

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

---

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία:

*«ΜΕΛΕΤΗ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΛΑΔΩΝ ΑΡΤΙΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ  
ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΔΥΟ ΥΛΙΚΑ»*

Συγγραφέας:

Σταυρούλα Π. Παπαγιαννοπούλου

A.M.: 08118050

Επιβλέπων:

Δημήτριος Ν. Κονισπολιάτης,

Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Ιανουάριος 2024

[ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ]

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί και την ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου στη σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ταυτόχρονα, σηματοδοτεί και την έναρξη ενός νέου κύκλου ζωής όπου πλέον αποκτώ επαγγελματική υπόσταση, αυτή του διπλωματούχου Ναυπηγού. Εφόδιά μου σε αυτή τη νέα πρόκληση θα αποτελούν πάντοτε οι γνώσεις και οι εμπειρίες που απέκτησα αλλά και οι δεξιότητες που κατάφερα να αναπτύξω κατά τη διάρκεια της πενταετούς φοίτησής μου.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Ν. Κονισπολιάτη που μου δίδαξε το μάθημα «Αγκυρώσεις Πλωτών Κατασκευών» και αποτέλεσε την αφορμή για να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Η μεταλαμπάδευση γνώσεων πάνω στα θέματα αγκυρώσεων, η συνεχής επικοινωνία και οι επεξηγήσεις που μου προσέφερε συνιστούν καταλυτικούς παράγοντες για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς φίλους και συναδέλφους που με στήριξαν ηθικά και συναισθηματικά καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Πρωτίστως, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστό στους γονείς μου, Παναγιώτη και Ελένη, στις αδερφές μου, Γαρυφαλλιά και Δανάη και στους καλούς μου φίλους και συναδέλφους, Κώστα και Άρη για την αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση που έλαβα αυτά τα πέντε χρόνια.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ξεκινά με μια σύντομη αναφορά στα είδη των υπεράκτιων κατασκευών που συναντάμε σήμερα στην offshore βιομηχανία ενώ πραγματοποιείται και μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης τόσο των κατασκευών αυτών όσο και των συστημάτων αγκύρωσης τους. Στη συνέχεια, γίνεται ταξινόμηση των τελευταίων λαμβάνοντας υπόψιν ένα σύνολο διαφορετικών κριτηρίων και παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος. Επιπρόσθετα, παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τα είδη, τα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων υλικών, των συνδέσμων, των ανωστικών σωμάτων και των αγκυρών που μπορούν να αποτελέσουν δυνητικά ένα κλάδο αγκύρωσης. Παράλληλα, πραγματοποιείται μελέτη και μαθηματική περιγραφή συστημάτων αγκύρωσης ενός, δύο και πολλαπλών κλάδων ενώ καταστρώνονται οι απαραίτητες εξισώσεις που διέπουν αυτά τα συστήματα. Τέλος, αξιοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα «MSTAC» του εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών & Συστημάτων Αγκύρωσης της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και λαμβάνοντας υπόψιν συγκεκριμένες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται κατά τη διάρκεια σχεδίασης συστημάτων αγκύρωσης, κατασκευάζονται πίνακες συντελεστών και διαγράμματα δυνάμεων των πλέον φορτιζόμενων κλάδων. Σημειώνονται συγκρίσεις και αξιολογούνται τα αποτελέσματα με βάση πληροφορίες και πηγές που αντλούνται από την ελληνική και τη διεθνή αλληλογραφία.

**Λέξεις κλειδιά:** Πλωτές Κατασκευές, Συστήματα Αγκυρώσεων, Υλικά, Σύνδεσμοι, Άγκυρες, Αλυσοειδής, Στατική Ανάλυση, Σχεδίαση Συστημάτων Αγκύρωσης.

## Abstract

The following diploma thesis begins with a brief reference to the types of offshore constructions found today in the offshore industry, while a historical review of the evolution of both these constructions and their mooring systems is also presented. Then, the latter are classified into different categories taking into consideration various criteria while the main characteristics of each system are presented as well. In addition, information is provided on the types, characteristics, advantages and disadvantages of the different kind of materials, connectors, mooring buoys and anchors that a mooring line could potentially consist of. Furthermore, a study and a mathematical description of single-, double- and multi-line mooring systems composed by different materials, was developed while the necessary mathematical equations governing these systems are derived. Finally, using the "MSTAC" computer program of the Floating Structures & Mooring Systems Laboratory, SNAME and taking into account specific requirements that have to be fulfilled during the design of mooring systems, tables of design coefficients and force diagrams of the most loaded lines are constructed. Comparisons are made and results are evaluated with information and sources found in Greek and international bibliography.

**Key words:** Offshore Structures, Mooring Systems, Materials, Connector, Anchors, Catenary, Static Analysis, Design of Mooring Systems.

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	8
2. Ιστορική Αναδρομή.....	8
3. Ταξινόμηση Συστημάτων Αγκύρωσης.....	9
3.1. Προσωρινά Συστήματα Αγκύρωσης (Temporary Mooring Systems) .....	10
3.2. Μόνιμα Συστήματα Αγκύρωσης (Permanent Mooring Systems).....	10
3.3. Αλυσοειδή Συστήματα Αγκύρωσης (Catenary Mooring Systems) .....	10
3.4. Συστήματα Αγκύρωσης υπό Υψηλή Προένταση (Taut Leg Mooring Systems).....	11
3.5. Συστήματα Αγκύρωσης Πολλαπλών Κλάδων (Spread Multi-Leg Mooring Systems).....	12
3.6. Συστήματα Αγκύρωσης ενός Σημείου (Single Point Mooring Systems) .....	13
4. Γραμμές Αγκύρωσης (Mooring Lines) .....	16
4.1. Υλικά.....	17
4.1.1. Αλυσίδα (Chain).....	17
4.1.2. Συρματόσχοινα (Wire Ropes) .....	19
4.1.3. Σχοινί από Πολυεστέρα (Fiber Ropes).....	22
4.1.4. Σχοινί από Άλλα Συνθετικά Υλικά (Other Synthetic Ropes) .....	23
4.1.5. Νάιλον (Polyamide Rope).....	24
4.1.6. HMPE (High Modulus Polyethylene Rope).....	24
4.1.7. Αραμίδιο (Aramid) .....	26
4.1.8. Σύγκριση Υλικών .....	26
4.2. Σύνδεσμοι (Connectors).....	27
4.2.1. Shackles.....	27
4.2.2. Swivels .....	28
4.2.3. M-Link Synthetic Rope Connector.....	29
4.2.4. Wire Clamp.....	30
4.2.5. Subsea Connector Tools.....	30
5. Αλυσοειδής Καμπύλη (Catenary).....	31
5.1. Στατική Ανάλυση της Αλυσοειδούς.....	31
5.2. Λύση των Εξισώσεων της Μη Ελαστικής Αλυσοειδούς.....	35
6. Στατική Ανάλυση Γραμμής Αγκύρωσης αποτελούμενης από Δύο Τμήματα Μη Ελαστικού Υλικού .....	39
7. Στατική Ανάλυση Συστημάτων Αγκύρωσης Αποτελούμενων από Δύο Τμήματα Μη Ελαστικού Υλικού.....	41
7.1. Στατική Ανάλυση Συμμετρικού Συστήματος Αγκύρωσης Δύο Κλάδων .....	41
7.2. Στατική Ανάλυση Συμμετρικού Συστήματος Αγκύρωσης Πολλαπλών Κλάδων .....	44
8. Σχεδίαση Συστημάτων Αγκύρωσης.....	46

8.1. Σχεδίαση Μίας Γραμμής Αγκύρωσης Αποτελούμενης από Δύο Τμήματα Μη Ελαστικού Υλικού .....	47
8.2. Σχεδίαση Συστημάτων Αγκύρωσης Πολλαπλών Κλάδων Αποτελούμενων από Δύο Τμήματα Μη Ελαστικού Υλικού .....	49
9. Υπολογιστικό Πρόγραμμα MSTAC – Σύγκριση Αποτελεσμάτων .....	52
10. Σχόλια και Μελλοντικές Προτάσεις.....	66
11. Παράρτημα.....	67
12. Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	69

## 1. Εισαγωγή

Από την απαρχή της ανθρώπινης ιστορίας, οι άνθρωποι δραστηριοποιούνται και αξιοποιούν το θαλάσσιο περιβάλλον με ποικίλους τρόπους ανά τους αιώνες. Στις μέρες μας, ορισμένες από τις σύγχρονες θαλάσσιες δραστηριότητες αποτελούν οι εξερευνητικές γεωτρήσεις, η εναπόθεση σωληνώσεων στον πυθμένα της θάλασσας, η διαμόρφωση του πυθμένα της θάλασσας, η εγκατάσταση ανωστικών σωμάτων για μετεωρολογικές εφαρμογές, τα πλωτά ξενοδοχεία κλπ [1]. Ωστόσο, μία από τις σημαντικότερες θαλάσσιες δραστηριότητες σχετίζεται με τον εντοπισμό, την εξόρυξη, την παραγωγή, την αποθήκευση και τη διανομή του πετρελαίου. Η πραγματοποίηση όλων των παραπάνω στηρίζεται στις υπεράκτιες κατασκευές (offshore structures).

Ως υπεράκτιες κατασκευές ορίζονται οι κατασκευές που δεν έχουν άμεση σύνδεση με τη στεριά, έχουν σταθερή θέση και εκτείνονται πάνω ή κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτές διακρίνονται σε πλωτές κατασκευές (floating platforms) και κατασκευές στερεωμένες στον πυθμένα της θάλασσας (fixed structures). Η επιτακτική ανάγκη για διατήρηση μιας σταθερής θέσης ή σε ορισμένες περιπτώσεις μιας ελεγχόμενα μεταβαλλόμενης θέσης απαιτεί τη σχεδίαση και εγκατάσταση κατάλληλου συστήματος αγκύρωσης [1]. Σκοπός ενός συστήματος αγκύρωσης και βασική πρόκληση ενός μηχανικού είναι οι υπεράκτιες κατασκευές να ανθίστανται στις δυσμενείς καιρικές συνθήκες (υψηλοί άνεμοι, κύματα, σεισμοί, πάγος κλπ.) και να παραμένουν σε αρμονία με το φυσικό περιβάλλον ώστε να εξυπηρετούν τις ποικίλλες ανθρώπινες δραστηριότητες [5].

## 2. Ιστορική Αναδρομή

Η παλαιότερη υπεράκτια κατασκευή για εξόρυξη πετρελαίου κατασκευάστηκε περί το 1887, ανοικτά των ακτών της νότιας Καρολίνας, κοντά στην περιοχή Santa Barbara. Πρόκειται για μια απλή, ξύλινη προβλήτα εξοπλισμένη με μια εξέδρα για τη διάνοιξη κάθετων “πηγαδιών πετρελαίου” στον πυθμένα της θάλασσας. Μεταγενέστερα, σημαντικές εξελίξεις στην εξόρυξη πετρελαίου σημειώθηκαν το 1911, όταν κατασκευάστηκε πηγάδι σε βάθος χιλιομέτρων στη λίμνη Caddo της Λουιζιάνα αλλά και το 1927, όταν εγκαταστάθηκε πλατφόρμα εξόρυξης στη λίμνη Maracaibo της Βενεζουέλας, γνωστή και ως “λίμνη πετρελαίου” [2].

Η δεκαετία του 1930 αποτέλεσε την αφετηρία για την αξιοποίηση του κόλπου του Μεξικού ως υπεράκτιας πηγής πετρελαίου και αερίου. Ειδικότερα, η 18<sup>η</sup> Μαρτίου 1938, όπου πραγματοποιήθηκε εξόρυξη πετρελαίου από το κοίτασμα Creole μέσω πηγαδιών 4.3 μέτρων βάθους, που κατασκεύασαν οι εταιρείες Pure Oil και Superior Oil, ορίστηκε ως η απαρχή της υπεράκτιας βιομηχανίας πετρελαίου. Μετά το τέλος του 2<sup>ου</sup> Παγκόσμιου πολέμου, η υπεράκτια δραστηριότητα στον κόλπο του Μεξικού εξελίχθηκε ραγδαία [3]. Πλέον, πετρέλαιο αντλείται σε μεγαλύτερα βάθη νερού ενώ συγκεκριμένα η κολοσσός εταιρεία Shell έχει δημιουργήσει τριακόσια υπεράκτια πηγάδια στην ευρύτερη περιοχή [4].

Ταυτόχρονα με όλα τα προαναφερθέντα γεγονότα, σημειώθηκε και η εξέλιξη των μεθόδων αγκύρωσης. Τα συστήματα αγκύρωσης είναι άμεσα συνυφασμένα με την εξερεύνηση και την πλοήγηση από την αρχαιότητα. Η ύπαρξη αγκυρώσεων από την εποχή που ο άνθρωπος ξεκίνησε να ψαρεύει, αποδεικνύεται μέσω τοιχογραφιών σε σπήλαια [6]. Πιο συγκεκριμένα, οι αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποιούσαν καλάθια με πέτρες και μεγάλους σάκους γεμάτους άμμο (dead weights anchors) για την πρόσδεση των μικρών πλοίων εκμεταλλεύοντας το βάρος τους και την αναπτυσσόμενη τριβή



τους κατά μήκος του πυθμένα. Σήμερα, γίνεται λόγος για υπεράκτια και μη συστήματα αγκυρώσεων που σχεδιάζονται για ένα εύρος περιβαλλοντικών συνθηκών – από το δυσμενές περιβάλλον της Βόρειας Θάλασσας έως το ήπιο κλίμα του κόλπου της Ταϊλάνδης – αλλά και ένα εύρος βαθών νερού που σε ορισμένες εφαρμογές ξεπερνά τα 3000m.

### 3. Ταξινόμηση Συστημάτων Αγκύρωσης

Η εντατικοποίηση των δραστηριοτήτων στο θαλάσσιο περιβάλλον και ιδιαίτερα οι προσπάθειες για την εξαγωγή και εκμετάλλευση υδρογονανθράκων συνέβαλαν καθοριστικά στην ανάπτυξη και εγκατάσταση ενός μεγάλου φάσματος θαλάσσιων κατασκευών και ναυπηγημάτων. Μολονότι η υποδιαίρεση των κατασκευών αυτών είναι δύσκολη λόγω των ποικίλων γεωμετρικών μορφών και διαστάσεων, του τρόπου εγκατάστασης κ.ά. επιχειρείται να γίνει μια κατηγοριοποίηση με βάση τη δυνατότητα αλλαγής του τύπου εγκατάστασης και λειτουργίας τους. Έτσι, οι υπεράκτιες κατασκευές διακρίνονται σε σταθερές κατασκευές (fixed structures), πλωτές κατασκευές (floating structures) και ενδίδουσες κατασκευές (compliant structures). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν χωροδικτυώματα «Jackets» και πλατφόρμες βαρύτητας· στη δεύτερη συναντάμε γεωτρηκτικά σκάφη (Drilling ships), βυθισμένες και ημιβυθισμένες πλατφόρμες (Submersible platforms, Semisubmersible platforms) και συστήματα παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης (FPSO, FSO)· ενώ η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει πλατφόρμες TLP, articulated towers και guyed-tower πλατφόρμες [19]. Ενδελεχής μελέτη των προαναφερθέντων offshore κατασκευών ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διπλωματικής.

Το ενδιαφέρον στρέφεται τώρα γύρω από τα συστήματα αγκύρωσης. Αυτά συμβάλλουν αφενός στη διατήρηση της προκαθορισμένης θέσης των υπεράκτιων κατασκευών και ναυπηγημάτων και αφετέρου στην εξισορρόπηση των περιβαλλοντικών φορτίων. Παράλληλα, η δύναμη επαναφοράς που δημιουργείται από τα συστήματα αγκύρωσης αντισταθμίζει τα λειτουργικά φορτία όπως αυτά που απαιτούνται κατά την εναπόθεση σωλήνων στον πυθμένα [5]. Είναι εύλογο λοιπόν να συμπεράνει κανείς πως τα συστήματα αγκυρώσεων είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργικότητα του συνόλου των θαλασσίων κατασκευών. Ο τύπος της αγκύρωσης που επιλέγεται σε κάθε περίπτωση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τρεις παραμέτρους που σχετίζονται πρωτίστως με τον σκοπό αγκύρωσης της κατασκευής και τον τύπο της προς αγκύρωση κατασκευής. Είναι προφανές ότι οι δύο αυτοί παράμετροι είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι μεταξύ τους ενώ σημαντικό παράγοντα συνιστούν και οι επικρατούσες συνθήκες (κύματα, άνεμος κλπ) στη θέση όπου πρόκειται να αγκυρωθεί η κατασκευή [1].

Τα συστήματα αγκύρωσης μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες λαμβάνοντας υπόψιν διαφορετικό κριτήριο κάθε φορά. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής ωστόσο, θα πραγματοποιηθεί η διάκρισή τους σε τρεις βασικές κατηγορίες. Ειδικότερα, με κριτήριο τη διάρκεια της αγκύρωσης, διακρίνουμε τα προσωρινά συστήματα αγκύρωσης (temporary mooring systems) και τα μόνιμα συστήματα αγκύρωσης (permanent mooring systems). Επιλέγοντας ως κριτήριο το προφίλ και τη διαμόρφωση του εκάστοτε συστήματος αγκύρωσης, διακρίνουμε τα αλυσοειδή συστήματα αγκύρωσης (catenary mooring systems) και τα συστήματα αγκύρωσης υπό υψηλή προένταση (taut leg mooring systems). Τέλος, έχοντας ως γνώμονα τη δυνατότητα και τον τρόπο με τον οποίο επιτρέπουν σε μία πλωτή κατασκευή να μετακινηθεί, δεδομένων των διαφόρων εξωτερικών παραγόντων που επικρατούν στην περιοχή που πρόκειται αυτή να εγκατασταθεί, διακρίνουμε το

σύστημα των πολλαπλών κλάδων αγκύρωσης (spread multi-leg moorings) και το σύστημα αγκύρωσης ενός σημείου (single point moorings) [1,17].

### 3.1. Προσωρινά Συστήματα Αγκύρωσης (Temporary Mooring Systems)

Τα προσωρινά συστήματα αγκύρωσης αναφέρονται σε κατασκευές οι οποίες εγκαθίστανται για περιορισμένο χρονικό διάστημα στον τόπο λειτουργίας τους. Εξαιτίας της μικρής διάρκειας παραμονής τους, τα συστήματα αυτά κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνεται η επανεγκατάσταση και η τοποθέτησή τους και παραμένουν στο σημείο εγκατάστασης τους από μερικές ημέρες έως αρκετούς μήνες. Επιπρόσθετα, δεν είναι σχεδιασμένα να περιορίζουν τη μετατόπιση της κατασκευής σε ακραία εξωτερικά φαινόμενα όπως ισχυρές καταιγίδες, συνεπώς απαιτούνται προσαρμογές ώστε να καταφέρουν να αντισταθούν σε αντίστοιχα φαινόμενα [1].

Τα προσωρινά συστήματα πρόσδεσης είναι κατάλληλα για κατασκευές όπως: γεωτρητικά σκάφη (drilling ships) και πλωτές ημι-βυθιζόμενες πλατφόρμες (semi-submersibles) για ερευνητικούς σκοπούς, σκάφη εναπόθεσης σωλήνων στον πυθμένα (pipe laying vessels), φορηγίδες με γερανούς (crane vessels), πλωτά ξενοδοχεία (flotels), πλοία εφοδιασμού (logistics supply vessels) κ.ά.

### 3.2. Μόνιμα Συστήματα Αγκύρωσης (Permanent Mooring Systems)

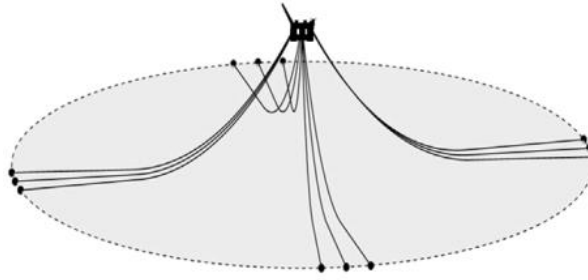
Τα μόνιμα συστήματα αγκύρωσης, σε σχέση με τα προσωρινά, αναφέρονται σε κατασκευές που παραμένουν στον τόπο εγκατάστασης και λειτουργίας τους καθ' όλο τον κύκλο ζωής τους. Ανάλογα με τη διάρκεια ζωής της αγκυρωμένης κατασκευής, το σύστημα δύναται να παραμείνει στο σημείο εγκατάστασης του από αρκετά χρόνια έως αρκετές δεκαετίες. Στην πλειοψηφία τους, τα συστήματα αυτά δεν είναι κατασκευασμένα για περίπτωση επανατοποθέτησης και έτσι σχεδιάζονται ώστε να αντιστέκονται σε ακραία δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Η διάρκεια ζωής των μόνιμων συστημάτων χωρίς τον κίνδυνο εμφάνισης φαινομένων κόπωσης κυμαίνεται από 20 έως 30 έτη [1].

Τα μόνιμα συστήματα πρόσδεσης είναι κατάλληλα για κατασκευές όπως: δεξαμενόπλοια (tankers) και πλωτές ημι-βυθιζόμενες πλατφόρμες (semi-submersibles) που λειτουργούν ως πλωτά συστήματα εξόρυξης, πλατφόρμες SPAR, πλωτοί τερματικοί σταθμοί (floating terminals), πλωτοί κυματοθραύστες (floating breakwaters) κ.ά.

### 3.3. Αλυσοειδή Συστήματα Αγκύρωσης (Catenary Mooring Systems)

Το σύστημα αγκύρωσης με αλυσοειδείς γραμμές (catenary) αποτελεί το πιο συνηθισμένο σύστημα αγκύρωσης ιδίως για ρηχά και ενδιάμεσου βάθους, νερά. Στη θέση στατικής ισορροπίας, όπως φαίνεται στην εικόνα (1), μέρος της γραμμής αγκύρωσης επικάθεται στον πυθμένα της θάλασσας. Εξαιτίας της βαρύτητας, οι γραμμές αγκύρωσης μεταξύ της πλωτής μονάδας και του θαλάσσιου πυθμένα αποτυπώνουν το σχήμα της αλυσοειδούς καθώς δέχονται την επίδραση του βάρους τους και μόνο, με αποτέλεσμα να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για την αντιμετώπιση της στατικής μετατόπισης και των δυναμικών κινήσεων του πλωτού αγκυρωμένου σώματος. Κατά συνέπεια, τα μήκη των γραμμών πρέπει να είναι μεγαλύτερα από το βάθος του νερού και

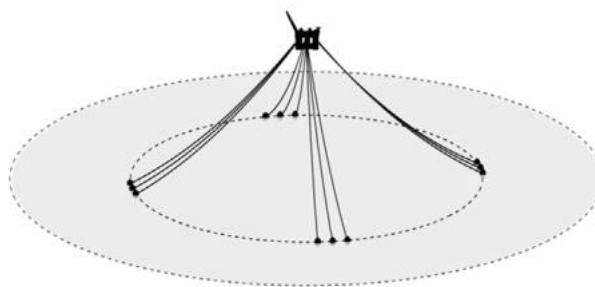
επιπρόσθετα, τα σημεία αγκύρωσης στον πυθμένα σε ένα σύστημα αγκύρωσης αλυσοειδούς υπόκεινται σε οριζόντιες δυνάμεις [17].



Σχήμα (1): Αλυσοειδές Σύστημα Αγκύρωσης [17].

### 3.4. Συστήματα Αγκύρωσης υπό Υψηλή Προένταση (Taut Leg Mooring Systems)

Το σύστημα αγκύρωσης υπό υψηλή προένταση δεν διαθέτει σημεία στη γραμμή που εφάπτονται στον πυθμένα, αλλά οι γραμμές αγκύρωσης είναι τεντωμένες από την άγκυρα στον πυθμένα έως την πλωτή κατασκευή που αγκυρώνεται. Μια τυπική διάταξη του συγκεκριμένου συστήματος αγκύρωσης παρουσιάζεται στο σχήμα (2). Η γωνία μεταξύ της γραμμής και του πυθμένα κυμαίνεται μεταξύ 30 και 40 μοιρών [17]. Ακόμη, το παρόν σύστημα λόγω της διαμόρφωσής του, απαιτεί λιγότερο υλικό στις γραμμές αγκύρωσης σε σχέση με το σύστημα της αλυσοειδούς. Τα σημεία αγκύρωσης στον πυθμένα σε ένα σύστημα αγκύρωσης τεντωμένης γραμμής πρέπει να είναι σχεδιασμένα να αντέχουν και σε οριζόντιες και σε κατακόρυφες φορτίσεις. Σε αυτή την περίπτωση, οι απαιτήσεις για την αντιμετώπιση της ημι-στατικής μετατόπισης και των δυναμικών κινήσεων του πλωτού αγκυρωμένου σώματος ικανοποιούνται εξαιτίας της ελαστικότητας των γραμμών [17]. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή του συστήματος αγκύρωσης τεντωμένης γραμμής προτιμάται σε βαθύ νερό ενώ δεν ενδείκνυται σε μικρά βάθη καθώς είναι υπερβολικά δύσκαμπτο αυξάνοντας κατακόρυφες τάσεις στις γραμμές.



Σχήμα (2): Σύστημα Αγκύρωσης υπό Υψηλή Προένταση [17].

### 3.5. Συστήματα Αγκύρωσης Πολλαπλών Κλάδων (Spread Multi-Leg Mooring Systems)

Τα συστήματα αγκύρωσης πολλαπλών κλάδων αποτελούν μία φυσική επέκταση της παραδοσιακής μεθόδου αγκύρωσης των πλοίων. Πολλές προεντεταμένες γραμμές αγκύρωσης βρίσκονται διατεταγμένες γύρω από την υπεράκτια κατασκευή περιορίζοντας τις κινήσεις της, όπως φαίνεται στην εικόνα (1). Η κινηματική συμπεριφορά των κλάδων αγκύρωσης εξαρτάται σε μικρό βαθμό από τη διεύθυνση του κυματισμού με αποτέλεσμα η χρήση του συστήματος αγκύρωσης πολλαπλών κλάδων να βρίσκει εφαρμογή ακόμα και στα πιο τρικυμώδη νερά. Ακόμη, το συγκεκριμένο σύστημα είναι ευέλικτο καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε βάθος νερού. Οι γραμμές συνδέονται με την κατασκευή με τη χρήση βαρούλκων και με τον πυθμένα με άγκυρες.

Κατά το σχεδιασμό της διάταξης του συστήματος, η κατεύθυνση του καθορίζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Ένα τέτοιο σύστημα είναι απλό, οικονομικό και δεν απαιτεί πολύπλοκα μηχανικά συστήματα περιστροφής. Για την επίτευξη μεγαλύτερης ακαμψίας, ο κλάδος αγκύρωσης θα πρέπει να αποτελείται από βαρύτερο τμήμα στο κάτω μέρος – τον πυθμένα – και ελαφρύτερο κοντά στην επιφάνεια του νερού. Οι τάσεις που εφαρμόζονται στους κλάδους, οι οποίοι αποτελούν το μέσο εφαρμογής δυνάμεων συγκράτησης της υπεράκτιας κατασκευής σε επιτρεπτά όρια, οφείλονται στο βάρος του καλωδίου ή/και στις ελαστικές του ιδιότητες [18].

Το υλικό από το οποίο αποτελούνται συνήθως οι γραμμές αγκύρωσης στο σύστημα πολλαπλών κλάδων είναι αλυσίδα, συρματόσκοινο ή συνδυασμός και των δύο. Στην περίπτωση της αλυσίδας, τα χαρακτηριστικά της αλυσοειδούς των γραμμών παρέχουν ευκαμψία στο σύστημα. Τέλος, τα συστήματα αγκύρωσης πολλαπλών κλάδων εφαρμόζονται τόσο σε προσωρινές όσο και σε μόνιμες εφαρμογές αγκυρώσεων, όπως τα πλωτά συστήματα παραγωγής (floating production) [1].



Εικόνα (1): Πλοίο εφοδιασμένο με σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης πετρελαίου (FPSO) αγκυρωμένο με σύστημα πολλαπλών κλάδων [18].

### 3.6. Συστήματα Αγκύρωσης ενός Σημείου (Single Point Mooring Systems)

Τα συστήματα αγκυρώσεων σε ένα σημείο τέθηκαν σε εφαρμογή από τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Πρόκειται για ένα σύστημα που εφαρμόζεται κυρίως σε πλωτό σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης, και βρίσκεται στην πλώρη του σκάφους και πάνω σε αυτό προσδένονται οι κλάδοι αγκύρωσης. Το σύστημα αγκύρωσης μιας γραμμής έχει την ικανότητα να αντιστέκεται σε μεγάλες μεταβολές της θέσης της κατασκευής που αγκυρώνει και προκαλούνται εξαιτίας των εξωτερικών φορτίων του ανέμου, των θαλασσίων κυμάτων και των ρευμάτων. Παρουσιάζει μεγάλη προσαρμοστικότητα στη λειτουργία του σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες, ωστόσο η σχεδίαση και κατασκευή του είναι δύσκολη και αρκετά δαπανηρή. Οι υπεράκτιες κατασκευές που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους συστήματα είναι οι μονάδες σε μορφή πλοίου και μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες:

1. Σταθερός πύργος (Fixed tower): Το σύστημα αγκύρωσης ενός σημείου με σταθερό πύργο (fixed tower) αποτελεί μια σχετικά απλή μέθοδο αγκύρωσης ενός πλωτού συστήματος. Μεταξύ του σκάφους και του πύργου χρησιμοποιούνται πλωτοί σωλήνες για τη μεταφορά πετρελαίου. Στον πύργο βρίσκεται ενσωματωμένο ένα έδρανο το οποίο επιτρέπει στο τμήμα που είναι συνδεδεμένο με τους σωλήνες να περιστρέφεται, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ του πλωτού και του πύργου. Ένα τυπικό παράδειγμα εφαρμογής συστήματος αγκύρωσης ενός σημείου με σταθερό πύργο απεικονίζεται στην εικόνα (2). Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής δεν ενδείκνυται για μεγάλα βάθη νερού [5].
2. Συνδυασμός ανωστικού σώματος με αλυσειδείς γραμμές αγκύρωσης (CALM buoy): Σε ένα σύστημα CALM (Catenary Anchor Leg Mooring), χρησιμοποιείται ένα μόνιμα αγκυρωμένο ανωστικό σώμα (σημαντήρας) αντί για τον σταθερό πύργο, σε συνδυασμό με πλωτούς, εύκαμπτους σωλήνες για τη μεταφορά του πετρελαίου, όπως φαίνεται στην εικόνα (3). Στην κορυφή του σώματος, υπάρχει μηχανισμός που επιτρέπει στην αγκυρωμένη πλωτή κατασκευή να περιστρέφεται προς το κύμα ή τον άνεμο χωρίς να απαιτείται περιστροφή του σημαντήρα. Το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βαθύ νερό με τις πιθανότητες σύγκρουσης να είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες του συστήματος σταθερού πύργου, εντούτοις έχει μεγάλο κόστος και η συντήρηση ή η επισκευή του σε περίπτωση σύγκρουσης είναι αρκετά δαπανηρή [5].
3. Αγκύρωση μέσω Πυργίσκου (Turret Mooring): Το πλοίο της εικόνας (4) αγκυρώνεται μέσω της ύπαρξη πυργίσκου (turret), μιας συσκευής η οποία ενσωματώνεται απευθείας στο πλοίο και στερεώνεται μόνιμα στον πυθμένα μέσω ενός συστήματος πρόσδεσης, συνήθως με αλυσίδες. Ο πυργίσκος περιέχει ένα σύστημα έδρασης που επιτρέπει στο σκάφος να περιστρέφεται γύρω από το σταθερό γεωστατικό τμήμα του πυργίσκου. Το σύστημα αγκύρωσης με πυργίσκο μπορεί να συνδυαστεί με ένα σύστημα μεταφοράς ρευστών που επιτρέπει τη σύνδεση υποθαλάσσιων σωλήνων με την υπεράκτια μονάδα. Οι πυργίσκοι μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κύριους τύπους: μόνιμοι και αποσπώμενοι. Ο πρώτος είναι μόνιμα ενσωματωμένος στο πλωτό σκάφος. Στη δεύτερη περίπτωση, ένα τμήμα του καθίσταται ικανό να αποσυνδεθεί σε περίπτωση υπέρβασης ορισμένων περιβαλλοντικών συνθηκών σχεδιασμού, για παράδειγμα, σε περίπτωση σοβαρών προειδοποιήσεων για τυφώνες ή σε πολιτικό κλίμα [5].
4. Άλλες κατηγορίες συστήματος SPM: Η SALM (Single Anchor Leg Mooring) buoy, η ALP (Articulated Loading Platform) και η SAL (Single Anchor Loading) [5]. Τυπικά παραδείγματα εφαρμογής των συστημάτων αγκύρωσης SALM και ALP απεικονίζονται στις εικόνες (5) και (6) αντίστοιχα.



*Εικόνα (2): Πλοίο εφοδιασμένο με σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης πετρελαίου (FPSO) αγκυρωμένο με σύστημα ενός σημείου με σταθερό πύργο [18].*



*Εικόνα (3): Πλοίο εφοδιασμένο με σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης πετρελαίου (FPSO) αγκυρωμένο με συνδιασμό ανωστικού σώματος και αλυσσιδών γραμμών αγκύρωσης [18].*



*Εικόνα (4): Πλοίο εφοδιασμένο με σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης πετρελαίου (FPSO) αγκυρωμένο μέσω εξωτερικού πυργίσκου [18].*



*Εικόνα (5): Εγκατάσταση συστήματος αγκύρωσης ενός σημείου τύπου SALM [18].*





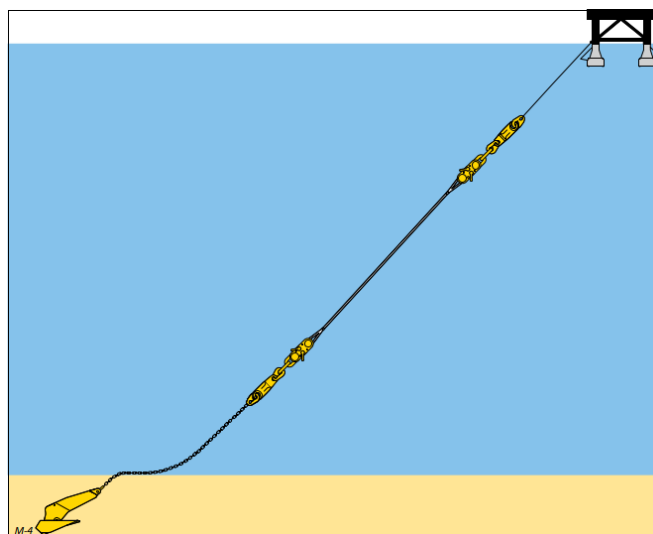
Εικόνα (6): Πλοίο αγκυρωμένο μέσω συστήματος ALP και έτοιμο για την φόρτωση πετρελαίου [18].

#### 4. Γραμμές Αγκύρωσης (Mooring Lines)

Μια τυπική γραμμή αγκύρωσης απαρτίζεται από τρία βασικά μέρη. Αυτά είναι:

1. Το υλικό κατασκευής
2. Οι σύνδεσμοι
3. Το ανωστικό σώμα (σε ορισμένες περιπτώσεις)
4. Η άγκυρα

Ανάλογα με τις προδιαγραφές της εκάστοτε εφαρμογής αλλά και τις απαιτήσεις στη χωρητικότητα, το μέγεθος και το βάρος, διατίθεται μια μεγάλη ποικιλία υλικών, συνδέσμων και αγκυρών ώστε να εξυπηρετείται καλύτερα ο σκοπός της αγκύρωσης. Στη συνέχεια, τα τρία αυτά μέρη θα αναλυθούν εκτενώς. Μια αναπαράσταση μιας τυπικής γραμμής αγκύρωσης φαίνεται στο σχήμα (3).



Σχήμα (3): Τυπική γραμμή αγκύρωσης [15].



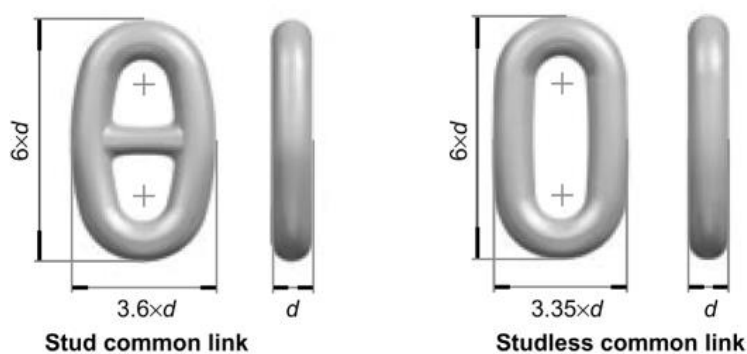
## 4.1. Υλικά

Οι γραμμές αγκύρωσης κατασκευάζονται από αλυσίδα, συρματόσχοινο, σκοινί από συνθετικές ίνες, ή συνδυασμό των παραπάνω, με στόχο να είναι ισχυρές και ανθεκτικές ώστε να διατηρούν κατά το δυνατό την αγκυρωμένη κατασκευή στη θέση της και ύστερα εκείνη να εξυπηρετεί τον σκοπό της. Η επιλογή υλικού εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων όπως το βάθος του νερού, τις επικρατούσες συνθήκες στην περιοχή, το χρονικό διάστημα αγκύρωσης καθώς και τις απαιτήσεις λειτουργίας που επιβάλλονται.

### 4.1.1. Αλυσίδα (Chain)

Το πιο ευρέως διαδεδομένο υλικό κατασκευής των γραμμών αγκύρωσης είναι η αλυσίδα, η οποία συναντάται σε πλήθος διαφορετικών διαμέτρων και βαθμών. Συνήθως, οι αλυσίδες κατασκευάζονται σε μήκη των 27,5m που είναι γνωστές σαν shots. Σε πολλές όμως περιπτώσεις, είναι επιθυμητό να έχουμε αλυσίδα σε συνεχές μήκος, για κάθε κλάδο αγκύρωσης, έτσι ώστε να αποφεύγεται η ανάγκη για ακριβές συνδέσεις με κρίκους και σχετικά προβλήματα κόπωσης που έχουν παρατηρηθεί στο χώρο αυτό. Διαφορετικά, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν συνδετικοί κρίκοι με ικανή διάρκεια ζωής, χωρίς κόπωση [1].

Για τις αλυσίδες που χρησιμοποιούνται στις υπεράκτιες εφαρμογές, αυτές χαρακτηρίζονται συνήθως από μεγάλο μέγεθος με τη διάμετρό τους να κυμαίνεται από 70mm έως 200mm. Στη βιομηχανικές εφαρμογές σε απόσταση από την ακτή (offshore industry) διακρίνουμε δύο βασικές μορφές αλυσίδας: την studlink και την studless.



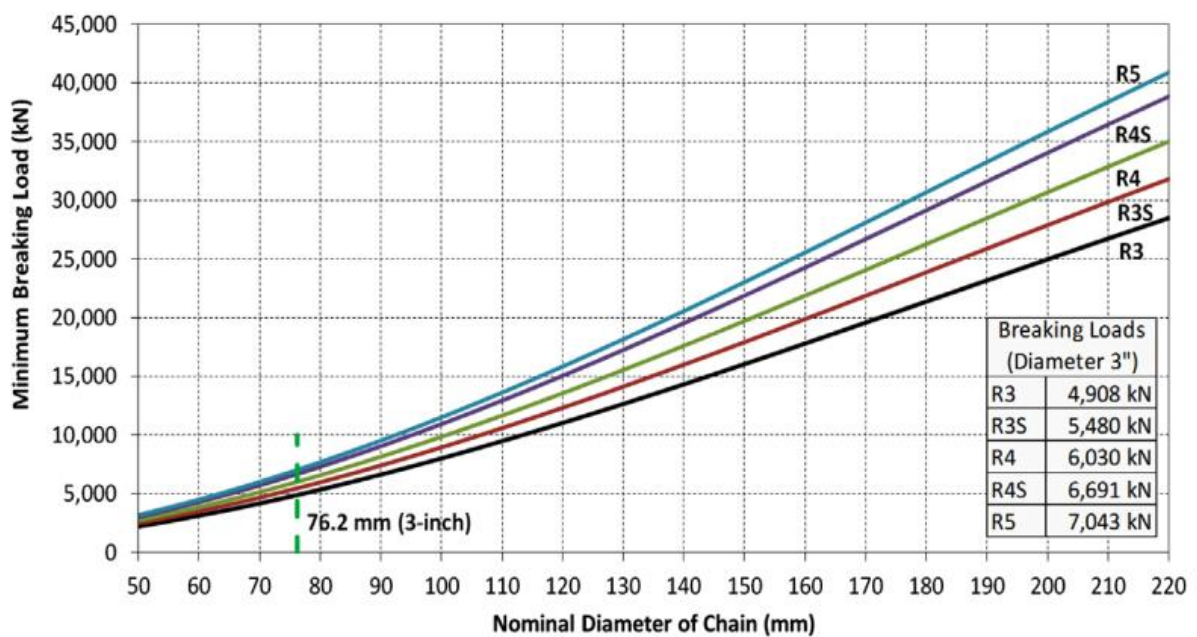
Σχήμα (4): Τυπικές μορφές αλυσίδας [5].

Όπως φαίνεται στο σχήμα (4), η αλυσίδα studlink αποτελείται από οβάλ κρίκους (oval link), οι οποίοι φέρουν στη μέση ένα κεντρικό, χονδρό καρφί (stud), κάθετο στον κεντρικό άξονα. Ο πείρος στο κέντρο χρησιμοποιείται για να διατηρεί το αρχικό σχήμα του κρίκου και να εμποδίζει την αλυσίδα να μπερδευτεί όταν μαζεύεται. Είναι η συνηθέστερη μορφή αλυσίδας που χρησιμοποιείται στα προσωρινά συστήματα αγκύρωσης τα οποία πρόκειται να ανασυρθούν και να επανεγκατασταθούν πολλές φορές κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αυτού του είδους αλυσίδας συνιστούν οι πλωτές ημι-βυθισμένες κατασκευές για εξερευνητικούς σκοπούς ενώ πρόκειται και για το συνηθέστερο τύπο αλυσίδας που χρησιμοποιείται στα πλοία [5].

Σε αντίθεση με την αλυσίδα studlink, η αλυσίδα studless αποτελείται από οβάλ κρίκους χωρίς να φέρει το ενδιάμεσο καρφί. Παρουσιάζει μειωμένο βάρος (περίπου 10%) αλλά φέρει την ίδια

αντοχή σε θραύση σε σχέση με την αλυσίδα studlink. Επιπρόσθετα, στα πλεονεκτήματά της συγκαταλέγονται η αποφυγή χαλαρών κεντρικών καρφιών, η απουσία ρωγμών λόγω κόπωσης στη συγκόλληση των κεντρικών καρφιών ενώ η κατασκευή και η επιθεώρηση θεωρούνται πιο εύκολες. Συνήθως χρησιμοποιείται σε μόνιμα συστήματα αγκύρωσης όπως είναι τα FPSO/FSO και οι πλατφόρμες Spar [5].

Οι αλυσίδες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αγκύρωσης των υπεράκτιων κατασκευών χαρακτηρίζονται από διάφορους βαθμούς όπως R3, R3S, R4, R4S και R5. Σημειώνεται ότι βαθμός R5 υποδηλώνει τη μεγαλύτερη αντοχή. Αυτοί οι πέντε βαθμοί προσδιορίστηκαν σταδιακά από τον Νορβηγικό Νηογνώμονα (DNV) [9] ενώ σήμερα περιλαμβάνονται στους κανονισμούς και των υπόλοιπων Νηογνωμόνων. Στο σχήμα (5) παρουσιάζεται το ελάχιστο φορτίο θραύσης ως συνάρτηση της ονομαστικής διαμέτρου της αλυσίδας για κάθε έναν από τους πέντε βαθμούς ενώ στον πίνακα (1) παρουσιάζονται οι μηχανικές τους ιδιότητες σύμφωνα με το ISO 20438.



Σχήμα (5): Διάγραμμα ελάχιστου φορτίου θραύσης ως συνάρτηση της ονομαστικής διαμέτρου της αλυσίδας για κάθε έναν από τους πέντε βαθμούς [5].

Grade	Minimum yield strength N/mm <sup>2</sup>	Minimum tensile strength N/mm <sup>2</sup>	Minimum elongation %	Minimum reduction in area %	Average impact energy J				
					Temperature °C	Base material		Weld	
						Average	Single value	Average	Single value
R3	410	690	17	50	0	60	45	50	38
					-20	40	30	30	23
R3S	490	770	15	50	0	65	49	53	40
					-20	45	34	33	25
R4	580	860	12	50	-20	50	38	36	27
R4S	700	960	12	50	-20	56	42	40	30
R5	760	1000	12	50	-20	58	44	42	32

Πίνακας (1): Μηχανικές Ιδιότητες των R3, R3S, R4, R4S και R5 βαθμών [7].

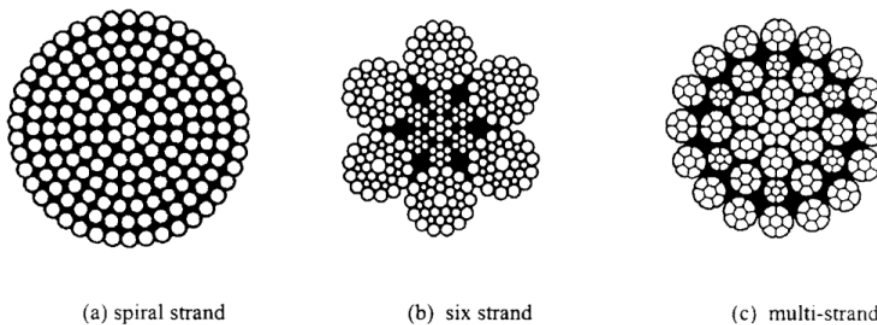
Τέλος, για λόγους πληρότητας αξίζει να σημειωθεί ότι πριν την αλυσίδα βαθμού R3 υπήρχε η αλυσίδα τύπου ORQ (Offshore Rig Quality). Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (American Petroleum Institute ή API) προσδιορίζει τις απαιτήσεις σε υλικά καθώς και τις διαδικασίες κατασκευής και ελέγχου για αλυσίδες studlink τύπου ORQ με ελάχιστη αντοχή σε εφελκυσμό ίση με 641 MPa. Γενικά, αυτού του τύπου οι αλυσίδες παρουσιάζουν ελαφρώς χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες από τις αντίστοιχες για αλυσίδες βαθμού R3, ωστόσο είχαν χρησιμοποιηθεί ευρέως ικανοποιώντας τις εκάστοτε απαιτήσεις ικανοποιητικά [8].

Αναφορικά με τις αλυσίδες που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες αγκύρωσης των πλοίων, αυτές έχουν τέσσερις ποιότητες (grades) χάλυβα ορισμένες ως βαθμού 1, βαθμού 2, βαθμού 3 και βαθμού 4 (K4). Οι συγκεκριμένες αλυσίδες κατασκευάζονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές ενός οργανισμού πιστοποίησης (Classification Societies). Ειδικότερα [1]:

1. Η αλυσίδα βαθμού 1, πλέον δεν κατασκευάζεται.
2. Η αλυσίδα βαθμού 2, δεν συνιστάται για μεγάλοι μεγέθους εγκαταστάσεις αγκυρώσεων.
3. Η αλυσίδα βαθμού 3, είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη και το κόστος της ανά μονάδα μάζας, είναι οριακά μεγαλύτερο, από την αλυσίδα βαθμού 2, η οποία επιπλέον είναι σημαντικά βαρύτερη για ένα συγκριτικά παρόμοιο φορτίο θραύσης.
4. Η μεγαλύτερη αντοχή, σε αναλογία με την μάζα, παρέχεται από τις αλυσίδες βαθμού K4. Συνήθως, αλυσίδες βαθμού K4 χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αγκυρώσεων που σχεδιάζονται για αυστηρές συνθήκες επιβίωσης, που από την φύση τους είναι μεγάλου μεγέθους.

#### 4.1.2. Συρματόσχοινα (Wire Ropes)

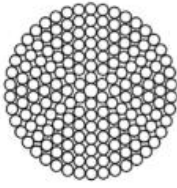
Τα συνήθη συρματόσχοινα που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αγκύρωσης των υπεράκτιων κατασκευών διακρίνονται κατασκευαστικά σε τρεις τύπους: σπειροειδούς νήματος (spiral strand), έξι νημάτων (six strand) και πολλαπλών νημάτων (multi-strand). Αναλυτικότερα [10],



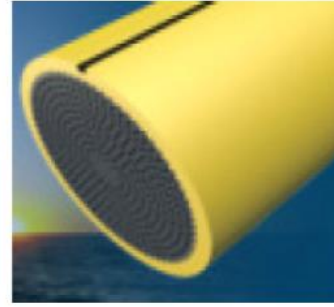
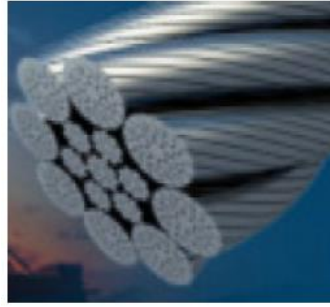
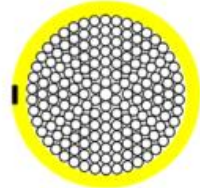
Σχήμα (6): Τύποι συρματόσχοινων [10].

### Low/Non rotating

Spiral strand



Sheathed spiral strand



Σχήμα (7): Συρματόσχοινο σπειροειδούς νήματος χωρίς και με εξωτερική επένδυση [5].

1. Τύπου σπειροειδούς νήματος: Γεωμετρικά, ίσως πρόκειται για την απλούστερη κατασκευή σχοινιού αφού αποτελείται από μόνο ένα νήμα (ομόκεντρα ελικοειδή στρώματα σύρματος) (σχήμα (6), (a)). Τα εξωτερικά στρώματα ενός τέτοιου τύπου συρματόσχοινου, που αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της διατομής, έχουν γενικά σύρματα ίδιας διαμέτρου, αντίθετων ελικοειδών μορφών και ίδια ή παρόμοια γωνία έλικας (αλλά κατά συνέπεια διαφορετικό ελικοειδές βήμα ή μήκος στρώσης) με ένα πυρήνα συχνά γεωμετρικά παρόμοιο με εκείνον ενός συμβατικού σχοινιού (με μικτά μεγέθη σύρματος, αλλά με κοινό βήμα και μορφή). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός συρματόσχοινου τύπου σπειροειδούς νήματος συνοψίζονται ακολούθως:
  - a) Υψηλή αντοχή και ακαμψία για δεδομένη διάμετρο και ποιότητα σύρματος.
  - b) Υψηλός βαθμός ροπής ισορροπίας.
  - c) Αντοχή σε φαινόμενα διάβρωσης, αλλά περιορισμένη αντοχή σε εφελκυσμό (ειδικά εάν χρησιμοποιούνται διαμορφωμένα σύρματα σε εφαρμογές εξόρυξης).
  - d) Ευκολότερη επένδυση σε πολυμερές και άρα μακροπρόθεσμη αντιδιαβρωτική προστασία λόγω της κυκλικής, εξωτερικής επιφάνειας του σχοινιού. Γι αυτό το λόγο θεωρούνται καταλληλότερα για μόνιμα συστήματα αγκύρωσης.
  - e) Περιορισμένη ανεκτικότητα στην επιβεβλημένη συστροφή.
  - f) Δαπανηρή κατασκευή λόγω του αριθμού των ξεχωριστών εργασιών που απαιτούνται για την κατασκευή των στρωμάτων και του υψηλού κόστους κεφαλαίου του απαιτούμενου εξοπλισμού μεγάλης κλίμακας.
2. Τύπου έξι νημάτων: συρματόσχοινα τύπου έξι (ή οκτώ) νημάτων (σχήμα (6), (b)) κατασκευάζονται ουσιαστικά σε δύο στάδια: σύρματα συστρέφονται μεταξύ τους σε ένα ή περισσότερα επίπεδα για να σχηματίσουν νήματα (τα οποία έχουν ίσο μήκος στρώματος για να επιτρέψουν σε διαφορετικές διαμέτρους σύρματος να συνδιαστούν μαζί), και ύστερα τα έξι (ή οκτώ) προκύπτοντα νήματα τυλίγονται ελικοειδώς γύρω από έναν κεντρικό πυρήνα. Διακρίνουμε δύο κύριες κατηγορίες πυρήνων: πυρήνας από συνθετικές ίνες (fibre core) όπου χαρακτηρίζεται από ευκολία στη συναρμολόγηση. Και πυρήνας χάλυβα (steel) γνωστός και ως IWRC (Independent Wire Rope Core) που παρέχει υψηλότερη αντοχή και υψηλότερη αξονική, καθώς και εγκάρσια ακαμψία και χρησιμοποιείται συνήθως στις υπεράκτιες αγκυρώσεις. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός συρματόσχοινου τύπου έξι (ή οκτώ) νημάτων συνοψίζονται ακολούθως:
  - a) Υψηλή ανοχή σε προκύπτουσες βλάβες (damage tolerance). Δύναται να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές υπό υψηλο φορτίο.
  - b) Για κάθε δεδομένο τελικό φορτίο θραύσης, συνιστά την οικονομικότερη λύση.
  - c) Λόγω προβλημάτων στην επένδυση και των πιο λεπτών συρμάτων, δεν επιλέγονται γενικά σε εφαρμογές όπου η έκθεση στο θαλασσινό νερό αναμένεται να είναι μακροχρόνια.
  - d) Έχουν καλή ροπή ισορροπίας.

e) Ανεκτικότητα σε φαινόμενα στρέψης.

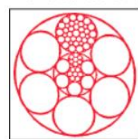
3. Τύπου πολλαπλών νημάτων: τέτοιου είδους συρματόσχοινα έχουν δύο ή περισσότερες στρώσεις νημάτων (σχήμα (6), (c)), των οποίων η μορφή και η διάταξη είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη ροπή ισορροπίας. Μερικές φορές, τα νήματα αυτών των σχοινίων συμπιέζονται (είτε με τράβηγμα είτε με κύλιση) προκειμένου να βελτιωθεί το εξωτερικό προφίλ του σχοινοῦ. Συνήθως, χρησιμοποιούνται σε υπεράκτιες εφαρμογές που απαιτούνται ευελιξία και ροπή ισορροπίας (fall crane ropes, diving bell hoist ropes). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός συρματόσχοινοῦ τύπου πολλαπλών νημάτων συνοψίζονται ακολούθως:
- a) Επαρκής ελαστικότητα κάμψης και αντοχή σε θλίψη.
  - b) Καλή ροπή ισορροπίας.
  - c) Κατώτερη αντοχή σε διάβρωση καθώς διαθέτουν μικρότερα, εξωτερικά σύρματα σε σχέση με άλλα σχοινιά παρόμοιας αντοχής τα οποία δε φέρουν επένδυση όπως τα συρματόσχοινα τύπου σπειροειδούς νήματος. Επομένως, αν και χρησιμοποιούνται σε μόνιμα συστήματα αγκύρωσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η διάρκεια ζωής της κατασκευής.
  - d) Λόγω των υψηλών τάσεων που αναπτύσσονται μεταξύ των νημάτων διαφορετικών επιπέδων, φαινόμενα κόπωσης τείνουν να αναπτύσσονται εσωτερικά σε αυτά τα σχοινιά οδηγώντας σε απώλεια αντοχής χωρίς εξωτερικά, ορατά σημάδια.
  - e) Σημαντικά πιο ακριβά σε σχέση με τα συμβατικά συρματόσχοινα τύπου έξι νημάτων με παρόμοιας αντοχή.

Συνεχίζοντας, πραγματοποιείται και μια ακόμη διάκριση μεταξύ των συρματόσχοινων. Έτσι, έχουμε συρματόσχοινα συμβατικού τύπου και συρματόσχοινα τύπου μηδενικής ροπής. Στην πρώτη περίπτωση, όλα τα νήματα τυλίγονται στην ίδια διεύθυνση, ελικοειδώς γύρω από τον πυρήνα. Οι απαιτούμενες προϋποθέσεις αντοχής και κόπωσης για το σχοινί, καθορίζουν τον αριθμό των νημάτων και συρμάτων σε κάθε σχοινί, π.χ. 6x36, 6x42, 6x54 [1]. Στην εικόνα (7) απεικονίζεται συρματόσχοινο 6x36 με κεντρικό πυρήνα χάλυβα, το οποίο αποτελείται από έξι εξωτερικά νήματα (branches) που το κάθε ένα από αυτά αποτελείται από τριάντα έξι σύρματα (wires). Αυτή η κατασκευή παράγει ροπή, καθώς αυξάνεται η τάση. Συνεπακόλουθα, είναι αναγκαία η χρήση swivels στα σημεία σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων. Swivels είναι τύπος κρίκων που χρησιμοποιείται για να αποσβένει περιστροφικές δυνάμεις στην άγκυρα. Από την άλλη μεριά, οι κατασκευές τύπου μηδενικής ροπής, προκαλούν το ενδιαφέρον για μόνιμες αγκυρώσεις επειδή εξαλείφουν την ανάγκη για swivels, εφ' όσον δεν παράγουν σημαντικές ροπές με τις αλλαγές της τάσης. Σ' αυτήν την κατασκευή, κάνουμε χρήση στρώσεων συρμάτων (δεσμών συρμάτων), τα οποία τυλίγονται σε αντίθετες διευθύνσεις, έτσι ώστε να επιτευχθούν τα χαρακτηριστικά της μηδενικής ροπής [1].

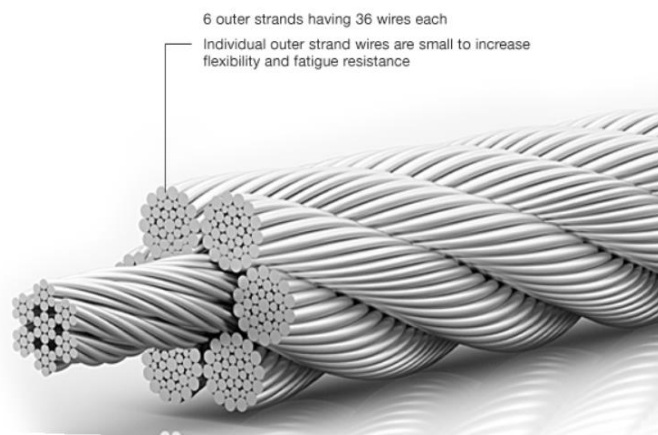


## Class 6×36 IWRC

Individual Construction:



6x36 Warr. Seale  
IWRC (Steel Core)



Εικόνα (7): Συρματόσχοινο κλάσης 6x36 [21].

Στα μόνιμα συστήματα αγκύρωσης, τα καλώδια από συρματόσχοινο καλύπτονται από ένα περίβλημα πολυαιθυλενίου ή πολυουραιθάνης ώστε να αυξάνεται η αντοχή τους σε φαινόμενα διάβρωσης. Το υλικό του περιβλήματος έχει συνήθως κίτρινο χρώμα εξασφαλίζοντας καλύτερη ορατότητα κάτω από τη θάλασσα (σχήμα (7)) ενώ χαρακτηρίζεται και από υψηλή πυκνότητα. Αναφορικά με τα σύρματα, αυτά είναι γαλβανισμένα με ή χωρίς κάποιο περίβλημα. Το εκάστοτε υλικό γεμίσματος που χρησιμοποιείται όπως για παράδειγμα ο ψευδάργυρος, καλύπτει τους εσωτερικούς χώρους μεταξύ των συρμάτων και ελαχιστοποιεί την ταχύτητα της διάβρωσης με την είσοδο του αλμυρού νερού πετυχαίνοντας εν τέλει ακόμη καλύτερη αντοχή σε διάβρωση [5]. Στον πίνακα (2) παρουσιάζεται η αντοχή σε διάβρωση διαφορετικών τύπων συρματόσχοινου όπως περιλαμβάνονται στα πρότυπα RP-2SK του Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου [11].

Galvanized 6- or 8-strand	6–8 years
Galvanized unjacketed spiral strand	10–12 years
Galvanized unjacketed spiral strand with zinc filler wires	15–17 years
Galvanized jacketed spiral strand	20–25 years
Galvanized jacketed spiral strand with zinc filler wires	30–35 years

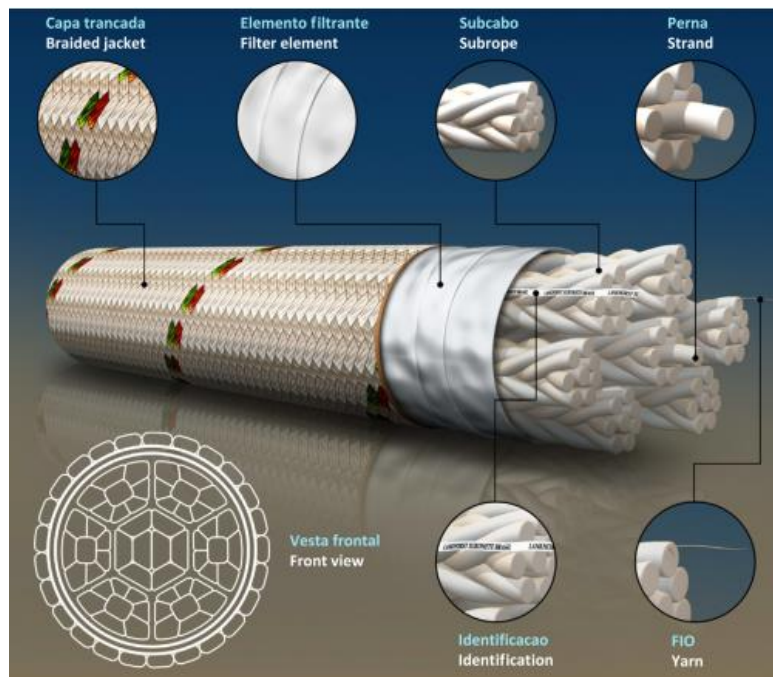
Πίνακας (2): Αντοχή σε διάβρωση διαφορετικών τύπων συρματόσχοινου κατά API [8].

### 4.1.3. Σχοινί από Πολυεστέρα (Fiber Ropes)

Σχοινιά από πολυεστέρα χρησιμοποιούνται εκτενώς σε μόνιμα συστήματα αγκύρωσης σε βαθύ νερό. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω του μικρού βάρους και συγχρόνως της μεγάλης ελαστικότητας που παρουσιάζουν ως υλικά. Η πρώτη φορά που σχοινί από πολυεστέρα αξιοποιήθηκε σε εφαρμογή αγκύρωσης σε βαθύ νερό ήταν το 1995 από την εταιρεία πετρελαίου Petrobras [12]. Επρόκειτο για

σχοινί 300m το οποίο εγκαταστάθηκε επιτυχώς σε μία γραμμή αγκύρωσης μιας πλατφόρμας στα εθνικά ύδατα της Βραζιλίας.

Όπως προαναφέρθηκε, τα σχοινιά από πολυεστέρα χαρακτηρίζονται από υψηλή ελαστικότητα η οποία επιτρέπει την εγκατάσταση συστημάτων αγκύρωσης υπό υψηλή προένταση σε βαθύ ακόμα και πολύ βαθύ νερό, αφού απορροφά τις επιβαλλόμενες δυναμικές κινήσεις κατά μήκος του κλάδου χωρίς να παράγει υπερβολικές δυναμικές τάσεις, οι οποίες προκαλούνται κυρίως από τις κινήσεις του σκάφους λόγω κυματισμών. Παράλληλα, σε ορισμένες περιπτώσεις η επιλογή τέτοιων σχοινιών μπορεί να οδηγήσει σε χρήση λιγότερων γραμμών αγκύρωσης για τις ίδιες απαιτήσεις λειτουργίας σε σύγκριση με ένα σύστημα αλυσίδας-συρματοσόχινου-αλυσίδας. Σήμερα, χάριν στη ύπαρξη σχοινιών από πολυεστέρα έχει διευρυνθεί το εύρος του βάθους του νερού όπου εγκαθίστανται Υπεράκτιες Κινητές Μονάδες Εξόρυξης (MODUs). Στα πλεονεκτήματα του πολυεστέρα συγκαταλέγονται ακόμα το χαμηλό κόστος, η χαμηλή, αξονική ακαμψία καθώς και οι εξαιρετικές ιδιότητες σε περιπτώσεις κόπωσης. Τέλος, αναφορικά με τον τρόπο παραγωγής, τα πολυεστερικά σχοινιά προκύπτουν από πολλά, μικρότερα “υποσχοινιά” (subropes) τοποθετημένα παράλληλα. Αυτά είναι τυλιγμένα με ένα φίλτρο (soil filter) για να εμποδίσουν την είσοδο χώματος αλλά και με ένα “κάλυμμα” (jacket) για προστασία έναντι της τριβής. Η εικόνα (8) αποδίδει σχηματικά τη δημιουργία ενός πυρήνα από δέσμες υποσχοινιών ώστε αυτός να αντέχει τα φορτία εφελκυσμού [5].



Εικόνα (8): Διαδικασία κατασκευής σχοινιού από πολυεστέρα [5].

#### 4.1.4. Σχοινί από Άλλα Συνθετικά Υλικά (Other Synthetic Ropes)

Ο πολυεστέρας βέβαια δεν είναι το μόνο συνθετικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σχοινιών αγκύρωσης. Υπάρχουν και άλλα συνθετικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μόνιμα ή προσωρινά συστήματα αγκύρωσης όπως το νάϊλον, το HMPE και το αραμίδιο. Ήδη από τη δεκαετία του 1970, μικρές γραμμές αγκύρωσης από νάϊλον και αραμίδιο χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία για την πρόσδεση οργάνων αγκυροβόλησης και σηματοδύρων πλοήγησης σε βαθύ νερό. Από την άλλη μεριά, το HMPE έχει χρησιμοποιηθεί σε MODUs ενώ σε

μόνιμα συστήματα εφαρμόζεται σε ειδικές περιπτώσεις. Περισσότερες πληροφορίες για τα προαναφερθέντα συνθετικά υλικά παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 4.1.5. Νάιλον (Polyamide Rope)

Το νάιλον είναι εξαιρετικά ελαστικό συγκριτικά με άλλους τύπους υλικών που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αγκυρώσεων. Είναι το ανθεκτικότερο καλώδιο από ίνες και αξιοποιείται σε εφαρμογές κατά τις οποίες υπάρχει απαίτηση για υψηλή ελαστικότητα. Σχοινί από νάιλον συναντάμε στα καταστρώματα αρκετών πλοίων, όπως φαίνεται στην εικόνα (9). Επιπρόσθετα αξίζει να σημειωθεί πως στο ρηχό νερό, ένα μήκος καλωδίου από νάιλον, μπορεί να ενταχθεί στους κλάδους αγκύρωσης για να απορροφήσει την ενέργεια από τη δυναμική της κατασκευής. Το νάιλον έχει αντοχή στο νερό, μειωμένη κατά 25% της αντοχής του σε χερσαίο περιβάλλον, σε αντίθεση με τα σχοινιά από πολυεστέρα, στα οποία δεν παρατηρείται μείωση της αντοχής κατά τη βύθισή τους [5].



Εικόνα (9): Σχοινί από νάιλον σε σύγχρονο πλοίο [22].

#### 4.1.6. HMPE (High Modulus Polyethylene Rope)

Το HMPE συνιστά το πολυαιθυλένιο υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Το υλικό αυτό παρουσιάζει ανώτερες ιδιότητες από τα υπόλοιπα συνθετικά υλικά όπως εξαιρετική αντοχή, αντίσταση τριβής, και ειδικό βάρος μικρότερο από αυτό του θαλασσινού νερού. Ακόμη, είναι ελαφρύτερο, πιο εύκολο στη διαχείριση ενώ έχει και μικρότερη διάμετρο συγκρινόμενο με σχοινί από πολυεστέρα για το ίδιο όριο θραύσης. Μεγέθυνση τμήματος σχοινιού από HMPE παρουσιάζεται στην εικόνα (10). Εντούτοις, η προμήθεια τέτοιων σχοινιών είναι αρκετά δαπανηρή περιορίζοντας έτσι τις εφαρμογές τους. Βέβαια, οι συμβατικές ποιότητες του HMPE είναι επιρρεπείς σε φαινόμενα ερπυσμού. Ερπυσμός είναι το φαινόμενο, κατά το οποίο σε στερεό σώμα – στην περίπτωση μας, το καλώδιο – εκδηλώνεται αργή και συνεχής παραμόρφωση κατά την άσκηση δύναμης, παρότι η οποία το καταπονεί είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού. Το συγκεκριμένο φαινόμενο αποτελεί πρόβλημα, όχι τόσο σε προσωρινά, όσο σε μόνιμα συστήματα αγκύρωσης σε μεγάλα βάθη νερού. Ο ρυθμός ερπυσμού του HMPE δεν μειώνεται λογαριθμικά με το χρόνο συγκριτικά με άλλα

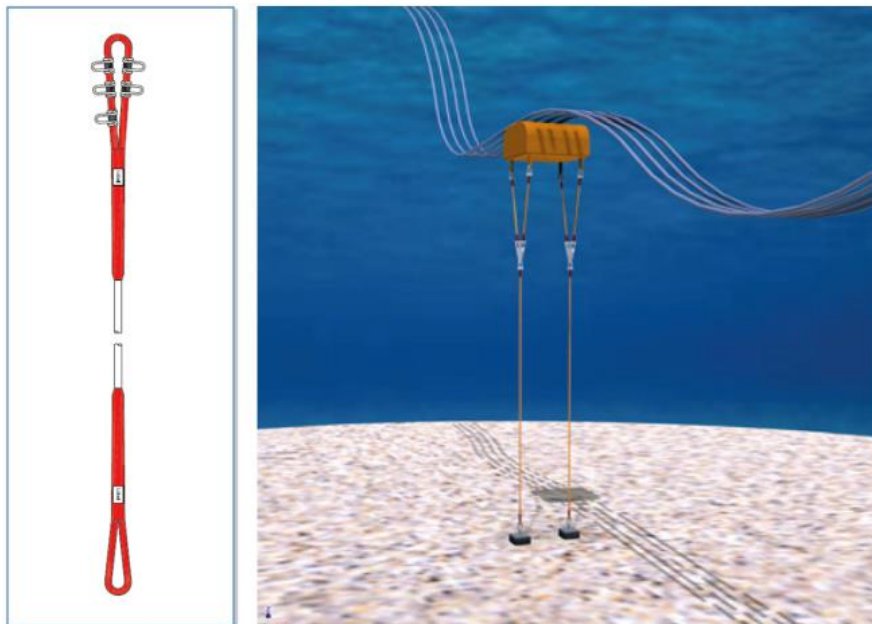


συνθετικά υλικά, αλλά υπάρχει πιθανότητα να αυξηθεί και δυνητικά να προκληθεί αστοχία στον κλάδο αγκύρωσης. Επίσης, ο ρυθμός ερπυσμού αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας [5].



Εικόνα (10): Συρματόσχοινο από HMPE [23].

Σε μια πρόσφατη εφαρμογή μόνιμου συστήματος αγκύρωσης σε ημι-βαθύ νερό, η χρήση σχοινιού από HMPE της εταιρείας Lankhorst παρουσίασε αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των αλυσίδων και των χαλύβδινων συρματόσχοινων. Αναλυτικότερα, όντας ελαφρύτερο, το HMPE συνετέλεσε σε μείωση του μεγέθους του χρησιμοποιούμενου ανωστικού σώματος εξασφαλίζοντας έτσι πιο εύκολη διαδικασία εγκατάστασης. Συγχρόνως, περιορίσαν σημαντικά προβλήματα που σχετίζονται με τη διάβρωση και την κόπωση. Η διάταξη αυτού του συστήματος αγκύρωσης φαίνεται στο σχήμα (8) [13].



Σχήμα (8): Διάταξη του συστήματος αγκύρωσης από HMPE της εταιρείας Lankhorst [13].

#### 4.1.7. Αραμίδιο (Aramid)

Τα σχοινιά από αραμίδιο, όπως αυτό της εικόνας (11), παρουσιάζουν ιδιότητες αντοχής και ακαμψίας συγκρίσιμες με εκείνες του μεταλλικού συρματόσχοινου. Χρησιμοποιείται περιστασιακά σε εφαρμογές αγκυρώσεων, καθώς ενέχει κίνδυνος αστοχίας λόγω κόπωσης από αξονική συμπίεση του υλικού, με συνεπαγόμενη αστοχία του σχοινού αν οι ίνες συμπιεστούν. Ιστορικά, η πρώτη προσπάθεια χρήσης σχοινού από αραμίδιο στο σύστημα αγκύρωσης του πλοίου Ocean Builder I στα 1045ft βάθος νερού στην περιοχή του κόλπου του Μεξικού, πραγματοποιήθηκε το 1983. Οι γραμμές είχαν εγκατασταθεί αρκετούς μήνες πριν την άφιξη του πλοίου με τρόπο που τους επέτρεπε να χαλαρώνουν και να περιστρέφονται. Η ενέργεια αυτή προκάλεσε κόπωση λόγω αξονικής συμπίεσης στα σημεία που συνδέονταν με τον πυθμένα, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του σχοινού. Όταν τελικά το πλοίο έφτασε και αγκυρώθηκε, τα σχοινιά τεντώθηκαν για να τοποθετηθούν οι άγκυρες και ορισμένα εξ αυτών έσπασαν. Βέβαια, μια μέθοδος αντιμετώπισης του φαινομένου αυτού, αποτελεί η καλύτερη σχεδίαση του σχοινού, διατηρώντας μια τάση στη γραμμή που δεν επιτρέπει στις ίνες να συμπιεστούν [14].



Εικόνα (11): Σχοινί από αραμίδιο [24].

#### 4.1.8. Σύγκριση Υλικών

Λαμβάνοντας υπόψιν όσα προαναφέρθηκαν σχετικά με τα διαφορετικά υλικά κατασκευής των γραμμών αγκύρωσης, διαπιστώνουμε πως οποιαδήποτε επιλογή έχει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Συνοψίζοντας [1]:

1. Όλες οι γραμμές αγκύρωσης του συστήματος από αλυσίδα: Η αλυσίδα έχει επιδείξει αντοχή στις offshore εγκαταστάσεις. Παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στην τριβή με τον πυθμένα και συνεισφέρει σημαντικά στο να εξυπηρετεί η άγκυρα τον σκοπό της. Όμως σε βαθιά νερά, ένα τέτοιο σύστημα αγκύρωσης, επιβάλλει περιορισμούς στα φορτία της πλωτής κατασκευής, που οφείλονται στο βάρος του συστήματος αγκύρωσης και στις υψηλές απαιτήσεις της προέντασης.

2. Όλες οι γραμμές αγκύρωσης του συστήματος από συρματόσχοινο: Το συρματόσχοινο είναι ελαφρύτερο από την αλυσίδα, έτσι παρέχεται μεγαλύτερη δύναμη επαναφοράς για δεδομένη προένταση. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, όταν έχουμε να κάνουμε με βαθύτερα νερά, γιατί τα δυναμικά φαινόμενα έχουν μεγαλύτερη επίδραση για μεγαλύτερα βάθη νερού. Όμως, προς αποφυγήν του γεγονότος να χάσει η άγκυρα την στήριξή της, σ' ένα σύστημα αγκύρωσης από συρματόσχοινα, απαιτούνται πολύ μακρύτερες γραμμές αγκύρωσης. Επιπλέον, ένα σοβαρό μειονέκτημα των γραμμών αγκύρωσης από συρματόσχοινα, είναι η φθορά, η οποία οφείλεται στην μακράς διάρκειας τριβή, η οποία αναπτύσσεται κατά την επαφή της γραμμής με τον πυθμένα. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω, τέτοια συστήματα αγκύρωσης, με όλες τις γραμμές τους από συρματόσχοινα, δεν χρησιμοποιούνται για μόνιμες αγκυρώσεις.
3. Οι γραμμές αγκύρωσης του συστήματος ως συνδυασμός αλυσίδας και συρματόσχοινου: Σ' αυτό το σύστημα, το τμήμα της αλυσίδας συνδέεται με την άγκυρα. Έτσι, αφ' ενός παρέχεται καλύτερη αντοχή κατά την τριβή με τον πυθμένα και αφ' ετέρου το βάρος του τμήματος της αλυσίδας συνεισφέρει ώστε η άγκυρα να διατηρεί την ικανότητά της. Τμήμα της αλυσίδας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στο σημείο πρόσδεσης (fairlead) της κατασκευής, προς βελτίωση των ιδιοτήτων φθοράς/κόπωσης. Η σωστή επιλογή μηκών, συρματόσχοινου και αλυσίδας, προσφέρει τα πλεονεκτήματα των χαμηλότερων απαιτήσεων προέντασης με υψηλότερες δυνάμεις επαναφοράς, βελτιώνει τις ικανότητες της άγκυρας και παρουσιάζει ικανοποιητική αντίσταση στις τριβές με τον πυθμένα. Αυτά τα πλεονεκτήματα, κάνουν τον συνδυασμό αυτό, αρκετά ελκυστικό για αγκυρώσεις σε βαθιά νερά.
4. Οι γραμμές αγκύρωσης του συστήματος ως συνδυασμός αλυσίδας και συνθετικού υλικού: Τώρα το ανώτερο τμήμα του κλάδου αγκύρωσης αποτελείται από κάποιο συνθετικό υλικό. Τα σχοινιά από συνθετικό υλικό παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συρματόσχοινων γιατί είναι αξιοσημείωτα ελαφρότερα, πολύ ελαστικά και μπορούν να απορροφούν τις επιβαλλόμενες δυναμικές κινήσεις κατά μήκος της έκτασής τους, χωρίς να παράγουν υπερβολικές δυναμικές τάσεις. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά και οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν έχουν μελετηθεί τόσο όσο των παραδοσιακών σχοινιών, και ως εκ' τούτου μας αναγκάζουν να είμαστε υπέρ του δέοντος συντηρητικοί στον σχεδιασμό τους. Αυτό αποτελεί και το σημαντικότερο μειονέκτημα σε περιπτώσεις χρήσης τους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στις θαλάσσιες εφαρμογές, συνθετικά καλώδια υποβαλλόμενα σε δυναμικά φορτία, συχνά σχεδιάζονται με παράγοντες ασφαλείας δέκα φορές μεγαλύτερους καθιστώντας την εγκατάσταση ιδιαίτερα δαπανηρή.

## 4.2. Σύνδεσμοι (Connectors)

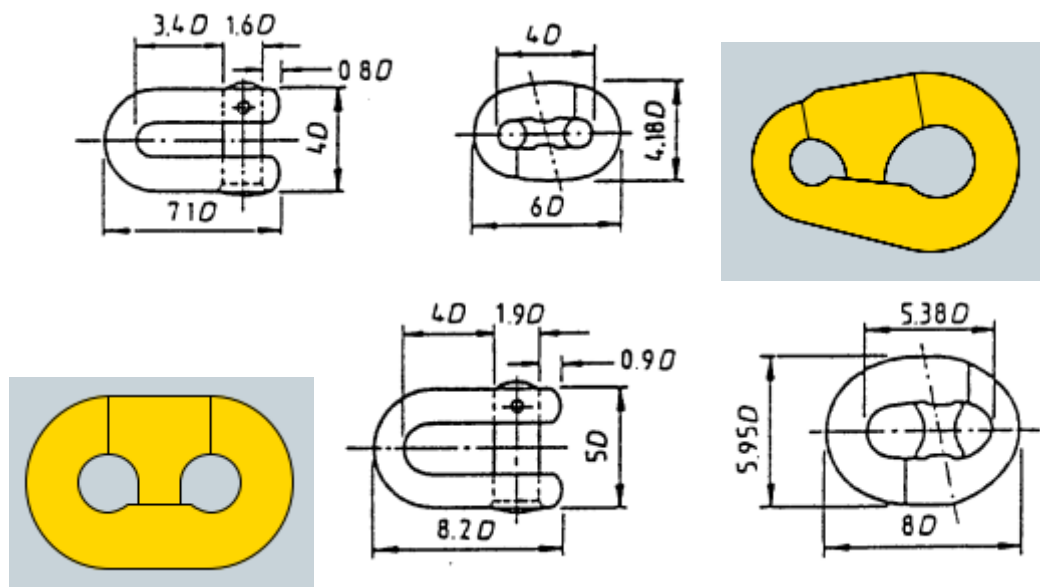
### 4.2.1. Shackles

Ο σύνδεσμος shackle συνιστά τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύνδεσμο στην υπεράκτια βιομηχανία. Αποτελείται από ένα τόξο το οποίο κλείνεται από ένα καρφί. Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί σύνδεσμοι shackle ενώ χρησιμοποιούνται τόσο σε μόνιμα όσο και σε προσωρινά συστήματα αγκύρωσης. Ειδικότερα:

1. Joining shackle, type Dee: φέρει αφαιρούμενο πείρο ώστε να εξασφαλίζεται η σύνδεση του άκρου της αλυσίδας στο σημείο πρόσδεσης [1].

2. Joining shackle, type Kenter: πρόκειται για έναν προσεκτικά καταρτισμένο σύνδεσμο, ο οποίος χωρίζεται σε δύο τμήματα που είναι ασφαλώς συνδεδεμένα με ένα γωνιακό λεπτό πείρο και τάπα στεγανοποίησης. Χρησιμοποιείται συχνά, για να συνδέει δύο τμήματα μιας αλυσίδας τα οποία έχουν τις ίδιες διαστάσεις και πρέπει να περάσουν πάνω από ένα βαρούλκο (εργάτη άγκυρας). Αυτός ο τύπος, είναι επίσης γνωστός και ως lugless shackle. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι συνήθως δεν χρησιμοποιούνται σε μόνιμα συστήματα αγκύρωσης καθώς έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης σε σχέση με την αλυσίδα [1].
3. Joining shackle, type pear: πρόκειται για παρόμοιο σύνδεσμο με αυτόν της 2<sup>ης</sup> περίπτωσης με βασική διαφορά ότι τα τμήματα της αλυσίδας που θέλουμε να συνδέσουμε έχουν διαφορετικές διαστάσεις. Κατ' αντιστοιχία με τον σύνδεσμο τύπου Kenter, ούτε οι σύνδεσμοι τύπου pear χρησιμοποιούνται σε μόνιμα συστήματα αγκύρωσης [15].
4. Joining shackle, type C: πρόκειται και πάλι για σύνδεσμο παρόμοιο με αυτόν της 2<sup>ης</sup> περίπτωσης με τη διαφορά να έγκειται στον τρόπο με τον οποίο ο σύνδεσμος ανοίγει και κλείνει. Ούτε ο σύνδεσμος τύπου C προτιμάται στα μόνιμα συστήματα αγκύρωσης [15].
5. Anchor shackle, type Dee: χρησιμοποιείται για να συνδέσει την άγκυρα με τον τελευταίο κρίκο [1].
6. Anchor shackle, type Kenter: εξυπηρετεί τον ίδιο σκοπό με το σύνδεσμο της 3<sup>ης</sup> περίπτωσης αλλά έχει διαφορετική διάταξη [1].

Όλοι οι τύποι συνδέσμων shackle που περιγράφηκαν παραπάνω, απεικονίζονται σχηματικά στο σχήμα (9).



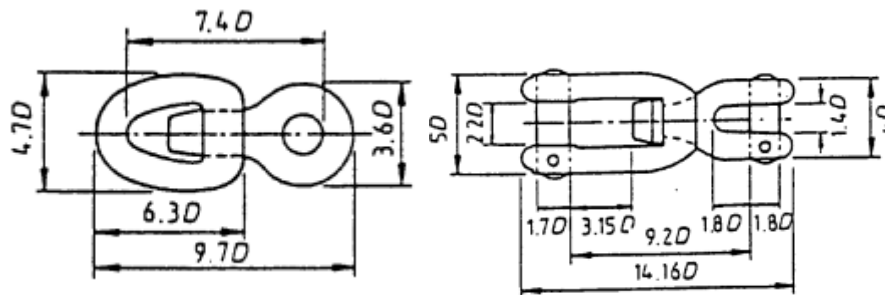
Σχήμα (9): Joining shackle type Dee, Joining shackle type Kenter, Joining shackle type pear, Joining shackle type C, Anchor shackle type Dee Anchor shackle type Dee (σειρά παρουσίασης από αριστερά προς τα δεξιά) [1,15].

#### 4.2.2. Swivels

Οι σύνδεσμοι swivel χρησιμοποιούνται συνήθως στα προσωρινά συστήματα αγκύρωσης έτσι ώστε να περιορίζουν τις περιστροφικές δυνάμεις και την ροπή που αναπτύσσονται κατά μήκος της γραμμής αγκύρωσης. Συχνά, τοποθετούνται μερικοί σύνδεσμοι πάνω από το σημείο της άγκυρας (εικόνα (12)) ενώ συναντώνται και σε θέσεις μεταξύ τμήματος αλυσίδας και τμήματος

συρματόσχοινου. Η τυπική μορφή τέτοιων συνδέσμων παρουσιάζεται στο σχήμα (10). Στην κατηγορία των συνδέσμων swivels διακρίνουμε τους ακόλουθους τύπους:

1. Roller bearing swivel: χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται η σύνδεση άγκυρας/ αλυσίδας ενώ αξιοποιούνται ώστε να συνδέσουν το επικαθιζόμενο στον πυθμένα τμήμα της αλυσίδας με σχοινί από συνθετικό υλικό. Ο συγκεκριμένος τύπος συνδέσμου είναι ιδανικός την εγκατάσταση και την τάνυση προκαθορισμένων συστημάτων αγκύρωσης [15].
2. Slide bearing swivel: εξυπηρετούν συνδέσεις μεταξύ τμημάτων συρματόσχοινου ακόμα και σε συστήματα που δεν φέρουν ανωστικά σώματα [15].
3. Swivel shackle: πρόκειται για συνδιασμό των συνιστωσών του ονόματός του [1].



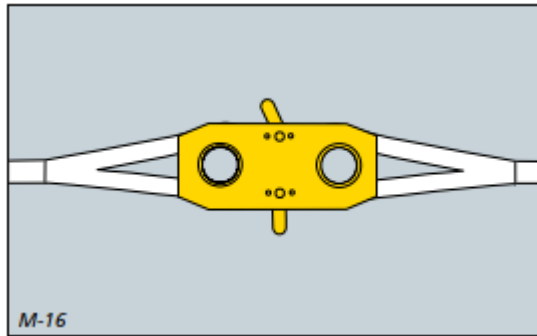
Σχήμα (10): Swivel και Swivel shackle αντίστοιχα [1].



Εικόνα (12): 16mm galvanised steel chain moorings swivel [20].

#### 4.2.3. M-Link Synthetic Rope Connector

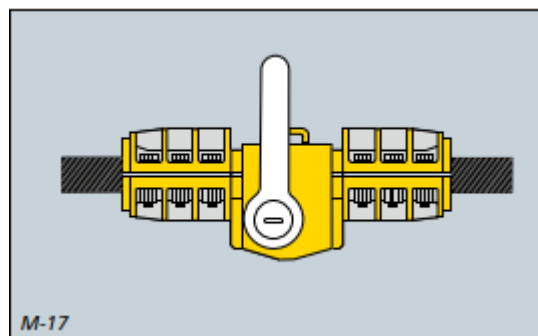
Πρόκειται για ένα σύνδεσμο της νέας γενιάς, που σχεδιάστηκε ώστε να αντικαταστήσει τις ογκώδεις “δακτυλήθρες” που χρησιμοποιούνταν στα σχοινιά από συνθετικό υλικό και απαιτούσαν χρονοβόρο και επίπονο χειρισμό. Η διάταξη ενός τέτοιου συνδέσμου παρουσιάζεται στο σχήμα (11). Παράλληλα, χρησιμεύουν για τη σύνδεση δύο τμημάτων συνθετικού σχοινοῦ σε περιπτώσεις αγκύρωσεις σε βαθύ νερό καθώς και στη σύνδεση ανωστικού σώματος με τη γραμμή αγκύρωσης χωρίς να καταστρέψουν τη γραμμή [15].



Σχήμα (11): Σύνδεσμος M-Link [15].

#### 4.2.4. Wire Clamp

Ο συμπαγής συρμάτινος σφικτήρας (wire clamp) του σχήματος (12) αξιοποιείται για την προσθήκη ανωστικού σώματος σε συρματόσχοινο εξασφαλίζοντας ότι τα φορτία κατανέμονται κατά μήκος του σχοινιού. Συνεπακόλουθα, αποφεύγονται αστοχίες λόγω κάμψης. Ο συγκεκριμένος σφικτήρας μπορεί να ρυθμιστεί με κατάλληλο τρόπο ώστε να ταιριάζει σε μια μεγάλη ποικιλία διαμέτρων συρματόσχοινου [15].

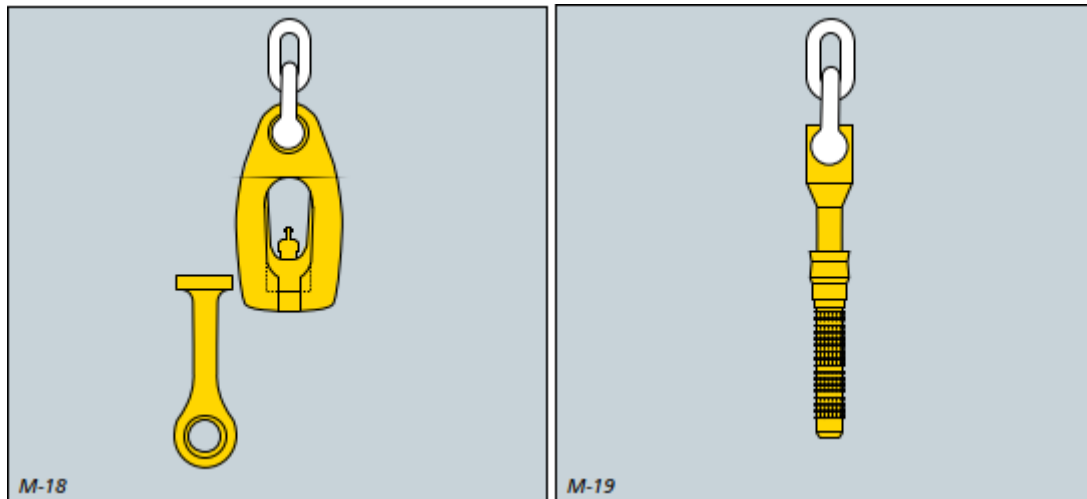


Σχήμα (12): Συρμάτινος σφικτήρας (wire clamp) [15].

#### 4.2.5. Subsea Connector Tools

Με γνώμονα ότι το βάθος νερού στο οποίο επιθυμούμε πλέον να αγκυρώνουμε πλωτές μονάδες διαρκώς αυξάνεται, γεννήθηκε η ανάγκη να συνδέουμε και να αποσυνδέουμε γραμμές αγκύρωσης ή συνδέσμους χωρίς τη βοήθεια των δυτών. Σήμερα, διατίθεται μια μεγάλη ποικιλία τέτοιων υποβρύχιων εργαλείων σύνδεσης όπως αυτά που απεικονίζονται στο σχήμα (13). Μερικά από αυτά εξυπηρετούν όλους τους καταληκτικούς συνδέσμους (end-connectors) που χρησιμοποιούνται συνήθως στις γραμμές αγκύρωσης για αλυσίδα, συρματόσχοινο και συνθετικό σχοινί. Ακόμη, αναφέρεται ότι αυτά τα εργαλεία λειτουργούν είτε μηχανικά είτε υδραυλικά είτε με τη βοήθεια της μονάδας ROV [15].





Σχήμα (13): Τύποι υποβρύχιων εργαλείων σύνδεσης [15].

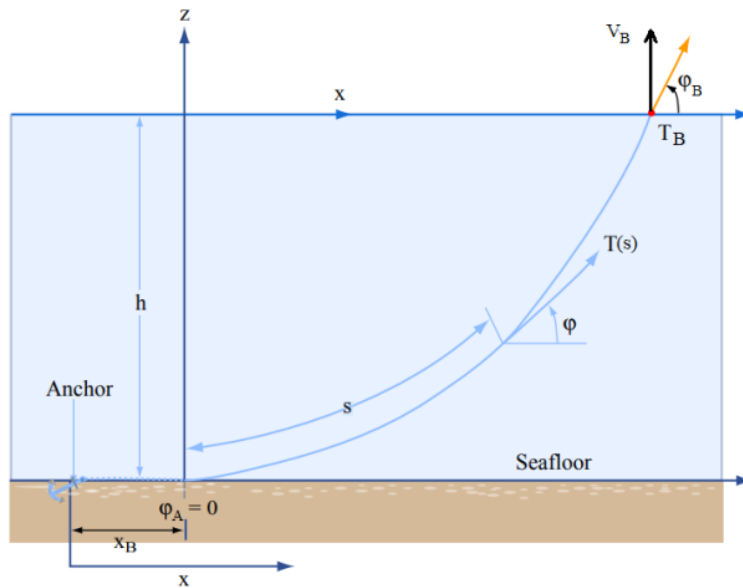
## 5. Αλυσοειδής Καμπύλη (Catenary)

### 5.1. Στατική Ανάλυση της Αλυσοειδούς

Η μορφή που λαμβάνει ένα σχοινί ή μία αλυσίδα στον αέρα υπό την επίδραση μόνο του βάρους λέγεται αλυσοειδής (catenary). Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα πραγματοποιηθεί μελέτη των συστημάτων αγκύρωσης λαμβάνοντας υπόψιν τις εξισώσεις που προκύπτουν από την επίλυση του δισδιάστατου προβλήματος (2D). Η ανάλυση που ακολουθεί στηρίζεται στο [1]. Για την καλύτερη παρουσίαση του μαθηματικού προβλήματος και την πληρέστερη κατανόηση των εξισώσεων που το διέπουν, κρίθηκε απαραίτητο η ανάλυση να ξεκινήσει για γραμμή αγκύρωσης αποτελούμενη από ένα ενιαίο υλικό. Ύστερα θα πραγματοποιηθεί η μετάβαση σε γραμμές αγκύρωσης αποτελούμενες από δύο υλικά (ενότητα 6) που είναι και το θέμα της εργασίας.

Αρχικά, τοποθετείται μία γραμμή αγκύρωσης στο επίπεδο  $xz$  της οποίας η διάμετρος είναι πολύ μικρότερη του μήκους της, ισχύει δηλαδή  $d \ll L$ . Όταν σε κάποιο σημείο της γραμμής αγκύρωσης εφαρμόζεται τάση  $T$ , τότε σχηματίζεται γωνία  $\varphi$  από την εφαπτόμενη σε αυτήν και την οριζόντιο. Προφανώς, τα μεγέθη  $T, \varphi$  θα μεταβάλλονται κατά μήκος της γραμμής. Ακόμη, καθώς η διάμετρος θεωρείται μικρή, οι αποστάσεις κατά μήκος της γραμμής αγκύρωσης μετριοούνται κατά τη μέση γραμμή οπότε και εισάγεται μία καινούρια, ανεξάρτητη συντεταγμένη  $s$  (Lagrangian). Τέλος, φαινόμενα κάμψης δε λαμβάνονται υπόψιν στην ανάλυση.

Στο σχήμα (14), παρουσιάζεται η προς μελέτη γραμμή αγκύρωσης. Ως σημείο A ορίζεται το σημείο που βρίσκεται επί του πυθμένα της θάλασσας από το οποίο και ύστερα ξεκινά η γραμμή να ανυψώνεται (αρχή της γραμμής αγκύρωσης). Στο σημείο αυτό, η τάση και η γωνία είναι μηδενικές ( $T = 0$  και  $\varphi_A = 0$ ). Ως σημείο B ορίζεται το σημείο που βρίσκεται στο όριο της επιφάνειας της θάλασσας όπου γίνεται η πρόσδεση με την προς αγκύρωση πλωτή κατασκευή (πέρας της γραμμής αγκύρωσης). Επιπλέον, λαμβάνεται αυθαίρετο σημείο μέτρησης O (συνήθως το σημείο πρόσδεσης στην άγκυρα) του οποίου η απόσταση από το σημείο A είναι  $x_B$ .

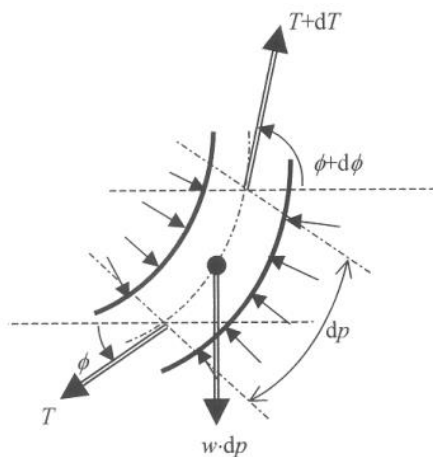


Σχήμα (14): Γραμμή αγκύρωσης με τμήμα επικαθούμενο στον πυθμένα και εφαρμογή τάσης  $T(s)$  σε σημείο της [16].

Η στατική ανάλυση της αλυσοειδούς καμπύλης στηρίζεται στην ανάλυση της στατικής ισορροπίας ενός τμήματος της γραμμής αγκύρωσης, διαφορικού μήκους  $dp$  στο οποίο υποτίθεται ότι επιβάλλεται τάση  $T$ . Στο διαφορικό μήκος  $dp$  επενεργούν οι ακόλουθες δυνάμεις:

1. Το βάρος το οποίο ισούται με  $w \cdot dp$ . Με  $w$  συμβολίζεται το βάρος ανά μονάδα μήκους στον αέρα.
2. Οι υδροστατικές δυνάμεις
3. Η τάση από τα γειτονικά τμήματα

Με βάση το σχήμα (15), ορίζουμε αρχή και πέρας του διαφορικού μήκους τα  $p$  και  $p + dp$  αντίστοιχα. Συνεπώς, η τάση που επενεργεί κατά τη διεύθυνση της εφαπτομένης στη μέση γραμμή της γραμμής αγκύρωσης θα μεταβάλλεται από  $p$  σε  $p + dp$  κατά  $dT$ . Ταυτόχρονα, η γωνία της εφαπτομένης αλλά και η διεύθυνση της τάσης θα μεταβάλλεται κατά  $d\phi$ .

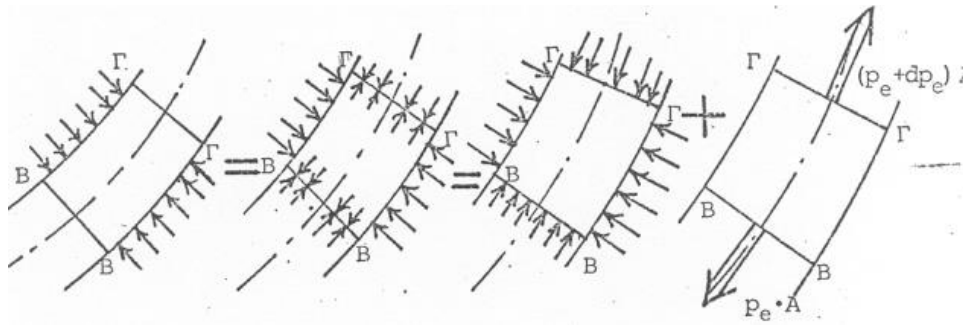


Σχήμα (15): Στατική ισορροπία στοιχείου διαφορικού μήκους [1].

Σύμφωνα με την αρχή του Αρχιμήδη, κάθε σώμα πλήρως ή μερικώς βυθισμένο σε κάποιο ρευστό δέχεται ανωστική δύναμη ίση με το βάρος του ρευστού που εκτοπίζει. Συνεπακόλουθα,



καθίσταται σαφές πως η αρχή του Αρχιμήδη βρίσκει εφαρμογή μόνο πλευρικά του διαφορικού μήκους και όχι στις φανταστικές τομές BB' και CC'. Εντούτοις, η ανάλυση περιλαμβάνει τις διαδικασίες που απεικονίζονται στο σχήμα (16). Η απλούστευση της ανάλυσης απαιτεί την προσθαφαίρεση (τελικό αποτέλεσμα ίσο με το μηδέν) των πιέσεων που θα υπήρχαν εάν οι τομές BB' και CC' ήταν εκτεθειμένες στο ρευστό. Τις πιέσεις που κατευθύνονται προς το εσωτερικό του διαφορικού μήκους τις συνυπολογίζουμε στις πιέσεις που ενεργούν πλευρικά. Εφόσον, πλέον όλες οι πλευρές του διαφορικού μήκους θεωρούνται “εμβαπτισμένες” στο ρευστό, είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η αρχή του Αρχιμήδη.



Σχήμα (16): Ισοδύναμη στατική ισορροπία στοιχείου διαφορικού μήκους [1].

Έστω  $\rho_w$  η πυκνότητα του ρευστού και  $A$  το εμβαδόν της διατομής της γραμμής που υπολίζεται ως:

$$\bullet \quad A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (5.1.1)$$

Έτσι, το διαφορικό στοιχείο μήκους δέχεται άντωση  $B \cdot dp$ , όπου

$$\bullet \quad B = \rho_w \cdot g \cdot A \quad (5.1.2)$$

Με βάση το 4<sup>ο</sup> κατά σειρά από τα αριστερά σκαρίφημα του σχήματος (16), οι πιέσεις στις τομές BB' και CC' έχουν διεύθυνση προς το εξωτερικό του διαφορικού μήκους. Έστω,  $p_e$  η υδροστατική πίεση στο μέσο της τομής του BB'. Τότε, η δεδομένη πίεση προκαλεί την εφαρμογή μιας δύναμης  $p_e \cdot A$  στην ίδια διεύθυνση (εφαπτομενική) που ενεργεί και η τάση  $T$ . Συνεπώς, ορίζεται η ενεργός τάση  $T_e$  η οποία υπολογίζεται ως:

$$\bullet \quad T_e = T + p_e \cdot A \quad (5.1.3)$$

Οπότε, και η ενεργός τάση στις τομές BB' και CC' προκύπτει ως:

$$\begin{aligned} \bullet \quad BB': T_e &= T - \rho_w \cdot g \cdot z \cdot A \\ \bullet \quad CC': T_e + dT_e &= T + dT - \rho_w \cdot g \cdot (z + dz) \cdot A \end{aligned} \quad (5.1.4)$$

Αναφορικά με το βάρος του διαφορικού τμήματος στο ρευστό ανά μονάδα μήκους έχουμε:

$$\bullet \quad w_1 = w - B \quad (5.1.5)$$

Εισάγεται πλέον το Lagrangian σύστημα συντεταγμένων ( $t$ : η εφαπτομενική διεύθυνση,  $i$ : η εγκάρσια διεύθυνση) ώστε να γραφτούν οι εξισώσεις ισορροπίας των δυνάμεων. Προβάλλοντας τις δυνάμεις στις δύο διευθύνσεις, λαμβάνουμε:

$$\bullet \quad (T_e + dT_e) \cdot \cos(d\varphi) - T_e - w_1 \cdot \sin\varphi \cdot dp = 0 \quad (5.1.6)$$

$$\bullet \quad (T_e + dT_e) \cdot \sin(d\varphi) - w_1 \cdot \cos\varphi \cdot dp = 0 \quad (5.1.7)$$

Λαμβάνοντας το όριο  $dp \rightarrow 0$ , εξάγεται  $\cos(d\varphi) \rightarrow 1$  και  $\sin(d\varphi) \cong d\varphi$ . Διαιρώντας με  $dp$  λαμβάνουμε:

$$\bullet \quad \frac{dT_e}{dp} = w_1 \cdot \sin\varphi \quad (5.1.8)$$

$$\bullet \quad T_e \cdot \frac{d\varphi}{dp} = w_1 \cdot \cos\varphi \quad (5.1.9)$$

Από τη θεωρία της ελαστικότητας, το σώμα που συμπιέζεται πλευρικά (εν προκειμένω λόγω της υδροστατικής πίεσης) εκτείνεται στην κατά μήκος διεύθυνση. Η ιδιότητα αυτή εκφράζεται από το λόγο Poisson,  $\mu$ . Εάν  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, τότε η αξονική αδιάστατη έκταση  $e$  δίνεται από τη σχέση:

$$\bullet \quad e = \frac{1}{E} \cdot \left( \frac{T}{A} + \mu \cdot 2 \cdot p_e \right) \quad (5.1.10)$$

Το λάθος είναι πολύ μικρό εάν υποθέσουμε ότι  $\mu = \frac{1}{2}$ , ενώ ταυτόχρονα τα αποτελέσματα απλοποιούνται σημαντικά. Επομένως, προκύπτει ότι:

$$\bullet \quad e = \frac{1}{EA} \cdot (T + p_e \cdot A) = \frac{T_e}{EA} \quad (5.1.11)$$

Το διαφορικό μήκος της γραμμής είχε διαφορικό μήκος  $ds$  πριν εκταθεί. Μετά την έκταση, το μήκος έγινε  $dp$ , και άρα:

$$\bullet \quad e = \frac{dp-ds}{ds} = \frac{dp}{ds} - 1 \quad (5.1.12)$$

Η αρχή διατήρησης της μάζας επιβάλλει ότι εάν  $m_0$  είναι η ανά μονάδα μήκους μάζα της γραμμής πριν εκταθεί και  $m$  το αντίστοιχο μέγεθος μετά την έκταση τότε:

$$\bullet \quad m_0 \cdot ds = m \cdot dp \quad (5.1.13)$$

Όταν  $\mu = \frac{1}{2}$  τότε γίνεται λόγος για παραμόρφωση του σώματος υπό σταθερό όγκο. Συνεπακόλουθα, η άντωση που είναι ανάλογη του όγκου διατηρείται. Οπότε,

$$\bullet \quad B_0 = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_w \cdot d_0^2 \cdot g \quad (5.1.14)$$

Εάν  $d_0$  και  $w_0$  η διάμετρος και το βάρος ανά μονάδα μήκους στο ρευστό της γραμμής όταν η τάση είναι μηδενική, λαμβάνουμε

$$\bullet \quad B_0 \cdot ds = B \cdot dp \quad (5.1.15)$$

$$\bullet \quad w_0 \cdot ds = w_1 \cdot dp \quad (5.1.16)$$

Έτσι, οι εξισώσεις ισορροπίας (5.1.8) και (5.1.9) γίνονται:

$$\bullet \quad \frac{dT_e}{ds} = w_0 \cdot \sin\varphi \quad (5.1.17)$$

$$\bullet \quad T_e \cdot \frac{d\varphi}{ds} = w_0 \cdot \cos\varphi \quad (5.1.18)$$

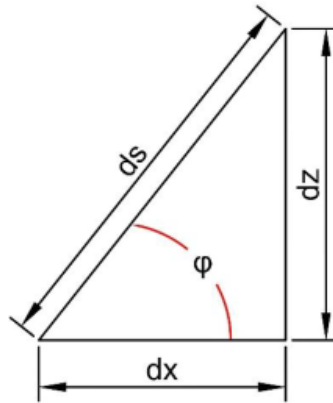
Με αναφορά στο σχήμα (17), λαμβάνουμε τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\bullet \quad dx = dp \cdot \cos\varphi \quad (5.1.19)$$

$$\bullet \quad dz = dp \cdot \sin\varphi \quad (5.1.20)$$

$$\bullet \quad \frac{dx}{ds} = (1 + e) \cdot \cos\varphi \quad (5.1.21)$$

$$\bullet \quad \frac{dz}{ds} = (1 + e) \cdot \sin\varphi \quad (5.1.22)$$



Σχήμα (17): Προβολές διαφορικού μήκους  $ds$  στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα [1].

## 5.2. Λύση των Εξισώσεων της Μη Ελαστικής Αλυσοειδούς

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για λόγους διευκόλυνσης, τα υλικά των γραμμών αγκύρωσης θεωρούνται μη ελαστικά ( $E \rightarrow \infty$ ). Συνεπακόλουθα, η εφαπτομενική παραμόρφωση μπορεί να αγνοηθεί, δηλαδή  $e \rightarrow 0$ . Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων στατικής ισορροπίας διαμορφώνεται ως εξής:

- $\frac{dT_e}{ds} = w_1 \cdot \sin\varphi$  (5.2.1)

- $T_e \cdot \frac{d\varphi}{ds} = w_1 \cdot \cos\varphi$  (5.2.2)

- $dx = ds \cdot \cos\varphi$  (5.2.3)

- $dz = ds \cdot \sin\varphi$  (5.2.4)

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (5.2.1) και (5.2.2) λαμβάνουμε,

- $\frac{dT_e}{T_e} = \tan\varphi d\varphi$  (5.2.5)

Ενώ ολοκληρώνοντας την εξίσωση (5.2.5) και γνωρίζοντας ότι στον πυθμένα της θάλασσας ισχύει  $T_e = T_{eA}$  και  $\varphi = \varphi_A$  προκύπτουν ότι:

- $\ln T_e = -\ln \cos\varphi + c$  (5.2.6)

- $\ln T_{eA} = -\ln \cos\varphi_A + c$  (5.2.7)

Συνδιάζοντας καταλλήλως τις εξισώσεις (5.2.6) και (5.2.7) προκύπτει η τάση σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της γραμμής αγκύρωσης σε συνάρτηση με την τάση στον πυθμένα της θάλασσας. Αναλυτικότερα:

- $\ln T_e + \ln \cos\varphi = \ln T_{eA} + \ln \cos\varphi_A$

$$\Rightarrow \ln(T_e \cdot \cos\varphi) = \ln(T_{eA} \cdot \cos\varphi_A)$$

$$\Rightarrow T_e \cdot \cos\varphi = T_{eA} \cdot \cos\varphi_A$$

$$\Rightarrow T_e = T_{eA} \cdot \frac{\cos\varphi_A}{\cos\varphi} \quad (5.2.8)$$

Από το συνδιασμό των εξισώσεων (5.2.2) και (5.2.8) και ολοκλήρωση στο διάστημα  $[\varphi_A, \varphi]$  προκύπτει ότι:

- $T_{eA} \cdot \frac{\cos\varphi_A}{\cos\varphi} d\varphi = w_1 \cdot \cos\varphi ds$

$$\Rightarrow ds = T_{eA} \cdot \frac{\cos\varphi_A}{\cos\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{w_1 \cdot \cos\varphi}$$

$$\Rightarrow ds = \frac{T_{eA}}{w_1} \cdot \cos\varphi_A \cdot \frac{d\varphi}{\cos^2\varphi}$$

$$\Rightarrow S = \frac{T_{eA}}{w_1} \cdot \cos\varphi_A \cdot (\tan\varphi - \tan\varphi_A) \quad (5.2.9)$$

Από το συνδιασμό των εξισώσεων (5.2.1), (5.2.2) και (5.2.8) και ολοκλήρωση στο διάστημα  $[\varphi_A, \varphi]$  προκύπτει ότι:

- $dx = \frac{T_{eA}}{w_1} \cdot \cos\varphi_A \cdot \frac{d\varphi}{\cos\varphi}$

$$\Rightarrow x = \frac{T_{eA}}{w_1} \cdot \cos\varphi_A \cdot \left[ \ln\left(\frac{1}{\cos\varphi} + \tan\varphi\right) - \ln\left(\frac{1}{\cos\varphi_A} + \tan\varphi_A\right) \right] \quad (5.2.10)$$

Από το συνδιασμό των εξισώσεων (5.2.1), (5.2.3) και (5.2.8) και ολοκλήρωση στο διάστημα  $[\varphi_A, \varphi]$  προκύπτει ότι:

- $dz = \frac{T_{eA}}{w_1} \cdot \cos\varphi_A \cdot \frac{\sin\varphi d\varphi}{\cos\varphi}$

$$\Rightarrow z = \frac{T_{eA}}{w_1} \cdot \cos\varphi_A \cdot \left[ \frac{1}{\cos\varphi} - \frac{1}{\cos\varphi_A} \right] \quad (5.2.11)$$

Η εξίσωση (5.2.5) στο όριο της επιφάνειας της θάλασσας (σημείο B) δίνει:

- $\ln T_{eB} = -\ln \cos\varphi_B + c \quad (5.2.12)$

Ενώ από το συνδιασμός της με τη (5.2.7) λαμβάνουμε:

- $\ln T_{eB} + \ln \cos\varphi_B = \ln T_{eA} + \ln \cos\varphi_A$

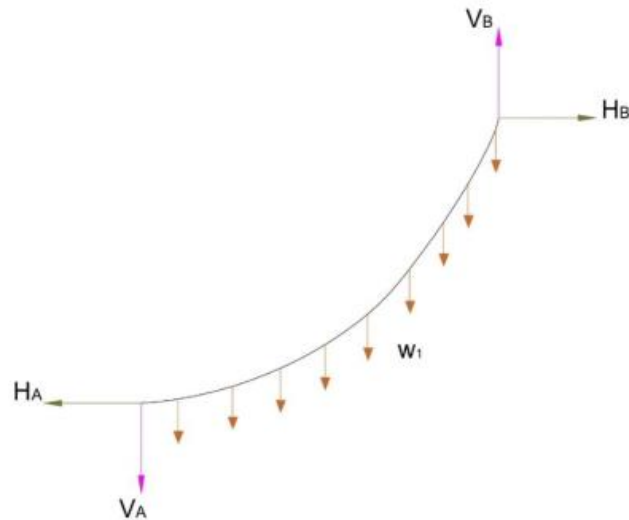
$$\Rightarrow \ln(T_{eB} \cdot \cos\varphi_B) = \ln(T_{eA} \cdot \cos\varphi_A)$$

$$\Rightarrow T_{eB} \cdot \cos\varphi_B = T_{eA} \cdot \cos\varphi_A$$

$$\Rightarrow H_B = H_A \quad (5.2.13)$$

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η οριζόντια συνιστώσα  $H$  της τάσης παραμένει σταθερή κατά μήκος της γραμμής αγκύρωσης. Ακόμη, σε κάθε σημείο της γραμμής θα ισχύει  $H = T_{eA} \cdot \cos\varphi_A$

[1]. Τα ανωτέρα συμπεράσματα αποτυπώνονται στο σχήμα (18) όπου φαίνεται ότι κατά μήκος της γραμμής αγκύρωσης αναπτύσσονται μόνο κατακόρυφες δυνάμεις (βάρους ανά μονάδα μήκους,  $w_1$ ).



Σχήμα (18): Επίδραση οριζόντιων και κατακόρυφων δυνάμεων στο ανυψωμένο μήκος της γραμμής.

Έχοντας προσδιορίσει τη σχέση της οριζόντιας συνιστώσας της τάσης, οι προαναφερθείσες εξισώσεις δύνανται να εκφραστούν ως συνάρτηση του  $H$ . Ειδικότερα, η εξίσωση (5.2.9) δίνει:

- $$S = \frac{H}{w_1} \cdot \tan\varphi - \frac{H}{w_1} \cdot \tan\varphi_A$$

$$\Rightarrow \tan\varphi = \tan\varphi_A + \frac{w_1 \cdot S}{H}$$
(5.2.14)

Παράλληλα, προκύπτει ότι:

- $$T_{eS} = \frac{H}{\cos\varphi} = H \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi}} = H \cdot \sqrt{1 + \tan^2\varphi}$$

$$\Rightarrow T_{eS} = H \cdot \sqrt{1 + \left(\tan\varphi_A + \frac{w_1 \cdot S}{H}\right)^2}$$
(5.2.15)

Δεδομένου ότι  $\sinh^{-1}(x) = \ln(x + \sqrt{1 + x^2})$ , η εξίσωση (5.2.10) δίνει:

- $$x = \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \ln\left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi}} + \tan\varphi\right) - \ln\left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_A}} + \tan\varphi_A\right) \right]$$

$$\Rightarrow x = \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \ln\left(\sqrt{1 + \tan^2\varphi} + \tan\varphi\right) - \ln\left(\sqrt{1 + \tan^2\varphi_A} + \tan\varphi_A\right) \right]$$

$$\Rightarrow x = \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \sinh^{-1}(\tan\varphi) - \sinh^{-1}(\tan\varphi_A) \right]$$

$$\Rightarrow x = \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \sinh^{-1}\left(\frac{w_1 \cdot S}{H} + \tan\varphi_A\right) - \sinh^{-1}(\tan\varphi_A) \right]$$
(5.2.16)

Η εξίσωση (5.2.11) δίνει:

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad z &= \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi}} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_A}} \right] \\
 \Rightarrow z &= \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \sqrt{\frac{\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi}} - \sqrt{\frac{\sin^2 \varphi_A + \cos^2 \varphi_A}{\cos^2 \varphi_A}} \right] \\
 \Rightarrow z &= \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \sqrt{1 + \tan^2 \varphi} - \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_A} \right] \\
 \Rightarrow z &= \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot S}{H} + \tan \varphi_A \right)^2} - \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_A} \right] \quad (5.2.17)
 \end{aligned}$$

Για μηδενική γωνία πυθμένα ( $\varphi_A = 0$ ), η εξίσωση (5.2.17) απλοποιείται ως εξής:

$$\bullet \quad z = \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot S}{H} \right)^2} - 1 \right] \quad (5.2.18)$$

Παράλληλα, δεδομένου ότι  $\cosh^{-1}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$ , προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad \cosh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot z}{H} + 1 \right) &= \cosh^{-1} \left( \frac{w_1}{H} \cdot \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot S}{H} \right)^2} - 1 \right] + 1 \right) \\
 &= \cosh^{-1} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot S}{H} \right)^2} - 1 + 1 \right) = \cosh^{-1} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot S}{H} \right)^2} \right) \\
 &= \ln \left( \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot S}{H} \right)^2} + \sqrt{\left( \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot S}{H} \right)^2} \right)^2 - 1} \right) \\
 &= \ln \left( \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot S}{H} \right)^2} + \frac{w_1 \cdot S}{H} \right) = \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot S}{H} \right) \quad (5.2.19)
 \end{aligned}$$

Επομένως, για μηδενική γωνία πυθμένα ( $\varphi_A = 0$ ), η εξίσωση (5.2.16) απλοποιείται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad x &= \frac{H}{w_1} \cdot \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot S}{H} \right) \\
 \Rightarrow x &= \frac{H}{w_1} \cdot \cosh^{-1} \left( 1 + \frac{w_1 \cdot z}{H} \right) \quad (5.2.20)
 \end{aligned}$$

Για λόγους πληρότητας, παρατίθενται οι παρακάτω σχέσεις ως συνάρτηση της κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης,  $V_B$  στο άνω άκρο της γραμμής αγκύρωσης χωρίς απόδειξη [1].

$$\bullet \quad \tan \varphi = \frac{V_B}{H} - \frac{w_1}{H} \cdot (L - s) \quad (5.2.21)$$

$$\bullet \quad x = \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \sinh^1 \left( \frac{V_B}{H} - \frac{w_1}{H} \cdot (L - s) \right) - \sinh^1 \left( \frac{V_B}{H} - \frac{w_1}{H} \cdot L \right) \right] \quad (5.2.22)$$

$$\bullet \quad z = \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{V_B}{H} - \frac{w_1}{H} \cdot (L - s) \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{V_B}{H} - \frac{w_1}{H} \cdot L \right)^2} \right] \quad (5.2.23)$$

Στο άνω άκρο της γραμμής, όπου  $s = L$  &  $z = D$ , οι εξίσωσεις (5.2.17), (5.2.23) δίνουν τις ακόλουθες σχέσεις για το βάθος του νερού  $D$ :

$$\bullet \quad D = \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L}{H} + \tan \varphi_A \right)^2} - \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_A} \right] \quad (5.2.24)$$

$$\bullet \quad D = \frac{H}{w_1} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{V_B}{H} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{V_B}{H} - \frac{w_1}{H} \cdot L \right)^2} \right] \quad (5.2.25)$$

Στο κάτω άκρο της γραμμής, όπου  $\varphi = \varphi_A$  &  $s = 0$ , ισχύει ότι:

$$\bullet \quad \tan \varphi_A = \frac{V_B}{H} - \frac{w_1}{H} \cdot L \quad (5.2.26)$$

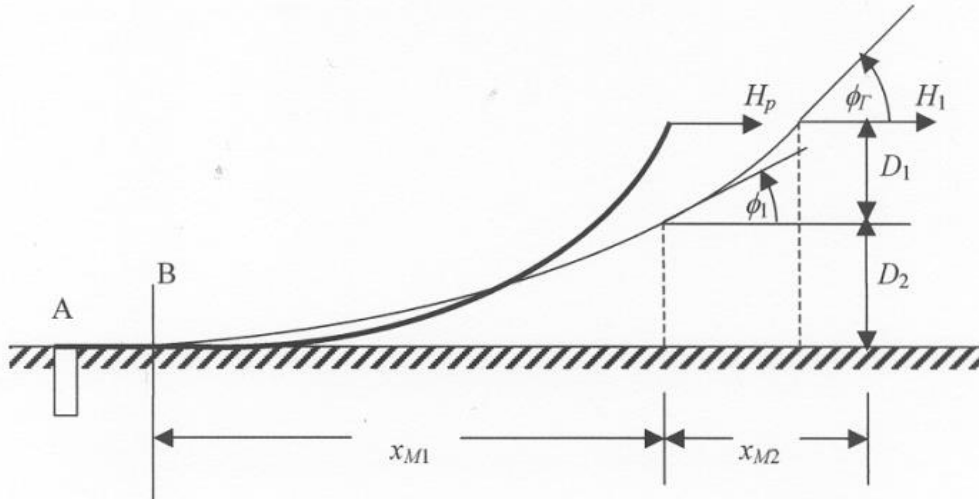
Τέλος, για  $z = D$  &  $s = l_s$  ( $l_s$ : το ανυψωμένο μήκος της γραμμής), η εξίσωση (5.2.18) δίνει:

$$\begin{aligned} \bullet \quad D \cdot \frac{w_1}{H} + 1 &= \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot l_s}{H} \right)^2} \\ \Rightarrow \left( D \cdot \frac{w_1}{H} + 1 \right)^2 &= 1 + \left( \frac{w_1 \cdot l_s}{H} \right)^2 \\ \Rightarrow \left( \frac{w_1 \cdot D}{H} \right)^2 + 2 \cdot \frac{w_1 \cdot D}{H} &= \left( \frac{w_1 \cdot l_s}{H} \right)^2 \Rightarrow l_s = \frac{H}{w_1} \cdot \sqrt{\left( \frac{w_1 \cdot D}{H} \right)^2 + 2 \cdot \frac{w_1 \cdot D}{H}} \end{aligned} \quad (5.2.27)$$

## 6. Στατική Ανάλυση Γραμμής Αγκύρωσης αποτελούμενης από Δύο Τμήματα Μη Ελαστικού Υλικού

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, οι σχέσεις που διατυπώθηκαν εκτενώς στις ενότητες αφορούν γραμμές αγκύρωσης αποτελούμενες από ένα ενιαίο και μη ελαστικό υλικό. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής ωστόσο, η μελέτη επεκτείνεται και σε γραμμές αγκύρωσης αποτελούμενες από δύο ενιαία και μη ελαστικά υλικά. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο οι προαναφερθείσες σχέσεις να επαναδιατυπωθούν καταλλήλως.

Μία γραμμή αγκύρωσης που αποτελείται από δύο τμήματα διαφορετικών υλικών περιγράφεται από δύο συνεχόμενες μη ελαστικές αλυσοειδείς, ενιαίου υλικού. Η στατική μορφή κάθε μίας από αυτές τις αλυσοειδείς περιγράφεται στη βιβλιογραφία [1]. Μία τέτοια γραμμή αγκύρωσης περιγράφεται σχηματικά στο σχήμα (19) [1].



Σχήμα (19): Στατική Ισορροπία Γραμμής Αγκύρωσης Δύο Υλικών [1].

Τα διάφορα μεγέθη που εμφανίζονται στο σχήμα (19) περιγράφονται ακολούθως:

- $x_{M1}$ : είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ του σημείου επαφής της κατώτερης αλυσσοειδούς με τον πυθμένα και του σημείου σύνδεσης των δύο αλυσσοειδών.
- $x_{M2}$ : είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ του σημείου σύνδεσης των δύο αλυσσοειδών και της κορυφής της ανώτερης αλυσσοειδούς.
- $\varphi_A$ : είναι η γωνία που σχηματίζει η γραμμή αγκύρωσης στο σημείο επαφής της με τον πυθμένα.
- $\varphi_1$ : είναι η γωνία της εφαπτομένης στη γραμμή στο σημείο σύνδεσης των δύο υλικών.
- $\varphi_\Gamma$ : είναι η γωνία που σχηματίζει η γραμμή αγκύρωσης στην κορυφή της.
- $D_1, D_2$ : τα βυθίσματα της κατώτερης και ανώτερης αλυσσοειδούς αντίστοιχα.
- $L_1, L_2$ : τα μήκη της κατώτερης και ανώτερης αλυσσοειδούς αντίστοιχα.

Συμβολίζοντας με  $w_1$  και  $w_2$  τα βάρη ανά μονάδα μήκους των δύο υλικών στο νερό, όλα τα προηγούμενα αναφερόμενα μεγέθη συνδέονται με τις παρακάτω εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη στατική μορφή μιας γραμμής αγκύρωσης με δύο υλικά. Αναλυτικότερα:

$$\begin{aligned} \bullet \quad x_{M1} &= \frac{H}{w_1} \{ \sinh^{-1}(\tan \varphi_1) - \sinh^{-1}(\tan \varphi_A) \} \\ \Rightarrow x_{M1} &= \frac{H}{w_1} \left\{ \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 L_1}{H} + \tan \varphi_A \right) - \sinh^{-1}(\tan \varphi_A) \right\} \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \bullet \quad x_{M2} &= \frac{H}{w_2} \{ \sinh^{-1}(\tan \varphi_\Gamma) - \sinh^{-1}(\tan \varphi_1) \} \\ \Rightarrow x_{M2} &= \frac{H}{w_2} \left\{ \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 L_1 + w_2 L_2}{H} + \tan \varphi_A \right) - \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 L_1}{H} + \tan \varphi_A \right) \right\} \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$\bullet \quad D_1 = \frac{H}{w_1} \left\{ \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_1} - \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_A} \right\}$$



$$\Rightarrow D_1 = \frac{H}{w_1} \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 L_1}{H} + \tan \varphi_A \right)^2} - \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_A} \right\} \quad (6.3)$$

- $D_2 = \frac{H}{w_2} \left\{ \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_1} - \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_A} \right\}$

$$\Rightarrow D_2 = \frac{H}{w_2} \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 L_1 + w_2 L_2}{H} + \tan \varphi_A \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 L_1}{H} + \tan \varphi_A \right)^2} \right\} \quad (6.4)$$

- $L_1 = \frac{H}{w_1} \left\{ \sqrt{\left( \frac{w_1 D_1}{H} + \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_A} \right)^2} - 1 - \tan \varphi_A \right\} \quad (6.5)$

- $L_2 = \frac{H}{w_2} \left\{ \sqrt{\left( \frac{w_2 D_2}{H} + \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_1} \right)^2} - 1 - \tan \varphi_1 \right\}$

$$\Rightarrow L_2 = \frac{H}{w_2} \left\{ \sqrt{\left( \frac{w_2 D_2}{H} + \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 L_1}{H} + \tan \varphi_A \right)^2} \right)^2} - 1 - \left( \frac{w_1 L_1}{H} + \tan \varphi_A \right) \right\} \quad (6.6)$$

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που τμήμα της κατώτερης αλυσοειδούς βρίσκεται στον πυθμένα ή υπάρχει οριακή ανύψωση της γραμμής, η γωνία  $\varphi_A$  είναι μηδενική.

## 7. Στατική Ανάλυση Συστημάτων Αγκύρωσης Αποτελούμενων από Δύο Τμήματα Μη Ελαστικού Υλικού

### 7.1. Στατική Ανάλυση Συμμετρικού Συστήματος Αγκύρωσης Δύο Κλάδων

Όταν συνεργάζονται δύο γραμμές, το σύστημα αγκύρωσης μπορεί να παραλάβει φορτία προς τα δεξιά ή αριστερά εξίσου καλά (σχήμα (20)). Επιπλέον, όταν οι δυνάμεις μεταβάλλονται με τον χρόνο, εμποδίζει τις μεγάλες μετακινήσεις μια και ενεργεί σαν ισοδύναμο ελατήριο που παραλαμβάνει δυνάμεις και προς τις δύο κατευθύνσεις. Οι μετακινήσεις αυτές δεν πρέπει να ξεπερνούν μία δεδομένη τιμή που τίθεται για λειτουργικούς λόγους και η οποία λαμβάνεται συνήθως ως ένα ποσοστό του βάθους του νερού. Ο περιορισμός των μετακινήσεων σε επιτρεπτά όρια επιτυγχάνεται με την προένταση, δηλαδή φροντίζοντας να επιβάλλουμε αρκετή τάση στα δύο σχοινιά ακόμη και με μηδενικό εξωτερικό φορτίο, ώστε η ισοδύναμη “σταθερά επαναφοράς” να είναι αρκετά υψηλή. Η στατική συμπεριφορά ενός συστήματος αγκύρωσης δύο κλάδων, υπό την επίδραση μιας εξωτερικά επιβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης  $H_{ex}$ , φαίνεται σχηματικά ακολούθως.



- $\delta L = L_1 - L_p$

$$= \left[ \frac{H_1}{w_1} * \left\{ \sqrt{\left( \frac{w_1 D_{11}}{H_1} + 1 \right)^2 - 1} \right\} + \frac{H_1}{w_2} * \left\{ \sqrt{\left( \frac{w_2 D_{12}}{H_1} + \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 L_{11}}{H_1} \right)^2} \right)^2 - 1} - \frac{w_1 L_{11}}{H_1} \right\} \right] - \left[ \frac{H_p}{w_1} * \left\{ \sqrt{\left( \frac{w_1 D_{p1}}{H_p} + 1 \right)^2 - 1} \right\} + \frac{H_p}{w_2} * \left\{ \sqrt{\left( \frac{w_2 D_{p2}}{H_p} + \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 L_{p1}}{H_p} \right)^2} \right)^2 - 1} - \frac{w_1 L_{p1}}{H_p} \right\} \right] \quad (7.1.6)$$

Με τη βοήθεια των προηγούμενων σχέσεων, η οριζόντια μετατόπιση μπορεί να γραφεί ως εξής:

- $\delta x = \mathbb{x}_1 - \mathbb{x}_p = (L - L_1 + x_1) - (L - L_p + x_p) = (L_p - L_1) - (x_1 - x_p) \quad (7.1.7)$

Στις σχέσεις (7.1.6) και (7.1.7) με  $L$ ,  $L_1$  και  $L_p$  συμβολίζονται κατά σειρά: το ολικό μήκος των γραμμών, το ανυψωμένο μήκος της γραμμής No.1 στην κατάσταση εξωτερικής φόρτισης και το ανυψωμένο μήκος των γραμμών No.1&2 στην κατάσταση προέντασης. Προτείνεται στον αναγνώστη να μεταβεί στην ενότητα 8 για την καλύτερη κατανόηση των υπόλοιπων μεγεθών που εμφανίζονται στις εξισώσεις της παρούσας ενότητας.

Η σχέση (7.1.7) εκφράζει την οριζόντια μετατόπιση  $\delta x$  συναρτήσει της δύναμης προέντασης  $H_p$  και της μέγιστης δύναμης  $H_1$  που εμφανίζεται στην πρώτη γραμμή αγκύρωσης, στην κορυφή της μετά την επιβολή της εξωτερικά επιβαλλόμενης δύναμης  $H_{ex}$ . Κατά αντίστοιχο τρόπο, η οριζόντια μετατόπιση  $\delta x$  μπορεί να γραφεί και ως συνάρτηση της εξωτερικής δύναμης  $H_2$  η οποία εμφανίζεται στην κορυφή της δεύτερης γραμμής αγκύρωσης μετά την επιβολή της  $H_{ex}$ . Αναλυτικότερα, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

- $x_2 = \frac{H_2}{w_1} \cdot \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{21}}{H_2} \right) + \frac{H_2}{w_2} \cdot \left\{ \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{21} + w_2 \cdot L_{22}}{H_2} \right) - \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{21}}{H_2} \right) \right\} \quad (7.1.8)$

- $\delta L = L_2 - L_p$

$$= \left[ \frac{H_2}{w_1} * \left\{ \sqrt{\left( \frac{w_1 D_{21}}{H_2} + 1 \right)^2 - 1} \right\} + \frac{H_2}{w_2} * \left\{ \sqrt{\left( \frac{w_2 D_{22}}{H_2} + \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 L_{21}}{H_2} \right)^2} \right)^2 - 1} - \frac{w_1 L_{21}}{H_2} \right\} \right] - \left[ \frac{H_p}{w_1} * \left\{ \sqrt{\left( \frac{w_1 D_{p1}}{H_p} + 1 \right)^2 - 1} \right\} + \frac{H_p}{w_2} * \left\{ \sqrt{\left( \frac{w_2 D_{p2}}{H_p} + \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 L_{p1}}{H_p} \right)^2} \right)^2 - 1} - \frac{w_1 L_{p1}}{H_p} \right\} \right] \quad (7.1.9)$$

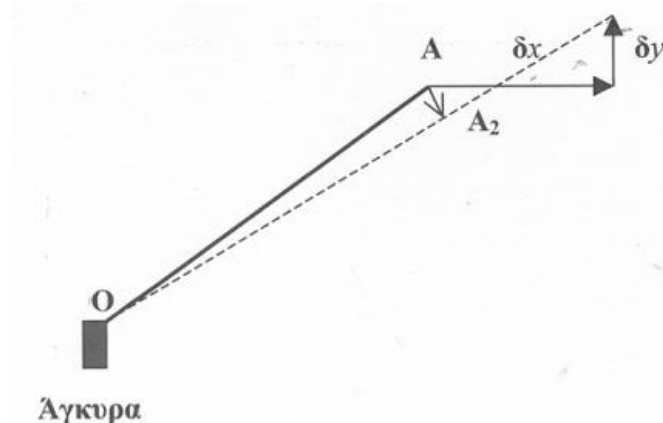
- $\delta x = \mathbb{x}_p - \mathbb{x}_1 = (L - L_p + x_p) - (L - L_2 + x_2) = (L_2 - L_p) - (x_2 - x_p) \quad (7.1.10)$

## 7.2. Στατική Ανάλυση Συμμετρικού Συστήματος Αγκύρωσης Πολλαπλών Κλάδων

Η στατική ανάλυση συστήματος αγκύρωσης πολλαπλών κλάδων απαιτεί την υιοθέτηση ορισμένων παραδοχών. Ειδικότερα, το προς μελέτη σύστημα αγκύρωσης παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

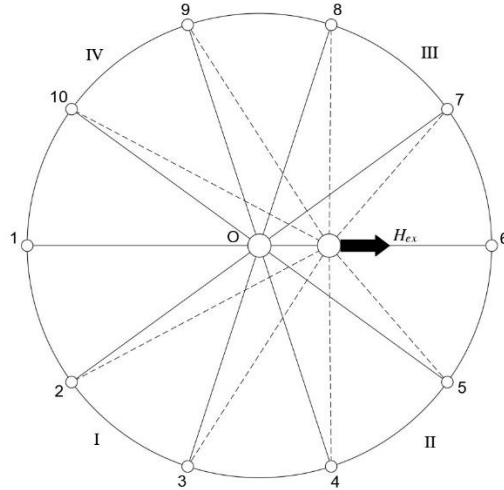
1. Συμμετρικά, διατεταγμένες και ομοιόμορφες γραμμές,  $N$  (άρτιος)
2. Σταθερό βάθος νερού,  $D$
3. Επιβαλλόμενη εξωτερική οριζόντια δύναμη,  $H_{ex}$ . (εξετάζεται η χειρίστη περίπτωση φόρτισης όπου η εξωτερική δύναμη ενεργεί κατά τη διεύθυνση μίας γραμμής καθώς τότε θα παραλάβει φορτίο μεγαλύτερο από οποιαδήποτε άλλη)

Στην κατάσταση ισορροπίας, το σύστημα των  $N$  γραμμών δε φορτίζεται από εξωτερικά φορτία, ισχύει δηλαδή  $H_{ex} = 0$ . Τότε, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 7.1 για λόγους περιορισμού των μετακινήσεων των προς αγκύρωση κατασκευών, η κάθε γραμμή φορτίζεται από την προένταση  $T_p$ , με οριζόντια συνιστώσα την  $H_p$ . Η απόσταση άγκυρας-άνωτερου σημείου του σχοινιού συμβολίζεται ως  $x_p$ .



Σχήμα (21): Συμβολή της συνιστώσας κατά μήκος της γραμμής στη μεταβολή της τάσης για μικρή γωνία [1].

Όταν ενεργεί ένα φορτίο  $H_{ex}$ , κατά μήκος της γραμμής, λόγω συμμετρίας η κατασκευή θα κινηθεί κατά τη διεύθυνση της  $H_{ex}$ . Κάθε γραμμή του συστήματος θα κινηθεί διαφορετικά αφού σχηματίζονται διαφορετικές γωνίες σε σχέση με την  $H_{ex}$ . Όλα τα προηγούμενα φαίνονται σχηματικά στο ακόλουθο σχήμα (22). Οι κινήσεις της κατασκευής θεωρούνται μικρές σε σχέση με το μήκος της κάθε γραμμής. Σαν αποτέλεσμα, η αλλαγή στη γωνία κάθε γραμμής είναι μικρή και μπορεί κατ' αρχήν να αγνοηθεί. Η μετακίνηση της κάθε γραμμής μπορεί να αναλυθεί σε μία συνιστώσα κατά το μήκος της και μία συνιστώσα κάθετη. Δεδομένου ότι η μεταβολή στη γωνία είναι μικρή, στην μεταβολή της τάσης συνεισφέρει μόνο η συνιστώσα κατά το μήκος της γραμμής, όπως φαίνεται στο σχήμα [21].



Σχήμα (22): Συμμετρικό σύστημα αγκύρωσης 10 κλάδων υπό την εφαρμογή εξωτερικού φορτίου κατά την οριζόντια διεύθυνση.

Εάν αριθμήσουμε με 1 την γραμμή που κατά κύριο λόγο παραλαμβάνει τη δύναμη  $H_{ex}$ , τότε η γραμμή  $k$ , με  $k = 2, 3, 4, \dots, N$  σχηματίζει γωνία ως προς την  $H_{ex}$ , ίση με  $\theta_k$ :

- $\theta_k = \frac{2\pi}{N} \cdot (k - 1)$  (7.2.1)

Οι γραμμές που βρίσκονται στο δεξιό ημιεπίπεδο συνεισφέρουν αρνητική δύναμη, ενώ οι γραμμές του αριστερού ημιεπιπέδου παραλαμβάνουν την  $H_{ex}$ . Λόγω συμμετρίας, οι γραμμές πχ, 2 και 10 έχουν την ίδια τάση και γ' αυτό αναλύουμε τις γραμμές κάτω από την ευθεία που ορίζεται από τη διεύθυνση της γραμμής 1. Ορίζουμε:

- $k_a = \left\lfloor \frac{N}{4} \right\rfloor + 1$  &  $k_b = \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor + 1$  (7.2.2)

όπου η συνάρτηση  $[x]$  ορίζει τον πλησιέστερο ακέραιο  $k$  στο  $x$  είναι μικρότερος ή ίσος του  $x$ . Τότε εάν  $\delta$  συμβολίζει τη μετατόπιση του σημείου O (μετατόπιση της γραμμής 1), οι γραμμές που ανήκουν στο τεταρτημόριο I (σχήμα (22)), μετατοπίζονται στη διεύθυνση του άξονά τους κατά την απόσταση:

- $\delta x_k = \delta \cdot \cos\theta_k, \quad k = 2, 3, \dots, k_a$  (7.2.3)

Ενώ αυτές του τεταρτημορίου II κατά την απόσταση:

- $\delta x_k = \delta \cdot \cos\theta_k, \quad k = k_a + 1, k_a + 2, \dots, k_b$  (7.2.4)

Όπου  $\theta_k$  δίνεται από τη σχέση (1) και  $0 < \theta_k \leq \frac{\pi}{2}$  για την σχέση (3) και  $\frac{\pi}{2} < \theta_k \leq \pi$  για τη σχέση (7.2.4). Η δύναμη  $H_k$  κάθε σχοινιού είναι συνάρτηση της απόστασης από την άγκυρα  $x_k$  όπου

$$\bullet \quad x_k = x_p + \delta x_k \quad (7.2.5)$$

Όπου,  $x_p = x_{p1} + x_{p2}$  και  $x_{p1}, x_{p2}$  οι οριζόντιες αποστάσεις της εκάστοτε γραμμής για το πρώτο και το δεύτερο υλικό αντίστοιχα, σε κατάσταση προέντασης και όταν  $H_{ex} = 0$ .

Έστω  $L_{tot}$  το συνολικό ανυψωμένο μήκος της γραμμής στην πιο τεντωμένη κατάσταση. Με  $L_1, L_2$  συμβολίζουμε τα ανυψωμένα μήκη για το πρώτο και το δεύτερο υλικό αντίστοιχα. Συνεπώς, αξιοποιώντας τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν στην ενότητα προκύπτει ότι:

$$\bullet \quad L_{tot} = L_1 + L_2$$

$$\Rightarrow L_{tot} = \frac{H_1}{w_1} * \left\{ \sqrt{\left(\frac{w_1 D_1}{H_1} + 1\right)^2 - 1} \right\} + \frac{H_1}{w_2} * \left\{ \sqrt{\left(\frac{w_2 D_2}{H_1} + \sqrt{1 + \left(\frac{w_1 L_1}{H_1}\right)^2}\right)^2 - 1} - \frac{w_1 L_1}{H_1} \right\} \quad (7.2.6)$$

Σε μία άλλη εντατική κατάσταση, με οριζόντια δύναμη πάνω στη γραμμή ίση με  $H_k$ , και απόσταση  $x_k$ , ισχύουν τα εξής:

$$\bullet \quad x_q = x_{q1} + x_{q2}$$

$$\Rightarrow x_q = \frac{H_k}{w_1} \cdot \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 L_1}{H_k} \right) + \frac{H_k}{w_2} \cdot \left( \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 L_1 + w_2 L_2}{H_k} \right) - \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 L_1}{H_k} \right) \right) \quad (7.2.7)$$

$$\bullet \quad L_q = L_{q1} + L_{q2}$$

$$\Rightarrow L_q = \frac{H_k}{w_1} * \left\{ \sqrt{\left(\frac{w_1 D_1}{H_k} + 1\right)^2 - 1} \right\} + \frac{H_k}{w_2} * \left\{ \sqrt{\left(\frac{w_2 D_2}{H_k} + \sqrt{1 + \left(\frac{w_1 L_1}{H_k}\right)^2}\right)^2 - 1} - \frac{w_1 L_1}{H_k} \right\} \quad (7.2.8)$$

$$\bullet \quad x_k = x_q + L_{tot} - L_q \quad (7.2.9)$$

Δεδομένου ότι  $N$  άρτιος αριθμός γραμμών, η ισορροπία των δυνάμεων  $H_k$  απαιτεί:

$$\bullet \quad H_1 + 2 \cdot \sum_{k=2}^{k_a} H_k \cos \theta_k = H_{ex} - 2 \cdot \sum_{k=k_a+1}^{k_b-1} H_k \cos \theta_k + H_{k_b} \quad (7.2.10)$$

## 8. Σχεδίαση Συστημάτων Αγκύρωσης

Κατά τη διαδικασία σχεδίασης συστημάτων αγκύρωσης, θα πρέπει να ικανοποιούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις οι οποίες σχετίζονται με την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα της αγκυρωμένης κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα:

1. Περιορισμός 1: Η μέγιστη μετατόπιση της κορυφής της γραμμής που δέχεται την εξωτερική φόρτιση κατά τη διεύθυνση του μήκους της, δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από ένα ποσοστό του βάρους του νερού. Το ποσοστό αυτό, σε προβλήματα σχεδίασης εκφράζεται μέσω ενός

συντελεστή  $\alpha_4$ , ο οποίος συνήθως έχει την τιμή 0.06 (η μέγιστη μετατόπιση  $\delta x$  δεν πρέπει να υπερβαίνει το 6% του βάθους  $D$  του νερού).

2. Περιορισμός 2: Η μέγιστη ένταση η οποία εμφανίζεται στην κορυφή της φορτιζόμενης γραμμής, δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από ένα ποσοστό της έντασης θραύσης της. Το ποσοστό αυτό σε προβλήματα σχεδίασης, λαμβάνεται συνήθως ίσο με 55% και ο αντίστοιχος συντελεστής ασφάλειας  $\alpha$  λαμβάνει την τιμή 0.55.
3. Περιορισμός 3: Το ανυψωμένο μήκος της γραμμής αγκύρωσης  $L_{tot}$ , μετά την επιβολή της εξωτερικής φόρτισης, δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από ένα ποσοστό του συνολικού μήκους της γραμμής  $L$ . Η απαίτηση αυτή μαθηματικά εκφράζεται από την σχέση  $L_{tot} \leq \alpha_3 \cdot L$ . Ο αντίστοιχος συντελεστής  $\alpha_3$  λαμβάνει συνήθως την τιμή 0.9.

## 8.1. Σχεδίαση Μίας Γραμμής Αγκύρωσης Αποτελούμενης από Δύο Τμήματα Μη Ελαστικού Υλικού

Το πρόβλημα της σχεδίασης μίας γραμμής αγκύρωσης αποτελούμενης από δύο μη ελαστικά υλικά αναλύεται ως ακολούθως. Έχει προσδιοριστεί ότι η γραμμή η οποία πρέπει να αγκυρωθεί, υπόκειται σε εξωτερική δύναμη  $H_{ex}$ . Ταυτόχρονα είναι γνωστό και το συνολικό βάθος του νερού  $D$ , στο οποίο θα γίνει η αγκύρωση. Ανεξάρτητα από το αν η γραμμή αγκύρωσης απαρτίζεται από ένα ή δύο ενιαία, μη ελαστικά υλικά, το βάρος ανά μονάδα μήκους της γραμμής στο νερό δίνεται από τη σχέση:

$$\bullet \quad w = \gamma \cdot A \quad (8.1.1)$$

Όπου,  $\gamma$  και  $A$  είναι το ειδικό βάρος και η επιφάνεια της διατομής αντίστοιχα της γραμμής και υπολογίζονται ως εξής ( $g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\rho_c$ : η πυκνότητα του εκάστοτε υλικού της γραμμής,  $\rho_w$ : η πυκνότητα του νερού,  $d$ : η ονομαστική διάμετρος του συρματόσχοινου και  $d_c$ : η διάμετρος σύρματος της αλυσίδας):

$$\bullet \quad \gamma = g \cdot (\rho_c - \rho_w) \quad (8.1.2)$$

$$\bullet \quad A = \begin{cases} \frac{\pi}{4} \cdot d^2, & \text{για συρματόσχοινα} \\ 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_c^2, & \text{για αλυσίδες} \end{cases} \quad (8.1.3)$$

Ακόμη, η εκάστοτε επιλογή υλικού για την κατασκευή της γραμμής αγκύρωσης συνεπάγεται και μια διαφορετική τιμή για την τάση θραύσης του υλικού,  $\sigma_{br}$ .

Εντούτοις, για τη σχεδίαση των γραμμών αγκύρωσης δύο υλικών, εκτός από τις προαναφερθείσες παραμέτρους του προβλήματος ( $D, H_{ex}, \sigma_{br}, \rho_c$ ) και τους συντελεστές ασφαλείας, απαιτείται η γνώση επιπλέον στοιχείων τα οποία προσδιορίζουν τη σχέση μεταξύ των τμημάτων της γραμμής αγκύρωσης από διαφορετικά υλικά. Αυτά είναι, ο λόγος των βαρών των δύο υλικών και ο λόγος των μηκών τους. Ορίζουμε λοιπόν:

$$\bullet \quad \frac{w_1}{w_2} = \delta \quad (8.1.4)$$

$$\bullet \quad \frac{L_1}{L} = \varepsilon \quad (8.1.5)$$

Το πρόβλημα πλέον ανάγεται στον υπολογισμό των ελάχιστων απαιτούμενων τιμών των βαρών  $w_1$  και  $w_2$  καθώς και των τιμών των μηκών  $L_1$  και  $L_2$  έτσι ώστε η τάση στην κορυφή της γραμμής να μην είναι μεγαλύτερη από ένα ποσοστό της τάσης θραύσης  $\sigma_{br2}$  του δεύτερου υλικού της γραμμής αγκύρωσης.

Η ανάλυση της μεθοδολογίας σχεδίασης ξεκινά με τη σχέση η οποία δίνει το συνολικό βάθος του νερού και η οποία προέρχεται από την άθροιση των σχέσεων (6.3) και (6.4). Η αντίστοιχη εξίσωση προκύπτει ως:

- $D = D_1 + D_2$

$$\begin{aligned} \Rightarrow D &= \frac{H}{w_1} \cdot \left( \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_1}{H} + \frac{V_A}{H} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{V_A}{H} \right)^2} \right) \\ &\quad + \frac{H}{w_2} \cdot \left( \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_1 + w_2 \cdot L_2}{H} + \frac{V_A}{H} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_1}{H} + \frac{V_A}{H} \right)^2} \right) \\ \Rightarrow D &= \frac{1}{w_1} \cdot \left( \sqrt{H^2 + (V_A + w_1 \cdot L_1)^2} - \sqrt{H^2 (1 + \tan^2 \varphi_A)} \right) \\ &\quad + \frac{1}{w_2} \cdot \left( \sqrt{H^2 + (V_A + w_1 \cdot L_1 + w_2 \cdot L_2)^2} - \sqrt{H^2 + (V_A + w_1 \cdot L_1)^2} \right) \end{aligned} \quad (8.1.6)$$

Ο υπολογισμός του βάρους της γραμμής στο νερό προκύπτει ως απόρροια της θεώρησης ότι η μέγιστη τιμή της τάσης που αναπτύσσεται στην πλέον φορτιζόμενη γραμμή από την εξωτερικά επιβαλλόμενη δύναμη  $H_{ex}$  πρέπει να είναι μικρότερη από ένα ποσοστό της τάσης θραύσης (περιορισμός 2). Επομένως, προκύπτει ότι:

- $T_{max} = T(L_2) = \alpha \cdot \sigma_{br2} \cdot A$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \sqrt{H^2 + (V_A + w_1 \cdot L_1 + w_2 \cdot L_2)^2} &= \alpha \cdot \sigma_{br2} \cdot \frac{w_2}{\gamma_2} \\ \Rightarrow H \sqrt{1 + \left( \frac{V_A + w_1 \cdot L_1 + w_2 \cdot L_2}{H} \right)^2} &= \frac{\sigma_{br2} \cdot w_2 \cdot a}{\gamma_2} \end{aligned} \quad (8.1.7)$$

Χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις των  $\delta$  και  $\varepsilon$ , οι σχέσεις (8.1.6) και (8.1.7) διαμορφώνονται ως εξής:

- $\sqrt{H^2 + (V_A + w_2 \cdot L \cdot (\delta\varepsilon + 1 - \varepsilon))^2} - \sqrt{H^2 + (V_A + w_2 L \delta\varepsilon)^2}$

$$= D \cdot w_2 - \frac{1}{\delta} \cdot \left( \sqrt{H^2 + (V_A + w_2 L \delta\varepsilon)^2} - \sqrt{H^2 \cdot (1 + \tan^2 \varphi_A)^2} \right) \quad (8.1.6\alpha)$$

- $H \sqrt{1 + \left( \frac{V_A + w_2 \cdot L \cdot (\delta\varepsilon + 1 - \varepsilon)}{H} \right)^2} = \frac{\sigma_{br2} \cdot w_2 \cdot a}{\gamma_2} \quad (8.1.7\alpha)$



## 8.2. Σχεδίαση Συστημάτων Αγκύρωσης Πολλαπλών Κλάδων Αποτελούμενων από Δύο Τμήματα Μη Ελαστικού Υλικού

Κατά τη σχεδίαση συστημάτων αγκύρωσης πολλαπλών κλάδων, η δυσκολία που ανακύπτει σχετίζεται με το γεγονός ότι δεν γνωρίζουμε εκ των προτέρων πόσες γραμμές φορτίζονται ταυτόχρονα και σε ποιο βαθμό η κάθε μία. Στην περίπτωση αυτή, η σχεδίαση αφορά κυρίως τη γραμμή η οποία παραλαμβάνει κατά το μεγαλύτερο μέρος της την εξωτερική φόρτιση  $H_{ex}$ , και λόγω αυτής αναπτύσσεται στην κορυφή της η μέγιστη δύναμη που δρα στο σύστημα αγκύρωσης  $H_1$ . Κατά τη σχεδίαση συστημάτων αγκύρωσης τα οποία αποτελούνται από αριθμό γραμμών πλέον της μίας, θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα έτσι ώστε να μην μετακινείται περισσότερο από ένα ορισμένο μήκος το οποίο ορίζεται με τη βοήθεια του συντελεστή μετατόπισης  $\alpha_4$  (Περιορισμός 1). Αυτό όπως έχει ήδη προαναφερθεί εκτενώς επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της προέντασης. Κατά συνέπεια, όταν πρόκειται για σχεδίαση συστήματος αγκύρωσης με αριθμό γραμμών πλέον της μίας θα πρέπει εκτός των άλλων χαρακτηριστικών μεγεθών τους, να υπολογιστεί και η απαιτούμενη δύναμη προέντασης τους, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ασφάλειας οι οποίες έχουν ήδη τεθεί.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, υποθέτουμε ότι το προς μελέτη σύστημα αγκύρωσης αποτελείται από άρτιο αριθμό γραμμών. Οπότε, η εξίσωση (7.2.10) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\bullet \quad c_1 \cdot H_1 = H_{ex} + c_2 \cdot H_1 \quad (8.2.1)$$

Με τους συντελεστές  $c_1, c_2$  να προκύπτουν ως εξής:

$$\bullet \quad c_1 = \frac{H_1 + 2 \cdot \sum_{k=2}^{k_a} H_k \cos \theta_k}{H_1} \quad (8.2.2)$$

$$\bullet \quad c_2 = \frac{-2 \cdot \sum_{k=k_a+1}^{k_b-1} H_k \cos \theta_k + H_{k_b}}{H_1} \quad (8.2.3)$$

Οι συντελεστές  $c_1$  και  $c_2$  είναι συναρτήσεις του αριθμού των γραμμών, των συντελεστών ασφαλείας  $\alpha_4$  και  $\alpha$ , του βάθους του νερού  $D$ , του λόγου βαρών  $\delta$  καθώς και του λόγου μηκών  $\varepsilon$ , ενώ είναι ανεξάρτητοι του εξωτερικού φορτίου  $H_{ex}$ . Δύναται να κατασκευασθεί λοιπόν ένα σύστημα  $k$  μη γραμμικών εξισώσεων με  $k$  αγνώστους, το οποίο θα περιγράφει πλήρως το προς μελέτη σύστημα αγκύρωσης και η επίλυση του οποίου θα δίνει τις τιμές των συντελεστών αυτών. Στη συνέχεια, παρατίθενται ενδεικτικά το σύστημα των μη γραμμικών εξισώσεων που προκύπτει για τέσσερις κλάδους αγκύρωσης ( $N = 4$ ) ενώ για περισσότερους κλάδους η διαδικασία είναι ανάλογη. Σημειώνεται ότι λήφθηκε υπόψιν μηδενική γωνία πυθμένα ( $\varphi_A = 0$ ) ενώ οι οι γνωστές παράμετροι ( $D, \delta, \varepsilon, \sigma_{br}, \alpha, \alpha_4, H_{ex}$ ) του προβλήματος λαμβάνουν προκαθορισμένες τιμές.

### Εξισώσεις για N=4 κλάδους αγκύρωσης

$$\bullet \quad \frac{w_1}{w_2} = \delta \quad (8.2.4)$$

$$\bullet \quad \frac{L_{11}}{L_{11} + L_{12}} = \varepsilon \quad (8.2.5)$$

$$\bullet \quad H_1 = H_{ex} + H_3 \quad (8.2.6)$$

- $H_1 + w_1 \cdot D_{1_1} + w_2 \cdot D_{1_2} = \frac{a \cdot \sigma_{br}}{\gamma_2} w_2$  (8.2.7)

- $D_{p1} = \frac{H_p}{w_1} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_{p1}}{H_p} \right)^2} - 1 \right\}$  (8.2.8)

- $D_{p2} = \frac{H_p}{w_2} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_{p1} + w_2 \cdot L_{p2}}{H_p} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_{p1}}{H_p} \right)^2} \right\}$  (8.2.9)

- $D = D_{p1} + D_{p2}$  (8.2.10)

- $x_{p1} = \frac{H_p}{w_1} \cdot \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{p1}}{H_p} \right)$  (8.2.11)

- $x_{p2} = \frac{H_p}{w_2} \cdot \left\{ \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{p1} + w_2 \cdot L_{p2}}{H_p} \right) - \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{p1}}{H_p} \right) \right\}$  (8.2.12)

- $x_p = x_{p1} + x_{p2}$  (8.2.13)

- $D_{1_1} = \frac{H_1}{w_1} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_{1_1}}{H_1} \right)^2} - 1 \right\}$  (8.2.14)

- $D_{1_2} = \frac{H_1}{w_2} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_{1_1} + w_2 \cdot L_{1_2}}{H_1} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_{1_1}}{H_1} \right)^2} \right\}$  (8.2.15)

- $D = D_{1_1} + D_{1_2}$  (8.2.16)

- $D_{2_1} = \frac{H_2}{w_1} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_{2_1}}{H_2} \right)^2} - 1 \right\}$  (8.2.17)

- $D_{2_2} = \frac{H_2}{w_2} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_{2_1} + w_2 \cdot L_{2_2}}{H_2} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_{2_1}}{H_2} \right)^2} \right\}$  (8.2.18)

- $D = D_{2_1} + D_{2_2}$  (8.2.19)

- $D_{3_1} = \frac{H_3}{w_1} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_{3_1}}{H_3} \right)^2} - 1 \right\}$  (8.2.20)

- $D_{3_2} = \frac{H_3}{w_2} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_{3_1} + w_2 \cdot L_{3_2}}{H_3} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{w_1 \cdot L_{3_1}}{H_3} \right)^2} \right\}$  (8.2.21)

- $D = D_{3_1} + D_{3_2}$  (8.2.22)

- $x_{1_1} = \frac{H_1}{w_1} \cdot \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{1_1}}{H_1} \right)$  (8.2.23)

$$\bullet \quad x_{1_2} = \frac{H_1}{w_2} \cdot \left\{ \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{1_1} + w_2 \cdot L_{1_2}}{H_1} \right) - \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{1_1}}{H_1} \right) \right\} \quad (8.2.24)$$

$$\bullet \quad x_1 = x_{1_1} + x_{1_2} \quad (8.2.25)$$

$$\bullet \quad x_1 = x_p + \delta$$

$$\Rightarrow x_1 = x_p + \alpha_4 \cdot D \quad (8.2.26)$$

$$\bullet \quad x_{2_1} = \frac{H_2}{w_1} \cdot \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{2_1}}{H_2} \right) \quad (8.2.27)$$

$$\bullet \quad x_{2_2} = \frac{H_2}{w_2} \cdot \left\{ \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{2_1} + w_2 \cdot L_{2_2}}{H_2} \right) - \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{2_1}}{H_2} \right) \right\} \quad (8.2.28)$$

$$\bullet \quad x_2 = x_{2_1} + x_{2_2} \quad (8.2.29)$$

$$\bullet \quad x_2 = x_p \quad (8.2.30)$$

$$\bullet \quad x_{3_1} = \frac{H_3}{w_1} \cdot \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{3_1}}{H_3} \right) \quad (8.2.31)$$

$$\bullet \quad x_{3_2} = \frac{H_3}{w_2} \cdot \left\{ \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{3_1} + w_2 \cdot L_{3_2}}{H_3} \right) - \sinh^{-1} \left( \frac{w_1 \cdot L_{3_1}}{H_3} \right) \right\} \quad (8.2.32)$$

$$\bullet \quad x_3 = x_{3_1} + x_{3_2} \quad (8.2.33)$$

$$\bullet \quad x_3 = x_p - \delta$$

$$\Rightarrow x_3 = x_p - \alpha_4 \cdot D \quad (8.2.34)$$

#### Άγνωστοι για N=4 κλάδους αγκύρωσης

- $D_{p1}$ : το βάθος νερού από τον πυθμένα έως το σημείο σύνδεσης των δύο υλικών στην κατάσταση προέντασης.
- $D_{p2}$ : το βάθος νερού από το σημείο σύνδεσης των δύο υλικών έως το ανώτερο σημείο του κλάδου (στο όριο της επιφάνειας της θάλασσας) στην κατάσταση προέντασης.
- $H_p$ : η οριζόντια συνιστώσα της εφαρμοζόμενης δύναμης προέντασης.
- $x_{p1}$ : η οριζόντια απόσταση μεταξύ της άγκυρας και του σημείου σύνδεσης των δύο υλικών στην κατάσταση προέντασης. (κατώτερο τμήμα της αλυσοειδούς)
- $x_{p2}$ : η οριζόντια απόσταση μεταξύ του σημείου σύνδεσης των δύο υλικών και του ανωτέρου σημείου του κλάδου (στο όριο της επιφάνειας της θάλασσας) στην κατάσταση προέντασης. (ανώτερο τμήμα της αλυσοειδούς)
- $x_p$ : η συνολική, οριζόντια απόσταση μεταξύ της άγκυρας και του ανωτέρου σημείου του κλάδου (στο όριο της επιφάνειας της θάλασσας) στην κατάσταση προέντασης.
- $L_{p1}$ : το μήκος του κατώτερου τμήματος της αλυσοειδούς στην κατάσταση προέντασης.
- $L_{p2}$ : το μήκος του ανωτέρου τμήματος της αλυσοειδούς στην κατάσταση προέντασης.
- $H_j, j = 1,2,3$ : η οριζόντια συνιστώσα της εφαρμοζόμενης τάσης στον  $j$  κλάδο.

- $D_{j_1}, j = 1,2,3$ : το βάθος του νερού από τον πυθμένα έως το σημείο σύνδεσης των δύο υλικών στον  $j$  κλάδο.
- $D_{j_2}, j = 1,2,3$ : το βάθος νερού από το σημείο σύνδεσης των δύο υλικών έως το ανώτερο σημείο στον  $j$  κλάδο (στο όριο της επιφάνειας της θάλασσας).
- $x_{j_1}, j = 1,2,3$ : η οριζόντια απόσταση μεταξύ της άγκυρας και του σημείου σύνδεσης των δύο υλικών στον  $j$  κλάδο.
- $x_{j_2}, j = 1,2,3$ : η οριζόντια απόσταση μεταξύ του σημείου σύνδεσης των δύο υλικών και του ανωτέρου σημείου του κλάδου (στο όριο της επιφάνειας της θάλασσας) στον  $j$  κλάδο.
- $x_j, j = 1,2,3$ : η συνολική, οριζόντια απόσταση μεταξύ της άγκυρας και του ανωτέρου σημείου (στο όριο της επιφάνειας της θάλασσας) στον  $j$  κλάδο.
- $L_{j_1}, j = 1,2,3$ : το μήκος του κατώτερου τμήματος της αλυσοειδούς στον  $j$  κλάδο υπό την επιβολή της οριζόντιας δύναμης  $H_j$ .
- $L_{j_2}, j = 1,2,3$ : το μήκος του ανώτερου τμήματος της αλυσοειδούς στον  $j$  κλάδο υπό την επιβολή της οριζόντιας δύναμης  $H_j$ . Σημειώνεται ότι  $L_{1_2} = L_{2_2} = L_{3_2} = L_{p2}$  καθώς το ανώτερο τμήμα της αλυσοειδούς συνήθως κατασκευάζεται από συρματόσχοινο το οποίο έχει μικρή ελαστικότητα. Δηλαδή δεν πρόκειται για καινούριους αγνώστους.
- $w_1$ : το βάρος ανά μονάδα μήκους του κατώτερου τμήματος της αλυσοειδούς.
- $w_2$ : το βάρος ανά μονάδα μήκους του ανώτερου τμήματος της αλυσοειδούς.

## 9. Υπολογιστικό Πρόγραμμα MSTAC – Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Κάνοντας μία ανασκόπηση στα όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες διαπιστώνουμε πως το μαθηματικό πρόβλημα, οι προκύπτουσες εξισώσεις αλλά και σημαντικές απαιτήσεις σχεδίασης διατυπώθηκαν και αναλύθηκαν επαρκώς ώστε να διαμορφώσουν το κατάλληλο θεωρητικό υπόβαθρο για τη μελέτη συστημάτων αγκύρωσης. Στην παρούσα ενότητα επιχειρείται να αναπτυχθεί μια μεθοδολογία και να προκύψουν ορισμένα γενικά συμπεράσματα που αφορούν στη διαδικασία σχεδίασης τέτοιων συστημάτων.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, βασικό εργαλείο για την υλοποίηση του υπολογιστικού μέρους αποτελεί το υπολογιστικό πρόγραμμα «MSTAC» του εργαστηρίου πλωτών κατασκευών. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα .exe το οποίο δέχεται ως δεδομένα εισόδου ένα 'XXXXDA'.txt file και επιστρέφει ως δεδομένα εξόδου ένα 'XXXXOU'.txt file. Προσοχή πρέπει να δίνεται στα δεδομένα εισόδου να έχουν την κατάλληλη διάταξη ώστε να μπορεί το πρόγραμμα να τρέξει. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα «MSTAC» πραγματοποιήθηκαν:

1. Για συμμετρικό σύστημα γραμμών αγκύρωσης με άρτιο αριθμό κλάδων:  $N = 4, N = 6, N = 8, N = 10$  &  $N = 12$ . Αναφορικά με τη διάταξη των κλάδων στο χώρο, ορίστηκε η No.1 γραμμή, αυτή δηλαδή που παραλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της εξωτερικής φόρτισης να βρίσκεται στη θέση για γωνία διαγραφής  $\pi$  ενώ οι θέσεις των υπόλοιπων κλάδων να προκύπτουν με αρχή τη γραμμή No.1 διαγράφοντας κατάλληλη, ανθωορολογιακή φορά.
2. Για βάθη νερού:  $D = 20, D = 50, D = 100$  &  $D = 300$
3. Για δύο τμήματα υλικού με: μέτρο ελαστικότητας  $EA = 5 * 10^{30}$  και τάσεις θραύσης για την αλυσίδα (κατώτερο τμήμα γραμμής αγκύρωσης) και το συρματόσχοινο (άνωτερο τμήμα της

γραμμής αγκύρωσης)  $\sigma_{br1} = 5.52 * 10^8 \frac{N}{m^2}$  και  $\sigma_{br2} = 1.0 * 10^9 \frac{N}{m^2}$  αντίστοιχα. Έτσι, τα όρια θραύσης προκύπτουν ως  $T_{BREAK1} = 13985126 N$  και. Παράλληλα, λαμβάνονται προκαθορισμένες τιμές για τις πρόσθετες μάζες και τη διάμετρο των σχοινιών (οι ακριβείς τιμές τους παραλείπονται καθώς η επιλογή τους είναι τυχαία αφού διαπιστώθηκε ότι δεν επηρεάζουν τα τελικά αποτελέσματα). Έτσι, τα όρια θραύσης για τα δύο υλικά προκύπτουν ως  $T_{BREAK1} = 13985126 N$  και  $T_{BREAK2} = 6361725 N$ .

4. Για τιμές του λόγου μηκών:  $\varepsilon = 0.2, \varepsilon = 0.3$  &  $\varepsilon = 0.4$
5. Για τιμές του λόγου βαρών:  $\delta = 3, \delta = 4$  &  $\delta = 5$
6. Για δύο διαφορετικές τιμές της μάζας ανά μονάδα μήκους του τμήματος του δεύτερου υλικού:  $w_2 = 15 \frac{kg}{m}$  &  $w_2 = 30 \frac{kg}{m}$ . Η επιτάχυνση της βαρύτητας λήφθηκε ως  $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$  οπότε πρόεκυψαν οι αντίστοιχες τιμές του βάρους ανά μονάδα μήκους για το δεύτερο υλικό ενώ οι τιμές για τη μάζα και το βάρος ανά μονάδα μήκους για το πρώτο υλικό υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψιν το  $\delta$ .
7. Για ολικό μήκος της γραμμής προκαθορισμένο και ίδιο για υπολογισμούς στο ίδιο βάθος νερού ανεξαρτήτως των υπόλοιπων παραγόντων. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε:  $D = 20$  &  $L = 150, D = 50$  &  $L = 300, D = 100$  &  $L = 600, D = 300$  &  $L = 1200$ .
8. Για επιμέρους μήκη των δύο τμημάτων των υλικών με βάση το ολικό μήκος, το λόγο  $\varepsilon$  αλλά και τον Περιορισμό 3.
9. Για οριζόντια δύναμη προέντασης στην κορυφή της γραμμής και εξωτερική φόρτιση σύμφωνα με το βάθος του νερού. Ειδικότερα, για μικρότερα βάθη νερού ( $D = 20, D = 50$ ) επιλέχθηκε  $H_p = 45000$  &  $H_{ex} = 55000$  ενώ για μεγαλύτερα βάθη νερού ( $D = 100, D = 300$ ) επιλέχθηκε  $H_p = 55000$  &  $H_{ex} = 65000$ . Η αλλαγή αυτή οφείλεται στην απαίτηση η πλέον φορτισμένη γραμμή No.1 να μην ανυψώνεται ώστε να εξασφαλίζεται μηδενική γωνία πυθμένα ( $\varphi_A = 0$ ).

Η επιλογή των εννιά προαναφερθέντων σημείων βασίζεται στο γεγονός ότι για να καταλήξουμε σε ορισμένα συμπεράσματα έπρεπε οι παράμετροι του προβλήματος να παραμείνουν ίδιοι και οι συγκρίσεις να αφορούν την επιλογή διαφορετικών βαρών για το δεύτερο υλικό.

Αξιοποιώντας όλα τα παραπάνω προέκυψαν δεδομένα που σχετίζονται με τις οριζόντιες συνιστώσες της δύναμης μετά την επιβολή της εξωτερικής φόρτισης και αφορούν στον κάθε κλάδο του συστήματος αγκύρωσης που εξετάζαμε κάθε φορά. Με βάση τους τύπους για τον υπολογισμό των συντελεστών  $c_1, c_2$  που παρατίθενται στην ενότητα 11 (βλ. Παράρτημα) προέκυψαν οι ακόλουθοι πίνακες αλλά και ενδεικτικά διαγράμματα της οριζόντιας δύναμης που αναπτύσσεται στην πλέον φορτισμένη γραμμή για  $N=6$  κλάδους και για τα διάφορα  $D, \varepsilon, \delta$ .

Πραγματοποιώντας συγκρίσεις μεταξύ των τιμών των τιμών των πινάκων μπορεί να διαπιστώσει κανείς τα παρακάτω:

1. Για τον ίδιο λόγο  $\varepsilon$  και  $\delta$ , το ίδιο βάθος νερού  $D$  και τον ίδιο αριθμό κλάδων  $N$ , η αύξηση του βάρους  $w_2$  του δεύτερου υλικού (και κατ'άναλογο τρόπο και του  $w_1$  του πρώτου υλικού) προκαλεί σε ορισμένες περιπτώσεις μικρή και σε άλλες μεγάλη μείωση των συντελεστών  $c_1$  και  $c_2$ . Αν και η μείωση αυτή είναι ακόμα μικρότερη στο συντελεστή  $c_1$ , δεν μπορούμε να προβούμε

στον ισχυρισμό ότι ο υπολογισμός των συγκεκριμένων δύο συντελεστών είναι ανεξάρτητος των επιλεχθέντων βαρών  $w_1, w_2$ . Συνεπακόλουθα, δεν προκύπτει κάποια γενικευμένη μεθοδολογία που να λύνει το πρόβλημα της σχεδίασης με το υπολογιστικό πρόγραμμα «MSTAC», αφού το τελευταίο απαιτεί ως input τον καθορισμό του  $w_2$ .

Συμπέρασμα: Οι συντελεστές σχεδίασης  $c_1$  και  $c_2$  και κατ'επέκταση όλη η διαδικασία της σχεδίασης εξαρτάται από την επιλογή του βάρους του υλικού. Συνεπώς, κάθε περίπτωση σχεδίασης πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά.

2. Εξετάζοντας τους πίνακες που αφορούν στο ίδιο βάρος του δεύτερου υλικού, διαπιστώνουμε ότι για τους λόγους μηκών  $\varepsilon = 0.2$  &  $\varepsilon = 0.3$  και ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου βαρών  $\delta$ , οι συντελεστές  $c_1$  και  $c_2$  παρουσιάζουν μικρή έως ανεπαίσθητη απόκλιση. Πρόκειται για μια σημαντική παρατήρηση αφού μπορεί να εξοικονομηθεί υλικό και κατ'επέκταση οικονομικοί πόροι με κατάλληλο προσδιορισμό – που καθορίζεται από το λόγο  $\varepsilon$  – των μηκών των δύο τμημάτων των υλικών για την ίδια εφαρμογή αγκύρωσης. Βέβαια, χρειάζεται να αναφερθεί ότι στην περίπτωση λόγου μηκών  $\varepsilon = 0.4$ , η διαφορά στους συντελεστές είναι μεγαλύτερη οπότε και απαιτείται μεγαλύτερη προσοχή στη φάση της σχεδίασης.

Συμπέρασμα: Δεδομένου ότι η επιλογή βάρους του δεύτερου υλικού είναι προκαθορισμένη, μικρές τιμές του λόγου μηκών  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 0.2$  &  $\varepsilon = 0.3$ ) οδηγούν στο ίδιο πρόβλημα σχεδίασης, ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου βαρών  $\delta$ .

Πραγματοποιώντας τώρα συγκρίσεις μεταξύ των διαγραμμάτων που παρουσιάζουν την οριζόντια συνιστώσα  $H_1$  της τάσης που αναπτύσσεται στον πρώτο κλάδο αγκύρωσης ως συνάρτηση του βάθους του νερού και για όλα τα  $\varepsilon, \delta$ , μπορεί να διαπιστώσει κανείς τα παρακάτω:

1. Ανεξάρτητα από τις τιμές του λόγου μηκών  $\varepsilon$  και του λόγου βαρών  $\delta$ , σε ένα συμμετρικό σύστημα αγκύρωσης  $N=6$  κλάδων, όπου το βάθος νερού είναι  $D = 300$ , αναπτύσσεται η μικρότερη  $H_1$ . Με άλλα λόγια, η επιβολή της εξωτερικής φόρτισης  $H_{ex}$  προκαλεί την ανάπτυξη μιας οριζόντιας συνιστώσας της τάσης στην κορυφή της γραμμής, η οποία όμως δεν φορτίζει έντονα τη No.1 γραμμή. Από την άλλη μεριά, ο πλέον φορτισμένος, πρώτος κλάδος εντοπίζεται στις περιπτώσεις όπου το βάθος νερού είναι μικρότερο ( $D = 20$ ). Ενώ για τις ενδιάμεσες τιμές του βάθους του νερού ( $D = 50$  &  $D = 100$ ), παρατηρούνται και πάλι υψηλές τιμές της  $H_1$  αλλά σε κάθε περίπτωση μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές για  $D = 20$ . μοναδική εξαίρεση στα όσα προαναφέρθηκαν, αποτελεί η περίπτωση για  $\varepsilon = 0.4$  &  $\delta = 3$  όπου ο πιο φορτισμένος κλάδος αγκύρωσης (υψηλότερη οριζόντια συνιστώσα  $H_1$ ) εντοπίζεται σε βάθος νερού  $D = 100$ .

Συμπέρασμα: Σε μεγάλο βάθος νερού ( $D = 300$ ), η αναπτυσσόμενη οριζόντια δύναμη  $H_1$  του πρώτου κλάδου αγκύρωσης είναι εμφανώς μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη δύναμη σε μικρό βάθος νερού ( $D = 20$ ). Στα ενδιάμεσα βάθη νερού ( $D = 50$  &  $D = 100$ ), ο πρώτος κλάδος αγκύρωσης είναι και πάλι έντονα φορτισμένος αλλά κατά κανόνα λιγότερο, σε σύγκριση με τον αντίστοιχο κλάδο σε μικρό βάθος νερού.

2. Διατηρώντας σταθερό το λόγο μηκών  $\varepsilon$ , οι διαφορετικές τιμές που λαμβάνει ο λόγος βαρών  $\delta$  επηρεάζει άμεσα την αναπτυσσόμενη οριζόντια συνιστώσα  $H_1$  της τάσης στην κορυφή του πρώτου κλάδου αγκύρωσης. Αναλυτικότερα, οποιαδήποτε τιμή του βάθους του νερού  $D$  και να εξετάσουμε, αύξηση του  $\delta$  συμβάλλει κατά κανόνα σε αύξηση της τιμής της  $H_1$  και άρα σε πιο φορτισμένες γραμμές αγκύρωσης.

Συμπέρασμα: Μεγαλύτερες τιμές του λόγου βαρών  $\delta$  οδηγούν σε πιο φορτισμένους κλάδους αγκύρωσης ανεξάρτητα από τις τιμές του λόγου μηκών  $\varepsilon$  και του βάθους του νερού  $D$ .

3. Διατηρώντας τώρα σταθερό το λόγο βαρών  $\delta$ , οι διαφορετικές τιμές που λαμβάνει ο λόγος μηκών  $\varepsilon$  επηρεάζει και πάλι την αναπτυσσόμενη οριζόντια συνιστώσα  $H_1$  της τάσης στην κορυφή του πρώτου κλάδου αγκύρωσης αλλά με διαφορετικό τρόπο αυτήν τη φορά. Πιο συγκεκριμένα, στα μεγαλύτερα βάθη νερού ( $D = 50$ ,  $D = 100$  &  $D = 300$ ), αύξηση του  $\varepsilon$  συμβάλλει κατά κανόνα σε αύξηση της τιμής της  $H_1$  και άρα σε πιο φορτισμένες γραμμές αγκύρωσης. Αυτή η παρατήρηση δεν ισχύει ωστόσο για βάθος νερού  $D = 20$  καθώς η πλέον φορτισμένος κλάδος αγκύρωσης εντοπίζεται για  $\varepsilon = 0.3$  ανεξαρτήτως του  $\delta$ .

Συμπέρασμα: Μεγαλύτερες τιμές του λόγου μηκών  $\varepsilon$  οδηγούν σε πιο φορτισμένους κλάδους αγκύρωσης ανεξάρτητα από τις τιμές του λόγου βαρών  $\delta$ , μόνο σε περιπτώσεις ενδιάμεσων και μεγάλων βαθών νερού ( $D = 50$ ,  $D = 100$  &  $D = 300$ ).

$\varepsilon=0.2$ & $\delta=3$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.665	1.948	1.632	2.382	2.075	3.194	3.640	1.744	3.426
50	1.000	0.653	1.940	1.575	2.376	2.003	3.181	3.520	1.749	3.308
100	1.000	0.598	1.929	1.497	2.368	1.921	3.169	3.415	1.753	3.214
300	1.000	0.580	1.926	1.475	2.366	1.898	3.166	3.383	1.754	3.186

Πίνακας (3): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=15$  kg/m,  $\varepsilon=0.2$  &  $\delta=3$ .

$\varepsilon=0.3$ & $\delta=3$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.667	1.946	1.620	2.381	2.057	3.190	3.607	1.745	3.397
50	1.000	0.656	1.940	1.580	2.376	2.008	3.181	3.527	1.749	3.311
100	1.000	0.603	1.929	1.501	2.369	1.926	3.170	3.420	1.752	3.219
300	1.000	0.582	1.926	1.477	2.366	1.900	3.166	3.386	1.754	3.188

Πίνακας (4): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=15$  kg/m,  $\varepsilon=0.3$  &  $\delta=3$ .

$\varepsilon=0.4$ & $\delta=3$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.661	1.944	1.605	2.379	2.042	3.187	3.578	1.746	3.372
50	1.000	0.662	1.941	1.583	2.377	2.011	3.182	3.531	1.749	3.315
100	1.000	0.613	1.930	1.509	2.369	1.935	3.171	3.431	1.752	3.228
300	1.000	0.589	1.927	1.486	2.367	1.909	3.168	3.398	1.753	3.199

Πίνακας (5): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=15$  kg/m,  $\varepsilon=0.4$  &  $\delta=3$ .



$\varepsilon=0.2$ & $\delta=4$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.669	1.947	1.630	2.382	2.067	3.191	3.619	1.745	3.407
50	1.000	0.654	1.940	1.577	2.376	2.005	3.181	3.526	1.749	3.314
100	1.000	0.598	1.929	1.498	2.368	1.922	3.169	3.416	1.753	3.215
300	1.000	0.581	1.926	1.475	2.366	1.898	3.166	3.383	1.754	3.186

Πίνακας (6): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=15$  kg/m,  $\varepsilon=0.2$  &  $\delta=4$ .

$\varepsilon=0.3$ & $\delta=4$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.673	1.946	1.618	2.381	2.055	3.190	3.604	1.746	3.384
50	1.000	0.660	1.941	1.584	2.377	2.012	3.182	3.535	1.748	3.318
100	1.000	0.604	1.929	1.503	2.369	1.927	3.170	3.422	1.752	3.221
300	1.000	0.582	1.926	1.477	2.366	1.900	3.166	3.386	1.754	3.188

Πίνακας (7): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=15$  kg/m,  $\varepsilon=0.3$  &  $\delta=4$ .

$\varepsilon=0.4$ & $\delta=4$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.668	1.944	1.606	2.379	2.043	3.187	3.578	1.747	3.362
50	1.000	0.668	1.942	1.589	2.377	2.016	3.183	3.539	1.748	3.322
100	1.000	0.616	1.931	1.512	2.370	1.937	3.172	3.436	1.752	3.232
300	1.000	0.590	1.928	1.488	2.368	1.911	3.168	3.401	1.753	3.201

Πίνακας(8): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=15$  kg/m,  $\varepsilon=0.4$  &  $\delta=4$ .

$\varepsilon=0.2$ & $\delta=5$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.674	1.947	1.628	2.382	2.072	3.192	3.626	1.745	3.403
50	1.000	0.655	1.940	1.580	2.376	2.010	3.182	3.532	1.749	3.316
100	1.000	0.599	1.929	1.498	2.368	1.923	3.169	3.416	1.753	3.215
300	1.000	0.580	1.926	1.475	2.366	1.898	3.166	3.383	1.754	3.186

Πίνακας (9): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=15$  kg/m,  $\varepsilon=0.2$  &  $\delta=5$ .

$\varepsilon=0.3$ & $\delta=5$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.677	2.015	1.739	2.382	2.059	3.190	3.607	1.746	3.387
50	1.000	0.663	1.941	1.587	2.377	2.017	3.183	3.538	1.748	3.324
100	1.000	0.605	1.930	1.505	2.369	1.929	3.170	3.424	1.752	3.222
300	1.000	0.582	1.926	1.477	2.367	1.900	3.166	3.387	1.754	3.189

Πίνακας (10): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=15$  kg/m,  $\varepsilon=0.3$  &  $\delta=5$ .

$\varepsilon=0.4$ & $\delta=5$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.673	1.945	1.611	2.380	2.048	3.188	3.585	1.747	3.368
50	1.000	0.672	1.942	1.594	2.377	2.020	3.183	3.545	1.748	3.327
100	1.000	0.618	1.931	1.516	2.370	1.940	3.172	3.438	1.752	3.234
300	1.000	0.591	1.928	1.489	2.368	1.912	3.168	3.402	1.753	3.202

Πίνακας (11): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=15$  kg/m,  $\varepsilon=0.4$  &  $\delta=5$ .

$\varepsilon=0.2$ & $\delta=3$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.659	1.941	1.589	2.378	2.022	3.185	3.557	1.748	3.342
50	1.000	0.636	1.936	1.550	2.373	1.976	3.177	3.488	1.750	3.277
100	1.000	0.584	1.926	1.479	2.367	1.903	3.167	3.390	1.753	3.193
300	1.000	0.554	1.921	1.439	2.363	1.861	3.161	3.336	1.755	3.145

Πίνακας (12): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=30$  kg/m,  $\varepsilon=0.2$  &  $\delta=3$ .

$\varepsilon=0.3$ & $\delta=3$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.663	1.942	1.594	2.378	2.028	3.185	3.557	1.747	3.349
50	1.000	0.639	1.937	1.555	2.374	1.981	3.178	3.494	1.750	3.283
100	1.000	0.584	1.926	1.479	2.367	1.903	3.167	3.390	1.753	3.193
300	1.000	0.554	1.921	1.438	2.363	1.860	3.161	3.334	1.755	3.144

Πίνακας (13): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=30$  kg/m,  $\varepsilon=0.3$  &  $\delta=3$ .

$\varepsilon=0.4$ & $\delta=3$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.658	1.943	1.597	2.378	2.031	3.185	3.561	1.747	3.353
50	1.000	0.644	1.938	1.561	2.374	1.988	3.179	3.501	1.750	3.289
100	1.000	0.584	1.926	1.480	2.367	1.904	3.167	3.392	1.753	3.193
300	1.000	0.557	1.921	1.443	2.363	1.865	3.162	3.341	1.755	3.149

Πίνακας (14): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=30$  kg/m,  $\varepsilon=0.4$  &  $\delta=3$ .

$\varepsilon=0.2$ & $\delta=4$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.661	1.942	1.594	2.378	2.028	3.185	3.565	1.747	3.357
50	1.000	0.636	1.936	1.551	2.374	1.978	3.177	3.488	1.750	3.278
100	1.000	0.584	1.926	1.479	2.367	1.903	3.167	3.390	1.753	3.193
300	1.000	0.554	1.921	1.439	2.363	1.861	3.161	3.336	1.755	3.145

Πίνακας (15): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=30$  kg/m,  $\varepsilon=0.2$  &  $\delta=4$ .

$\varepsilon=0.3$ & $\delta=4$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.666	1.943	1.597	2.379	2.036	3.187	3.575	1.747	3.357
50	1.000	0.640	1.937	1.556	2.374	1.983	3.178	3.495	1.750	3.286
100	1.000	0.584	1.926	1.479	2.367	1.903	3.167	3.390	1.753	3.193
300	1.000	0.554	1.921	1.438	2.363	1.860	3.161	3.334	1.755	3.144

Πίνακας (16): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=30$  kg/m,  $\varepsilon=0.3$  &  $\delta=4$ .

$\varepsilon=0.4$ & $\delta=4$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.663	1.944	1.604	2.379	2.038	3.187	3.577	1.747	3.359
50	1.000	0.646	1.938	1.564	2.375	1.991	3.179	3.505	1.749	3.295
100	1.000	0.584	1.926	1.480	2.367	1.904	3.167	3.392	1.753	3.194
300	1.000	0.557	1.921	1.443	2.363	1.865	3.162	3.341	1.755	3.149

Πίνακας (17): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=30$  kg/m,  $\varepsilon=0.4$  &  $\delta=4$ .

$\varepsilon=0.2$ & $\delta=5$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.664	1.943	1.599	2.379	2.038	3.187	3.579	1.747	3.361
50	1.000	0.637	1.936	1.551	2.374	1.978	3.177	3.488	1.750	3.278
100	1.000	0.584	1.926	1.479	2.367	1.903	3.167	3.390	1.753	3.193
300	1.000	0.554	1.921	1.439	2.363	1.861	3.161	3.336	1.755	3.145

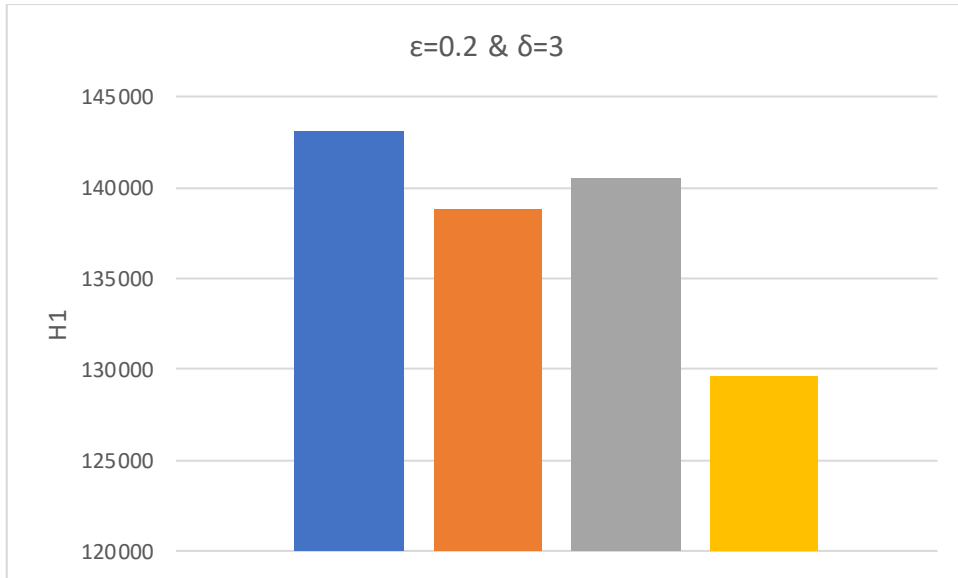
Πίνακας (18): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=30$  kg/m,  $\varepsilon=0.2$  &  $\delta=5$ .

$\varepsilon=0.3$ & $\delta=5$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.658	1.943	1.603	2.379	2.042	3.187	3.582	1.746	3.372
50	1.000	0.640	1.937	1.557	2.374	1.985	3.178	3.497	1.750	3.288
100	1.000	0.584	1.926	1.479	2.367	1.903	3.167	3.390	1.753	3.192
300	1.000	0.553	1.921	1.438	2.363	1.860	3.161	3.334	1.755	3.144

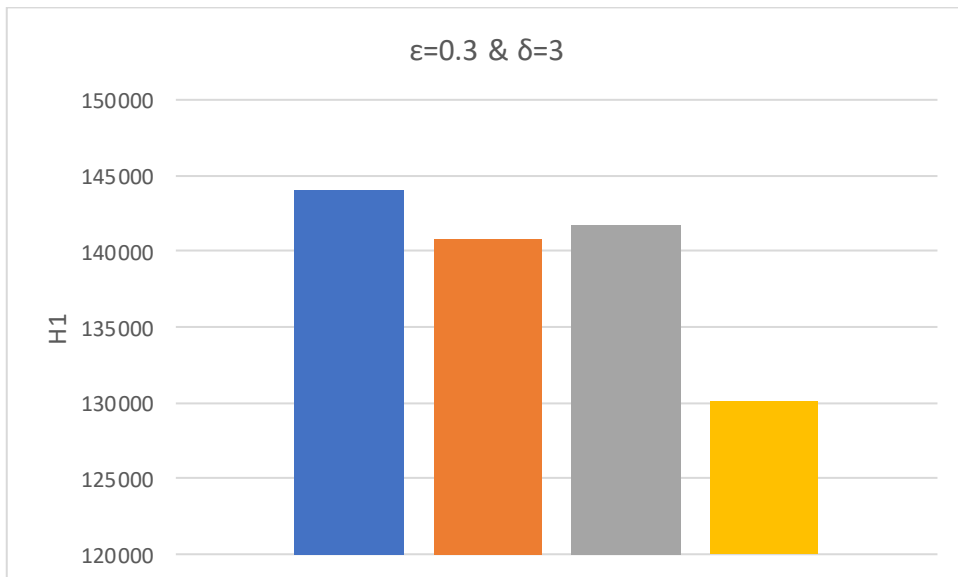
Πίνακας (19): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=30$  kg/m,  $\varepsilon=0.3$  &  $\delta=5$ .

$\varepsilon=0.4$ & $\delta=5$										
N=	N=4		N=6		N=8		N=10		N=12	
D (m)	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
20	1.000	0.665	1.944	1.610	2.380	2.044	3.188	3.585	1.746	3.374
50	1.000	0.655	1.938	1.566	2.375	1.993	3.180	3.510	1.749	3.296
100	1.000	0.584	1.926	1.480	2.367	1.904	3.167	3.392	1.753	3.194
300	1.000	0.557	1.921	1.443	2.363	1.865	3.162	3.341	1.755	3.149

Πίνακας (20): Συντελεστές  $c_1, c_2$  για  $w_2=30$  kg/m,  $\varepsilon=0.4$  &  $\delta=5$ .



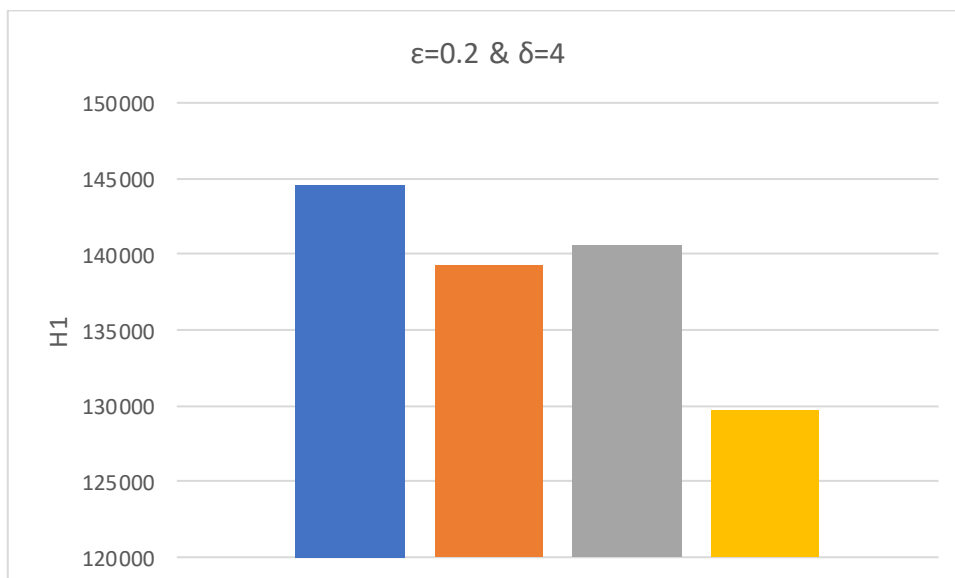
Διάγραμμα (1): Οριζόντια δύναμη  $H1$  για  $w_2=15 \text{ kg/m}$ ,  $N=6$ ,  $\epsilon=0.2$  &  $\delta=3$   
 (μπλε:  $D=20$ , πορτοκαλί:  $D=50$ , γκρι:  $D=100$ , κίτρινο:  $D=300$ ).



Διάγραμμα (2): Οριζόντια δύναμη  $H1$  για  $w_2=15 \text{ kg/m}$ ,  $N=6$ ,  $\epsilon=0.3$  &  $\delta=3$   
 (μπλε:  $D=20$ , πορτοκαλί:  $D=50$ , γκρι:  $D=100$ , κίτρινο:  $D=300$ ).



Διάγραμμα (3): Οριζόντια δύναμη  $H_1$  για  $w_2=15$  kg/m,  $N=6$ ,  $\varepsilon=0.4$  &  $\delta=3$   
(μπλε:  $D=20$ , πορτοκαλί:  $D=50$ , γκρι:  $D=100$ , κίτρινο:  $D=300$ ).



Διάγραμμα (4): Οριζόντια δύναμη  $H_1$  για  $w_2=15$  kg/m,  $N=6$ ,  $\varepsilon=0.2$  &  $\delta=4$   
(μπλε:  $D=20$ , πορτοκαλί:  $D=50$ , γκρι:  $D=100$ , κίτρινο:  $D=300$ ).

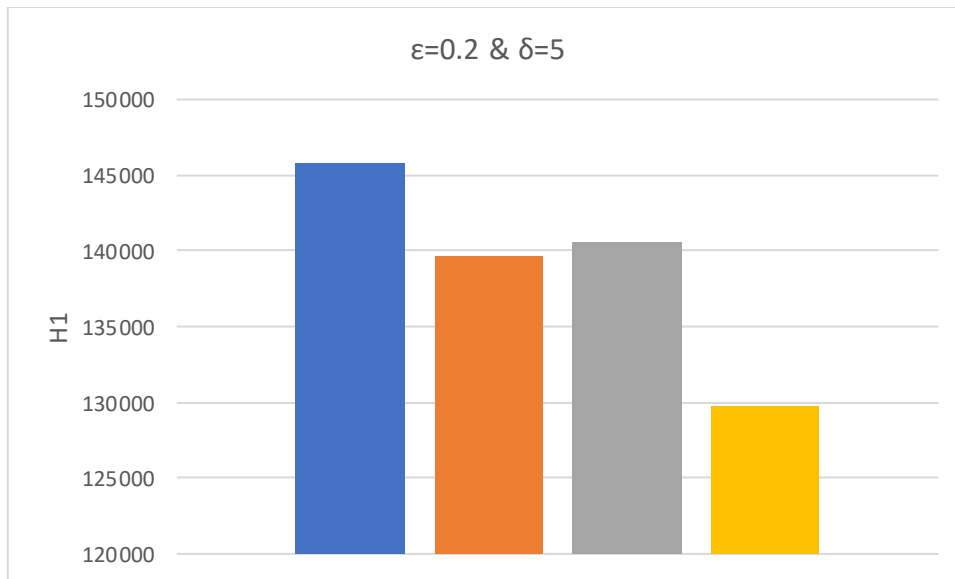


Διάγραμμα (5): Οριζόντια δύναμη  $H_1$  για  $w_2=15 \text{ kg/m}$ ,  $N=6$ ,  $\epsilon=0.3$  &  $\delta=4$   
 (μπλε:  $D=20$ , πορτοκαλί:  $D=50$ , γκρι:  $D=100$ , κίτρινο:  $D=300$ ).



Διάγραμμα (6): Οριζόντια δύναμη  $H_1$  για  $w_2=15 \text{ kg/m}$ ,  $N=6$ ,  $\epsilon=0.4$  &  $\delta=4$   
 (μπλε:  $D=20$ , πορτοκαλί:  $D=50$ , γκρι:  $D=100$ , κίτρινο:  $D=300$ ).

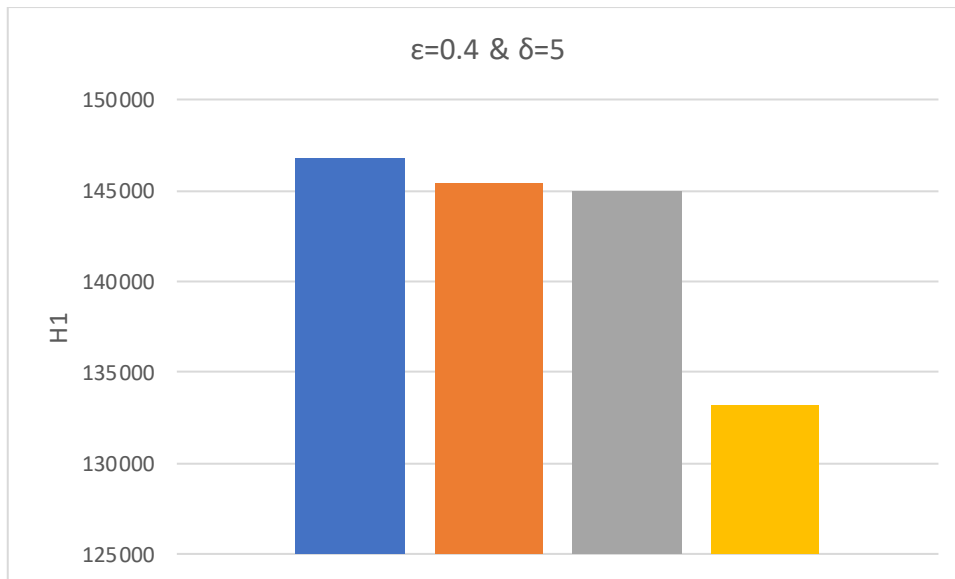




Διάγραμμα (7): Οριζόντια δύναμη  $H1$  για  $w_2=15 \text{ kg/m}$ ,  $N=6$ ,  $\epsilon=0.2$  &  $\delta=5$   
 (μπλε:  $D=20$ , πορτοκαλί:  $D=50$ , γκρι:  $D=100$ , κίτρινο:  $D=300$ ).



Διάγραμμα (8): Οριζόντια δύναμη  $H1$  για  $w_2=15 \text{ kg/m}$ ,  $N=6$ ,  $\epsilon=0.3$  &  $\delta=5$   
 (μπλε:  $D=20$ , πορτοκαλί:  $D=50$ , γκρι:  $D=100$ , κίτρινο:  $D=300$ ).



Διάγραμμα (9): Οριζόντια δύναμη  $H1$  για  $w_2=15 \text{ kg/m}$ ,  $N=6$ ,  $\epsilon=0.4$  &  $\delta=5$   
(μπλε:  $D=20$ , πορτοκαλί:  $D=50$ , γκρι:  $D=100$ , κίτρινο:  $D=300$ ).

## 10. Σχόλια και Μελλοντικές Προτάσεις

Η παρούσα εργασία επιχειρήσε να δώσει απάντηση σε ένα καίριο ερώτημα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί που ασχολούνται με το σύνολο των εφαρμογών αγκύρωσης: «Πως μπορεί να υλοποιηθεί η διαδικασία της σχεδίασης δεδομένου ότι δεν γνωρίζουμε εκ των προτέρων τα βάρη των δύο τμημάτων των υλικών, τα οποία μάλιστα αποτελούν και μεταβλητή του προβλήματος;». Τα αποτελέσματα του προγράμματος «MSTAC» κατέδειξαν πως δεν μπορούν να εξαχθούν σαφή και ασφαλή συμπεράσματα για τους συντελεστές που υπεισέρχονται στη σχεδίαση για κάθε τιμή του βάρους, το οποίο κάθε φορά πρέπει να εισάγεται ως input στο πρόγραμμα.

Η συγκεκριμένη διπλωματική μπορεί να επεκταθεί και σε μελέτη συστημάτων αγκυρώσεων αποτελούμενων από διαφορετικά υλικά αλλά με γωνία πυθμένα διαφορετική του μηδενός πχ.  $\varphi_A = 2^\circ$ ,  $\varphi_A = 4^\circ$ . Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η ανάπτυξη υπολογιστικού κώδικα αξιοποιώντας κάποια γλώσσα προγραμματισμού όπου θα λύνει το σύστημα των  $k$  μη γραμμικών εξισώσεων με κατάλληλο ορισμό των αρχικών τιμών κάθε μεταβλητής. Επιπρόσθετα, μπορεί να πραγματοποιηθεί μελέτη στατικής συμπεριφοράς και σχεδίαση συστημάτων που φέρουν ανωστικά σώματα ή πρόσθετα βάρη. Τα ανωστικά σώματα συνδέονται με τη γραμμή αγκύρωσης και ασκούν ανωστική δύναμη. Τέλος, μια ακόμη ιδέα για μελλοντική έρευνα είναι η λύση των εξισώσεων της ελαστικής αλυσοειδούς, δηλαδή όταν η επαπτομενική παραμόρφωση δεν αγνοείται ( $e \rightarrow 0$ ) ενώ η επέκταση της θεωρίας σε ένα σύστημα αγκύρωσης υπό υψηλή πρόενταση η ανάπτυξη της μεθοδολογίας σχεδίασης του αποτελούν μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση του προβλήματος.

## 11. Παράρτημα

Τύποι υπολογισμού των συντελεστών  $c_1$  και  $c_2$

ανάλογα με τον αριθμό  $N$  των κλάδων

N=4

$$\triangleright c_2 = \frac{H_3}{H_1}$$

N=6

$$\triangleright c_1 = \frac{H_1 + 2H_2 \cos\left(\frac{\pi}{3}\right)}{H_1}$$

$$\triangleright c_2 = \frac{H_4 - 2H_3 \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)}{H_1}$$

N=8

$$\triangleright c_1 = \frac{H_1 + 2H_2 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)}{H_1}$$

$$\triangleright c_2 = \frac{H_5 - 2H_4 \cos\left(\frac{3\pi}{4}\right)}{H_1}$$

N=10

$$\triangleright c_1 = \frac{H_1 + 2H_2 \cos\left(\frac{\pi}{5}\right) + 2H_3 \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right)}{H_1}$$

$$\triangleright c_2 = \frac{H_6 - 2H_4 \cos\left(\frac{3\pi}{5}\right) - 2H_5 \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right)}{H_1}$$

N=12

$$\triangleright c_1 = \frac{H_1 + 2H_2 \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + 2H_3 \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)}{H_1}$$

$$\triangleright c_2 = \frac{H_7 - 2H_6 \cos\left(\frac{5\pi}{6}\right) - 2H_5 \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)}{H_1}$$

Αρχείο input του υπολογιστικού προγράμματος MSTAC για σύστημα

N=6 γραμμών αγκύρωσης

```
6 0.0000000E+00
2 200.0000 0
90.00000 60.00000 13.84200 588.600 0.1270000
7.0938899E+30 13985126.
110.0000 15.00000 6.520000 147.1500 9.0000004E-02
```

5.8240000E+30 6361725.

-0.000000 0.0000000E+00 3.141593

2 200.0000 0

90.00000 60.00000 13.84200 588.600 0.1270000

7.0938899E+30 13985126.

110.0000 15.00000 6.520000 147.1500 9.0000004E-02

5.8240000E+30 6361725.

0.000000 0.0000000E+00 4.188970

2 200.0000 0

90.00000 60.00000 13.84200 588.600 0.1270000

7.0938899E+30 13985126.

110.0000 15.00000 6.520000 147.1500 9.0000004E-02

5.8240000E+30 6361725.

-0.000000 0.0000000E+00 5.235988

2 200.0000 0

90.00000 60.00000 13.84200 588.600 0.1270000

7.0938899E+30 13985126.

110.0000 15.00000 6.520000 147.1500 9.0000004E-02

5.8240000E+30 6361725.

-0.000000 0.0000000E+00 0.000000

2 200.0000 0

90.00000 60.00000 13.84200 588.600 0.1270000

7.0938899E+30 13985126.

110.0000 15.00000 6.520000 147.1500 9.0000004E-02

5.8240000E+30 6361725.

-0.000000 0.0000000E+00 1.047198

2 200.0000 0

90.00000 60.00000 13.84200 588.600 0.1270000

7.0938899E+30 13985126.

110.0000 15.00000 6.520000 147.1500 9.0000004E-02

5.8240000E+30 6361725.

-0.000000 0.0000000E+00 2.094395

## 12. Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Μαυράκος Σ.Α., Χατζηγεωργίου Ι.Κ. (2007). *Αγκυρώσεις πλωτών κατασκευών*. Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ.
- [2] Wilson, J. F. (2003). Offshore Structures (marine engineering). *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 161–168. <https://doi.org/10.1016/b0-12-227410-5/00512-3>.
- [3] Patel, M. H. (1989). *Dynamics of offshore structures*. Butterworths.
- [4] *Company history*. Shell Global. (n.d.). <https://www.shell.com/about-us/our-heritage/our-company-history.html>.
- [5] Wu, Y., Kwan, T., Luo, Y., & Ma, K.-T. (2019). *Mooring system engineering for offshore structures*. Gulf Professional Publishing.
- [6] *History of mooring*. History of mooring | Asociación Española de Empresas de Amarre. (n.d.). <http://www.amarradores.es/en/our-work/history-mooring>.
- [7] ISO 20438, Ships and Marine Technology—Offshore Mooring Chains, ISO International Standards, 2017.
- [8] API Spec 2F, Specification for Mooring Chain, first ed. issued 1974, third ed., January 1981, American Petroleum Institute, 1981.
- [9] DNV OS E302 (2008). *Offshore Mooring Chain*. Det Norske Veritas.
- [10] Jones D.R.H. (2013, February 13). *Torsional failure of a wire rope mooring line during installation in Deep Water*. Failure Analysis Case Studies II. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080439594500080>.
- [11] API RP-2SK, Design and analysis of stationkeeping systems for floating structures, API Recommended Practice 2SK, third ed., American Petroleum Institute, 2005.
- [12] Rossi, R., Del Vecchio, C. J. M., & Gonçalves, R. C. F. (2010, May 3). *SS: Fiber Moorings, recent experiences and research: Moorings with polyester ropes in Petrobras: Experience and the evolution of life cycle management*. OnePetro. <https://doi.org/10.4043/20845-MS>.
- [13] Lankhorst Ropes - supplier of synthetic fibre and steel wire ropes. (n.d.). <https://www.lankhorstropes.com/synthetic-fibre-ropes>.
- [14] Riewald, P. G. (1986). Performance analysis of an Aramid Mooring line. *Offshore Technology Conference*. <https://doi.org/10.4043/5187-ms>.
- [15] *Anchor manual 2015: The Guide to Anchoring*. (2015). Vryhof Anchors B.V.
- [16] MIT OpenCourseWare. (n.d.). *Design of ocean systems: Mechanical engineering*. MIT OpenCourseWare. <https://ocw.mit.edu/courses/2-019-design-of-ocean-systems-spring-2011/>.

- [17] *Mooring systems*. Home. (n.d.). <http://abc-moorings.weebly.com/mooring-systems.html>.
- [18] Paik, J. K. (2022). *Ship-shaped offshore installations: Design, building, and Operation*. Cambridge university press.
- [19] Μαυράκος Σ.Α., (1999). *Μελέτη και Σχεδίαση πλωτών κατασκευών*. Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ.
- [20] <https://www.gsproducts.co.uk/16mm-galvanised-steel-chain-swivel/>.
- [21] Ltd, U. (2021, June 16). *Class 6x36 IWRC and fiber core - uniropes*. Uniropes Ltd. <https://www.uniropes.com/ropes/class-6x36-iwrc-and-fiber-core/>.
- [22] <https://www.boomarine.com/products/nylon-ropes>.
- [23] <https://www.lanex.cz/en/>.
- [24] *Aramid rope - high heat resistance mooring rope*. Pilotfits. (2020, April 6). <https://pilotfits.com/products/aramid-rope/>.