :  $s$  = απόσταση μεταξύ πασσάλων

$b$  = μέση διάμετρος των πασσάλων που μελετάμε

Σε περίπτωση που οι πάσσαλοι δεν είναι ούτε σε σειρά ούτε παράλληλοι, αλλά η διεύθυνση της δύναμης σχηματίζει γωνία  $\phi$  με την ευθεία που ενώνει τους πασσάλους(Σχήμα 4.8), τότε χρησιμοποιείται η τροποποιημένη, όπως διαμορφώθηκε από τους Reese & Wang(1996), σχέση:



Σχήμα 4.8 Πάσσαλοι η διεύθυνση των οποίων σχηματίζει γωνία τη δύναμη

$$e = (e_i^2 * \cos^2 \varphi + e_i^2 * \sin^2 \varphi)^{1/2} \quad (4.13)$$

όπου:  $e_i$  = επιρροή από πασσάλους σε σειρά

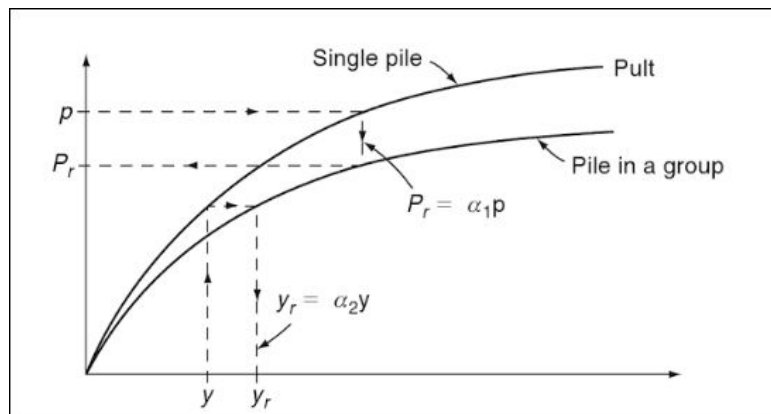
$e_j$  = επιρροή από πασσάλους εν παραλλήλω

$\varphi$  = γωνία που σχηματίζουν πάσσαλοι με φορτίο

Αφού υπολογίσουμε με τις προαναφερθείς σχέσεις την επιρροή που έχουν σε κάθε πάσσαλο, καθένας από τους υπόλοιπους πασσάλους ξεχωριστά μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή αποδοτικότητας του κάθε πασσάλου.

$$e_j = e_{1j} * e_{2j} * \dots * e_{ij} * \dots * e_{Nj} \quad , \text{όπου } I \neq j \quad (4.14)$$

Για να μπορέσουμε να εκμεταλλευτούμε τα διαγράμματα δύναμης-μετατοπίσεως p-y κάνουμε την αυθαίρετη, αλλά λογική, υπόθεση ότι οι τιμές της δύναμης(p) στα σχετικά διαγράμματα μπορούν να απομειωθούν θέτοντας  $\alpha_j = e_j$  σύμφωνα και με το σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9

Σύγκριση καμπών p-y μεταξύ μεμονωμένου πασσάλου και πασσάλου σε ομάδα

Με αυτόν τον τρόπο έχουμε υπολογίσει τον συντελεστή αποδοτικότητας του κάθε πασσάλου μιας ομάδας, θεωρώντας ωστόσο ότι οι κεφαλές των πασσάλων δεν συνδέονται μεταξύ τους. Πρακτικά αυτός ο συντελεστής καθορίζει την αλληλεπίδραση των πασσάλων δια μέσω του εδάφους. Οι πάσσαλοι όμως λόγω του κεφαλόδεσμου και ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που εξετάζονται στη παρούσα διπλωματική, όπου ο κεφαλόδεσμος είναι δύσκαμπτος αλληλεπιδρούν και δια μέσου της σύνδεσής τους, η οποία φροντίζει όλοι οι πάσσαλοι να μετακινούνται σαν στερεό σώμα. Η δυνατότητα του εδάφους να παραμορφώνεται και να μπορεί να ανακατανέμει τις τάσεις που αναπτύσσονται μας δίνει την δυνατότητα να

θεωρήσουμε ακόμα και αν δεν αποδεικνύεται πλήρως, ότι όλοι οι πάσσαλοι καταλήγουν να έχουν τον ίδιο συντελεστή αποδοτικότητας, ο οποίος προκύπτει ως ο μέσος όρος των συντελεστών αποδοτικότητας κάθε πασσάλου. Έτσι ο συντελεστής αποδοτικότητας που χρησιμοποιείται και αφορά το σύνολο της πασσαλο-ομάδας είναι:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (4.15)$$

Και αφού πλέον γνωρίζουμε τον συντελεστή αποδοτικότητας της πασσαλο-ομάδας είμαστε σε θέση να την διαστασιολογήσουμε αυξάνοντας το φορτίο σχεδιασμού, ώστε να υπολογίσουμε αυτήν την απομείωση που προκαλείται σύμφωνα και με το σχήμα 4.9 θέτοντας:

$$p_{dgroup} = P_d/e \quad (4.16)$$

όπου  $p_d$  είναι το οριζόντιο φορτίο που προέκυψε από την διαστασιολόγηση με βάση τα φορτία της ανωδομής, σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε νωρίτερα στο κεφάλαιο 4.3.<sup>[22]</sup>

## 4.5 Σύνοψη

Συνοψίζοντας, σε μια πάσσαλο-ομάδα ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διαστασιολόγηση πρέπει να δοθεί στο σχεδιασμό του κεφαλόμενου, μιας και μπορεί να δημιουργήσει μεγάλα προβλήματα τόσο στην ανωδομή αν είναι εύκαμπτος όσο και στην ίδια τη θεμελίωση. Επίσης, η μορφή του είναι αυτή που καθορίζει και την διανομή των φορτίων από την ανωδομή στους πασσάλους, καθώς αποτελεί συνδεδετικό κρίκο μεταξύ τους. Τέλος, πρέπει να υπολογισθεί η αλληλεπίδραση που δημιουργείται μεταξύ των πασσάλων και η απομείωση των αντοχών τους, που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν.

# 5

## Βελτιστοποίηση ομάδας πασσάλων

---

### 5.1 Γενικά

Η επιστήμη του μηχανικού έχει ως κύριο στόχο το σχεδιασμό και την κατασκευή συστημάτων, η πρόοδος ωστόσο της τεχνολογίας των υπολογιστών επέτρεψε την αύξηση των απαιτήσεων και πλέον ο σχεδιασμός ενός συστήματος που ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφαλείας δεν αποτελεί αποδεκτή λύση. Οι απαιτήσεις ασφαλείας αποτελούν αναγκαία, αλλά όχι ικανή συνθήκη για τον καθορισμό μιας λύσης. Είναι απαραίτητο το σύστημα να σχεδιαστεί με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο. Βέλτιστος ονομάζεται ένας σχεδιασμός που ικανοποιεί τις λειτουργικές προδιαγραφές, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα συγκεκριμένα κριτήρια, με πλέον σύνηθες αυτό του κόστους.

Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η εξεύρεση ενός συνδυασμού ανεξάρτητων μεταβλητών που λαμβάνουν πραγματικές ή ακέραιες τιμές και οι οποίες ονομάζονται παράμετροι ή μεταβλητές σχεδιασμού, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης συνήθως υπόκεινται σε περιορισμούς. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης συνήθως υπόκεινται σε περιορισμούς, όπως είναι το εύρος μέσα στο οποίο κινούνται οι παράμετροι σχεδιασμού το οποίο καθορίζει το χώρο αναζήτησης, αλλά και άλλες συναρτήσεις περιορισμού, οι οποίες καθορίζουν τον χώρο των αποδεκτών λύσεων του προβλήματος. Οι περιορισμοί αποτελούν τα φυσικά όρια που τίθενται στην επίτευξη του στόχου.<sup>[23]</sup>

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η βελτιστοποίηση θα αφορά την εξεύρεση του ελάχιστου δυνατού κόστους υλικών(σκυρόδεμα και χάλυβα), χωρίς να υπολογίζει άλλους παράγοντες που αυξάνουν το κόστος της κατασκευής όπως είναι τα εργατικά έξοδα, τα κόστη των μηχανημάτων κλπ. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που υπάρχουν



είναι τόσο ακέραιες(πλήθος πασσάλων) όσο και πραγματικές(γεωμετρικά χαρακτηριστικά πασσάλων). Τέλος οι περιορισμοί που αναπτύσσονται έχουν να κάνουν με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα και των λοιπών κανονιστικών διατάξεων που αφορούν τους πασσάλους και περιλαμβάνουν ελάχιστες και μέγιστες αποστάσεις μεταξύ τους, ελάχιστες και μέγιστες διαμέτρους, ελάχιστα και μέγιστα μήκη, ελάχιστο και μέγιστο ποσοστό οπλισμού κλπ.

Με λίγα λόγια στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της σχέσης:

$$\text{Κόστος} = V_c * c_c + V_s * c_s \quad (5.1)$$

όπου  $V_c$  = συνολικός όγκος σκυροδέματος

$c_c$  = κόστος σκυροδέματος ανά κυβικό μέτρο

$V_s$  = συνολικός όγκος χάλυβα

$c_s$  = κόστος χάλυβα ανά κυβικό μέτρο

## 5.2 Επιλογή βέλτιστου συνδυασμού πασσάλων

Στο κομμάτι της επιλογής του βέλτιστου συνδυασμού πασσάλων ακολουθήθηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι και στο τέλος συγκρίθηκαν τα αποτελέσματά τους. Και οι τρεις μέθοδοι παρουσιάζουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά και έχουν κοινή μεθοδολογία στα πρώτα βήματα.

Η πρώτη κοινή παραδοχή και για τις τρεις μεθόδους έχει να κάνει με την διάταξη των πασσάλων. Επιλέχθηκε, η πλέον διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται όταν έχουμε να κάνουμε με άκαμπτους κεφαλόδεσμούς, η χρήση καννάβου. Επιλέχθηκε δηλαδή η τοποθέτηση των πασσάλων σε σειρές και στήλες. Το πλήθος των πασσάλων σε κάθε σειρά και σε κάθε στήλη καθορίστηκε αφενός από τις κανονιστικές διατάξεις που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2 και αφετέρου από το κομμάτι της αλληλεπίδρασης των πασσάλων έτσι όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4. Έτσι καθώς σε περίπτωση αστοχίας του εδάφους από θραύση τύπου βάρθρου έχουμε ανεκμετάλλετες επιφάνειες των πασσάλων, η επιλογή αποστάσεων που διαστασιολογούνται ως βάρθρο απορρίπτονται και εξετάζεται η μέγιστη απόσταση για την οποία εμφανίζεται αυτό το φαινόμενο. Έτσι όπως εμπειρικά προκύπτει σύμφωνα με τον Burland η ελάχιστη επιτρεπτή απόσταση μεταξύ των πασσάλων είναι αυτή των τριών

διαμέτρων(ως απόσταση μεταξύ πασσάλων θεωρείται η απόσταση από κέντρο βάρους σε κέντρο βάρους διατομής).

Με βάση λοιπόν αυτήν την παραδοχή και θεωρώντας ως μέγιστη αποδεκτή απόσταση μεταξύ πασσάλων αυτή των πέντε διαμέτρων(σε μεγαλύτερη απόσταση οδηγούμαστε σε πολύ μεγάλα πάχη κεφαλόδεσμου) για τις δεδομένες διαστάσεις που μπορεί να πάρει ο κεφαλόδεσμος (πλάτους - μήκους) μπορούμε να υπολογίσουμε τον ελάχιστο και τον μέγιστο αριθμό πασσάλων σε κάθε διεύθυνση.

Ως ελάχιστος θεωρείται αυτός που προκύπτει αν διαιρέσουμε την συνολική απόσταση προς 5 μέγιστες διαμέτρους στρογγυλοποιώντας προς τα επάνω. Μέγιστη διάμετρος πασσάλου σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις είναι τα 3 μέτρα. Ως μέγιστος θεωρείται αυτός που προκύπτει διαιρώντας την συνολική απόσταση με 3 ελάχιστες διαμέτρους και αυτή τη φορά στρογγυλοποιώντας προς τα κάτω. Πάλι σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις η ελάχιστη επιτρεπτή διάμετρος είναι 30 εκατοστά.

Έχουμε πλέον υπολογίσει το εύρος των πασσάλων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κάθε διεύθυνση. Δεδομένου ότι οι ελάχιστες και οι μέγιστες αποστάσεις καθορίζονται με βάση την διάμετρο των πασσάλων, μπορούμε λύνοντας τις σχέσεις αυτές ως προς τις διαμέτρους, αφού πρώτα υπολογίσουμε για κάθε πλήθος πασσάλων την απόσταση τους, στη συνέχεια είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την ελάχιστη και τη μέγιστη διάμετρο πασσάλου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε πλήθος πασσάλων.

Δημιουργούμε λοιπόν δύο πίνακες (έναν για κάθε διεύθυνση), όμοιους με τον πίνακα 5.1.

Πλήθος πασσάλων	Ελάχιστη διάμετρος	Μέγιστη διάμετρος
-----------------	--------------------	-------------------

Πίνακας 5.1 Ελάχιστες-Μέγιστες διαμέτροι ανάλογα με το πλήθος των πασσάλων

Και τώρα είμαστε σε θέση να δημιουργήσουμε όλους τους δυνατούς καννάβους, συνδυάζοντας πλήθος πασσάλων σε κάθε διεύθυνση και ως ελάχιστη και μέγιστη διάμετρο την τομή των συνόλων τους. Για να γίνει πιο εύκολα κατανοητό ακολουθεί σχετικό παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι ακολουθήσαμε την πιο πάνω διαδικασία και προέκυψαν οι δύο πίνακες που ακολουθούν για τις δύο διευθύνσεις.

Βελτιστοποίηση ομάδας πασσάλων σύμφωνα με EC-7

Πλήθος πασσάλων	Ελάχιστη διάμετρος	Μέγιστη διάμετρος
2	1.02	1.70
3	0.68	1.133
4	0.51	0.85

Πίνακας 5.2 Ο πίνακας 5.1 για διεύθυνση x παραδείγματος

Πλήθος πασσάλων	Ελάχιστη διάμετρος	Μέγιστη διάμετρος
2	0.90	1.40
3	0.72	1.18

Πίνακας 5.3 Ο πίνακας 5.1 για διεύθυνση y παραδείγματος

Με βάση αυτούς τους δύο πίνακες σχηματίζεται τρίτος που περιλαμβάνει τους δυνατούς συνδυασμούς πασσάλων με τις ελάχιστες και μέγιστες διαμέτρους που απαιτούν.

Πλήθος πασσάλων σε διεύθυνση x	Πλήθος πασσάλων σε διεύθυνση y	Ελάχιστη διάμετρος	Μέγιστη διάμετρος
2	2	1.02	1.40
2	3	1.02	1.18
3	2	0.90	1.133
3	3	0.72	1.133
4	2	-	-
4	3	0.72	0.85

Τα περιεχόμενα των αρχικών πινάκων ήταν ενδεικτικά και δεν αντιστοιχούσαν σε κάποιες τιμές μήκους-πλάτους, αλλά ο μόνος στόχος τους ήταν να δείξουν πως θα γίνει η ένωση των δύο πινάκων των δύο κάθετων διευθύνσεων.

Και έτσι ολοκληρώνεται το πρώτο βήμα της διαστασιολόγησης που είναι κοινό και για τις 3 μεθόδους, έχοντας δημιουργήσει έναν πίνακα με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς πασσάλων, ο οποίος περιλαμβάνει επίσης το εἶδος των διαμέτρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε κάρναβο.

Το επόμενο κοινό πάλι βήμα, είναι η μεταφορά των φορτίων της ανωδομής στους πασσάλους κάθε κάρναβου για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς φόρτισης. Για κάθε κάρναβο λοιπόν, επιλέγουμε αυθαίρετα μια διατομή πασσάλου εντός των επιτρεπτών ορίων και αφού υπολογίσουμε τους συντελεστές αποδοτικότητας της ομάδας, τρέχουμε με βάση τα φορτία που ασκεί η ανωδομή στον κεφαλόδεσμο για κάθε συνδυασμό φορτίσεων τη φόρμα για κατανομή των φορτίων στους πασσάλους. Πλέον έχουμε για κάθε πάσσαλο την αξονική και την τέμνουσα που ασκεί στην κορυφή του κάθε συνδυασμός φόρτισης, επομένως τα ζευγάρια αξονική-τέμνουσα κάθε πασσάλου θα είναι τόσα όσοι και οι συνδυασμοί που τρέξαμε.

Ως εδώ η διαδικασία ήταν κοινή και για τις τρεις μεθόδους που πρόκειται να αναπτυχθούν. Η συνέχεια παρότι είναι σχετικά παραπλήσια διαφέρει στη σχέση που θα υπάρχει μεταξύ των πασσάλων. Θεώρηση πρώτη παντού χρησιμοποιείται ο ίδιος πάσσαλος, θεώρηση δεύτερη παντού χρησιμοποιείται η ίδια διάμετρος πασσάλου και θεώρηση τρίτη χωρίζουμε τον κεφαλόδεσμο σε τεταρτημόρια και οι αντικατοπτρικοί πάσσαλοι έχουν κοινή διάμετρο.

#### **α) Θεώρηση κοινού πασσάλου**

Είναι η συνηθέστερη επιλογή για πασσαλο-ομάδες και στόχος είναι να βρεθεί ο οικονομικότερος πάσσαλος που μπορεί να αντέξει τη δυσμενέστερη φόρτιση. Οι πάσσαλοι διαστασιολογούνται με βάση τη δυσμενέστερη φόρτιση η οποία συνήθως εμφανίζεται σε κάποιον από τους γωνιακούς πασσάλους. Ο λόγος που επιλέγεται είναι ότι οδηγεί σε οικονομικότερες λύσεις μιας και η ύπαρξη ιδίων πασσάλων μειώνει τόσο τις ανάγκες εργαλείων(π.χ. για πασσάλους εκσκαφής διαφορετικών διαμέτρων θα χρειαζόνταν διαφορετικά τρυπάνια για την εκσκαφή) όσο και τον κίνδυνο λάθους. Στα πλην αυτής της επιλογής είναι ότι οι περισσότεροι πάσσαλοι υπερδιαστασιολογούνται. Μιας και η συνηθέστερη επιλογή υπάρχουν δημοσιεύσεις που την περιγράφουν παρόμοιες διαδικασίες(π.χ. Μπέκας και Σταυρουλάκης 2016)<sup>[24]</sup>.

#### **β) Θεώρηση κοινής διαμέτρου**

Στηριζόμενοι στην πιο πάνω θεώρηση και για απομείωση, όσον τον δυνατόν γίνεται του όγκου των υλικών επιλέγεται η χρήση κοινής διατομής για όλους τους πασσάλους αλλά καθορισμό του μήκους των πασσάλων με βάση τις ανάγκες που αναπτύσσονται σε κάθε θέση.

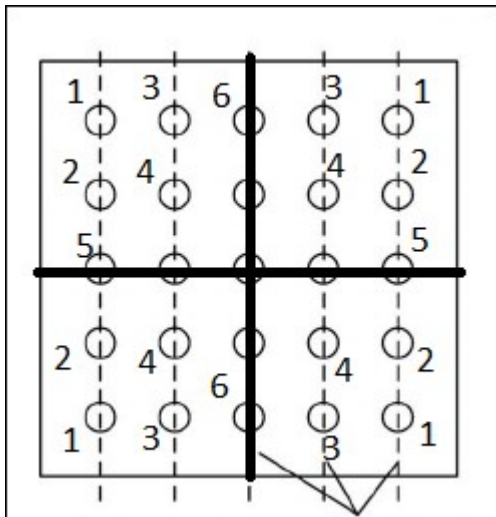
Απλοποιητικά θεωρούμε ότι αν όλοι οι πάσσαλοι έχουν μήκος μεγαλύτερο από το μέγιστο ενεργό μήκος, όπου ενεργό μήκος ορίζουμε αυτό στο οποίο αναπτύσσεται το 90% των φορτίων, τότε τα διατμητικά φορτία ισομοιράζονται στους πασσάλους. Στην περίπτωση που εξετάζουμε όπου έχουμε μη-γραμμικό πάσσαλο και ελαστικό έδαφος το μήκος αυτό υπολογίζεται ίσο με 2.5 μέτρα, τιμή μεγαλύτερη από το ελάχιστο μήκος όπως αυτό καθορίστηκε από τις διατάξεις του Ε.Τε.Π στο κεφάλαιο 2.

<sup>[25]</sup>

Το πρόβλημα της συγκεκριμένης θεώρησης είναι ότι πρέπει να γίνει για κάθε πιθανή διάμετρο διαστασιολόγηση όλων των πασσάλων αυξάνοντας σε μεγάλο βαθμό τις επαναλήψεις που γίνονται.

### γ) Θεώρηση τεταρτημόριων

Σε αυτήν την θεώρηση χωρίζουμε τον κάνναβο σε τεταρτημόρια και δημιουργούμε



Σχήμα 5.1 Κάτοψη ομάδας πασσάλων χωρισμένη σε τεταρτημόρια.

τετράδες και ζευγάρια όταν απαιτείται σύμφωνα και με το σχήμα 5.1. Κάθε ζευγάρι ή τετράδα θα έχει τον ίδιο πάσσαλο επομένως για κάθε τετράδα η διαστασιολόγηση γίνεται για την δυσμενέστερη φόρτιση που εμφανίζεται στην τετράδα. Ο λόγος που επιλέχθηκε η χρήση τεταρτημορίων ήταν για να μπορούσαμε να διατηρήσουμε το κέντρο βάρους της πασσαλο-ομάδας ίδιο με το κέντρο βάρους του καννάβου. Ένα πρόβλημα που εμφανίζεται εδώ πρώτη φορά είναι η

ανάγκη να γίνουν επαναλήψεις στις κατανομές των φορτίων της ανωδομής καθώς οι οριζόντιες δυνάμεις πρέπει να μοιραστούν ανάλογα με τη διάμετρο που έχει κάθε πάσσαλος. Επομένως ενώ αρχικά θα έχουμε θεωρήσει ότι όλοι οι πάσσαλοι έχουν την ίδια διατομή και επομένως αναλαμβάνουν την ίδια δύναμη, θα πρέπει σε δεύτερη φάση να επαναλάβουμε τη διαδικασία μεταφοράς των φορτίων με τις νέες διατομές και αν χρειαστεί στη συνέχεια να επαναλάβουμε την διαδικασία μέχρι να προσεγγίσουμε τις κατάλληλες διατομές για κάθε τετράδα.

## 5.3 Επιλογή βέλτιστου πασσάλου ανά θέση

Αφού επιλέξουμε τι σχέση θα υπάρχει μεταξύ των πασσάλων(ποια θεώρηση επιλέχθηκε) και έχουμε υπολογίσει τα φορτία με βάση τα οποία θα διαστασιολογήσουμε και τις ελάχιστες και μέγιστες διαμέτρους του πασσάλου όπως εκτενώς εξηγήθηκε πιο πάνω, ξεκινάει η διαστασιολόγηση του πασσάλου. Τα φορτία τα οποία χρειαζόμαστε για την διαστασιολόγηση είναι η μέγιστη αξονική, η μέγιστη τέμνουσα και εάν αναπτυχθούν αρνητικές τιμές(εφελκυστικές φορτίσεις) η μέγιστη

τιμή που λαμβάνουν. Θα πρέπει λοιπόν να επιλέξουμε τον πάσσαλο που θα κοστίζει λιγότερο υπολογίζοντας τον όγκο του καθώς και τον όγκο του οπλισμού του.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

α) Ξεκινάμε από την ελάχιστη διάμετρο και ορίζοντάς του το ελάχιστο μήκος που μπορεί να λάβει, εξετάζουμε αν πάσσαλος με αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και με βάση τα γνωστά χαρακτηριστικά του εδάφους, μπορεί να προκαλέσει αστοχία εδάφους. Η αστοχία εδάφους αφορά τόσο σε αξονική φόρτιση(είτε εφελκυστική, είτε θλιπτική) όσο και σε τέμνουσα φόρτιση. Ελέγχουμε δηλαδή αν υπάρχει κίνδυνος βύθισης του πασσάλου, εξόλκευσης του ή παράλληλης μετατόπισης του με αστοχία κοντού πασσάλου. Σε περίπτωση που αυτές οι ανάγκες δεν ικανοποιούνται αυξάνουμε το μήκος με ένα σταθερό βήμα(στους κώδικες που αναπτύχθηκαν επιλέχθηκε βήμα 1 εκατοστού για να υπάρχει μεγάλη ακρίβεια στο αποτέλεσμα, παρόλα αυτά θα μπορούσε να είχε επιλεγεί και μεγαλύτερη τιμή καθώς η τάξη μεγέθους του συνήθους μήκους του πασσάλου είναι άνω των 5 μέτρων). Και επαναλαμβάνουμε μέχρι να ικανοποιούνται και οι 3 έλεγχοι.

β) Αφού γνωρίζουμε τις πλήρεις διαστάσεις του πασσάλου (διάμετρος διατομής - μήκος) ως επόμενο βήμα έχουμε να βρούμε τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται κατά μήκος του πασσάλου, για να εξετάσουμε αν υπάρχει κίνδυνος του πασσάλου ως δομικού στοιχείου. Για το λόγο αυτό πρέπει να αντικαταστήσουμε το έδαφος με ελατήρια και τρέχοντας μια στατική ανάλυση και να υπολογίσουμε τα εντατικά μεγέθη που θα αναπτυχθούν. Τα ελατήρια που χρησιμοποιούνται είναι τα ελατήρια Winkler ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών των οποίων με βάση τα χαρακτηριστικά του εδάφους που πρόκειται να αντικαταστήσουν αναπτύχθηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 3.3. Επιλέξαμε να τοποθετήσουμε τα ελατήρια αυτά σε απόσταση 10 εκατοστών μεταξύ τους.

γ) Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης διαστασιολογούμε τον πάσσαλο. Η διαστασιολόγηση αυτή γίνεται με την παραδοχή ότι ο οπλισμός του προκύπτει αντίστοιχα με τον τρόπο που θα διαστασιολογούσαμε ένα κυκλικό υποστύλωμα. Ο απαιτούμενος οπλισμός λοιπόν, προκύπτει από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης κυκλικής διατομής με χρήση των ανηγμένων ροπών και αξονικών σαν αυτά που φαίνονται στο σχήμα 5.2. Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ανηγμένων τιμών είναι:

$$v_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c * f_{cd}} \quad (5.2)$$

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{A_c * h * f_{cd}} \quad (5.3)$$

όπου:  $N_{Ed}$  = Αξονική δύναμη σχεδιασμού

$M_{Ed}$  = Καμπτική ροπή σχεδιασμού

$A_c$  = Εμβαδόν διατομής

$h$  = Διάμετρος διατομής

$f_{cd}$  = αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος

Και αφού διαβαστεί από το διάγραμμα η τιμή  $\omega$  μπορούμε να υπολογίσουμε τον απαιτούμενο οπλισμό από τη σχέση:

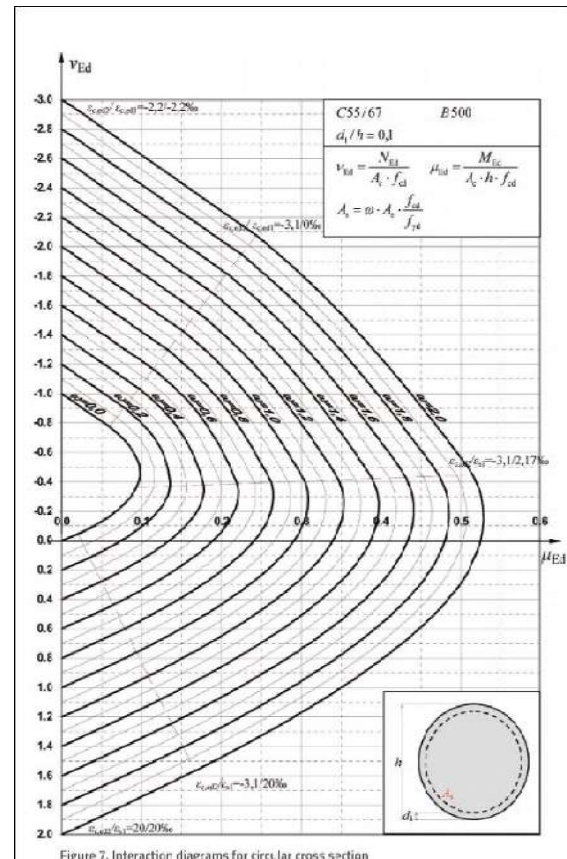
$$A_s = \omega * A_c * \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad (5.4)$$

όπου εδώ το  $f_{yd}$  είναι η αντοχή σχεδιασμού του χάλυβα.[26]

Γνωρίζοντας τα εμβαδά της διατομής πολλαπλασιάζοντας με το μήκος που υπολογίσαμε μπορούμε να βρούμε το συνολικό όγκο χάλυβα και σκυροδέματος, αφού πρώτα με αντίστοιχο τρόπο υπολογίσουμε και τον οπλισμό διάτμησης του στοιχείου. Ξέροντας τους όγκους μπορούμε να υπολογίσουμε το κόστος του πασσάλου και επομένως το κόστος που υπάρχει για τη συγκεκριμένη διάταξη καννάβου και για τη συγκεκριμένη διάμετρο πασσάλου.

δ) Στη συνέχεια με βήμα που πάλι είναι της επιλογής μας(χρησιμοποιήθηκε βήμα 5 εκατοστών) αυξάνουμε την διάμετρο του πασσάλου και επαναλαμβάνουμε τα βήματα α,β,γ μέχρι να φτάσουμε τη μέγιστη διάμετρο που μπορεί να πάρει ο συγκεκριμένος κάνναβος. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται μετά για κάθε διαφορετική διάταξη καννάβου.

Στο τέλος έχουμε έναν πίνακα όπου στην πρώτη στήλη έχουμε τη διάταξη του καννάβου(π.χ. 6x8), στη δεύτερη στήλη τη διάμετρο του πασσάλου, στην τρίτη το



Σχήμα 5.2 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης κυκλικής διατομής

μήκος του, στην τέταρτη τον απαιτούμενο οπλισμό και στην πέμπτη το κόστος. Ο πίνακας αυτός αφορά την πρώτη θεώρηση στις άλλες 2 η δεύτερη, η τρίτη και η τέταρτη στήλη επαναλαμβάνονται τόσες φορές όσοι και οι διαφορετικοί πάσσαλοι. Η βέλτιστη λύση προκύπτει από την στήλη του κόστους και πιο συγκεκριμένα από την γραμμή που δίνει το ελάχιστο κόστος.

Στο κόστος αυτό υπολογίζεται και το κόστος του κεφαλόδεσμου. Επειδή ωστόσο δεν είναι τόσο εύκολος ο πλήρης υπολογισμός των οπλισμών του κεφαλόδεσμου κάθε φορά θα θεωρούμε ότι ο όγκος του οπλισμού του κεφαλόδεσμου αντιστοιχεί στο 1% του συνολικού του όγκου και επομένως χρειάζεται να υπολογίσουμε μόνο το πάχος του με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4.

Το κύριο πρόβλημα της όλης διαδικασίας είναι οι πολλές επαναλήψεις που χρειάζεται να γίνουν, επομένως στόχος είναι να τις απομειώσουμε όσο γίνεται. Επειδή το πλέον χρονοβόρο κομμάτι είναι το κομμάτι με τον υπολογισμό των ελατηρίων Winkler, η ανάλυση και τελικά η όπλιση του πασσάλου και επομένως αν μπορούσαμε εξαρχής να απορρίψουμε κάποιους πασσάλους από αυτό το κομμάτι θα μπορούσαμε να κερδίσουμε στο χρόνο υπολογισμού.

Για να το πετύχουμε αυτό χρησιμοποιήσαμε τα όρια του οπλισμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Έτσι υπολογίζουμε το κόστος κάθε πασσάλου αν είχε τον ελάχιστο επιτρεπτό οπλισμό, βρίσκοντας για κάθε πάσσαλο το ελάχιστο κόστος που θα μπορούσε να έχει. Βρίσκοντας τον πάσσαλο ο οποίος μπορεί να πετύχει την μικρότερη τιμή και θέτοντας τον ως κρίσιμο μπορούμε να απορρίψουμε κάποιους πασσάλους με την ακόλουθη λογική. Υπολογίζουμε τον οπλισμό που αυτός ο πάσσαλος απαιτεί και κάθε πάσσαλος που η ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει είναι μεγαλύτερη από το κόστος αυτού του πασσάλου δεν διαστασιολογείται. Επομένως εξετάζουμε μόνο όσους πασσάλους περιλαμβάνουν εντός του εύρους των τιμών τους το κόστος του κρίσιμου πασσάλου και αν κατά τη διάρκεια εντοπιστεί κάποιος πάσσαλος οικονομικότερος, τότε αυτός γίνεται κρίσιμος και ενδεχομένως έχουμε την δυνατότητα να απορρίψουμε και άλλους πασσάλους.



## 5.4 Σύνοψη

Η βελτιστοποίηση που θα γίνει αφορά αποκλειστικά τα έξοδα υλικών, χωρίς να συνυπολογίζει τα έξοδα κατασκευής. Επειδή η διαδικασία βελτιστοποίησης δεν είναι γραμμική, δεν μπορεί δηλαδή να βρεθεί η βέλτιστη λύση μέσω κάποιας εξίσωσης, αλλά μέσω επαναλήψεων η βελτιστοποίηση δεν θα περιοριστεί στην εύρεση της βέλτιστης διάταξης αλλά και στην εύρεση της ταχύτερης διαδικασίας για τον υπολογισμό αυτό. Αφού ολοκληρωθούν και τα τρία διαφορετικά είδη βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκαν, στη συνέχεια θα συγκριθούν τα αποτελέσματά τους.

## 6

## Εφαρμογή

## 6.1 Περιγραφή της διαδικασίας που θα ακολουθηθεί

Βήμα 1<sup>ο</sup>

Με βάση τις διαστάσεις που θα έχει ο κεφαλόδεσμος(μήκος σε κάθε διεύθυνση) υπολογίζεται ο ελάχιστος και ο μέγιστος αριθμός πασσάλων που μπορούν να τοποθετηθούν σε κάθε διεύθυνση(Κώδικας 6.1). Για κάθε αριθμό πάσσαλων υπολογίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη διατομή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί(Κώδικας 6.2).

```
Nxmin = ceil ( Lx / 5 / Dmax );
Nymin = ceil ( Ly / 5 / Dmax );
if Nxmin<2
    Nxmin=2;
end
if Nymin<2
    Nymin=2;
end

Nxmax = floor ( Lx / 3 / Dmin );
Nymax = floor ( Ly / 3 / Dmin );
```

Κώδικας 6.1

```
nx = Nxmax - Nxmin + 1;
ny = Nymax - Nymin + 1;

s = Nxmin;
for i = 1 : nx;
    Dximin(i) = Dmin;
    while Dximin(i) * s * 5 <= Lx ;
        Dximin(i) = Dximin(i) + 0.05;
    end
    Dximax(i) = Dmax;
    while Dximax(i) * s * 3 > Lx ;
        Dximax(i) = Dximax(i) - 0.05;
    end
    Nx(i) = Nxmin + i - 1;
    s = s + 1;
end
```

Κώδικας 6.2

Βήμα 2<sup>ο</sup>

Σχεδιάζονται όλοι οι εφικτοί συνδυασμοί πασσάλων που θα τοποθετηθούν σε κάθε κάρναβο θεωρώντας ως εύρος διαμέτρων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί την τομή των συνόλων των διαμέτρων στις 2 διευθύνσεις. Οι διαδικασίες που περιγράφονται

στα βήματα 3,4,5,6 αφορούν ένα κάνναβο και πρέπει να επαναληφθούν για όλους τους καννάβους και εν συνεχεία πηγαίνουμε στο βήμα 7.

Βήμα 3<sup>ο</sup>

Για τον εξεταζόμενο κάνναβο θεωρούμε μια διάμετρο(τη μέση διάμετρο από το επιτρεπτό εύρος) και υπολογίζουμε την αλληλεπίδραση των πασσάλων λόγω διατμητικών φορτίσεων, υπολογίζοντας την επιρροή που έχουν σε κάθε πάσσαλο οι υπόλοιποι(Κώδικας 6.3) και εν συνεχεία βρίσκουμε το μέσο όρο για φόρτιση σε κάθε διεύθυνση.

```

for k = 1:ny
    if k ~= i
        d = (D(i,j) + D(k,j))/2;
        if k < i && (i-k)*sy / d <= 4
            ey(i,j) = ey(i,j) * 0.7 * (( i - k ) * sy / d) ^ 0.26;
        elseif k > i && (k-i)*sy/d <= 7
            ey(i,j) = ey(i,j) * 0.48 * (( k - i ) * sy / d) ^ 0.38;
        end
        if (i-k) * sy / d <= 3.75 && (i-k) * sy / d >= -3.75
            ex(i,j) = ex(i,j) * 0.64 * (abs(i-k) * sy / d) ^ 0.34;
        end
    end
end
end
    
```

Κώδικας 6.3

Βήμα 4<sup>ο</sup>

Χρησιμοποιώντας όλα τα φορτία της ανωδομής για κάθε συνδυασμό φόρτισης, αρχικά τα μεταφέρουμε στο κέντρο βάρους της πάσσαλο-ομάδας(Κώδικας 6.4) και στη συνέχεια υπολογίζουμε το φορτίο που αντιστοιχεί σε κάθε πάσσαλο, αυξάνοντας το διατμητικό φορτίο με βάση τον συντελεστή που υπολογίστηκε στο βήμα 3 (Κώδικας 6.5).

Κώδικας 6.4

```

for i = 1 : n;
    if f(i)==1;
        R=R+F(i);
        My=My + F(i)*(xf(i) - xcm);
        Mx=Mx + F(i)*(yf(i) - ycm);
    elseif f(i)==2;
        Fx=Fx+F(i);
    elseif f(i)==3;
        Fy=Fy+F(i);
    elseif f(i)==4;
        Mx = Mx + F(i);
    else
        My = My + F(i);
    end
end
end
    
```

```

ff = tand(Fx/Fy);
Ef = ( Ex^2 * (sind(ff))^2 + Ey^2 * (cosd(ff))^2 ) ^ (1/2);
for i = 1 : N;
    sx = (Fx * D(i)) / SD;
    sy = (Fy * D(i)) / SD;
    Shear(i) = (sx^2 + sy^2)^(1/2);
    Axial(i) = R + My * (xp(i) - xcm)/xx + Mx * (yp(i) - ycm)/yy;
end
for i = 1 : N;
    Shear(i) = Shear(i) / Ef;
end

```

Κώδικας 6.5

Βήμα 5<sup>ο</sup>

Αφού ορίσουμε τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους, για το συνδυασμό αξονικού - διατμητικού φορτίου που επελέγη, για κάθε πιθανή διάμετρο πασσάλου υπολογίζουμε τη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου. Ως φέρουσα ικανότητα θεωρείται το άθροισμα αντοχής πλευρικής τριβής(Κώδικας 6.6) και αντοχής αιχμής(Κώδικας 6.7) έναντι των αξονικών φορτίων και ελέγχου κοντού πασσάλου(Κώδικας 6.8) για το διατμητικό, για ένα αρχικό μήκος και στη συνέχεια αυξάνουμε το μήκος μέχρι την ικανοποίηση των απαιτήσεων. Σε περίπτωση που το μήκος ξεπεράσει το γνωστό βάθος η διατομή απορρίπτεται(Κώδικας 6.9). Οι πιο πάνω κώδικες αφορούν πάσσαλους εκτοπίσεως, ενώ αντιστοιχί κώδικες αναπτύχθηκαν και για πάσσαλους εκσκαφής. Η αντιστοιχία κωδικών είναι 6.6 -> 6.10 και 6.7 -> 6.11 ενώ οι άλλοι δύο είναι κοινοί.

```

Qs = 0;
for k = 1 : (1*step);
    a = 1;
    v = h(1);
    while k*(1/step) > v
        a = a + 1;
        v = v + h(a);
    end
    sv=0;
    for w = 1:(a-1);
        sv = sv + g(w) * h (w);
    end;
    sv = sv + ( 1 - v - h(a))*g(a);
    if hydro < k*(1/step);
        sv = sv - (k*(1/step) - hydro)*10;
    end;
    Qs = Qs + 0.9 * ((-1)^arn(a)) * pi * d * K(a) * sv * tand(fd(a)) *(1/step);
end;

```

Κώδικας 6.6

```

Nq = ( 1 + sind(f(j)))/( 1 - sind(f(j))) * exp ( pi * tand(f(j)));
Nc = ( Nq - 1 ) / tand(f(j));
Ng = 2 * ( Nq - 1 ) *tand(f(j));
sv = 0;
for k = 1:(j-1);
    sv = sv + g(k) * h (k);
end;
if c(j)==0 && ((1 + h(j) - vathos) > (10*d))
    sv = sv + (10 * d) * g(j);
else
    sv = sv + ( 1 + h(j) - vathos)*g(j);
end
if hydro < 1;
    sv = sv - ( 1 - hydro)*10;
end;
qpu = 1.3 * c (j) * Nc + sv * Nq + 0.3 * g(j) * d *Ng;
Qp = pi * d ^ 2 / 4 * qpu;

```

Κώδικας 6.7

```

Hu = 0;
if C == 0;
    for k = 1 : (j-1);
        Hu = Hu + 1.5* g(k) * (h(k))^2 * d * (tand(45+f(k)/2))^2;
    end;
    Hu = Hu + 1.5 * g(j) * (1 + h(j) -vathos)^2 *(tand(45 + f(j)/2))^2;
else
    k=1;
    abc=h(1);
    while abc < 1.5*d;
        k=k+1;
        abc=abc+h(k);
    end
    Hu = (abc - 1.5 * d) *9 * cu(k) * d;
    for a = k : (j-1);
        Hu = Hu + h(a) * 9 * cu(a) *d;
    end
    Hu = Hu + 9 * cu(j) * d * ( 1 +h(j) - vathos);
end

```

Κώδικας 6.8

```

if l < sum(h)-1.01
    D(i) = d;
    L(i) = 1-(1/step);
    QSP(i)=Qsp;
    HU(i)=Hu;
else
    D(i) = 0;
    L(i) = 0;
    QSP(i) = 0;
    HU(i) = 0;
end

```

Κώδικας 6.9

```

Qs=0;
for k= 1:(j-1)
    Qs = Qs + ((-1)^arn(k)) * fsu(k) * pi * d * h(k);
end
Qs=Qs + ((-1)^arn(j)) * (1+h(j)-vathos)*fsu(j)*pi*d;
    
```

Κώδικας 6.10

```

Qp=0;
if (aaa(j)==1 || aaa(j)==2) && (1+h(j)-vathos)>=(3*d);
    Qp = qpu(j)*pi*d^2/4;
elseif aaa(j)==3 && (1+h(j)-vathos)>=d
    Qp = qpu(j)*pi*d^2/4;
end
    
```

Κώδικας 6.11

### Βήμα 6<sup>ο</sup>

Οι συνδυασμοί μήκη - διαμέτροι καθώς και το σύνολο των πασσάλων τοποθετείται σε αρχείο Excel, καθώς θέλουμε η σύγκριση να αφορά και διαφορετικούς καννάβους, όπου υπολογίζουμε και το ελάχιστο κόστος κάθε συνδυασμού θεωρώντας ελάχιστο οπλισμό και αφού υπολογίσουμε πάχος κεφαλόδεσμου με οπλισμό 1%. Και βρίσκουμε τον κάρναβο και τους πασσάλους με το μικρότερο πιθανό κόστος.

### Βήμα 7<sup>ο</sup>

```

if a(j) == 1 ;
    if (i*step) < (1.5 * D);
        kh(i) = 0;
    elseif Su(j) < 100;
        kh(i) = 0.4 * 8 / D ;
    elseif Su(j) < 200;
        kh(i) = 0.4 * 16 / D ;
    elseif Su(j) < 400;
        kh(i) = 0.4 * 32 / D ;
    else
        kh(i) = 0;
    end
elseif a(j) == 2 ;
    if Dr(j) < 0.5 ;
        kh(i) = 2.5 * i * step / D ;
    elseif Dr < 0.75 ;
        kh(i) = 7.5 * i * step / D ;
    else
        kh(i) = 20 * i * step / D;
    end
    if (i*step) > hydro;
        kh(i) = kh(i) * 0.6;
    end
end
end
    
```

Για τους πασσάλους που επιλέξαμε, βρίσκουμε τα χαρακτηριστικά των ελατηρίων Winkler(Κώδικας 6.12) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση του πασσάλου. Χρησιμοποιώντας αυτά τα ελατήρια τρέχουμε ανάλυση πασσάλου και βρίσκουμε τη μέγιστη ροπή που αναπτύσσεται στον πάσσαλο. Με βάση αυτή, από τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης βρίσκουμε τον απαιτούμενο οπλισμό.

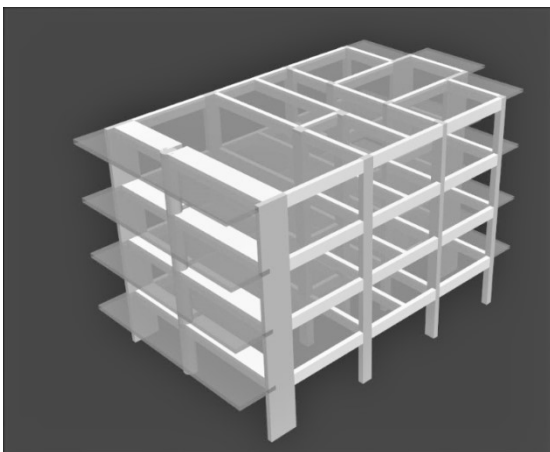
Κώδικας 6.12

## Βήμα 8<sup>ο</sup>

Αφού βρεθεί ο απαιτούμενος οπλισμός, υπολογίζεται το κόστος αυτής της διάταξης. Κατόπιν αποκλείουμε από το Excel όλους τους συνδυασμούς, που για ελάχιστο οπλισμό το κόστος θα ήταν μεγαλύτερο από αυτό που υπολογίστηκε. Για τους υπόλοιπους συνδυασμούς του Excel επαναλαμβάνεται το βήμα 7. Αν βρεθεί συνδυασμός με μικρότερο κόστος, εξετάζουμε μήπως μπορεί να απορριφθεί και κάποιος άλλος συνδυασμός, χωρίς να χρειαστεί να τον υπολογίσουμε. Οι υπολογισμοί ολοκληρώνονται όταν έχει βρεθεί το χαμηλότερο κόστος.

## 6.2 Εφαρμογή

Για την τριώροφη κατασκευή του σχήματος 6.1 ζητήθηκε η εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού πασσάλων. Οι διαστάσεις της κατασκευής είναι 11 x 17. Η



Σχήμα 6.1 Τριώροφη κατασκευή προς διαστασιολόγηση.

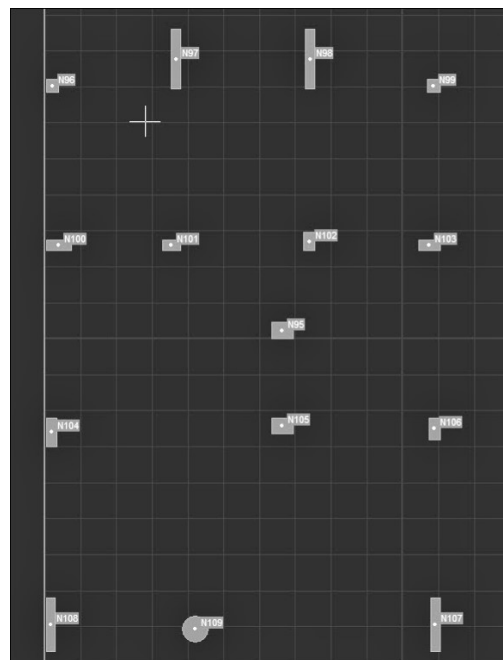
Τα υποστυλώματα πρόκειται να πακτωθούν στον κεφαλόδεσμο, ενώ η ακριβής διάταξή τους φαίνεται στο σχήμα 6.2.

Από την γεωλογική μελέτη που έγινε στο υπέδαφος και από γεώτρηση συνολικού βάθους 20 μέτρων προέκυψε ότι αυτό μπορεί να χωριστεί σε δυο εδαφικές ζώνες.

Η πρώτη εδαφική ζώνη συνολικού πάχους

διαστασιολόγηση γίνεται για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς φόρτισης, ωστόσο γίνεται η παραδοχή ότι κρίσιμος είναι ο σεισμικός συνδυασμός κατά τη διεύθυνση x και προκύπτει από τη σχέση:

$$1.00 * G + 0.30 * Q + 1.00 * E_x$$



Σχήμα 6.2 Κάτοψη υποστυλωμάτων στη βάση της κατασκευής

10 μέτρων αποτελείται από μη-συνεκτικό έδαφος και έπειτα από δοκιμή CPT υπολογίστηκε η αντοχή αιχμής κώνου σε  $q_c = 8\text{MPa}$ . Το ειδικό βάρος του εδάφους ήταν  $\gamma_1 = 20\text{kN/m}^3$ , ενώ η γωνία τριβής υπολογίστηκε ίση με  $\varphi_1 = 33^\circ$  και σχετική πυκνότητα  $D_r=35\%$ . Η δεύτερη εδαφική στρώση αποτελείται από συνεκτικό έδαφος (άργιλο) πάχους 10 μέτρων αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_u = 100\text{kPa}$ . Το ειδικό βάρος του είναι  $\gamma_2 = 20\text{kN/m}^3$ , η γωνία τριβής  $\varphi_2 = 20^\circ$ , ενώ η πραγματική του συνοχή υπολογίστηκε ίση με  $c = 40\text{kPa}$ .

Για τη θεμελίωση επελέγη η χρήση πασσάλων εκοκαφής κατασκευασμένοι από οπλισμένο σκυρόδεμα και χρήση δύσκαμπτου κεφαλόδεσμου από οπλισμένο σκυρόδεμα, ο οποίος εφάπτεται στο έδαφος θεωρώντας ωστόσο ότι η συνεισφορά του στην παραλαβή φορτίων της ανωδομής αμελείται. Οι διαστάσεις του κεφαλόδεσμου θεωρούνται  $13 \times 19$  για να εξασφαλίσουν τα υποστυλώματα να είναι κεντρικά και όχι πλευρικά.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε:

Σε πρώτη φάση υπολογίστηκε το πλήθος των πασσάλων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε διεύθυνση καθώς το εύρος των διαμέτρων που αντιστοιχούν σε κάθε πλήθος σχηματίζοντας τους πίνακες 6.1 και 6.2.

Πλήθος πασσάλων διεύθυνση x	$D_{\min}$	$D_{\max}$
2	1,3	2,15
3	0,9	1,4
4	0,7	1,05
5	0,55	0,85
6	0,45	0,7
7	0,4	0,6
8	0,35	0,5
9	0,3	0,45
10	0,3	0,4
11	0,3	0,35
12	0,3	0,35
13	0,3	0,3
14	0,3	0,3

Πλήθος πασσάλων διεύθυνση y	$D_{\min}$	$D_{\max}$
2	1,9	3
3	1,3	2,1
4	0,95	1,55
5	0,8	1,25
6	0,65	1,05
7	0,55	0,9
8	0,5	0,75
9	0,45	0,7
10	0,4	0,6
11	0,35	0,55
12	0,35	0,5
13	0,3	0,45
14	0,3	0,45
15	0,3	0,4
16	0,3	0,35
17	0,3	0,35
18	0,3	0,35
19	0,3	0,3
20	0,3	0,3
21	0,3	0,3



Στους πίνακες αυτούς επιλέχθηκαν ενδεικτικά κάποια πλήθη πασσάλων για τη δημιουργία καννάβων για διαστασιολόγηση. Στον πίνακα 6.3 φαίνονται οι συνδυασμοί που δημιουργήθηκαν και οι ελάχιστες και οι μέγιστες διαμέτροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε κάνναβο.

Πίνακας 6.3		
Κάνναβος	$D_{min}$	$D_{max}$
3 x 5	0.90	1.25
4 x 5	0.80	1.05
4 x 6	0.70	1.05
5 x 5	0.80	0.85
5 x 6	0.65	0.85

Για κάθε κάνναβο αφού πρώτα υπολογίστηκε ο συντελεστής αλληλεπίδρασης των πασσάλων, θεωρώντας μια μέση διάμετρο μεταξύ των ορίων, υπολογίστηκαν τα φορτία που αντιστοιχούν σε κάθε πάσσαλο. Επειδή στη πρώτη βελτιστοποίηση θα χρησιμοποιηθεί σε όλες τις θέσεις ο ίδιος πάσσαλος, για κάθε κάνναβο διαστασιολογήσαμε τον πάσσαλο που δέχεται τα μεγαλύτερα φορτία. Σε περίπτωση που η διαστασιολόγηση γινόταν για περισσότερους συνδυασμούς φόρτισης, η διαστασιολόγηση θα γινόταν για τα δυσμενέστερα φορτία της δυσμενέστερης φόρτισης, δηλαδή το συνολικό μέγιστο.

Με βάση λοιπόν τα στοιχεία που υπολογίστηκαν πιο πάνω (φορτία και συντελεστής αποδοτικότητας της πάσσαλο-ομάδας) και για τα δεδομένα του υπεδάφους που περιγράφηκαν νωρίτερα προέκυψε ο πίνακας 6.4 ο οποίος περιλαμβάνει για κάθε κάνναβο, για όλες τις δυνατές διαμέτρους (αύξηση διαμέτρου κατά 5 εκατοστά κάθε φορά) το ελάχιστο μήκος που απαιτείται ώστε η φέρουσες ικανότητες να είναι μεγαλύτερες ή ίσες με τις δυνάμεις που ασκούνται στην κορυφή του πασσάλου. Σε επόμενη στήλη υπολογίζεται ο όγκος κάθε πασσάλου και εν συνεχεία ο συνολικός όγκος της πάσσαλο-ομάδας. Με βάση τον συνολικό όγκο και τον όγκο του κεφαλόμενου με πάχος που υπολογίστηκε σύμφωνα με το κεφάλαιο 4, υπολογίζεται το ελάχιστο κόστος, που μπορεί να πάρει κάθε συνδυασμός με τον ελάχιστο οπλισμό. Θεωρήθηκε το κόστος σκυροδέματος: 70€/m<sup>3</sup> και οπλισμού: 5570€/m<sup>3</sup>.

Υπογραμμισμένη είναι η σειρά που δίνει το ελάχιστο κόστος και επομένως ο πιθανώς οικονομικότερος συνδυασμός. Για αυτόν τον συνδυασμό αναλύουμε τον πάσσαλο, για να βρούμε τον απαιτούμενο οπλισμό και επομένως το πραγματικό του κόστος.

Βελτιστοποίηση ομάδας πασσάλων σύμφωνα με EC-7

Κάνναβος	Διάμετρος (m)	Μήκος (m)	Όγκος (m <sup>3</sup> )	Συν. όγκος (m <sup>3</sup> )	Ελάχιστο κόστος (€)
3x5	0,9	7,130	4,5359	68,0387	71583,94163
	0,95	6,760	4,7916	71,8745	76023,04986
	1	6,420	5,0423	75,6338	80455,74416
	1,05	6,120	5,2993	79,4898	84896,52988
	1,1	5,840	5,5499	83,2491	89329,22418
	1,15	5,750	5,9725	89,5869	93977,89547
	1,2	6,000	6,7858	101,7876	99117,62764
	1,25	6,250	7,6699	115,0486	104346,1682
4x5	0,8	6,080	3,0561	61,1228	62769,04222
	0,85	5,720	3,2458	64,9163	67204,59813
	0,9	5,410	3,4417	68,8339	71650,54789
	0,95	5,120	3,6292	72,5834	76082,41989
	1	5,000	3,9270	78,5398	80699,14484
	1,05	5,250	4,5460	90,9197	85853,88398
4x6	0,7	5,820	2,2398	53,7552	53916,29731
	0,75	5,430	2,3989	57,5736	58353,94514
	0,8	5,090	2,5585	61,4043	62792,6192
	0,85	5,000	2,8373	68,0940	67470,76006
	0,9	5,000	3,1809	76,3407	72279,31106
	0,95	5,000	3,5441	85,0586	77127,33245
	1	5,000	3,9270	94,2478	82014,82421
	1,05	5,250	4,5460	109,1036	87376,94731
5x5	0,8	5,000	2,5133	62,8319	62912,18814
	0,85	5,000	2,8373	70,9313	67708,40465
5x6	0,65	5,060	1,6791	50,3719	49515,10037
	0,7	5,000	1,9242	57,7268	54248,95368
	0,75	5,000	2,2089	66,2680	59082,17367
	0,8	5,000	2,5133	75,3982	63964,73163
	0,85	5,000	2,8373	85,1175	68896,62758

Για πάσσαλο με τα χαρακτηριστικά αυτά και με βάση το υπέδαφος που υπάρχει υπολογίζουμε τα ελατήρια Winkler. Κατόπιν για τη δυσμενέστερη φόρτιση και τα

δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη που αναπτύχθηκαν σε κορυφή πασσάλου, αναλύουμε τον πάσσαλο και βρίσκουμε τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται κατά μήκος του πασσάλου για να μπορέσουμε να τον οπλίσουμε.

Η μέγιστη ροπή που αναπτύχθηκε είναι 30kNm επομένως βρίσκουμε την ανηγμένη ροπή και την ανηγμένη αξονική για να χρησιμοποιήσουμε το διάγραμμα αλληλεπίδρασης.

$$v = -0,135 \quad \mu = 0,012$$

Από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης προκύπτει ότι δεν απαιτείται οπλισμός επομένως χρησιμοποιούμε τον ελάχιστο και επομένως αυτή είναι η βέλτιστη λύση μεταξύ αυτών των καννάβων. Για να είναι και η ολικά βέλτιστη λύση θα πρέπει να εξετάσουμε όλους τους δυνατούς καννάβους.

Επειδή το μέγεθος της κατασκευής δεν ασκεί μεγάλα φορτία στην κατασκευή για να έχει νόημα η βελτιστοποίηση των πασσάλων με τους άλλους τρόπους. Και γενικώς είναι μια κατασκευή για την οποία η θεμελίωση με πασσάλους δεν ενδείκνυται, καθώς ο κεφαλόδεσμος έχει συνολικό βάρος ίσο με το μισό συνολικό βάρος της κατασκευής.

Για το λόγο αυτό επιλέξαμε αντί για την τριώροφη κατασκευή να ασχοληθούμε με μια δωδεκαώροφη κάνοντας την παραδοχή ότι τα φορτία που θα μεταφερθούν στον κεφαλόδεσμο από την ανωδομή θα είναι τετραπλάσια από αυτά που μεταφέρθηκαν από την τριώροφη κατασκευή.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με πριν καταλήξαμε στον ακόλουθο πίνακα και εξετάσαμε αν η διατομή που είναι υπογεγραμμένη, αυτή δηλαδή με το ελάχιστο πιθανό κόστος, είναι όντως η οικονομικότερη.

Στον πίνακα αυτό εμφανίζονται διατομές με μηδενικό μήκος. Αυτό προέκυψε όταν στο βάθος το οποίο έχουμε ορίσει, το βάθος δηλαδή για το οποίο γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η συγκεκριμένη διάμετρος δεν μπορεί να αναπτύξει φέρουσα ικανότητα μεγαλύτερη από την αξονική που ασκείται στην κορυφή του πασσάλου.

Βελτιστοποίηση ομάδας πασσάλων σύμφωνα με EC-7

Κάνναβος	Διάμετρος (m)	Μήκος (m)	Όγκος (m <sup>3</sup> )	Συν. όγκος (m <sup>3</sup> )	Ελάχιστο κόστος (€)
3x5	0,9	0,000	0,0000	0,0000	-
	0,95	0,000	0,0000	0,0000	-
	1	0,000	0,0000	0,0000	-
	1,05	0,000	0,0000	0,0000	-
	1,1	0,000	0,0000	0,0000	-
	1,15	0,000	0,0000	0,0000	-
	1,2	0,000	0,0000	0,0000	-
	1,25	17,750	21,7825	326,7379	122077,0034
4x5	0,8	0,000	0,0000	0,0000	-
	0,85	0,000	0,0000	0,0000	-
	0,9	0,000	0,0000	0,0000	-
	0,95	18,950	13,4322	268,6435	92504,1706
	1	17,110	13,4382	268,7633	96632,02199
	1,05	9,570	8,2867	165,7335	92120,20167
4x6	0,7	0,000	0,0000	0,0000	-
	0,75	0,000	0,0000	0,0000	-
	0,8	0,000	0,0000	0,0000	-
	0,85	17,240	9,7828	234,7882	81432,85477
	0,9	9,970	6,3426	152,2234	78635,14758
	0,95	8,960	6,3510	152,4250	82769,86024
	1	8,030	6,3067	151,3619	86798,63439
	1,05	7,160	6,1999	148,7965	90701,57697
5x5	0,8	18,190	9,1433	228,5823	76795,23684
	0,85	16,140	9,1586	228,9661	80945,20808
5x6	0,65	0,000	0,0000	0,0000	-
	0,7	17,230	6,6309	198,9264	66075,6613
	0,75	15,030	6,6401	199,2015	70216,52147
	0,8	9,140	4,5943	137,8280	69193,76772
	0,85	8,120	4,6077	138,2309	73345,33423

$\nu = 0.467$

$\mu = 0.0436$

Βελτιστοποίηση ομάδας πασσάλων σύμφωνα με EC-7

Πάλι δεν απαιτείται οπλισμός και επομένως χρησιμοποιείται ο ελάχιστος κώνοντας την λύση την οικονομικότερη. Και πάλι για να είναι οριστική η λύση θα πρέπει να εξεταστούν όλοι οι κώνναβοι.

Στη δεύτερη μορφή της βελτιστοποίησης, επιλέγοντας τον κώνναβο 5 x 6 που μας έδωσε πριν την βέλτιστη λύση θα υπολογίσουμε το μήκος που απαιτείται για κάθε πάσσαλο, για τις διάφορες διαμέτρους και θα βρούμε για ποια διάμετρο δίνεται η οικονομικότερη λύση και πόσο θα κοστίζει αυτή.

Αριθμός πασσάλου	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
1	5	5	5	5	5
2	5	5	5	5	5
3	5	5	5	5	5
4	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5
6	5,78	5	5	5	5
7	5	5	5	5	5
8	5	5	5	5	5
9	5	5	5	5	5
10	5,37	5	5	5	5
11	6,47	5,52	5	5	5
12	7,57	6,55	5,63	5	5
13	5	5	5	5	5
14	5	5	5	5	5
15	6,05	5,14	5	5	5
16	7,15	6,16	5,27	5	5
17	8,25	7,18	6,22	5,35	5
18	9,35	8,2	7,17	6,24	5,39
19	5,64	5	5	5	5
20	6,74	5,78	5	5	5
21	7,84	6,8	5,86	5,01	5
22	8,94	7,82	6,81	5,9	5,07
23	13,97	8,84	7,77	6,8	5,91
24	16,17	9,86	8,72	7,69	6,75
25	7,43	6,41	5,5	5	5
26	8,53	7,43	6,46	5,57	5
27	9,63	8,46	7,41	6,46	5,6
28	15,34	9,48	8,36	7,36	6,44
29	17,54	15,19	9,32	8,25	7,28
30	0	17,23	15,03	9,14	8,12
V	-	79,68218	81,96464	84,83305	91,1098
Κόστος	-	56087,91	60396,91	64754,98	69398,53

## Βελτιστοποίηση ομάδας πασσάλων σύμφωνα με EC-7

Και πάλι η λύση δεν μπορεί να θεωρηθεί η βέλτιστη οικονομική λύση, αν δεν έχουμε ελέγξει όλους τους δυνατούς καννάβους.

Η ύπαρξη σεισμού προς μια διεύθυνση ωστόσο και η διαστασιολόγηση ως προς έναν μόνο συνδυασμό φόρτισης δεν μπορεί να δώσει αποτελέσματα ρεαλιστικά, καθώς για σεισμό με αντίθετη φορά τα μεγάλα αξονικά φορτία αναμένεται να αναπτυχθούν στην αντίθετη πλευρά. Κανονικά θα έπρεπε η διαστασιολόγηση κάθε πασσάλου να γίνει για περισσότερους συνδυασμούς φορτίσεων. Μιας και δεν είναι εφικτό κάτι τέτοιο, θα θεωρήσουμε ότι για αντίθετη φορά τα φορτία είναι αντικατοπτρικά και επομένως μπορούμε να συνδυάσουμε τους πασσάλους θεωρώντας ότι οι απέναντι πάσσαλοι στη διεύθυνση  $x$  διαστασιολογούνται με τον ίδιο τρόπο και οι πάσσαλοι που φαίνονται στον κάτωθι κάνναβο ομαδοποιούνται όπως στον πίνακα που ακολουθεί.

6		12		18		24		30
5		11		17		23		29
4		10		16		22		28
3		9		15		21		27
2		8		14		20		26
1		7		13		19		25

Κάνναβος 5 x 6

Βελτιστοποίηση ομάδας πασσάλων σύμφωνα με EC-7

D	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
1,25	7,43	6,41	5,5	5	5
2,26	8,53	7,43	6,46	5,57	5
3,27	9,63	8,46	7,41	6,46	5,6
4,28	15,34	9,48	8,36	7,36	6,44
5,29	17,54	15,19	9,32	8,25	7,28
6,30	0	17,23	15,03	9,14	8,12
7,19	5,64	5	5	5	5
8,20	6,74	5,78	5	5	5
9,21	7,84	6,8	5,86	5,01	5
10,22	8,94	7,82	6,81	5,9	5,07
11,23	13,97	8,84	7,77	6,8	5,91
12,24	16,17	9,86	8,72	7,69	6,75
13	5	5	5	5	5
14	5	5	5	5	5
15	6,05	5,14	5	5	5
16	7,15	6,16	5,27	5	5
17	8,25	7,18	6,22	5,35	5
18	9,35	8,2	7,17	6,24	5,39
Συνολικό μήκος	-	253,28	216,14	185,95	170,73
Όγκος	-	97,47357	95,48773	93,46866	96,88077
Κόστος	-	57578,1	61529,58	65478,29	69881,9

Επομένως σε μια πιο ρεαλιστική διαστασιολόγηση προκύπτει η κάτωθι βελτιστοποίηση.

Στην τελευταία βελτιστοποίηση ομαδοποιούμε τους πασσάλους σε τετράδες:

(1-6-25-30), (2-5-26-29), (3-4-27-28), (7-12-19-24), (8-11-20-23), (9-10-21-22)

και ζευγάρια:

(13-18), (14-17), (15-16).

Για αυτές τις ομάδες επιλέγουμε τον δυσμενέστερο πάσσαλο κάθε ομάδας και τον τοποθετούμε σε όλες τις θέσεις, επιτρέποντας σε διαφορετικές ομάδες να έχουν διαφορετικές διαμέτρους. Στην πρώτη διαστασιολόγηση επιλέγουμε ιδανικό πάσσαλο κάθε ομάδας και εν συνεχεία πρέπει να ξανατρέξουμε των κώδικα των φορτίων καθώς τα αξονικά φορτία που αναλαμβάνει κάθε πάσσαλος είναι ανάλογα και της επιφάνειας που εφάπτεται στον κεφαλόδεσμο.

## Βελτιστοποίηση ομάδας πασσάλων σύμφωνα με EC-7

Σε αυτήν την περίπτωση το πάχος του κεφαλόδεσμου καθορίζεται με βάση τη μέγιστη διάμετρο που εμφανίζεται στον κάνναβο. Ορίζοντας κάθε φορά το πάχος του κεφαλόδεσμου θεωρώντας επιτρεπτούς τους 5 που αντιστοιχούν στις πέντε επιτρεπτές διαμέτρους, μπορούμε κάθε φορά να επιλέξουμε την οικονομικότερη διάμετρο για κάθε ομάδα, αρκεί αυτή η διάμετρος να είναι μικρότερη από τη διάμετρο που αντιστοιχεί στον κεφαλόδεσμο.

Σε πρώτη φάση για τα ζευγάρια υπολογίζουμε και όγκους και έχουμε τον ακόλουθο πίνακα:

D	0,65	V	0,7	V	0,75	V	0,8	V	0,85	V
1,25	7,43	4,93	6,41	4,93	5,50	4,86	5,00	5,03	5,00	5,67
2,26	8,53	5,66	7,43	5,72	6,46	5,71	5,57	5,60	5,00	5,67
3,27	9,63	6,39	8,46	6,51	7,41	6,55	6,46	6,49	5,60	6,36
4,28	15,34	10,18	9,48	7,30	8,36	7,39	7,36	7,40	6,44	7,31
5,29	17,54	11,64	15,19	11,69	9,32	8,23	8,25	8,29	7,28	8,26
6,30	-	-	17,23	13,26	15,03	13,28	9,14	9,19	8,12	9,22
7,19	5,64	3,74	5,00	3,85	5,00	4,42	5,00	5,03	5,00	5,67
8,20	6,74	4,47	5,78	4,45	5,00	4,42	5,00	5,03	5,00	5,67
9,21	7,84	5,20	6,80	5,23	5,86	5,18	5,01	5,04	5,00	5,67
10,22	8,94	5,93	7,82	6,02	6,81	6,02	5,90	5,93	5,07	5,75
11,23	13,97	9,27	8,84	6,80	7,77	6,87	6,80	6,84	5,91	6,71
12,24	16,17	10,73	9,86	7,59	8,72	7,70	7,69	7,73	6,75	7,66
13	5,00	1,66	5,00	1,92	5,00	2,21	5,00	2,51	5,00	2,84
14	5,00	1,66	5,00	1,92	5,00	2,21	5,00	2,51	5,00	2,84
15	6,05	2,01	5,14	1,98	5,00	2,21	5,00	2,51	5,00	2,84
16	7,15	2,37	6,16	2,37	5,27	2,33	5,00	2,51	5,00	2,84
17	8,25	2,74	7,18	2,76	6,22	2,75	5,35	2,69	5,00	2,84
18	9,35	3,10	8,20	3,16	7,17	3,17	6,24	3,14	5,39	3,06

Εν συνεχεία ομαδοποιούμε τους πασσάλους όπως εξηγήθηκε πριν και αθροίζοντας τους όγκους τους για κάθε διάμετρο παίρνοντας έναν πίνακα που θα περιλαμβάνει πλέον όγκους ομάδας, τον ακόλουθο:



Βελτιστοποίηση ομάδας πασσάλων σύμφωνα με EC-7

	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
1,6,25,30	-	18,195	18,140	14,215	14,890
2,5,26,29	17,302	17,410	13,943	13,893	13,937
3,4,27,28	16,572	13,808	13,934	13,893	13,664
7,12,19,24	14,474	11,438	12,123	12,757	13,335
8,11,20,23	13,744	11,253	11,283	11,863	12,382
9,10,21,22	11,136	11,253	11,195	10,968	11,428
13,18	4,762	5,080	5,377	5,650	5,896
14,17	4,397	4,687	4,957	5,202	5,675
15,16	4,380	4,349	4,537	5,027	5,675

Τέλος υπολογίζουμε για κάθε κεφαλόδεσμο ποιος είναι ο ελάχιστος όγκος πασσάλων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, επιλέγοντας τον μικρότερο όγκο από τις διαμέτρους που είναι ίσες ή μικρότερες από τη διάμετρο αναφοράς του κεφαλόδεσμου έχοντας:

	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
Όγκος πασσάλων	-	96,639	93,409	89,082	88,938
Όγκος κεφαλόδεσμου	362,267	395,2	428,13	461,06	494
Κόστος	-	57508,22	61355,48	65110,9	69502,12

Υπογραμμισμένες στον πίνακα φαίνονται οι διαμέτροι πασσάλων που έδωσαν τον ελάχιστο όγκο για κάθε ομάδα και επομένως χρησιμοποιήθηκαν, για την οικονομικότερη λύση.

# 7

## Συμπεράσματα

---

- Η θεμελίωση με πασσάλους δεν ενδείκνυται για μικρές κατασκευές. Όπως φάνηκε στην τριώροφη κατασκευή το μήκος των πασσάλων καθοριζόταν από τους κανονισμούς, οδηγώντας σε αντικοινωνικές θεμελιώσεις. Αντιθέτως σε μεγαλύτερες κατασκευές όπως η δωδεκαώροφη ή για παράδειγμα η θεμελίωση ενός βάρου γέφυρας, τα φορτία που ασκεί η ανωδομή στον κεφαλόδεσμο είναι αυτά που καθορίζουν το απαιτούμενο μήκος του πασσάλου.
- Ένας άλλος λόγος που εμφανίζονται μεγάλα μήκη, εξαιτίας των κανονιστικών διατάξεων του DIN-4014, είναι η χρήση μεγάλων διατομών. Μειώνοντας τις διατομές μειώνονται και οι επιφάνειες που αναπτύσσονται οι αντιστάσεις τριβής και αιχμής. Επίσης για μεγάλες διατομές αυξάνεται και το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος.
- Η απομείωση των διατομών πρέπει να γίνεται με γνώμονα και τις αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων. Η αύξηση του αριθμού των πασσάλων μειώνει το φορτίο που αντιστοιχεί σε κάθε πάσσαλο, κινδυνεύοντας να οδηγηθούμε σε μικρά φορτία πασσάλου. Στόχος λοιπόν είναι να βρεθεί η ιδανική λύση μεταξύ του πλήθους πάσσαλων και των πιθανών διαμέτρων.
- Το μεγαλύτερο μέρος του όγκου αφορά τον κεφαλόδεσμο. Ο τρόπος που επιλέχθηκε για τη διαστασιολόγηση του, εξαρτάται αποκλειστικά από τις διαμέτρους των πασσάλων και όχι από την απόστασή τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διάμετρος των πασσάλων εν τέλει να καθορίζεται από τον κεφαλόδεσμο και όχι από τον καθαρό όγκο των πασσάλων, όπως θα περιμέναμε, επομένως η βελτιστοποίηση του κεφαλόδεσμου θα είχε εξίσου μεγάλο ενδιαφέρον.

- Στην περίπτωση που υπολογίζαμε το πάχος του κεφαλόδεσμου, θεωρώντας ότι αλληλεπιδρά με το έδαφος και επομένως συμπεριφέρεται σαν επιφανειακή θεμελίωση το πάχος του θα καθοριζόταν από τις αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων. Για αυτή την περίπτωση υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον ανάμεσα στις διάφορες μορφές βελτιστοποίησης. Στη διάταξη 5 x 6 έχουμε:
  - Για κοινούς πασσάλους παντού βέλτιστη επιλογή τη χρήση διαμέτρου 0.80 μέτρων και συνολικό όγκο: 137,828 m<sup>3</sup>
  - Για κοινή διάμετρο με διαφορετικά μήκη πάλι οικονομικότερη διάμετρος είναι αυτή των 0.80 μέτρων, ωστόσο τώρα ο συνολικός όγκος των πασσάλων θα είναι: 93,469 m<sup>3</sup>
  - Στην τελευταία επίλυση που οι πάσσαλοι έχουν διαφορετικές διαμέτρους ο όγκος των πασσάλων υπολογίστηκε στο βέλτιστο συνδυασμό: 88,938 m<sup>3</sup>

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η πρώτη και πιο συνήθης επιλογή διάταξης πασσάλων είναι ιδιαίτερα αντι-οικονομική, καθώς υπάρχει μεγάλη υπερδιαστασιολόγηση των πασσάλων και κυρίως όσων βρίσκονται στο κέντρο του κεφαλόδεσμου. Ο συνολικός όγκος που χρησιμοποιείται είναι σχεδόν 50% μεγαλύτερος από αυτόν που πραγματικά χρειάζεται.

Για το αν αξίζει να χρησιμοποιηθεί η τρίτη επιλογή η οποία συγκριτικά με την δεύτερη δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές θα πρέπει να συνυπολογιστεί το έξτρα κόστος που θα υπάρξει για μηχανήματα π.χ. τρυπάνια διαφορετικής διαμέτρου.

- Όσο πιο ανομοιόμορφη είναι η κατανομή των φορτίων της ανώδομης και όσο μεγαλύτερα είναι τα φορτία, τόσο μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η βελτιστοποίηση της ομάδας.

# 8

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

---

- [1] Neufert E. (362000) «Οικοδομική και αρχιτεκτονική σύνθεση», Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα.
- [2] Αναγνωστόπουλος Α, Παπαδόπουλος Β. (2011) «Επιφανειακές Θεμελιώσεις και Θεμελιώσεις με Πασσάλους», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- [3] Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (2006) «Π.Ε.Τε.Π. 11-01-01-00: Πάσσαλοι δί' εκκαφής (Εγχυτοι πάσσαλοι) και κεφαλόδεσμοι», Αθήνα.
- [4] Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (2006) «Π.Ε.Τε.Π. 11-01-02-00: Πάσσαλοι δί' εκτοπίσεως (Εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι)», Αθήνα.
- [5] Eurocode 7 (2004), «Geotechnical Design, Part 1 (EN 1997 - 1): General Rules» Final Draft. European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- [6] Καββαδάς Μ. (2008) «Σημειώσεις Θεμελιώσεων Τεχνικών Έργων», Έκδοση Ε.Μ.Π.
- [7] Terzaghi K. (1943) «Theoretical Soil Mechanics», J. Wiley and Sons, New York, London.
- [8] American Petroleum Institute (API) (1984) « Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design».
- [9] Tomlinson M.J. (1977) «Pile design and construction practice», Viewpoint Publ., London.
- [10] DIN 4014 (1990) «Deutsche Norm: Bohrpfähle - Herstellung, Bemessung und Tragverhalten».
- [11] Burland J. (1988) «The design of piles for bearing capacity and settlement» Student Notes, Imperial College, London.
- [12] Γεωργιάνου Β. (2014) «Σημειώσεις Θεμελιώσεων: Ανάτοπα διαφανειών από τις παραδόσεις του μαθήματος», Έκδοση Ε.Μ.Π.

- [13] Γκαζέτας Γ, Αναστασόπουλος Ι, Γαρίνη Ε. (2013) «Σημειώσεις του Μαθήματος Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής», Έκδοση Ε.Μ.Π.
- [14] Χαλούλος Γ. (2012) «Διδακτορική Διατριβή: Αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης πασσάλου υπό καθεστώς ρευστοποίησης και οριζόντιας μετατόπισης του εδάφους».
- [15] Reynolds C, Steedman J, Threlfall A. (112008) «Reynolds's reinforced concrete designer's handbook 11<sup>th</sup> edition», Taylor & Francis Group, New York.
- [16] Τάσιος Θ. (1999) «Κατασκευές και Θεμελιώσεις από Ωπλ. Σκυρόδεμα», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- [17] Τρέζος Κ. (2015) «Σημειώσεις Μαθήματος: Κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα».
- [18] Βιντζηλαίου Ε. (2015) «Σημειώσεις Μαθήματος: Κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα».
- [19] Terzaghi K, Peck R.B. (1948) «Soil Mechanics in Engineering Practice», J.Wiley and Sons, New York.
- [20] Vesic A.S. (1969) «Experiments with instrumented pilegroup in sand», ASTM, STP444.
- [21] Broms B. (1975) «Precast piling practice», R.I.T., Stockholm.
- [22] Reese L, Van Impe W. (2011) «Single piles and pile groups under lateral loading», Taylor & Francis Group, LLC.
- [23] Καρλαύτης Μ, Λαγαρός Ν. (2010) «Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- [24] Bekas G, Stavroulakis G (2016) «Cost optimization of a raft foundation including pile group design optimization and soil improvement considerations», 11<sup>th</sup> HSTAM International Congress on Mechanics, Athens.
- [25] Gerolymos N, Gazetas G. (2008) «Lateral Response of Pile with Material and Interface Nonlinearities. Part B: Applications», 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας.
- [26] Τάσιος Θ, Γιαννόπουλος Π, Τρέζος Κ, Τσουκάντας Σ. (2005) «Ωπλισμένο σκυρόδεμα με βάση τον νέο ελληνικό κανονισμό σκυροδέματος», Έκδοση Ε.Μ.Π., Αθήνα.