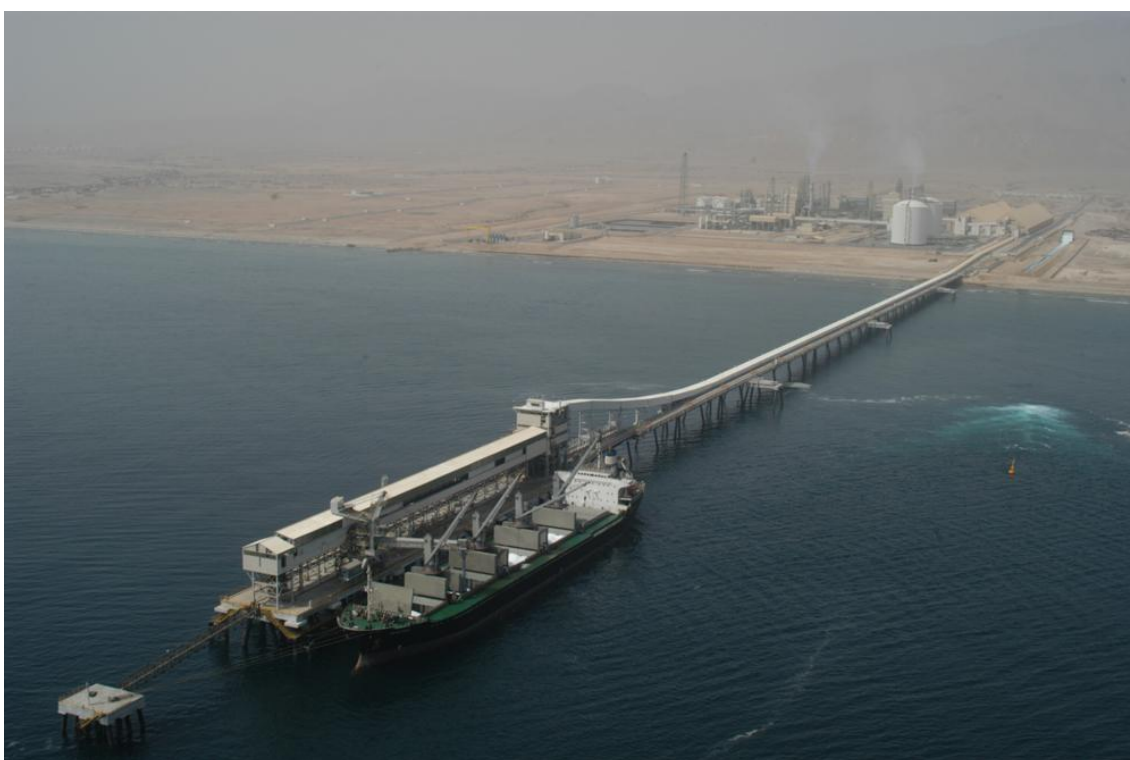




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Δομοστατικός Σχεδιασμός & Ανάλυση Κατασκευών»
Τομέας Δομοστατικής- Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΕΞΕΔΡΕΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ- ΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ
ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΩΝ



Στέλλα Π. Βλαχογιάννη, Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π

Επιβλέπων: Χ. Ι. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Α' ΜΕΡΟΣ: Γενική περιγραφή των φορέων, στατικά συστήματα, τρόποι κατασκευής, ισχύοντες κανονισμοί

1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	
1.1. Εισαγωγή.....	3
1.2. Διαδικασία σχεδιασμού λιμενικών έργων.....	5
1.3. Τύποι εξεδρών - κρηπιδωμάτων.....	7
1.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή φορέα.....	12
1.5. Τύποι ανωδομής.....	14
1.6. Φέροντες πάσσαλοι.....	15
1.6.1. Γενικά χαρακτηριστικά.....	15
1.6.2. Υλικό κατασκευής.....	16
1.6.2.1. Χαλύβδινοι πάσσαλοι.....	16
1.6.3. Τύποι πασσάλων.....	17
1.6.4. Πάσσαλοι σε λιμενικά έργα.....	19
1.6.5. Πλεονεκτήματα πασσάλων σε σύγκριση με άλλου τύπου θεμελιώσεις.....	20
1.7. Ισχύοντες κανονισμοί.....	20
2. ΦΟΡΤΙΑ	
2.1. Εισαγωγή.....	23
2.2. Μόνιμα φορτία.....	25
2.3. Κινητά φορτία.....	25
2.4. Περιβαλλοντικά φορτία.....	26
2.4.1. Φορτία ανέμου.....	26
2.4.1.1. Υπολογισμός δυνάμεων λόγω ανέμου.....	28
2.4.2. Φορτία κυμάτων.....	29
2.4.2.1. Κύμα σχεδιασμού.....	31
2.4.2.2. Υπολογισμός δυνάμεων λόγω κυμάτων στην ανωδομή.....	32
2.4.2.3. Υπολογισμός λόγω κυμάτων στους πασσάλους.....	35
2.4.3. Θαλάσσια ρεύματα.....	37
2.4.3.1. Δυνάμεις λόγω ρευμάτων.....	37
2.4.4. Καιρικές συνθήκες- θερμοκρασιακές μεταβολές.....	38
2.5. Έλξη δέστρας.....	39
2.6. Πρόσκρουση κατά την παραβολή.....	39
2.6.1. Δυνάμεις λόγω επαφής κατά την παραβολή στην ανωδομή.....	40
2.6.2. Δυνάμεις λόγω επαφής κατά την παραβολή στους πασσάλους.....	42
2.7. Σεισμικά φορτία.....	43
2.8. Στάθμη ύδατος.....	43
2.9. Επιτρεπτά όρια παραμορφώσεων.....	45
2.10. Τρόποι ανάληψης φορτίων από φέροντες πασσάλους.....	45
2.10.1. Κατακόρυφα φορτία.....	45
2.10.2. Οριζόντια φορτία.....	46
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ AZZAWIYA	
3.1. Εισαγωγή.....	47
3.2. Γεωλογικές & τοπογραφικές συνθήκες.....	49
3.3. Περιγραφή φορέα.....	52
3.3.1. Γενικά χαρακτηριστικά.....	52
3.3.2. Διαμόρφωση προσομοιώματος.....	54
3.3.3. Εξέδρες (access trestle).....	56
3.3.3.1. Γεωμετρία- παραδοχές.....	56

3.3.3.2. Συνοριακές συνθήκες.....	57
3.3.3.3. Στήριξη αγωγών.....	59
3.3.3.4. Λεπτομέρειες προσομοιώματος.....	59
3.3.3.5. Βασικοί συνδυασμοί φορτίσεων.....	59
3.3.3.6. Φορτία αγωγού.....	61
3.3.3.7. Διατομές.....	61
3.3.4. Ιδιομορφές.....	64

Β' ΜΕΡΟΣ: Χαλύβδινοι πάσσαλοι, ισοδύναμο μήκος λυγισμού, δείκτης εδάφους, παραμετρικές αναλύσεις

4. ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΠΑΣΣΑΛΩΝ

4.1. Λυγισμός μεταλλικών πασσάλων.....	67
4.2. Καμπτικός λυγισμός λόγω αξονικής θλιπτικής δύναμης.....	67
4.3. Ισοδύναμο μήκος λυγισμού πασσάλων.....	69
4.4. Παραμετρικές αναλύσεις.....	71
4.4.1. Παράμετροι.....	72
4.4.1.1. Σταθερά ελατηρίων.....	72
4.4.1.1.1. Δείκτης εδάφους.....	72
4.4.1.2. Συνθήκες στήριξης στην κορυφή των πασσάλων.....	75
4.4.1.3. Βάθος έμπτυξης.....	75
4.4.2. Πορεία ανάλυσης.....	76

5. ΦΟΡΕΑΣ 1: Μεμονωμένος πάσσαλος

5.1. Προσομοίωμα	77
5.2. Πορεία ανάλυσης.....	77
5.3. Αναλυτικές λύσεις.....	77
5.4. Adina.....	78
5.4.1. 1 ^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμπτυξης- Συνθήκες δέσμευσης στην κορυφή του πασσάλου- Σταθερά ελατηρίων.....	79
5.4.2. 2 ^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμπτυξης- Συνθήκες δέσμευσης στην κορυφή του πασσάλου- Εδαφικά προφίλ.....	84
5.5. Συμπεράσματα.....	86
5.6. Ιδιομορφές.....	87

6. ΦΟΡΕΑΣ 2: Πλαίσιο αποτελούμενο από δύο κάθετους πασσάλους

6.1. Προσομοίωμα.....	89
6.2. Πορεία ανάλυσης.....	89
6.3. Αναλυτικές λύσεις.....	90
6.4. Adina.....	90
6.4.1. 3 ^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμπτυξης- Σταθερά ελατηρίων.....	91
6.4.2. 4 ^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμπτυξης- Εδαφικά προφίλ.....	94
6.5. Συμπεράσματα.....	95
6.6. Ιδιομορφές.....	95

7. ΦΟΡΕΑΣ 3: Πλαίσιο αποτελούμενο από έναν κατακόρυφο & έναν κεκλιμένο πάσσαλο

7.1. Προσομοίωμα.....	97
7.2. Πορεία ανάλυσης.....	97
7.3. Adina.....	97
7.3.1. 5 ^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμπτυξης- Εδαφικά προφίλ.....	99
7.3.2. 6 ^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Γωνία κλίσης.....	100
7.4. Συμπεράσματα.....	102
7.5. Ιδιομορφές	102

8. ΦΟΡΕΑΣ 4: Πλαίσιο αποτελούμενο από δύο κεκλιμένους πασσάλους	
8.1. Προσομοίωμα.....	103
8.2. Πορεία ανάλυσης.....	103
8.3. Adina.....	103
8.3.1. 7 ^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμπτυξης- Εδαφικά προφίλ.....	104
8.3.2. 8 ^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Γωνία κλίσης.....	105
8.4. Συμπεράσματα.....	106
8.5. Ιδιομορφές.....	107
9. ΦΟΡΕΑΣ 5: Χωρικό προσομοίωμα αποτελούμενο από κεκλιμένους πασσάλους & πλάκα σκυροδέματος	
9.1. Προσομοίωμα.....	109
9.2. Πορεία ανάλυσης.....	109
9.3. Adina.....	109
9.3.1. 9 ^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμπτυξης- Εδαφικά προφίλ.....	110
9.3.2. 10 ^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Γωνία κλίσης.....	111
9.4. Συμπεράσματα.....	112
9.5. Ιδιομορφές.....	113
10. ΦΟΡΕΑΣ 6: Πραγματικός φορέας	
10.1. Προσομοίωμα.....	115
10.2. Πορεία ανάλυσης.....	118
10.3. Adina- Παραμετρικές αναλύσεις.....	118
11. Συμπεράσματα.....	125
12. Βιβλιογραφία.....	128



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Δομοστατικός Σχεδιασμός & Ανάλυση Κατασκευών

Τομέας Δομοστατικής- Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΕΞΕΔΡΕΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ- ΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία της Στέλλας Βλαχογιάννη

Επιβλέπων Καθηγητής: Χάρης Ι. Γαντές, Αναπλ. Καθ. Ε.Μ.Π

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαμόρφωση μίας ειδικής κατηγορίας λιμενικών κατασκευών, των μεταλλικών εξεδρών φόρτωσης εκφόρτωσης εμπορευμάτων που στηρίζονται σε μεταλλικούς πασσάλους. Παίρνοντας αφορμή από μία πραγματική κατασκευή, η μελέτη εστιάζεται στις παραμέτρους που επηρεάζουν τον τρόπο λυγισμού των πασσάλων. Σκοπός της εργασίας είναι, σταδιακά, μέσω της διαμόρφωσης όλο και πιο σύνθετων προσομοιωμάτων να προσδιοριστεί η βέλτιστη, κατά το δυνατόν, διάταξη αυτών των φορέων.

Στο Α' Μέρος της εργασίας, πραγματοποιείται γενική περιγραφή των φορέων, των στατικών συστημάτων, των τρόπων κατασκευής και των φορτίων που σχετίζονται με τις μεταλλικές εξέδρες φόρτωσης και εκφόρτωσης εμπορευμάτων. Στο 1^ο Κεφάλαιο, λοιπόν, αναφέρεται περιληπτικά η πορεία σκέψης που ακολουθείται για τη διαμόρφωση των λιμενικών κατασκευών στο σύνολό τους. Περιγράφονται αναλυτικά οι τύποι εξεδρών που μπορούν να κατασκευαστούν και οι επιλογές που υπάρχουν όσον αφορά στον τύπο της ανωδομής και των φερόντων πασσάλων και προσδιορίζονται οι παράγοντες που καθορίζουν τις επιλογές αυτές. Στο 2^ο Κεφάλαιο περιγράφονται τα φορτία που λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό των εξεδρών. Γίνεται διαχωρισμός σε μόνιμα, κινητά και περιβαλλοντικά φορτία και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην περιγραφή των τελευταίων, ενώ παράλληλα, παρατίθενται εξισώσεις και τρόποι υπολογισμού των δυνάμεων που αναπτύσσονται λόγω των παραπάνω φορτίων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 3 που ακολουθεί, κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στην κατασκευή που αποτέλεσε και την αφορμή για την παρούσα εργασία. Περιγράφονται οι επικρατούσες συνθήκες στην περιοχή του έργου που επηρέασαν τη διαμόρφωση του λιμένα στο σύνολο του, αναλύεται ο φορέας ανά τμήματα και, τελικά, προσομοιώνεται η συγκεκριμένη εξέδρα σε πρόγραμμα ανάλυσης προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά της.

Στο Β' Μέρος της εργασίας, η μελέτη εστιάζεται στη συμπεριφορά των μεταλλικών πασσάλων σε φαινόμενα λυγισμού και πραγματοποιείται μία σειρά παραμετρικών αναλύσεων προκειμένου να προσδιοριστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάταξη των πασσάλων κατά τη διαμόρφωση των εξεδρών. Στο 4^ο Κεφάλαιο προσδιορίζονται οι παράμετροι εκείνες που λαμβάνονται υπόψη και αιτιολογείται το εύρος των τιμών για το οποίο πραγματοποιούνται αναλύσεις. Στα κεφάλαια που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά οι παραμετρικές αναλύσεις. Ξεκινούν, στο Κεφάλαιο 5, με το πλέον απλό προσομοίωμα, ένα μεμονωμένο πάσσαλο, και καταλήγουν, στο Κεφάλαιο 10, με έναν πραγματικό σύνθετο φορέα. Σε κάθε σειρά παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιείται στα ανωτέρω κεφάλαια διαμορφώνονται διαγράμματα που παρουσιάζουν την επιρροή κάθε παραμέτρου και πίνακες με τις ιδιομορφές όλων των χρησιμοποιούμενων φορέων.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
POSTGRADUATE COURSE OF STUDIES
“Analysis & Design of Earthquake Resistant Structures”
Division of Structural Engineering- Laboratory of Steel Structures

STRUCTURAL DESIGN OF ACCESS TRESTLES

**Postgraduate Thesis
of Stella Vlachogianni**

Supervisor: Dr. Charis Gantes, Associate Professor N.T.U.A

ABSTRACT

This thesis deals with the investigation of the factors that influence the formation of a special type of port structures, access trestles founded on steel piles. Taking the occasion from an existing structure, the study focuses on the parameters that influence the buckling of the piles. The purpose of the thesis is, gradually through the simulation of increasingly complex systems, to determine the optimum possible arrangement of such structures.

In Part I of the work a general description of access trestles is given, and the methods of construction and the loads associated to such structural systems are described. To that effect, in Chapter 1, the structural concept for the development of port structures as a whole is summarized. The types of trestles and the available options regarding the type of superstructure and piles are described in detail and the factors driving these choices are identified. The 2nd Chapter describes the loads considered for the design of the trestles. These are separated into permanent, live and environmental, giving special emphasis on the description of the latter, illustrating equations and methods for the calculation of the forces developed due to the above loads. Finally, in Chapter 3, it is considered useful to describe the existing structure that lead to the present thesis. The conditions in the project area that influenced the lay-out of the port as a whole are described, and, finally, this specific access trestle is simulated in a structural analysis software in order to study its behavior.

In Part II of the work, the study focuses on the buckling behavior of the steel piles and a number of parametric analyses are carried out in order to identify the factors that determine the pile arrangement. Chapter 4 describes thoroughly the parameters that are used in the analyses and explains the range of the values for which tests are conducted. In the following chapters, the parametric analyses are described in detail. Starting with Chapter 5, with the simplest system, a single pile, and ending with Chapter 10, with an existing complex access trestle, for each parametric analysis diagrams are plotted that show the influence of each parameter as well as lists with the eigenmodes of every system that is analyzed.

A' ΜΕΡΟΣ

Γενική περιγραφή των φορέων, στατικά συστήματα, τρόποι κατασκευής, ισχύοντες κανονισμοί

1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1. Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και η διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαμόρφωση μιας ειδικής κατηγορίας λιμενικών κατασκευών, των μεταλλικών θαλάσσιων εξεδρών φόρτωσης και εκφόρτωσης εμπορευμάτων. Αποτελούν τμήματα της ευρύτερης διαμόρφωσης ενός λιμένα και εντάσσονται στη γενικότερη αντίληψη που ακολουθείται για το σχεδιασμό των λιμενικών έργων. Πρόκειται για τα τμήματα εκείνα τα οποία συνδέουν την ακτή με τις κατασκευές που βρίσκονται σε σχετικά μεγάλο βάθος κοντά στην ακτή στις οποίες προσδένουν τα σκάφη για τη φορτοεκφόρτωση των εμπορευμάτων τους.

Αυτού του είδους οι κατασκευές παρουσίασαν ιδιαίτερη ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες με την εκρηκτική αύξηση των εμπορικών δραστηριοτήτων σε διεθνές επίπεδο. Στην τεχνολογική πρόοδο και την ανάπτυξη εξελιγμένων στατικών συστημάτων και μεθόδων κατασκευής συνέβαλε καθοριστικά η χρήση αυτών των φορέων στη μεταφορά πετρελαιοχημικών προϊόντων. Είναι σαφές ότι πρόκειται για έργα πολύ μεγάλου προϋπολογισμού, τα οποία επηρεάζουν τόσο τις περιβαλλοντικές, όσο και τις κοινωνικές συνθήκες των τοπικών κοινωνιών, διαμορφώνουν μεγάλο αριθμό θέσεων εργασίας, εμπλέκουν μεγάλο αριθμό φορέων με ετερόκλητα συμφέροντα, απαιτούν πολλούς πόρους για την κατασκευή και τη λειτουργία τους, πολύ χρόνο για τη μελέτη και την κατασκευή τους και, από τεχνικής άποψης, ένα πολύ μεγάλο αριθμό παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την υλοποίησή τους.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων φορέων φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν. Επισημαίνεται ότι η πλειοψηφία αυτών των κατασκευών αναφέρεται σε σταθμούς φόρτωσης- εκφόρτωσης πετρελαϊκών προϊόντων.



i. Immingham- UK





ii. Oil terminal



iii. Tanker terminal- Shoaiba Desal Plant



iv. Oman LNG marine facilities

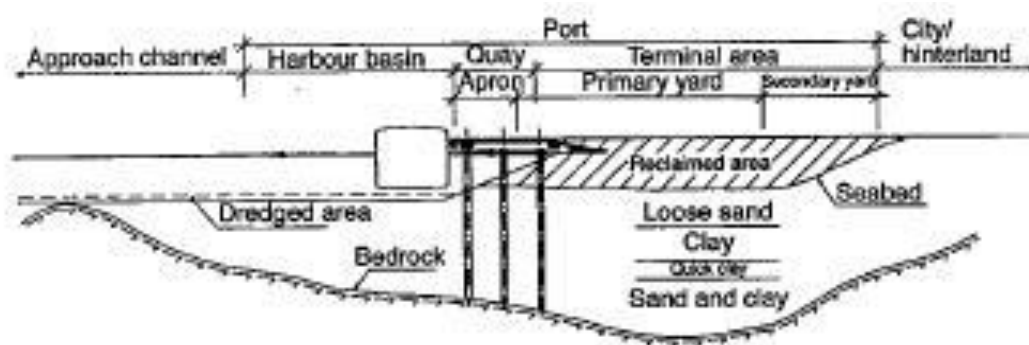
Εικόνα 1: Παραδείγματα λιμενικών έργων

1.2. Διαδικασία σχεδιασμού λιμενικών έργων

Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας σχεδιασμού που ακολουθείται για την κατασκευή των λιμενικών έργων, στα οποία εντάσσονται και οι υπό μελέτη εξέδρες.

Η διάταξη των έργων σε ένα λιμένα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζει αφενός τον ελλιμενισμό των πλοίων με ευκολία και, αφετέρου, τη φορτοεκφόρτωση των εμπορευμάτων και αποεπιβίβαση επιβατών με ασφάλεια και ταχύτητα. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να διασφαλίζεται άνετη πρόσβαση τω σκαφών στο λιμάνι, κατάλληλα σχεδιασμένη είσοδος, επαρκής χώρος ελιγμών καθώς και αποφυγή ανεπιθύμητων προσχώσεων ή διαβρώσεων του πυθμένα και της ακτής.

Για την ορθολογική μελέτη της γενικής διάταξης των έργων πρέπει να πραγματοποιηθεί μία σειρά από δραστηριότητες προκειμένου να συλλεχθούν και να επεξεργαστούν τα απαραίτητα δεδομένα. Ενδεικτικά, οι περιοχές που πρέπει να μελετηθούν παρουσιάζονται στην Εικόνα 2:



Εικόνα 2: Περιοχές που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό λιμενικών έργων

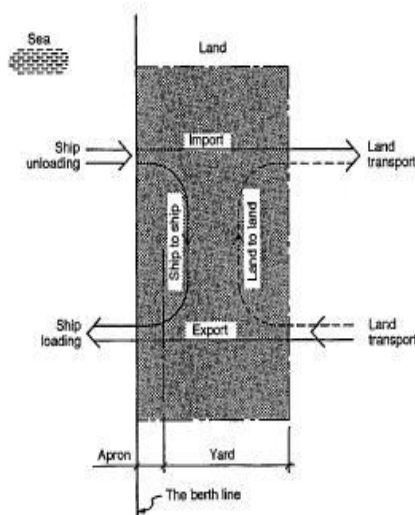
Παράλληλα, πρέπει να καθοριστούν με ακρίβεια οι ανάγκες του Ιδιοκτήτη του έργου, προκειμένου να προταθεί η βέλτιστη λύση. Για το λόγο αυτό, συλλέγονται οι εξής πληροφορίες:

- Είδος λιμενικών εγκαταστάσεων

Εξαρτώνται από το είδος των φορτίων που πρόκειται να μεταφερθούν, αν θα έχουν ιδιωτική ή δημόσια χρήση και αν θα προβλέπεται μελλοντική επέκταση.

- Καταγραφή του όγκου των μεταφερόμενων φορτίων

Πρέπει να συλλεχθούν δεδομένα για τις μέσες και μέγιστες τιμές φορτίων που θα μεταφερθούν. Η συνήθης διαδρομή των φορτίων φαίνεται στην Εικόνα 3, πρέπει όμως σε κάθε περίπτωση να προσαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες των Ιδιοκτητών. Τα δεδομένα που σχετίζονται με την πυκνότητα και τη συχνότητα των μεταφερόμενων φορτίων πρέπει να κατηγοριοποιούνται με βάση το μέγεθος των πλοίων που ελλιμενίζονται, το είδος του φορτίου, την απαίτηση ή μη αποθήκευσης στο χώρο του λιμανιού, το χρόνο παραμονής τους στις εγκαταστάσεις, τη συχνότητα και τον απαιτούμενο χρόνο φόρτωσης εκφόρτωσης του κάθε φορτίου, την προέλευση και τον προορισμό του και την απαίτηση ή μη ειδικού εξοπλισμού για το χειρισμό του.



Εικόνα 3: Ροή φορτίων στο λιμάνι

- Παράκτιες περιοχές και θαλάσσιες συνθήκες

Ο σχεδιασμός ενός λιμένα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες πλοήγησης κατά τη διαδικασία ελλιμενισμού των πλοίων, τις διαστάσεις του διαύλου προσέγγισης, τους περιορισμούς λόγω καιρικών συνθηκών κατά τη διαδικασία των ελιγμών, την πιθανότητα πρόσκρουσης πλοίων και άλλων κινδύνων και τις απαιτήσεις λειτουργίας σύμφωνα με τα πρότυπα ασφαλείας.

- Διαθεσιμότητα χώρου

Ένας σωστός σχεδιασμός τέτοιων εγκαταστάσεων πρέπει πάντα να περιλαμβάνει πρόβλεψη για μελλοντική επέκταση ή αλλαγή χρήσης του λιμένα. Πρέπει, λοιπόν, να συγκεντρωθούν πληροφορίες σχετικές με τις τοπικές συνθήκες κυκλοφορίας, τη θέση και το μέγεθος των αγκυροβολίων σε σχέση με τον υπάρχοντα χώρο και τις υπόλοιπες εγκαταστάσεις που πρέπει να τοποθετηθούν, τους τρόπους πρόσβασης στο λιμάνι σε σχέση με τις υπάρχουσες κυκλοφοριακές υποδομές, τη διαθεσιμότητα χώρου για δημιουργία αποθηκευτικών και λοιπών βοηθητικών εγκαταστάσεων και, συνολικά, την υπάρχουσα μορφή της περιοχής που θα τοποθετηθεί το έργο.

- Ανάπτυξη

Είναι σαφές ότι η κατασκευή τέτοιων έργων επηρεάζει την ανάπτυξη των κοντινών περιοχών. Κατά τη μελέτη, λοιπόν, πρέπει να ληφθεί υπόψη η αύξηση του πληθυσμού των περιοχών αυτών, η αύξηση της κυκλοφορίας, η οικονομική ανάπτυξη, η βιομηχανική εξέλιξη και, φυσικά, τα περιβαλλοντικά προβλήματα των τοπικών κοινωνιών

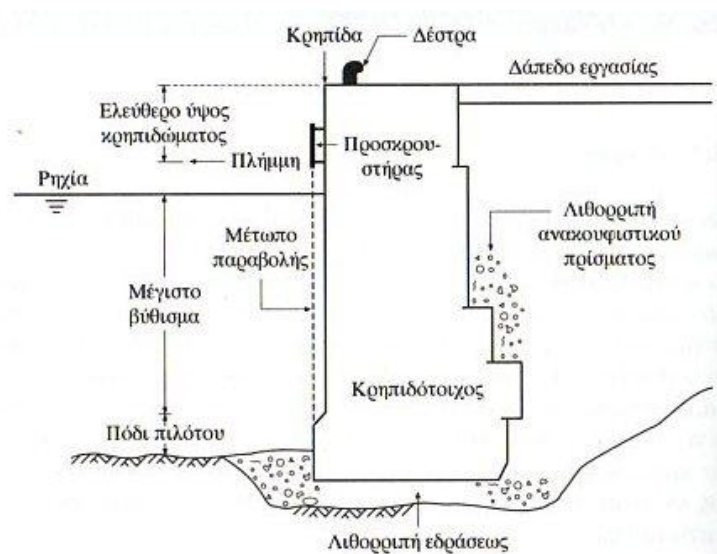
- Φυσικές συνθήκες

Παράλληλα με τις απαιτήσεις των Ιδιοκτητών, οι φυσικές συνθήκες της περιοχής συμμετέχουν καθοριστικά στη διαδικασία σχεδιασμού. Πολλές φορές, μάλιστα, κρίνεται απαραίτητο να διαμορφωθούν μικρής κλίμακας μοντέλα προσομοίωσης των πραγματικών συνθηκών. Οι συνθήκες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι τοπογραφικές, θαλάσσιες, γεωτεχνικές και γεωλογικές συνθήκες, δεδομένα στάθμης ύδατος, ποιότητα νερού, συνθήκες ανέμου και κυματισμών, κλιματολογικές συνθήκες, παλίρροια, ρεύματα, πάγος, συνθήκες ορατότητας, διαθεσιμότητα φυσικών πόρων κλπ.

1.3. Τύποι εξεδρών- κρηπιδωμάτων

Καθώς η ευρεία χρήση αυτής της μορφής εξεδρών είναι φαινόμενο των τελευταίων κυρίως ετών, δεν υπάρχει αναλυτική περιγραφή των τυπικών μορφών φορέων που μπορούν να κατασκευαστούν στη βιβλιογραφία. Για το λόγο αυτό, ακολουθεί η περιγραφή μίας αντίστοιχης κατηγορίας κατασκευών των κρηπιδότοιχων, που είναι κατασκευές όμως οι οποίες έρχονται σε επαφή με την ακτή και λαμβάνουν υπόψη την ώθηση των γαιών.

Τα κρηπιδώματα ή κρηπιδότοιχοι χρησιμεύουν για την πρόσδεση των σκαφών, ώστε να είναι δυνατές οι κάθε είδους κινήσεις φορτοεκφόρτωσης εμπορευμάτων ή/και αποεπιβίβασης επιβατών. Για το σκοπό αυτό διαμορφώνεται ένα υπαρκτό ή νοητό κατακόρυφο μέτωπο, το μέτωπο παραβολής, στο οποίο πλευρίζει, πρυμνοδετεί ή γενικά προσδένει το σκάφος για να ακινητοποιηθεί κατά το δυνατόν. Το κατακόρυφο αυτό μέτωπο συνήθως οριοθετεί τη λιμενολεκάνη και το υδάτινο στοιχείο, ενώ παράλληλα συγκρατεί τις γαίες που διαμορφώνουν τους χερσαίους χώρους του λιμένα και το δάπεδο εργασίας των κρηπιδωμάτων. Στην Εικόνα 4 δίνονται τα κύρια στοιχεία ενός εσωτερικού λιμενικού έργου:



Εικόνα 4: Βασική ονοματολογία κρηπιδώματος

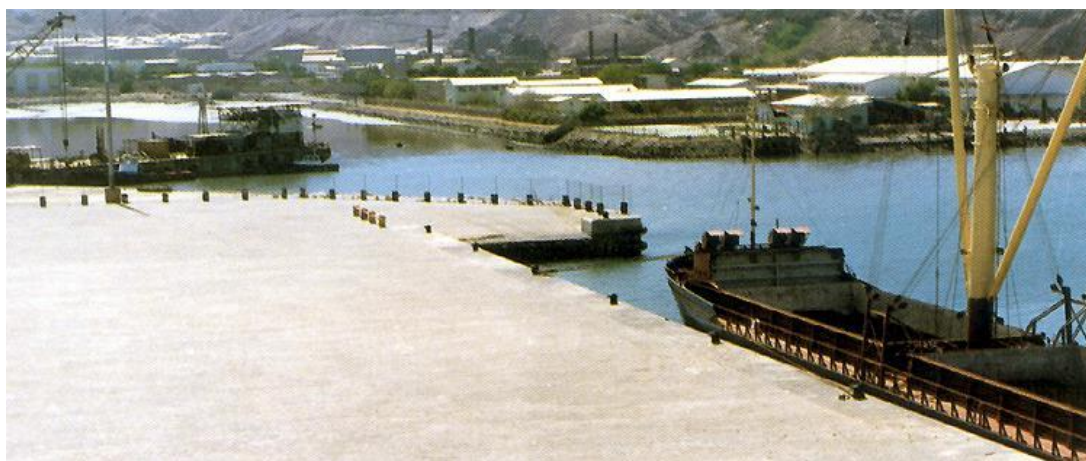
Τα κρηπιδώματα εξοπλίζονται συνήθως με προσκρουστήρες για την απορρόφηση της κρουστικής ενέργειας κατά την παραβολή των σκαφών, με δέστρες για την ακινητοποίηση τους μέσω των κάβων, με δίκτυα παροχών για την εξυπηρέτηση των σκαφών, με γερανούς για τη φορτοεκφόρτωση των εμπορευμάτων. Επίσης, τα κρηπιδώματα εφοδιάζονται κατά περίπτωση με κλίμακες, κρίκους πρόσδεσης και άλλα εξαρτήματα.

Διακρίνουμε διάφορους τύπους κρηπιδότοιχων ανάλογα με τη μορφή και τη λειτουργία τους. Οι κυριότεροι μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- i. Έργα βαρύτητας
- ii. Εύκαμπτα διαφράγματα
- iii. Κρηπιδότοιχοι ανοικτού τύπου

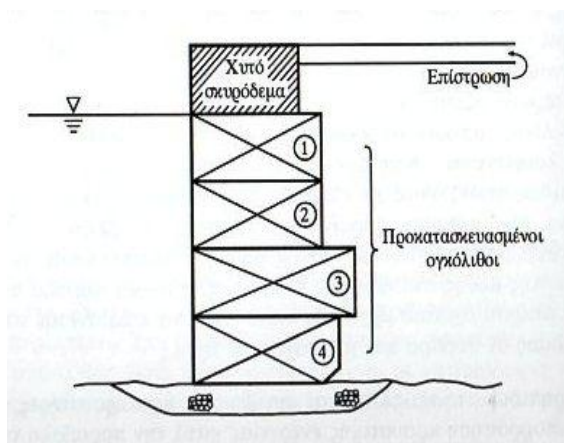
Οι δύο πρώτες κατηγορίες αναφέρονται ενημερωτικά, ενώ η τρίτη θα αναλυθεί περαιτέρω καθώς προσεγγίζει αρκετά το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.

Τα έργα βαρύτητας αντιμετωπίζουν τις ωθήσεις γαιών κυρίως μέσω του ίδιου βάρους τους και της συνεπαγόμενης αντίστασης σε ολίσθηση. Επομένως πρόκειται για ογκώδεις κατασκευές στις οποίες εφαρμόζεται εκτεταμένα η προκατασκευή. Δύο τυπικοί εκπρόσωποι της κατηγορίας αυτής είναι ο κλασικός κρηπιδότοιχος με προκατασκευασμένους συμπαγείς ογκολίθους από σκυρόδεμα και τα προκατασκευασμένα κιβώτια. Οι ογκολίθοι αυτοί είναι μεγάλων διαστάσεων και κατασκευάζονται με ή χωρίς πυθμένα. Εναλλακτικά, οι κυψέλες μπορεί να διαμορφωθούν με μεταλλικές πασσαλοσανίδες που εμπήγνυνται επί τόπου του έργου. Οι κυψέλες συμπληρώνονται με αδρανή υλικά.

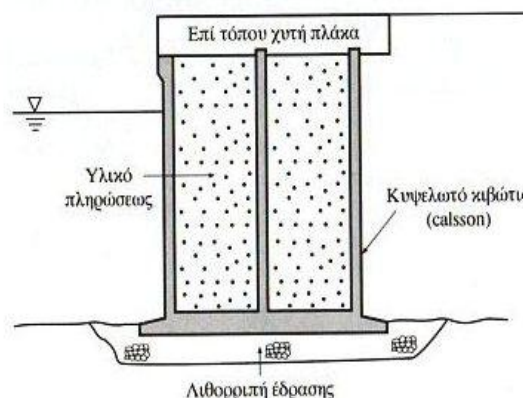


Εικόνα 5: Κρηπιδώμα κλειστού μετώπου

Τα διαφράγματα αναλαμβάνουν τις οριζόντιες ωθήσεις μέσω της ακαμψίας των κατακόρυφων στοιχείων της λεπτής διατομής και μορφώνονται είτε από συστοιχία μεταλλικών πασσαλοσανίδων, είτε από προκατασκευασμένες πασσαλοσανίδες οπλισμένου σκυροδέματος.

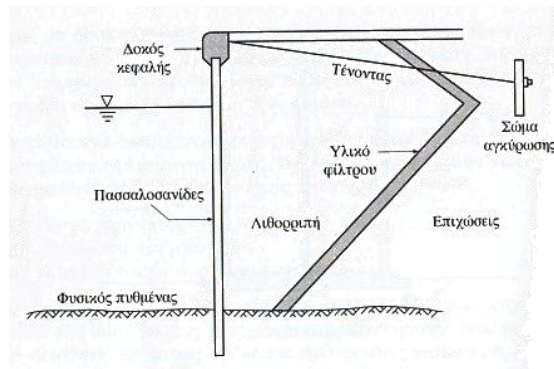


Εικόνα 6: Κρηπιδότοιχος από πρόχυτους ογκολίθους



Εικόνα 7: Κρηπιδότοιχος από πρόχυτα κιβώτια

Για μείωση των καμπτικών ροπών και επακόλουθα των διαστάσεων του έργου, σχεδόν πάντοτε προβλέπονται αγκυρώσεις μέσω κατάλληλων τενόντων. Εκτός από προκατασκευασμένα στοιχεία, για τη μόρφωση του έργου μπορεί να χρησιμοποιηθεί έγχυτο σκυρόδεμα. Σε αυτήν την περίπτωση αναφέρεται ως διαφραγματικός τοίχος.



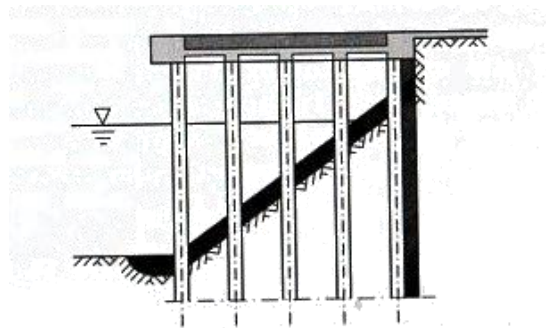
Εικόνα 8: Πασσαλόφραγμα με αγκύρωση

Η τρίτη μεγάλη κατηγορία κρηπιδότοιχων διαφέρει από τις άλλες δύο στο γεγονός ότι η θεμελίωση του έργου είναι ασυνεχής και εξασφαλίζεται μέσω πασσάλων.



Εικόνα 9: Κρηπιδώμα ανοικτού τύπου (Abu Dhabi)

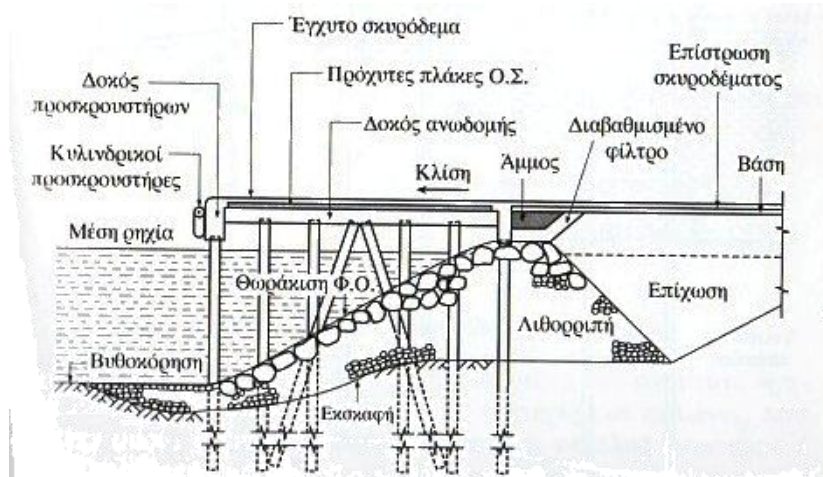
Οι πάσσαλοι, που μπορεί να είναι μεταλλικοί ή σκυροδέματος, υποβαστάζουν την πλατφόρμα του κρηπιδώματος και μεταφέρουν τα φορτία στο έδαφος. Η συγκράτηση των γαιών και επιχώσεων επιτυγχάνεται συνήθως με κατάλληλη θωράκιση του πρανούς σε συνδυασμό με κατασκευή βαρύτητας ή διάφραγμα στο έξαλο τμήμα. Τυπική διάταξη κρηπιδώματος ανοικτού τύπου δίδεται στην Εικόνα 10:



Εικόνα 10: Τυπική διάταξη ανοικτού κρηπιδώματος

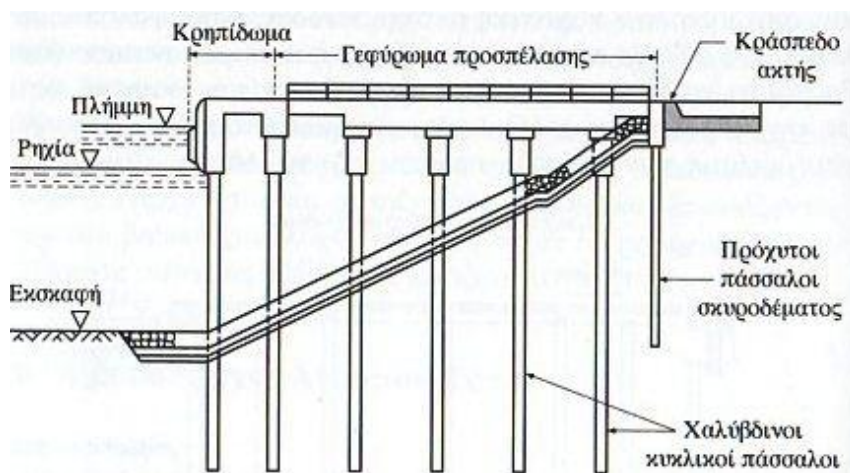
Οι κατασκευές αυτές μπορεί να είναι είτε εύκαμπτες, οπότε και στηρίζονται αμιγώς σε κατακόρυφους πασσάλους, χωρίς εξωτερικές δεσμεύσεις στη οριζόντια διεύθυνση, είτε πιο δύσκαμπτες με τη χρήση κεκλιμένων πασσάλων. Η δυσκαμψία τους εξαρτάται από τη συνολική διαμόρφωση του φορέα, τα χρησιμοποιούμενα υλικά, την επιμέρους δυσκαμψία

μελών και στηρίξεων, αλλά και την προβλεπόμενη χρήση των κατασκευών αυτών. Γίνεται αντιληπτό ότι οι εύκαμπτες κατασκευές μπορεί να μην είναι κατάλληλες για τη λειτουργία γερανών, κυρίως σε σεισμογενείς περιοχές. Επίσης, δεν είναι οι πλέον κατάλληλες για πλατφόρμες φορτοεκφόρτωσης υγρών φορτίων, καθώς στους χρησιμοποιούμενους αγωγούς μεταφοράς των υγρών παρουσιάζεται ο κίνδυνος εμφάνισης σημαντικών οριζόντιων δυνάμεων λόγω ανέμου, κυμάτων, ρευμάτων και θερμοκρασιακών μεταβολών της προβλήτας. Τα επιτρεπτά όρια συστολοδιαστολών εξαρτώνται από το σύστημα αγωγών που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 11: Κρηπίδωμα με κατακόρυφους και λοξούς πασσάλους

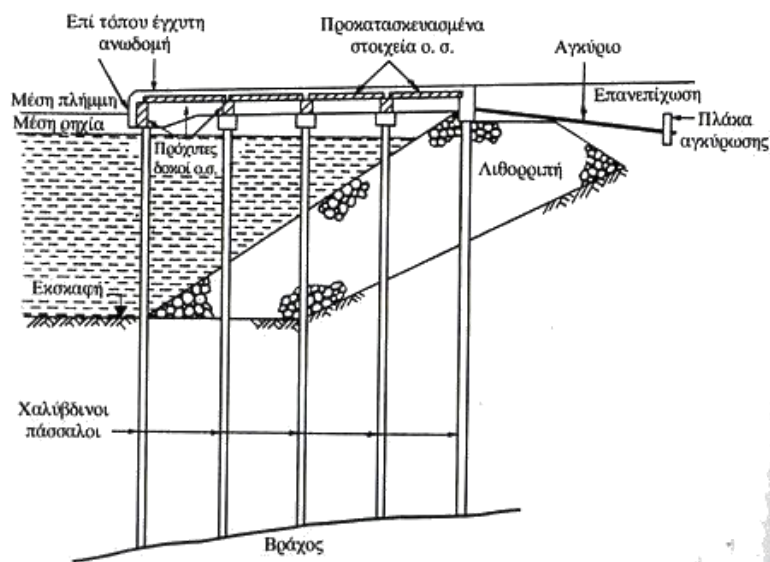
Όπως φαίνεται στη Εικόνα 11 οι πάσσαλοι μπορεί να είναι όλοι κατακόρυφοι ή να συνυπάρχουν και κεκλιμένοι για την ανάληψη των οριζόντιων φορτίων. Στην περίπτωση των κατακόρυφων πασσάλων οι οριζόντιες φορτίσεις μπορούν να αναληφθούν από εγκάρσια γεφυρώματα που προβλέπονται ανά αποστάσεις, όπως σε κρηπιδώματα χωρίς αμαξιτή προσπέλαση (Εικόνα 12), από την παθητική αντίσταση των γαιών για τις προς τη στεριά φορτίσεις, από αγκυρώσεις για τις προς τη θάλασσα δυνάμεις (Εικόνα 13) ή και μόνον από την καμπτική αντοχή των κατακόρυφων πασσάλων (Εικόνα 14).



Εικόνα 12: Παραλιακό κρηπίδωμα με γεφυρώματα προσπέλασης

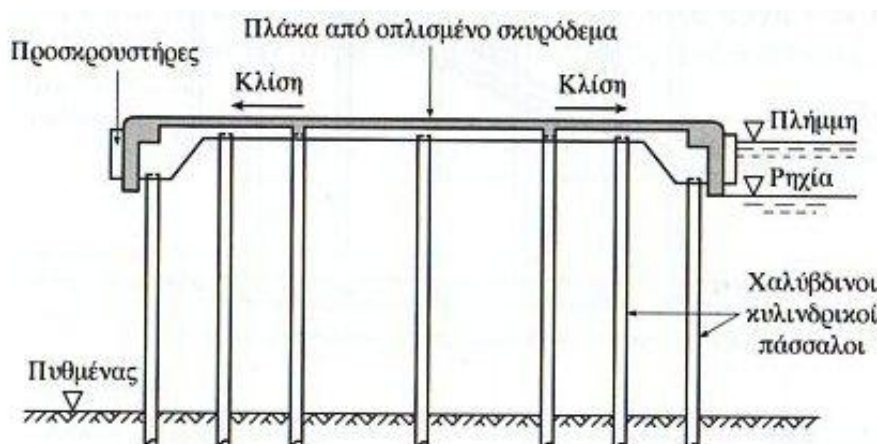
Σε περίπτωση πρόβλεψης κεκλιμένων πασσάλων θα πρέπει να δίνεται προσοχή στην ποιότητα του εδάφους, ώστε με την πάροδο του χρόνου να μην προκύπτουν κατακόρυφες επιφορτίσεις των πασσάλων αυτών από το εδαφικό υλικό. Εάν χρησιμοποιείται υδραυλική επίχωση ή τα εδάφη είναι πολύ χαλαρά κατασκευάζεται εκ

των προτέρων πρίσμα συγκράτησης των επιχώσεων που μπορεί να θωρακισθεί επιπρόσθετα μετά την έμπηξη των πασσάλων. Κατάλληλη διάταξη αποστράγγισης θα πρέπει να προβλέπεται ιδίως σε συνεκτικά εδάφη και σε επίκαιρες θέσεις, όπως στη συναρμογή των υλικών πληρώσεως με το προς τη στεριά πέρας της ανωδομής.

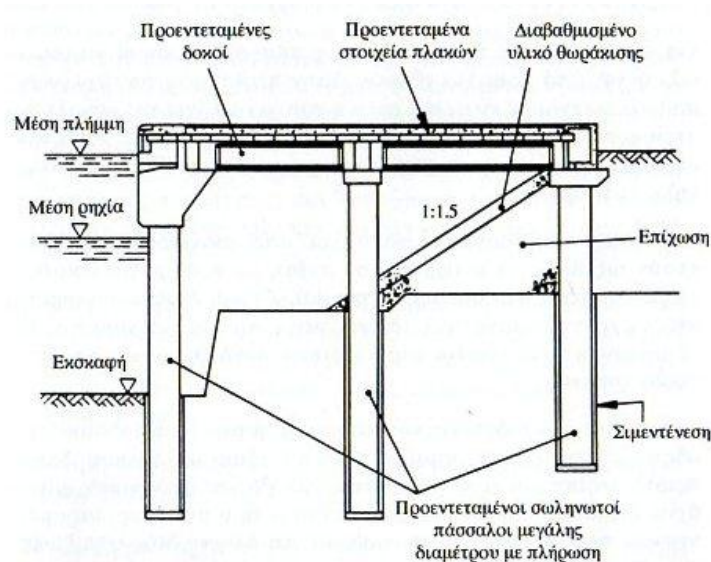


Εικόνα 13: Ανοικτό κρηπίδωμα με αγκύρωση

Παραλλαγή του παραπάνω τύπου στήριξης του ανοικτού κρηπιδώματος σε πασσάλους αποτελεί η στήριξη σε πυλώνες, που στη ουσία είναι κατακόρυφοι πάσσαλοι μεγάλης διαμέτρου ή άλλης ειδικής μορφής (Εικόνα 14). Το υλικό κατασκευής των πυλώνων είναι συνήθως οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα. Αντίθετα με τους πασσάλους, οι πυλώνες αντέχουν σε μεγάλες διατμητικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές. Τα έργα πάνω σε πυλώνες αφορούν συχνά ειδικά λιμενικά έργα, που κατασκευάζονται εκτός της προστατευμένης περιοχής του λιμένος, αλλά και συνήθη παράκτια κρηπιδώματα μπορούν να διαμορφωθούν με ανάλογο τρόπο.



Εικόνα 14: Διατομή προβλήτα σε κατακόρυφους πασσάλους



Εικόνα 15: Παράκτιο κρηπίδωμα σε πυλώνες

1.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή φορέα

- Συνθήκες εδάφους

Το γεγονός ότι οι συνθήκες εδάφους μπορεί να μεταβάλλονται σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μεγάλου αριθμού από είδη προβλητών. Επομένως, αν το έδαφος είναι χαλαρό με μικρή αντοχή δεν έχει νόημα η κατασκευή μίας συμπαγούς διατομής, αλλά προτείνεται η στήριξη σε πασσάλους οι οποίοι θα καταλήγουν σε βράχο ή άλλο ισχυρό στρώμα. Με λίγα λόγια, έχει ιδιαίτερη σημασία η λεπτομερής και προσεκτική γεωτεχνική μελέτη, η οποία, πολλές φορές, καθορίζει και τον τύπο προβλήτας που τελικά θα κατασκευαστεί.

- Ποσότητα υποθαλάσσιας εργασίας

Η αποφυγή όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ποσότητας εργασίας κάτω από το νερό είναι πολύ σημαντικός παράγοντας κατά το σχεδιασμό των προβλητών. Δίνεται έμφαση στο να επιλέγονται μέθοδοι κατασκευής οι οποίες επιτρέπουν οι εργασίες να γίνονται στην επιφάνεια και σε τελικό στάδιο να τοποθετούνται κάτω από το νερό. Ιδανική επιλογή για αυτό είναι οι κατασκευές που στηρίζονται σε μεταλλικούς πασσάλους.

- Κυματισμοί

Οι ανοικτού τύπου προβλήτες προτιμώνται σε σύγκριση με τις συμπαγείς, όσον αφορά στη συμπεριφορά των κυματισμών που αντανακλώνται στο κατακόρυφο μέτωπο. Η αντανάκλαση των κυματισμών στο συμπαγές κατακόρυφο μέτωπο μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στη σωστή λειτουργία του λιμένα.

- Εμπειρία κατασκευής

Οι εργασίες που πρέπει να πραγματοποιηθούν σε τέτοια έργα, δίπλα ή κάτω από το νερό, διαφέρουν σημαντικά από αυτές που γίνονται στην ξηρά. Γι' αυτό η ανάλογη εμπειρία σε αυτές τις κατασκευές θεωρείται απαραίτητη, και μάλιστα υπάρχουν κανονισμοί οι οποίοι δίνουν ιδιαίτερη έμφαση σε αυτήν την παράμετρο (π.χ. Norwegian Concrete Association's Guidelines for Design and Construction of Concrete Structures in Marine Environments).

- Εξοπλισμός

Για τέτοιας κλίμακας έργα απαιτείται εξειδικευμένος και βαρύς εξοπλισμός και πρέπει να διασφαλισθεί ότι η εταιρία που αναλαμβάνει την κατασκευή μπορεί να ανταποκριθεί στις ειδικές απαιτήσεις.

- Υλικά

Η επιλογή των υλικών κατασκευής επηρεάζεται από το σκοπό λειτουργίας της προβλήτας και από οικονομικούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί, μάλιστα, επηρεάζουν και τις περισσότερες των περιπτώσεων το σχεδιασμό όλης της κατασκευής. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η διαθεσιμότητα ή μη των υλικών στην κοντινή περιοχή του έργου.

- Χρόνος κατασκευής

Ο χρόνος κατασκευής είναι καθοριστικός σε μεγάλης κλίμακας έργα. Δίνεται προσοχή αν η νέα κατασκευή επηρεάζει τη λειτουργία κάποιου κοντινού λιμανιού και επιλέγεται εκείνος ο τρόπος κατασκευής ο οποίος θα διαταράξει όσο το δυνατόν λιγότερο την εύρυθμη λειτουργία των κοντινών εγκαταστάσεων. Ανάλογα με το είδος της προβλήτας η ταχύτητα προόδου των εργασιών μεταβάλλεται.

- Μελλοντική επέκταση

Μελλοντικές ανάγκες που μπορεί να προκύψουν από τις αυξανόμενες απαιτήσεις μεταφοράς προϊόντων πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό και την επιλογή τύπου προβλήτας. Συχνό φαινόμενο είναι η απαίτηση για μεγαλύτερα βάθη νερού, προκειμένου να προσεγγίσουν μεγαλύτερα σκάφη, γεγονός όμως που μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα με την ευστάθεια των υπαρχουσών κατασκευών.

- Κόστος κατασκευής

Είναι αυτό που συνήθως καθορίζει και την επιλογή του φορέα. Η γενική παραδοχή είναι ότι ανοικτού τύπου προβλήτες είναι φθηνότερες από τις συμπαγείς όσο αυξάνεται το βάθος του νερού στο μπροστινό μέτωπο.

Συνοπτικά, ανοικτού τύπου φορέας προτιμάται στις εξής περιπτώσεις:

- i. όταν το υπέδαφος αποτελείται από χαλαρά επιφανειακά στρώματα πάνω από ισχυρό υπόβαθρο
- ii. όταν δεν υπάρχει το απαιτούμενο υλικό πλήρωσης για την κατασκευή τοίχων βαρύτητας
- iii. όταν πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η επιρροή του έργου στις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής
- iv. όταν οι εργασίες γίνονται σε μεγάλο βάθος νερού.

1.5. Τύποι ανωδομής

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος μόρφωσης της ανωδομής είναι με χρήση προκατασκευασμένων ή και επί τόπου χυτών στοιχείων σκυροδέματος. Χαλύβδινες δοκοί μπορεί επίσης να προβλεφθούν σε συνδυασμό με το σκυρόδεμα, ενώ ξύλινη ανωδομή μπορεί να κατασκευασθεί σε μικρά έργα, όπως σε αλιευτικά καταφύγια ή μαρίνες.

Αμφιέριστες ή τετραέριστες πλάκες διαμορφώνουν τη μεγάλη οριζόντια επιφάνεια της ανωδομής. Οι πλάκες στηρίζονται σε δοκούς, που με τη σειρά τους εδράζονται στις

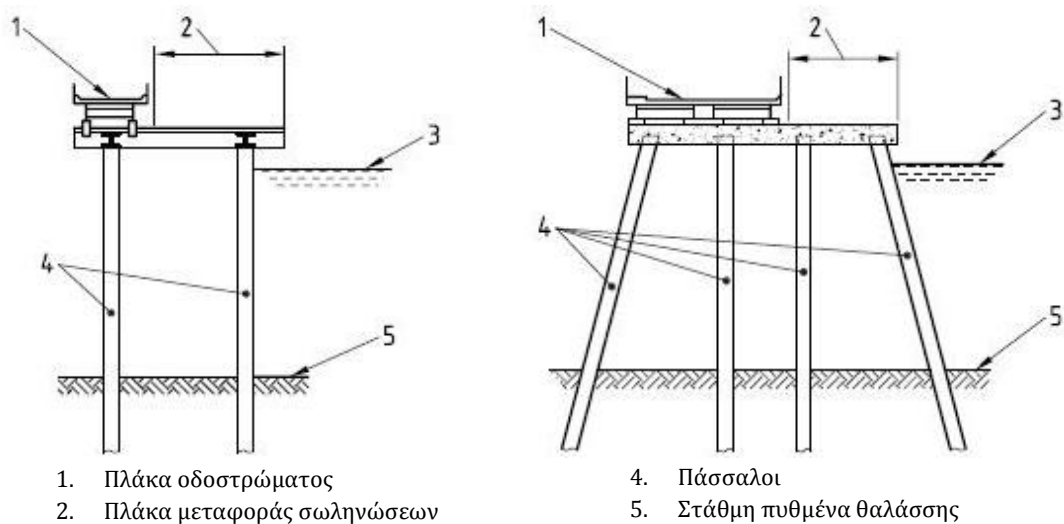
κεφαλές των πασσάλων. Διάφοροι συνδυασμοί δοκών από σκυρόδεμα και χάλυβα εφαρμόζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου.



Jubail Saudi Arabia

Εικόνα 16: Τύποι ανωδομής

Αν το μήκος της αποβάθρας είναι αρκετά μεγάλο, η ταχύτητα της κατασκευής είναι σημαντική παράμετρος και πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό. Σε αυτήν την περίπτωση προκατασκευασμένες δοκοί και σύμμικτες κατασκευές χρησιμοποιούνται ευρέως. Όπου υπάρχουν μεταλλικά μέλη, αυτά πρέπει να προστατεύονται έναντι διάβρωσης. Η συνήθης διάταξη αποτελείται από μεταλλική εσχάρα και κατάστρωμα από σκυρόδεμα. Πέραν των συνήθων φορτίσεων που παραλαμβάνει η ανωδομή, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην κατηγορία αυτή κρηπιδότοιχων και η ένταση που προκαλείται στην ανωδομή από τις ελαστικές παραμορφώσεις των επί μέρους πασσάλων που την υποστηρίζουν. Η σύνδεση ανωδομής- πασσάλων πρέπει να ελέγχεται ιδιαίτερα σε σεισμική επιβάρυνση.



Εικόνα 17: Τύποι ανωδομής

Η τελική στάθμη της ανωδομής καθορίζεται από τους εξής παράγοντες:

- Τη στάθμη του θερματικού σταθμού
- Το υψηλότερο σημείο της στάθμης του ύδατος λαμβάνοντας υπόψη και τις μεταβολές λόγω παλίρροιας
- Τη μεταβολή της στάθμης ύδατος λόγω ανέμου μέσα στη λεκάνη του λιμανιού
- Τη δράση των κυμάτων
- Το είδος των πλοίων που χρησιμοποιούν την αποβάθρα
- Τις εγκαταστάσεις του λιμένα και τη διαχείριση των φορτίων

1.6. Φέροντες πάσσαλοι

1.6.1. Γενικά χαρακτηριστικά

Οι πάσσαλοι αποτελούν το συνηθέστερο τρόπο βαθιάς θεμελίωσης, η οποία εφαρμόζεται με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό και βασίζεται στο γεγονός ότι αν το έδαφος κοντά στην επιφάνεια δεν είναι επαρκώς ανθεκτικό, μπορούν να κατασκευασθούν επιμήκη στοιχεία (πάσσαλοι) από υλικό με αντοχή μεγαλύτερη από το περιβάλλον έδαφος (π.χ. από σκυρόδεμα ή χάλυβα) τα οποία μεταφέρουν τα φορτία της κατασκευής στο βάθος, όπου οι εδαφικές στρώσεις είναι επαρκώς ανθεκτικές. Επομένως, όταν μαλακά εδάφη υπέρκεινται στιφρών, σε αποθέσεις μαλακών ή χαλαρών εδαφών μεγάλου πάχους, επιτυγχάνεται η μεταβίβαση στο έδαφος υψηλών φορτίων με ταυτόχρονο περιορισμό των καθιζήσεων, η ανάληψη υψηλών φορτίων με τρόπο που να μην επηρεάζονται υπάρχουσες κατασκευές με επιφανειακή θεμελίωση, η ανάληψη οριζόντιων φορτίων, κλπ.

1.6.2. Υλικό κατασκευής

Οι φέροντες πάσσαλοι μπορεί να αποτελούνται από ποικιλία υλικών. Στην περίπτωση των ξύλινων πασσάλων έχουμε ευχέρεια στην κατασκευή λόγω της ευκολίας στην κοπή τους και του μικρού σχετικά βάρους τους. Επέκταση των πασσάλων κατά μήκος μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλη μάτιση.

Οι προκατασκευασμένοι πάσσαλοι από σκυρόδεμα πλεονεκτούν ως προς τη μειωμένη, σε σχέση με τους μεταλλικούς, διάβρωση τους στο θαλάσσιο περιβάλλον και διαθέτουν σημαντική φέρουσα ικανότητα, ιδίως όταν είναι προεντεταμένοι. Η επιμήκυνση τους γίνεται μέσω ειδικών συνδέσμων και εποξειδικών ρητινών.

Επί τόπου σκυροδοτούμενοι πάσσαλοι μπορεί να κατασκευασθούν με τεχνικές εκτοπίσεως ή μη του εδαφικού υλικού. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται χαλύβδινος σωληνωτός μανδύας διαμέτρου μέχρι 700 mm το πολύ, που συνήθως παραμένει και προφυλάσσει το σκυρόδεμα για όλη τη διάρκεια ζωής του. Στην δεύτερη περίπτωση μπορούμε να έχουμε πασσάλους μεγαλύτερης διαμέτρου, μέχρι 1200 mm, σε στιφρή άργιλο ή ημίβραχο. Γενικά η χρήση επί τόπου σκυροδοτούμενων πασσάλων πρέπει να αποφεύγεται στα λιμενικά έργα λόγω των ανεξέλεγκτων συνθηκών διάστρωσης ύφαλου σκυροδέματος.

1.6.2.1. Χαλύβδινοι πάσσαλοι

Στην παρούσα εργασία αντικείμενο μελέτης είναι οι χαλύβδινοι πάσσαλοι, οι οποίοι και περιγράφονται αναλυτικότερα. Χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της αυξημένης αντοχής τους και της ευχέρειας χειρισμού τους, είναι ικανοί να μεταφέρουν μεγάλα θλιπτικά φορτία όταν καταλήγουν σε συμπαγές εδαφικό στρώμα και έχουν τη δυνατότητα έμπηξης σε μεγάλο βάθος μέχρι να συναντήσουν το κατάλληλο εδαφικό στρώμα ή να αναπτύξουν υψηλή πλευρική τριβή, ωστόσο το κόστος τους ανά μέτρο είναι υψηλότερο σε σύγκριση με τους πασσάλους από σκυρόδεμα. Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα έναντι κάμψης και λυγισμού.



i. Egyptian LNG Marine works- Egypt



Jubail Saudi arabia

Εικόνα 18: Χαλύβδινοι πάσσαλοι

Οι συνήθεις τύποι χαλύβδινων πασσάλων αποτελούνται από διατομές μορφής Η, οι οποίες προσφέρουν μεγάλη παράπλευρη τριβή, και κυκλικές διατομές, οι οποίες διαθέτουν καλές ιδιότητες για παραλαβή οριζόντιων και αξονικών φορτίσεων. Οι κοίλες διατομές συχνά τοποθετούνται με ανοικτό το κάτω άκρο. Δεν είναι πάντα απαραίτητο να πληρώνονται οι κοίλες διατομές με σκυρόδεμα, εκτός των περιπτώσεων που προκύπτει κρίσιμη η αντοχή αιχμής. Ειδικά σε λιμενικά έργα, όπου επιδιώκεται περισσότερο ελαστικότητα (resilience), απ' ότι δυσκαμψία (rigidity), ώστε να αναληφθούν οι δυνάμεις λυγισμού και προσκρούσεων, η πλήρωση των κοίλων διατομών με σκυρόδεμα δεν ενδείκνυται.

Για συνήθη, αδιατάρακτα εδαφικά στρώματα οι χαλύβδινες διατομές πρέπει να έχουν επαρκή αντοχή σε διάβρωση, για την περίοδο ζωής που σχεδιάζονται, και το τμήμα του πασσάλου που βρίσκεται πάνω από τη στάθμη της θάλασσας σε λιμενικά έργα ή το τμήμα που βρίσκεται σε διαβρωμένα εδαφικά στρώματα πρέπει να προστατεύεται έναντι διάβρωσης

1.6.3. Τύποι πασσάλων

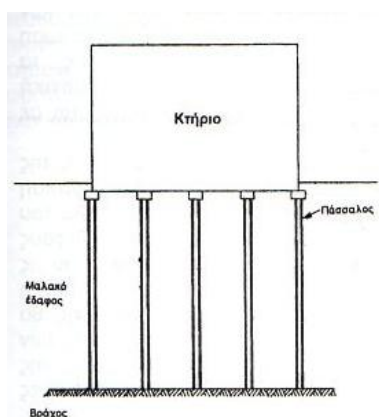
Ανάλογα με τη μεθοδολογία κατασκευής τους οι πάσσαλοι διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: στους πασσάλους «δι' εκτοπίσεως» και στους πασσάλους «άνευ εκτοπίσεως» (δι' εκσκαφής του εδαφικού υλικού κατά την κατασκευή τους)

- i. Πάσσαλοι δι' εκτοπίσεως
 - a. Προκατασκευασμένοι- εμπηγνυόμενοι: ξύλινοι, μεταλλικοί, οπλισμένου σκυροδέματος (με απλό ή προεντεταμένο οπλισμο)
 - b. Επί τόπου εγχυόμενοι (σκυροδέματος) με εκτόπιση εδαφικού υλικού
- ii. Πάσσαλοι άνευ εκτοπίσεως (δι' εκσκαφής)

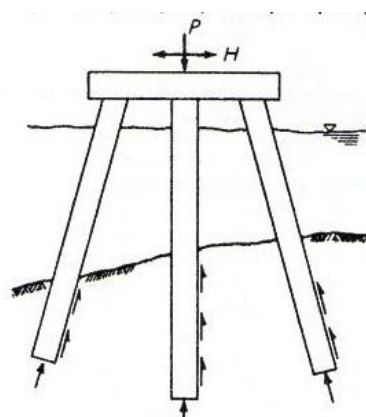
Στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον εστιάζεται στην πρώτη κατηγορία των εμπηγνυόμενων- προκατασκευασμένων πασσάλων. Πρόκειται για τον ιδανικότερο τύπο για την περίπτωση των λιμενικών έργων καθώς η κατασκευή τους δεν επηρεάζεται από υπόγεια ύδατα, επιτυγχάνουν μεγάλα βάθη, επανεμπηγνύονται σε περίπτωση «ανύψωσης», μπορούν να εμπηχθούν σε προκαθορισμένη διάταξη και είναι κατάλληλοι για τις περιπτώσεις όπου σχετικώς μεγάλου πάχους μαλακές αποθέσεις υπέρκεινται της

βάσεως έδρασης. Όσο, βέβαια, αυξάνεται η διατομή του πασσάλου, τόσο δυσκολότερη γίνεται η έμψη και εμφανίζονται δυσκολίες κατά την κατασκευή.

Μία δεύτερη κατηγοριοποίηση των πασσάλων- η οποία όμως δε θα αναλυθεί περαιτέρω- βασίζεται στον τρόπο μεταβίβασης των φορτίων στο έδαφος και τον τρόπο ανάπτυξης της αντοχής- οριακού φορτίου- των πασσάλων. Σε αυτήν την περίπτωση διακρίνονται σε: α) πασσάλους αιχμής- οπότε και το σύνολο της αντοχής τους οφείλεται στην αντοχή του εδάφους στην περιοχή αιχμής του πασσάλου, β) πασσάλους τριβής- οπότε και η φέρουσα ικανότητά τους οφείλεται στην τριβή που αναπτύσσεται στην παράπλευρη επιφάνεια και γ) πασσάλους αιχμής- τριβής



Εικόνα 19: Θεμελίωση με πασσάλους αιχμής σε βραχώδες στρώμα



Εικόνα 20: Θεμελίωση με πασσάλους τριβής

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου αποτελεί σημαντικό σημείο κατά τη φάση σχεδιασμού ενός μεγάλου έργου. Από την επιλογή αυτή επηρεάζονται τόσο η εν γένει συμπεριφορά, όσο και το κόστος του έργου. Τα βασικά κριτήρια για την επιλογή συγκεκριμένου τύπου πασσάλου σε ένα λιμενικό έργο είναι:

- i. η θέση, ο τύπος και οι φορτίσεις της ανωδομής,
- ii. οι συνθήκες υπεδάφους καθώς και η στάθμη των υπόγειων υδάτων,
- iii. οι ειδικές επί τόπου συνθήκες,
- iv. η διάρκεια ζωής του έργου και, τέλος,
- v. οι δυνατότητες και το κόστος κατασκευής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε λιμενικά έργα η χρήση προκατασκευασμένων πασσάλων δι' εκτοπίσεως είναι η πρώτη επιλογή. Ένας συμπαγής προκατασκευασμένος πάσσαλος από σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περιοχές με χαμηλή στάθμη νερού, αλλά για βαθιά νερά είναι πολύ βαρύς και δύσκολος στη διαχείριση. Για το λόγο αυτό, επιλέγονται πάσσαλοι κοίλης μεταλλικής διατομής ή κοίλης προκατασκευασμένης διατομής από σκυρόδεμα. Μεγάλης διαμέτρου μεταλλικοί πάσσαλοι αποτελούν οικονομική λύση στην ανάληψη πλευρικών δυνάμεων λόγω κυματισμών και πρόσδεσης σκαφών. Οι συνθήκες εδάφους, επηρεάζουν τόσο το υλικό που επιλέγεται, όσο και τη μέθοδο εγκατάστασης του πασσάλου.

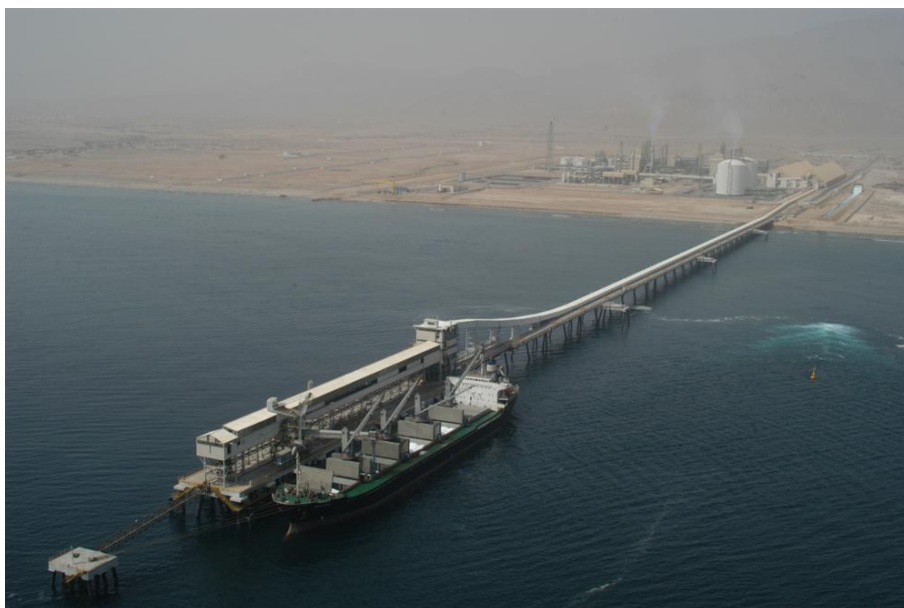
Τελικά, ο παράγοντας της αντοχής είναι αυτός που καθορίζει την επιλογή του υλικού. Έτσι, ενώ οι ξύλινοι πάσσαλοι μπορεί να αποτελούν μία φθηνή επιλογή, δεν προτιμώνται λόγω της μικρής αντοχής και της τάσης να αποσυντίθενται εύκολα στο τμήμα που βρίσκεται πάνω από το νερό. Προκατασκευασμένοι πάσσαλοι από σκυρόδεμα δεν υπόκεινται σε διάβρωση όταν βρίσκονται σε θαλασσινό νερό και καλής σύνθεσης

σκυρόδεμα μειώνει την επιρροή υψηλών συγκεντρώσεων θεικών οξέων σε έδαφος ή νερό. Οι έγχυτοι πάσσαλοι από σκυρόδεμα δεν είναι τόσο ανθεκτικοί σε βλαβερές ουσίες, διότι είναι δύσκολη η άριστη συμπύκνωση του σκυροδέματος. Οι μεταλλικοί πάσσαλοι μπορούν να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής για συνήθεις εδαφικές συνθήκες, εφόσον δεν έρχονται σε επαφή με θαλασσινό νερό ή διαβρωμένα εδαφικά στρώματα. Σε αντίθετη περίπτωση πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα έναντι διάβρωσης.

Η τελική επιλογή του πασσάλου εξαρτάται από το κόστος. Ωστόσο, το συνολικό κόστος μίας θεμελίωσης από πασσάλους δεν είναι ούτε η τιμή ανά μέτρο μήκους, αλλά ούτε και το κόστος ανά πάσσαλο ανά kN που μεταφέρει. Η παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη είναι το συνολικό κόστος των εργασιών θεμελίωσης και τοποθέτησης των πασσάλων.

1.6.4. Πάσσαλοι σε λιμενικά έργα

Οι προβλήτες αποτελούνται από μία αποβάθρα, όπου προσδένουν τα πλοία για τη φορτοεκφόρτωση των εμπορευμάτων τους και μία κατασκευή που συνδέει την αποβάθρα αυτή με την ακτή και στηρίζει το οδόστρωμα και τους αγωγούς μεταφοράς των προϊόντων.



Εικόνα 21: Προβλήτα μεταφοράς πετρελαίου

Οι προβλήτες που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη μεταφορά πετρελαίου και παράγωγων προϊόντων διαφέρουν σημαντικά τόσο στη διαμόρφωση, όσο και στον εξοπλισμό από τις προβλήτες μεταφοράς στερεών προϊόντων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα πλοία μεταφοράς υγρού φορτίου που χρησιμοποιούν αυτές τις κατασκευές, μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερα από τα φορτηγά πλοία, ωστόσο ο απαιτούμενος εξοπλισμός συνήθως είναι σημαντικά ελαφρύτερος. Για υγρά φορτία η βασική απαίτηση για σύνδεση με την ξηρά περιλαμβάνει μόνο μία εξέδρα για τους αγωγούς και ένα διάδρομο πρόσβασης. Όπου απαιτείται μεγαλύτερο βάθος νερού για την προσέγγιση μεγάλων δεξαμενόπλοιων, συνηθίζεται να διαμορφώνεται μία πλωτή κατασκευή η οποία συνδέεται με την ακτή μέσω αγωγών που στηρίζονται στον πυθμένα της θάλασσας.

Τα φορτία που πρέπει να αναλάβουν οι πάσσαλοι σε τέτοιες κατασκευές είναι τα εξής:

- Πλευρικά φορτία παραβολής & πρόσδεσης των σκαφών
- Πλευρικά φορτία από τους κυματισμούς
- Τις δυνάμεις λόγω ρευμάτων στα ελλιμενισμένα πλοία και στους πασσάλους
- Πλευρικά φορτία από τις δυνάμεις ανέμου
- Θλιπτικές και δυνάμεις άνωσης που εισάγονται λόγω των παραπάνω φορτίων
- Σε ορισμένες περιοχές, οι πάσσαλοι πρέπει να αναλάβουν κάθετα και πλευρικά φορτία λόγω πάγου
- Σεισμικά φορτία

Οι παραπάνω δυνάμεις δεν είναι απαραίτητα αθροιστικές. Παρά το γεγονός ότι άνεμος, κυματισμοί και ρεύματα μπορούν να προκύψουν ταυτόχρονα και προς την ίδια διεύθυνση, οι δυνάμεις κατά την προσάραξη των πλοίων και οι δυνάμεις λόγω πρόσδεσης πραγματοποιούνται σε αντίθετες διευθύνσεις. Ο ελλιμενισμός δεν πρέπει να πραγματοποιείται όταν εμφανίζεται μέγιστο ύψος κύματος. Ο υπολογισμός των δυνάμεων που αναπτύσσονται στους πασσάλους λόγω των παραπάνω φορτίων περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.

1.6.5. Πλεονεκτήματα πασσάλων σε σύγκριση με άλλου τύπου θεμελιώσεις

Πρόκειται για μέθοδο που επιτρέπει τη θεμελίωση σε μεγαλύτερα βάθη και παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους θεμελίωσης. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα των θεμελιώσεων με πασσάλους είναι η δραστική μείωση των αναμενόμενων διαφορικών καθιζήσεων σε σχέση με τις επιφανειακές θεμελιώσεις. Οι διαφορικές υποχωρήσεις μεταξύ των σημείων έδρασης μιας κατασκευής οφείλονται κυρίως στην τυχαία, συχνά σημαντική, ανομοιογένεια του εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση. Στην περίπτωση των πασσάλων τριβής, η παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου στην οποία αναπτύσσεται η τριβή είναι μεγάλη και συνεπώς η άθροιση των πλευρικών τριβών εξαφανίζει πρακτικά την τυχαία ανομοιομορφία του εδάφους, επειδή η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου επηρεάζεται από το μέσο όρο των τριβών σε ολόκληρη την παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η φέρουσα ικανότητα όλων των πασσάλων θεμελίωσης ενός έργου θα είναι παρόμοια, ακόμη και στην περίπτωση που το έδαφος παρουσιάζει συστηματική ανομοιογένεια.

1.7. Ισχύοντες κανονισμοί

Πρόκειται για εξειδικευμένη κατηγορία κατασκευών που καλύπτεται από ειδική κατηγορία κανονισμών και προτύπων ασφαλείας σε συνδυασμό με τους ισχύοντες κανονισμούς κάθε χώρας.

- Εθνικοί κανονισμοί

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των λιμενικών αυτών έργων υπόκεινται στους Κανονισμούς που έχουν οριστεί από το αντίστοιχο Υπουργείο κάθε χώρας που θα υλοποιηθεί το έργο, όπως: USA: United States Department of the Interior, UK: Department of Energy, Norway: Norwegian Petroleum Directorate Norwegian Petroleum Law with Regulations and Guidelines

- Πρότυπα

Σε πολλές χώρες, οι εθνικοί κανονισμοί κάνουν αναφορές σε Πρότυπα, εννοώντας ότι οι απαιτήσεις ασφαλείας θεωρείται ότι καλύπτονται στην περίπτωση που κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή ακολουθούνται συγκεκριμένα πρότυπα. Ανάλογα με τη χώρα ακολουθούνται και διαφορετικά Πρότυπα: Canadian standard CSA, ISO standard, Norwegian Standard, Norwegian Council for Building Standardization (1999), British standard. Τα Πρότυπα δεν είναι υποχρεωτικοί κανονισμοί και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και εκτός της χώρας στην οποία διαμορφώθηκαν. Αυτό συμβαίνει συχνά σε περιπτώσεις που η εταιρεία κατασκευής και μελέτης ενός έργου γνωρίζει σε βάθος τις απαιτήσεις ενός Προτύπου από παρόμοια έργα σε άλλες περιοχές.

- Ειδικά κριτήρια εταιρειών

Οι Κανονισμοί και τα Πρότυπα συχνά δεν επαρκούν για την κάλυψη των απαιτήσεων ασφαλείας. Για το λόγο αυτό και οι εταιρείες που ζητούν την κατασκευή εξειδικευμένων λιμενικών έργων συχνά συντάσσουν οι ίδιες συγκεκριμένες, λεπτομερείς και αυστηρές προϋποθέσεις που έχουν σχέση με την ασφάλεια αυτών των κατασκευών.

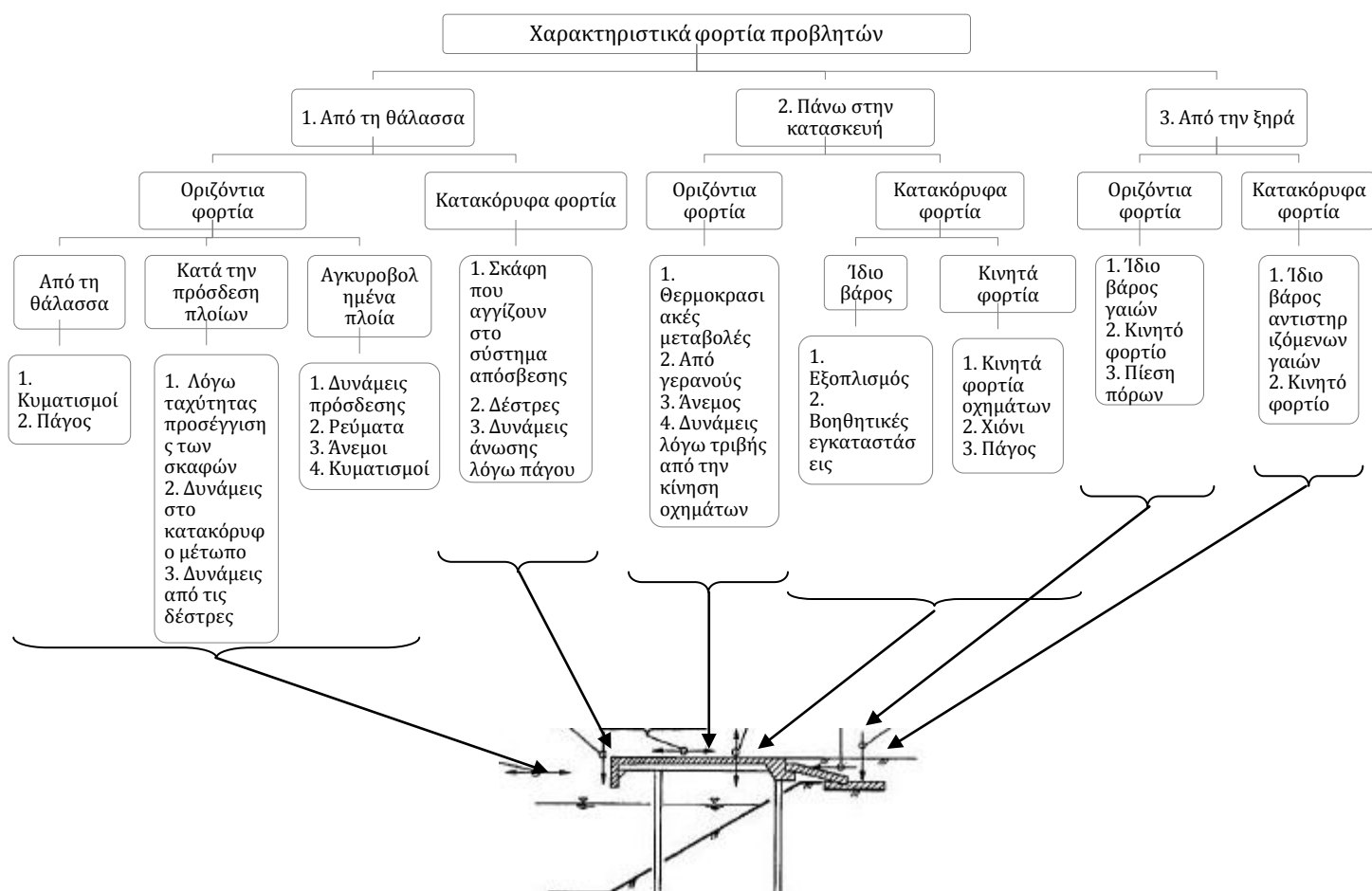
2. ΦΟΡΤΙΑ

2.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί περιγράφονται αναλυτικά τα φορτία που λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό λιμενικών έργων. Πρόκειται για χαρακτηριστικά φορτία, δηλαδή φορτία για τα οποία γνωρίζουμε την πιθανότητα εμφάνισης τους σε ορισμένο χρονικό διάστημα. Διακρίνονται σε στατικά και δυναμικά φορτία ανάλογα με την επιτάχυνση τους και χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- φορτία από τη θάλασσα,
- φορτία πάνω στην κατασκευή και
- φορτία από την ξηρά

Προτείνεται συνήθως από τους Κανονισμούς, τα κατακόρυφα φορτία να παραλαμβάνονται από πασσάλους ή υποστυλώματα, ενώ τα οριζόντια μέσω της πλάκας της ανωδομής.



Εικόνα 22: Χαρακτηριστικά φορτία για το σχεδιασμό

Αυτά στα οποία εστιάζουμε τα ενδιαφέρον είναι κυρίως τα εξής:

- Ίδια βάρη φορέων
- Κινητά φορτία
- Φορτία οχημάτων
- Φορτία ώθησης γαιών

- Μόνιμα φορτία αγωγών και εξοπλισμού
- Φορτία λόγω μεταβολής θερμοκρασίας
- Φορτία πρόσδεσης σκαφών
- Σεισμικά φορτία
- Κόπωση
- Τυχηματικές φορτίσεις (π.χ. σύγκρουση πλοίου κλπ.)

Τα μόνιμα φορτία από τα ίδια βάρη της κατασκευής και την υδατική πίεση σε συνδυασμό με τα περιβαλλοντικά φορτία λόγω κυματισμών και ανεμοπίεσης έχουν καθοριστική σημασία για τη διαστασιολόγηση του φορέα.

Ο καθορισμός των περιβαλλοντικών φορτίων στηρίζεται, συνήθως, σε παρατηρήσεις ετών. Για την οριακή κατάσταση αστοχίας υπολογίζονται τα επίπεδα κυματισμών και τα φορτία ανέμου για περίοδο επαναφοράς 100 ετών. Για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας επιλέγονται μικρότερες χρονικές περίοδοι επαναφοράς, έως και της τάξης του 1 έτους.

Πιο συγκεκριμένα:

i. Οριακή κατάσταση αστοχίας

Λαμβάνεται υπόψη ο δυσμενέστερος συνδυασμός:

- μέγιστο ύψος κύματος με πιθανότητας εμφάνισης 1 στα 100 έτη
- μέγιστη ταχύτητα ανέμου με πιθανότητα εμφάνισης 1 στα 100 έτη
- μέγιστη ταχύτητα κύματος
- μέγιστη και ελάχιστη στάθμη θάλασσας με πιθανότητα 1 στα 100 έτη
- μέγιστη σεισμική επιτάχυνση

ii. Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Έχει σχέση με το μέγεθος των σκαφών που ελλιμενίζονται και το μέγιστο ύψος κύματος για την ασφαλή προσέγγιση τους στο λιμάνι για περίοδο επαναφοράς 10 ετών.

Τύπος σκάφους		Οριακές τιμές λειτουργικότητας
Σκάφος υποβοηθούμενο από ρυμουλκά		$H_s = 1.5 - 2.0 \text{ m}$
Κατά τη διαδικασία αγκυροβόλησης των σκαφών		$H_s = 1.0 - 1.5 \text{ m}$ $V_w = 12.5 \text{ m/s}$
Ανάλογα με το μέγεθος του σκάφους που προσεγγίζει	1,000 - 35,000 DWT	$H_s = 1.2 \text{ m}$
		$H_s = 0.7 \text{ m}$
	5,000 - 75,000 DWT	$H_s = 1.4 \text{ m}$
		$H_s = 0.90 \text{ m}$
	20,000 - 170,000 DWT	$H_s = 1.6 \text{ m}$
		$H_s = 1.1 \text{ m}$
*Εξαρτάται από τον τύπο του σκάφους/ ευαισθησία σε περιβαλλοντικές συνθήκες DWT: συνολική μεταφορική ικανότητα σκάφους		
<ul style="list-style-type: none"> • H_s: χαρακτηριστική τιμή ύψους κύματος • V_w: ταχύτητα ανέμου 		

Πίνακας 1: Συνθήκες λειτουργικότητας για τα σκάφη

Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή των σημαντικότερων τύπων φορτίων που επηρεάζουν το σχεδιασμό τέτοιων φορέων και, όπου είναι απαραίτητο, αναφέρονται οι βασικές εξισώσεις που διέπουν τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων δυνάμεων.

2.2. Μόνιμα φορτία

Για κρηπιδότοιχους βαρύτητας τα μόνιμα φορτία είναι καθοριστικά για το σχεδιασμό και τη μελέτη του έργου. Αναφέρονται συνοπτικά τα εξής:

- Ίδιον βάρος κατασκευής
- Βάρος επιχώσεων & επιστρώσεων
- Υδροστατική πίεση
- Ενεργητικές ωθήσεις γαιών

2.3. Κινητά φορτία

Τα κινητά φορτία των εξεδρών δεν καθορίζονται τόσο από το μέγεθος των πλοίων που ελλιμενίζονται, όσο από τη χρήση για την οποία κατασκευάστηκαν. Για παράδειγμα, ειδικής χρήσης προβλήτες όπως εξέδρες μεταφοράς πετρελαϊκών ειδών που μπορούν να φιλοξενήσουν πλοία εκατοντάδων χιλιάδων τόνων, σχεδιάζονται για κινητά φορτία της τάξης των 10 kN/m², ενώ προβλήτες σχεδιασμένες για πλοία ανεφοδιασμού της τάξης των δύο χιλιάδων τόνων, μελετώνται για κινητά φορτία 50-200 kN/m². Επομένως, τα κινητά φορτία εξαρτώνται από τον τύπο των μεταφερόμενων φορτίων, τον απαιτούμενο εξοπλισμό για τις διάφορες δραστηριότητες κλπ. Παράλληλα με αυτά λαμβάνονται υπόψη και συγκεντρωμένα φορτία λόγω κίνησης οχημάτων ή χρήσης γερανών στις προβλήτες.



Εικόνα 23: Σταθμός φορτοεκφόρτωσης καυσίμων- Shoaiba Power Plant

Μία πρώτη προσέγγιση, που καλύπτει την προκαταρκτική μελέτη του έργου, είναι η ομοιόμορφη φόρτιση του κρηπιδώματος με κατακόρυφο φορτίο p μεταξύ των τιμών 5-10 kN/m², ανάλογα με την περίπτωση. Το ύψος στοιβάσας στη ζώνη του κρηπιδώματος μπορεί να λαμβάνεται 3m προκειμένου περί γενικού φορτίου και 7,5 m σε κρηπιδώματα εμπορευματοκιβωτίων.

Ενδεικτικές τιμές ομοιόμορφη φόρτισης ανάλογα με τη χρήση του κρηπιδώματος παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Τύπος φορτίου	kN/m ²
Ε.Ι.Χ. και ελαφρά φορτηγά	5
Βαριά φορτηγά	10
Γενικό φορτίο	20-30
Σταθμός πολλαπλών χρήσεων	50
Βαριά οχήματα & γερανοί που λειτουργούν από το μέτωπο της προβλήτας & 3 m προς τα μέσα	60
Εμπορευματοκιβώτια 2 καθ' ύψος	
Άδεια σε στοίβες	15
Γεμάτα σε στοίβες	55
Εμπορεύματα go/go (σύστημα οριζόντιας φορτοεκφόρτωσης)	30-50

Πίνακας 2: Προτεινόμενες τιμές κινητών φορτίων

Στην περίπτωση που λειτουργούν σιδηροδρομικοί συρμοί στο κρηπίδωμα, όπως σε συμβατικές εγκαταστάσεις γενικού φορτίου, τότε η σχετική φόρτιση μπορεί να ληφθεί 50 kN/m² ομοιόμορφα κατανομημένη στο εύρος κατάληψης των συρμών. Ένα άλλο σημαντικό φορτίο που επιβαρύνει συχνά τα κρηπιδώματα είναι αυτό που οφείλεται στους γεραμούς κρηπιδώματος με σιδηροτροχιές ή όχι. Οι γεραμοί εξασκούν συγκεντρωμένα φορτία κατά μήκος του κρηπιδώματος, όμως πέραν των κατακόρυφων φορτίων εξασκούν και οριζόντιες δυναμικές καταπονήσεις που οφείλονται κυρίως στην ανεμοπίεση και την πέδηση.

Εκτός από τα στατικά αυτά φορτία, ο τρόπος χειρισμού των εμπορευμάτων επιβάλλει να λαμβάνονται υπόψη και δυναμικές επιφορτίσεις.

Προτείνεται ο σχεδιασμός να γίνεται για το δυσμενέστερο συνδυασμό κινητών φορτίων που μπορεί να προκύψει κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Σε περιπτώσεις όπου οι προβλήτες είναι πολύ εκτεθειμένες στην ανοικτή θάλασσα, πρέπει επιπλέον να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό η πιθανότητα ανύψωσης τους με την είσοδο των κυμάτων κάτω από αυτές.

2.4. Περιβαλλοντικά φορτία

Με τον όρο «περιβαλλοντικά φορτία» περιλαμβάνουμε φορτίσεις οι οποίες οφείλονται σε περιβαλλοντικά φαινόμενα, όπως άνεμο, κύματα, παλίρροια κλπ. Για αυτές τις φορτίσεις τα ποσοστά αβεβαιότητας για τις ακραίες τιμές τους είναι αρκετά υψηλά, ενώ ταυτόχρονα σε περίπτωση υπέρβασης τους οι βλάβες είναι δύσκολα επισκευάσιμες. Για το λόγο αυτό προτείνεται να λαμβάνονται υπόψη οι δυσμενέστερες, όσο είναι δυνατόν, τιμές. Συνιστάται, μάλιστα, σε τόσο μεγάλης κλίμακας έργα να πραγματοποιούνται πειράματα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής.

2.4.1. Φορτία ανέμου

Τα τοπικά χαρακτηριστικά του ανέμου είναι ίσως η πλέον σημαντική παράμετρος των μετεωρολογικών συνθηκών που βρίσκει εφαρμογή στη μελέτη λιμενικών έργων. Η ανεμοπίεση δρα άμεσα στις πάσης φύσεως κατασκευές, στα σκάφη και στα μέτωπα παραβολής, εάν πρόκειται για παραβεβλημένα πλοία, καθώς επίσης δημιουργεί τα

ανεμογενή κύματα στην επιφάνεια της θάλασσας. Η σημασία επομένως της γνώσης της συμπεριφοράς του ανέμου είναι προφανής για τη μελέτη των πάσης φύσεως λιμενικών έργων.

Η ανεμολογική πληροφορία συμπυκνώνεται είτε σε ροδογράμματα ανεμολογίου, είτε σε κατάλληλους πίνακες όπως ο παρακάτω. Τέτοιοι πίνακες τηρούνται και στο τμήμα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας.

U (m/s)	Διεύθυνση ανέμου (Deg)												Total
	-15 to 15	15 to 45	45 to 75	75 to 105	105 to 135	135 to 165	165 to 195	195 to 225	225 to 255	255 to 285	285 to 315	315 to 345	
1.0	0.59	.78	.97	.93	.76	.58	.37	.27	.37	.58	.45	.55	7.21
3.0	1.61	2.02	2.50	2.27	2.03	1.54	.92	.65	.92	1.45	1.16	1.36	18.42
5.0	2.61	2.30	2.33	3.33	3.24	2.55	1.11	.93	1.59	1.80	1.22	2.03	25.04
7.0	2.62	2.04	1.80	3.01	3.86	2.64	.64	.68	1.09	1.28	1.06	1.88	22.60
9.0	1.90	.68	.83	1.09	3.01	1.24	.26	.40	.74	1.00	.90	1.70	13.74
11.0	.82	.24	.16	.47	1.54	.65	.06	.26	.42	1.01	.75	1.22	7.59
13.0	.25	.09	.07	.09	.46	.35	.01	.04	.14	.27	.65	.77	3.17
15.0	1	.05	.01	.08	.17	.03	-	.01	.12	.21	.56	.57	1.92
17.0	.01	-	-	-	.02	.01	-	.02	.07	.01	.08	.1	.32
19.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.00	.00	-	.00
Total	10.52	8.20	8.66	11.26	15.09	9.59	3.38	3.26	5.45	7.61	6.81	10.18	100

Πίνακας 3: Συχνότητα και ένταση ανέμου ανά διεύθυνση

Ένας συνηθισμένος τύπος ανεμολογίου είναι αυτός που ακολουθεί:

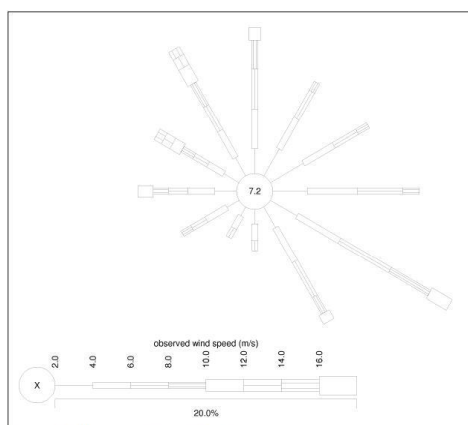


Figure 3-1. Wind rose offshore Azzawliya

Εικόνα 24: Ανεμολόγιο για όλες τις διευθύνσεις κοντά στη στεριά

Κατά σύμβαση τα ανεμόμετρα των μετεωρολογικών σταθμών μετρούν την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Λόγω της διαφορετικής τραχύτητας που συναντά η πνοή του ανέμου πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από αυτήν πάνω από τη θάλασσα, γίνεται διόρθωση των μετρήσεων με ειδικούς τύπους.

Άλλες μετεωρολογικές πληροφορίες που πρέπει να συλλεχθούν για τη σωστή μελέτη αναφέρονται ονομαστικά παρακάτω:

- Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα
- Θερμοκρασία και υγρασία αέρα

- Ορατότητα
- Ατμοσφαιρική πίεση
- Ηλιοφάνεια

2.4.1.1. Υπολογισμός δυνάμεων λόγω ανέμου

Εάν αμεληθούν τα δυναμικά φαινόμενα, τότε η ανεμοπίεση κατά τη διεύθυνση πνοής εκφράζεται συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου U ως εξής:

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} U^2 A_p$$

Όπου:

C_D	Συντελεστής μορφής
γ	Ειδικό βάρος αέρα 1.29 κρ/μ ³ (0°, 1 Atm)
g	Επιτάχυνση βαρύτητας
A_p	Η προβολή της επιφάνειας εγκάρσια στη φορά του ανέμου

Εξίσωση 1: Ανεμοπίεση κατά τη διεύθυνση πνοής

Η φόρτιση του πλοίου είναι δυσμενής για πνοή ανέμου κάθετη προς τον άξονα του, οπότε προκύπτει σχεδόν συμμετρική καταπόνηση και έτσι εκμηδενίζεται η εφαπτομενική δράση στην κρηπίδα.

Η φόρτιση λόγω ανεμοπίεσης μπορεί να αναλυθεί σε εγκάρσια και επιμήκη συνιστώσα καθώς και σε ροπή περί το κέντρο βάρους του σκάφους. Η ροπή αυτή εξαρτάται από τη φορά πνοής του ανέμου. Ανάλογα με τη γωνία πνοής του ανέμου ως προς τον άξονα του σκάφους, μπορούμε να υπολογίσουμε σε κάθε διεύθυνση την ανεμοπίεση από τις παρακάτω σχέσεις:

$$F_{TW} = (1 + 3.1 \sin \alpha) C_{TW} H L_{oa} V_w^2$$

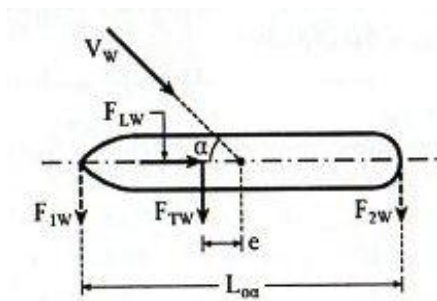
$$F_{LW} = (1 + 3.1 \sin \alpha) C_{LW} H L_{oa} V_w^2$$

Όπου:

F_{TW}	Η εγκάρσια συνιστώσα της φόρτισης σε kg
F_{LW}	Η κατά μήκος συνιστώσα της φόρτισης σε kg
α	Η γωνία πνοής του ανέμου
H	Το μέγιστο ελεύθερο ύψος του σκάφους συμπεριλαμβανομένου τυχόν φορτίου πάνω από το κατάστρωμα, σε m
L_{oa}	Το συνολικό μήκος του πλοίου σε m/s
V_w	Η ταχύτητα του ανέμου σε m/s
C_{TW}, C_{LW}	Συντελεστές εγκάρσιας ή κατά μήκος συνιστώσας αντίστοιχα

Εξίσωση 2: Ανεμοπίεση ανά διεύθυνση

Η τιμή εφαρμογής της πνοής του ανέμου V_w πρέπει να αναφέρεται σε ταχύτητες ριπής ανέμου V_g με κάποια μικρή μείωση, έστω: $V_w = V_g / 1.1$



Εικόνα 25: Φόρτιση σκάφους λόγω ανέμου

Η δράση F_{TW} μπορεί να αναλυθεί σε δύο παράλληλες συνιστώσες F_{1w} και F_{2w} ως εξής:

$$F_{1w} = F_{TW} (0.5 + k_e)$$

$$F_{2w} = F_{TW} (0.5 + k_e)$$

Οπότε: $F_{TW} = F_{1w} + F_{2w}$

Όπου k_e συντελεστής εκκεντρότητας με $e = k_e L_{0a}$

Οι τιμές των συντελεστών C_{TW} , C_{LW} και k_e δίδονται σε πίνακες ανάλογα με το μέγεθος του σκάφους. Οι σχέσεις που προκύπτουν από τις παραπάνω σχέσεις πρέπει να πολλαπλασιάζονται επί συντελεστή ασφαλείας 1,25 για να καλύπτονται δυναμικά φαινόμενα και άλλες αβεβαιότητες.

Η παραπάνω αποτελεί την τυπική διαδικασία υπολογισμού. Ανάλογα με τους κανονισμούς που εφαρμόζονται μπορεί να υπάρξουν και μεταβολές. Παρατηρούμε ότι εκτός από δύναμη αναπτύσσεται και ροπή λόγω της δράσης των κυμάτων από τα σκάφη στην κατασκευή. Τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τον τύπο του πλοίου, το φορτίο και τη διεύθυνση του ανέμου.

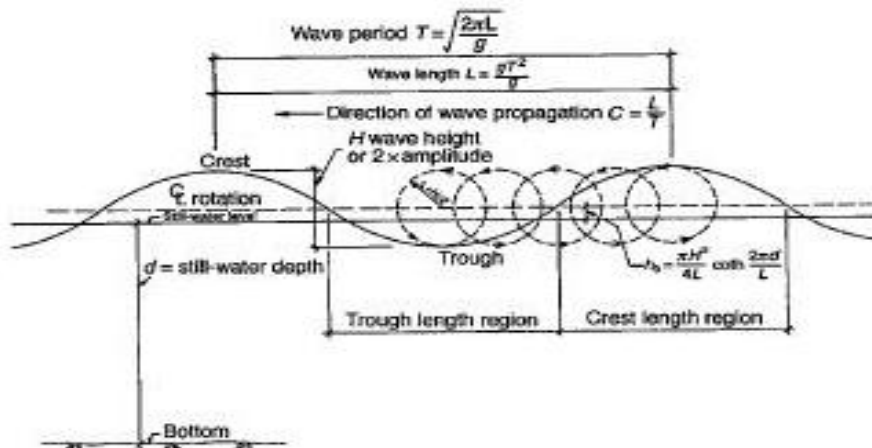
2.4.2. Φορτία κυμάτων

Άλλη μία σημαντική παράμετρος για τη μελέτη των λιμενικών έργων, αλλά και τη σωστή λειτουργία ενός λιμένα είναι ο καθορισμός των δυνάμεων λόγω κυματισμών που θα δεχθεί το έργο στη διάρκεια ζωής του. Ο καθορισμός ακραίων τιμών με συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς είναι βασικός κατά το σχεδιασμό και πρέπει να λαμβάνει υπόψη περιβαλλοντικές παραμέτρους. Τα στοιχεία των ανεμογενών κυματισμών που αφορούν τα λιμενικά έργα μπορούν να εκτιμηθούν κατά κανόνα με ικανοποιητική ακρίβεια από τις διαθέσιμες μεθόδους πρόγνωσης της θαλάσσιας υδραυλικής. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στη γεωγραφική διαμόρφωση των ακτών και σε ανεμολογικά στοιχεία.

Ως γνωστόν, καθώς τα κύματα ταξιδεύουν προς την ακτή, όπου συνήθως βρίσκονται τα λιμενικά έργα, υφίστανται ένα πλήθος μεταβολών, οι κυριότερες από τις οποίες οφείλονται στη ρήχωση, στη διάθλαση, στην περίθλαση, στην ανάκλαση από τον κεκλιμένο πυθμένα και στη θραύση των κυμάτων. Όλες αυτές οι μεταβολές μπορούν επίσης να υπολογισθούν με αρκετή ακρίβεια.

Τα ανεμογενή κύματα έχουν τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων αυτών- ύψος, μήκος και περίοδος- εξαρτώνται από τα

χαρακτηριστικά των ανέμων από τους οποίους δημιουργήθηκαν και προέρχονται από τη μεταφορά ενέργειας από την αέρια μάζα στην επιφάνεια του νερού.



Εικόνα 26: Χαρακτηριστικά μεγέθη κύματος

Η συνολική ενέργεια ενός κύματος είναι ανάλογη του τετραγώνου του ύψους του:

$$H_s = \frac{\sqrt{WF}}{30}$$

Όπου:

W = ταχύτητα ανέμου σε km/h

F = fetch in km

Εξίσωση 3: Συνολική ενέργεια κύματος

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το βάθος του νερού κατά τη δημιουργία των κυματισμών.

Κι ενώ το ύψος ενός κύματος είναι η πιο εμφανής παράμετρος, εξίσου σημαντική για τους μελετητές είναι και η περίοδος T η οποία υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$L = \frac{3}{2} T^2 = \frac{2}{3} V^2$$

$$T = 25\sqrt{L} = \frac{2}{3} V$$

$$V = 1.1\sqrt{L} = \frac{3}{2} T = \frac{L}{T}$$

Όπου:

L = μήκος κύματος σε m

V = ταχύτητα κύματος σε m/s

Εξίσωση 4: Υπολογισμός χαρακτηριστικών τιμών κύματος

Γενικά, από τη γραμμική θεωρία των κυμάτων ανάλογα με το βάθος του νερού ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

	Ρηχά νερά $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$	Μεταβατική ζώνη $\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	Βαθιά νερά $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$
1. προφίλ ελεύθερης επιφάνειας			

Γενική εξίσωση: $\eta = \frac{H}{2} \cdot \cos \theta$			
2. ταχύτητα κύματος			
$c = \frac{L}{T} = \frac{g}{\omega} kd = \sqrt{gd}$	$c = \frac{L}{T} = \frac{g}{\omega} \tanh(kd) = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \cdot T$	$c = \frac{L}{T} = \frac{g}{\omega} = \sqrt{\frac{g}{k}}$	
3. μήκος κύματος			
$L = c \cdot T = \frac{g}{\omega} kdT = \sqrt{gd} \cdot T$	$L = c \cdot T = \frac{g}{\omega} \tanh(kd) \cdot T = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \cdot T$	$L = c \cdot T = \frac{g}{\omega} \cdot T = \sqrt{\frac{g}{k}} \cdot T$	
4. συνιστώσες ταχύτητα νερού			
a) οριζόντια	$u = \frac{H}{2} \cdot \sqrt{\frac{g}{d}} \cdot \cos \vartheta$	$u = \frac{H}{2} \cdot \omega \cdot \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cdot \cos \vartheta$	$u = \frac{H}{2} \cdot \omega \cdot e^{kz} \cdot \cos \vartheta$
b) κατακόρυφη	$w = \frac{H}{2} \cdot \omega \cdot \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cdot \sin \vartheta$	$w = \frac{H}{2} \cdot \omega \cdot \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cdot \sin \vartheta$	$w = \frac{H}{2} \cdot \omega \cdot e^{kz} \cdot \sin \vartheta$
5. συνιστώσες επιτάχυνσης			
a) οριζόντια	$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H}{2} \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{g}{d}} \cdot \sin \vartheta$	$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H}{2} \cdot \omega^2 \cdot \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cdot \sin \vartheta$	$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H}{2} \cdot \omega^2 \cdot e^{kz} \cdot \sin \vartheta$
b) κατακόρυφη	$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{H}{2} \cdot \omega^2 \cdot \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cdot \cos \vartheta$	$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{H}{2} \cdot \omega^2 \cdot \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cdot \cos \vartheta$	$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{H}{2} \cdot \omega^2 \cdot e^{kz} \cdot \cos \vartheta$

Πίνακας 4: Γραμμική θεωρία κυμάτων

2.4.2.1. Κύμα σχεδιασμού

Συνήθως το κύμα σχεδιασμού αποτελείται από κύματα προερχόμενα από τον ωκεανό και κύματα που δημιουργούνται τοπικά λόγω ανέμου. Τα δύο αυτά κύματα υπολογίζονται χωριστά και αθροίζονται με βάση την ενέργεια που μεταφέρει το καθένα:

$$H_{s,i} = \left(H_{s,w}^2 + H_{s,0}^2 \right)^{1/2}$$

Εξίσωση 5: Κύμα σχεδιασμού

Ανάλογα με την προστασία του λιμανιού και την τοποθέτηση του, αν κάποια από τις δύο συνιστώσες είναι ασήμαντη τότε αγνοείται. Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό του κύματος σχεδιασμού είναι τα εξής:

- Η διαμόρφωση του βυθού στην περιοχή της κατασκευής
- Η ανάκλαση των κυμάτων σε γειτονικές πλαγιές
- Η διάθλαση των κυμάτων που μπορεί να εμφανιστεί καθώς τα κύματα εισέρχονται σε ρηχά ύδατα

Για να προσδιοριστεί το κύμα σχεδιασμού πρέπει να καθοριστεί η διάρκεια ζωής του έργου. Αυτή προσδιορίζεται με βάση τις συνθήκες που ισχύουν σε κάθε περίπτωση σε συνδυασμό με φυσικούς παράγοντες και διεργασίες που επηρεάζουν την επάρκεια του έργου.

Μετά τον καθορισμό της ζωής σχεδιασμού του έργου θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ανάλυση της επικινδυνότητας σε περίπτωση αστοχίας της κατασκευής. Είναι σαφές ότι

τα έργα δε σχεδιάζονται για να αντιμετωπίζουν ικανοποιητικά κάθε εξωτερική φόρτιση οιοδήποτε μεγέθους, γι' αυτό προσδιορίζεται με κάποια μέθοδο βελτιστοποίησης η πιθανότητα αστοχίας του έργου p που δίνει τη μικρότερη συνολική επιβάρυνση. Στην ανάλυση αυτή υπεισέρχονται ποικίλοι παράγοντες, κοινωνικής, οικονομικής, τεχνικής φύσεως, που πολλές φορές είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Επίσης, η επικινδυνότητα σε ανθρώπινες ζωές, σε σημαντικές εγκαταστάσεις κλπ. καθορίζουν το μέγεθος της πιθανότητας υπέρβασης p σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Η συμβολή του μελετητή είναι αποφασιστικής σημασίας στον καθορισμό της βέλτιστης πιθανότητας αστοχίας της κατασκευής, καθώς είναι αυτός που έχει την αίσθηση της συνολικής ασφάλειας που προκύπτει από τους επί μέρους συντελεστές ασφαλείας που λαμβάνονται υπόψη, των αδυναμιών των μεθόδων υπολογισμού κλπ. Αφού καθοριστεί η πιθανότητα υπέρβασης, υπολογίζεται η περίοδος επαναφοράς T α του κύματος σχεδιασμού ως εξής:

$$T = \frac{1}{1 - n \sqrt{1 - \frac{P}{100}}}$$

Όπου

T Περίοδος επαναφοράς

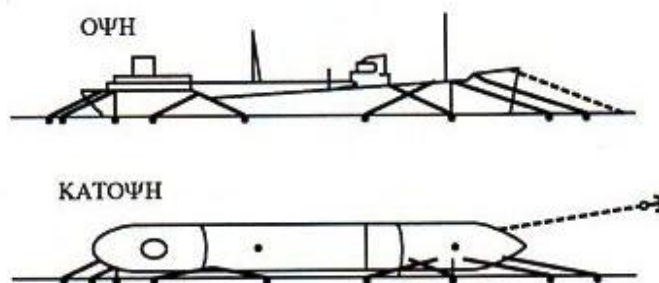
n Διάρκεια ζωής έργου

P Η πιθανότητα (%) υπέρβασης του μέγιστου ύψους κύματος σχεδιασμού κατά τη διάρκεια ζωής του έργου

Εξίσωση 6: Περίοδος επαναφοράς

2.4.2.2. Υπολογισμός δυνάμεων λόγω κυμάτων στην ανωδομή

Η ακινητοποίηση του σκάφους στη θέση παραβολής γίνεται με τη βοήθεια των κάβων που διατάσσονται με τρόπο που να αναιρούν όσο γίνεται τους έξι βαθμούς ελευθερίας κινήσεως που εν γένει έχει το σκάφος. Μία πλήρης διάταξη κάβων σε παραβεβλημένο σκάφος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

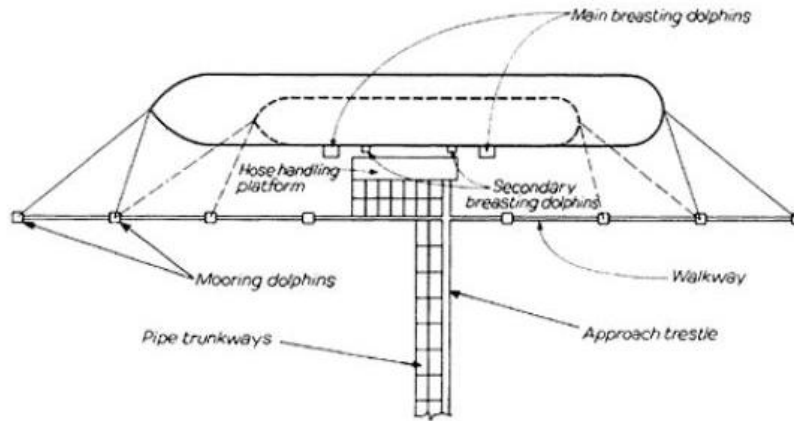


Εικόνα 27: Πλήρης διάταξη κάβων κρηπιδώματος

Οι δέστρες απαιτείται να αντέχουν το τράβηγμα από τα σκοινιά πρόσδεσης, τόσο ώστε να διατηρούν σε σταθερή τροχιά το σκάφος κατά τα τελευταία στάδια της διαδικασίας ελλιμενισμού. Όταν το πλοίο έχει πλέον ελλιμενισθεί πλήρως, συγκρατείται στη θέση του με τη χρήση τεσσάρων σκοινιών, όπως φαίνεται παραπάνω. Με τον τρόπο αυτό, το πλοίο αφενός προστατεύεται από τις πολλές προσκρούσεις στα συστήματα απόσβεσης, και

αφετέρου από τον κίνδυνο να απομακρυνθεί από την προβλήτα υπό την επιρροή κυμάτων ή ρευμάτων. Το φορτίο που δέχεται κάθε σκοινί λόγω ανέμων ή ρευμάτων που επενεργούν στο πλοίο δεν μπορεί να υπολογισθεί με ακρίβεια. Έχει σημασία η τάση των σκοινιών και η γωνία που σχηματίζεται με τον άξονα του σκάφους.

Οι δυνάμεις που δέχεται το αγκυροβολημένο πλοίο και μεταφέρει στους κάβους και τις γραμμές αγκυρώσεως μπορούν να υπολογιστούν προσεγγιστικά όπως παρακάτω.



Εικόνα 28: Αναπτυσσόμενη δύναμη λόγω πρόσδεσης σκαφών

Η επίδραση των κυματισμών, που είναι ιδιαίτερα επικίνδυνοι όταν είναι μεγάλης περιόδου, μπορεί να εκτιμηθεί για φορά παράλληλη με τον άξονα του πλοίου από τη σχέση:

$$F_w = \frac{1}{2} mgHk\varepsilon\beta \cos \omega t$$

Όπου:

m Η μάζα του πλοίου με την προσαύξη της πρόσθετης μάζας του νερού

H Το ύψος κύματος

$k = 2\pi/\lambda$ λ : μήκος κύματος

$$\varepsilon = \frac{1}{kD} \cdot \frac{\sinh kd - \sinh kh}{\cosh kd}$$

D Βύθισμα πλοίου

d Βάθος θάλασσας

h «πόδι πιλότου»

$$\beta = \frac{3[\sin(kl) - kl \cos(kl)]}{(kl)^3}$$

$2l$ Μήκος πλοίου

ω Κυκλική συχνότητα κυματισμού

Εξίσωση 7: Δυνάμεις αγκυροβολημένου πλοίου λόγω κυματισμών

Η παραπάνω σχέση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη ως προς τη σχέση του μήκους κύματος και μήκους πλοίου, εφόσον αφορά μονοχρωματικούς κυματισμούς. Για πρακτικές εφαρμογές μπορεί να εφαρμόζεται η έκφραση:

$$F_w = \frac{1}{8} \rho g B H^2$$

Όπου:

B (μέσο) πλάτος πλοίου

Η περίπτωση κάθετης πρόσπτωσης των κυματισμών στο αγκυροβολημένο σκάφος παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα και συνίσταται η προσφυγή σε φυσικό ομοίωμα για υπολογισμό των τάσεων και βελτιστοποίηση της διάταξης των κάβων και ενδεχομένως των προσκρουστήρων του έργου παραβολής.

Οι δυνάμεις λόγω εγκάρσιων ρευμάτων μπορούν να υπολογισθούν σύμφωνα με την έκφραση:

$$F_s = c\gamma A \frac{V^2}{2g}$$

c Συντελεστής αντίστασης που εξαρτάται από το σχήμα του σκάφους και τα υπάρχοντα στερεά όρια. Οι τιμές του κυμαίνονται από 1.0 στα βαθιά μέχρι 3.5 περίπου για πολύ μικρό «πόδι πιλότου». Κανονικά πρέπει να χρησιμοποιείται $c=2.5$ για παραβεβλημένα σκάφη

γ Ειδικό βάρος νερού

A Προσβαλλόμενη εγκάρσια επιφάνεια

V Ταχύτητα ρεύματος

Εξίσωση 8: Δυνάμεις λόγω εγκάρσιων ρευμάτων

Οι δυνάμεις που οφείλονται σε διαμήκη ρεύματα ως προς το πλοίο μπορούν να εκφρασθούν όπως παρακάτω:

$$F_f = \frac{0.137}{\log R - 2} \rho S V^2$$

Όπου:

$R = \frac{2Vl}{\nu}$ Αριθμός Reynolds

ν Κινηματική συνεκτικότητα

ρ Πυκνότητα νερού

S Η βρεχόμενη επιφάνεια (των υφάλων) του σκάφους

Εξίσωση 9: Δυνάμεις λόγω διαμήκων ρευμάτων

Οι δυνάμεις αυτές αναλύονται σε συνιστώσες προκειμένου να ληφθούν υπόψη ως καταπονήσεις κατά το σχεδιασμό των πασσάλων στήριξης των προβλητών.

- Εγκάρσιες δράσεις

Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να αναληφθούν από τους πασσάλους μόνο με καμπτική λειτουργία ανάλογη της δυσκαμψίας τους.

- Διαμήκεις δράσεις

Σε αυτήν την περίπτωση αναλαμβάνονται μέσω καμπτικής λειτουργίας όλων των πασσάλων που συνδέονται με το τμήμα του καταστρώματος που είναι παράλληλο στη δράση αυτή. Παρότι αναμένονται μικρές παραμορφώσεις λόγω του μεγάλου πλήθους πασσάλων που συμμετέχουν στην ανάληψη της δύναμης, αν ωστόσο υπερβούν τα επιτρεπτά όρια ενδείκνυται να τοποθετηθούν κεκλιμένοι πάσσαλοι. Σε αυτή την περίπτωση οι πάσσαλοι υπολογίζονται θεωρώντας ότι η συνιστώσα των δυνάμεων

ελλιμενισμού των σκαφών αναλαμβάνεται αποκλειστικά από τους κεκλιμένους χωρίς τη συνεισφορά των κατακόρυφων.

2.4.2.3. Υπολογισμός δυνάμεων λόγω κυμάτων στους πασσάλους

Οι πάσσαλοι αντιδρούν στη δράση των κυμάτων ως στοιχεία δοκού, θεωρώντας συνοριακές συνθήκες τις συνθήκες σύνδεσης των πασσάλων στο κατάστρωμα και στη στάθμη του βυθού.

Η δράση των κυμάτων σε ένα μεμονωμένο πάσσαλο αποτελείται από δύο παράγοντες:

- Δράση που οφείλεται στην ταχύτητα του νερού
- Δράση που οφείλεται στην επιτάχυνση του νερού

Το οριζόντιο συνολικό φορτίο ανά μονάδα μήκους σε έναν κατακόρυφο πάσσαλο είναι:

$$p = p_D + p_M = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_w}{g} \cdot D \cdot u \cdot |u| + C_M \cdot \frac{\gamma_w}{g} \cdot F \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

Για πασσάλους με κυκλική διατομή ισχύει:

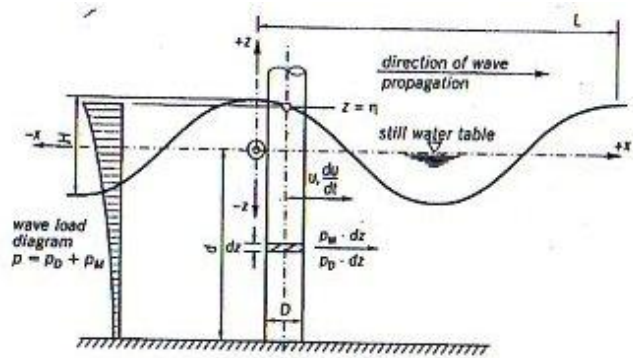
$$p = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_w}{g} \cdot D \cdot u \cdot |u| + C_M \cdot \frac{\gamma_w}{g} \cdot \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

Όπου:

p_D	Πίεση λόγω της ταχύτητας του νερού που προκαλείται από την αντίσταση της ροής ανά μονάδα μήκους πασσάλου (kN/m)
p_M	Πίεση λόγω αδράνειας που οφείλεται στην κίνηση των κυματισμών ανά μονάδα μήκους του πασσάλου (kN/m)
p	Συνολική πίεση ανά μέτρο μήκους του πασσάλου (kN/m)
C_D	Σταθερά που λαμβάνει υπόψη την αντίσταση του πασσάλου στην πίεση του νερού
C_M	Σταθερά που λαμβάνει υπόψη την αντίσταση του πασσάλου στην επιτάχυνση του νερού
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας
γ_w	Πυκνότητα νερού (kN/m ³)
u	Οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του νερού στη θέση ελέγχου
$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{du}{dt}$	Οριζόντια συνιστώσα της επιτάχυνσης του νερού στην ελεγχόμενη θέση (m/s ²)

Εξίσωση 10: Οριζόντιο φορτίο ανά μονάδα μήκους του πασσάλου

Για το συνολικό φορτίο υπολογίζουμε το ολοκλήρωμα για όλο το ύψος του κύματος, λαμβάνοντας ως $z=0$ το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα και για $z=n$ τη μέγιστη προσωρινή διακύμανση της επιφάνειας



Εικόνα 29: Δράση κυμάτων σε κάθετο πάσσαλο

Όπου:

- z Τεταγμένη σημείου ελέγχου ($z=0=$ επιφάνεια Υ.Ο.)
- x Τετμημένη σημείου ελέγχου
- η Προσωρινή διακύμανση στάθμης νερού (m)
- d Βάθος νερού κάτω από Σ.Υ.Ο. (m)
- D Διάμετρος πασσάλου (m)
- H Ύψος κύματος (m)
- L Μήκος κύματος (m)

Για ομάδα πασσάλων, το συνολικό φορτίο υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

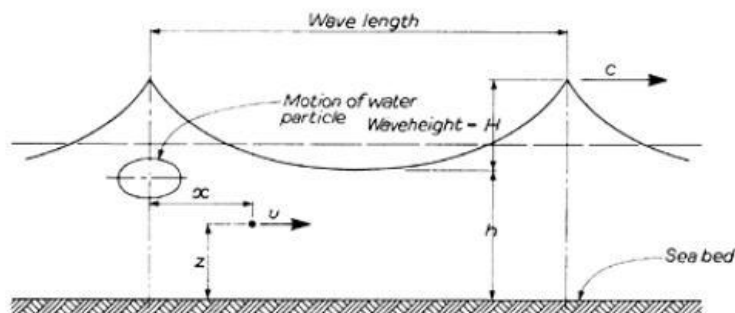
$$totalP = \sum_{n=1}^N P_n(\vartheta_n)$$

Όπου:

- N Πλήθος πασσάλων
- $P_n(\vartheta_n)$ Φορτίο κύματος μεμονωμένου πασσάλου n $\vartheta = k \cdot x_n - \omega \cdot t$ (kN)
- x_n Απόσταση μεμονωμένου πασσάλου n από την αρχή των αξόνων $y-z$ (m)

Εξίσωση 11: Συνολικό φορτίο για ομάδα πασσάλων

Μία απλή προσέγγιση υπολογισμού του φορτίου κύματος είναι η θεώρηση ότι η μέγιστη δύναμη κύματος μπορεί να εκφραστεί ως η ισοδύναμη στατική δύναμη που προκαλείται από ένα μεμονωμένο κύμα που έχει το σχήμα που φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 30: Μεμονωμένο κύμα

2.4.3. Θαλάσσια ρεύματα

Σε αντίθεση με τα κύματα, τα θαλάσσια ρεύματα σε παράκτιες περιοχές είναι εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθούν με κάποια αξιοπιστία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπεισέρχονται πολλές επιμέρους συνιστώσες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

- Ωκεάνια ρεύματα
- Ρεύματα λόγω παλίρροιας
- Ανεμογενή ρεύματα
- Ρεύματα λόγω ατμοσφαιρικής πίεσης
- Κυματογενή ρεύματα

Οι δύο πρώτες κατηγορίες αναφέρονται σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές.

Τα ανεμογενή και τα ρεύματα λόγω ατμοσφαιρικής πίεσης αναφέρονται σε τοπικά φαινόμενα. Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν δεδομένα για τη συμπεριφορά τους απαιτείται καταγραφή τουλάχιστον ενός έτους για την απόκτηση αντιπροσωπευτικού δείγματος. Η ένταση των ανεμογενών ρευμάτων στην επιφάνεια ανέρχεται σε 2- 3% περίπου της ταχύτητας ανέμου επάνω από το οριακό στρώμα. Η φορά των καθαρά ανεμογενών ρευμάτων διαφέρει από τη φορά του ανέμου και μεταβάλλεται σημαντικά με το βάθος, αλλά τείνει να πλησιάζει προς τη φορά του ανέμου όσο τα νερά γίνονται πιο ρηχά.

Ο υπολογισμός των κυματογενών ρευμάτων εμφανίζει αυξημένη σπουδαιότητα στα ρηχά νερά. Η φορά μετάδοσης των κυματογενών ρευμάτων συμπίπτει με τη φορά μετάδοσης των κυματισμών και του πρωτογενούς αιτίου του ανέμου.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι τα ρεύματα εμποδίζουν την ομαλή λειτουργία των λιμένων είτε φορτίζοντας τα πλοία, είτε προκαλώντας μεταφορά και αποθέσεις ιζημάτων. Η φόρτιση των σκαφών γίνεται τόσο κατά τη φάση εισόδου και ελιγμών, όσο και κατά τη διάρκεια της παραμονής τους στη θέση πρόσδεσης. Ως ανεκτές τιμές ρευμάτων στη λιμενολεκάνη θεωρούνται εντάσεις κάτω από 0,3 m/s.

2.4.3.1. Δυνάμεις λόγω ρευμάτων

Η μόνιμη φόρτιση F_D από σταθερό ρεύμα μπορεί να εκτιμηθεί από την έκφραση:

$$F_D = C_D \rho V^2 A_n / 2$$

Όπου:

C_D Συντελεστής

ρ Πυκνότητα νερού

V Μέση ταχύτητα προσπίπτοντος ρεύματος

A_n Επιφάνεια πρόσπτωσης

Εξίσωση 12: Δύναμη λόγω σταθερού ρεύματος

Ο συντελεστής C_D εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds και την τραχύτητα της παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου. Για κυλινδρικούς πασσάλους τιμές του C_D λαμβάνονται από ειδικούς πίνακες.

Πέραν της μόνιμης φόρτισης κατά τη φορά της ροής εξασκούνται στον πάσσαλο μεταβαλλόμενες δυνάμεις τόσο κατά τη φορά ροής, όσο και εγκάρσια σε αυτήν, λόγω των στροβίλων που αναπτύσσονται στην «σκιά» που δημιουργεί ο πάσσαλος στο πεδίο ροής. Οι εναλλασσόμενες αυτές φορτίσεις δημιουργούν προβλήματα συντονισμού στην κατασκευή και κόπωσης των υλικών. Για το λόγο αυτό κατά τη μελέτη του έργου επιδιώκεται η αποφυγή των φαινομένων συντονισμού, που μπορεί να είναι ιδιαίτερα έντονα κατά τη φάση κατασκευής, παρά ο συνυπολογισμός των δυνάμεων αυτών στις λοιπές φορτίσεις.

Όταν συνυπάρχουν με τα ρεύματα κυματισμοί που επαυξάνουν τις συρτικές δυνάμεις, τότε για τον υπολογισμό τους πρέπει να προσδιορίζονται πρώτα οι ταχύτητες των υγρών μορίων με επαλληλία ρεύματος- κύματος. Η Εξίσωση 12 μπορεί τότε να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της συνολικής συρτικής δύναμης, ενώ μία αδρανειακή συνιστώσα F_I που οφείλεται στους κυματισμούς πρέπει να προστεθεί στην F_D σύμφωνα με την υπόθεση Morison. Η αδρανειακή φόρτιση εκφράζεται ως:

$$F_I = C_I \rho \pi D^2 \dot{V} L / 4$$

Όπου

$C_I = 2$ Για κυλινδρικούς πασσάλου

\dot{V} Η επιτάχυνση των υγρών μορίων κάθετη στον άξονα του πασσάλου. Η επιτάχυνση αυτή μπορεί να εκτιμηθεί σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία Airy

Εξίσωση 13: Αδρανειακή φόρτιση

2.4.4. Καιρικές συνθήκες- Θερμοκρασιακές μεταβολές

Λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό της κατασκευής επιτρέποντας να εμφανιστούν ανεμπόδιστα οι συστολοδιαστολές του καταστρώματος. Η διαμήκης αυτή κίνηση προκαλεί παραμορφώσεις στις κεφαλές των πασσάλων, οι οποίες πρέπει να υπολογίζονται. Μεγάλου μήκους προβλήτες είναι σκόπιμο να χωρίζονται σε επιμέρους τμήματα μέσω κόμβων. Οι θερμοκρασιακές μεταβολές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και κατά τη διαστασιολόγηση των κεκλιμένων πασσάλων σε διαμήκεις δράσεις.

2.5. Έλξη δέστρας

Η φόρτιση αυτή οφείλεται στην έλξη που μεταφέρεται μέσω του κάβου στη δέστρα του κρηπιδώματος λόγω των κινήσεων του παραβλημένου σκάφους, που προκαλούνται από τους κυματισμούς, τον άνεμο, τα ρεύματα κλπ. Παρά το γεγονός ότι η έλξη αυτή μπορεί να σχηματίζει αρκετά μεγάλη γωνία με το οριζόντιο επίπεδο, καθώς επίσης και με την κάθετο στην κρηπίδα, συνήθως σε προκαταρκτικούς υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη μόνο η οριζόντια συνιστώσα της τάσης κάθετα στο μέτωπο του κρηπιδώματος. Επίσης, γίνεται η παραδοχή της αναγωγής του συγκεντρωμένου φορτίου σε οριζόντιο γραμμικό φορτίο σε στάθμη περίπου 0,50 m, πάνω από την επιφάνεια του κρηπιδώματος.

Οι δέστρες σε κρηπιδώματα για σκάφη με έμφορτο εκτόπισμα μέχρι 20000t τοποθετούνται ανά αποστάσεις 10- 30 m. Λαμβάνεται πρόνοια ώστε οι εγκάρσιοι αρμοί του κρηπιδότοιχου να διχοτομούν την απόσταση μεταξύ δύο παραπλήσιων δεστρών. Η τιμή έλξης δέστρας εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του αντίστοιχου σκάφους. Ο πίνακας

που ακολουθεί δίνει χαρακτηριστικές τιμές σχεδιασμού της οριζόντιας τάσης του κάβου που μεταφέρεται στη δέστρα σε συνάρτηση με το μέγεθος του σκάφους. Στον ίδιο Πίνακα δίδεται και η αντίστοιχη κατανεμημένη οριζόντια δύναμη στην κρηπίδα ανά τρέχον μέτρο μήκους κρηπιδώματος.

Συνολικό εκτόπισμα	Οριζόντια έλξη δέστρας	
(t)	(t)	(t/m)
Έως 2000	10	1.0
Έως 10000	30	1.5
Έως 20000	60	2.0
Έως 50000	80	2.0
Έως 100000	100	2.5
Έως 200000	150	4.5
Πάνω από 200000	200	5.0

Πίνακας 5: Έλξη δέστρας

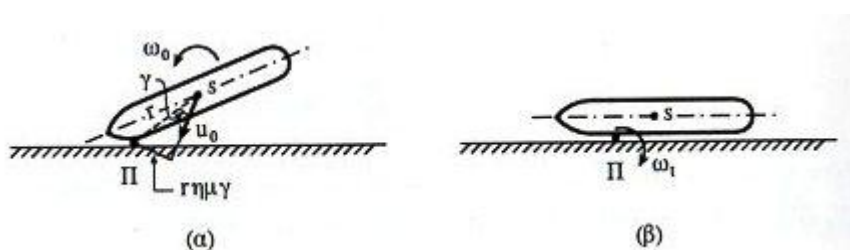
Η τάση του κάβου αναλύεται και σε κατακόρυφη συνιστώσα που γενικά είναι μεγαλύτερη από την οριζόντια. Η επαύξηση αυτή μπορεί να φτάσει και το 50% κατά μέγιστον.

2.6. Πρόσκρουση κατά την παραβολή

Η φόρτιση αυτή αφορά στη φάση προσέγγισης του σκάφους στο κρηπιδώμα για την πρόσδεση του. Κατά τη φάση αυτή το πλοίο έρχεται σε επαφή με τον κρηπιδότοιχο μέσω των προσκρουστήρων σε ένα είδος ελεγχόμενης πρόσκρουσης. Η δράση αυτή βρίσκεται σε άμεση σχέση με την κινητική ενέργεια του σκάφους και επομένως αυξάνει σε σπουδαιότητα με το μέγεθος του. Στην πράξη η ενέργεια του πλοίου επιδιώκεται να απορροφάται από τους προσκρουστήρες του κρηπιδώματος ώστε να μειώνεται κατά το δυνατόν η μέγιστη δύναμη που μεταφέρεται λόγω κρούσης στον κρηπιδότοιχο αλλά και στη γάστρα του πλοίου.

Ο υπολογισμός της ενέργειας του πλοίου που μεταφέρεται στον κρηπιδότοιχο κατά την πρόσκρουση βασίζεται σε παραδοχές, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

- i. Η κρούση πλοίου- κρηπιδότοιχου είναι ελαστική
- ii. Το πρώτο σημείο επαφής πλοίου- προσκρουστήρα βρίσκεται κοντά στην πλώρη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 31
- iii. Μετά την επαφή με τον προσκρουστήρα το πλοίο περιστρέφεται μόνον γύρω από το σημείο επαφής χωρίς να ολισθαίνει
- iv. Οι λοιπές δράσεις, όπως των ρυμουλκών, του ανέμου, κλπ. είναι αμελητέες



Εικόνα 31: Φάσεις πρόσκρουσης: α) έναρξη, β) πέρας πρόσκρουσης

2.6.1. Δυνάμεις λόγω επαφής κατά την παραβολή στην ανωδομή

Κατά την έναρξη της πρόσκρουσης, τη στιγμή δηλαδή που το σκάφος έρχεται σε πρώτη επαφή με τον προσκρουστήρα, το πλοίο έχει εν γένει ταχύτητα u_0 και γωνιακή ταχύτητα ω_0 περί το κέντρο βάρους του S. Κατά το πέρας της φάσης πρόσκρουσης η ταχύτητα u_0 έχει μηδενιστεί, ενώ το πλοίο περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω_t περί κατακόρυφο άξονα που διέρχεται από το σημείο επαφής Π (Εικόνα 31β).

Με βάση το θεώρημα διατήρησης της στροφορμής περί τον άξονα δια του Π γράφονται οι παρακάτω σχέσεις:

$$mu_0(r \sin \gamma) + mk^2 \omega_0 = m(k^2 + r^2) \omega_t$$

ή

$$\omega_t = (ru_0 \sin \gamma + k^2 \omega_0) / (k^2 + r^2)$$

Όπου

m Η κινούμενη μάζα που λαμβάνει μέρος στην κρούση

k Η ακτίνα αδρανείας του πλοίου ως προς S

r, γ Όπως ορίζονται στην Εικόνα 31

Εξίσωση 14: Θεώρημα διατήρησης στροφορμής

Η ενέργεια που απορροφάται από τον προσκρουστήρα προκύπτει ως η διαφορά των ενεργειών μεταξύ έναρξης και λήξης της πρόσκρουσης, δηλαδή:

$$E_\alpha = \frac{1}{2} mu_0^2 + \frac{1}{2} mk^2 \omega_0^2 - \frac{1}{2} m(k^2 + r^2) \omega_t^2$$

Η οποία λόγω της προηγούμενης σχέσης δίνει:

$$(k^2 + r^2) E_\alpha = \frac{1}{2} mu_0^2 (k^2 + r^2 \cos^2 \gamma) + \frac{1}{2} mk^2 r^2 \omega_0^2 - rmu_0 \sin \gamma k^2 \omega_0$$

Εξίσωση 15: Ενέργεια που απορροφάται από τον προσκρουστήρα

Εάν θεωρήσουμε πως η γωνιακή ταχύτητα ω_0 είναι αμελητέα ως προς τη u_0 , τότε η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί:

$$E_\alpha = \frac{1}{2} mu_0^2 (k^2 + r^2 \cos^2 \gamma) / (k^2 + r^2)$$

Αντίθετα, όταν το σκάφος προσεγγίζει με γωνιακή ταχύτητα μόνον, η ενέργεια που απορροφάται από τον προσκρουστήρα είναι:

$$E_\alpha = \frac{1}{2} mk^2 r^2 \omega_0^2$$

Η μάζα m που συμμετέχει στην κρούση μπορεί να γραφεί ως:

$$m = C_m M$$

Όπου:

C_m Συντελεστής πρόσθετης μάζας

M Η μάζα του πλοίου

Εξίσωση 16: Μάζα που συμμετέχει στην κρούση

Η σχέση αυτή εκφράζει το γεγονός ότι κατά την κίνηση του σκάφους στη θάλασσα συμπαρασύρεται ένα ποσό ρευστού που περιβάλλει το πλοίο και συμμετέχει στην πρόσκρουση του στον κρηπιδότοιχο.

Η ταχύτητα παραβολής είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την εκτίμηση της απορροφούμενης ενέργειας E_a επειδή η τελευταία εξαρτάται από το τετράγωνο της u_0 . Η διεύθυνση της ταχύτητας του πλοίου κατά την παραβολή τείνει να είναι κάθετη προς την κρηπίδα για καλές συνθήκες ελιγμών. Δεχόμαστε ότι η u_0 εξαρτάται κυρίως από την προστασία των κρηπιδωμάτων, τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες και από τις πραγματικές συνθήκες ελιγμών παραβολής. Σημειώνεται ότι η ταχύτητα $u_0 = 0.1 \text{ m/s}$ καλόν είναι να θεωρείται ως κατώτερο όριο για το σχεδιασμό. Με δεδομένη πλέον την ποσότητα ενέργειας που πρέπει να απορροφηθεί από τον προσκρουστήρα είναι δυνατόν να υπολογισθεί η δύναμη κρούσης που μεταφέρεται στην ανωδομή με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Τυπικές τιμές αυτής της δύναμης κατανεμημένης κατά μήκος της γραμμής των προσκρουστήρων δίνεται στον παρακάτω Πίνακα:

Συνολικό εκτόπισμα (t)	Φόρτιση (t/m)
Έως 5000	1.5
Έως 10000	2.0
Έως 20000	2.5
Έως 30000	3.0
Έως 50000	3.5
Έως 100000	4.0

Πίνακας 6: Φόρτιση πρόσκρουσης παραβολής

2.6.2. Δυνάμεις λόγω επαφής κατά την παραβολή στους πασσάλους

Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της δύναμης που αναπτύσσεται λόγω παραβολής ενός σκάφους όπως μεταφέρεται στην υπόλοιπη κατασκευή είναι:

$$\text{κινητική ενέργεια } E_k = \frac{m_s V^2}{2g}$$

Όπου:

m_s Η μετακίνηση του πλοίου και η μάζα νερού που μετατοπίζεται με αυτό

V Η ταχύτητα προσέγγισης στην κατασκευή

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η συνολική αυτή τιμή της κινητικής ενέργειας δε μεταφέρεται εξ ολοκλήρου στους πασσάλους. Ενέργεια απορροφάται από την παραμόρφωση του πλοίου, από τη συμπίεση των προσκρουστήρων και την αλληλεπίδραση τους με τα συστήματα που τα στηρίζουν. Επιπλέον, κινητική ενέργεια κατά την προσέγγιση του πλοίου στην αποβάθρα μπορεί να χαθεί κατά την προσπάθεια να υπερνικηθεί η αντίσταση του νερού στην πλώρη του πλοίου, λόγω τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του πλοίου και των προσκρουστήρων και στο τράβηγμα των σκοινιών πρόσδεσης.

Θεωρώντας ότι έχουν υπολογιστεί οι παραπάνω παράμετροι, εστιάζουμε στον υπολογισμό των δυνάμεων που πρέπει να αναληφθούν από τους πασσάλους. Κάνοντας, αρχικά, την υπόθεση ότι ένας κάθετος πάσσαλος, που ενεργεί ως πρόβολος από το σημείο στήριξης του κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, δέχεται μία δύναμη H στο σημείο A , η απόσταση που θα μετακινηθεί υπολογίζεται ως εξής:

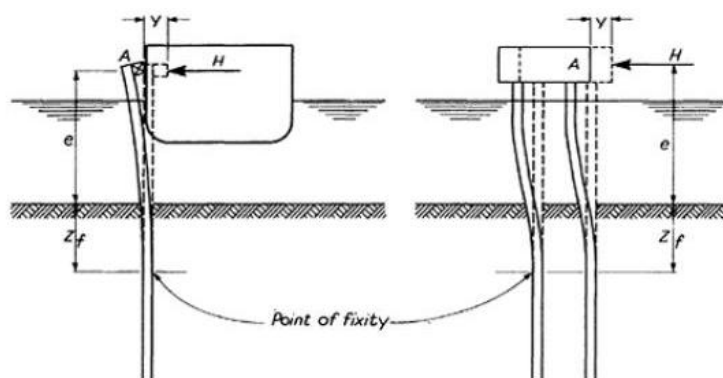
$$\text{μετατόπιση } y = \frac{H(e + z_f)^3}{3EI}$$

Το έργο που παράγεται σε αυτήν την περίπτωση είναι:

$$\text{παραγόμενο έργο} = \frac{1}{2} H_y = \frac{H^2 (e + z_f)^3}{6EI}$$

Η ροπή M στους πασσάλους είναι ίση με:

$$\text{παραγόμενο έργο} = \frac{M^2 (e + z_f)}{6EI}$$



Εικόνα 32: Αναπτυσσόμενη δύναμη στους πασσάλους κατά την παραβολή

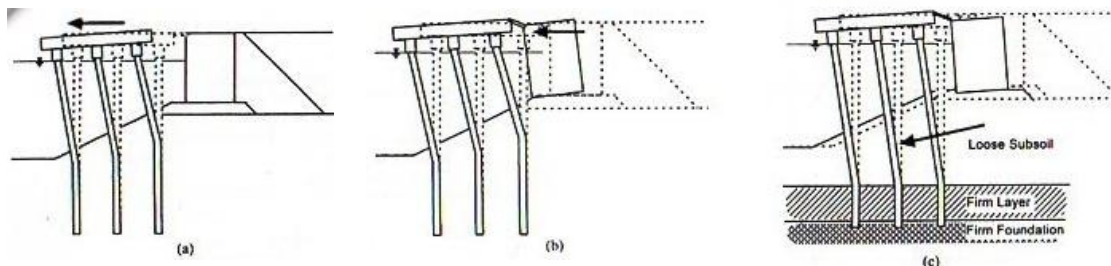
2.7. Σεισμικά φορτία

Τα λιμενικά έργα που κατασκευάζονται σε σειсмоγενείς περιοχές πρέπει να σχεδιάζονται κατάλληλα ώστε να ανταποκρίνονται ικανοποιητικά σε τέτοιου είδους δυναμικές φορτίσεις. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να συλλέγονται τα σχετικά στοιχεία αναφορικά με τις σεισμικές διεγέρσεις της περιοχής, που σε συνδυασμό με τους εδαφικούς σχηματισμούς στην γειτονία του έργου δίνουν τη σεισμική του επιβάρυνση. Σε αυτήν την έρευνα δεν πρέπει να παραβλέπεται η κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού, η οποία συμβάλλει σημαντικά στη συνολική φόρτιση του έργου. Η βασική απαίτηση που τίθεται σαν κριτήριο σχεδιασμού είναι γενικά να μη διακόπτεται η λειτουργία των κρηπιδωμάτων ζωτικής σημασίας του λιμένα μετά από σεισμό. Ο μηχανικός θα πρέπει να ορίσει σε αυτήν την περίπτωση δύο βασικές παραμέτρους, ώστε να γίνει δυνατή η εφαρμογή αυτού του κριτηρίου: α) τα κρηπιδώματα ζωτικής σημασίας και β) το μέγεθος του σεισμού σχεδιασμού. Οι παράμετροι αυτές ορίζονται με βάση την πλήρη γνώση των τοπικών συνθηκών και τη διάρκεια ζωής του έργου.

Τα κρηπιδώματα έχουν πολύ μειωμένα περιθώρια ανοχών σε μικρομετακινήσεις που μπορεί να προκληθούν από σεισμό. Λόγοι λειτουργίας, όπως η μετακίνηση σιδηροτροχιών γερανών, καταστροφή δικτύων παροχών, ή κατασκευαστικοί, όπως καταστροφή κλειδιών μεταξύ προκατασκευασμένων στοιχείων, διαρροή υλικού επίχωσης, καθιστούν τους κρηπιδότοιχους ιδιαίτερα ευάλωτους στους σεισμικούς κραδασμούς εάν δεν έχουν

ληφθεί τα απαραίτητα μέτρα. Οι σεισμικές δυνάμεις υπολογίζονται για κάθε κύριο άξονα της κατασκευής.

Τυπικές μορφές αστοχίας σε κατασκευές που στηρίζονται σε πασσάλους είναι:



Εικόνα 33: Τυπικές μορφές αστοχίας κατασκευών που στηρίζονται σε πασσάλους

- a) Παραμόρφωση λόγω δύναμης αδρανείας στο κατάστρωμα
- b) Παραμόρφωση λόγω οριζόντιας δύναμης στον τοίχο αντιστήριξης
- c) Παραμόρφωση λόγω σχετικών μετατοπίσεων του χαλαρού εδάφους

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη χρήση κεκλιμένων πασσάλων. Οι κεκλιμένοι πάσσαλοι παραμένουν το πιο αποδοτικό δομικό σύστημα για την παραλαβή των οριζόντιων φορτίων λόγω πρόσδεσης πλοίων ή χρήσης γερανών στο κατάστρωμα, επειδή δημιουργούν ένα πιο δύσκαμπτο σύστημα. Αυτό, όμως, έχει ως αποτέλεσμα συγκεντρώσεις τάσεων κατά τη διάρκεια των σεισμών.

2.8. Στάθμη ύδατος

Η στάθμη της θάλασσας πρέπει να προσδιοριστεί επαρκώς, ώστε να υπολογιστούν με ακρίβεια οι συνθήκες ελλιμενισμού και πρόσδεσης των σκαφών στις αποβάθρες. Οι τιμές αυτές επηρεάζονται από τους παρακάτω παράγοντες, οι οποίοι σε εξαίρεση το φαινόμενο της παλίρροιας, δεν υπόκεινται σε ασφαλή πρόγνωση και μέτρηση:

i. Παλίρροια

Το φαινόμενο της αστρονομικής παλίρροιας οφείλεται στις νομοτελειακές κινήσεις των ουράνιων σωμάτων. Για το λόγο αυτό υπάρχει και η δυνατότητα ασφαλούς πρόβλεψης της στάθμης της θάλασσας για κάθε επιθυμητή χρονική στιγμή. Οι μεταβολές στη στάθμη της θάλασσας οφείλονται κυρίως στο φαινόμενο αυτό και παρουσιάζονται διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας.

ii. Θαλάσσια ρεύματα

Μπορούν να προκύψουν από κινούμενες υδάτινες μάζες λόγω ανέμου, λόγω διαφοράς θερμοκρασίας και αλατότητας, λόγω αστρονομικών και μετεωρολογικών φαινομένων ή ακόμη εξαιτίας της ροής των υδάτων σε εκβολές ποταμών και μπορεί να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην περίπτωση που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες. Κατά τη διαστασιολόγηση παρότι συνήθως τα φορτία που μεταφέρονται δεν είναι καθοριστικά κατά τη φάση λειτουργίας του λιμανιού, μπορούν ωστόσο να δημιουργήσουν προβλήματα κατά τη φάση κατασκευής.

iii. Τοπικές μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης

Προκαλούν μεταβολές στάθμης που δεν υπερβαίνουν συνήθως τα 0,30 m, αλλά σε συνδυασμό με ισχυρούς ανέμους μπορούν να προκαλέσουν εντονότερα φαινόμενα.

iv. Άνεμοι

Οι άνεμοι με γενική κατεύθυνση προς την ακτή τείνουν να αυξάνουν τη στάθμη της θάλασσας στην παράκτια ζώνη. Εάν ισχυρός άνεμος πνέει κατά μήκος της ακτής τότε μπορεί να δημιουργηθούν μακρά κύματα που κινούνται κατά μήκος της ακτής και ανυψώνουν ή καταβιβάζουν τη μέση στάθμη στην έξαρση ή την κοιλία αντίστοιχα των κυμάτων αυτών.

v. Μακρές ελεύθερες ταλαντώσεις

Πρόκειται για ταλαντώσεις που δημιουργούνται από κινούμενο βαρομετρικό χαμηλό και λαμβάνουν περιόδους που μπορεί να κυμαίνονται από μερικά λεπτά έως 2 ώρες. Οι αντίστοιχες ανυψώσεις της στάθμης είναι μερικά εκατοστά μέχρι και 2 ή 3 m σε εξαιρετικές περιπτώσεις. Προσοχή πρέπει να δίνεται διότι οι κυματισμοί αυτοί λόγω της μεγάλης περιόδου εισχωρούν ανενόχλητοι στις προστατευμένες από ανεμογενείς κυματισμούς περιοχές, όπως οι λιμένες. Τέτοια φαινόμενα προκύπτουν συνήθως σε κλειστές λεκάνες, όπως η λεκάνη της Μεσογείου.

vi. Εποχική διακύμανση

Κατά τη χειμερινή περίοδο υπολογίζεται μία πτώση της στάθμης κατά 0,2 m.

vii. Ανύψωση στάθμης λόγω κλιματικών μεταβολών

Σύμφωνα με τα κλιματολογικά δεδομένα υπολογίζεται αύξηση της στάθμης της θάλασσας λόγω κλιματικών αλλαγών κατά 0,6 m, επομένως, για το έργο λαμβάνεται υπόψη 0,3 m για διάρκεια ζωής 50 ετών.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίζεται η ανώτερη και κατώτερη στάθμη ύδατος για το σχεδιασμό της κατασκευής. Η υπερκατασκευή πρέπει να τοποθετείται πάνω από την κορυφή του κύματος σχεδιασμού, αλλιώς θα υπόκειται σε πολύ μεγάλες οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις από την άμεση δράση των κυματισμών.

2.9. Επιτρεπτά όρια παραμορφώσεων

Οι επιτρεπόμενες παραμορφώσεις σύμφωνα με το Πρότυπο BS 6349- 2:2010 είναι οι εξής:

Τύπος παραμόρφωσης	Δομικό στοιχείο	Όριο παραμόρφωσης	Σχόλια
Κατακόρυφες παραμορφώσεις	Πρόβολοι	Μήκος/180	Για πετρελαιοχημική χρήση μήκος/200
	Δοκοί	Άνοιγμα/200	Για πετρελαιοχημική χρήση μήκος/400
Οριζόντιες παραμορφώσεις	Κορυφή πασσάλων ή υποστυλωμάτων	Ύψος/300 με μέγιστο 100 mm	

Πίνακας 7: Επιτρεπτά όρια παραμορφώσεων

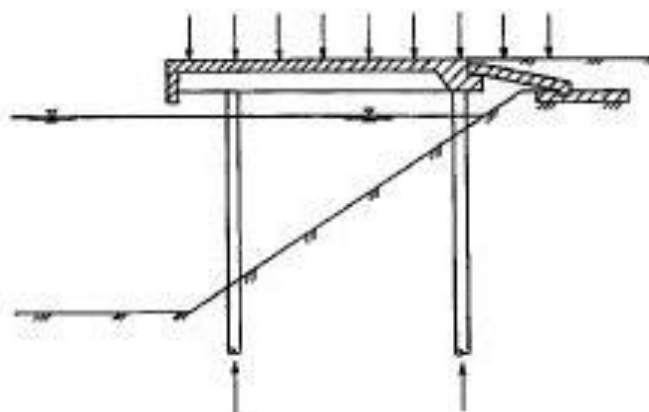
Για προβλήτες που μεταφέρουν ευαίσθητα προϊόντα, όπως πετροχημικά, συνήθως απαιτείται να ληφθούν υπόψη πρόσθετοι κίνδυνοι για να αποφασισθούν οι μέγιστες επιτρεπτές παραμορφώσεις. Πρέπει να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς οι παραμορφώσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, πλευρικών ανέμων και λειτουργίας

των αγωγών. Επιπλέον, οι συνδέσεις των αγωγών τόσο κατά μήκος, όσο και στις περιοχές μεταξύ προβλήτας και ξηράς, πρέπει να διαμορφώνονται έτσι ώστε να μην επηρεάζονται από αυτές τις παραμορφώσεις. Τέλος, θεωρείται σωστό να δίνεται κάποια αρχική κλίση στους αγωγούς προκειμένου να είναι δυνατή τόσο η εύκολη μεταφορά των υγρών φορτίων μέσω της βαρύτητας, όσο και η εκκένωση τους σε περίπτωση εργασιών συντήρησης ή επισκευής.

2.10. Τρόποι ανάληψης φορτίων από φέροντες πασσάλους

2.10.1. Κατακόρυφα φορτία

Τα κατακόρυφα φορτία μεταφέρονται μέσω των πασσάλων στο ισχυρό έδαφος.



Εικόνα 34: Διαδρομή φορτίων

Ανάλογα με τη μέθοδο ανάλυσης που θα επιλεγεί, μπορούν να υιοθετηθούν δύο τρόποι σχεδιασμού της κατασκευής για την ανάληψη των κατακόρυφων φορτίων:

- i. Μόνο από τους κατακόρυφους πασσάλους, οι κεκλιμένοι (όταν υπάρχουν) αναλαμβάνουν όλες τις οριζόντιες δράσεις
- ii. Από τους κατακόρυφους πασσάλους και αντίθετα ζεύγη από κεκλιμένους πασσάλους.

Όλες οι δράσεις θεωρείται ότι αναλαμβάνονται αξονικά από τους πασσάλους, δηλαδή δεν σχεδιάζονται έναντι φαινομένων λυγισμού. Η εγκυρότητα αυτής της υπόθεσης πρέπει να ελέγχεται υπολογίζοντας τις σχετικές ελαστικές παραμορφώσεις. Οι ελαστικές παραμορφώσεις διαφορετικά φορτιζομένων πασσάλων τροποποιούν και την επίδραση των φορτίων αυτών στην υπερκατασκευή. Τελικά, η παραμόρφωση κάθε πασσάλου εξαρτάται από το έδαφος στο οποίο καταλήγει, στο ενεργό μήκος, τη διατομή και το υλικό του πασσάλου.

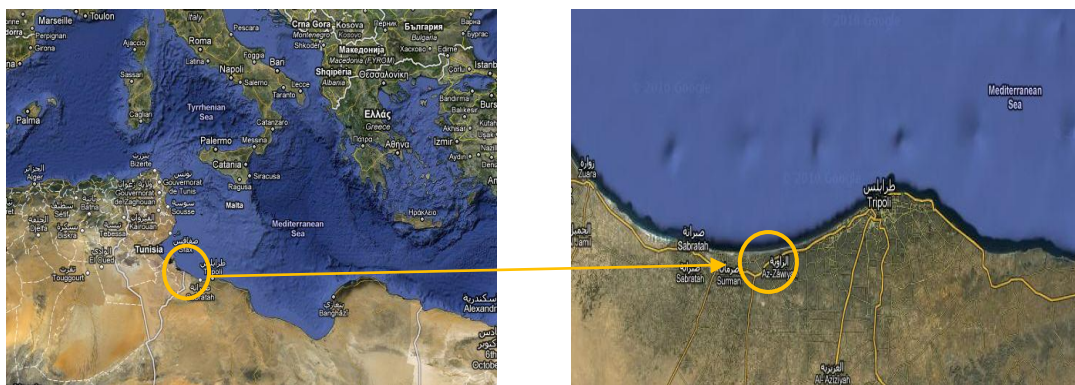
2.10.2. Οριζόντια φορτία

Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στα οριζόντια φορτία και στον τρόπο που θα εισάγονται οι δυνάμεις πρόσδεσης των σκαφών στην κατασκευή. Οι πάσσαλοι έχουν κατασκευαστεί για να λειτουργούν αξονικά και δεν πρέπει να μεταφέρονται σε αυτούς οριζόντια φορτία καθώς αυξάνεται ο κίνδυνος εμφάνισης λυγισμού.

13. AZZAWIYA OIL HARBOUR

13.1. Εισαγωγή

Έχοντας ολοκληρώσει την περιγραφή των προβλητών και των φορτίων που εντείνουν τέτοιου τύπου κατασκευές, προχωρούμε στην ανάλυση ενός πραγματικού φορέα. Πρόκειται για μία μεταλλική εξέδρα φόρτωσης- εκφόρτωσης πετροχημικών προϊόντων στην περιοχή της Azzawiya, μία πόλη στα βορειοδυτικά της Λιβύης, που διαβρέχεται από τη Μεσόγειο θάλασσα, σε απόσταση 40 km δυτικά από την Τρίπολη.



Εικόνα 35: Τοποθεσία έργου

Το έργο περιλαμβάνει μία σειρά από επιμέρους κατασκευές, όπως κυματοθραύστες, λιμενοβραχίονες, παράκτιες και ανοικτής θαλάσσης υποδομές, εργασίες βυθοκόρησης, βοηθήματα πλοήγησης, ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις για τη μεταφορά των προϊόντων από τα σκάφη στις δεξαμενές, κτίρια εγκαταστάσεων και οτιδήποτε άλλο είναι απαραίτητο για την ολοκληρωμένη λειτουργία.

Η κατασκευή έρχεται να ενισχύσει τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις, οι οποίες λόγω της αυξημένης ζήτησης δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες. Τα προϊόντα που διακινούνται είναι παράγωγα του πετρελαίου. Οι ποσότητες που εξυπηρετούνται από την υπάρχουσα υποδομή, καθώς και αυτές που πρέπει να καλυφθούν με τις νέες εγκαταστάσεις παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

No	Προϊόν	Ποσότητες (*1000) tn/ έτος			
		Υπάρχουσα κατάσταση		Μετά την επέκταση	
		Εξαγωγές	Εισαγωγές	Εξαγωγές	Εισαγωγές
1	Αργό πετρέλαιο (Crude oil)	7,000	5,500	18,000	5,500
2	Βαρύ μαζούτ (Heavy fuel oil)	800		600	700
3	Γκαζόιλ (Gasoil)	350	500	150	150
4	Νάφθα ατμοσφαιρικής απόσταξης (SRN)	650			
5	Κηροζίνη (Kerosene)	700		450	
6	Ελαφριά νάφθα (Light naphtha)	7.5			
7	Βενζίνη (Gasoline)		600	1,100	650
8	Βενζίνη πολυμερισμού (PY GAS)		150		
9	MTBE		200		
10	Βασικό λάδι (Base oil)		50		150

11	Υπόλειμμα ατμοσφαιρικής απόσταξης (Reduced crude)		200		200
12	Υγραέριο (LPG)				250
13	Καύσιμα ναυτιλίας (Bunker fuel oil)				400
14	Άσφαλτος (Asphalt)			80	

Πίνακας 8: Υπάρχουσες και μελλοντικές ανάγκες όπως παρέχονται από την ARC

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, προκειμένου να ικανοποιείται και να διευκολύνεται η αναμενόμενη ροή φορτίων μέσα στο λιμάνι πρέπει να προσδιοριστούν με ακρίβεια τα είδη των σκαφών που αναμένεται να προσεγγίζουν το λιμάνι, ο τύπος, τα φορτία, η συχνότητα ελλιμενισμού και τυχόν μελλοντικές μεταβολές.

Παρουσιάζεται παρακάτω η υπάρχουσα και η μελλοντική ροή των φορτίων όχι μόνον της ARC (Azzawiya Refinery Company), αλλά και άλλων εταιρειών που εξυπηρετούνται από τις ίδιες εγκαταστάσεις, BMC (Brega Petroleum Marketing Company) και ROO (Repsol Oil Operations Company)

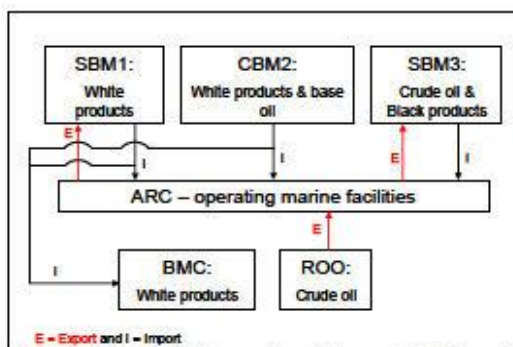


Figure 2-1. Export/Import flow between the existing port facilities and ARC, BMC and ROO

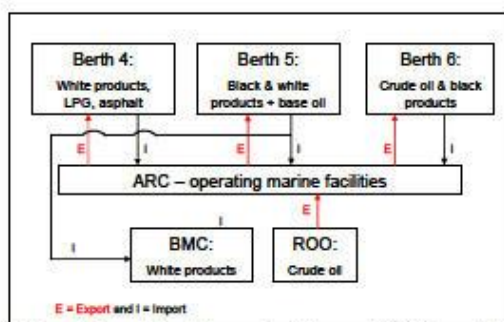


Figure 2-2. Export/Import flow between the future port facilities and ARC, BMC and ROO

Εικόνα 36: Υπάρχουσα και μελλοντική ροή φορτίων

Τέλος, ακολουθούν οι πληροφορίες που δίνονται από τον Ιδιοκτήτη για το μέγεθος των σκαφών που πρόκειται να χρησιμοποιήσουν το λιμάνι:

Προϊόν	Μέσο μέγεθος σκάφους (DWT)	Μέσο/ Μέγιστο μέγεθος σκάφους ανά κατηγορία προϊόντων (DWT)
Αργό πετρέλαιο (Crude oil)	95,000	95,000/170,000
Υγρά καύσιμα (Fuel oil)	25,000	25,000/75,000
Υπόλειμμα ατμοσφαιρικής απόσταξης (Reduced crude)	35,000	
Καύσιμα ναυτιλίας (Bunker fuel oil)	20,000	
Γκαζόιλ (Gasoil)	22,500	
Νάφθα ατμοσφαιρικής απόσταξης (SRN)		20,000/35,000

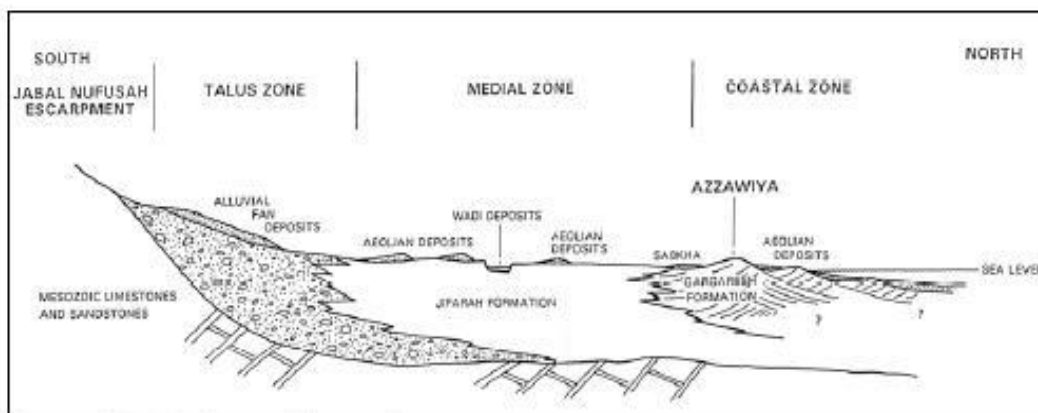
Κηροζίνη (Kerosene)	16,500	
Βενζίνη (Gasoline)		
Βενζίνη πολυμερισμού (PY GAS)	22,000	
MTBE		
Βασικό λάδι (Base oil)	9,000	9,000/16,000
Υγραέριο (LPG)	15,000	15,000/30,000
Άσφαλτος (Asphalt)	5,000	5,000/10,000

Πίνακας 9: Μέσο και μέγιστο μέγεθος σκαφών που θα χρησιμοποιήσουν τις νέες εγκαταστάσεις ανά προϊόν και ανά ομάδα προϊόντων

Κάποια βασικά σημεία των μελετών που πραγματοποιούνται, καθώς και η σημασία ορισμένων σημαντικών παραγόντων που επηρεάζουν τη διαμόρφωση του λιμανιού παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν:

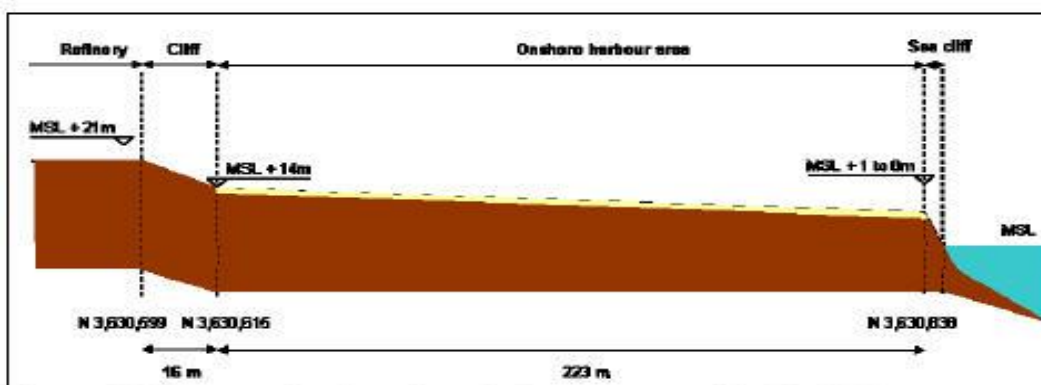
13.2. Γεωλογικές & τοπογραφικές συνθήκες

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για το σχεδιασμό και την κατασκευή του φορέα είναι η γνώση των γεωλογικών συνθηκών. Η προβλήτα στηρίζεται σε μεταλλικούς πασσάλους, η σωστή, λοιπόν, προσομοίωση των εδαφικών συνθηκών είναι καθοριστική για τον ορθό σχεδιασμό του έργου. Οι γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής είναι οι εξής:



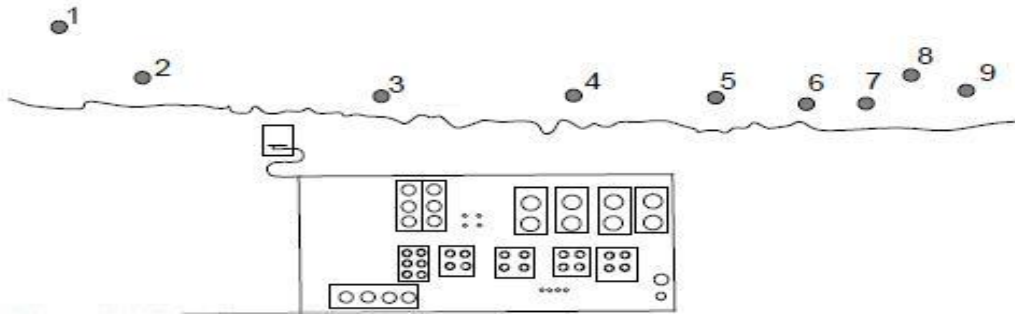
Εικόνα 33: Γεωλογικές συνθήκες της περιοχής

Ενώ οι τοπογραφικές μελέτες κατέληξαν στο ανάγλυφο της παράκτιας περιοχής:



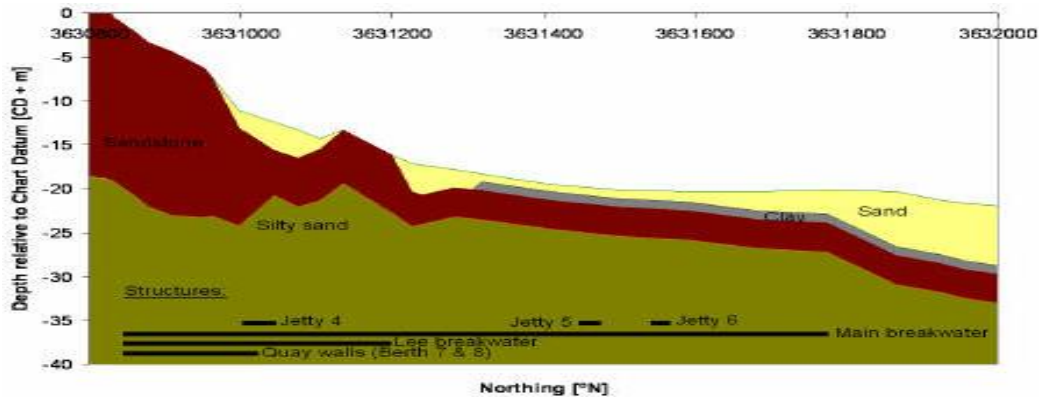
Εικόνα 34: Τοπογραφία παράκτιας περιοχής

Για τον προσδιορισμό της διαμόρφωσης του βυθού στην περιοχή του έργου πραγματοποιήθηκαν γεωτρήσεις σε διάφορα σημεία:



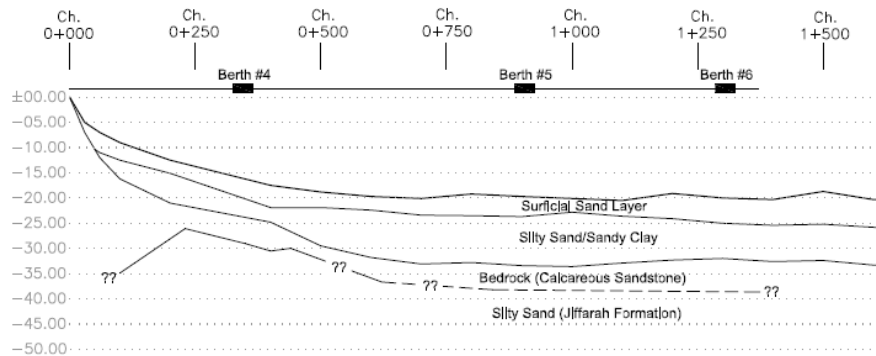
Εικόνα 35: Κατανομή γεωτρήσεων στην παράκτια περιοχή

Και κατέληξαν στη μορφή βυθού:



Εικόνα 36: Μορφή βυθού παράκτια και σε απόσταση μερικών km από την ακτή

Κατά μήκος της κατασκευής η μορφολογία του εδάφους είναι η παρακάτω:



Εικόνα 37: Γεωλογική τομή κατά μήκος του άξονα της κατασκευής

Όπως παρατηρούμε παραπάνω, τόσο ο πυθμένας της θάλασσας, όσο και το πάχος των εδαφικών στρώσεων μεταβάλλονται κατά μήκος της κατασκευής. Προτείνονται, λοιπόν, δύο τύποι εδαφικών προφίλ:

i. Εδαφικό προφίλ Α

Ορίζεται για την περιοχή από την αρχή της προβλήτας έως το 0+500 m και η μεταβολή του πυθμένα κυμαίνεται από τα -10 m για το τμήμα 0+100 m, έως -18 m στο 0+500 m.

ii. Εδαφικό προφίλ Β

Το προφίλ αυτό χρησιμοποιείται για το τμήμα 0+500 m έως 1+350 m και η στάθμη του πυθμένα υπολογίζεται στα -20 m.

Οι εδαφικές παράμετροι και το πάχος των στρωμάτων για τα προτεινόμενα εδαφικά προφίλ παρουσιάζονται παρακάτω:

Στρώμα εδάφους	Πάχος στρώματος	Εδαφικές παράμετροι
Holocene deposits - Upper (fine sand)	4m	Ειδικό βάρος, $\gamma' = 10.0\text{kN/m}^3$ $N_{SPT} = 30$ Γωνία τριβής εδαφικού υλικού, $\phi = 35^\circ$ Συνοχή, $c = 0$
Holocene deposits - Lower (silty sand with organic clay at places)	5m για το τμήμα 0 έως 0+500	Ειδικό βάρος, $\gamma' = 9.0\text{kN/m}^3$ $N_{SPT} = 15$
	9m για το τμήμα 0+500 έως 1+350	Γωνία τριβής εδαφικού υλικού, $\phi = 32^\circ$ Συνοχή, $c = 0$
Gargaresh Formation (Calcareous sandstone)	5m	UCS: $q_u = 2600\text{kPa}$ RQD = 93%
Jiffarah Formation (fine silty sand)		Ειδικό βάρος, $\gamma' = 10\text{kN/m}^3$ $N_{SPT} > 50$ Γωνία τριβής εδαφικού υλικού, $\phi = 39^\circ$ Συνοχή, $c = 0$

Πίνακας 10: Εδαφικό προφίλ στη περιοχή του έργου

Η επιρροή του εδάφους στους πασσάλους προσομοιώνεται με τη χρήση γραμμικών ελατηρίων, που τοποθετούνται προς όλες τις διευθύνσεις. Η δυσκαμψία των ελατηρίων αυτών εξαρτάται από τη διάμετρο του πασσάλου και την εδαφική στρώση. Για το λόγο αυτό, υπολογίζονται οι εδαφικές σταθερές στην περιοχή που θα τοποθετηθούν οι πάσσαλοι και διαμορφώνεται το παρακάτω προφίλ για το σχεδιασμό τους:

Στρώμα εδάφους	Τύπος εδάφους	Πάχος στρώματος	Εδαφικές παράμετροι
Layer 1: Upper Holocene deposits	Άμμος	4m	Ειδικό βάρος, $\gamma' = 10.0\text{kN/m}^3$ Γωνία τριβής εδαφικού υλικού, $\delta = 25^\circ$ Οριακή τιμή πλευρικής τριβής, $f_{su} = 81.3\text{kPa}$ Συντελεστής αστοχίας, $N_q = 20$ Οριακή τιμή αντοχής αιχμής πασσάλου, $q_{bu} = 4.8\text{MPa}$
Layer 2: Lower Holocene deposits	Άμμος	5m για το τμήμα 0 έως 0+500	Ειδικό βάρος, $\gamma' = 10.0\text{kN/m}^3$ Γωνία τριβής εδαφικού υλικού, $\delta = 20^\circ$
		9m για το τμήμα 0+500 έως 1+350	Οριακή τιμή πλευρικής τριβής, $f_{su} = 50.3\text{kPa}$ Συντελεστής αστοχίας, $N_q = 9$ Οριακή τιμή αντοχής αιχμής πασσάλου, $q_{bu} = 2.2\text{MPa}$
Layer 3: Sandstone	Βράχος	5m	Ειδικό βάρος, $\gamma' = 10.0\text{kN/m}^3$ UCS, $q_u = 2600\text{kPa}$
Layer 4: Deep silty sand	Άμμος	-	Ειδικό βάρος, $\gamma' = 10.0\text{kN/m}^3$ Γωνία τριβής εδαφικού υλικού, $\delta = 20^\circ$ Οριακή τιμή πλευρικής τριβής, $f_{su} = 50.3\text{kPa}$ Συντελεστής αστοχίας, $N_q = 9$ Οριακή τιμή αντοχής αιχμής πασσάλου, $q_{bu} = 2.2\text{MPa}$

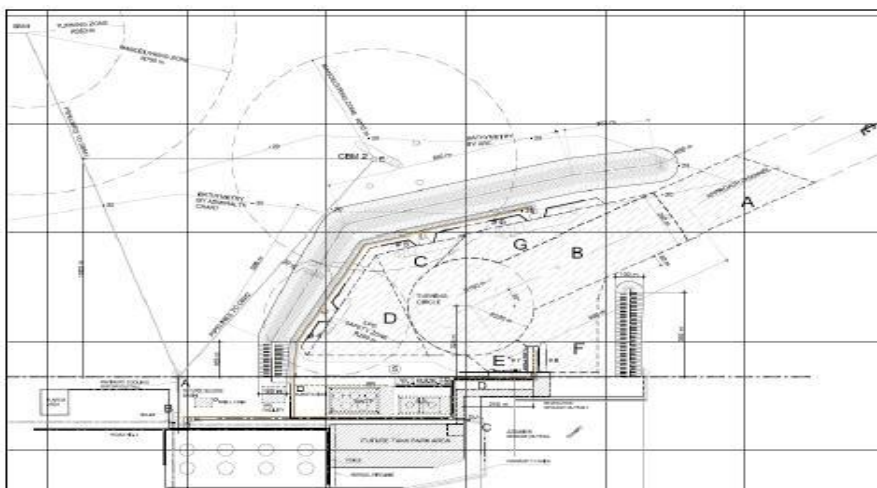
Πίνακας 11: Εδαφικό προφίλ για το σχεδιασμό των πασσάλων

13.3. Περιγραφή φορέα

Λαμβάνοντας υπόψη όσα αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 1.4, παρατηρούμε ότι στην Azzawiya όπου το υπέδαφος δεν είναι ιδιαίτερα καλό, η κατασκευή ήταν αρκετά εκτεθειμένη στην ανοικτή θάλασσα και παράλληλα υπήρχαν οι γνώσεις και τα μέσα από τους εμπλεκόμενους φορείς επιλέχθηκε ανοικτού τύπου προβλήτα που στηρίζεται σε μεταλλικούς πασσάλους. Το νέο έργο περιλαμβάνει την κατασκευή 3 νέων προβλητών ικανών για την εισαγωγή και εξαγωγή υγρών πετροχημικών προϊόντων. Τα αγκυροβόλια

είναι ικανά να υποδεχτούν σκάφη μεγέθους έως 170.000 DWT. Συγκεκριμένα αγκυροβόλια διαμορφώνονται για την υποδοχή σκαφών με ειδικών τύπων φορτία.

Η τοποθεσία και η διεύθυνση των προβλητών έχει γίνει καθ' υπόδειξη του Ιδιοκτήτη του έργου και είναι η παρακάτω:

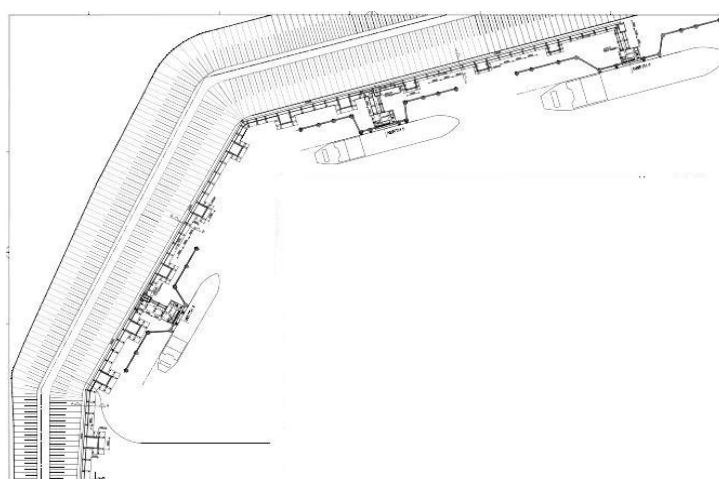


Εικόνα 42: Τοποθεσία και διεύθυνση προβλητών

13.3.1. Γενικά χαρακτηριστικά

Οι προβλήτες περιλαμβάνουν κατ' ελάχιστο:

- Δρόμο πρόσβασης
- Τροχιά μεταφοράς αγωγών (pipe bridge)
- Τροχιά μεταφοράς καλωδίων (cableways)
- Εγκαταστάσεις φωτισμού
- Εξοπλισμό ασφαλείας



Εικόνα 43: Access trestle

Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται για τη διαμόρφωση των προβλητών είναι οι εξής:

- Να αντέχουν όλες τις φορτίσεις που προέρχονται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως κυματισμούς, άνεμο, σεισμό κλπ. χωρίς να χάνουν την αντοχή και τη λειτουργικότητά τους

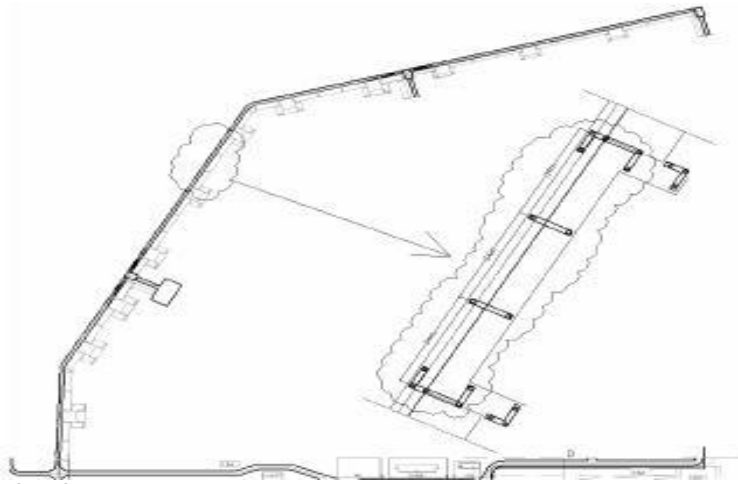
- ii. Να προσφέρουν την απαιτούμενη πρόσβαση και το χώρο που απαιτείται για τη σωστή λειτουργία των αγκυροβολίων
- iii. Η λωρίδα οδοστρώματος που υπάρχει στις προβλήτες να προσφέρει πρόσβαση από την ακτή στη πλατφόρμα φόρτωσης προϊόντων για όλα τα είδη οχημάτων περιλαμβανομένων γερανών και πυροσβεστικών οχημάτων
- iv. Το οδόστρωμα να έχει πλάτος τουλάχιστον 4 m και να σχεδιαστεί τουλάχιστον για τα παρακάτω φορτία:
 - Φορτίο οδοστρώματος (BS5400)
 - Μεμονωμένο φορτίο τροχού 100 kN με πίεση 1,1 N/mm² εφαρμοζόμενο σε κυκλική επιφάνεια (διαμέτρου 340 mm) ή τετράγωνη (πλευράς 300 mm)
 - Γερανός βάρους 30 tn, με δύο άξονες 12 tn ο καθένας
 - Εξωτερικό συγκεντρωμένο φορτίο 300 kN σε επιφάνεια 1,0*1,0 που μπορεί να δρα σε ολόκληρη την επιφάνεια του οδοστρώματος
 - Πλευρικό φορτίο 200 kN
 - Οι χειρολαβές, που είναι υποχρεωτικές εκατέρωθεν του δρόμου, σχεδιάζονται για οριζόντιο φορτίο 0,5 kN/m
- v. Η τροχιά μεταφοράς των αγωγών σχεδιάζεται ώστε να φιλοξενεί όλους τους αγωγούς μεταφοράς προϊόντων από και προς τα αγκυροβόλια, καθώς και όλες τις σωληνώσεις για τις βοηθητικές εγκαταστάσεις
- vi. Να υπάρχει σταθερή κλίση 1:1000 από τις πλατφόρμες φόρτωσης προς την ξηρά ώστε τα υλικά να μεταφέρονται με τη βαρύτητα- αυτό επιτρέπει τη διαμόρφωση μόνο οριζόντιων αναδιπλώσεων
- vii. Να διαμορφωθούν αναδιπλώσεις των αγωγών ανά 125- 150 m για την προστασία από θερμοκρασιακές μεταβολές

Ολόκληρη η προβλήτα έχει μήκος 1320 m και αποτελείται από οδόστρωμα μίας λωρίδας και μία τροχιά μεταφοράς των αγωγών μεταφοράς των προϊόντων. Υπάρχει πρόσβαση σε 3 προβλήτες τόσο μέσω του οδοστρώματος των γεφυρών πρόσβασης, όσο και της τροχιάς των αγωγών. Το πλάτος του οδοστρώματος είναι σταθερό σε όλο το μήκος της προβλήτας, ενώ της τροχιάς των αγωγών μειώνεται κατά μήκος.

Η ανάλυση των κατασκευών θα γίνει με χρήση του προγράμματος SAP. Πρώτο βήμα σε αυτή τη διαδικασία είναι η διαμόρφωση του προσομοιώματος. Επειδή ο εν λόγω φορέας έχει μήκος 1320 m. είναι δύσκολη η ανάλυση του σε ένα ενιαίο προσομοίωμα και θα χωριστεί σε τυπικά τμήματα που επαναλαμβάνονται με μικρές παραλλαγές.

13.3.2. Διαμόρφωση προσομοιώματος

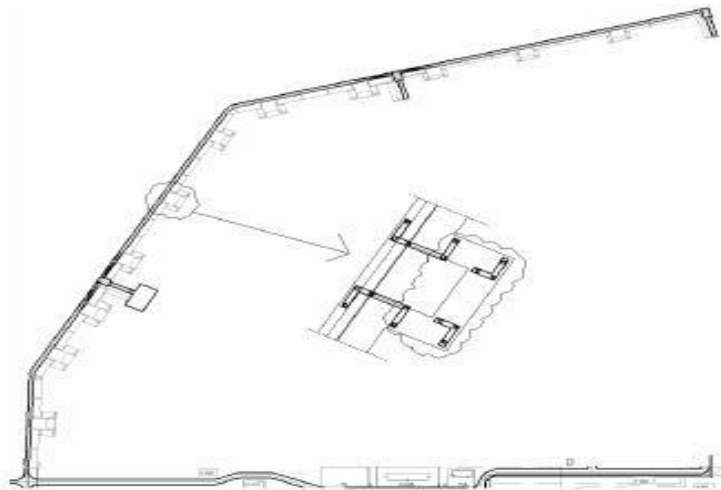
Ο φορέας χωρίζεται σε επιμέρους στατικά συστήματα. Ένα τυπικό τέτοιο σύστημα έχει μήκος 102 m και επαναλαμβάνεται, με διάφορες τροποποιήσεις, σε όλο το μήκος της προβλήτας.



Εικόνα 44: Τυπικό τμήμα 102 m

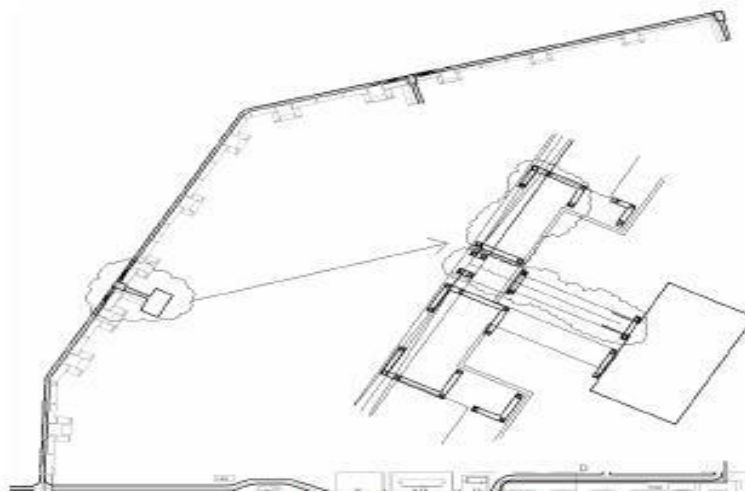
Ένα τυπικό σύστημα αποτελείται από 3 επιμέρους τμήματα των 34 m και ακολουθείται από μία αναδίπλωση. Οι δοκοί του οδοστρώματος και της τροχιάς αρθρώνονται στους κεφαλόδεσμους. Κατ' αυτόν τον τρόπο δεν επιτρέπεται καμία σχετική οριζόντια μετακίνηση μεταξύ κεφαλόδεσμων και δοκών, χωρίς ωστόσο να υπάρχει συνέχεια ροπών από άνοιγμα σε άνοιγμα.

Οι μεταλλικές δοκοί της τροχιάς των αγωγών, στις αναδιπλώσεις, στηρίζονται απλώς, με μία κυλιόμενη σύνδεση στους κεφαλόδεσμους στο τέλος κάθε τυπικού τμήματος των 102 m. Επομένως, δε μεταφέρονται οριζόντια φορτία στο τυπικό τμήμα από την αναδίπλωση, που επίσης σημαίνει ότι κάθε αναδίπλωση είναι ανεξάρτητο στατικό σύστημα. Επιπλέον, υπάρχει μία γέφυρα η οποία ενώνει το τμήμα του οδοστρώματος από άνοιγμα σε άνοιγμα στη θέση της αναδίπλωσης. Αυτή η γέφυρα στηρίζεται στη μία άκρη, ενώ στην άλλη επιτρέπεται να κυλιέται ελεύθερα. Επομένως, κάθε στατικό σύστημα δεν είναι εντελώς ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα. Είναι ανεξάρτητο μόνο κατά τη διαμήκη διεύθυνση.



Εικόνα 45: Τυπικό τμήμα αναδίπλωσης

Άλλο ένα ανεξάρτητο στατικό σύστημα είναι η προβλήτα μετάβασης (turning platform) μαζί με τη γέφυρα πρόσβασης που ενώνει την προβλήτα με το αγκυροβόλι. Δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ αυτής της κατασκευής και της προβλήτας, δηλαδή δε μεταφέρονται οριζόντια ή κατακόρυφα φορτία από ή προς αυτήν.



Εικόνα 46: Προβλήτα μετάβασης

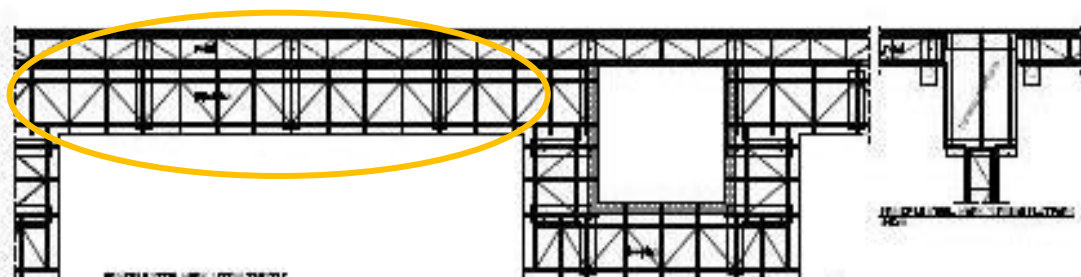
Τελευταίο ανεξάρτητο στατικό σύστημα είναι αυτό που στηρίζει το κεκλιμένο οδόστρωμα. Σε αυτό το τμήμα της κατασκευής υπάρχει σημαντική υψομετρική διαφορά μεταξύ της τροχιάς των αγωγών και του οδοστρώματος, ενώ συνδέονται στους ίδιους κεφαλόδεσμους.

Συνοπτικά, τα ανεξάρτητα στατικά συστήματα που δημιουργούνται και ελέγχονται είναι:

- Εξέδρα (access trestle)
- Αναδίπλωση- Τροχιά μεταφοράς αγωγών (Loop- pipe rack)
- Προβλήτα μετάβασης (Turning platform)
- Κεκλιμένο οδόστρωμα

13.3.3. Εξέδρα (access trestle)

Στην εργασία θα ασχοληθούμε με τη μελέτη των μεταλλικών εξεδρών (access trestle). Τα υπόλοιπα στατικά συστήματα δε θα αναλυθούν περαιτέρω. Η προσομοίωση των φορέων γίνεται με τη χρήση του προγράμματος SAP.



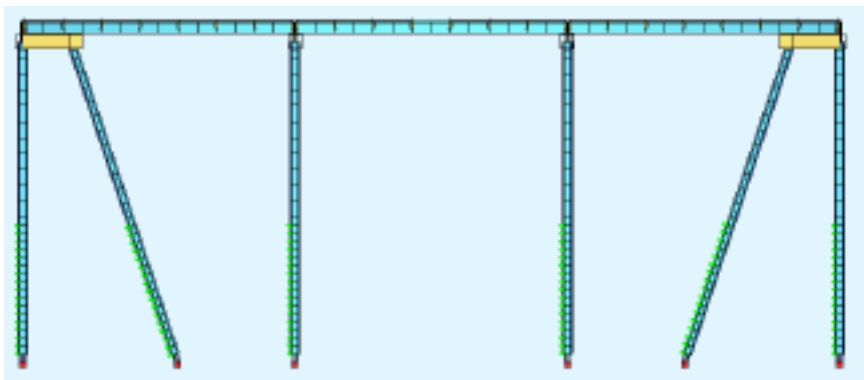
Εικόνα 47: Access trestle

13.3.3.1. Γεωμετρία- παραδοχές

Στην πραγματική κατασκευή διαμορφώνονται και αναλύονται τρία τυπικά τέτοια συστήματα, τα οποία έχουν ίδια μορφή, ίδιο στατικό σύστημα και ίδιες συνοριακές συνθήκες. Η μόνη διαφορά είναι το πλάτος και τα φορτία της τροχιάς των αγωγών, τα οποία μειώνονται κατά μήκος της προβλήτας. Στην παρούσα εργασία οι αναλύσεις πραγματοποιούνται θεωρώντας ένα ομοιόμορφο τμήμα σε όλο το μήκος.

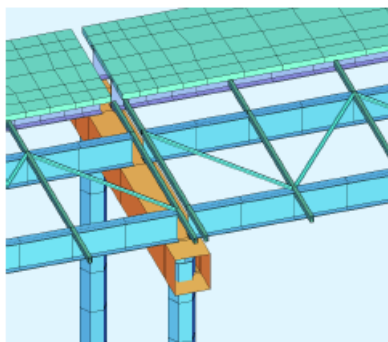
Στα δύο άκρα του φορέα εκτός από τους κατακόρυφους πασσάλους, τοποθετούνται και δύο κεκλιμένοι, προκειμένου να αυξήσουν τη δυσκαμψία του φορέα και να ελαττώσουν το μέγεθος των μετακινήσεων κατά τη διαμήκη έννοια. Στην εγκάρσια διεύθυνση τα πλαίσια που σχηματίζονται από τους πασσάλους έχουν επαρκή δυσκαμψία ώστε οι μετακινήσεις που προκύπτουν να είναι στα επιτρεπόμενα πλαίσια. Οι κεκλιμένοι πάσσαλοι τοποθετούνται υπό γωνία 75° .

Οι πάσσαλοι είναι μεταλλικοί, οι κεφαλόδεσμοι από οπλισμένο σκυρόδεμα, η τροχιά μεταφοράς των αγωγών μεταλλική και το οδόστρωμα αποτελείται από σύμμικτη διατομή.



Εικόνα 48: Όψη φορέα

Υπάρχει αρμός σε κάθε κεφαλόδεσμο, όπου οι μεταλλικές δοκοί της τροχιάς και του οδοστρώματος διακόπτονται.

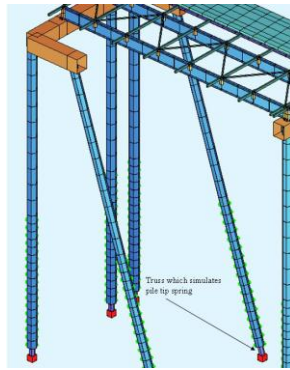


Εικόνα 49: Λεπτομέρεια προσομοιώματος

Κατ' αυτόν τον τρόπο, το οδόστρωμα και η τροχιά μεταφοράς των αγωγών απλώς στηρίζονται σε κάθε άνοιγμα. Δεν επιτρέπονται οριζόντιες μετακινήσεις μεταξύ κεφαλόδεσμου και του οδοστρώματος και της τροχιάς. Με αυτό τον σχεδιασμό εξασφαλίζεται ότι κάθε τμήμα μπορεί να συναρμολογηθεί προηγουμένως, να αναρτηθεί και να τοποθετηθεί στη θέση του.

13.3.3.2. Συνοριακές συνθήκες

Ο πυθμένας της θάλασσας τοποθετείται στα $-20,00$ m, οι πάσσαλοι διεισδύουν στο έδαφος για $17,00$ m και θεωρείται τύπος εδάφους B. Η αντίδραση του εδάφους προσομοιώνεται με γραμμικά ελατήρια, η δυσκαμψία των οποίων εξαρτάται από τη διάμετρο του πασσάλου. Η αιχμή του πασσάλου προσομοιώνεται με στοιχεία δικτυώματος με κατάλληλο εμβαδόν και μέτρο ελαστικότητας.



Εικόνα 50: Κεκλιμένοι πάσσαλοι στα ακραία τμήματα

Με βάση, λοιπόν, τη γεωτεχνική μελέτη και τη διάμετρο του πασσάλου που χρησιμοποιείται προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες για τις δυσκαμψίες των ελατηρίων των πασσάλων:

Εδαφικό Προφίλ Α				Εδαφικό Προφίλ Β			
Βάθος	Σταθερά ελατηρίου	Βάθος	Σταθερά ελατηρίου	Βάθος	Σταθερά ελατηρίου	Βάθος	Σταθερά ελατηρίου
m	MN/m	m	MN/m	m	MN/m	m	MN/m
0	0.0			0	0.0		
1	6.3	11	737.1	1	6.3	11	61.2
2	20.3	12	737.1	2	20.3	12	401.2
3	30.5	13	737.1	3	30.5	13	737.1
4	31.6	14	473.3	4	31.6	14	737.1
5	29.1	15	221.0	5	29.1	15	737.1
6	34.5	16	236.3	6	34.5	16	486.3
7	39.8	17	248.7	7	39.8	17	246.2
8	45.2	18	249.9	8	45.2	18	249.9
9	393.1	19	249.9	9	50.5	19	249.9
10	737.1	20	125.0	10	55.9	20	125.0

Πίνακας 12: 1000mm axial pile spring design values for profiles A (left) and B (right)

Εδαφικό Προφίλ Α				Εδαφικό Προφίλ Β			
Βάθος	Σταθερά ελατηρίου	Βάθος	Σταθερά ελατηρίου	Βάθος	Σταθερά ελατηρίου	Βάθος	Σταθερά ελατηρίου
m	MN/m	m	MN/m	m	MN/m	m	MN/m
0	0.0			0	0.0		
1	7.6	11	887.9	1	7.6	11	73.7
2	24.5	12	887.9	2	24.5	12	483.2
3	36.7	13	887.9	3	36.7	13	887.9
4	38.0	14	570.2	4	38.0	14	887.9
5	35.1	15	266.2	5	35.1	15	887.9
6	41.5	16	284.6	6	41.5	16	585.8
7	48.0	17	299.6	7	48.0	17	296.6
8	54.4	18	301.0	8	54.4	18	301.0
9	473.6	19	301.0	9	60.8	19	301.0
10	887.9	20	150.5	10	67.3	20	150.5

Πίνακας 13: 1200mm axial pile spring design values for profiles A (left) and B (right)

Εδαφικό Προφίλ Α

Εδαφικό Προφίλ Β

Βάθος	Σταθερά ελατηρίου	Βάθος	Σταθερά ελατηρίου	Βάθος	Σταθερά ελατηρίου	Βάθος	Σταθερά ελατηρίου
m	MN/m	m	MN/m	m	MN/m	m	MN/m
0	0.0			0	0.0		
1	8.9	11	1038.7	1	8.9	11	86.2
2	28.6	12	1038.7	2	28.6	12	565.3
3	42.9	13	1038.7	3	42.9	13	1038.7
4	44.5	14	667.0	4	44.5	14	1038.7
5	41.0	15	311.4	5	41.0	15	1038.7
6	48.6	16	332.9	6	48.6	16	685.2
7	56.1	17	350.5	7	56.1	17	346.9
8	63.6	18	352.1	8	63.6	18	352.1
9	554.0	19	352.1	9	71.2	19	352.1
10	1038.7	20	176.1	10	78.7	20	176.1

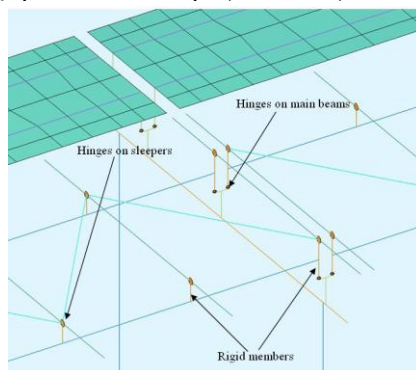
Πίνακας 14: 1400mm axial pile spring design values for profiles A (left) and B (right)

13.3.3.3. Στήριξη αγωγών

Οι αγωγοί στηρίζονται σε στρωτήρες (sleepers) ανά 5 m. Τα εγκάρσια φορτία μεταφέρονται σε κάθε στρωτήρα κατά μήκος της προβλήτας. Στη διαμήκη διεύθυνση οι αγωγοί είναι ελεύθεροι να ολισθήσουν. Υπάρχει μόνο μία στήριξη για τον αγωγό σε αυτή τη διεύθυνση στο μέσον του ανοίγματος.

13.3.3.4. Λεπτομέρειες προσομοιώματος

Μία λεπτομέρεια του προσομοιώματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Παρατηρούμε ότι οι στρωτήρες τοποθετούνται υψηλότερα από τον κεντροβαρικό άξονα των κυρίων δοκών προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή των οριζόντιων φορτίων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση άκαμπτων μελών με μήκος ίσο με το μισό του ύψους των κυρίων δοκών. Οι στρωτήρες απλώς στηρίζονται, αλλά υπάρχουν εσωτερικές αρθρώσεις σε κάθε άκαμπτο μέλος. Bearings επιτρέπουν στις κύριες δοκούς να περιστρέφονται ελεύθερα γύρω από τον ισχυρό και ασθενή άξονα τους.



Εικόνα 51: Λεπτομέρεια προσομοιώματος

13.3.3.5. Βασικοί συνδυασμοί φορτίσεων

LC1: Ίδιο βάρος σκυροδέματος & χάλυβα

LC2: ίδιο βάρος μεταλλικού αγωγού

LC3: βάρος υγρών φορτίων αγωγού

LC4: φορτίο οδοστρώματος

- LC5: κινητό φορτίο πεζοδρομίου
 LC10: άνεμος, συνήθεις συνθήκες
 LC11: ομοιόμορφη αύξηση θερμοκρασίας 30°C
 LC13: πρόσθετο νεκρό φορτίο στο οδόστρωμα
 LC14: φορτίο κυμάτων, συνήθεις συνθήκες, διαμήκης διεύθυνση
 LC15: φορτίο κυμάτων, ακραίες συνθήκες, διαμήκης διεύθυνση
 LC16: φορτίο κυμάτων, συνήθεις συνθήκες, εγκάρσια διεύθυνση
 LC17: φορτίο κυμάτων, ακραίες συνθήκες, εγκάρσια διεύθυνση
 LC18: ομοιόμορφο νεκρό φορτίο 5 kN/m² στο οδόστρωμα
 LC20: νεκρό φορτίο από τις γέφυρες που συνδέονται
 LC21: κινητό φορτίο από τις συνδεδεμένες γέφυρες
 LC90: σεισμός κατά X (διαμήκης διεύθυνση)
 LC91: σεισμός κατά Y (εγκάρσια διεύθυνση)
 LC92: σεισμός κατά Z (κατακόρυφα)

Ενδεικτικά, παρατίθενται οι βασικοί συνδυασμοί φορτίσεων:

	ULS1	ULS2	ULS3	ULS4	ULS5	ULS6	ULS7	ULS8	ULS9	ULS10
LC1	1,35	1,35	1,35	1,35	1,00	1,00	1,00	1,00	1,35	1,35
LC2	1,35	1,35	1,35	1,35	1,00	1,00	1,00	1,00	1,35	1,35
LC3	1,35	1,35	1,35	1,35	1,00	1,00	1,00	1,00	1,35	1,35
LC4	0,54	0,54	0,54	1,35	0,40	0,40	0,40	1,00	-	-
LC5	0,54	0,54	0,54	1,35	0,40	0,40	0,40	1,00	-	-
LC10	1,40	0,84	0,84	0,84	1,31*0,6	1,31*0,6	1,31*0,6	1,31*0,6	1,31*0,5	1,31*1,4
LC11	0,78	1,30	0,78	0,78	0,60	1,00	0,60	0,60	0,78	0,78
LC13	1,75	1,75	1,75	1,75	1,00	1,00	1,00	1,00	1,35	1,35
LC14	0,84	0,84	1,40	0,84	-	-	-	-	-	-
LC15	-	-	-	-	0,60	0,60	1,00	0,60	1,40	0,84
LC16	0,84	0,84	1,40	0,84	-	-	-	-	-	-
LC17	-	-	-	-	0,60	0,60	1,00	0,60	1,40	0,84
LC18	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35
LC20	1,35	1,35	1,35	1,35	1,00	1,00	1,00	1,00	1,35	1,35
LC21	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35

Πίνακας 15: Οριακή κατάσταση αστοχίας

	SLS1	SLS2	SLS3	SLS4	SLS5	SLS6
LC1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LC2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LC3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LC4	0,40	0,40	0,40	1,00	-	-
LC5	0,40	0,40	0,40	1,00	-	-
LC10	1,00	0,60	0,60	0,60	0,50	1,00
LC11	0,60	1,00	0,60	0,60	0,60	0,60
LC13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LC14	0,60	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60
LC15	-	-	-	-	-	-
LC16	0,60	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60
LC17	-	-	-	-	-	-

LC18	-	-	-	-	1,00	1,00
LC20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LC21	-	-	-	-	1,00	1,00

Πίνακας 16: Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

	Seism9	Seism10	Seism11	Seism12	Seism13	Seism14	Seism15	Seism16
LC1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LC2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LC3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LC4	-	-	-	-	-	-	-	-
LC5	-	-	-	-	-	-	-	-
LC10	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
LC11	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
LC13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LC14	-	-	-	-	-	-	-	-
LC15	-	-	-	-	-	-	-	-
LC16	-	-	-	-	-	-	-	-
LC17	-	-	-	-	-	-	-	-
LC18	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
LC20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LC21	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
LC90	1,00	1,00	-1,00	-1,00	0,30	0,30	-0,30	-0,30
LC91	0,30	-0,30	0,30	-0,30	1,00	-1,00	1,00	-1,00
LC92	-0,30	-0,30	-0,30	-0,30	-0,30	-0,30	-0,30	-0,30

Πίνακας 17: Σεισμικός συνδυασμός

13.3.3.6. Φορτία αγωγού

Η τροχιά μεταφοράς των αγωγών έχει ομοιόμορφο φορτίο 400 kg/m. Τα υπόλοιπα φορτία για ανάλογα με τη διάμετρο του αγωγού παρουσιάζονται παρακάτω:

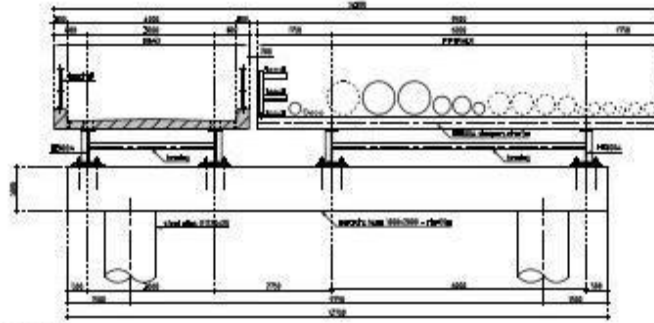
Ονοματική διάμετρος (inch)	Διάμετρος (mm)	Πάχος ελάσματος (mm)	Εσωτερική διάμετρος (mm)	Βάρος (kg/m)	Γεμισμένος με νερό (kg/m)	Μέγιστο άνοιγμα (m)
2	60.3	5.5	49.3	7.5	9.4	6.0
4	114	6.0	102	16.1	24.3	7.5
6	168	7.1	153	28.2	46.9	8.0
8	219	6.4	206	33.3	66.7	8.5
10	273	6.4	260	41.7	94.9	9.0
12	324	6.4	311	49.7	125.7	10.0
14	356	7.9	340	68.1	158.8	10.7
16	416	7.9	401	77.9	203.9	11.3
18	457	7.9	441	87.8	240.8	11.6
20	508	9.5	489	117	304.8	12.2
24	610	9.5	591	141	415.0	12.8
30	762	9.5	743	176	609.6	13.4

Εικόνα 18: Φορτία τροχιάς αγωγών

Συγκεντρωτικά, χρησιμοποιείται I.B. μεταλλικών αγωγών 15 kN/m, I.B. τροχιάς αγωγών 4 kN/m, φορτίο υγρών προϊόντων 30 kN/m και κινητό φορτίο στο πεζοδρόμιο 2,5 kN/m².

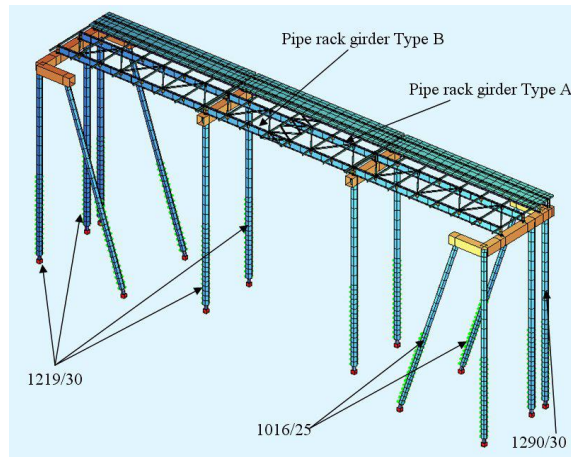
13.3.3.7. Διατομές

Η διατομή που προσομοιώνεται απλοποιητικά είναι η εξής:



Εικόνα 53: Διατομή προσομοιώματος

Στο αριστερό τμήμα είναι το οδόστρωμα και στη δεξιά η τροχιά των αγωγών.

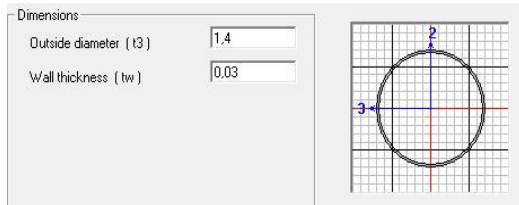


Εικόνα 54: Διατομές κεφαλόμεσμων

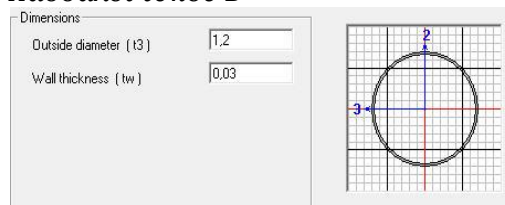
Η διατομή των κεφαλόμεσμων έχει ύψος 1,8 m και πλάτος 1,6 m.

Συγκεντρωτικά οι διατομές που χρησιμοποιούνται φαίνονται παρακάτω:

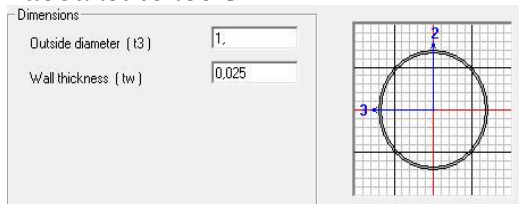
Πάσσαλοι τύπου A



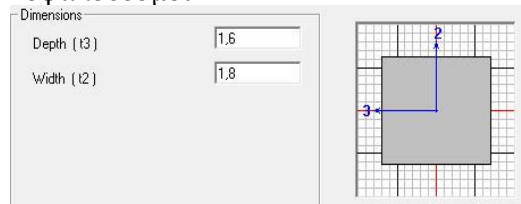
Πάσσαλοι τύπου B



Πάσσαλοι τύπου C

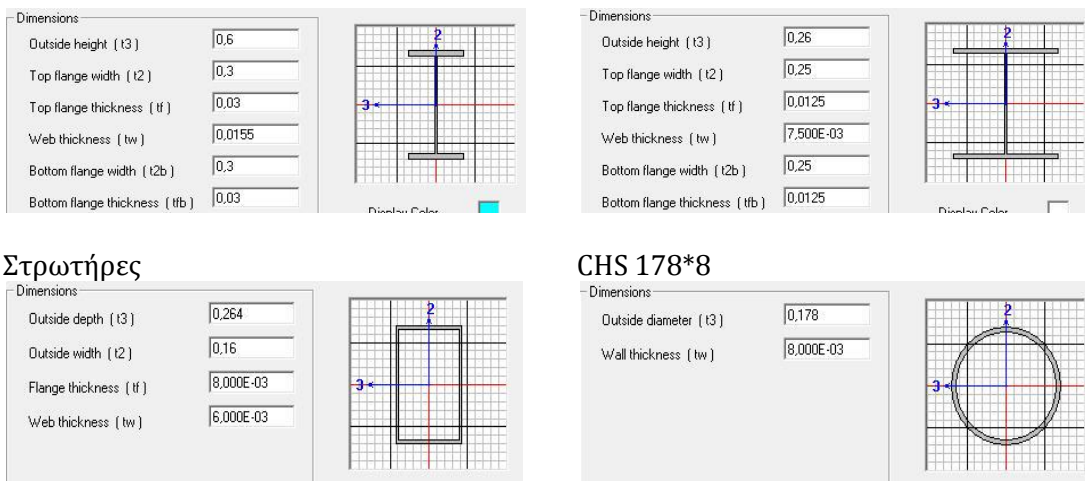


Κεφαλόμεσμοι



Κύριες δοκοί piperack HEA 600

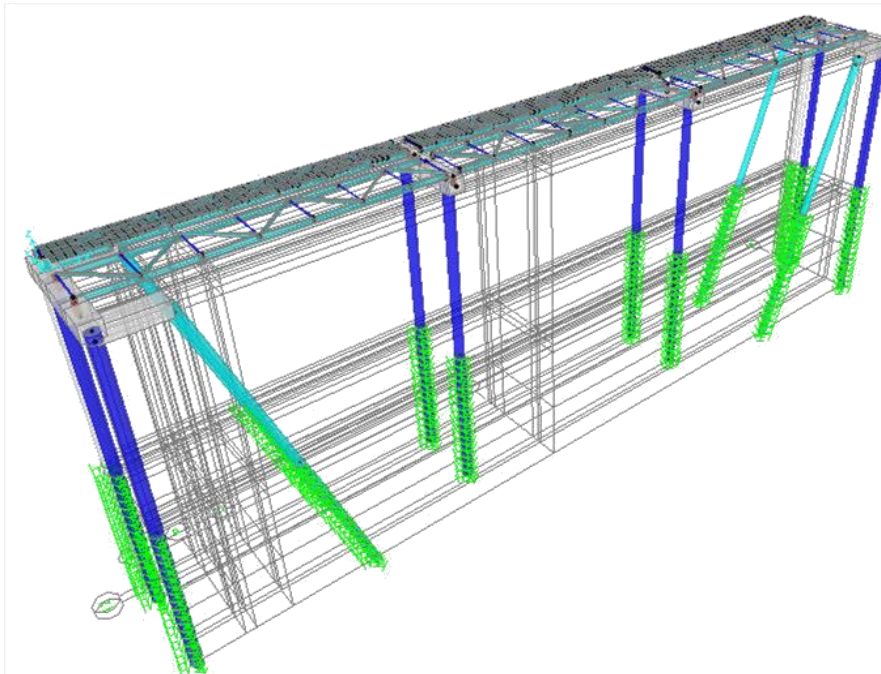
Κύριες δοκοί οδοστρώματος HEA 260



Εικόνα 55: Διατομές προσομοιώματος SAP

Για την προσομοίωση του οδοστρώματος, χρησιμοποιούνται επιφανειακά στοιχεία πάχους 20 cm. Μέχρι τα 20 m παρατηρούμε ότι βρίσκεται ο πυθμένας της θάλασσας και μετά οι πάσσαλοι διεισδύουν στο έδαφος για 17 m. Τοποθετούνται γραμμικά ελατήρια εγκάρσια για να προσομοιώσουν τη σταθερά του εδάφους, σύμφωνα με τις τιμές που προσδιορίστηκαν στους Πίνακες 12- 14. Διαμήκη ελατήρια δεν τοποθετούνται για τη διευκόλυνση των αναλύσεων και στην αιχμή οι πάσσαλοι δεσμεύονται με άρθρωση.

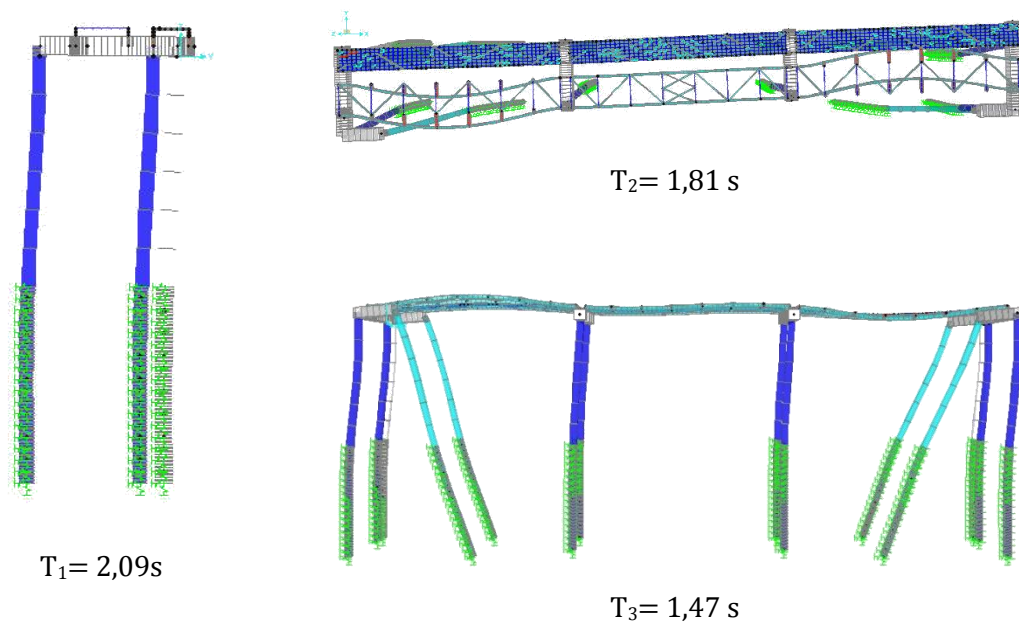
Τελικά, το προσομοίωμα που διαμορφώνεται στο Sap έχει την εξής μορφή:



Εικόνα 56: Προσομοίωμα Sap

13.3.4. Ιδιομορφές

Για το Εδαφικό Προφίλ Α οι ιδιομορφές που προκύπτουν είναι οι εξής:



Εικόνα 57: Ιδιομορφές για εδαφικό προφίλ Α

Με αφορμή το φορέα της Azzawiya προκύπτει η ανάγκη διερεύνησης του κρίσιμου μήκους λυγισμού των πασσάλων σε τέτοιου τύπου κατασκευές. Οι συνθήκες έδρασης δεν μπορούν να χαρακτηριστούν με ακρίβεια και κατ' επέκταση δεν μπορεί να οριστεί ακριβώς ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου λυγισμού και της καμπτικής αντοχής, τελικά, των πασσάλων.

Έχοντας ως οδηγό τον παραπάνω φορέα και τις εδαφικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή του έργου πραγματοποιείται μία σειρά από παραμετρικές αναλύσεις προκειμένου να διαπιστωθεί η επιρροή των εδαφικών συνθηκών, του βάθους έμπηξης και του τρόπου σύνδεσης των πασσάλων με την ανωδομή.

Β' ΜΕΡΟΣ

**Χαλύβδινοι πάσσαλοι, ισοδύναμο μήκος λυγισμού, δείκτης
εδάφους, παραμετρικές αναλύσεις**

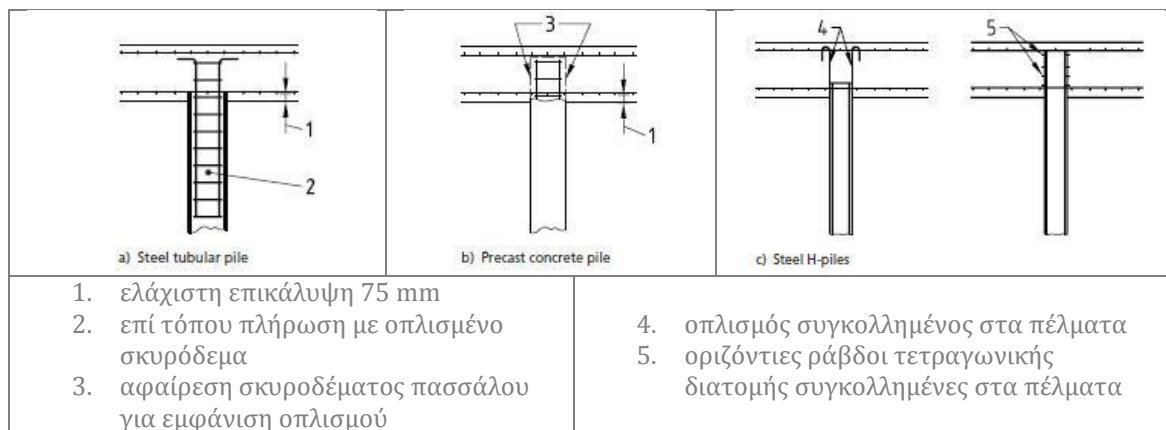
14. ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΠΑΣΣΑΛΩΝ

Παίρνοντας ως αφορμή το φορέα της Azzawiya που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στο Β' μέρος της εργασίας γίνεται διερεύνηση του φαινομένου του λυγισμού στους μεταλλικούς πασσάλους. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διαδικασία σχεδιασμού του φορέα εμφανίστηκε το πρόβλημα ακριβούς υπολογισμού του ισοδύναμου μήκους λυγισμού των πασσάλων κατά τον έλεγχο ευστάθειας. Γίνεται, λοιπόν, μία σειρά από παραμετρικές αναλύσεις ξεκινώντας από έναν πολύ απλό φορέα και καταλήγοντας σε ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα, στις οποίες μεταβάλλοντας διάφορες παραμέτρους, γίνεται προσπάθεια να προσεγγισθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η πραγματική συμπεριφορά και να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν το ισοδύναμο μήκος λυγισμού σε τέτοιες κατασκευές.

14.1. Λυγισμός μεταλλικών πασσάλων

Οι μεταλλικοί πάσσαλοι πρέπει να σχεδιάζονται έναντι λυγισμού. Το ισοδύναμο μήκος πρέπει να καθορίζεται θεωρώντας ότι η κορυφή του πασσάλου είτε είναι στο επίπεδο της κάτω πλευράς του καταστρώματος ή στο επίπεδο των ενισχύσεων του πλαισίου που διαμορφώνεται, επιλέγεται όποιο σημείο βρίσκεται χαμηλότερα, και η βάση του πασσάλου είναι το σημείο στήριξης του στο έδαφος, λαμβάνοντας υπόψη τυχόν μεταβολές της στάθμης του βυθού, λόγω υγροποίησης ή διάβρωσης. Οι κεφαλές των πασσάλων συνήθως ενσωματώνονται στο κατάστρωμα, επιτυγχάνοντας το ελάχιστο ισοδύναμο μήκος λυγισμού και τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα.

Παραδείγματα συνδέσεων πασσάλων με την ανωδομή παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 58: Τρόποι σύνδεσης πασσάλων με την υπερκατασκευή

14.2. Καμπτικός λυγισμός λόγω αξονικής θλιπτικής δύναμης

Αποτελεί τη συνηθέστερη μορφή αστάθειας θλιβόμενων μελών μεταλλικών κατασκευών. Η απώλεια της ευστάθειας του αρχικώς ευθύγραμμου μέλους εκδηλώνεται με μετάπτωσή του σε μία καμπυλωμένη μορφή, με κάμψη περί τον ισχυρό ή τον ασθενή άξονα της διατομής του μέλους, χωρίς την εμφάνιση σχετική στροφής των διατομών. Όπως και στις άλλες μορφές αστοχίας λόγω λυγισμού, το φαινόμενο συμβαίνει πριν το μέλος αναπτύξει την πλαστική αντοχή της διατομής του.

Η επάρκεια ενός θλιβόμενου μέλους με σταθερή διατομή έναντι καμπτικού λυγισμού ελέγχεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Όπου

N_{Ed} Η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης

$N_{b,Rd}$ Η αντοχή του θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό

Εξίσωση 17: Επάρκεια θλιβόμενου μέλους έναντι καμπτικού λυγισμού

Η αντοχή ενός θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό λαμβάνεται από τις σχέσεις:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{Για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{Για διατομές κατηγορίας 4}$$

Όπου: χ Μειωτικός συντελεστής

Εξίσωση 18: Αντοχή θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό

Κατά τον καθορισμό των A και A_{eff} δε χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψη τυχόν οπές για κοχλίες στα άκρα του θλιβόμενου μέλους.

Σε μέλη υπό αξονική θλίψη η τιμή του μειωτικού συντελεστή χ υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, ως συνάρτηση της ανηγμένης λυγηρότητας λ και του συντελεστή ατελειών α , ο οποίος εξαρτάται από την αντίστοιχη καμπύλη λυγισμού:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \quad \text{αλλά } \chi \leq 1,0$$

Όπου

$$\Phi = 0,5 \left[1 + a \left(\bar{\lambda} - 0,2 \right) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad \text{Για διατομές κατηγορίας 1,2 και 3}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \quad \text{Για διατομές κατηγορίας 4}$$

α Συντελεστής ατελειών, που αντιστοιχεί σε κάθε καμπύλη λυγισμού και λαμβάνεται από πίνακες

$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}$ Το ελαστικό κρίσιμο φορτίο για την αντίστοιχη μορφή λυγισμού, βασισμένο στις ιδιότητες της πλήρους διατομής

$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2 A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$ Η κρίσιμη τάση Euler

L_{cr} Το ισοδύναμο μήκος λυγισμού στο υπό θεώρηση επίπεδο λυγισμού

$i = \sqrt{I/A}$ Η ακτίνα αδρανείας περί τον αντίστοιχο άξονα, υπολογιζόμενη

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i}$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της πλήρους διατομής

Λυγηρότητα για την ανάλογη μορφή λυγισμού

Η οριακή (χαρακτηριστική) λυγηρότητα, ως το σημείο τομής της οριζόντιας ευθείας για $\sigma = f_y$, με την καμπύλη Euler. Το σημείο τομής P αντιστοιχεί στη λυγηρότητα για την οποία η κρίσιμη τάση λυγισμού κατά Euler είναι ίση με το όριο διαρροής

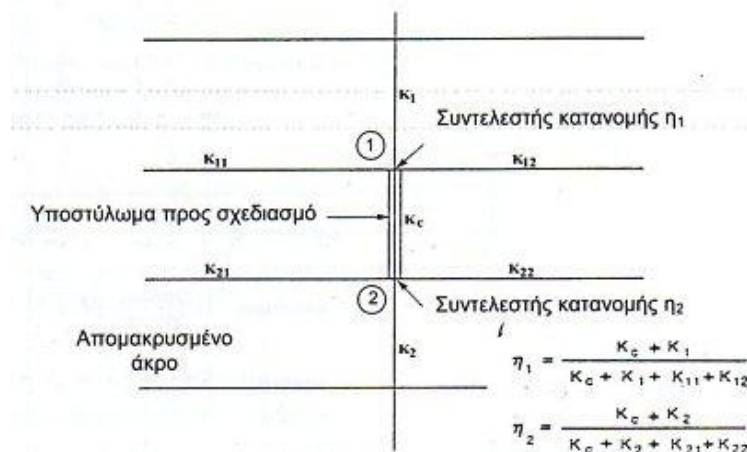
f_y σε N/mm^2

Εξίσωση 19: Υπολογισμός κρίσιμου φορτίου λυγισμού & κρίσιμου μήκους λυγισμού για μέλη υπό αξονική θλίψη

14.3. Ισοδύναμο μήκος λυγισμού πασσάλων

Το ισοδύναμο μήκος λυγισμού L_{cr} ενός θλιβόμενου μέλους μήκους L , είναι το μήκος ενός κατά τα άλλα όμοιου μέλους με «αρθρωτά άκρα» (δηλαδή άκρα παρεμποδιζόμενα έναντι πλευρικής μετακίνησης αλλά ελεύθερα να στρέφονται στο επίπεδο λυγισμού), το οποίο έχει την ίδια αντοχή σε λυγισμό με το θλιβόμενο μέλος μήκους L .

Ο ακριβής προσδιορισμός του ισοδύναμου μήκους λυγισμού θλιβόμενων μελών τα οποία είναι ενταγμένα σε κάποιο πλαισιωτό φορέα, προϋποθέτει την ανάλυση σε ευστάθεια ολόκληρου του φορέα. Με αυτήν την ανάλυση προσδιορίζονται οι κρίσιμες ιδιομορφές λυγισμού για κάθε μέλος, με τη βοήθεια των οποίων υπολογίζονται στη συνέχεια οι συντελεστές ισοδύναμου μήκους λυγισμού L_{cr}/L . Προκειμένου να αποφευχθεί η διαδικασία αυτή, η οποία είναι πολύπλοκη και χρονοβόρα για τους συνήθεις υπολογισμούς της πράξης, έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές προσεγγιστικές μέθοδοι, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται με απλό τρόπο η αξιολόγηση της δυστρεψιάς των άκρων των θλιβόμενων μελών και ο προσδιορισμός των συντελεστών αυτών.



Εικόνα 59: Συντελεστής κατανομής η_1 και η_2 για συνεχή υποστυλώματα

Μία διαδεδομένη μέθοδος είναι αυτή που αναπτύχθηκε από τον Wood R. H. και υιοθετήθηκε από διάφορους κανονισμούς (Βρετανικό, Γερμανικό κλπ). Στην Εικόνα 59 παρουσιάζεται ένα τμήμα αποσπασμένο από το συνολικό πλαισιωτό φορέα. Το τμήμα αυτό περιλαμβάνει ένα συνεχές υποστυλώμα καθώς και τις δοκούς οι οποίες συντρέχουν στην κεφαλή (σημείο 1) και στον πόδα (σημείο 2) του υποστυλώματος ενός ορόφου, για το οποίο ζητείται ο προσδιορισμός του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή, για τον προσδιορισμό του ανωτέρω συντελεστή του τμήματος (1-2) του συνεχούς υποστυλώματος χρησιμοποιούνται οι συντελεστές κατανομής των άκρων του, n_1 και n_2 , οι οποίοι υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$n_1 = \frac{K_c + K_1}{K_c + K_1 + K_{11} + K_{12}}$$

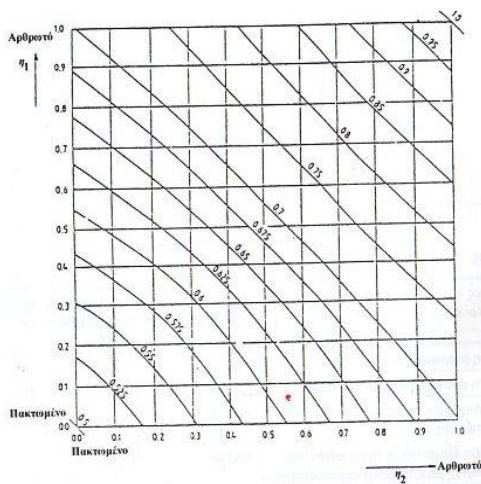
$$n_2 = \frac{K_c + K_2}{K_c + K_2 + K_{21} + K_{22}}$$

Εξίσωση 20: Υπολογισμός συντελεστών κατανομής

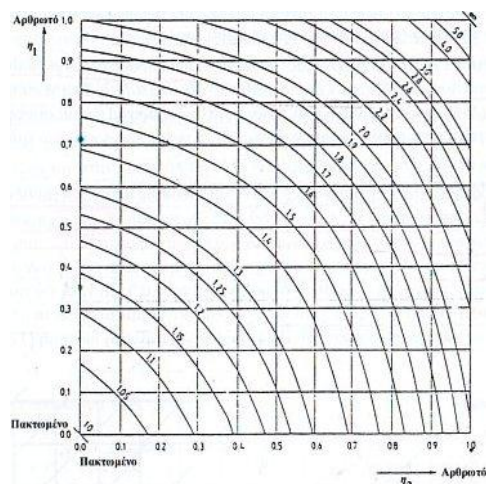
Όπου

- $K_c = I_c / L_c$ Ο συντελεστής δυσκαμψίας του υποστυλώματος
 K_1, K_2 Οι συντελεστές δυσκαμψίας για τα γειτονικά τμήματα του υποστυλώματος (άνω και κάτω)
 $K_{ij} = I_{i,j} / L_{i,j}$ Ο συντελεστής ενεργού δυσκαμψίας των δοκών που απολήγουν στο υποστυλωμα (στην κεφαλή και τη βάση του) ($i,j=1,2$)

Αφού υπολογίσουμε τους συντελεστές κατανομής των άκρων με βάση τις Εξισώσεις 2, χρησιμοποιούμε τους παρακάτω Πίνακες για να υπολογίσουμε τους συντελεστές ισοδύναμου μήκους λυγισμού για υποστυλώματα με μεταθετά και αμετάθετα άκρα αντίστοιχα.



Εικόνα 60: Συντελεστές ισοδύναμου μήκους λυγισμού L_{cr}/L για υποστυλωμα με αμετάθετα άκρα



Εικόνα 61: Συντελεστές ισοδύναμου μήκους λυγισμού L_{cr}/L για υποστυλωμα με μεταθετά άκρα

Τέλος, η πλέον διαδεδομένη και εύχρηστη μέθοδος, σε περίπτωση κατά την οποία οι συνθήκες των άκρων του θλιβόμενου μέλους είναι αρθρώσεις ή πακτώσεις με ή χωρίς δυνατότητα σχετικής μετακίνησης, κάνει χρήση των συντελεστών ισοδύναμου μήκους λυγισμού L_{cr}/L του παρακάτω Πίνακα. Οι προτεινόμενες τιμές των συντελεστών ισοδύναμου μήκους λυγισμού του πίνακα αυτού περιέχονται σε διεθνείς κανονισμούς (π.χ. LRFD '86).

Μορφές λυγισμού υποστυλωμάτων	(α)	(β)	(γ)	(δ)	(ε)	(στ)
Θεωρητική τιμή	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Προτεινόμενη τιμή	0,65	0,80	1,2	1,0	2,10	2,0

Πίνακας 19: Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού

Ωστόσο κατά τον έλεγχο των πασσάλων σε λυγισμό προκύπτει το πρόβλημα ότι οι συνθήκες έδρασης τους στο έδαφος δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να χαρακτηριστούν σαφώς ως αρθρώσεις ή πακτώσεις. Οι στηρίξεις αυτές επηρεάζονται τόσο από το εδαφικό προφίλ, όσο και από τη διάμετρο των πασσάλων, τις μεταβολές της στάθμης του βυθού λόγω υγροποίησης ή διάβρωσης, το βάθος έμπηξης των πασσάλων κ.ο.κ. Κατά τις αναλύσεις οι συνθήκες του εδάφους, λαμβάνοντας υπόψη και όσους παράγοντες εμπλέκονται, προσομοιάζονται με ελατήρια διαμήκη και εγκάρσια στα οποία δίνονται τιμές δυσκαμψίας, που προκύπτουν από τις γεωτεχνικές μελέτες, ανάλογες όλων αυτών των παραγόντων. Κατ' αυτόν τον τρόπο δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι έτοιμες τιμές συντελεστών ισοδύναμου μήκους λυγισμού που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Προέκυψε, έτσι, η ανάγκη διερεύνησης των παραγόντων που επηρεάζουν τον ισοδύναμο συντελεστή κρίσιμου μήκους λυγισμού. Οι παράγοντες που ελέγχονται είναι οι σταθερές των ελατηρίων, το βάθος έμπηξης και οι συνθήκες στήριξης της κορυφής των πασσάλων.

14.4. Παραμετρικές αναλύσεις

Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται με τη χρήση του προγράμματος ADINA 8.5 (Automatic Dynamic Incremental Non- linear Analysis). Οι διαστάσεις των προσομοιωμάτων και τα εδαφικά προφίλ που χρησιμοποιούνται λαμβάνονται από τις τεχνικές εκθέσεις του φορέα της Azzawiya, που έχει περιγραφεί παραπάνω.

Η διαδικασία που ακολουθείται, και θα περιγραφεί αναλυτικά στην πορεία, ξεκινά από την ανάλυση ενός απλού προσομοιώματος- ένας πακτωμένος πάσσαλος- και καταλήγει με την ανάλυση ενός τρισδιάστατου προσομοιώματος- μίας πλάκας σκυροδέματος που στηρίζεται σε τέσσερις πασσάλους με μεταβαλλόμενες σταθερές ελατηρίων ανάλογες του εδαφικού προφίλ που χρησιμοποιείται.

Για να υπολογιστεί ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού σε κάθε περίπτωση, η σκέψη που έγινε είναι να υπολογίζεται, μέσω του προγράμματος, ο load factor και ακολούθως το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για τις δεδομένες παραμέτρους που ελέγχονται και μέσω των Εξισώσεων 19 προκύπτει ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού β.

14.4.1. Παράμετροι

Οι παράμετροι που μεταβάλλονται μεταξύ των αναλύσεων είναι:

1. Σταθερά ελατηρίων
2. Συνθήκες στήριξης στην κορυφή των πασσάλων
3. Βάθος έμπηξης

14.4.1.1. Σταθερά ελατηρίων

Παρότι, συνήθως, δεν είναι φυσικώς δυνατό, οι αναλύσεις γίνονται θεωρώντας ενιαίο εδαφικό προφίλ για όλο το βάθος έμπηξης του πασσάλου, προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή μόνο της μεταβολής της σταθεράς των ελατηρίων στον υπολογισμό του συντελεστή του κρίσιμου μήκους λυγισμού. Για το λόγο αυτό, οι αναλύσεις καλύπτουν ένα ευρύτατο φάσμα τέτοιων τιμών και μελετάται, έτσι, η συμπεριφορά των πασσάλων σε όλα τα είδη εδάφους, από το πλέον χαλαρό μέχρι αυτό με τη μεγαλύτερη συνοχή, που πλησιάζει όσο είναι δυνατόν τις συνθήκες πάκτωσης.

Τέλος, για να έχουμε καλύτερη εκτίμηση των πραγματικών συνθηκών πραγματοποιούνται δύο αναλύσεις με μεταβαλλόμενες τιμές ελατηρίων κατά μήκος του πασσάλου σύμφωνα με τα εδαφικά προφίλ που έχουμε για την Azzawiya.

14.4.1.1.1. Δείκτης εδάφους

Σε αυτό το σημείο εισέρχεται και η έννοια του δείκτη εδάφους k_h σε οριζόντια διεύθυνση. Πρόκειται για έναν τρόπο έκφρασης της αντίδρασης του εδάφους στην παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου, λόγω οριζόντιων φορτίων επ' αυτού.

Έχει παρατηρηθεί κατά τις δοκιμαστικές φορτίσεις πασσάλων ότι κατά την επιβολή μικρών σχετικά οριζόντιων φορτίων η πλευρική μετατόπισή τους αυξάνει σχεδόν αναλογικά με την αύξηση του φορτίου. Έτσι η οριζόντια μετατόπιση μπορεί να υπολογισθεί με τη βοήθεια του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση ο οποίος ορίζεται από τη σχέση:

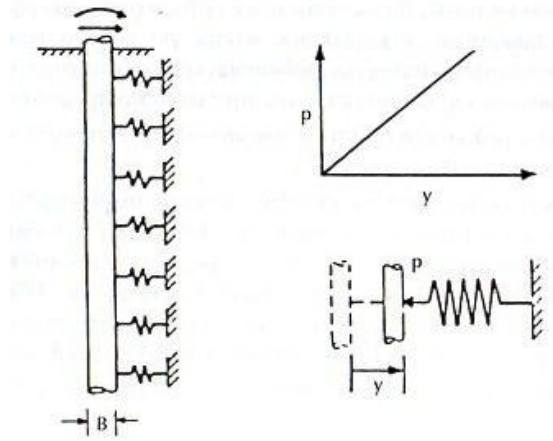
$$K_h = p / y$$

Όπου:

P Η πλευρική πίεση επί του πασσάλου

y Αντίστοιχη πλευρική μετατόπιση

Σύμφωνα με αυτήν την παραδοχή το έδαφος θεωρείται ότι αποτελείται από γραμμικά ελατήρια και ότι ο δείκτης εδάφους αντιστοιχεί στην ακαμψία των ελατηρίων αυτών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 62.



Εικόνα 62: Πάσσαλος ως ελαστική δοκός, σε ελαστικό έδαφος Winkler

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποιούν στις αναλύσεις τους αντί για το δείκτη εδάφους (subgrade reaction), k_h , το λεγόμενο μέτρο του δείκτη εδάφους (subgrade reaction modulus), K , το οποίο συνδέεται με το δείκτη εδάφους με τη σχέση $K = k_h \cdot B$, όπου B η διάμετρος ή το πλάτος του πασσάλου. Το μέτρο αυτό K , που εκφράζεται σε μονάδες δύναμη/ μήκος² αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στο μέτρο ελαστικότητας E και στην περίπτωση χρήσης του, αντί για τη γνωστή σχέση $p = k_h \cdot y$, που συνδέει την πίεση με την υποχώρηση, γίνεται χρήση της σχέσης $w = K \cdot y$, όπου η εδαφική αντίδραση (δύναμη) ανά μέτρο μήκους του πασσάλου.

Σε αυτό το σημείο γίνεται σύνδεση του δείκτη εδάφους με τη σταθερά των ελατηρίων προκειμένου να γίνεται αντιληπτό σε τι εδαφικά υλικά αντιστοιχούν οι αναλύσεις που πραγματοποιούνται. Ανάλογα με τον τύπο του εδάφους γίνονται οι παραδοχές ότι: α) k_h

είναι σταθερό για προφορτισμένες αργίλους, β) $k_h = n_h \frac{z}{B}$ για την περίπτωση των κανονικά φορτισμένων αργίλων και για μη συνεκτικά εδάφη, δηλαδή μεταβάλλεται συναρτήσει του βάθους. Ισχύει, λοιπόν, η σχέση:

Σταθερά ελατηρίων = δείκτης εδάφους * διάμετρος πασσάλου * επιφάνεια επιρροής

Στις αναλύσεις που πραγματοποιούνται λαμβάνεται διάμετρος πασσάλου = 1 m και επιφάνεια επιρροής κάθε ελατηρίου = 1 m (τοποθετούνται ανά 1 m). Επομένως, η σταθερά των ελατηρίων ισούται με το δείκτη εδάφους και προσδιορίζει ακριβώς το εδαφικό υλικό στο οποίο αντιστοιχεί.

Χαρακτηριστικές τιμές και τύποι υπολογισμού του δείκτη εδάφους δίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Προφορτισμένες άργιλοι
Ισχύει η ακόλουθη σχέση για την εκτίμηση του δείκτη εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση:
$k_h = \frac{k_r}{1,5B} (\text{tons} / \text{ft}^3)$
Όπου
k_r : δείκτης εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση, πασσάλου πλάτους B σε ft

($B = 1m = 3,28ft$)			
Στοιχεία	Στιφρή	Πολύ στιφρή	Σκληρή
Όριο μεταβολής k_t σε $tons / ft^3$ Ή σε MN / m^3	50-100 18-36	100-200 36-72	>200 >72
Όριο μεταβολής k_h σε $tons / ft^3$ Ή σε MN / m^3	10,2-20,3 ~30-60	56,5-112,9 ~60-120	>60,9 >170

Πίνακας 20: Βασικός δείκτης εδάφους K_t για προφορτισμένες αργίλους

Κανονικά φορτισμένες άργιλοι		
Υστερα από κατάλληλη εκτίμηση της σταθεράς n_h ισχύει η σχέση: $k_h = n_h \cdot \frac{z}{B}$		
	Μαλακές κανονικά φορτισμένες άργιλοι	Μαλακές οργανικές ιλύες
Όριο μεταβολής n_h σε $tons / ft^3$ Ή σε MN / m^3	1-2 2,8- 5,6	0,5 1,4
Το βάθος έμπηξης μεταβάλλεται: $1 < z < 20$ m, επομένως:		
Όριο μεταβολής k_h σε $tons / ft^3$ Ή σε MN / m^3	1-20 2,8- 56	2- 40 5,6- 112

Πίνακας 21: Βασικός δείκτης εδάφους K_t για κανονικά φορτισμένες αργίλους

Μη συνεκτικά εδάφη				
Ο δείκτης k_h μεταβάλλεται με το βάθος σύμφωνα με τη σχέση: $k_h = n_h \left(\frac{z}{B} \right)^n$				
Γραμμικά μεν για την περίπτωση κανονικά φορτισμένων άμμων ($n=1$), εκθετικά δε για μη συνεκτικά γενικώς εδάφη ($n=0,5-1$). Για την περίπτωση των άμμων δίνονται μέσες τιμές της σταθεράς n_h ανάλογα με τη σχετική πυκνότητα τους και τη ύπαρξη ή όχι στάθμης υπογείων υδάτων. Οι τιμές αυτές βασίζονται στη ρεαλιστική παραδοχή ότι το μέτρο ελαστικότητας της άμμου εξαρτάται από την ενεργό πίεση λόγω υπερκείμενων γαιών και τη σχετική πυκνότητα.				
Σχετική πυκνότητα		Χαλαρή	Μέση	Πυκνή
Terzaghi	Άμμος ξηρή ή υγρή n_h σε $tons / ft^3$ Ή σε MN / m^3	7 2,5	21 7,5	56 20
	Για βάθος έμπηξης $1 < z < 20$ m και $n=1$:			
	Όριο μεταβολής k_h σε $tons / ft^3$ Ή σε MN / m^3	7- 140 ~20- 390	21- 420 ~60- 1170	56- 1120 ~160- 3120
	Άμμος υπό άνωση n_h σε $tons / ft^3$ Ή σε MN / m^3	4 1,4	14 5	34 12
	Για βάθος έμπηξης $1 < z < 20$ m και $n=1$:			
	Όριο μεταβολής k_h σε $tons / ft^3$ Ή σε MN / m^3	4- 80 ~11,1- 222,4	14- 280 ~39- 778,4	34- 680 ~95- 1890
Reese	Άμμος υπό άνωση n_h σε $tons / ft^3$ Ή σε MN / m^3	15 5,3	46 16,3	96 34

Για βάθος έμπτυξης $1 < z < 20$ m και $n=1$:			
Όριο μεταβολής k_h σε $tons / ft^3$	15- 300 ~41,7- 834	46- 920 ~128- 2558	96-1920 ~267- 5255
Ή σε MN / m^3			

Πίνακας 22: Τιμές της σταθεράς n_h για άμμους

Στις παραμετρικές αναλύσεις που ακολουθούν η σταθερά των ελατηρίων λαμβάνει τιμές 5 έως $2000 MN / m^3$, οι οποίες, όπως αποδεικνύεται από τους ανωτέρω Πίνακες, αντιπροσωπεύουν σχεδόν όλο το εύρος εδαφικών υλικών.

14.4.1.2. Συνθήκες στήριξης στην κορυφή των πασσάλων

Οι συνθήκες στήριξης στην κορυφή των πασσάλων είναι άλλη μία παράμετρος προς διερεύνηση. Η κεφαλή του πασσάλου ανάλογα από το εάν είναι μεμονωμένος ή ανήκει σε ομάδα πασσάλων, καθώς και από τις ειδικότερες συνθήκες στήριξης της, μπορεί να θεωρηθεί ως ελεύθερη, ως αρθρωτή, ή ακόμη ως πλήρως πακτωμένη. Ο περιπτώσεις που εξετάζονται, λοιπόν, είναι οι παρακάτω:

- Ελεύθερη κορυφή
- Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις στην κορυφή του πασσάλου
- Δεσμευμένες στροφές στην κορυφή του πασσάλου
- Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις και στροφές στην κορυφή του πασσάλου

14.4.1.3. Βάθος έμπτυξης

Τελευταία παράμετρος είναι η επιρροή του μήκους έμπτυξης των πασσάλων. Διερευνάται, λοιπόν, σε ποιες περιπτώσεις το βάθος αυτό επηρεάζει το ισοδύναμο μήκος λυγισμού των πασσάλων. Οι τιμές που ελέγχονται για πάσσαλο μήκους 20 m είναι βάθος έμπτυξης 20 m, 15 m και 10 m αντίστοιχα.

Το βάθος έμπτυξης αποκτά ιδιαίτερο νόημα σχετιζόμενο με το ελεύθερο μήκος του πασσάλου κατά τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητάς του. Παρότι δεν αποτελεί αντικείμενο της εργασίας, ενδεικτικά αναφέρεται ότι ανάλογα με το λόγο των δύο αυτών μηκών οι πάσσαλοι μπορούν να χαρακτηρισθούν α) ως άκαμπτοι (κοντοί) οπότε και περιστρέφονται γύρω από ένα σημείο περιστροφής, σε κάποιο βάθος κατά μήκος του πασσάλου, χωρίς ουσιαστική παραμόρφωσή τους περί τον άξονα συμμετρίας τους και β) ως εύκαμπτοι (μακροί) εφόσον η συμπεριφορά τους κατά την οριζόντια φόρτιση μπορεί να παρομοιασθεί με αυτή μίας ελαστικής δοκού εντός ελαστικού εδάφους.

Ένας κοντός, άκαμπτος πάσσαλος, υπό την επενέργεια ενός οριζόντιου φορτίου περιστρέφεται γύρω από ένα σημείο περιστροφής εντός του εδάφους και η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του βασίζεται κυρίως στην αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους. Αντίθετα, η συμπεριφορά ενός μακρού εύκαμπτου πασσάλου, θεωρείται αντίστοιχη με αυτή της πεδιλοδοκού επί ελαστικού εδάφους. Στην περίπτωση αυτή, η φέρουσα ικανότητα του συστήματος πάσσαλος- έδαφος συνδέεται κυρίως με την κάμψη του πασσάλου λόγω οριζόντιας φόρτισης και των εξ αυτής παραγόμενων καμπτικών ροπών.

14.4.2. Πορεία ανάλυσης

Η πορεία που ακολουθείται είναι η εξής:

- Ελέγχεται πρώτα ένας μεμονωμένος πάσσαλος στον οποίο μεταβάλλονται σταδιακά το βάθος έμπτυξης, η σταθερά των ελατηρίων, οι συνθήκες δέσμευσης στην κορυφή και συνδυασμός όλων των παραπάνω παραμέτρων. Πρόκειται για τον πλέον απλό φορέα στον οποίο έχουμε εύκολα τη δυνατότητα να υπολογίσουμε αναλυτικά τα αναμενόμενα αποτελέσματα
- Σε δεύτερη φάση χρησιμοποιείται ένα απλό πλαίσιο αποτελούμενο από κατακόρυφους πασσάλους που συγκρατούνται από ένα κεφαλόδεσμο από σκυρόδεμα. Πρόκειται και σε αυτήν την περίπτωση για απλό φορέα στον οποίο τα αποτελέσματα μπορούν να συγκριθούν με τις αναλυτικές λύσεις
- Στη συνέχεια, μελετάται η επιρροή των κεκλιμένων πασσάλων. Αναφέρθηκε ήδη στην εργασία η συμβολή τους στην αύξηση της δυσκαμψίας των εξεδρών, σε αυτή τη φάση μελετάται ποια γωνία είναι η βέλτιστη για αυτό το σκοπό. Εξακολουθούμε να εργαζόμαστε σε ένα απλό πλαίσιο προκειμένου να υπάρχει εποπτεία των αποτελεσμάτων
- Ακολούθως, διαμορφώνεται ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα αποτελούμενο από κεκλιμένους πασσάλους και πλάκα σκυροδέματος
- Τέλος, αναλύεται ένας πραγματικός φορέας, προκειμένου να μελετηθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει έως τώρα

15. ΦΟΡΕΑΣ 1: ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΣ ΠΑΣΣΑΛΟΣ

Οι αναλύσεις ξεκινούν με τον πλέον απλό φορέα, ένα μεμονωμένο πάσσαλο, στον οποίο έχουμε τη δυνατότητα να ελέγξουμε την ορθότητα των αποτελεσμάτων του προγράμματος συγκρίνοντας τα με τα αποτελέσματα των αναλυτικών λύσεων.

5.1. Προσομοίωμα

Η διατομή που χρησιμοποιείται είναι κοίλη κυκλική διαμέτρου 1 m και πάχους ελάσματος 30 mm. Ο πάσσαλος έχει μήκος 20 m και οι συνθήκες στήριξης τόσο στην κορυφή, όσο και στη βάση μεταβάλλονται ανάλογα με την ανάλυση. Τα χαρακτηριστικά του προσομοιώματος είναι παρόμοια με αυτά του φορέα της Azzawiya.

5.2. Πορεία ανάλυσης

Η πορεία που ακολουθείται ξεκινάει με την ανάλυση του πασσάλου θεωρώντας στη βάση πάκτωση και μεταβάλλοντας τις συνθήκες στήριξης στην κορυφή. Αυτή είναι μία διαδικασία με την οποία μπορούμε να ελέγξουμε τα αποτελέσματα του προγράμματος σύμφωνα με τον Πίνακα 19. Από τον ίδιο Πίνακα παίρνουμε για κάθε περίπτωση το αναμενόμενο ισοδύναμο μήκος λυγισμού και υπολογίζουμε το κρίσιμο φορτίο λυγισμού σύμφωνα με τις Εξισώσεις 19. Το φορτίο που επιβάλλουμε σε κάθε ανάλυση ισούται περίπου με το 1/100 του αναμενόμενου φορτίου λυγισμού- καθώς έχει διαπιστωθεί ότι με αυτόν τον τρόπο οι αναλύσεις ολοκληρώνονται ομαλότερα.

Πραγματοποιούμε γραμμικές αναλύσεις λυγισμού (linearized buckling analysis method), επιλέγουμε classic analysis method και Lanczos method of generating starting vectors. Από τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από το πρόγραμμα, γνωρίζουμε το κρίσιμο φορτίο λυγισμού και στη συνέχεια υπολογίζουμε το συντελεστή ισοδύναμου μήκους β.

5.3. Αναλυτικές λύσεις

Σύμφωνα με τον Πίνακα 19 και τις Εξισώσεις 19 υπολογίζεται ακριβώς το αναμενόμενο φορτίο και μήκος λυγισμού καθώς και η αντοχή του πασσάλου σε λυγισμό για κάθε μία

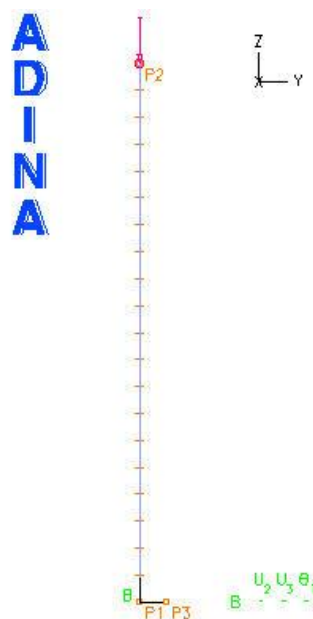
Φορέας 1: Μεμονωμένος πάσσαλος				
Συνθήκες στήριξης στη βάση	Συνθήκες δέσμευσης στην κορυφή	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους β από Πίνακα 19	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 EI}{(\beta L)^2}$	Αντοχή θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό $N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$
Πάκτωση	Χωρίς στήριξη	2,0	13930 kN	10671 kN
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις	0,7	113410 kN	26947 kN
Πάκτωση	Δεσμευμένες στροφές	1,0	55605 kN	24080 kN
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις & στροφές	0,5	220440 kN	28252 kN

Πίνακας 23: Αναλυτικές λύσεις για τον υπολογισμό του P_{cr}

Από τις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν αναμένουμε τα αποτελέσματα για τις παραπάνω συνθήκες στήριξης να ταυτίζονται.

5.4. Adina

Το προσομοίωμα που διαμορφώνεται στο Adina είναι τις μορφής:



Εικόνα 79: Προσομοίωμα προβόλου στο Adina

Οι ιδιομορφές που προκύπτουν για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 27. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων είναι τα εξής:

Φορέας 1: Μεμονωμένος πάσσαλος				
Συνθήκες στήριξης στη βάση	Συνθήκες δέσμευσης στην κορυφή	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού
Πάκτωση	Χωρίς στήριξη	13935	40,02	2,0
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις	113410	14,02	0,7
	Δεσμευμένες στροφές	55605	20,03	1,0
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις & στροφές	220440	10,06	0,5

Πίνακας 24: Αποτελέσματα Adina για πρόβολο

Τα αποτελέσματα είναι ακριβώς όπως αναμένονταν και ταυτίζονται με τις αναλυτικές λύσεις που υπολογίστηκαν στον Πίνακα 23. Εφόσον, λοιπόν, βεβαιώνουμε ότι το προσομοίωμα είναι σωστό συνεχίζουμε με τις παραμετρικές αναλύσεις. Αντικαθιστούμε την πάκτωση με μία σειρά ελατηρίων που αντιπροσωπεύουν το εδαφικό προφίλ.

5.4.1. 1^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμπηξης- Συνθήκες δέσμευσης στην κορυφή του πασσάλου- Σταθερά ελατηρίων

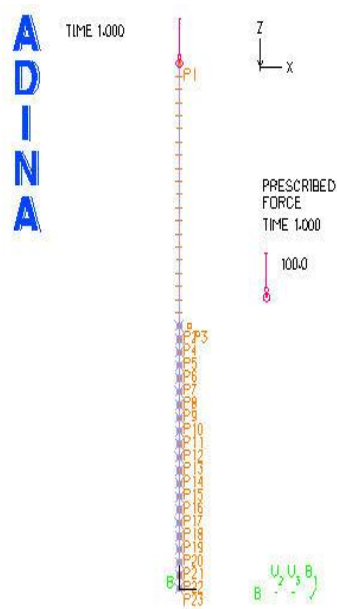
Παράμετροι:

- i. Βάθος έμπηξης:
 - a. 20 m
 - b. 15 m
 - c. 10 m
 - d. 5 m

- ii. Κορυφή:
 - a. ελεύθερη
 - b. δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις
 - c. δεσμευμένες στροφές
 - d. δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις & στροφές

- iii. Σταθερά ελατηρίων: κυμαίνεται μεταξύ $5 \cdot 10^3$ kN/m έως $2000 \cdot 10^3$ kN/m

Το προσομοίωμα που διαμορφώνεται είναι το εξής:



Εικόνα 64: Προσομοίωμα πασσάλου στο Adina

Ανάλογα με τις σταθερές των ελατηρίων, δηλαδή την ενδοτικότητα της στήριξης στη βάση, τις συνθήκες στήριξης στην κορυφή του πασσάλου και το βάθος έμπηξης προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για το συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού.

Φορέας 1: Μεμονωμένος πάσσαλος					
Βάθος έμπηξης	Συνθήκες δέσμευσης στην κορυφή	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού	Αντοχή σε λυγισμό (kN)
20 m	Χωρίς στήριξη	8173 έως 12551	52,24 έως 42,16	2,61 έως 2,11	6919 έως 9743
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις	64560 έως 102200	18,59 έως 14,77	0,93 έως 0,74	24884 έως 26650
	Δεσμευμένες στροφές	32290 έως 50085	26,28 έως 21,10	1,31 έως 1,06	19583 έως 23390
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις και στροφές	121440 έως 198740	13,57 έως 10,59	0,68 έως 0,53	27105 έως 28078
15 m	Χωρίς στήριξη	8258 έως 12550	51,97 έως 42,16	2,60 έως 2,11	6683 έως 9743
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις	65500 έως 102200	18,45 έως 14,77	0,92 έως 0,74	24956 έως 26650
	Δεσμευμένες στροφές	32670 έως 50100	26,13 έως 21,10	1,31 έως 1,06	19703 έως 23392
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις και στροφές	123860 έως 198740	13,42 έως 10,59	0,67 έως 0,53	27159 έως 28078
10 m	Χωρίς στήριξη	8552 έως 12551	51,07 έως 42,16	2,55 έως 2,11	6901 έως 9742
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις	66650 έως 102200	18,29 έως 14,77	0,91 έως 0,74	25040 έως 26650
	Δεσμευμένες στροφές	33960 έως 50100	25,63 έως 21,10	1,28 έως 1,06	20096 έως 23392
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις και στροφές	130760 έως 198740	13,06 έως 10,59	0,65 έως 0,53	27285 έως 28078
5 m	Χωρίς στήριξη	6042 έως 12540	60,76 έως 42,78	3,04 έως 2,11	4993 έως 9736
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις	52160 έως 102200	20,68 έως 14,77	1,03 έως 0,74	23661 έως 26650
	Δεσμευμένες στροφές	24305 έως 50100	30,29 έως 21,10	1,51 έως 1,06	16480 έως 23392
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις και στροφές	99120 έως 198680	15,00 έως 10,60	0,75 έως 0,53	26560 έως 28078

Πίνακας 25: Αποτελέσματα Adina για μεμονωμένο πάσσαλο

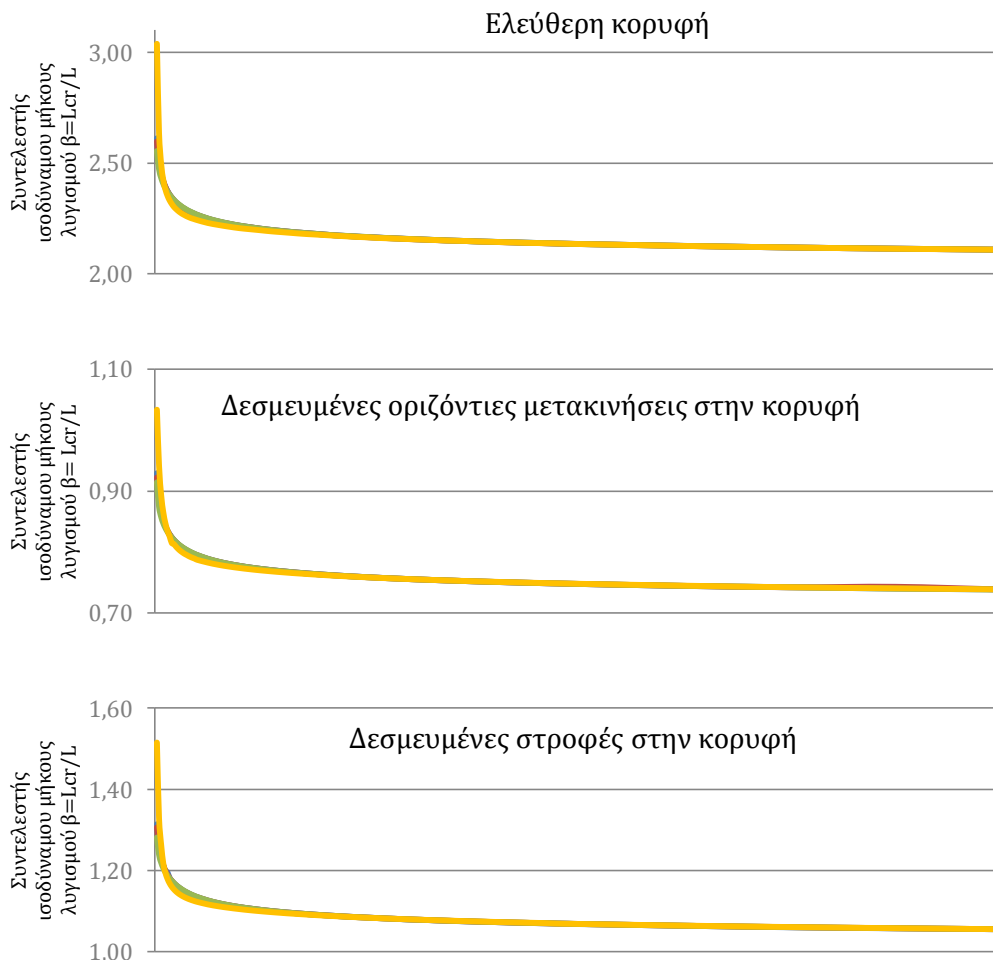
Γενικές Παρατηρήσεις

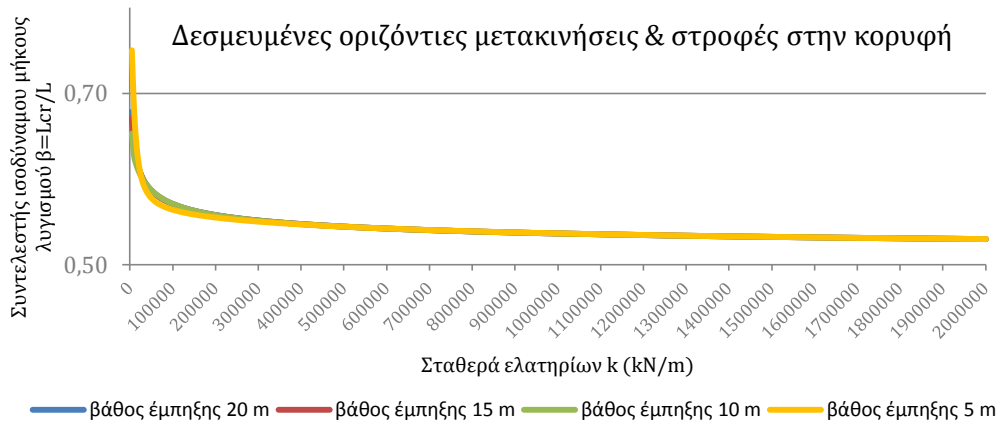
- i. Τα αποτελέσματα για το κρίσιμο φορτίο, το ισοδύναμο μήκος, το συντελεστή ισοδύναμου μήκους και την αντοχή σε λυγισμό δίνονται σε διάστημα. Η μικρότερη

τιμή αντιστοιχεί στην ανάλυση με τη μικρότερη σταθερά ελατηρίου και η μεγαλύτερη αντίστοιχα στην ανάλυση με τη μεγαλύτερη τιμή σταθεράς ελατηρίων. Ενδιάμεσα οι τιμές μεταβάλλονται όπως φαίνεται στα Διαγράμματα που ακολουθούν.

- ii. Το επιβαλλόμενο φορτίο που εφαρμόζεται στις αναλύσεις ισούται περίπου με το 1/100 του κρίσιμου φορτίου λυγισμού που είχε υπολογιστεί για τον πακτωμένο πρόβολο. Σε ορισμένες περιπτώσεις μεταβάλλεται για λόγους διευκόλυνσης των αναλύσεων του προγράμματος
- iii. Το ισοδύναμο μήκος λυγισμού υπολογίζεται με βάση την εξίσωση $L_{cr} = \pi \sqrt{\frac{EI}{P_{cr}}}$
- iv. Ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού υπολογίζεται από τη σχέση: $L_{cr} = \beta L$ και μειώνεται όσο αυξάνεται η σταθερά των ελατηρίων, έχοντας ως άνω όριο την τιμή που έχει υπολογιστεί για τον πρόβολο με βάση τον Πίνακα 23.

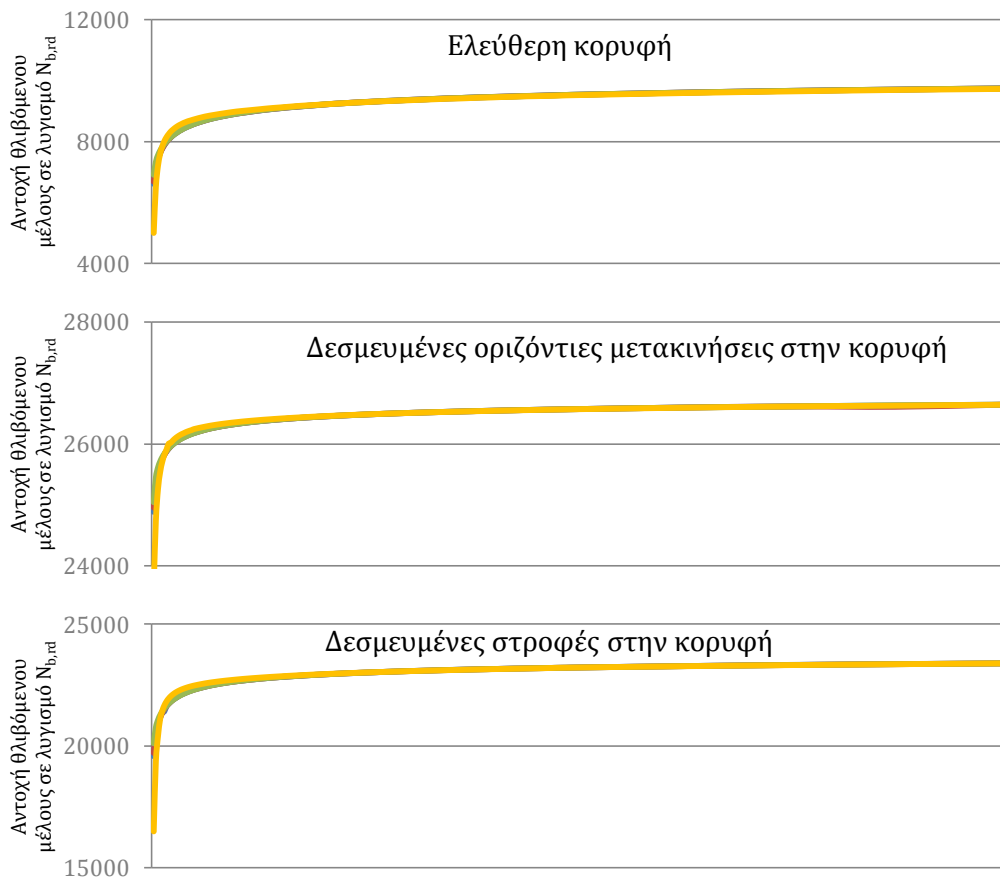
Συγκεντρωτικά η μεταβολή του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού ανάλογα με την παράμετρο που μεταβάλλεται σε κάθε ανάλυση παρουσιάζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν:

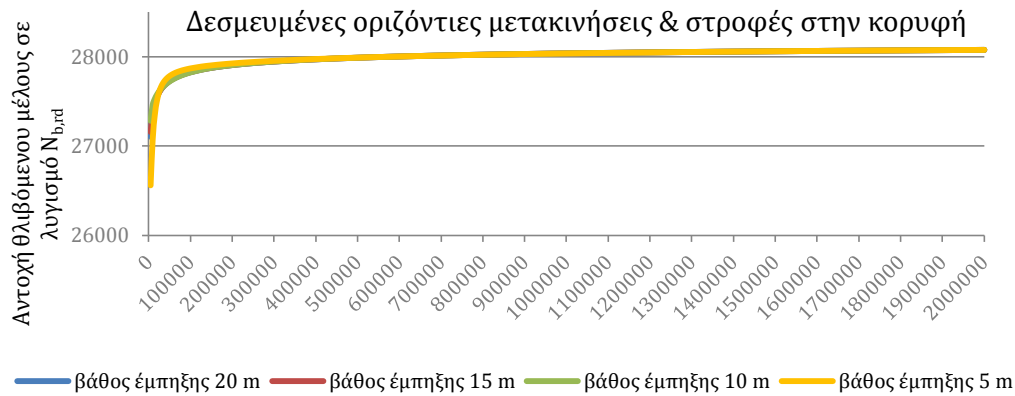




Διάγραμμα 1: Μεταβολή συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού συναρτήσει βάθους έμπτυξης & σταθεράς ελατηρίων, για όλες τις συνθήκες δέσμευσης στην κορυφή του πασσάλου

Αντίστοιχα, η αντοχή σε λυγισμό των μελών μεταβάλλεται ως εξής:





Διάγραμμα 2: Μεταβολή αντοχής πασσάλου σε λυγισμό συναρτήσει βάθους έμπηξης & σταθεράς ελατηρίων, για όλες τις συνθήκες δέσμευσης στην κορυφή του πασσάλου

Επιρροή παραμέτρων

i. Σταθερά ελατηρίων

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η σταθερά των ελατηρίων, τόσο αυξάνεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, ενώ μειώνεται το κρίσιμο μήκος λυγισμού και κατ' επέκταση ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού.

Θεωρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές, η παρατήρηση αυτή μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενη καθώς για μικρότερη δυσκαμψία ελατηρίων, η στήριξη είναι «ενδοτικότερη», άρα απαιτείται μικρότερο φορτίο για την αντίστοιχη μορφή λυγισμού. Το φορτίο αυτό έχει ως άνω όριο το αντίστοιχο που υπολογίστηκε για τον πρόβολο στον Πίνακα 23 και δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να το υπερβεί.

Όπως γίνεται εμφανές στα παραπάνω διαγράμματα, οι τιμές τείνουν ασυμπτωτικά σε λίγο μεγαλύτερη τιμή από το συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού του προβόλου. Ωστόσο, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με πολύ μεγαλύτερες τιμές ελατηρίων και η τιμή αυτή μειώνεται και τείνει με μεγάλη ακρίβεια στις τιμές που παίρνουμε από τον Πίνακα 23 για συνθήκες πλήρους πάκτωσης. Ωστόσο οι τιμές αυτές δεν αντιπροσωπεύουν συνήθη δεδομένα εδάφους και δεν συμπεριλαμβάνονται στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Παρόμοιες είναι και οι παρατηρήσεις για την αντοχή του μέλους σε λυγισμό.

ii. Συνθήκες στήριξης στην κορυφή του πασσάλου

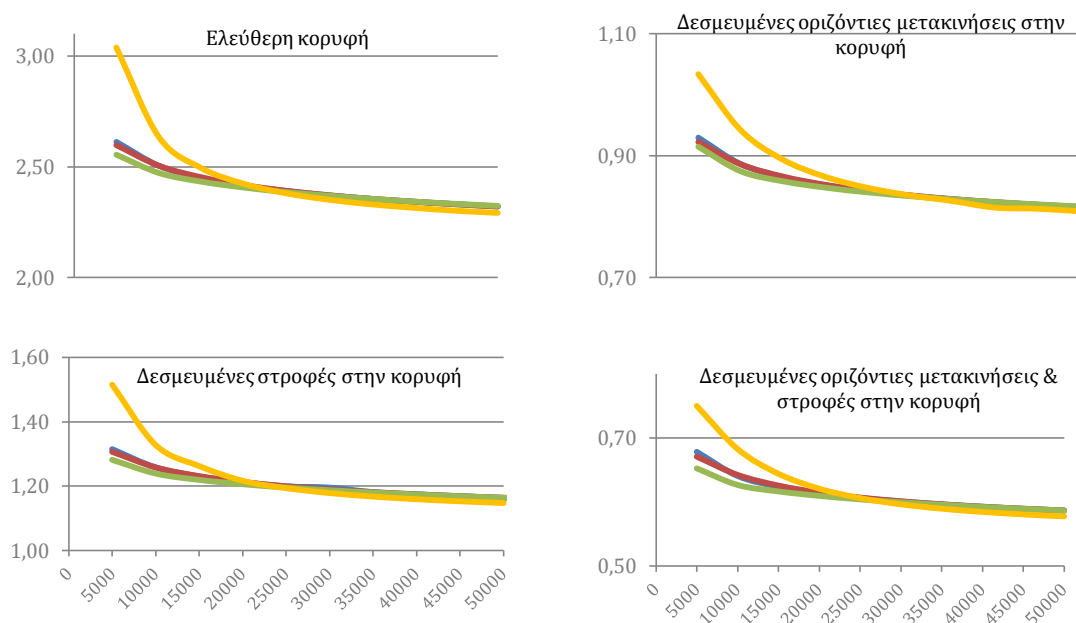
Η σημασία τους είναι σαφώς καθοριστική για τον υπολογισμό του κρίσιμου μήκους λυγισμού, όπως άλλωστε συμβαίνει και στην περίπτωση του προβόλου. Όσο περισσότερο περιορίζονται οι μετακινήσεις της κορυφής, τόσο μικρότερος είναι και ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού και τόσο μεγαλύτερη η αντοχή του πασσάλου σε λυγισμό. Ως όρια τίθενται οι τιμές του Πίνακα 23.

iii. Βάθος έμπηξης

Παρατηρώντας τον Πίνακα 25, εστιάζουμε στο γεγονός ότι για λόγους ελεύθερου μήκους πασσάλου προς βάθος έμπηξης από 1 έως 0,5 δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη μεταβολή

στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού και κατ' επέκταση στο ισοδύναμο μήκος λυγισμού και στο συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού. Αν, ωστόσο, μειώσουμε ακόμη περισσότερο το βάθος έμπτυξης των πασσάλων σε λόγο περί το $1/3$ και $1/4$ τότε εμφανίζονται σημαντικές αυξήσεις στο συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού. Μάλιστα, τέτοιοι λόγοι μηκών χρησιμοποιούνται κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή τέτοιων έργων, οπότε έχουν ιδιαίτερη σημασία οι αποκλίσεις που εμφανίζονται.

Πιο συγκεκριμένα, οι σημαντικότερες μεταβολές παρατηρούνται για μικρές τιμές της σταθεράς των ελατηρίων, οπότε παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται το βάθος έμπτυξης, τόσο μειώνεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, ενώ αυξάνεται το κρίσιμο μήκος λυγισμού και κατ' επέκταση ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού, όπως φαίνεται και στα αρχικά τμήματα των διαγραμμάτων του Διαγράμματος 3 που ακολουθούν.



Διάγραμμα 3: Επιρροή βάθους έμπτυξης για μικρές τιμές σταθεράς ελατηρίων στο συντελεστή β

Οι ιδιομορφές που προέκυψαν ανάλογα με το βάθος έμπτυξης και τις συνθήκες στήριξης στην κορυφή για χαρακτηριστικές τιμές σταθεράς ελατηρίων παρουσιάζονται στους Πίνακες 34- 51.

5.4.2. 2^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμπτυξης- Συνθήκες δέσμευσης στην κορυφή του πασσάλου- Εδαφικά προφίλ

Παράμετροι:

- i. Βάθος έμπτυξης:
 - a. 20 m
 - b. 15 m
 - c. 10 m
 - d. 5 m

- ii. Κορυφή:
 - a. ελεύθερη
 - b. δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις

- c. δεσμευμένες στροφές
- d. δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις & στροφές

iii. Σταθερά ελατηρίων: 2 εδαφικά προφίλ

Σε δεύτερη φάση ελέγχονται οι αντίστοιχες παράμετροι για πραγματικά εδαφικά δεδομένα. Τα εδαφικά προφίλ που χρησιμοποιούμε έχουν προκύψει από τις γεωτεχνικές μελέτες του φορέα της Azzawiya και έχουν αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

Φορέας 1: Μεμονωμένος πάσσαλος					
Βάθος έμπηξης	Συνθήκες στήριξης στην κορυφή	Εδαφικό Προφίλ	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού
20 m	Χωρίς στήριξη	A	8943	49,94	2,50
		B	8869	50,15	2,51
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις	A	71760	17,63	0,88
		B	71230	17,70	0,88
	Δεσμευμένες στροφές	A	35865	24,94	1,25
		B	35305	25,14	1,26
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις & στροφές	A	139920	12,63	0,63
		B	138380	12,70	0,63
15 m	Χωρίς στήριξη	A	8943	49,94	2,50
		B	8870	50,15	2,51
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις	A	71760	17,63	0,88
		B	71240	17,70	0,88
	Δεσμευμένες στροφές	A	35615	25,03	1,25
		B	35305	25,14	1,26
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις & στροφές	A	139920	12,63	0,63
		B	138400	12,70	0,63
10 m	Χωρίς στήριξη	A	8931	49,98	2,50
		B	8914	50,02	2,50
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις	A	71740	17,63	0,88
		B	71640	17,65	0,88
	Δεσμευμένες στροφές	A	35560	25,05	1,25
		B	35490	25,07	1,25
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις & στροφές	A	139660	12,64	0,63
		B	139280	12,66	0,63
5 m	Χωρίς στήριξη	A	7685	53,88	2,69
		B	7685	53,88	2,69
	Δεσμευμένες οριζόντιες	A	61620	19,03	0,95

	μετακινήσεις	B	61620	19,03	0,95
	Δεσμευμένες στροφές	A	30440	27,07	1,35
		B	30440	27,07	1,35
	Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις & στροφές	A	117840	13,76	0,69
		B	117840	13,76	0,69

Πίνακας 28: Αποτελέσματα Adina για εδαφικά προφίλ Azzawiya για μεμονωμένο πάσσαλο

Παρατηρήσεις

- i. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι ανάμεσα στις αναλύσεις για διαφορετικά βάθη έμπηξης του πασσάλου οι τιμές του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού δε μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου
- ii. Αν θελήσουμε να αντιστοιχίσουμε τις τιμές του β που προέκυψαν από τα εδαφικά προφίλ με τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για ενιαίες τιμές σταθεράς ελατηρίων σε όλο το μήκος των πασσάλων, θα παρατηρήσουμε ότι επηρεάζονται σχεδόν αποκλειστικά από την τιμή της σταθεράς που επικρατεί σε πολύ μικρό βάθος. Με απλά λόγια, φαίνεται ο συντελεστής να επηρεάζεται μόνο από τα επιφανειακά εδαφικά στρώματα και να μην έχει καμία επίδραση το βάθος έμπηξης και οι σταθερές των ελατηρίων στα μεγαλύτερα βάθη. Αυτός είναι και ο λόγος που προκύπτουν μεγάλα μήκη λυγισμού και συντελεστές ισοδύναμου μήκους λυγισμού.
- iii. Τέλος, παρατηρούμε ότι μεταξύ των δύο εδαφικών προφίλ δεν παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές. Αυτή η παρατήρηση ενισχύει τη διαπίστωση ότι η συμπεριφορά του πασσάλου επηρεάζεται από τα επιφανειακά εδαφικά στρώματα, όπου και τα δύο προφίλ- σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3, Πίνακες 12- 14- ταυτίζονται.

Οι ιδιομορφές που προέκυψαν από τις αναλύσεις για τα διάφορα βάθη έμπηξης και συνθήκες στήριξης παρουσιάζονται στους Πίνακες 34- 51.

5.5. Συμπεράσματα

Είναι σαφές ότι τα αποτελέσματα των αναλύσεων κινήθηκαν σε λογικά πλαίσια. Μάλιστα, στις πλείστες των περιπτώσεων ταυτίζονται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλυτικές σχέσεις που ισχύουν για τον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου και του ισοδύναμου συντελεστή λυγισμού.

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι όσο αυξάνονται οι τιμές της σταθεράς των ελατηρίων, τόσο μειώνεται το κρίσιμο φορτίο και μήκος λυγισμού και οι συντελεστές που προκύπτουν προσεγγίζουν τα αποτελέσματα για συνθήκες πλήρους πάκτωσης. Αντίστοιχα, αυξάνεται η αντοχή του πασσάλου σε λυγισμό.

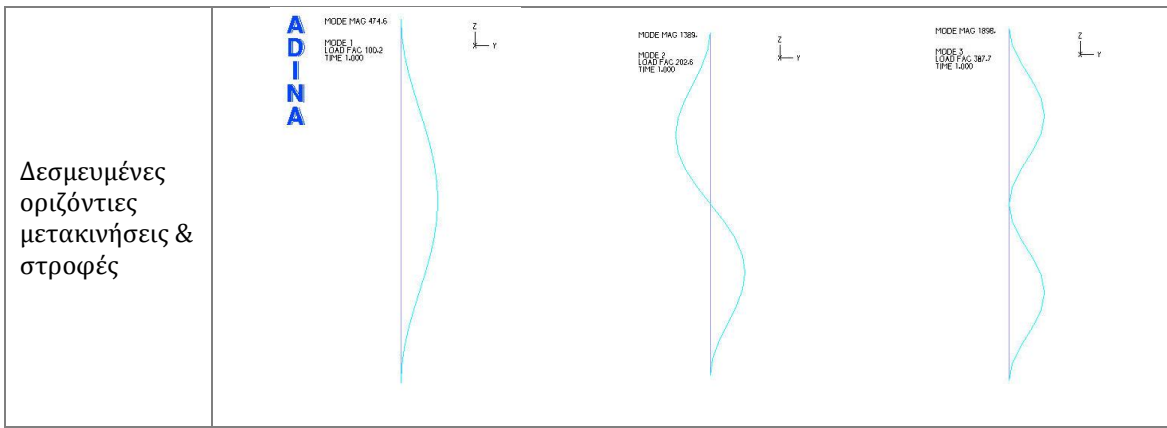
Οι συνθήκες δέσμευσης της κορυφής του πασσάλου, δηλαδή ο τρόπος σύνδεσης με την ανωδομή, διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στο ισοδύναμο μήκος λυγισμού.

Και τέλος, το βάθος έμπηξης, επηρεάζει τον υπολογισμό του ισοδύναμου μήκους λυγισμού του πασσάλου. Πρέπει, βέβαια, να επισημάνουμε ότι το βάθος αυτό καθορίζεται σημαντικά από τη φέρουσα ικανότητα αιχμής του πασσάλου και όχι μόνο από τον έλεγχο ευστάθειας.

5.6. Ιδιομορφές

Ακολουθούν οι τρεις πρώτες ιδιομορφές για τις πλέον χαρακτηριστικές αναλύσεις του μεμονωμένου πασσάλου. Οι ιδιομορφές που προκύπτουν είναι οι αναμενόμενες για όλες τις συνθήκες δέσμευσης στην κορυφή του πασσάλου και συμφωνούν απόλυτα με τα αποτελέσματα των αναλυτικών λύσεων:

Πάκτωση			
Ιδιομορφές			
	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Πρόβολος			
Δεσμευμένες οριζόντιες μετακινήσεις			
Δεσμευμένες στροφές			



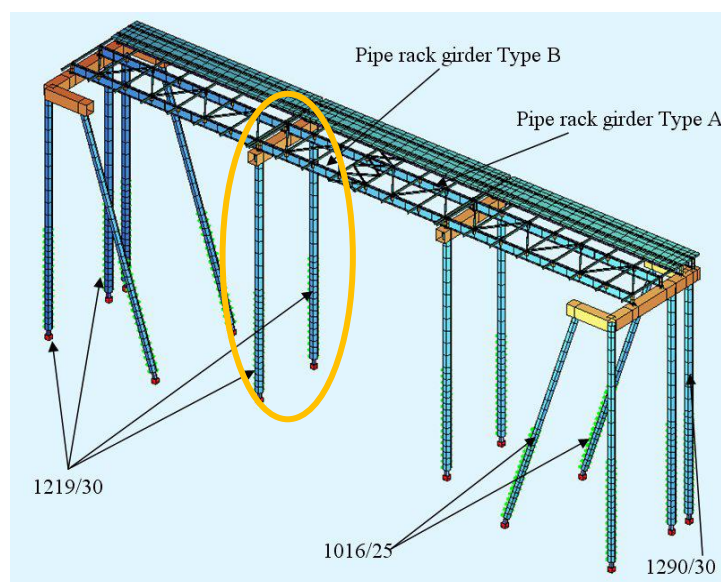
Πίνακας 29: Φορέας 1- πακτωμένος πρόβολος- μεταβαλλόμενες συνθήκες στην κορυφή

16. ΦΟΡΕΑΣ 2: Πλαίσιο αποτελούμενο από δύο κατακόρυφους πασσάλους

Οι αναλύσεις συνεχίζονται με έναν εξίσου απλό πλαισιωτό φορέα, ο οποίος αποτελείται από δύο κατακόρυφους πασσάλους που συνδέονται στην κορυφή με κεφαλόδεσμο από σκυρόδεμα. Και σε αυτό το στάδιο έχουμε τη δυνατότητα να ελέγξουμε τη ορθότητα των αποτελεσμάτων του προγράμματος συγκρίνοντας τα με τις αναλυτικές λύσεις.

16.1. Προσομοίωμα

Η διατομή των πασσάλων που χρησιμοποιούνται είναι κοίλη κυκλική διαμέτρου 1 m και πάχους ελάσματος 30 mm. Ο κεφαλόδεσμος είναι ορθογωνικής διατομής από σκυρόδεμα διαστάσεων 1,5x 1,5 m. Οι πάσσαλοι έχουν μήκος 20 m και ο κεφαλόδεσμος 6m.



Εικόνα 65: Παράδειγμα πλαισιωτού φορέα στην Azzawiya

16.2. Πορεία ανάλυσης

Σε πρώτη φάση ελέγχεται η συμπεριφορά του πλαισίου αν οι πάσσαλοι θεωρηθούν πακτωμένοι στο έδαφος. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται αφενός η ορθότητα των αποτελεσμάτων του προγράμματος, αφετέρου τίθεται ένα όριο στις τιμές του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού που θα υπολογιστεί κατά τις παραμετρικές αναλύσεις.

Μία πρώτη εκτίμηση του ισοδύναμου μήκους λυγισμού και του αντίστοιχου συντελεστή γίνεται στον Πίνακα 52. Από τον ίδιο Πίνακα παίρνουμε το αναμενόμενο ισοδύναμο μήκος λυγισμού και υπολογίζουμε το κρίσιμο φορτίο λυγισμού σύμφωνα με τις Εξισώσεις 19. Το φορτίο που επιβάλλουμε σε κάθε ανάλυση ισούται περίπου με το 1/100 του φορτίου λυγισμού.

Πραγματοποιούμε γραμμικές αναλύσεις λυγισμού (linearized buckling analysis method), επιλέγουμε classical analysis method και Lanczos method of generating starting vectors. Από τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από το πρόγραμμα, γνωρίζουμε το κρίσιμο φορτίο λυγισμού και στη συνέχεια υπολογίζουμε το συντελεστή ισοδύναμου μήκους β.

16.3. Αναλυτικές λύσεις

Για να υπολογίσουμε αναλυτικά το ισοδύναμο μήκος λυγισμού των πασσάλων χρησιμοποιούμε τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τον Wood R. Η και περιγράφηκε αναλυτικά στην Παράγραφο 4.3. Προσαρμόζουμε, λοιπόν, τις Εξισώσεις 20 στην περίπτωση του πλαισίου που φαίνεται στο Σχήμα 66. Στην περίπτωσή μας, οι συντελεστές δυσκαμψίας $K_1 = K_{11} = 0$, ενώ οι συντελεστές $K_2 = K_{21} = K_{22} \rightarrow \infty$

Σύμφωνα με τις Εξισώσεις 20 και την Εικόνα 61 ισχύουν τα εξής:

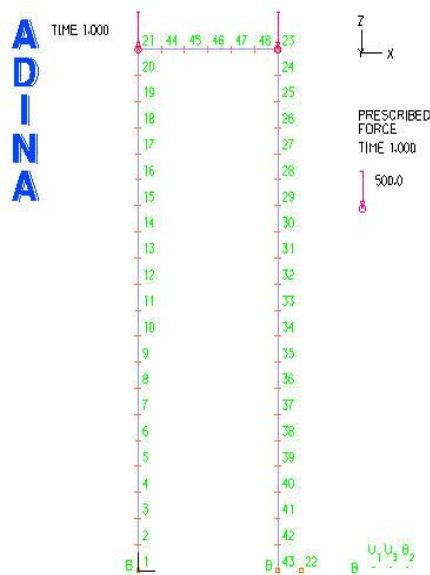
Φορέας 2: Πλαίσιο αποτελούμενο από κατακόρυφους πασσάλους & κεφαλόδεσμο				
Συνθήκες στήριξης στη βάση	n_1	n_2	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους β από Εικόνα 61	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 EI}{(\beta L)^2}$
Πάκτωση	0,0076	0	1,01	54667,33 kN

Πίνακας 52: Αναλυτικές λύσεις για τον υπολογισμό του P_{cr}

Από τις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν αναμένουμε για τις παραπάνω συνθήκες στήριξης τα αποτελέσματα αν είναι δυνατόν να ταυτίζονται.

16.4. Adina

Το προσομοίωμα που διαμορφώνεται στο Adina για το πακτωμένο πλαίσιο είναι της μορφής:



Εικόνα 66: Προσομοίωμα πακτωμένου πλαισίου στο Adina

Οι ιδιομορφές που προκύπτουν από τις αναλύσεις για κάθε περίπτωση στήριξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 56.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τον πακτωμένο φορέα είναι τα εξής:

Φορέας 2: Πλαίσιο αποτελούμενο από κατακόρυφους πασσάλους & κεφαλόδεσμο			
Συνθήκες στήριξης στη βάση	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού
Πάκτωση	52800	20,55	1,03

Πίνακας 53: Αποτελέσματα Adina για πλαίσιο

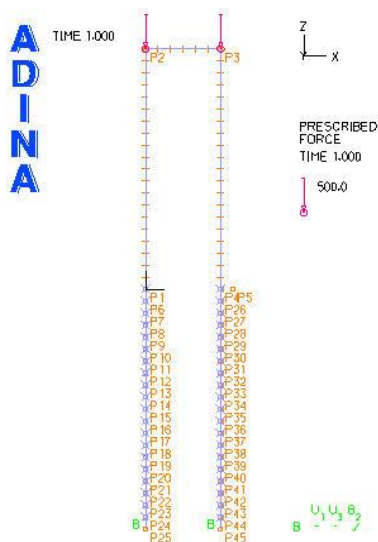
Τα αποτελέσματα είναι ακριβώς τις αναμένονταν και ταυτίζονται με τις αναλυτικές λύσεις που υπολογίστηκαν στον Πίνακα 52. Εφόσον, λοιπόν, βεβαιώνουμε ότι το προσομοίωμα είναι σωστό συνεχίζουμε με τις παραμετρικές αναλύσεις. Αντικαθιστούμε την πάκτωση με μία σειρά ελατηρίων που αντιπροσωπεύουν το εδαφικό προφίλ.

16.4.1. 3^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμπηξης-Σταθερά ελατηρίων

Παράμετροι:

- i. Βάθος έμπηξης:
 - a. 20 m
 - b. 15 m
 - c. 10 m
 - d. 5 m
- ii. Κορυφή:
 - a. Κεφαλόδεσμος
- iii. Σταθερά ελατηρίων: κυμαίνεται μεταξύ $5 \cdot 10^3$ kN/m έως $2000 \cdot 10^3$ kN/m

Το προσομοίωμα που διαμορφώνεται είναι το εξής:



Εικόνα 67: Προσομοίωμα πλαισίου στο Adina

Ανάλογα με τις σταθερές των ελατηρίων, δηλαδή την ενδοτικότητα της στήριξης στη βάση και το βάθος έμπηξης προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για το συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού:

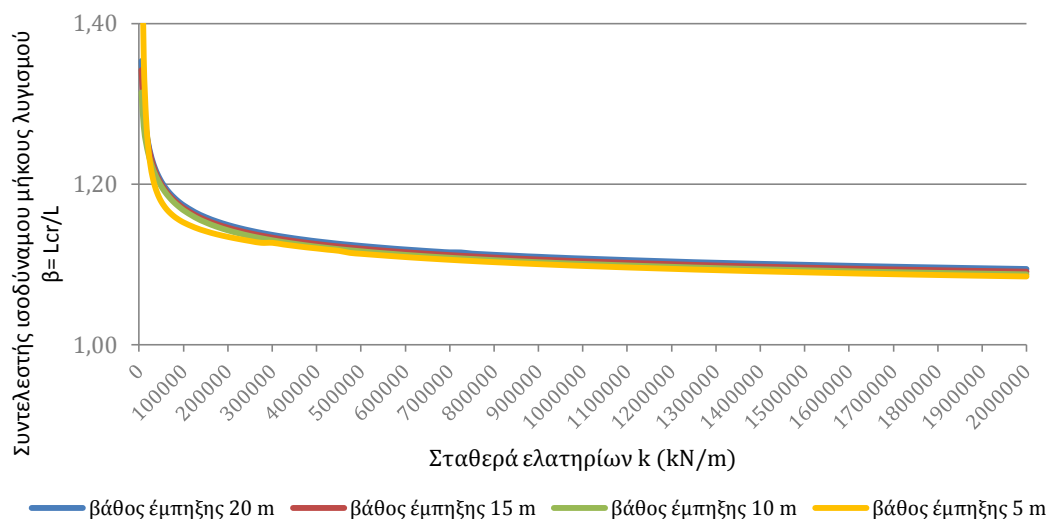
Φορέας 2: Πλαίσιο αποτελούμενο από κατακόρυφους πασσάλους & κεφαλόδεσμο			
Βάθος έμπηξης	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού
20 m	30465 έως 46560	27,06 έως 21,89	1,35 έως 1,09
15 m	30960 έως 46830	26,84 έως 21,82	1,34 έως 1,09
10 m	32295 έως 47110	26,28 έως 21,76	1,31 έως 1,09
5 m	23370 έως 47380	30,89 έως 21,70	1,54 έως 1,08

Πίνακας 54: Αποτελέσματα Adina για μεταβαλλόμενη σταθερά ελατηρίων

Γενικές Παρατηρήσεις

- Τα αποτελέσματα, όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάζονται σε διαστήματα και αντιστοιχούν στις μεταβαλλόμενες τιμές της σταθεράς των ελατηρίων
- Και σε αυτήν την περίπτωση επιβάλλεται φορτίο ίσο περίπου με το 1/100 του κρίσιμου φορτίου λυγισμού που είχε υπολογιστεί για τον πακτωμένο φορέα. Σε ορισμένες περιπτώσεις μειώνεται για λόγους διευκόλυνσης των αναλύσεων του προγράμματος
- Το ισοδύναμο μήκος λυγισμού υπολογίζεται με βάση την εξίσωση $L_{cr} = \pi \sqrt{\frac{EI}{P_{cr}}}$ και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού προκύπτει για κάθε πάσσαλο πολλαπλασιάζοντας το φορτίο που ασκείται στην κορυφή του επί το load factor που προκύπτει από το πρόγραμμα
- Ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού υπολογίζεται από τη σχέση: $L_{cr} = \beta L$ και μειώνεται όσο αυξάνεται η σταθερά των ελατηρίων, έχοντας ως άνω όριο την τιμή που έχει υπολογιστεί για τον πακτωμένο φορέα στον Πίνακα 52

Συγκεντρωτικά η μεταβολή του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού συναρτήσει της δυσκαμψίας των ελατηρίων παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 8: Μεταβολή συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού

Επιρροή παραμέτρων

Η επιρροή των παραμέτρων είναι η ίδια με αυτή που προέκυψε για το μεμονωμένο πάσσαλο. Και σε αυτές τις αναλύσεις είναι εμφανή και αναμενόμενα τα αποτελέσματα από τη μεταβολή κάθε παραμέτρου.

i. Σταθερά ελατηρίων

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η σταθερά των ελατηρίων τόσο αυξάνεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, ενώ μειώνεται το κρίσιμο μήκος λυγισμού και κατ' επέκταση ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού.

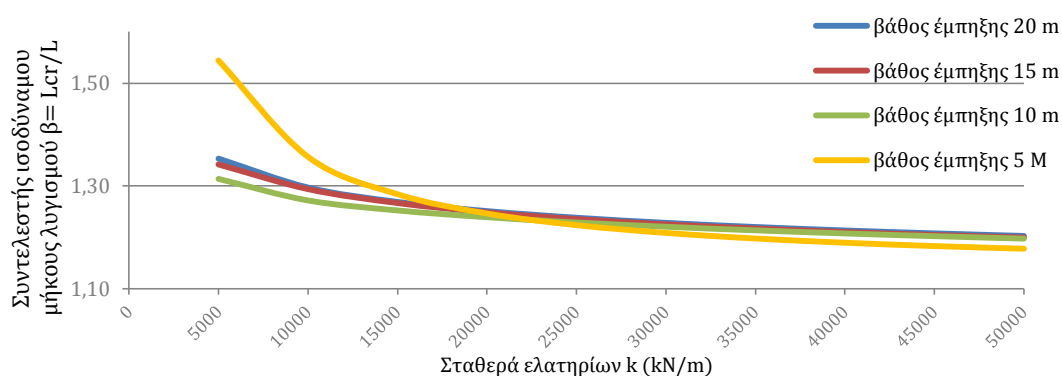
Θεωρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές, η παρατήρηση αυτή μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενη καθώς για μικρότερη δυσκαμψία ελατηρίων, η στήριξη είναι «ενδοτικότερη», άρα απαιτείται μικρότερο φορτίο για την αντίστοιχη μορφή λυγισμού. Το φορτίο αυτό έχει ως άνω όριο το αντίστοιχο που υπολογίστηκε για το πακτωμένο πλαίσιο στον Πίνακα 52 και δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να το υπερβεί.

Όπως γίνεται εμφανές στα παραπάνω διαγράμματα, οι τιμές τείνουν ασυμπτωτικά σε λίγο μεγαλύτερη τιμή από το συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού του πακτωμένου πλαισίου. Ωστόσο, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με πολύ μεγαλύτερες τιμές ελατηρίων και η τιμή αυτή μειώνεται και τείνει με μεγάλη ακρίβεια στις τιμές που παίρνουμε από τον Πίνακα 52 για συνθήκες πλήρους πάκτωσης. Ωστόσο οι τιμές αυτές δεν αντιπροσωπεύουν συνήθη δεδομένα εδάφους και δεν συμπεριλαμβάνονται στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

ii. Βάθος έμπτυξης

Όπως παρατηρήθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, σημαντικές μειώσεις του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού παρατηρούνται για μικρό λόγο ελεύθερου μήκους πασσάλου προς βάθος έμπτυξης.

Πιο συγκεκριμένα, οι σημαντικότερες μεταβολές εμφανίζονται για μικρές τιμές της σταθεράς των ελατηρίων, οπότε παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται το βάθος έμπτυξης, τόσο μειώνεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, ενώ αυξάνεται το κρίσιμο μήκος λυγισμού και κατ' επέκταση ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού, όπως φαίνεται και στο αρχικό τμήμα των διαγραμμάτων του Διαγράμματος 19 που ακολουθεί:



Διάγραμμα 9: Επιρροή βάθους έμπτυξης για μικρές τιμές σταθεράς ελατηρίων

Οι ιδιομορφές που προέκυψαν ανάλογα με το βάθος έμπτυξης για χαρακτηριστικές τιμές σταθεράς ελατηρίων παρουσιάζονται στους Πίνακες 57- 60.

16.4.2. 4^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμπτυξης-Εδαφικά προφίλ

Παράμετροι:

- i. Βάθος έμπτυξης:
 - a. 20 m
 - b. 15 m
 - c. 10 m
 - d. 5 m

- ii. Κορυφή:
 - a. Κεφαλόδεσμος

- iii. Σταθερά ελατηρίων: 2 εδαφικά προφίλ

Σε αυτό το στάδιο ελέγχονται οι αντίστοιχες παράμετροι για πραγματικά εδαφικά δεδομένα. Τα εδαφικά προφίλ που χρησιμοποιούμε έχουν προκύψει από τις γεωτεχνικές μελέτες του φορέα της Azzawiya.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατά μήκος της κατασκευής λόγω της μεταβαλλόμενης μορφολογίας του εδάφους, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 33, διαμορφώνονται δύο εδαφικά προφίλ. Οι σταθερές των ελατηρίων για κάθε ένα από αυτά παρουσιάζονται στους Πίνακες 12- 14.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις είναι τα εξής:

Φορέας 2: Πλαίσιο αποτελούμενο από κατακόρυφους πασσάλους & κεφαλόδεσμο				
Βάθος έμπτυξης	Εδαφικό Προφίλ	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού
20 m	A	33330	25,87	1,29
	B	33210	25,92	1,30
15 m	A	33510	25,80	1,29
	B	33360	25,86	1,29
10 m	A	33750	25,71	1,29
	B	33690	25,73	1,29
5 m	A	29160	27,66	1,38
	B	29160	27,66	1,38

Πίνακας 55: Αποτελέσματα Adina για τα 2 εδαφικά προφίλ

Παρατηρήσεις

- i. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι ανάμεσα στις αναλύσεις για διαφορετικά βάθη έμπτυξης του πασσάλου οι τιμές του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού δε μεταβάλλονται σχεδόν καθόλου
- ii. Αν θελήσουμε να αντιστοιχίσουμε τις τιμές του β που προέκυψαν από τα εδαφικά προφίλ με τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για ενιαίες τιμές σταθεράς ελατηρίων σε όλο το μήκος των πασσάλων, θα παρατηρήσουμε ότι επηρεάζονται

σχεδόν αποκλειστικά από την τιμή της σταθεράς που επικρατεί σε πολύ μικρό βάθος. Με απλά λόγια, φαίνεται ο συντελεστής να επηρεάζεται μόνο από τα επιφανειακά εδαφικά στρώματα και να μην έχει καμία επίδραση το βάθος έμπηξης και οι σταθερές των ελατηρίων στα μεγαλύτερα βάθη. Αυτός είναι και ο λόγος που προκύπτουν τόσο μεγάλα μήκη λυγισμού και συντελεστές ισοδύναμου μήκους λυγισμού.

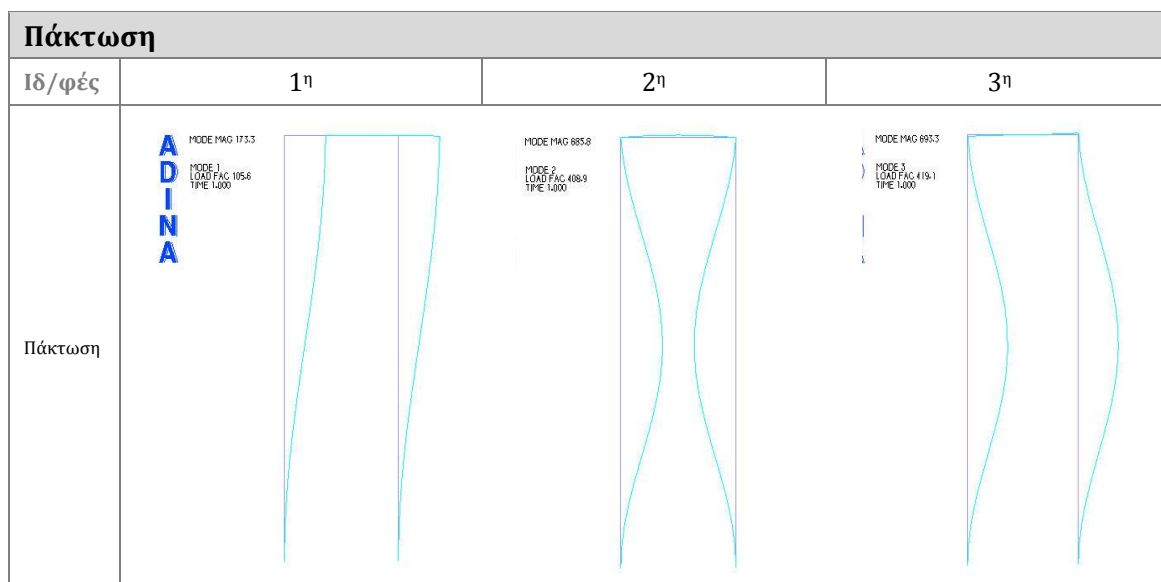
Οι ιδιομορφές για τα διάφορα βάθη έμπηξης και συνθήκες στήριξης παρουσιάζονται στους Πίνακες 61- 62.

16.5. Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας τις αναλύσεις συμπεραίνουμε ότι η τοποθέτηση κεφαλόδεσμου που συνδέει τους δύο πασσάλους ουσιαστικά περιορίζει τις στροφές και επιτρέπει μόνο μετακινήσεις. Αυτό είναι εμφανές αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του Πίνακα 52 με τον Πίνακα 19. Η επιρροή των διαφόρων παραμέτρων περιγράφηκε παραπάνω (παρ. 6.4.1) και ήταν η αναμενόμενη. Τέλος, η συμπεριφορά του πλαισίου για τα δύο εδαφικά προφίλ είναι σχεδόν όμοια, επιβεβαιώνοντας για μία ακόμη φορά το ρόλο που διαδραματίζουν τα επιφανειακά εδαφικά στρώματα στην απόκριση του φορέα.

16.6. Ιδιομορφές

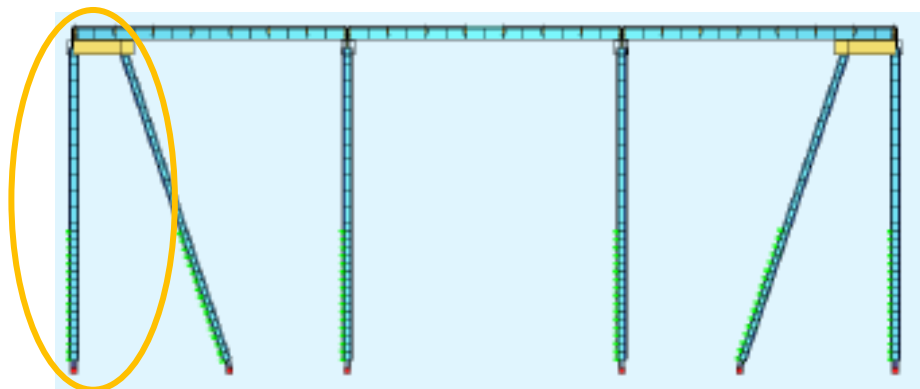
Ακολουθούν οι τρεις πρώτες ιδιομορφές που προκύπτουν από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα θεωρώντας το πλαίσιο πακτωμένο:



Πίνακας 56: Φορέας 2- πάκτωση στη βάση

17. ΦΟΡΕΑΣ 3: Πλαίσιο αποτελούμενο από έναν κατακόρυφο & έναν κεκλιμένο πάσσαλο

Σε πολλές περιπτώσεις προκειμένου να αυξηθεί η δυσκαμψία της κατασκευής και να μειωθούν οι μετακινήσεις εκτός από τους κατακόρυφους πασσάλους τοποθετούνται και κεκλιμένοι. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε και για το φορέα της Azzawiya, όπως φαίνεται και παρακάτω:



Εικόνα 68: Συνδυασμός κατακόρυφων & κεκλιμένων πασσάλων στο φορέα της Azzawiya

17.1. Προσομοίωμα

Η διατομή των πασσάλων που χρησιμοποιούνται είναι κοίλη κυκλική διαμέτρου 1 m και πάχους ελάσματος 30 mm. Ο κεφαλόδεσμος είναι ορθογωνικής διατομής από σκυρόδεμα διαστάσεων 1,5x 1,5 m. Οι πάσσαλοι έχουν μήκος 20 m και ο κεφαλόδεσμος 6m. Η γωνία κλίσης για τις παραμετρικές αναλύσεις είναι 70°.

17.2. Πορεία ανάλυσης

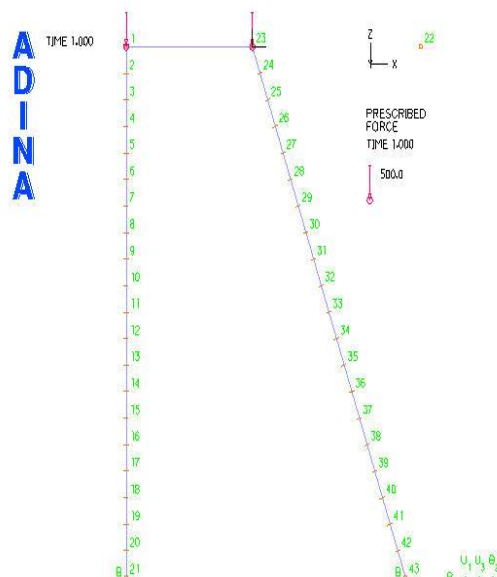
Όπως και τις προηγούμενες περιπτώσεις, ο πρώτος έλεγχος γίνεται θεωρώντας το πλαίσιο πακτωμένο. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε τη δυνατότητα να θέσουμε ένα όριο τις τιμές του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού που θα υπολογιστεί κατά τις παραμετρικές αναλύσεις.

Όσο πιο σύνθετος γίνεται ο φορέας, δεν υπάρχει πλέον η δυνατότητα να υπολογιστούν αναλυτικά οι τιμές του κρίσιμου φορτίου και μήκους λυγισμού.

Πραγματοποιούμε γραμμικές αναλύσεις λυγισμού (linearized buckling analysis method), επιλέγουμε classic analysis method και Lanczos method of generating starting vectors. Από τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από το πρόγραμμα, γνωρίζουμε το κρίσιμο φορτίο λυγισμού και στη συνέχεια υπολογίζουμε το συντελεστή ισοδύναμου μήκους β.

17.3. Adina

Το προσομοίωμα που διαμορφώνεται στο Adina είναι τις μορφής:



Εικόνα 69: Προσομοίωμα πακτωμένου πλαισίου στο Adina

Οι ιδιομορφές που προκύπτουν για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 66. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων είναι τα εξής:

Φορέας 3: Πλαίσιο αποτελούμενο από έναν κατακόρυφο & έναν κεκλιμένο πάσσαλο				
Συνθήκες στήριξης στη βάση	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού	
Πάκτωση	92600	15,52	0,78	Κατακόρυφος
			0,73	Κεκλιμένος

Πίνακας 63: Αποτελέσματα Adina για πακτωμένο πλαίσιο

Παρατηρήσεις

- i. Χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν συγκρίνοντας τον παραπάνω Πίνακα με τον Πίνακα 53. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού του πλαισίου με τον κεκλιμένο πάσσαλο ($\beta=0,73$) μειώνεται σημαντικά σε σύγκριση με το πλαίσιο που αποτελείται από δύο κατακόρυφους πασσάλους ($\beta=1,03$), έχοντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές.
- ii. Η τιμή που προκύπτει προσεγγίζει αρκετά την περίπτωση του Πίνακα 19 ($\beta=0,7$) οπότε και θεωρείται ότι περιορίζονται οι μετακινήσεις. Δηλαδή παρατηρούμε ότι όντως ο κεκλιμένος πάσσαλος ικανοποιεί την απαίτηση περιορισμού των μετακινήσεων, για την οποία και τοποθετείται

Αντικαθιστούμε την πάκτωση με μία σειρά ελατηρίων που αντιπροσωπεύουν το εδαφικό προφίλ. Σε αυτήν την περίπτωση δε γίνονται παραμετρικές αναλύσεις για όλες τις τιμές των ελατηρίων, αλλά επιλέγεται να ελεγχθεί πώς λειτουργεί ο φορέας θεωρώντας τα πραγματικά εδαφικά στοιχεία της περιοχής και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα για το πλαίσιο με τους κάθετους πασσάλους. Συνεχίζουμε, ωστόσο, να μελετάμε την επιρροή του βάθους έμπτυξης στα αποτελέσματα.

17.3.1. 5^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμψηξης-Εδαφικά προφίλ

Παράμετροι:

- i. Βάθος έμψηξης:
 - a. 20 m
 - b. 15 m
 - c. 10 m
 - d. 5 m
- ii. Κορυφή:
 - a. Κεφαλόδεσμος
- iii. Σταθερά ελατηρίων: 2 εδαφικά προφίλ

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις είναι τα εξής:

Φορέας 3: Πλαίσιο αποτελούμενο από έναν κατακόρυφο & έναν κεκλιμένο πάσσαλο					
Βάθος έμψηξης	Εδαφικό Προφίλ	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού	
20 m	A	62400	18,91	0,95	Κατακόρυφος
				0,89	Κεκλιμένος
	B	61800	19,00	0,95	Κατακόρυφος
				0,89	Κεκλιμένος
15 m	A	62450	18,90	0,94	Κατακόρυφος
				0,89	Κεκλιμένος
	B	61800	19,00	0,95	Κατακόρυφος
				0,89	Κεκλιμένος
10 m	A	62850	18,84	0,94	Κατακόρυφος
				0,89	Κεκλιμένος
	B	62850	18,84	0,94	Κατακόρυφος
				0,89	Κεκλιμένος
5 m	A	65250	18,49	0,92	Κατακόρυφος
				0,87	Κεκλιμένος
	B	65250	18,49	0,92	Κατακόρυφος
				0,87	Κεκλιμένος

Πίνακας 64: Αποτελέσματα Adina για τα 2 εδαφικά προφίλ

Παρατηρήσεις

- i. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τον Πίνακα 55, παρατηρούμε σημαντική αύξηση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού και κατ' επέκταση μείωση του ισοδύναμου μήκους λυγισμού και του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού. Γίνεται εμφανής και σε αυτήν την περίπτωση η επιρροή του κεκλιμένου πασσάλου στη μείωση των μετακινήσεων.

- ii. Οι τιμές του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού σε σύγκριση με τον Πίνακα 66 είναι αρκετά αυξημένες, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές της σταθεράς των ελατηρίων για μικρά βάθη είναι πολύ μικρές. Επομένως, οι συνθήκες έδρασης απέχουν πολύ από την πάκτωση, γεγονός που δικαιολογεί τη διαφορά των τιμών του συντελεστή ανάμεσα στους δύο Πίνακες.
- iii. Τέλος, για ακόμη μία φορά παρατηρούμε ότι το βάθος έμπηξης επηρεάζει το συντελεστή για μικρούς λόγους ελεύθερου μήκους πασσάλου προς βάθος έμπηξης.

Οι ιδιομορφές για τα διάφορα βάθη έμπηξης και συνθήκες στήριξης παρουσιάζονται στους Πίνακες 67- 68.

17.3.2. 6^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Γωνία κλίσης

Παράμετροι:

- i. Κλίση πασσάλου:
 - a. 45°
 - b. 50°
 - c. 55°
 - d. 60°
 - e. 65°
 - f. 70°
 - g. 75°
 - h. 80°
 - i. 85°
 - j. 90°
- ii. Κορυφή:
 - a. Κεφαλόδεσμος
- iii. Πάκτωση στη βάση

Σε αυτή τη σειρά αναλύσεων ελέγχεται η επιρροή της γωνίας κλίσης του πασσάλου. Έχει ήδη, γίνει εμφανές ότι η τοποθέτηση κεκλιμένων πασσάλων επηρεάζει σημαντικά την απόκριση της κατασκευής, μειώνοντας τις μετακινήσεις, αυξάνοντας το κρίσιμο φορτίο λυγισμού και μειώνοντας το κρίσιμο μήκος λυγισμού και τον αντίστοιχο συντελεστή. Στην προκειμένη περίπτωση προκειμένου να ελεγχθεί μόνο η επιρροή της γωνίας τοποθέτησης, οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για πακτωμένο πλαίσιο.

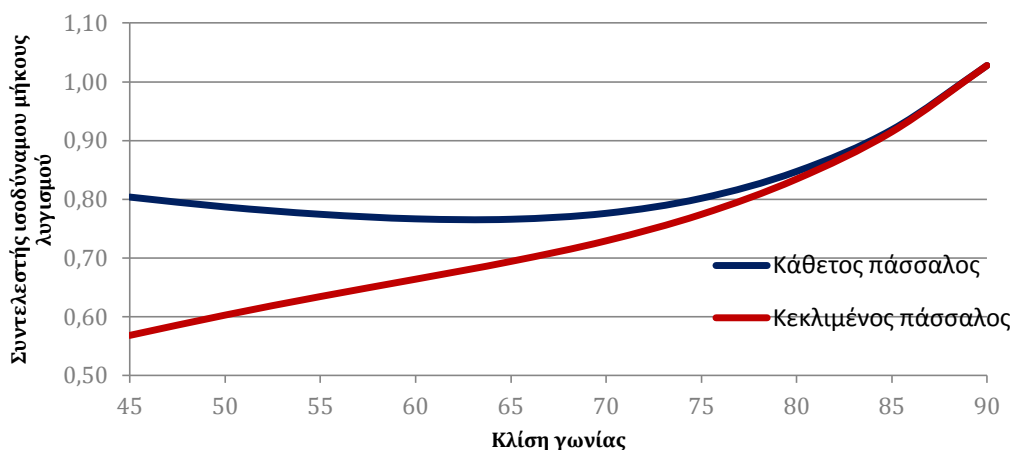
Αναλυτικά, οι τιμές του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού για κάθε γωνία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ οι ιδιομορφές που προκύπτουν για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 69.

Φορέας 3: Πλαίσιο αποτελούμενο από έναν κατακόρυφο & έναν κεκλιμένο πάσσαλο			
Γωνία κλίσης	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού
45°	86340	16,07	0,80
			0,57

50°	90060	15,74	0,79	Κάθετος
			0,60	Κεκλιμένος
55°	93000	15,49	0,77	Κάθετος
			0,63	Κεκλιμένος
60°	94890	15,33	0,77	Κάθετος
			0,66	Κεκλιμένος
65°	95070	15,32	0,77	Κάθετος
			0,69	Κεκλιμένος
70°	92610	15,52	0,78	Κάθετος
			0,73	Κεκλιμένος
75°	86805	16,03	0,80	Κάθετος
			0,77	Κεκλιμένος
80°	77700	16,94	0,85	Κάθετος
			0,83	Κεκλιμένος
85°	66150	18,36	0,92	Κάθετος
			0,91	Κεκλιμένος
90°	52800	20,55	1,03	Κάθετος

Πίνακας 65: Αποτελέσματα Adina για μεταβαλλόμενη γωνία κλίσης

Συγκεντρωτικά, η μεταβολή του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας κλίσης παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 11: Μεταβολή συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού συναρτήσει της γωνίας κλίσης του κεκλιμένου πασσάλου

Παρατηρήσεις

- i. Για τον κατακόρυφο πάσσαλο, παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,77 έως 1,03. Η ελάχιστη τιμή προκύπτει για γωνία κλίσης 65°. Για την τιμή αυτή λαμβάνουμε το μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο και το ελάχιστο μήκος λυγισμού.
- ii. Για τον κεκλιμένο πάσσαλο, ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού λαμβάνει τιμές μεταξύ των 0,57 έως 1,03. Η ελάχιστη τιμή προκύπτει και για τη μικρότερη γωνία σε αυτήν την περίπτωση, δηλαδή για γωνία 45°.

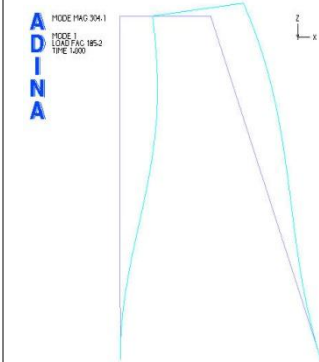
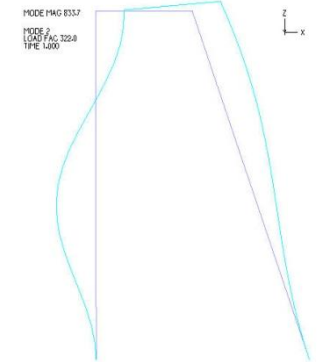
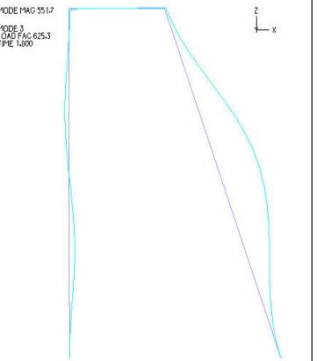
17.4. Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις του πλαισίου με τον κεκλιμένο πάσσαλο, με αυτά του προηγούμενου κεφαλαίου, του πλαισίου με τους δύο κατακόρυφους πασσάλους, γίνεται εμφανής ο περιορισμός των μετακινήσεων λόγω χρήσης του κεκλιμένου πασσάλου.

Σε επόμενο στάδιο, η γωνία κλίσης είναι αυτή που καθορίζει το βαθμό περιορισμού των μετακινήσεων. Η γωνία αυτή, ωστόσο, για κατασκευαστικούς λόγους δεν μπορεί να έχει πολύ μικρή κλίση. Επομένως, γωνίες της τάξης των 45-65° παρ' ότι δίνουν μεγάλα κρίσιμα φορτία λυγισμού και μικρά μήκη λυγισμού, δεν επιλέγονται για τον περιορισμό των μετακινήσεων. Συνήθως, η κλίση είναι της τάξης του 1:3 και 1:4, δηλαδή περίπου 70-75°. Παρατηρούμε ότι για αυτές τις τιμές τα αποτελέσματα του Πίνακα 65 είναι ικανοποιητικά.

17.5. Ιδιομορφές

Οι ιδιομορφές που προκύπτουν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για πακτωμένο πλαίσιο παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πάκτωση			
Ιδ/ φές	1 ^η	2 ^η	3 ^η
			

Πίνακας 66: Φορέας 3- πάκτωση

18. ΦΟΡΕΑΣ 4: Πλαίσιο αποτελούμενο από δύο κεκλιμένους πασσάλους

Συνεχίζουμε τη διερεύνηση της επιρροής των κεκλιμένων πασσάλων στη συμπεριφορά του φορέα, εξετάζοντας την περίπτωση του πλαισίου που στηρίζεται σε δύο κεκλιμένους πασσάλους.

18.1. Προσομοίωμα

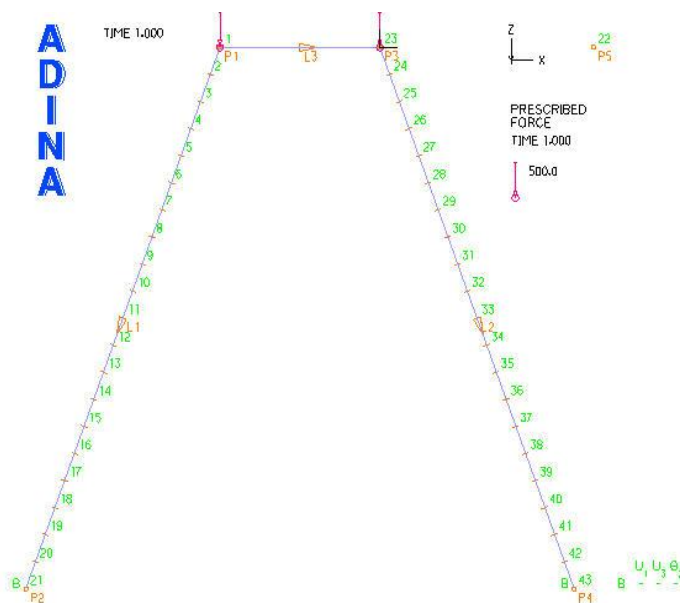
Χρησιμοποιείται ο ίδιος φορέας με τις προηγούμενες αναλύσεις. Η γωνία κλίσης των πασσάλων είναι 70° .

18.2. Πορεία ανάλυσης

Η πρώτη ανάλυση γίνεται θεωρώντας το πλαίσιο πακτωμένο, ενώ σε επόμενο στάδιο αντικαθίσταται η πάκτωση με μία σειρά ελατηρίων με σταθερές αυτές των δύο εδαφικών προφίλ που έχουν περιγραφεί σε προηγούμενες παραγράφους. Και σε αυτή τη σειρά αναλύσεων θεωρείται χρησιμότερο να μελετηθεί η συμπεριφορά για πραγματικά εδαφικά δεδομένα, οπότε και δεν πραγματοποιούνται αναλύσεις για όλες τις τιμές των ελατηρίων. Δεν υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστούν αναλυτικά οι κρίσιμες τιμές λυγισμού.

18.3. Adina

Το προσομοίωμα που διαμορφώνεται στο Adina είναι τις μορφής:



Εικόνα 70: Προσομοίωμα πακτωμένου πλαισίου στο Adina

Οι ιδιομορφές που προκύπτουν για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 73. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων είναι τα εξής:

Φορέας 4: Πλαίσιο αποτελούμενο από 2 κεκλιμένους πασσάλους			
Συνθήκες στήριξης στη βάση	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού
Πάκτωση	92700	15,51	0,73

Πίνακας 70: Αποτελέσματα Adina για πλαίσιο

Παρατηρήσεις

- i. Συγκρίνουμε τα παραπάνω αποτελέσματα με αυτά του Πίνακα 63. Παρατηρούμε ότι προκύπτει μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού, επομένως μικρότερο μήκος και κατ' επέκταση μικρότερος συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού. Το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογείται από την ύπαρξη και του δεύτερου κεκλιμένου πασσάλου ο οποίος περιορίζει ακόμη περισσότερο τις μετακινήσεις.

Αντικαθιστούμε την πάκτωση με μία σειρά ελατηρίων που αντιπροσωπεύουν τα εδαφικά προφίλ.

18.3.1. 7^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμψηξης-Εδαφικά προφίλ

Παράμετροι:

- i. Βάθος έμψηξης:
 - a. 20 m
 - b. 15 m
 - c. 10 m
 - d. 5 m
- ii. Κορυφή:
 - a. Κεφαλόδεσμος
- iii. Σταθερά ελατηρίων: 2 εδαφικά προφίλ

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις είναι τα εξής:

Φορέας 4: Πλαίσιο αποτελούμενο από δύο κεκλιμένους πασσάλους				
Βάθος έμψηξης	Εδαφικό Προφίλ	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού
20 m	A	61400	18,91	0,95
	B	60850	19,00	0,95
15 m	A	61400	18,90	0,94
	B	60850	19,00	0,95
10 m	A	61700	18,84	0,94
	B	61700	18,84	0,94
5 m	A	64100	21,28	0,88
	B	64100	21,28	0,88

Πίνακας 71: Αποτελέσματα Adina για κάθε εδαφικό προφίλ

Παρατηρήσεις

- i. Παρατηρούμε ότι δεν εμφανίζονται σημαντικές μεταβολές για διαφορετικά βάθη έμψηξης και διαφορετικά εδαφικά προφίλ

Οι ιδιομορφές για τα διάφορα βάθη έμψηξης και συνθήκες στήριξης παρουσιάζονται στους Πίνακες 74- 75.

18.3.2. 8^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Γωνία κλίσης

Παράμετροι:

- iv. Κλίση πασσάλου:
 - a. 45°
 - b. 50°
 - c. 55°
 - d. 60°
 - e. 65°
 - f. 70°
 - g. 75°
 - h. 80°
 - i. 85°
 - j. 90°

- v. Κορυφή:
 - a. Κεφαλόδεσμος

- vi. Πάκτωση στη βάση

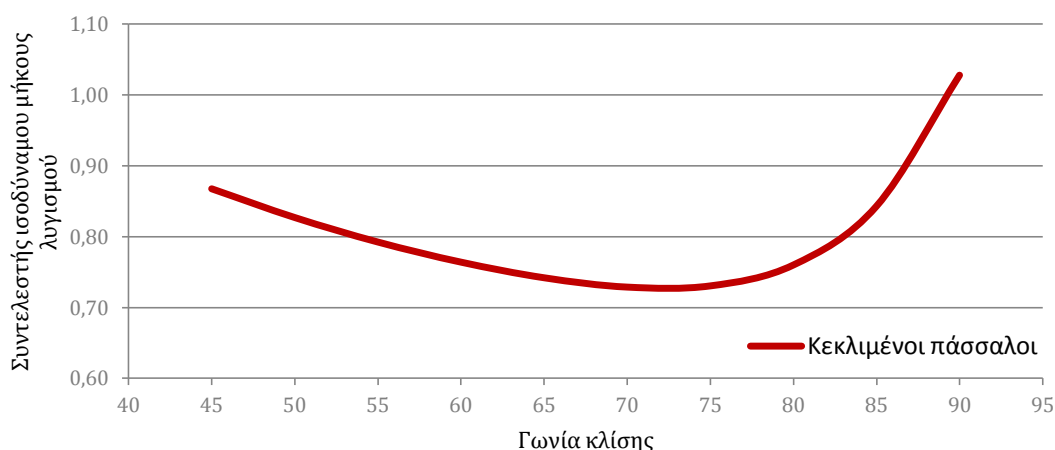
Και σε αυτή τη σειρά αναλύσεων ελέγχεται η επιρροή της γωνίας κλίσης. Έχει ήδη, γίνει εμφανές ότι η τοποθέτηση κεκλιμένων πασσάλων επηρεάζει σημαντικά την απόκριση της κατασκευής, μειώνοντας τις μετακινήσεις, αυξάνοντας το κρίσιμο φορτίο και μειώνοντας το κρίσιμο μήκος λυγισμού και τον αντίστοιχο συντελεστή. Στο προηγούμενο κεφάλαιο, ελέγχθηκε η επιρροή της χρήσης ενός μόνο κεκλιμένου πασσάλου, σε αυτό το στάδιο ελέγχεται η συμπεριφορά του πλαισίου στην περίπτωση που στηρίζεται σε δύο κεκλιμένους πασσάλους. Προκειμένου να ελεγχθεί μόνο η επιρροή της γωνίας τοποθέτησης, οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για πακτωμένο πλαίσιο.

Αναλυτικά, οι τιμές του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού για κάθε γωνία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ οι ιδιομορφές που προκύπτουν για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 76.

Φορέας 4: Πλαίσιο αποτελούμενο από δύο κεκλιμένους πασσάλους			
Γωνία κλίσης	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού
45°	37055	24,54	0,87
50°	47860	21,59	0,83
55°	59600	19,35	0,79
60°	71650	17,64	0,76
65°	83200	16,37	0,74
70°	92700	15,51	0,73
75°	97500	15,13	0,73
80°	93650	15,43	0,76
85°	77900	16,92	0,84

90°	52800	20,55	1,03
-----	-------	-------	------

Πίνακας 72: Αποτελέσματα Adina για μεταβαλλόμενη γωνία κλίσης



Διάγραμμα 42: Μεταβολή συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού συναρτήσει γωνίας κλίσης κεκλιμένων πασσάλων

Παρατηρήσεις

- i. Ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,73 έως 1,03. Το διάστημα αυτό, λαμβάνοντας υπόψη και τον Πίνακα 19, αντιστοιχεί σχεδόν σε πλήρη περιορισμό των μετακινήσεων, για γωνία 75° των κεκλιμένων πασσάλων, έως περιορισμό των στροφών, που συμβαίνει όταν οι πάσσαλοι είναι κάθετοι λόγω ύπαρξης του κεφαλόδεσμου.
- ii. Η μέγιστη τιμή κρίσιμου φορτίου λυγισμού και κατ' επέκταση η ελάχιστη τιμή ισοδύναμου μήκους και συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού προκύπτει για γωνία 75°.

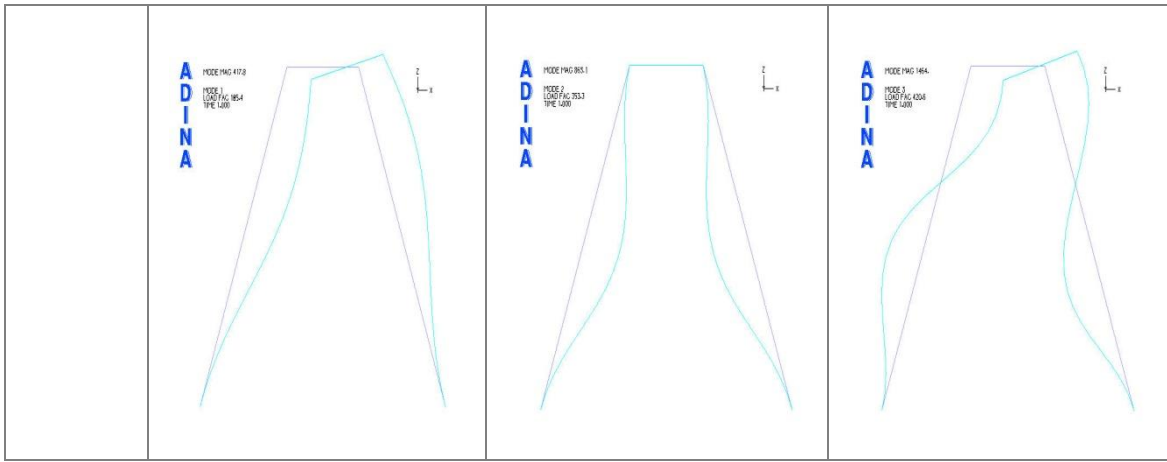
18.4. Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 72, με αυτά του Πίνακα 65 από το προηγούμενο κεφάλαιο, παρατηρούμε ότι η τοποθέτηση και δεύτερου κεκλιμένου πασσάλου αυξάνει σημαντικά το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για κλίση γωνίας της τάξης των 70- 75°, δηλαδή για γωνίες οι οποίες είναι κατασκευάσιμες. Για το λόγο αυτό, η διάταξη των δύο κεκλιμένων πασσάλων επιλέγεται συχνά για την αντιμετώπιση των μεγάλων μετακινήσεων σε τέτοιου τύπου φορείς.

18.5. Ιδιομορφές

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρεις πρώτες ιδιομορφές των φορέων που προέκυψαν από τις αναλύσεις, αρχικά για πακτωμένο πλαίσιο, στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη τα δύο εδαφικά προφίλ της Azzawiya και τέλος, για μεταβαλλόμενη γωνία κλίσης των κεκλιμένων πασσάλων.

Πάκτωση			
Ιδ/ φές	1 ^η	2 ^η	3 ^η



Πίνακας 73: Φορέας 4- Πάκτωση

19. ΦΟΡΕΑΣ 5: Χωρικό προσομοίωμα αποτελούμενο από κεκλιμένους πασσάλους & πλάκα σκυροδέματος

Σε αυτό το κεφάλαιο προχωρούμε με την ανάλυση ενός τρισδιάστατου προσομοιώματος και ελέγχουμε την επιρροή της σταθεράς των ελατηρίων, του βάθους έμπηξης και των γωνιών κλίσης των πασσάλων στο ισοδύναμο μήκος λυγισμού.

19.1. Προσομοίωμα

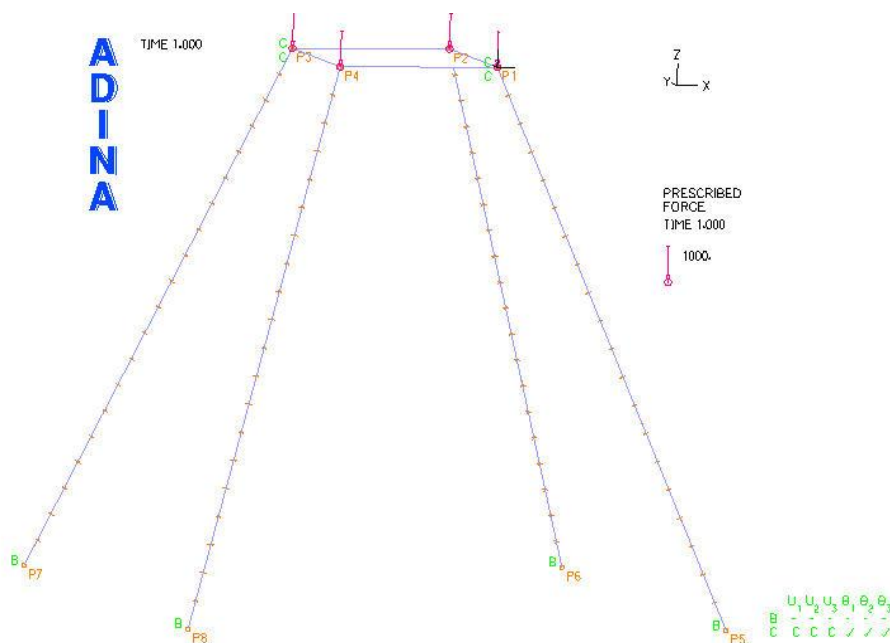
Ο φορέας που χρησιμοποιείται αποτελείται από πλάκα σκυροδέματος πάχους 1 m που στηρίζεται σε τέσσερις κεκλιμένους πασσάλους 20 m. Οι πάσσαλοι είναι κοίλης κυκλικής διατομής διαμέτρου 1 m και πάχους ελάσματος 30 mm. Οι πάσσαλοι τοποθετούνται υπό γωνία 75°.

19.2. Πορεία ανάλυσης

Η πρώτη ανάλυση γίνεται θεωρώντας το φορέα πακτωμένο, ενώ σε επόμενο στάδιο αντικαθίσταται η πάκτωση με μία σειρά ελατηρίων με σταθερές αυτές των δύο εδαφικών προφίλ που έχουν περιγραφεί σε προηγούμενες παραγράφους. Και σε αυτή τη σειρά αναλύσεων θεωρείται χρησιμότερο να μελετηθεί η συμπεριφορά για πραγματικά εδαφικά δεδομένα, οπότε και δεν πραγματοποιούνται αναλύσεις για όλες τις τιμές των ελατηρίων. Δεν υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστούν αναλυτικά οι κρίσιμες τιμές λυγισμού.

19.3. Adina

Το προσομοίωμα που διαμορφώνεται στο Adina είναι τις μορφής:



Εικόνα 722: Προσομοίωμα πακτωμένου φορέα στο Adina

Οι ιδιομορφές που προκύπτουν για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 80. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων του πακτωμένου φορέα είναι τα εξής:

Φορέας 5: Χωρικό προσομοίωμα αποτελούμενο από κεκλιμένους πασσάλους & πλάκα σκυροδέματος			
Συνθήκες στήριξης στη βάση	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού
Πάκτωση	175500	11,27	0,54

Πίνακας 77: Αποτελέσματα Adina για πλαίσιο

Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε ότι το φορτίο λυγισμού παίρνει πολύ μεγάλη τιμή και ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού πλησιάζει το 0,5, δηλαδή την τιμή για το αμφίπακτο υποστύλωμα. Γίνεται, λοιπόν, εμφανές σε τι βαθμό περιορίζονται οι μετακινήσεις και οι στροφές στην κορυφή του πασσάλου από την ύπαρξη πλάκας σκυροδέματος.

Αντικαθιστούμε την πάκτωση με μία σειρά ελατηρίων που αντιπροσωπεύουν τα εδαφικά προφίλ.

19.3.1. 9^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Βάθος έμψηξης-Εδαφικά προφίλ

Παράμετροι:

- iv. Βάθος έμψηξης:
 - a. 20 m
 - b. 15 m
 - c. 10 m
 - d. 5 m
- v. Κορυφή:
 - a. Πλάκα σκυροδέματος πάχους 1 m
- vi. Σταθερά ελατηρίων: 2 εδαφικά προφίλ

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις είναι τα εξής:

Φορέας 5: Χωρικό προσομοίωμα αποτελούμενο από κεκλιμένους πασσάλους & πλάκα σκυροδέματος				
Βάθος έμψηξης	Εδαφικό Προφίλ	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού
20 m	A	109000	14,31	0,69
	B	107800	14,38	0,70
15 m	A	109100	14,30	0,69
	B	107900	14,38	0,69
10 m	A	109000	14,31	0,69
	B	108700	14,33	0,69
5 m	A	101500	14,82	0,72
	B	101500	14,82	0,72

Πίνακας 78: Αποτελέσματα Adina για κάθε εδαφικό προφίλ

Παρατηρήσεις

- i. Παρατηρούμε ότι δεν εμφανίζονται διαφορές καθώς μεταβάλλεται το βάθος έμπτυξης των πασσάλων
- ii. Μεταξύ των δύο εδαφικών προφίλ οι διαφορές είναι πολύ μικρές
- iii. Επιβεβαιώνεται για μία ακόμη φορά ότι ο υπολογισμός του κρίσιμου φορτίου λυγισμού, του ισοδύναμου μήκους λυγισμού και του αντίστοιχου συντελεστή δεν επηρεάζεται σημαντικά από το βάθος έμπτυξης των πασσάλων

Οι ιδιομορφές για τα διάφορα βάθη έμπτυξης παρουσιάζονται στους Πίνακες 81- 82.

19.3.2. 10^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων: Γωνία κλίσης

Παράμετροι:

vii. Κλίση πασσάλων:

- a. 45°
- b. 50°
- c. 55°
- d. 60°
- e. 65°
- f. 70°
- g. 75°
- h. 80°
- i. 85°
- j. 90°

viii. Κορυφή:

- a. Πλάκα σκυροδέματος πάχους 1 m

ix. Πάκτωση στη βάση

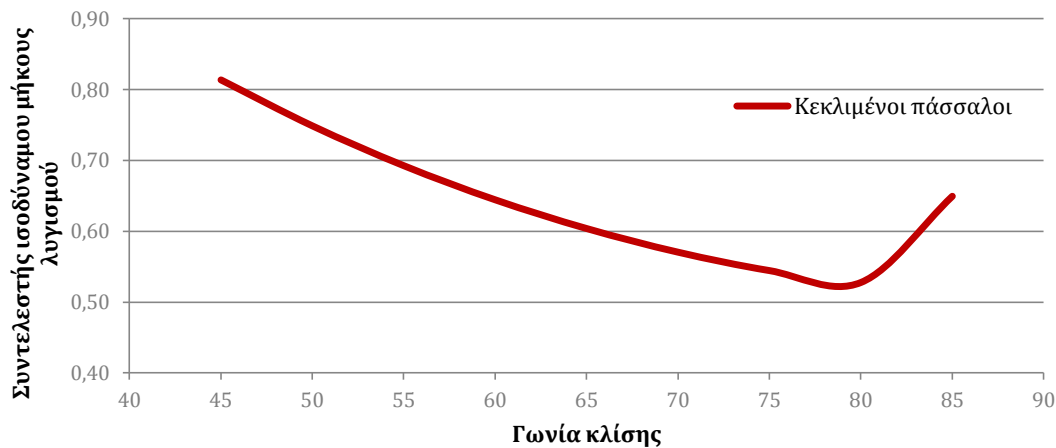
Και σε αυτή τη σειρά αναλύσεων ελέγχεται η επιρροή της γωνίας κλίσης. Έχει, ήδη, γίνει εμφανές ότι η τοποθέτηση κεκλιμένων πασσάλων επηρεάζει σημαντικά την απόκριση της κατασκευής, μειώνοντας τις μετακινήσεις, αυξάνοντας το κρίσιμο φορτίο λυγισμού και μειώνοντας το κρίσιμο μήκος λυγισμού και τον αντίστοιχο συντελεστή. Προκειμένου να ελεγχθεί μόνο η επιρροή της γωνίας τοποθέτησης, οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για πακτωμένο πλαίσιο.

Αναλυτικά, οι τιμές του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού για κάθε γωνία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ οι ιδιομορφές που προκύπτουν για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 83.

Φορέας 5: Χωρικό προσομοίωμα αποτελούμενο από κεκλιμένους πασσάλους & πλάκα σκυροδέματος			
Γωνία κλίσης	Κρίσιμο φορτίο λυγισμού (kN)	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού (m)	Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού
45°	42100	23,02	0,81
50°	58350	19,55	0,75
55°	78000	16,91	0,69

60°	100700	14,88	0,64
65°	125600	13,33	0,60
70°	151300	12,14	0,57
75°	175500	11,27	0,54
80°	194200	10,72	0,53
85°	131200	13,04	0,65

Πίνακας 79: Αποτελέσματα Adina για μεταβαλλόμενη γωνία κλίσης



Διάγραμμα 53: Μεταβολή συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού συναρτήσει γωνίας κλίσης κεκλιμένων πασσάλων

Παρατηρήσεις

- iii. Ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,53 έως 0,81, παρουσιάζοντας σημαντικές μεταβολές σε κάθε αύξηση της γωνίας κλίσης των πασσάλων
- iv. Η μέγιστη τιμή κρίσιμου φορτίου λυγισμού και κατ' επέκταση η ελάχιστη τιμή ισοδύναμου μήκους και συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού προκύπτει για γωνία 75° και 80°
- v. Για μικρή αύξηση της γωνίας από 80 σε 85° παρατηρείται σημαντική μείωση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού

19.4. Συμπεράσματα

Σε όλες τις αναλύσεις είναι εμφανής η επιρροή της πλάκας σκυροδέματος στον περιορισμό των στρωφών και των μετακινήσεων στην κορυφή των πασσάλων.

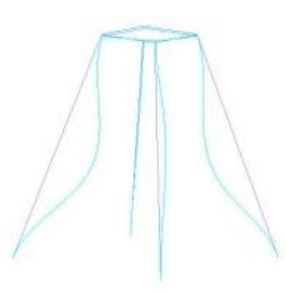
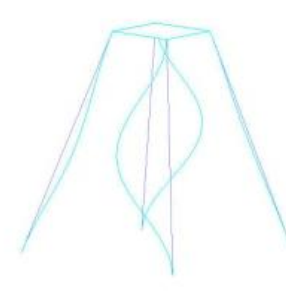

Επαναλαμβάνεται και σε αυτό το κεφάλαιο η παρατήρηση που έχει γίνει από την αρχή των παραμετρικών αναλύσεων για την επιρροή του βάθους έμπτυξης στο κρίσιμο μήκος λυγισμού των πασσάλων. Φαίνεται ότι οι τιμές επηρεάζονται μόνο από τα επιφανειακά στρώματα, γι' αυτό και ανάμεσα στα δύο εδαφικά προφίλ και στα διάφορα βάθη έμπτυξης που ελέγχονται δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές.

Τέλος, η μεταβολή της γωνίας κλίσης των κεκλιμένων πασσάλων είναι σημαντική παράμετρος στην απόκριση του συστήματος. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης, τόσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού,

φτάνοντας μέχρι τις 75- 80°, οπότε και προσεγγίζει την τιμή του αμφίπακτου υποστυλώματος. Για μεγαλύτερες γωνίες ο φορέας γίνεται εύκαμπτος και αυξάνεται σημαντικά η τιμή του κρίσιμου μήκους λυγισμού.

19.5. Ιδιομορφές

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρεις πρώτες ιδιομορφές των φορέων που προέκυψαν από τις αναλύσεις για πακτωμένο πλαίσιο:

Πάκτωση			
Ιδ/φές	1 ^η	2 ^η	3 ^η
			

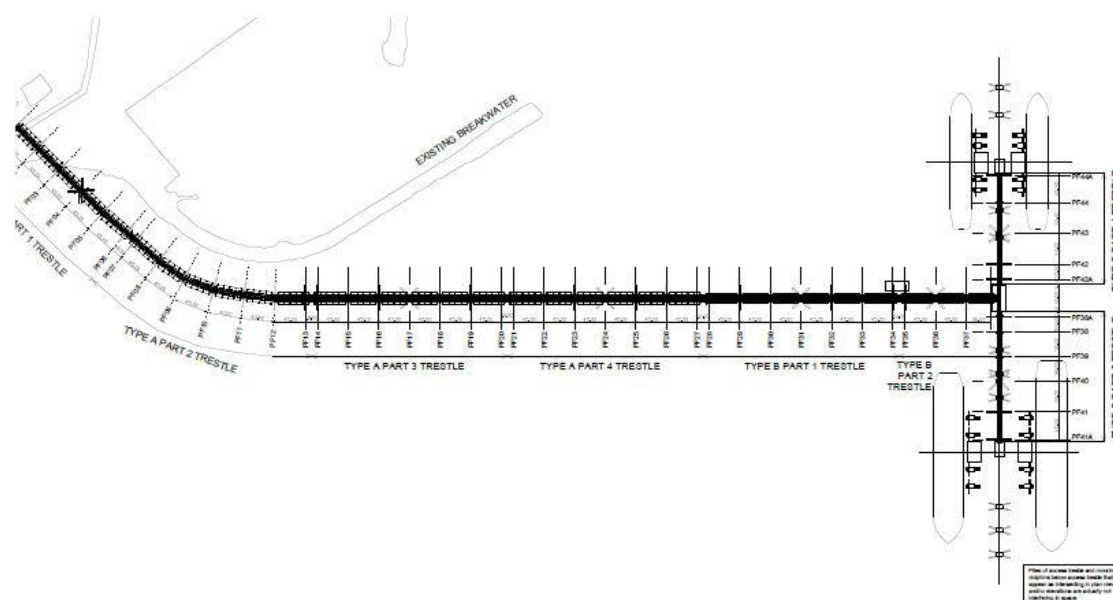
Πίνακας 80: Φορέας 5- Πάκτωση

20. ΦΟΡΕΑΣ 6: Πραγματικός φορέας

Στην τελευταία σειρά αναλύσεων χρησιμοποιείται ένας πραγματικός φορέας, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η επιρροή των παραμέτρων που έχουν ήδη εξεταστεί και να διερευνηθεί η βέλτιστη, κατά το δυνατόν, διάταξη αυτών των κατασκευών.

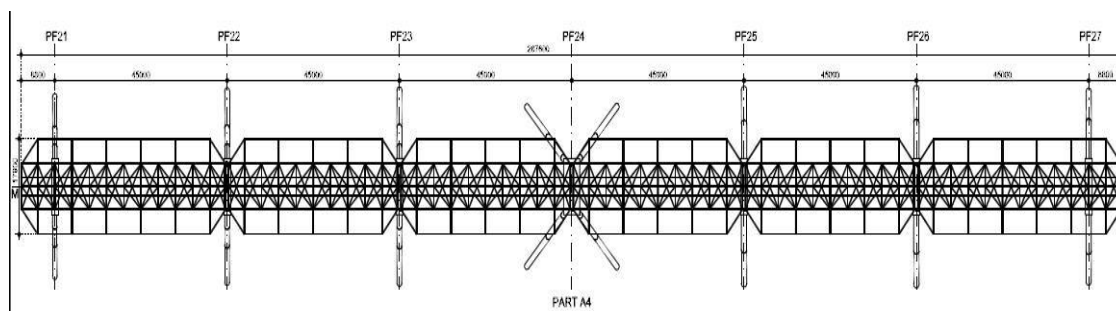
20.1. Προσομοίωμα

Ο φορέας που χρησιμοποιείται αποτελεί τμήμα της μελέτης του σταθμού φορτοεκφόρτωσης πετρελαϊκών προϊόντων στην περιοχή Βασιλικό της Κύπρου. Πρόκειται για επέκταση της υπάρχουσας υποδομής και αποτελείται από μία εξέδρα (trestle) μήκους ~1500 m που συνδέει την ακτή με την αποβάθρα που προσδένουν τα σκάφη, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 159: Oil terminal, Vassiliko, Cyprus

Προκειμένου να είναι δυνατή η ανάλυση και η κατασκευή του φορέα, χωρίζεται σε επιμέρους τυπικά τμήματα των ~290 m (Εικόνα 160), τα οποία επαναλαμβάνονται σε όλο το μήκος της κατασκευής με μικρές μεταβολές.

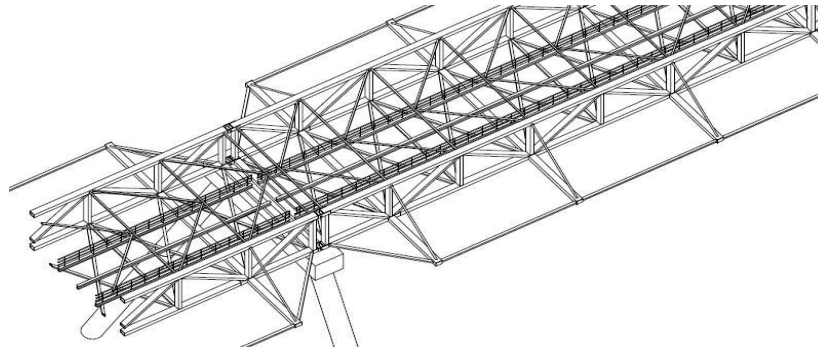


Εικόνα 160: Τυπικό επαναλαμβανόμενο τμήμα εξέδρας

Το τυπικό αυτό τμήμα αποτελείται από έξι ανοίγματα των 45 m καθένα από τα οποία στηρίζεται σε δύο κεκλιμένους, κατά την εγκάρσια διεύθυνση, πασσάλους. Στο μέσον αυτής της κατασκευής, υπάρχει μία ομάδα τεσσάρων κεκλιμένων πασσάλων, προς τις δύο

διευθύνσεις- εγκάρσια και διαμήκως, η οποία έχει σκοπό να περιορίσει το λυγισμό όλων των πασσάλων κατά τη διαμήκη διεύθυνση.

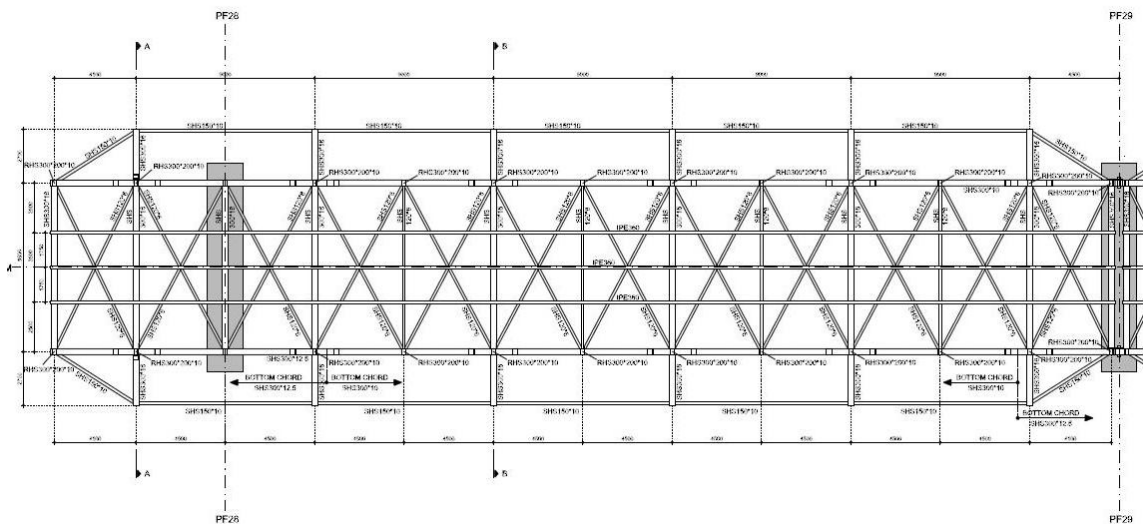
Η ανωδομή αποτελείται από χωρικό δικτύωμα της μορφής:



Εικόνα 161: Χωρικό δικτύωμα ανωδομής

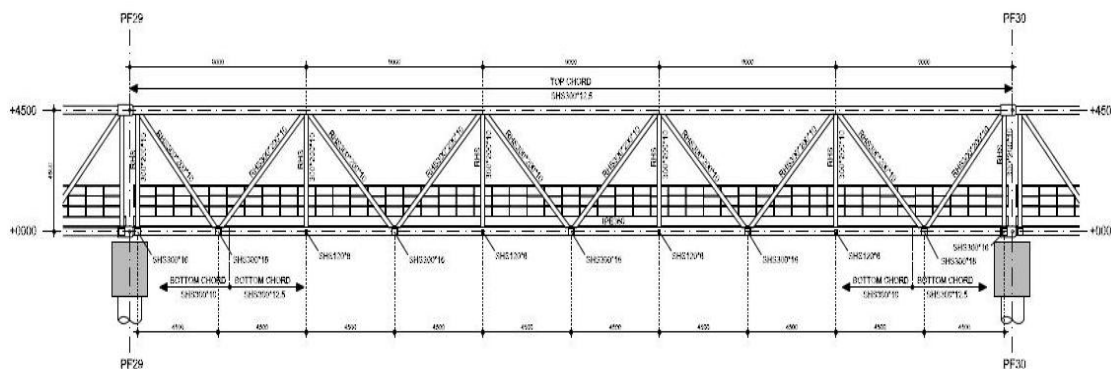
Και πιο συγκεκριμένα οι διατομές που χρησιμοποιούνται στο προσομοίωμα είναι οι εξής:

Σε κάτοψη:



Κύριες δοκοί στο κάτω πέλμα	SHS 300*12,5
Διαδοκίδες στο κάτω πέλμα	SHS 300*16
Βοηθητικά διαμήκη στοιχεία στο κάτω πέλμα	SHS 150*10
Διαγώνια στοιχεία στο κάτω πέλμα	SHS 120*6

Σε όψη:



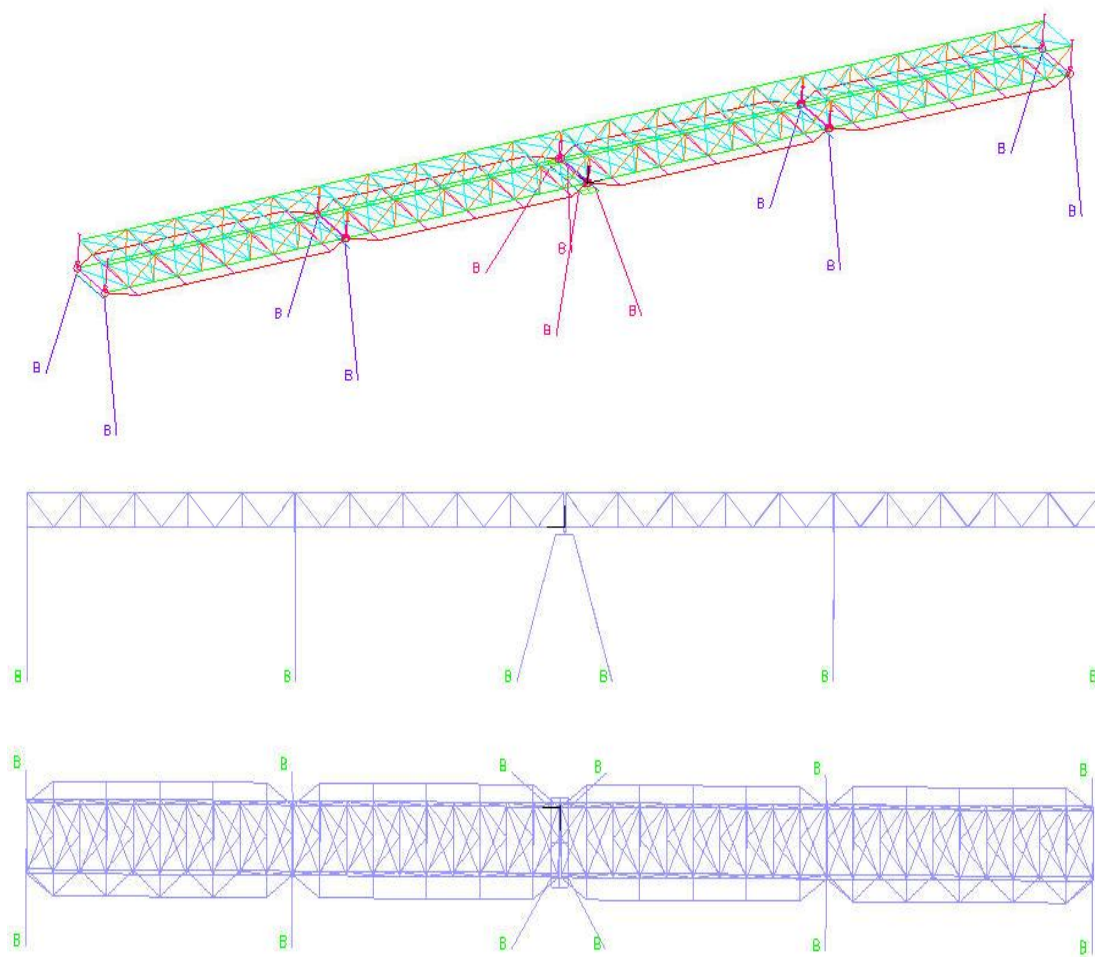
Κύριες δοκοί στο άνω πέλμα	SHS 300*12,5
Διαδοκίδες στο άνω πέλμα	SHS 120*6

Κατακόρυφα στοιχεία	RHS 300*200*10
Διαγώνια στοιχεία	RHS 300*200*10

Πίνακας 84: Διατομές προσομοιώματος

Οι πάσσαλοι που χρησιμοποιούνται είναι κοίλης κυκλικής διατομής. Η ομάδα των τεσσάρων κεκλιμένων πασσάλων είναι διατομής CHS 2000*40 και οι ομάδες των 2 κεκλιμένων εγκαρσίως πασσάλων είναι διατομής CHS 1500*30. Οι πάσσαλοι τοποθετούνται υπό γωνία 72°. Οι κεφαλόδεσμοι των μεσαίων πασσάλων είναι ορθογωνικής διατομής σκυροδέματος διαστάσεων 6000* 2000 και οι ακραίοι κεφαλόδεσμοι τετραγωνικής διατομής σκυροδέματος διαστάσεων 2000*2000.

Το προσομοίωμα που διαμορφώνεται για ολόκληρο το φορέα στο Adina είναι της μορφής που φαίνεται παρακάτω. Τα διαφορετικά χρώματα αντιπροσωπεύουν τη διατομή κάθε μέλους.



Εικόνα 162: Προσομοίωμα φορέα στο Adina

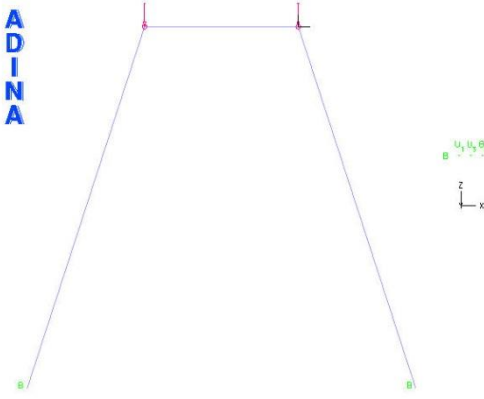
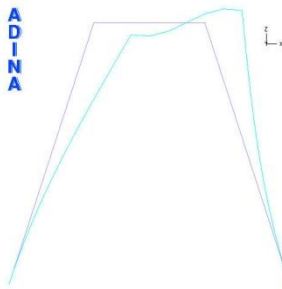
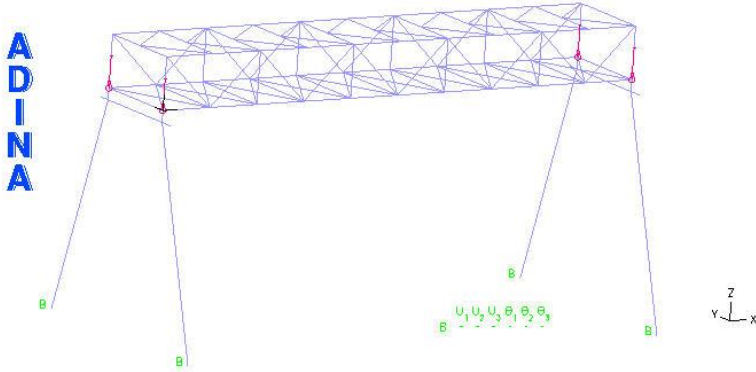
20.2. Πορεία ανάλυσης

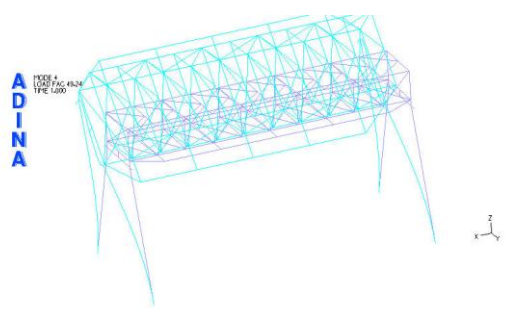
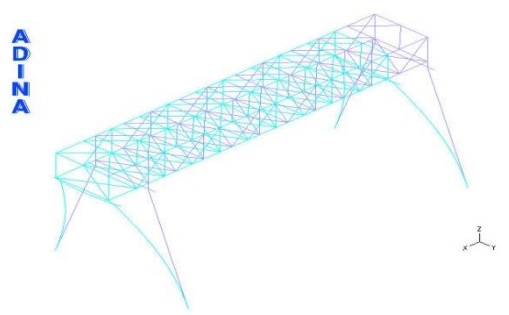
Η διαδικασία που ακολουθείται σε αυτό το κεφάλαιο έχει ως σκοπό να επιβεβαιώσει το ρόλο που διαδραματίζει η ομάδα των τεσσάρων κεκλιμένων πασσάλων προκειμένου να περιορίσει το λυγισμό των υπολοίπων πασσάλων στη διαμήκη διεύθυνση και να προταθεί η βέλτιστη κατά το δυνατόν διάταξη για αυτής της μορφής τις κατασκευές. Για το λόγο αυτό αναλύεται σταδιακά η συμπεριφορά κάθε τμήματος του φορέα, έως ότου καταλήξουμε στον ολοκληρωμένο φορέα.

Οι αναλύσεις γίνονται για πακτωμένο φορέα, προκειμένου να μελετηθεί μόνο η επιρροή της κεκλιμένης ομάδας των τεσσάρων πασσάλων.

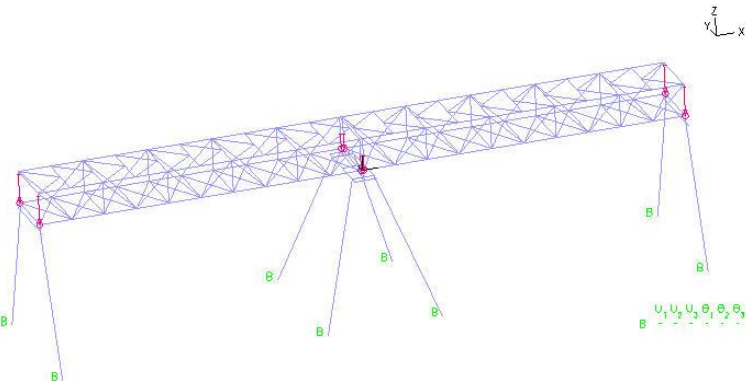
20.3. Adina

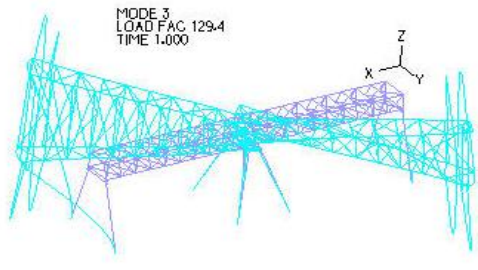
Παρουσιάζονται παρακάτω με τη σειρά που αναλύονται οι φορείς, από τον απλούστερο στο συνθετότερο:


Προσομοίωμα	
A. Πλαίσιο αποτελούμενο από κεκλιμένους πασσάλους υπό γωνία 72	
	
<p>Εγκάρσια ιδιομορφή $P_{cr} = 43100 \text{ kN}$</p>	
B. Μεμονωμένο άνοιγμα με κεκλιμένους πασσάλους κατά την εγκάρσια διεύθυνση	
	

<p>Εγκάρσια ιδιομορφή $P_{cr} = 43100 \text{ kN}$</p>	
<p>Διαμήκης ιδιομορφή $P_{cr} = 43100 \text{ kN}$</p>	

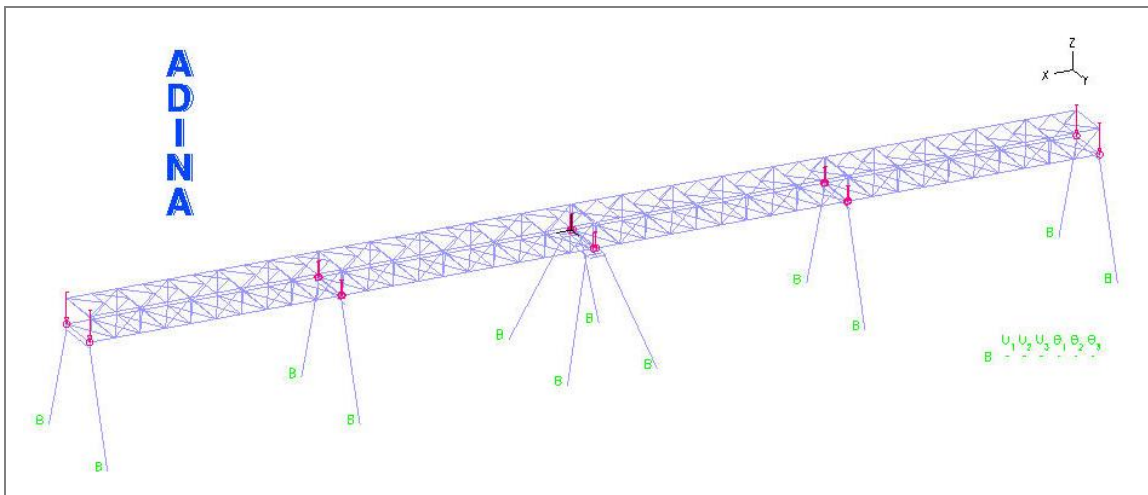
Γ. 1 άνοιγμα εκατέρωθεν, ομάδα 4 κεκλιμένων πασσάλων προς τις 2 διευθύνσεις

<p>ADINA</p>	
--------------	---

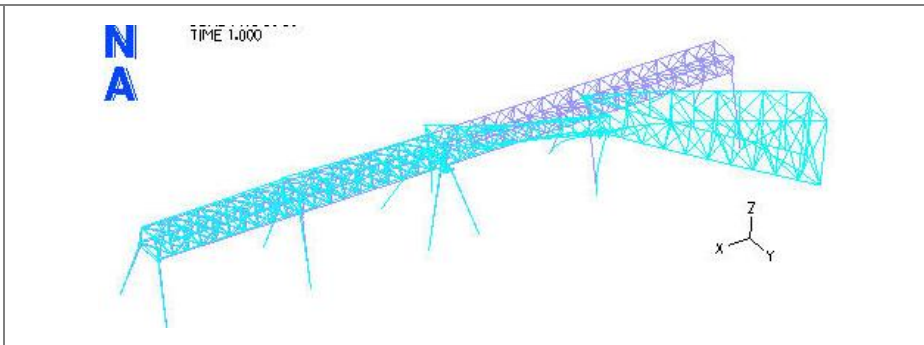
<p>Εγκάρσια ιδιομορφή $P_{cr} = 64700 \text{ kN}$</p>	
--	--

<p>Διαμήκης ιδιομορφή $P_{cr} = 92000 \text{ kN}$</p>	
--	--

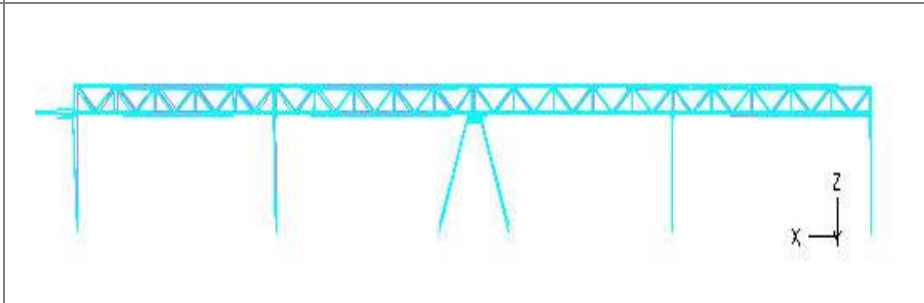
Δ. 2 ανοίγματα εκατέρωθεν, ομάδα 4 κεκλιμένων πασσάλων προς 2 διευθύνσεις



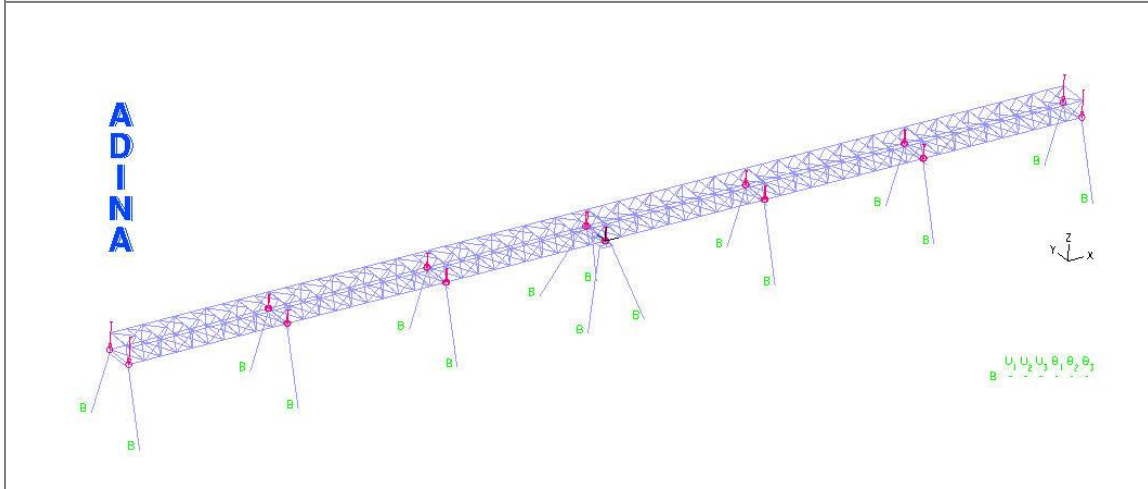
Εγκάρσια
ιδιομορφή
 $P_{cr} = 64200 \text{ kN}$

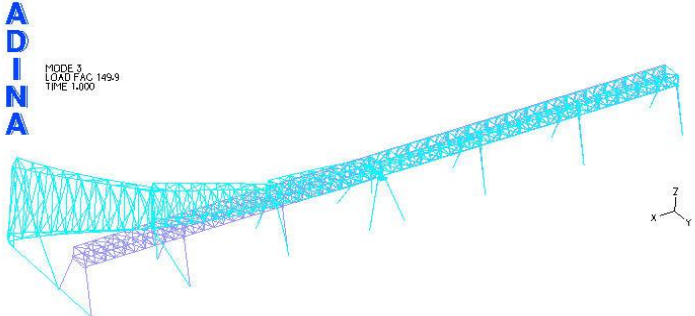
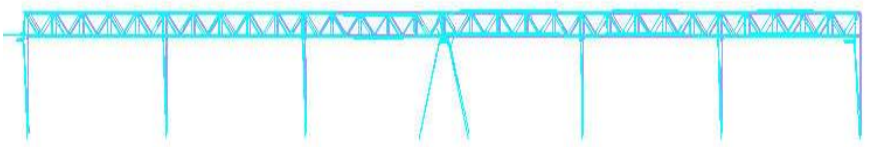


Διαμήκης
ιδιομορφή
 $P_{cr} = 92500 \text{ kN}$

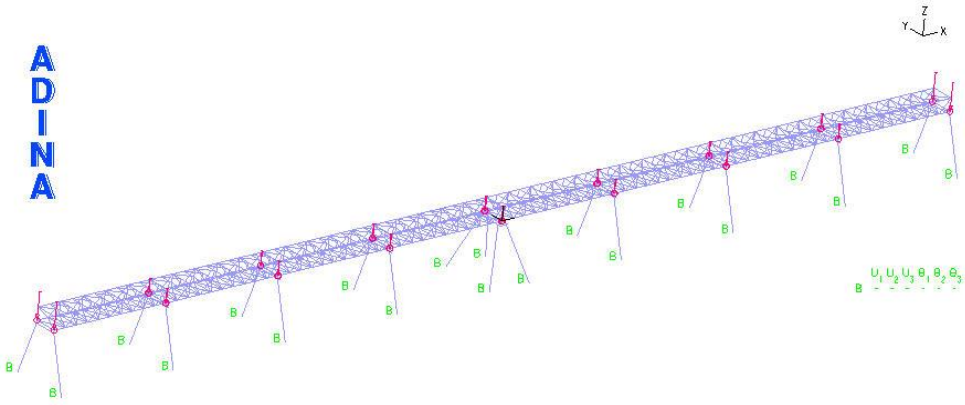


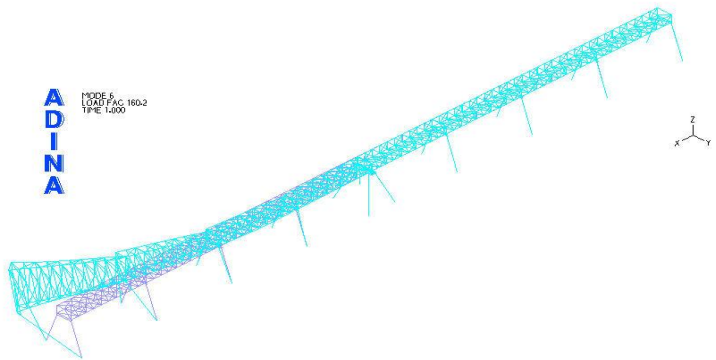
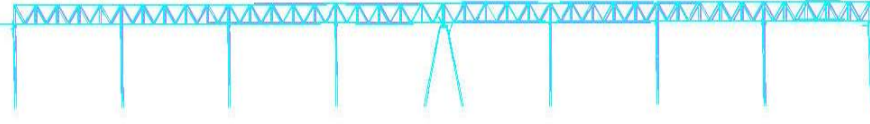
Ε. 3 ανοίγματα εκτέρωθεν, ομάδα 4 κεκλιμένων πασσάλων προς 2 διευθύνσεις



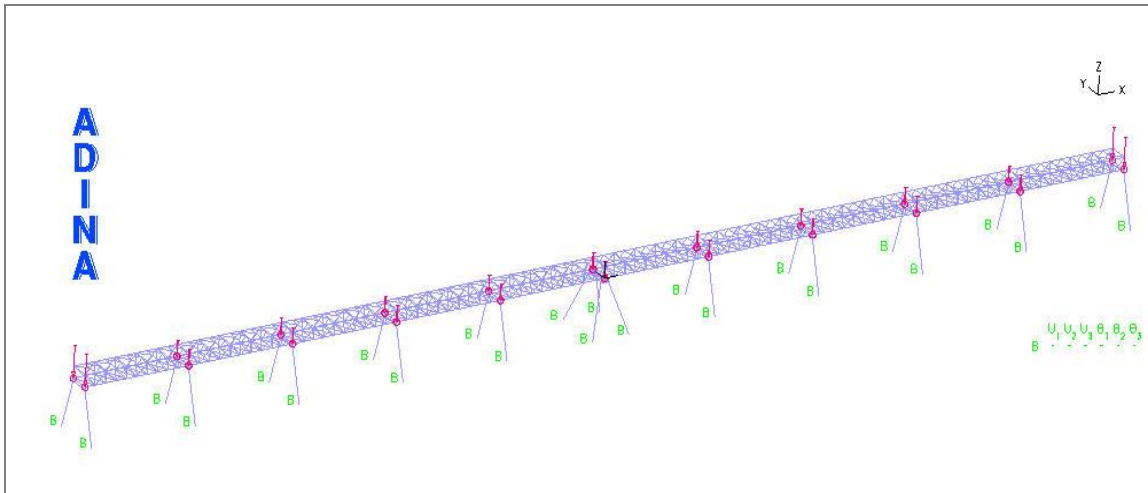
<p>Εγκάρσια ιδιομορφή $P_{cr} = 59960 \text{ kN}$</p>	
<p>Διαμήκης ιδιομορφή $P_{cr} = 90600 \text{ kN}$</p>	

Στ. 4 ανοίγματα εκατέρωθεν, ομάδα 4 κεκλιμένων πασσάλων προς 2 διευθύνσεις

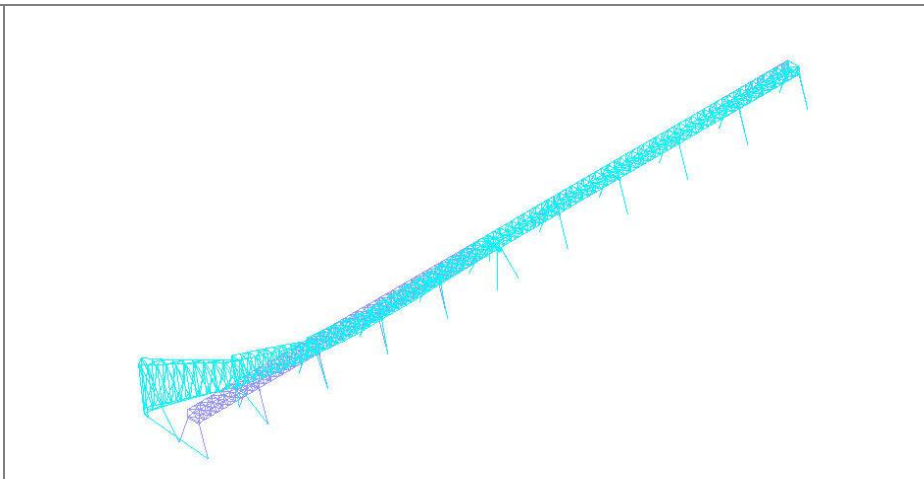
<p>ADINA</p>	
--------------	---

<p>Εγκάρσια ιδιομορφή $P_{cr} = 64080 \text{ kN}$</p>	
<p>Διαμήκης ιδιομορφή $P_{cr} = 92400 \text{ kN}$</p>	

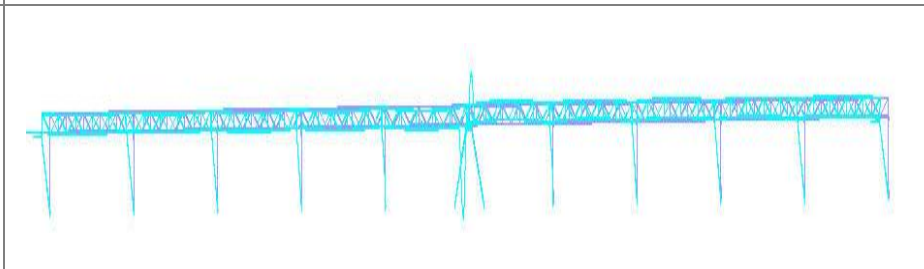
Z. 5 ανοίγματα εκατέρωθεν, ομάδα 4 κεκλιμένων πασσάλων προς 2 διευθύνσεις



Εγκάρσια
ιδιομορφή
 $P_{cr} = 63890 \text{ kN}$



Διαμήκης
ιδιομορφή
 $P_{cr} = 92290 \text{ kN}$



Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας ήταν η περιγραφή και η ανάλυση των παραμέτρων εκείνων που επηρεάζουν τη διάταξη μίας ειδικής κατηγορίας λιμενικών κατασκευών, των μεταλλικών θαλάσσιων εξεδρών φόρτωσης εκφόρτωσης εμπορευμάτων που στηρίζονται σε μεταλλικούς πασσάλους.

Πραγματοποιήθηκε μία σειρά παραμετρικών αναλύσεων, μεταβάλλοντας παράγοντες όπως οι συνθήκες δέσμευσης στην κορυφή των πασσάλων, το εδαφικό προφίλ στην περιοχή έδρασης, το βάθος έμπηξης και η γωνία κλίσης των πασσάλων και διαμορφώθηκαν διαγράμματα και πίνακες με τα αποτελέσματα. Έγινε σαφές ότι για απλά προσομοιώματα τα αποτελέσματα των αναλύσεων σχεδόν ταυτίζονται με τις αναλυτικές λύσεις, ενώ για πιο σύνθετους φορείς προσεγγίζουν την αναμενόμενη συμπεριφορά.

Η εργασία κλείνει με την ανάλυση ενός πραγματικού φορέα και την επιλογή της βέλτιστης για τη συγκεκριμένη περίπτωση διάταξης του φορέα.

Βιβλιογραφία

- [1] PIANC, Seismic Design Guidelines for Port Structures, A. A. Balkema Publishers, 2001
- [2] EAU, Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways, Ernst & Sohn, 1996
- [3] M. J. Tomlinson, Pile Design & Construction Practice, E & FN Spon, 1994
- [4] BS 6349-2:2010, Maritime Works- Part 2: Code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins, BSI Standards Publication, 2010
- [5] M. B. Abbott & W. A. Price, Coastal Estuarial and Harbour Structures, E & FN Spon, 2007
- [6] Ben C. Gerwick, Construction of Marine & Offshore Structures, CRC Press, 2000
- [7] Ivar Holland, Ove T. Gudmestad, Erik Jersin, Design of Offshore Concrete Structures, Spon Press, 2003
- [8] Carl A. Thoresen, Port Designer's Handbook: Recommendations & Guidelines, Thomas Telford, 2003
- [9] CUR, Handbook of quay walls, Taylor & Francis Group, 2007
- [10] ARCHIRODON NV, Azzawiya Oil Harbour Project- Access Trestle Tender Design Report, 2009
- [11] Royal Haskoning, Azzawiya Oil Harbour Bid Documents- Scope of Work, 2009
- [12] Royal Haskoning, Azzawiya Oil Harbour Bid Documents- Performance Specifications and Design Criteria, 2009
- [13] Royal Haskoning, Azzawiya Oil Harbour- Bid Addendum, 2009
- [14] UNCTAD, Port Development: A Handbook for planners in developing countries, 1985
- [15] Μέμος Κωνσταντίνος, Μαθήματα λιμενικών έργων, ΕΜΠ- Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, 2005
- [16] Ε. Ι. Σαπουντζάκης, Προσομοίωση τεχνικών έργων, ΕΜΠ- Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, 2003
- [17] Α. Αναγνωστόπουλος, Β. Παπαδόπουλος, Θεμελιώσεις με πασσάλους, Εκδόσεις Συμεών, 2004