ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη Συστήματος Αγκυροβόλησης Μικρών Σκαφών
Σχεδιασμός και Ανάλυση Άγκυρας Τύπου Delta

Συγγραφή: Άλκηστις Παπαντωνίου

Επιβλέπων: Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

Ευχαριστίες

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Γεώργιο Σταυρουλάκη, για την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τις γιαγιάδες μου Ρένα και Ξένη, τις θείες μου Σουζάνα και Λίλη, και τους γονείς μου, Δημήτρη και Ινώ, για την στήριξη και κατανόησή τους, καθώς βρίσκονταν και βρίσκονται πάντα στο πλευρό μου.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου στην Ηλέκτρα και στην Εύα, καθώς και σε όλους μου τους φίλους, παλιούς και καινούργιους, για τις όμορφες στιγμές που ζήσαμε και τα ανεπανάληπτα φοιτητικά χρόνια στα Χανιά.

Σύνοψη

Στην παρούσα μελετάται ευρέως διαδεδομένο σύστημα αγκυροβόλησης που χρησιμοποιείται από μικρού μήκους σκάφη, κύρια συστατικά του οποίου αποτελούν η άγκυρα και το μέσο πρόσδεσης της στο σκάφος. Εξετάζεται η στατική και δυναμική συμπεριφορά του συστήματος κάτω από την επίδραση δυνάμεων που οφείλονται στον άνεμο, την κίνηση της θάλασσας και τον βυθό. Εξετάζονται ομογενή και ετερογενή μέσα πρόσδεσης σκάφους-άγκυρας με χρήση αλυσίδας και σκοινιού, και μελετάται η μηχανική συμπεριφορά τους κάτω από συνθήκες φόρτισης. Υπολογίζεται η μετατόπιση του σκάφους όταν η τάση στο μέσο πρόσδεσης αυξάνεται, και η οριακή τάση μετά την οποία η δύναμη συγκρατήσεως της άγκυρας θα μειωθεί. Επίσης μελετάται πώς μεταβολές στην γεωμετρία της άγκυρας σε σχέση με το βυθό και στη γωνία που εφαρμόζεται η τάση έλξης από το μέσο πρόσδεσης, επηρεάζουν την μέγιστη εφικτή δύναμη συγκράτησης που αυτή προσφέρει. Στα πλαίσια της παρούσας, σχεδιάζεται άγκυρα τύπου Delta μάζας 4kg και υπολογίζεται διεξοδικά η συμπεριφορά της κάτω από ακραίες συνθήκες υψηλής φόρτισης. Για το σχεδιασμό και τους σχετικούς υπολογισμούς χρησιμοποιούνται λογισμικό CAD (Solidworks 2012) καθώς και το Comsol Multiphysics 4.2a. Χρησιμοποιούνται στοιχεία για την αναμενόμενη δύναμη συγκράτησης που προσφέρει ο συγκεκριμένος τύπος άγκυρας από πρόσφατες μετρήσεις πεδίου, που έχουν δημοσιευτεί. Τέλος αναλύεται ο βέλτιστος τρόπος αγκυροβόλησης σκαφών μήκους μέχρι 8 μέτρων χρησιμοποιώντας την άγκυρα αυτή σε συνδυασμό με τα λοιπά συστατικά του συστήματος αγκυροβόλησης, για την συγκράτηση του σκάφους σε ακραίες καιρικές συνθήκες.

Περιεχόμενα

Περίληψη

Στην παρούσα μελετάται σύστημα αγκυροβόλησης μικρού μήκους σκαφών που χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυσιπλοΐα, κύρια συστατικά του οποίου αποτελούν η άγκυρα και το μέσο πρόσδεσής της στο σκάφος.

Στο πρώτο εδάφιο περιγράφεται η άγκυρα και τα βασικά της μέρη. Παρατίθενται ιστορικά στοιχεία από την εφεύρεση της συσκευής και την εξέλιξή της στο χρόνο, και οι κυριότεροι τύποι σύγχρονων αγκυρών για μικρά και μεγάλα σκάφη ή πλοία.

Στο επόμενο εδάφιο δίνονται τα βασικά στοιχεία του εξοπλισμού-συστήματος αγκυροβόλησης, ορίζονται η λειτουργία τους και οι τεχνικές απαιτήσεις που οφείλει να πληρεί. Δίνεται σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του συστήματος άγκυρα – μέσο πρόσδεσης – σκάφος και χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις αλυσοειδούς καμπύλης που εφαρμόζονται όταν το μέσο πρόσθεσης είναι αλυσίδα, για να μελετηθεί η μεταβολή της θέσης του αγκυροβολημένου σκάφους, για διαφορετικές φορτίσεις (πχ λόγω ανέμου).

Το επόμενο κεφάλαιο διαπραγματεύεται το μέγεθος και κατεύθυνση των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν πάνω στο σκάφος, σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του μεγέθη, του αντίστοιχα πως οι δυνάμεις αυτές επιδρούν στο σύστημα αγκυροβόλησης.

Κατόπιν εξετάζονται οι δυνάμεις συγκράτησης που προσφέρουν οι άγκυρες όταν αγκυροβολούνται σε πυθμένα που προσφέρει καλή πρόσφυση. Παρατίθενται στοιχεία από μετρήσεις της δύναμης συγκράτησης που προσφέρεται από άγκυρες του εμπορίου για σκάφη μικρού μεγέθους, που αφορούν την παρούσα μελέτη. Επίσης εξετάζεται πώς η γεωμετρία της άγκυρας σε σχέση με τον πυθμένα και την κλίση της δύναμης που εφαρμόζεται πάνω σε αυτήν από το μέσο πρόσδεσης, επηρεάζει την αναμενόμενη δύναμη συγκράτησης.

Στη συνέχεια εξετάζεται η χρήση ομογενούς μέσου πρόσδεσης από αλυσίδα, και υπολογίζεται η θέση του σκάφους και οι δυνάμεις συγκράτησης σε σχέση με τη δύναμη φόρτισης και άλλες παραμέτρους αγκυροβόλησης όπως το έκταμα και το βάθος αγκυροβόλησης.

Κατόπιν εξετάζεται η μηχανική συμπεριφορά μη ομογενών μέσων πρόσδεσης, που συνήθως αποτελούνται από συνδυασμό αλυσίδας και σκοινιού (κοινή πρακτική για μικρού μήκους σκάφη) και η χρήση σχοινιού με βοηθητικό βάρος (κοινή πρακτική χρήσης της βοηθητικής άγκυρας). Επίσης εξετάζεται πώς η ελαστικότητα του μέσου πρόσδεσης επηρεάζει την συμπεριφορά του συστήματος και τη θέση του αγκυροβολημένου σκάφους σε περίπτωση υψηλής φόρτισης.

Στη συνέχεια αναλύεται η συμπεριφορά του σκάφους και οι σχετικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σύστημα αγκυροβόλησης όταν η δύναμη φόρτισης μεταβάλλεται στο χρόνο (πχ. λόγω ριπών ανέμου), και πώς αυτά επηρεάζουν την αγκυροβόληση με ομογενή και μη ομογενή μέσα πρόσδεσης.

Στο επόμενο εδάφιο εξετάζονται οι δυνάμεις που ενδέχεται να αναπτυχθούν στα συστήματα αγκυροβόλησης μικρών σκαφών (πχ. μέχρι 8 m μήκους) σε συνήθεις και σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Τα στοιχεία αυτά λαμβάνονται υπ’ όψη για το σχεδιασμό του συστήματος και των παραμέτρων αγκυροβόλησης, με χρήση άγκυρας τύπου Delta 4 kg, σε συνδυασμό με βοηθητική άγκυρα ίδιου τύπου όταν απαιτείται από τις καιρικές συνθήκες. Για τους υπολογισμούς αυτούς, βασική υπόθεση είναι ότι η αγκυροβόληση γίνεται σε βυθό που προσφέρει τη βέλτιστη πρόσφυση στην άγκυρα, έτσι ώστε το σύστημα αγκυροβόλησης να προσφέρει την μέγιστη δυνατή συγκράτηση στο σκάφος.

Στα επόμενα εδάφια γίνεται ένας λεπτομερής σχεδιασμός μιας άγκυρας τύπου Delta 4kg με χρήση του προγράμματος CAD Solidworks 2012. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται το τρισδιάστατο σώμα της συγκεκριμένης άγκυρας για να υπολογιστεί η παραμόρφωση και η αντοχή της σε συνθήκες υψηλής φόρτισης. Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και το πρόγραμμα Comsol Multiphysics 4.2a. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης δείχνουν ότι η άγκυρα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό ακραίες συνθήκες φόρτισης χωρίς να παραμορφωθεί ή να σπάσει, και ότι τυχόν αστοχία του συστήματος αγκυροβόλησης δεν θα οφείλεται στην η άγκυρα αλλά στο μέσο πρόσδεσης της.

Κεφάλαιο 1^{ο}
Εισαγωγικά

1.1 Ορισμός

Άγκυρα είναι μία συσκευή, κατασκευασμένη συνήθως από μέταλλο, που χρησιμεύει για τη σταθερή σύνδεση ενός σκάφους με τον πυθμένα ενός σώματος νερού, αποτρέποντας το να παρασυρθεί λόγω ανέμου ή ρεύματος νερού. Υπάρχουν άγκυρες μονίμως ποντισμένες («ρεμέτζο») που χρησιμοποιούνται για μόνιμο ελλιμενισμό σκαφών, και προσωρινές (που ποντίζονται και ανασύρονται). Η παρούσα εργασία αναφέρεται στις προσωρινές άγκυρες, που φέρονται από τα σκάφη και χρησιμοποιούνται για πρόσκαιρο αγκυροβόλιο.

Οι άγκυρες αποτελούνται από τα εξής μέρη:

Ένα στέλεχος (shank) με δακτύλιο στο ένα άκρο του οποίου βρίσκεται το λεγόμενο «μάτι της αλυσίδας» (anchor's pulling eye) πάνω στο οποίο δένεται το σκοινί ή η αλυσίδα που συνδέει την άγκυρα με το σκάφος .

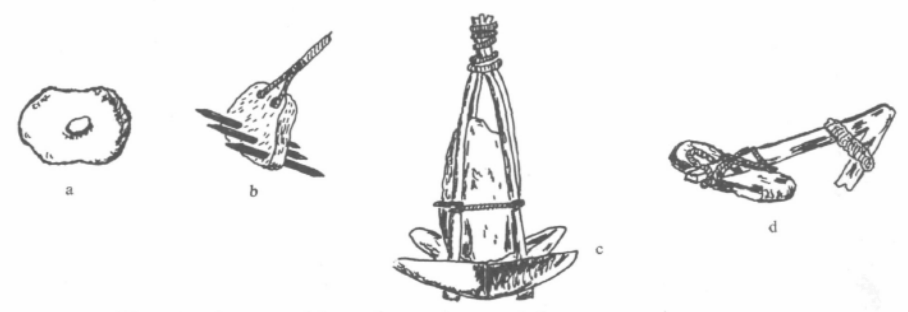
Έναν ή περισσότερους βραχίονες (flukes) με μυτερή απόληξη («νύχια») πού προορίζονται να εισχωρήσουν στον πυθμένα κατά την αγκυροβόληση δημιουργώντας πρόσφυση, ώστε να δράσουν ως σταθερό σημείο στο οποίο εφαρμόζονται όλες οι δυνάμεις που δρουν στο σκάφος και που μεταδίδονται μέσω του συστήματος σύνδεσης (αλυσίδα ή σκοινί).

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Οι πρώτες άγκυρες που χρησιμοποιήθηκαν πριν χιλιάδες χρόνια ήταν μεγάλες/βαριές πέτρες δεμένες σε κάποιο είδος σκοινιού που κατέβαινε από το πλάι του πλεούμενου. Αυτές οι άγκυρες – πέτρες συγκρατούσαν τη θέση του σκάφους ως προς το βυθό μόνο με το βάρος τους. [2]

Περίπου το 2000 π.Χ. οι ναυτικοί των Ινδιών σχεδίασαν άγκυρες που μπορούσαν να κρατούν στο βυθό λόγω του σχήματος τους και όχι μόνο με το βάρος τους. Αυτοί οι ναυτικοί κατασκεύασαν μεγάλα αγκίστρια με μια περόνη [2]. Γύρω στο 600 π.Χ. οι

Έλληνες πρόσθεσαν ένα δεύτερο νύχι και επιπλέον μια κάθετη ράβδο στην κορυφή της άγκυρας για να διευκολύνουν τα νύχια να εισχωρούν στο βυθό. Αυτός ήταν ο τύπος της άγκυρας που χρησιμοποιούσαν στην Ομηρική εποχή, πολύ αργότερα του Κολόμβου αλλά και πολλά πλοία των τελευταίων ετών.



Εικόνα 1.1 – Προϊστορικά Μοντέλα Άγκυρας [2]

α. πέτρα-άγκυρα, Γερμανία

β. πέτρα-άγκυρα με τρία ξύλα, Λίβανος 19ος αιώνας π.Χ

γ. άγκυρα, Σουηδία

δ. Ξύλινη άγκυρα με επιπλέον βάρος από πέτρα, Μαλαισία

1.3 Περιγραφή Άγκυρας - Τύποι Αγκύρων.

Η σημερινή εποχή διακρίνεται από την μεγάλη ποικιλία – αφθονία αγαθών, υλικών και τεχνολογικής ανάπτυξης. Αυτό φυσικά ισχύει και για τις άγκυρες. Από τους διάφορους τύπους αγκύρων πού υπάρχουν, οι πιο συνηθισμένοι είναι:

α) Ένστυπη ή κοινή άγκυρα του Αγγλικού Ναυαρχείου.

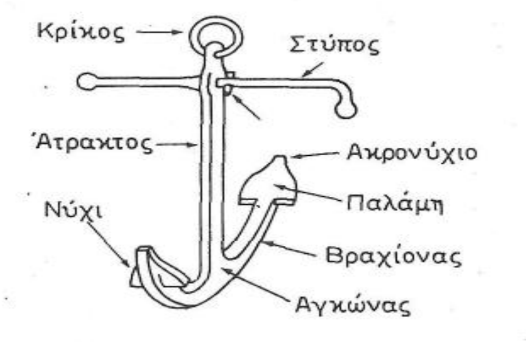
β) Άστυπη άγκυρα.

γ) Άγκυρα μικρού βάρους.

δ) Μυκητοειδής άγκυρα.

ε) Άγκυρα μεγάλης δυνάμεως κρατήσεως.

α) Ένστυπη άγκυρα (Stock Anchor)



Εικόνα 1.2 –Ένστυπη άγκυρα

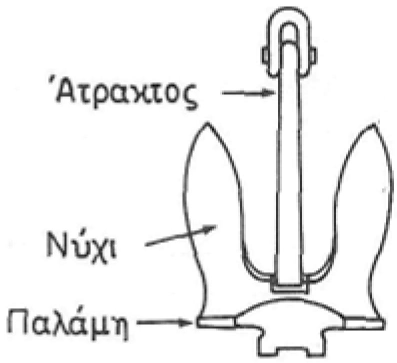
Αυτές οι άγκυρες αποτελούνται από άτρακτο (shank) δηλαδή κατακόρυφη ράβδο κυκλικής ή ορθογώνιας διατομής, όπου προσαρτάται αγκώνας (crown) στη βάση και κρίκος (ring) στην κορυφή. Από κάθε πλευρά του αγκώνα εξέχουν οι βραχίονες (arms) όπου προσαρτώνται τα νύχια (flukes). Αυτά τα πλατιά ελάσματα που απολήγουν στα ακρονύχια (bills) διεισδύουν στο βυθό και δίνουν την επιφάνεια συγκρατήσεως της άγκυρας.

Κάτω από τον κρίκο τοποθετείται ο στύπος (stock) που περνά μέσα από την άτρακτο κάθετα προς το επίπεδο των βραχιόνων. Ο στύπος, που ζυγίζει περίπου το $^1/_4$ του συνολικού βάρους της άγκυρας, είναι μακρύτερος και βαρύτερος από τους βραχίονες. Λόγω της γωνιακής τοποθετήσεως του στύπου, όταν η άγκυρα χτυπήσει στο βυθό, αυτός θα έλθει σε οριζόντια θέση. Όταν στην άγκυρα εφαρμοστεί τάση θα αναγκασθεί ο κατώτερος βραχίονας με το νύχι να εισχωρήσει βαθιά στο βυθό και να αποκτήσει πρόσφυση ώστε να αποφευχθεί το το σύρσιμο ή το ξέπιασμα της άγκυρας. Ο στύπος επίσης αποτρέπει την περιστροφή (μπατάρισμα) της άγκυρας όταν εφαρμοσθεί μεγάλη τάση ή τάση μη ευθύγραμμη με την άτρακτο.

Οι ένστυπες άγκυρες έχουν πρακτικά εγκαταλειφθεί στα εμπορικά πλοία γιατί σχετικά με το βάρος τους, είναι υπερβολικά δύσχρηστες στο χειρισμό και δύσκολες στην αποθήκευση. Λόγω της εξαιρετικής ικανότητας κρατήσεως τους στο βυθό, ελαφρύτερες ένστυπες άγκυρες χρησιμοποιούνται ακόμα σε λέμβους και σε μικρά πλοιάρια. Όμως. Η άγκυρα δεν έχει κινητά μέρη όπου μπορεί να εμπλακούν υλικά από το βυθό, έτσι αν ανασπασθεί (ξεπιάσει) τυχαία θα εισχωρήσει (πιάσει) πάλι στο βυθό. Το επάνω όμως νύχι, που προεξέχει από το βυθό, δεν βοηθά στην κράτηση της άγκυρας και μπορεί να εμπλακεί με την αλυσίδα όταν το πλοίο περιστρέφεται. Επίσης, σε αβαθή νερά ένα μικρό πλοίο μπορεί να υποστεί ζημιά αν προσκρούσουν τα ύφαλα με το νύχι που προεξέχει. Οι σφαίρες στις άκρες του στύπου εξυπηρετούν δύο σκοπούς: βοηθούν τη στροφή της άγκυρας όταν κτυπήσει στο βυθό και μέχρι ενός σημείου στην αποφυγή βυθίσεως του στύπου στο βυθό, όταν εφαρμοσθεί τάση στην άγκυρα. Η άγκυρα αυτή είναι δύσκολο να στοιβαχθεί με το στύπο στη θέση του. Για το σκοπό αυτό ο στύπος στηρίζεται στη θέση του με ισχυρό πείρο όταν η άγκυρα χρησιμοποιείται ή αφαιρώντας τον πείρο, ο στύπος αποθηκεύεται παράλληλα με την άτρακτο. Η δύναμη κρατήσεως της ένστυπης άγκυρας είναι περίπου τριπλάσια μέχρι τετραπλάσια του βάρους της, ανάλογα του είδους του βυθού.

β) Άστυπη άγκυρα (Stockless Anchor)

Υπάρχουν σύγχρονες άστυπες άγκυρες διαφόρων ειδών. Το πλεονέκτημα αγκυρών που δεν φέρουν στύπο είναι η ευκολία στον χειρισμό και αποθήκευση.



Εικόνα 1.3 – Άστυπη άγκυρα

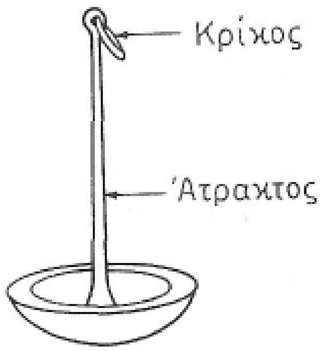
Τα μεγάλα εμπορικά πλοία απαιτείται να φέρουν δύο κατά κανόνα άστυπες άγκυρες στην πλώρη, μία σε κάθε πλευρά και μια εφεδρική. Τα πλοία «με μικρό δείκτη εξαρτισμού», φέρουν μόνο δύο άγκυρες στην πλώρη. Επιπλέον μπορεί να φέρουν μια άγκυρα στην πρύμνη με βάρος περίπου το ένα τρίτο του βάρους που απαιτείται για την πρωραία. Τα μικρά πλοία που δεν φέρουν εφεδρική άγκυρα στην πλώρη φέρουν υποχρεωτικά μια άστυπη άγκυρα στην πρύμνη σύμφωνα με τα προηγούμενα.

Η άστυπη άγκυρα αποτελείται από την κεφαλή, της οποίας ο αγκώνας, οι βραχίονες και τα νύχια έχουν σφυρηλατηθεί σε ένα τεμάχιο. Το βάρος της κεφαλής πρέπει να είναι τουλάχιστον 60% του ολικού βάρους της άγκυρας. Ολόκληρη η κεφαλή στρέφει από 30°- 40° προς κάθε πλευρά της ατράκτου. Η γωνία περιστροφής περιορίζεται με ειδική κατασκευή στον αγκώνα. Τα νύχια έχουν αρκετό μήκος και πλάτος και στη βάση τους έχουν χυτευτεί προεξέχουσες παλάμες που βοηθούν το πιάσιμο της άγκυρας στο βυθό. Όταν δηλαδή η άγκυρα σύρεται στο βυθό οι παλάμες αναγκάζουν τους βραχίονες να στραφούν και τα νύχια να εισχωρήσουν στον βυθό.

Οι άστυπες άγκυρες έχουν δύναμη κρατήσεως τριπλάσια μέχρι τετραπλάσια του βάρους τους σε βυθό καλής ποιότητας. Επειδή η άγκυρα έχει κινητό μέρος, όπου μπορεί να εμπλακούν υλικά από το βυθό, είναι πιθανό να μην ξαναπιάσει αν ανασπαστεί (ξεσύρει) από το βυθό.

Μειονέκτημα της άγκυρας αυτής είναι η αστάθεια της επειδή δεν έχει στύπο. Έτσι, όταν συρθεί με αρκετή δύναμη είναι δυνατόν να στραφεί 180° (να μπατάρει). Αν στη συνέχεια τα νύχια δεν κατορθώσουν να ξαναπιάσουν στο βυθό, η μόνη δύναμη κρατήσεως που θα απομείνει θα οφείλεται εξ ολοκλήρου στο βάρος της άγκυρας και την τριβή. Σε λασπώδη βυθό η άστυπη άγκυρα έχει την τάση να κυλιέται σαν μπάλα με αποτέλεσμα να ανασπάται (ξεσέρνει). Για την αγκυροβολιά μικρών σκαφών ή λέμβων χρησιμοποιείται συνήθως μικρή άστυπη άγκυρα με τέσσερις κυρτούς βραχίονες, το **τεσσαροχάλι.** Η πρυμναία άστυπη άγκυρα τοποθετείται σε ειδικό χώρο στην πρύμνη σε πλοία που ταξιδεύουν σε λιμάνια όπου ποντίζεται άγκυρα από την πρύμνη. Τα μειονεκτήματα της άστυπης άγκυρας αντισταθμίζονται από την εύκολη στοιβασιά της.

γ) Μυκητοειδής άγκυρα (Mushroom Anchor)



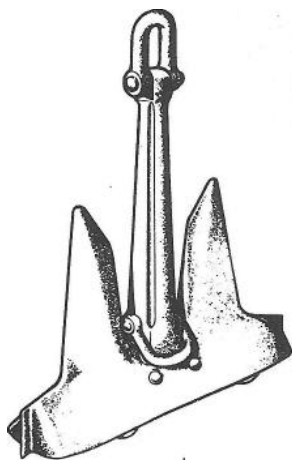
Εικόνα 1.4 – Μυκητοειδής άγκυρα.

Είναι άγκυρα από βαρύ μέταλλο σε σχήμα μανιταριού με μακρύ και στενό κορμό για άτρακτο. Λόγω της εξαιρετικής ικανότητας κρατήσεώς της χρησιμοποιείται σε μόνιμα αγκυροβόλια και ως άγκυρα σε σημαντήρες διαύλων ή άλλων βοηθημάτων ναυσιπλοΐας. Πιάνει στο βυθό και παραμένει σταθερή στη θέση της στις πιο δυσμενείς συνθήκες, γιατί καθώς μετακινείται προς όλες τις διευθύνσεις βυθίζεται περισσότερο. Επειδή δεν έχει στύπο ή νύχια που προεξέχουν για να εμπλακούν με την αλυσίδα της, το αντικείμενο που έχει αγκυροβοληθεί μπορεί να στρέφει ελεύθερα γύρω από την άγκυρα χωρίς να την ανασπάσει.

δ) Άγκυρα μεγάλης δυνάμεως κρατήσεως

(High Holding Power Anchor)

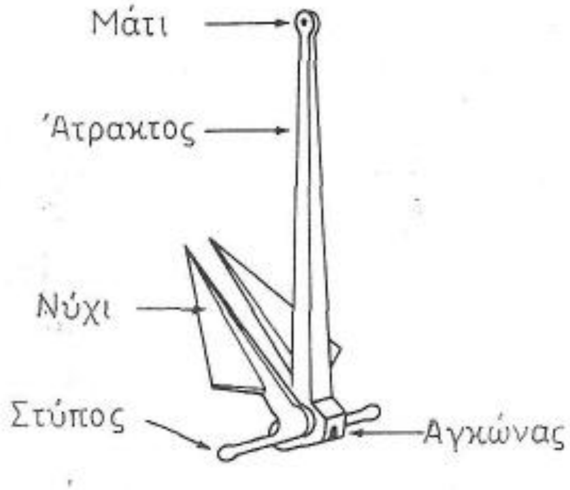
Αυτές οι άγκυρες έχουν διπλάσια μέχρι τετραπλάσια δύναμη κρατήσεως από μια συμβατική άστυπη άγκυρα με το ίδιο βάρος. Μετά από σειρά δοκιμών το αγγλικό ναυαρχείο κατασκεύασε την άγκυρα «AC14» με δύναμη κρατήσεως 12πλάσια του βάρους της. Η βελτίωση στην απόδοση της άγκυρας οφείλεται στα χαρακτηριστικά της. Για όλες τις άγκυρες αυτού του τύπου που έχουν γίνει αποδεκτές από τους νηογνώμονες επιτρέπεται μείωση του βάρους τους κατά 25% από αυτή που απαιτείται σύμφωνα με το δείκτη εξαρτισμού του πλοίου, αλλά η αλυσίδα πρέπει να είναι από ειδική ποιότητα και το βαρούλκο άγκυρας με μεγαλύτερη ισχύ.



Εικόνα 1.5 – Άγκυρα μεγάλης δυνάμεως κρατήσεως

ε) Άγκυρα μικρού βάρους (Lightweight Anchor)

Αυτά είναι τα πλέον πρόσφατα σχέδια αγκυρών, που χρησιμοποιούνται ευρύτατα από «μικρά» σκάφη και σε αυτού του τύπου τις άγκυρες εστιάζεται η παρούσα μελέτη.



Εικόνα 1.6 – Άγκυρα μικρού βάρους.

Η άγκυρες αυτές συνήθως φέρουν στύπο σταθεροποιήσεως χαμηλά στον αγκώνα και βραχίονες που στρέφουν. Κατασκευάζονται από διάφορα μέταλλα (μεταξύ των οποίων και σχετικώς ελαφρών) με μεγάλη αντοχή σε τάσεις εφελκυσμού. Η δύναμη κρατήσεώς τους εξασφαλίζεται από τη βαθιά διείσδυση στο βυθό παρά από το βάρος τους . Οι άγκυρες μικρού βάρους κατασκευάζονται σε ποικιλία τύπων, σχημάτων και βαρών.

Τα εμπορικότερα και πιο συνήθη σχέδια αγκυρών μικρού βάρους είναι τα παρακάτω [7]:

Άγκυρα με Νύχια (Fluke Anchor): η πιο χαρακτηριστική αυτής της κατηγορίας είναι η Danforth. Έχει μικρή μάζα συγκριτικά με την δύναμη συγκρατήσεώς της. Έχει πολύ καλή συμπεριφορά σε αμμώδη και λασπώδη βυθό, ενώ η γεωμετρία της διευκολύνει την χρήση και αποθήκευσή της. Δεν αποδίδει σε πυθμένα σκληρό ή με φύκια, ενώ σε δυνατά ρεύματα, τα μεγάλα της νύχια δύναται να την εμποδίσουν να βυθιστεί στον πυθμένα.

Άγκυρα τύπου Αρότρου (Plow Anchors): Οι δημοφιλέστερες σε αυτήν την κατηγορία είναι η CQR και η Delta. Η μύτη τους σε μορφή αρότρου βυθίζεται αποτελεσματικά, ενώ έχουν την ιδιότητα να επανέρχονται στην σωστή θέση όταν μια αλλαγή στην γωνία έλξης τις αναποδογυρίσει. Παρόλο που δεν δύναται να βυθιστεί σε σκληρό πυθμένα, αποδίδει καλύτερα σε βυθό από φύκια συγκριτικά με άλλες άγκυρες μικρού βάρους. Τέλος παρουσιάζει σχετική δυσκολία στο στοίβαγμα και αποθήκευση. Ο τύπος αυτός (CQR) εφευρέθηκε από τον διάσημο επιστήμονα G.I.Taylor το 1934 . [13]

Άγκυρα τύπου Δαγκάνας (Claw Anchors): Χαρακτηριστικότερη η άγκυρα Bruce. Σε περίπτωση που αναποδογυριστεί επανέρχεται στην σωστή θέση, δεν αποδίδει όμως σε σκληρό πυθμένα, ενώ λόγω της γεωμετρίας της μύτης της μπορεί να μην αποδώσει και σε πυθμένα με παχύ στρώμα φυκιών. Τέλος παρουσιάζει σχετική δυσκολία στο στοίβαγμα και αποθήκευση.

Η παρούσα εργασία εστιάζεται σε αυτού του τύπου άγκυρες. Παρέχει ανάλυση των συνθηκών, παραμέτρων και γενικά της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται κατά την αγκυροβόληση μικρών σκαφών με χρήση αυτών των αγκυρών. Επίσης περιλαμβάνει τις παραμέτρους σχεδιασμού συγκεκριμένης άγκυρας τύπου Delta που χρησιμοποιείται ευρέως από μικρά σκάφη, λεπτομερή σχεδιασμό της, και ανάλυση των δυνάμεων που εφαρμόζονται πάνω της κατά την αγκυροβόληση σε ομαλές συνθήκες, καθώς και υπολογισμούς της μηχανικής συμπεριφοράς της κάτω από ισχυρές έως ακραίες συνθήκες φόρτισης.

Κεφάλαιο 2^{ο}
Εξοπλισμός Αγκυροβόλησης
(Anchoring Tackle)

2.1 Λειτουργία και Απαιτήσεις Εξοπλισμού Αγκυροβόλησης

Κάθε στοιχείο του εξοπλισμού-συστήματος αγκυροβόλησης έχει μία ή περισσότερες λειτουργίες και πρέπει να πληρεί κάποιες απαιτήσεις. Συγκεκριμένα:

(Σημ. όταν αναφερόμαστε στη «θάλασσα» στα παρακάτω εννοούμε οιοδήποτε υγρό στοιχείο στο οποίο πλέει το σκάφος, δηλαδή περιλαμβάνονται οι λίμνες και ποταμοί.)

Λειτουργία: Ο εξοπλισμός αγκυροβόλησης έχει στόχο να συγκρατεί σταθερή τη θέση του σκάφους (δηλαδή να «δένει» προσωρινά) ως προς το βυθό της θάλασσας.

Απαίτηση 1: Στην ιδανική περίπτωση, ένα σύστημα αγκυροβόλησης θα πρέπει να συγκρατεί το σκάφος, ανεξάρτητα από την πρόβλεψη καιρού, κυματισμού και θαλασσίων ρευμάτων.

Απαίτηση 2: Η ρύθμιση καθώς και η πόντιση/ανάσυρση της άγκυρας θα πρέπει να μην παρουσιάζει δυσχέρεια.

Όσο αφορά την ασφάλεια που προσφέρει το σύστημα αγκυροβόλησης, η άγκυρα και κυρίως το μέσο πρόσδεσης της με το σκάφος αποτελούν τα πλέον αδύνατα συστατικά σε αντίξοες καιρικές συνθήκες. Επίσης συχνά παρουσιάζεται δυσκολία στο να επιλεγούν σωστά οι ασφαλείς παράμετροι αγκυροβόλησης σε σχέση με τις επικρατούσες συνθήκες και το περιβάλλον (π.χ. το μήκος της αλυσίδας, που χρειάζεται να ρυθμιστεί σε πραγματικό χρόνο, συχνά κάτω από αντίξοες καιρικές συνθήκες).

Τα λοιπά εξαρτήματα αγκυροβόλησης (δέστρες, εργάτης κλπ) επιλέγονται συνήθως κατά την κατασκευή του σκάφους, και δεν αναλύονται περαιτέρω στην παρούσα εργασία.

A. Άγκυρα

Λειτουργία: Η ποντισμένη άγκυρα που έχει αποκτήσει πρόσφυση στον πυθμένα αποτελεί το «σταθερό σημείο» της αγκυροβολίας.

Απαίτηση 3: Η άγκυρα ιδανικά πρέπει να μένει στην ίδια θέση, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση και το μέγεθος των δυνάμεων που δρουν στο σκάφος.

Στην πραγματικότητα, η άγκυρα θα παραμείνει σταθερή αν ισχύουν δύο απαραίτητες *εξωτερικές προϋποθέσεις:*

1. Η άγκυρα έχει ρυθμιστεί σωστά
2. Οι δυνάμεις που εφαρμόζονται πάνω της μέσω του τεταμένου σκοινιού, έχουν την κατάλληλη φορά/κατεύθυνση

B. Μέσα πρόσδεσης: Σκοινί ή/και αλυσίδα

Λειτουργία: Το σκοινί λειτουργεί ως σύνδεσμος μεταξύ της άγκυρας και του σκάφους.

Απαίτηση 4: Το σκοινί πρέπει να τραβάει την άγκυρα με κατεύθυνση τέτοια που να της επιτρέπει να συνεχίζει να έχει την απαιτούμενη πρόσφυση στον πυθμένα, προσφέροντας την απαιτούμενη δύναμη συγκράτησης.

Απαίτηση 5: Το σκοινί πρέπει να είναι πρακτικό στην αποθήκευση/στοίβαγμα.

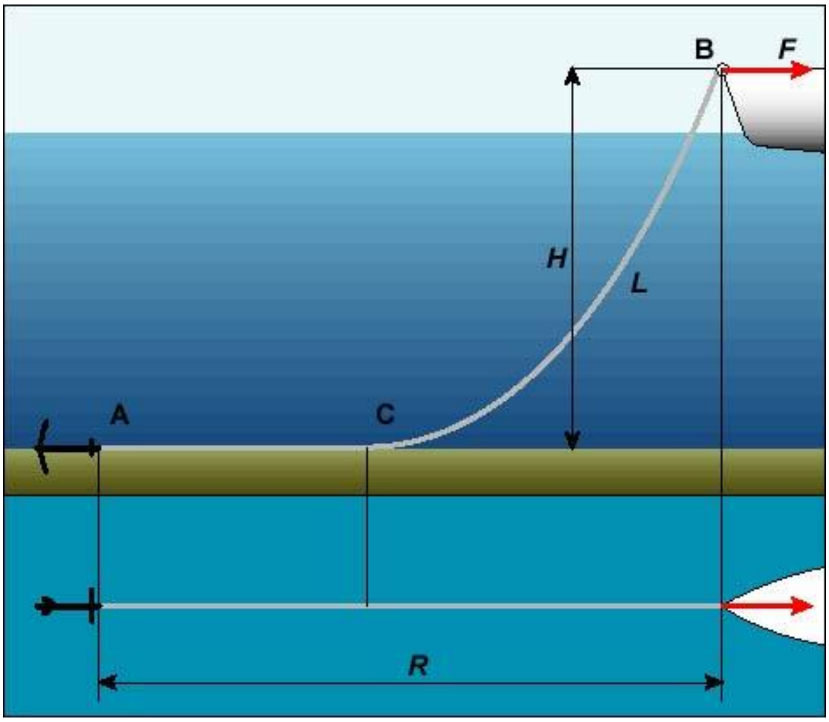
Απαίτηση 6: Το σκοινί πρέπει να μειώνει τις τάσεις (tensile stresses) στην άγκυρα και στον εξοπλισμό του σκάφους, λόγω κυμάτων ή ριπών ανέμου.

2.2 Αγκυροβόληση

Για την αγκυροβόληση του σκάφους, η άγκυρα συνδέεται μέσω του σκοινιού ή/και αλυσίδας με το σημείο πρόσδεσής της στο σκάφος (συνήθως στην πλώρη) και ποντίζεται όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα 1.2.

Βασική παράμετρος αγκυροβόλησης είναι ο λόγος H/L. Ὅπως θα αναλυθεί στα επόμενα, απαιτείται να αφεθεί ικανό μήκος («έκταμα») της αλυσίδας (L) σε σχέση με το βάθος (H) ώστε το «μάτι» της άγκυρας στο οποίο δένει η αλυσίδα (σημείο A) να παραμένει πάνω στον πυθμένα κάτω από συνθήκες φόρτισης (άνεμο, ρεύματα κλπ).

Το σημείο B σύνδεσης της αλυσίδας/σκοινιού με την πλώρη του σκάφους είναι κοντά στην άκρη του καταστρώματος, εντός του σκάφους (Σημ. στο σχήμα 1.2 εικονίζεται στην άκρη του σκάφους καθώς δεν επηρεάζει την ανάλυση. Στην πραγματικότητα είναι συνήθως κατά τι μετατοπισμένο, εντός του σκάφους, στην επιφάνεια του καταστρώματος, ώστε να εφαρμόζεται η τάση έλξης παράλληλα με την δύναμη F). Το σημείο B κινείται ελεύθερα ως προς τον πυθμένα. Στην αλυσίδα/σκοινί εφαρμόζεται τάση έλξης στο σημείο B από οριζόντια δύναμη F ίση με το άθροισμα των οριζοντίων δυνάμεων που δρουν επί του σκάφους από τα στοιχεία του περιβάλλοντος, (αεροδυναμική αντίσταση του σκάφους στον άνεμο, υδροδυναμική αντίσταση της γάστρας σε περίπτωση συνεχούς ροής του υγρού σώματος γύρω από αυτήν, π.χ. λόγω θαλασσίου ρεύματος κλπ). Στους παραμέτρους αγκυροβόλησης είναι το βάθος H σε συνδυασμό με το έκταμα L. Οι παράμετροι αυτοί είναι σημαντικοί για να εξασφαλίσουν ότι το σημείο A σύνδεσης του σκοινιού με το «μάτι» του στελέχους της άγκυρας (anchor’s pulling eye) θα παραμένει συνεχώς πάνω στον πυθμένα (για να προσφέρει η άγκυρα τη μέγιστη δύναμη συγκράτησης, όπως θα δούμε στη συνέχεια). Ακόμα και όταν το σκοινί/αλυσίδα αιωρούνται εξ ολοκλήρου, πχ λόγω ισχυρής φόρτισης. δηλαδή όταν το σημείο C συμπίπτει με το σημείο A, το σημείο A πρέπει να συνεχίσει να παραμένει πάνω στον πυθμένα, αποτελώντας το ολικό ελάχιστο της καμπύλης που σχηματίζει η ποντισμένη αλυσίδα ή βαρύ σκοινί.



Εικόνα 2.1 – Τυπική απεικόνιση ενός μέσου πρόσδεσης

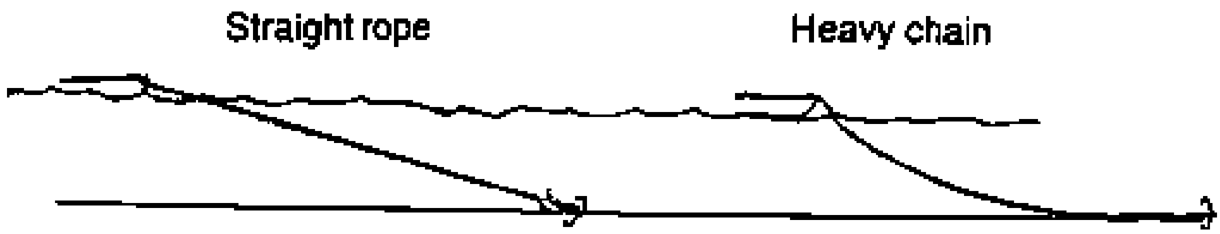
Όταν το σύστημα άγκυρα-αλυσίδα/σκοινί-σκάφος βρίσκεται σε ισορροπία, η δύναμη F αντισταθμίζεται με μια ίση και αντίθετη δύναμη τάσης στην αλυσίδα/σκοινί που οφείλεται αφενός στο βάρος της αιωρούμενης πάνω από τον πυθμένα ποντισμένης αλυσίδας/σκοινιού (τμήμα B-C), αφετέρου στην αντίσταση της βυθισμένης άγκυρας στην μετακίνηση από τη οριζόντια δύναμη τάσης αλυσίδας που εφαρμόζεται στο σημείο A. (Επίσης, πρόσθετη οριζόντια αντίσταση στην τάση προσφέρει, λόγω δυνάμεων τριβής, και το τμήμα της αλυσίδας που κείται πάνω στο βυθό, αυτό όμως δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία).

Λόγω του μεταβαλλόμενου μήκους και αντίστοιχα βάρους του τμήματος B-C, το μέσο πρόσδεσης λειτουργεί σαν ψευδο-ελατήριο, ακόμα και αν δεν παραμορφώνεται ελαστικά (το οποίο ισχύει για την περίπτωση χαλύβδινης αλυσίδας αλλά όχι για την περίπτωση σκοινιού).

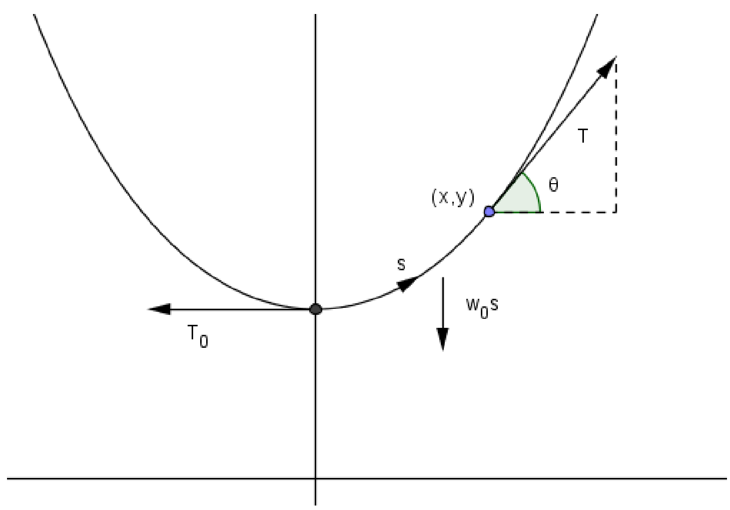
Το ύψος H είναι ίσο με το βάθος + ύψος εξάλων στην πλώρη του σκάφους. Το συνολικό μήκος του εκτάματος αλυσίδας/ενεργού σκοινιού (δλδ το «βιραρισμένο» μήκος) είναι πολύ μεγαλύτερο από το ύψος H μεταξύ πυθμένα και σημείου B. Η γεωμετρία της αλυσίδας/σκοινιού εξαρτάται από τέσσερις παραμέτρους:

- το ύψος H
- το συνολικό ενεργό μήκος L του σκοινιού (έκταμα)
- το βάρος της ποντισμένης αλυσίδας/σκοινιού w ανά μονάδα μήκους
- την δύναμη έλξης F

Το κύριο προτέρημα χρήσης αλυσίδας ως μέσο πρόσδεσης είναι το βάρος **w** (ποντισμένο) ανά μονάδα μήκους, που παρέχει ακόμα και σε συνθήκες ισχυρής φόρτισης, μία αλυσοειδή καμπύλη, ώστε η δύναμη στην άγκυρα να εφαρμόζεται παράλληλα με τον πυθμένα.



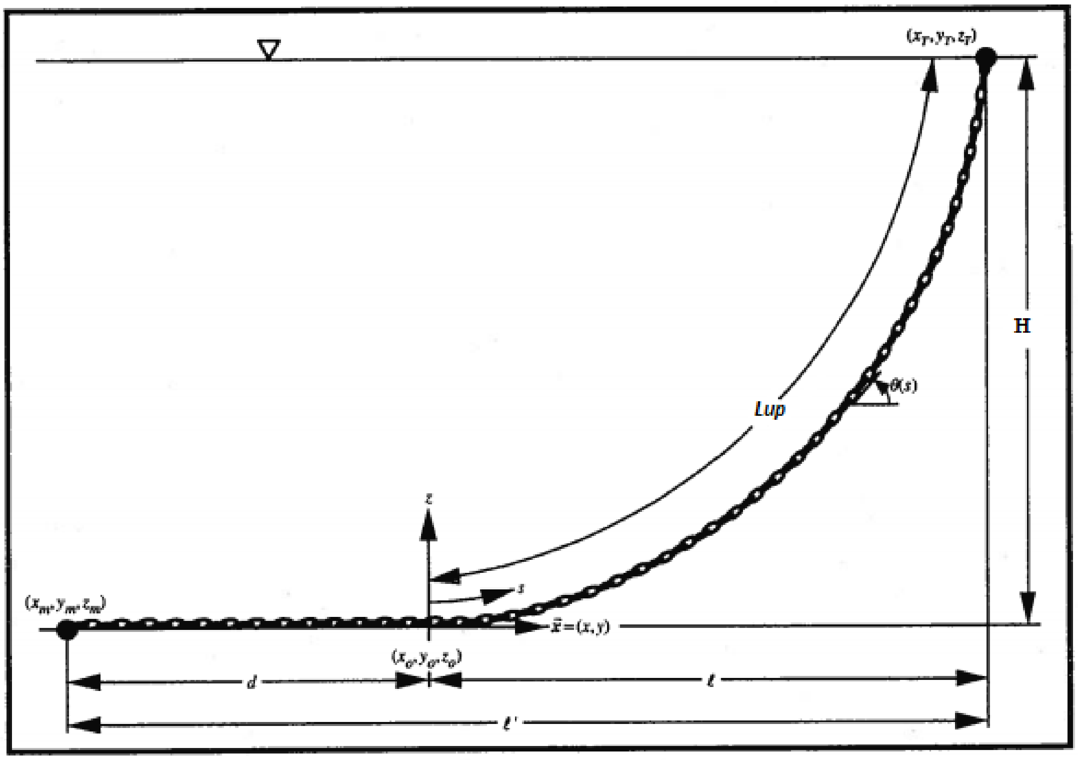
Εικόνα 2.2 - Αλυσοειδής γεωμετρία στο μέσο πρόσδεσης



η καμπύλη της αλυσοειδούς περιγράφεται από την εξίσωση $y = a\cosh(x/a)$

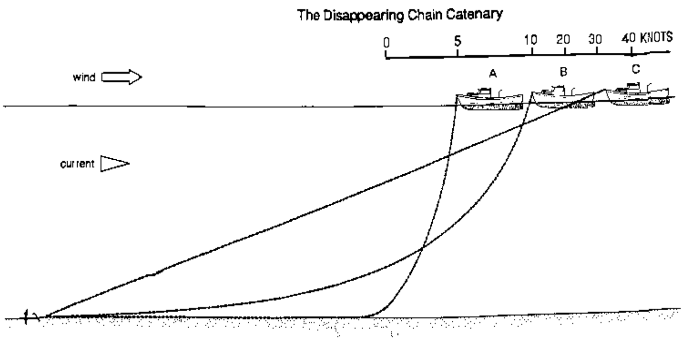
όπου $a = \frac{w_o}{T_0}$

Εικόνα 2.3 – Αλυσοειδής καμπύλη (Catenary Curve)



Εικόνα 2.4 – Υποβρύχια αλυσοειδής καμπύλη [1]

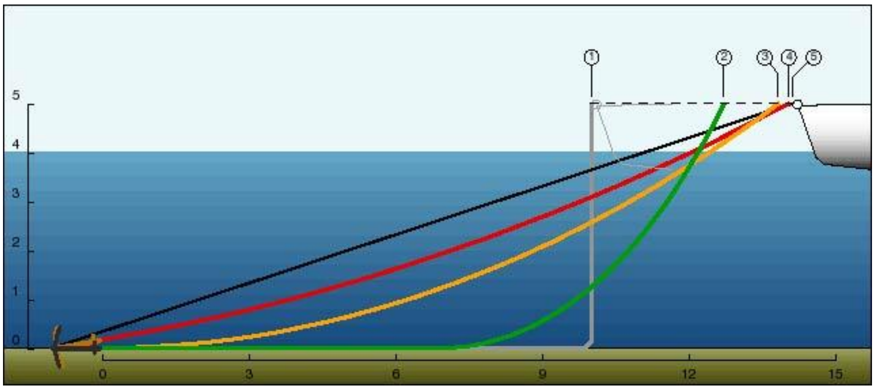
Η επίδραση των δυνάμεων του αέρα στην αλυσοειδή γεωμετρία εικονίζονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.5 - Επίδραση των δυνάμεων του αέρα στην αλυσοειδή γεωμετρία μέσου πρόσδεσης

Παραθέτουμε ένα παράδειγμα αγκυροβόλησης σκάφους σε οριζόντιο πυθμένα με χρήση αλυσίδας, που δείχνει πώς μεταβάλλεται η γεωμετρία του συστήματος άγκυρας-αλυσίδας-σκάφους όταν η F αυξάνει σταδιακά από μηδενική τιμή.

Για το παράδειγμα χρησιμοποιείται άγκυρα με αλυσίδα διαμέτρου 11 mm, με υποθαλάσσιο (ποντισμένο) βάρος ανά μονάδα μήκους w = 2,5 daN/m , με L = 15 m και H = 5 m. Η εικόνα 1.3 δείχνει την συμπεριφορά του συστήματος σκάφους, αλυσίδας και άγκυρας καθώς αυξάνεται σταδιακά η δύναμη F (η δύναμη F_c υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (5.2), η οποία δίνεται στο 5^o κεφάλαιο). Όπως θα δούμε στην συνέχεια, ο λόγος L:H (εδώ =3) επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά του συστήματος αγκυροβόλησης και την Fc.



Εικόνα 2.6 – Προφίλ ομογενούς μέσου πρόσδεσης για εύρος ελκτικών δυνάμεων

- Για $F = 0$ (*γκρί* καμπύλη), η αλυσίδα είναι σχήματος L: το υψηλότερο σημείο κρέμεται κατακόρυφα από το σημείο B στον πυθμένα, ενώ η υπόλοιπη αλυσίδα κείται οριζόντια στην επιφάνεια του πυθμένα, μέχρι το σημείο A της άγκυρας.
- Όταν η δύναμη F αυξάνεται (π.χ. F = 10 daN, πράσινη καμπύλη), το σκάφος μετατοπίζεται προς τα πίσω, και το οριζόντιο τμήμα μειώνεται καθώς η αλυσίδας ανυψώνεται από τον πυθμένα. Τμήμα της αλυσίδας μεταξύ των σημείων A και C παραμένει ευθύγραμμο και κείμενο επί του πυθμένα, ενώ το τμήμα μεταξύ των σημείων B και C (σημείο επαφής με τον πυθμένα) είναι μια αλυσοειδής καμπύλη. Η τάση στο σημείο A της άγκυρας παραμένει οριζόντια και ίση με F, η άγκυρα παραμένει οριζόντια και η δύναμη συγκρατήσεως του σκάφους αμετάβλητη.

- Όταν η F λάβει την κρίσιμη τιμή Fc (Fc = 50 daN, πορτοκαλί καμπύλη) η αλυσίδα ακουμπά στον πυθμένα μόνο στο σημείο Α (όπου δένει στο μάτι της άγκυρας). Η καμπύλη της αλυσίδας εφάπτεται στο σημείο Α με το επίπεδο του πυθμένα, η άγκυρα παραμένει οριζόντια και η δύναμη συγκράτησης του σκάφους παραμένει αμετάβλητη,
- Για τιμές της F μεγαλύτερες της Fc (πχ 100 daN, κόκκινη καμπύλη), ή τάση που εφαρμόζεται από την αλυσίδα στο σημείο Α δεν είναι πλέον οριζόντια. Το στέλεχος της άγκυρας ανυψώνεται από τον πυθμένα και η δύναμη συγκράτησης του σκάφους αρχίζει να μειώνεται.
- Εάν η F συνεχίζει να αυξάνεται, η αλυσοειδής καμπύλη σταδιακά μετατρέπεται σε μία σχεδόν ευθεία γραμμή (μαύρη καμπύλη), και τελικά η άγκυρα αποκολλείται από τον πυθμένα, «ξεγαντζώνει» και το σκάφος «ξεσέρνει»

2.3 Συνθήκες Συγκράτησης

Ανεξάρτητα από τον τύπο άγκυρας, η ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος αγκυροβολίας που θα συγκρατεί επαρκώς το σκάφος, εξαρτάται από το βαθμό που πληρούνται οι παρακάτω συνθήκες:

Συνθήκη1: Οι βραχίονες (flukes) είναι ολοκληρωτικά και συμμετρικά θαμμένοι στον πυθμένα (εικ 4.2 και 4.3)

Συνθήκη 1α : Εάν υπάρχει άρθρωση, αυτή βρίσκεται στην «ανοιχτή» θέση

Συνθήκη 2: Σε περίπτωση μεταβολής του μεγέθους της ελκτικής δύναμης (Pulling force), οι συνθήκες 1 και 1α συνεχίζουν να ισχύουν

Συνθήκη 3: Σε περίπτωση μεταβολής της διεύθυνσης (heading) της ελκτικής δύναμης (Pulling force), οι συνθήκες 1 και 1α συνεχίζουν να ισχύουν

Συνθήκη 4: Η τάση της αλυσίδας που εφαρμόζεται στο «μάτι» του στελέχους είναι παράλληλη με τον πυθμένα της θάλασσας

Η ικανοποίηση των συνθηκών 2 και 1α προϋποθέτει ότι η αγκυροβόληση έχει γίνει σωστά. Οι σχετικοί παράμετροι (όπως πχ βάρος και τύπος άγκυρας, έκταμα αλυσίδας, βάθος, τρόπος πόντισης κλπ) αποφασίζονται κατά τη διάρκεια της αγκυροβόλησης. Σημειωτέο είναι ότι άγκυρες ανώτερης τεχνολογίας ολοκληρώνουν αυτόματα μια ατελή αρχική ρύθμιση (λόγω του τρόπου πόντισης και πρόσφυσης) μετά τις πρώτες ριπές ανέμου. Πέρα από μια συγκεκριμένη δύναμη έλξης, η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της άγκυρας και του πυθμένα, κάθε άγκυρα θα «ξεσύρει». Η Συνθήκη 2 σημαίνει ότι μια σωστά ρυθμισμένη άγκυρα δεν θα ξεκολλά από τον πυθμένα (swing out of the bottom) ούτε θα «πέφτει» στο πλάι όταν αλλάζει η φορά ή αυξάνεται η δύναμη έλξης, ακόμα και στην περίπτωση που αρχίζει να ξεσέρνει. Η Συνθήκη 3 σημαίνει ότι μια καλά ρυθμισμένη άγκυρα από μόνη της (δηλαδή δίχως παρέμβαση από το πλήρωμα του σκάφους) θ ευθυγραμμίζεται με τη φορά εφαρμογής της ελκτικής δύναμης, σε θέση με τον βραχίονα προς τα κάτω. Επισημαίνεται ότι η Συνθήκες 2 και 3 απαιτούν ένα καλό σχέδιο άγκυρας και κατάλληλο βυθό (αμμώδη) . Η Συνθήκη 4 δεν εξαρτάται ούτε από τον τύπο άγκυρας, ούτε από την ρύθμισής της, αλλά από την συμπεριφορά και γεωμετρία της αλυσίδας/σκοινιού, όπως θα περιγραφεί παρακάτω. Εάν η τάση του σκοινιού στο «μάτι» της άγκυρας δεν εφαρμόζεται παράλληλα με τον πυθμένα αλλά υπό γωνία, τότε η δύναμη συγκράτησης υπολείπεται από τη μέγιστη δυνατή τιμή. Η μείωση εξαρτάται από τον σχεδιασμό/τύπο της άγκυρας και κυρίως από την γωνία, που με τη σειρά της εξαρτάται από το βάθος, το έκταμα, το βάρος της αλυσίδας/σκοινιού και την δύναμη έλξης που εξασκείται από το σκάφος.

Κεφάλαιο 3ο
Επίδραση Εξωτερικών Δυνάμεων στο Σύστημα αγκυροβόλησης

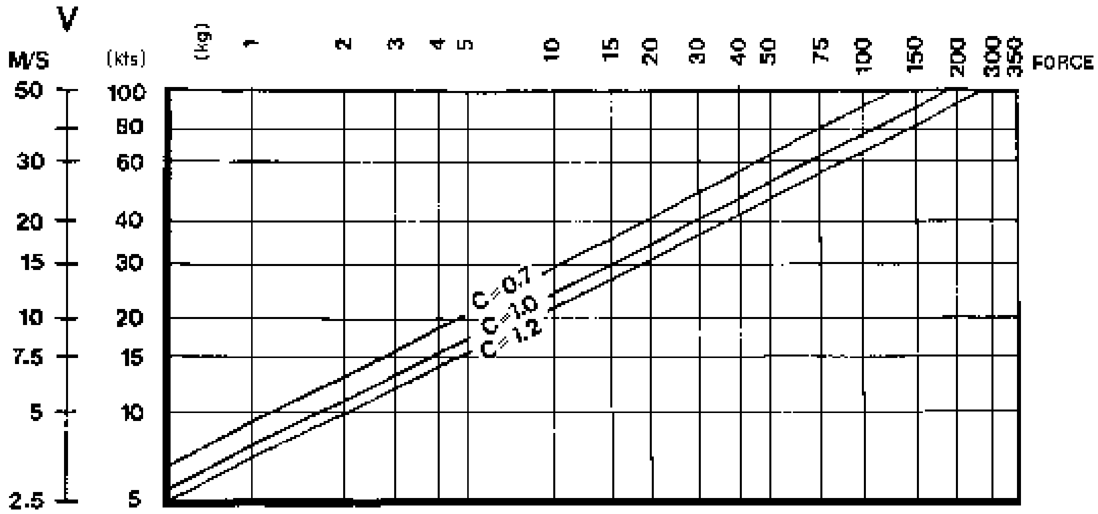
Για τη σωστή επιλογή και χρήση εξοπλισμού αγκυροβόλησης, είναι χρήσιμη η αποτύπωση των κύριων δυνάμεων που δρουν στην αλυσίδα/σκοινί που συνδέει την άγκυρα με το αγκυροβολημένο σκάφος. Αυτές οι δυνάμεις επηρεάζονται από τρία στοιχεία: τον άνεμο, την θάλασσα και τον βυθό.

3.1 Επίδραση του Ανέμου

Όλα τα σκάφη (εκτός των υποβρυχίων) έχουν επιφάνεια εκτεθειμένη και προσβαλλόμενη από τον άνεμο. Η δύναμη αντίστασης $\boldsymbol{Fw}$ (drag force) ενός σώματος εκτεθειμένου στον άνεμο, είναι ανάλογη της επιφάνειας διατομής $\boldsymbol{S}$ που προβάλλεται στην κατεύθυνση του ανέμου, του τετραγώνου της ταχύτητας $\boldsymbol{V}$ του ανέμου και της πυκνότητας του αέρα ρ_a , συγκεκριμένα:

$$F_w = \frac{1}{2}\rho_a C_d S V^2 \tag{3.1}$$

Ο συντελεστής C_d εξαρτάται από κυρίως από το σχήμα του αντικειμένου με πεδίο τιμών από 1,17 -για επίπεδη πλάκα κάθετη στην κατεύθυνση του ανέμου, έως και τιμές μικρότερες από 0,1 - για ένα αεροδυναμικά καλοσχεδιασμένο αντικείμενο (streamlined), π.χ. για αεροπλάνο ή αυτοκίνητο. Ακολουθεί διάγραμμα υπολογισμού της πίεσης του ανέμου (wind pressure), σε μια επιφάνεια 1m^2, για C_d =1.2, 1, 0.7, για μεταβαλλόμενη ταχύτητα ανέμου [6].



Εικόνα 3.1 – Δύναμη ανέμου ανά επιφάνεια 1m²

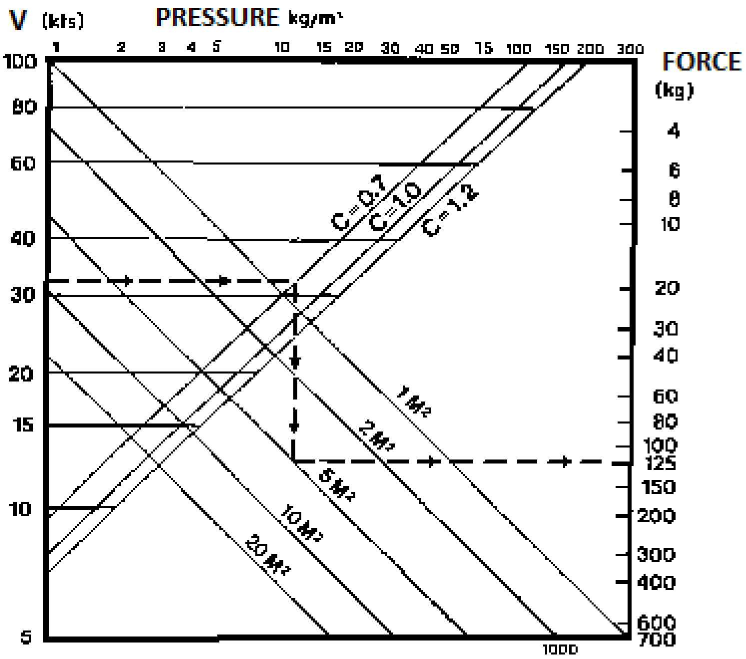
Ο συντελεστής C_d έχει μικρή εξάρτηση από την ταχύτητα του ανέμου (Reynolds number) αλλά και την κατεύθυνση του σε σχέση με τον κύριο άξονα του σκάφους. Η επιφάνεια του σκάφους που προβάλλεται στον άνεμο $\boldsymbol{S}$, δεν προκύπτει απλώς από το άθροισμα των επιφανειών των επιμέρους στοιχείων του πάνω από την επιφάνεια (κύτος, ξάρτια κλπ.), καθώς υπάρχουν και αεροδυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών. Ένα ακριβές αεροδυναμικό μοντέλο και επομένως το Cd για συγκεκριμένο σκάφος προκύπτει από σύνθετους υπολογισμούς και πειραματική μελέτη. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούμε εκτιμώμενες τιμές Cd κοντά στην μονάδα, που γενικώς είναι «συντηρητικές» όσο αφορά το σχεδιασμό του συστήματος αγκυροβόλησης, με γνώμονα την ασφάλεια.

Σπανίως ο άξονας ενός αγκυροβολημένου σκάφους είναι απολύτως ευθυγραμμισμένος με την διεύθυνση του ανέμου. Η οριζόντια εκτροπή του μπορεί να είναι μέχρι και 30 μοίρες, έχοντας έτσι εκτεθειμένη μεγαλύτερη πλευρική επιφάνεια στον άνεμο. Η προβαλλόμενη επιφάνεια για εκτροπή 30 μοιρών δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$S = sin30Lh \tag{3.2}$$

όπου L το μήκος του σκάφους και h το ύψος της πλευράς του.

Τα αγκυροβολημένα μηχανοκίνητα σκάφη τυπικά έχουν 25% μεγαλύτερη επιφάνεια προβαλλόμενη στον άνεμο («windage») από ιστιοφόρα ίδιου μήκους. Ακολουθεί πίνακας υπολογισμού της δύναμης (σε kg force) λόγω αντίστασης στον άνεμο (aerodynamic force due to wind pressure), για αγκυροβολημένα σκάφη επιφάνειας μέχρι και 20 m^2 και ταχύτητα ανέμου μέχρι και 100 κόμβους (51,44 m/s), με Cd=0.7, 1, 1.2, [6] και διπλασιασμένη λόγω ταλάντωσης του σκάφους (βλ Κεφάλαιο 8^o).



Εικόνα 3.2 - Γράφημα εύρεσης της δύναμης που ασκεί ο άνεμος σε διαφορετικές επιφάνειες 1m^2 – 20m^2

Παρατίθεται ενδεικτικός πίνακας συντελεστών C_d για διαφορετικούς τύπους μικρών σκαφών:

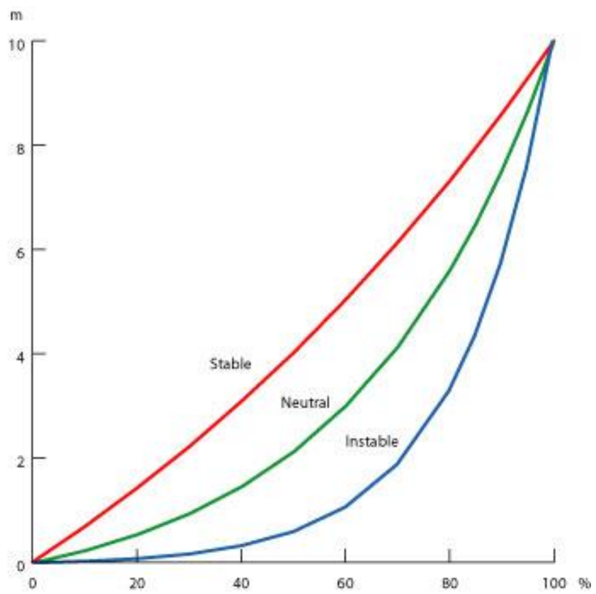
Μοντέλο Σκάφους	**Επιφάνεια Διατομής (m2)**	**Drag Coefficient, Cd**
20 ft Etchel	3	0.65
20 ft Bertram	4	0.75
20 ft Houseboat	8	1.20
26 ft Folkboat	4	0.70
26 ft Triton, Tophat, Spacesailer	5	0.70
32 ft Clansman	7	0.70
32 ft Mariner Cruiser	8	0.85

Εικόνα 3.3 – Ενδεικτικός πίνακας C_d για διαφορετικά είδη σκαφών [6]

3.1.1 Η μεταβολή της ταχύτητας ανέμου σε σχέση με το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας (Wind Velocity Gradient)

Αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικής εκτίμησης και πραγματικών μετρήσεων της δύναμης του ανέμου προκύπτουν και από την μεταβολή της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου σε συνάρτηση με το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας. Το μέσο μέγεθος της ταχύτητας είναι μέγιστο σε απόσταση περίπου 10m από την επιφάνεια του νερού, όπου πλέον δεν επιδρούν οι δυνάμεις τριβής (μεταξύ αέρα και νερού) που επηρεάζουν τη μέση ταχύτητα στο επιφανειακό στρώμα (boundary layer). Στο διάγραμμα που ακολουθεί δίνεται το ποσοστό μείωσης της μέσης ταχύτητας ανέμου σε σχέση με την ταχύτητα στα 10m, σε συνάρτηση με το ύψος. (Η συνήθης μέτρηση μέσης ταχύτητας του ανέμου αφορά ύψος 10 m, οπότε η ταχύτητα κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας είναι ποσοστό της «μέγιστης» αυτής τιμής).

Στο σχήμα που ακολουθεί (Εικόνα 4.4) δίδονται κατά προσέγγιση το σχήμα/προφίλ μέσης ταχύτητας του ανέμου από την επιφάνεια της θάλασσας έως τα 10 m, για σταθερή-στρωτή ροή (κόκκινη καμπύλη), τυρβώδη ροή με μέτρια-υψηλή τιμή αριθμού Re (πράσινη καμπύλη) και πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδη και ασταθή ροή με υψηλή τιμή αριθμού Re (μπλε καμπύλη).



Εικόνα 3.4 – Διάγραμμα % ταχύτητας ανέμου προς το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας

Τα έξαλα ενός σκάφους 8 -15m απέχουν μέχρι 3m από την επιφάνεια της θάλασσας, οπότε συνάγουμε ότι η μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος των εξάλων κυμαίνεται από το 30%-80% της μέγιστης τιμής ταχύτητας εκτός του επιφανειακού στρώματος (>10m ύψους), όπου οι υψηλότερες τιμές ισχύουν για την περίπτωση ακραίων καιρικών συνθηκών (πχ. καταιγίδας, τυφώνα κλπ).

3.2 Επίδραση της Θάλασσας

3.2.1 Κύματα

Η άνωση (buoyancy) λόγω του εκτοπίσματος νερού είναι δύναμη που δρα σε σκάφος που επιπλέει στη θάλασσα. Όταν το σκάφος και η θάλασσα βρίσκονται σε πλήρη ακινησία, τότε το άνυσμα της ανοδικής δύναμης είναι σταθερό και ίσο σε μέγεθος με το βάρος του υγρού που εκτοπίζεται από το σκάφος. Αν η επιφάνεια της θάλασσας δεν είναι επίπεδη λόγω κυματισμού ή/και το σκάφος μετατοπίζεται, η συνολική μέση δύναμη άνωσης παραμένει σταθερή, αλλά σε ορισμένα τμήματα της «γάστρας» του σκάφους τείνει να μεταβάλλεται αισθητά. Ο υπολογισμός των τοπικών διακυμάνσεων της δύναμης άνωσης και των ροπών που προκύπτουν είναι δυνατός μόνο αν το πλήρες σχήμα του σκάφους είναι γνωστό (σχήμα γάστρας, κατανομή μάζας, κλπ) καθώς και τα χαρακτηριστικά των κυμάτων. Οι μεταβαλλόμενες στο χρόνο δυνάμεις άνωσης λόγω των κυμάτων γενικά τείνουν να αλλάζουν τη δύναμη φόρτισης στο μέσο πρόσδεσης περιοδικά. Οι σχετικές μέγιστες δυνάμεις που αναπτύσσονται στο μέσο πρόσδεσης στις περιπτώσεις αυτές αναλύονται σε επόμενο εδάφιο.

3.2.2 Θαλάσσιο ρεύμα

Η μέση δύναμη που εξασκείται στο ύφαλο τμήμα του σκάφους από θαλάσσιο ρεύμα ταχύτητας V_ρ, υπολογίζεται προσεγγιστικά ως ακολούθως,

$$F_\rho = \frac{1}{2}\rho C_f S V_\rho^2 \tag{3.3}$$

όπου η πυκνότητα ρ είναι αυτή του νερού, η επιφάνεια S είναι η επιφάνεια του υφάλου τμήματος της γάστρας, και C_f ο συντελεστής επιφανειακής αντίστασης (λόγω τριβής μεταξύ γάστρας και νερού). Ο C_f εξαρτάται από το σχήμα της γάστρας και τη γωνία πρόσπτωσης του ρεύματος σε σχέση με τον κύριο άξονα του σκάφους. Γενικά οι γάστρες είναι «καλοσχεδιασμένες» υδροδυναμικά επιφάνειες με χαμηλό συντελεστή αντίστασης/τριβής.

Η επιφανειακή τριβή (skin friction drag) προκαλείται από την επαφή μεταξύ του νερού και της γάστρας (hull) καθώς το σκάφος κινείται στο νερό ή (ισοδύναμα) όταν το νερό κινείται γύρω από το αγκυροβολημένο σκάφος. Σε χαμηλές ταχύτητες, η επιφανειακή τριβή είναι το κυρίαρχο στοιχείο υδροδυναμικής οπισθέλκουσας, και εξακολουθεί να είναι σημαντική σε υψηλότερες ταχύτητες. *Ο συντελεστής επιφανειακής αντίστασης* C_f είναι συνάρτηση του αριθμού Reynolds που εξαρτάται από την πυκνότητα του ρευστού ρ, τη σχετική ταχύτητα ροής v , του χαρακτηριστικού μήκους L του σκάφους, και το κινηματικό ιξώδες μ του ρευστού. Ο αριθμός Reynolds δείχνει τον λόγο των δυνάμεων αδρανείας ως προς τις δυνάμεις της διάτμησης λόγω τριβών.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \tag{3.4}$$

Η πυκνότητα του νερού ρ εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητα σε άλατα. Το ιξώδες του νερού έχει μικρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία και την πυκνότητα. Ακολουθεί πίνακας ιξώδους για ορισμένες συνήθεις-τυπικές θερμοκρασίες νερού θαλασσινού και μη [3].

Viscosity of Fresh Water and Seawater, kg/(m-s)

Temperature (*K*)	Temperature (°*C*)	Temperature (°*F*)	Viscosity, Fresh Water	Viscosity, Seawater
283	10	50	1.304e – 3	1.400e – 3
288	15	60	1.122e – 3	1.210e – 3
294	21	70	0.974e – 3	1.060e – 3
300	27	80	0.858e – 3	0.920e – 3

Εικόνα 3.4 – Πίνακας ιξώδους αλμυρού και γλυκού νερού

Η εξίσωση εκτίμησης του συντελεστή επιδερμικής τριβής C_f που χρησιμοποιείται ευρέως μέχρι σήμερα είναι αυτή που παρουσιάστηκε το 1957 στα πλαίσια του International Towing Tank Conference (ITTC):

$$C_f = \frac{0.075}{(log_{10}Re-2)^2} \qquad (3.5)$$

Θεωρούμε την πυκνότητα νερού $\rho = 1000\ kg/m^3$ και ιξώδες $\mu = 0{,}00106\ kg/m^3$. Για μικρά σκάφη αναψυχής, όπως αυτά που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, π.χ. μήκους L= 7 m, σε θαλάσσιο ρεύμα $v = 1\ m/s$ και $v = 2\ m/s$, οπότε ο αριθμός Re υπολογίζεται $Re = 6\ \times 10^6$ και $Re = 13\ \times 10^6$ αντίστοιχα, και επομένως το $C_f = 3{,}28\ \times 10^{-3}$ και $C_f = 2{,}86\ \times 10^{-3}$ αντίστοιχα. Οπότε προκύπτει και η υδροδυναμική αντίσταση λόγω του ρεύματος. Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα:

$v\ (m/s)$	**Re**	C_f	F_ρ
1	6 x 10^6	3,28 x 10^-3	11,5 N
2	13 x 10^6	2,86 x 10^-3	40 N

3.2.3 Επίδραση του Βυθού

Ο βυθός εξασκεί οριζόντια δύναμη στο σκάφος μέσω της άγκυρας και της αλυσίδας/σκοινιού. Εάν η άγκυρα δεν κινείται/ξεσέρνεται (no dragging), η οριζόντια δύναμη από τον βυθό είναι δύναμη αντίδρασης, ίση με τη δύναμη τάσης του σκοινιού στο σημείο ένωσής του με το μάτι της άγκυρας (anchor pulling eye). (Σε αυτή την δύναμη προστίθεται και η δύναμη τριβής που οφείλεται στο τμήμα της αλυσίδας που κείται στον πυθμένα). Εάν η άγκυρα ξεσέρνεται και το σκάφος κινείται, η οριζόντια δύναμη που ασκείται από τον βυθό προς την άγκυρα και μέσω της αλυσίδας προς το σκάφος υπολείπεται των λοιπών δυνάμεων (από άνεμο, ρεύματα κλπ) που εξασκούνται στο σκάφος.

3.2.4 Κινήσεις Σκάφους

Ένα σκάφος, όπως και κάθε στερεό αντικείμενο, έχει 6 βαθμούς ελευθερίας: τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας και τρεις στροφικούς. Στην περίπτωση αγκυροβολημένου σκάφους, σχετικά με τον κίνδυνο να «ξεσύρει» η άγκυρα, τέσσερις κινήσεις είναι σημαντικές:

Pitching: Η κίνηση σε κάθετο άξονα, λόγω των κυμάτων.
Surging: Ταλάντωση στην κατεύθυνση του κύριου άξονα πρύμνης-πλώρης, που προκαλείται από της αυξομειώσεις της δύναμης του ανέμου και των κυμάτων.
Yawing: Μία περιστροφική κίνηση γύρω από κάθετο άξονα (πχ καταρτιού) που προκαλείται από αυξομειώσεις στην ένταση και μεταβολές διεύθυνσης του ανέμου.
Swinging: Μία σχεδόν περιστροφική κίνηση με κέντρο την άγκυρα που προκαλείται από yawing

Το συνολικό φορτίο/δύναμη που εξασκείται στον εξοπλισμό αγκυροβόλησης, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη δύναμη που εξασκεί ο άνεμος στο σκάφος και από τις λοιπές δυνάμεις που προστίθενται ανυσματικά, που οφείλονται σε θαλάσσια ρεύματα, και κινήσεις pitching, surging, yawing and swinging.

Κεφάλαιο 4ο
Δύναμη Συγκράτησης Άγκυρας

4.1 Ορισμός

Η «Δύναμη Συγκράτησης» $\boldsymbol{F_h}$ μιας άγκυρας (anchor's holding power), είναι η τιμή της μέγιστης ελκτικής δύναμης που μια άγκυρα μπορεί να δεχτεί χωρίς να συρθεί, σε δεδομένες συνθήκες, τύπο βυθού κλπ.

Ο ακριβής υπολογισμός της δύναμης συγκράτησης είναι αδύνατος για κάθε περίπτωση και για διαφορετικές συνθήκες (ανέμου, ρευμάτων κλπ). Όμως η εκτίμηση αυτής της δύναμης για δεδομένο τύπο και μέγεθος/βάρος άγκυρας είναι απαραίτητη στον κυβερνήτη του σκάφους για την σωστή και ασφαλή αγκυροβόληση. Για την παρούσα μελέτη, η δύναμη συγκράτησης εκτιμάται με βάση στοιχεία που παρέχονται από σχετικά πειράματα πεδίου με διαφορετικού τύπου άγκυρες και με εργαστηριακές μετρήσεις.

4.2 Υπολογισμός της Δύναμης Συγκράτησης

Ουσιαστική προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία της άγκυρας είναι η καλή πρόσφυση που έχει αποκτήσει με τον πυθμένα. Η μέγιστη δύναμη συγκρατήσεως εξασφαλίζεται από πυθμένα σκληρής άμμου. Η ποιότητα του πυθμένα κατατάσσεται σε τέσσερις κατηγορίες:

Κακή: πυθμένας όπου οι βραχίονες της άγκυρας δεν μπορούν να εισχωρήσουν εύκολα πχ βραχώδης ή/και καλυμμένος από λεπτό από λεπτό στρώμα άμμου, κοράλλια και φύκια, χαλίκι με κοχύλια, παχύ στρώμα από φύκια.
Μέτρια: πυθμένας από μαλακή άμμο ή λάσπη, ο οποίος δεν ασκεί ισχυρή αντίσταση, ακόμα και στην περίπτωση κατά την οποία η άγκυρα είναι τελείως θαμμένη, ή πυθμένας ετερογενής (πχ. άμμος με φύκια)
Καλή: αναφέρεται στις περισσότερες περιπτώσεις αγκυροβολίας σε βυθό άμμου ή λάσπης.
Εξαιρετική: Αναφέρεται σε πυκνή άμμο ή λάσπη, αλλά ταυτόχρονα αρκετά μαλακή ώστε οι βραχίονες της άγκυρας να εισχωρούν στον βαθιά στον πυθμένα, εύκολα.

Κατόπιν πειραμάτων διαφορετικών σχεδίων αγκυρών σε διάφορες ποιότητες πυθμένα, έγινε αντιληπτό ότι η δύναμη συγκρατήσεως μιας δεδομένου τύπου άγκυρας είναι ανάλογη της μάζας της και συνάρτηση της ποιότητας του πυθμένα [2]. Το 1934 ο G. I. Taylor [15] δημοσίευσε αποτελέσματα μελέτης και μετρήσεων της δύναμης συγκράτησης για άγκυρες διαφόρων τύπων, μεταξύ των οποίων και η CQR που εφηύρε [13].

Πιο πρόσφατες μελέτες και μετρήσεις για μεγαλύτερες άγκυρες πχ (NCEL Handbook for Marine Geotechnical Engineering, 1985) περιγράφουν τη σχέση μεταξύ δύναμης συγκράτησης και μάζας ως μη γραμμική, συγκεκριμένα ότι ή F_h είναι ανάλογη της $M^{0,92}$ [16].

Η δύναμη συγκρατήσεως σε κάθε είδους πυθμένα δεν μπορεί να προβλεφθεί, καθώς πειράματα έδειξαν ότι η δύναμη αυτή εξαρτάται και από την ποιότητα πυθμένα.

Για την παρούσα μελέτη, θεωρούμε την δύναμη συγκρατήσεως ανάλογη της μάζας της άγκυρας (με μονάδα μέτρησης kgf ώστε να ανταποκρίνεται σε μονάδες μέτρησης δύναμης) και ενός αδιάστατου (dimensionless) συντελεστή K που αφορά την ποιότητα του πυθμένα και το σχέδιο/τύπο της άγκυρας:

$$F_h = KM \tag{4.1}$$

Από διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία της βιβλιογραφίας μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή Κ κάθε τύπου άγκυρας για τις ποιότητες πυθμένα όπου έγιναν οι μετρήσεις. Χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα από δύο πειράματα, που έγιναν στο πεδίο από διαφορετικούς φορείς [4, 5], κατά τα οποία μετρήθηκε η δύναμη συγκρατήσεως διαφόρου τύπου αγκυρών μικρών σκαφών, υπό ελεγχόμενες συνθήκες αγκυροβόλησης. Στο πρώτο πείραμα [4], η μέγιστη δύναμη συγκράτησης που μπορούσε να μετρηθεί από τον εξοπλισμό του σκάφους ήταν 2250 kgf (σε 5 περιπτώσεις η δύναμη συγκράτησης ήταν μεγαλύτερη από 2250kgf). Οι ποντίσεις και μετρήσεις εκτελέστηκαν υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου και με χαμηλή αναλογία (L/H) 3:1, σε δύο τύπους πυθμένων (σκληρής άμμου και λάσπης). Το δεύτερο πείραμα [5] εκτελέστηκε με αναλογία L/H (εκτάματος/βάθους) 5:1 σε τρεις διαφορετικού τύπου πυθμένες, εκ των οποίων παραθέτουμε τα αποτελέσματα για την τον καλύτερο τύπο δηλαδή σκληρή άμμο.

Οι παρακάτω δύο πίνακες περιλαμβάνουν τα πρωτογενή στοιχεία που μετρήθηκαν, και τις υπολογισμένες τιμές της σταθεράς Κ για κάθε μέτρηση και τύπο άγκυρας.

	FORTRESS	THE CLAW	DELTA	CQR	OCEANE	SPADE	ROCNA	BUGEL	PEFORMANCE 20	MANSION SUPREME	SARCA ANCHORIGHT	HYDROBUBBLE	BULWAGGA	XYZ
WEIGHT (kg)	10	16,3	16,3	17,4	17,2	15,6	15,4	14,5	11,9	16,3	14,8	7,26	13	5,8
Holding Power (kgf) in Hard Sand	>2250	399	1350	failed to set	failed to set	>2250	>2250	900	675	>2250	133	>2250	1125	failed to set
Hard Sand K	>225	24	83	-	-	>144	146	62	57	>138	9	>310	87	-

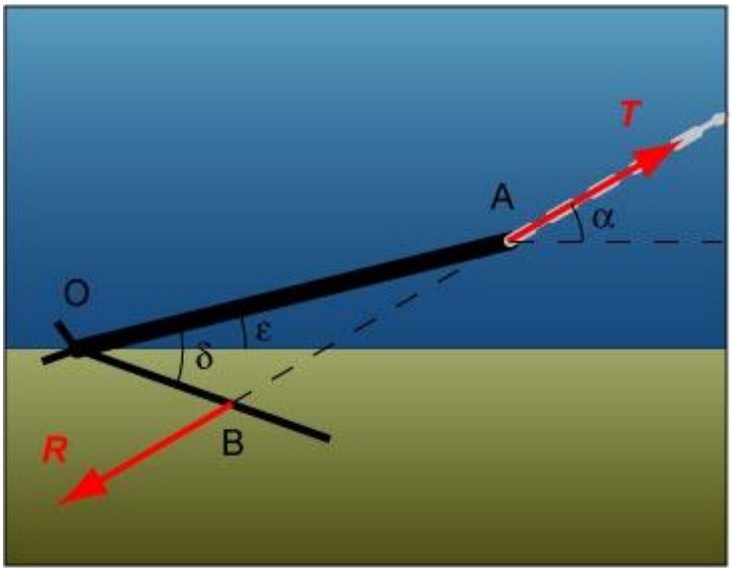
Εικόνα 4.1 – Πίνακας δυνμάμεων συγκράτησης και τιμών Κ για 14 σχέδια αγκυρών (Yachting Monthly Dec 2006)

	BRITANY	KOBRA 2	DELTA	BUGEL	MANSON SUPREME	BRAKE 16	SPADE S80	XYZ	CQR	SPADE A80	SPADE A100	FORTRESS FX37
WEIGHT (kg)	16,5	16,5	15,5	12	15	17	15	13,5	16,5	7	12	10,5
Holding Power (kgf) in Hard Sand	745	1530	740	1365	816	830	1705	790	402	1052	-	3281
Hard Sand K	45	93	48	114	54	49	114	59	24	150	-	312
Holding Power (kgf) Muddy Sand	446	1058	662	999	631	268	570	205	263	-	798	959
Muddy Sand K	27	64	43	83	42	16	38	15	16	-	67	91

Εικόνα 4.2 – Πίνακας δυνάμεων συγκράτησης και τιμών Κ για 12 σχέδια αγκυρών (Yaughting Monthly Nov 2009)

4.3 Επίδραση της Γωνίας Έλξης της Άγκυρας

Η Συνθήκη 4 των προϋποθέσεων συγκράτησης της άγκυρας αναφέρει ότι η τάση στο «μάτι» του στελέχους πρέπει να είναι παράλληλη με τον βυθό. Ωστόσο, οι περισσότερες άγκυρες έχουν ένα περιθώριο ανοχής σε μικρές θετικές γωνίες (έως περίπου 10 μοίρες), επειδή η αντίσταση του εδάφους στον βυθισμένο στο βυθό βραχίονα (fluke), δημιουργεί ροπή που τείνει να «καρφώσει» το στέλεχος στο έδαφος.



Εικόνα4.3 - Γωνίωση

Ως εκ τούτου, όσο η άγκυρα «κρατάει (δλδ δεν «ξεσύρει») , η γωνία $\boldsymbol{\varepsilon}$ μεταξύ του στελέχους της άγκυρας και του πυθμένα είναι σημαντικά μικρότερη από την γωνία έλξης $\boldsymbol{\alpha}$ της άγκυρας.

Θεωρούμε την αναλογία $\boldsymbol{p} = \boldsymbol{OA}/\boldsymbol{OB}$ και την γωνία $\boldsymbol{\delta}$ που σχηματίζουν το στέλεχος και ο βραχίονας της άγκυρας. Από την γεωμετρία/τριγωνομετρία προκύπτει:

$$\varepsilon = \alpha - \mathrm{atan}\left[\frac{\sin\delta}{p - cos\delta}\right] \qquad (4.2)$$

Για παράδειγμα, έστω δ = 32° και p = 4, το στέλεχος παραμένει καρφωμένο στον πυθμένα για γωνία α μικρότερη των 10°.

Η επίδραση της γωνίας έλξης (angulation) στη δύναμη συγκρατήσεως δεν έχει μελετηθεί πειραματικά από κατασκευαστές αγκυρών ή και ανεξάρτητους ερευνητές.

Για τάση αλυσίδας F_h δηλαδή ίση με την μέγιστη δύναμη συγκράτησης, το μέτρο της οριζόντιας δύναμης που εφαρμόζεται στην άγκυρα όταν η δύναμη τάσης εξασκείται υπό γωνία $\boldsymbol{a}$, είναι $F_h \cos a$ και της κάθετης δύναμης $F_h \sin a$. Η κάθετη δύναμη τείνει να ξεθάψει την άγκυρα, και για κάποια τιμή της γωνίας α = $\boldsymbol{a_0}$ η κάθετη δύναμη θα οδηγήσει σε ολική απώλεια της δύναμης συγκράτησης. Η συμπεριφορά της $F_h(a)$ για τιμές της γωνίας α κοντά στην οριακή αυτή τιμή $\boldsymbol{a_0}$ που η δύναμη συγκρατήσεως μηδενίζεται, δίνεται από το μέτρο της οριζόντιας συνιστώσας:

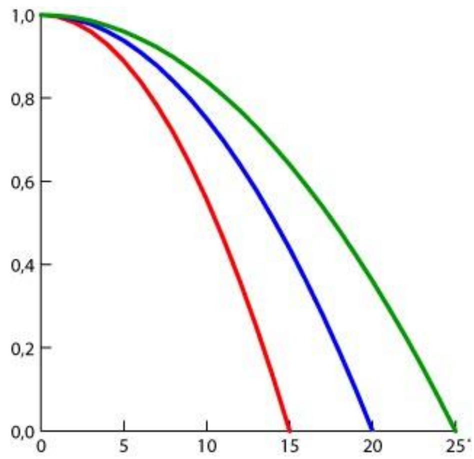
$$F_h(a) = F_c \cos(\Delta\alpha) = F(0)\,[1\text{-}a^2/2] \tag{4.3}$$

(βάσει του Taylor expansion του συνημίτονου)

Απ' αυτό προκύπτει παραβολικός συντελεστής μείωσης της δύναμης συγκρατήσεως όταν η γωνία α προσεγγίζει την οριακή γωνία a_0

$$F_h(a) = F_h(0)\left[1 - \left(\frac{a_0 - a}{2}\right)^2\right] \tag{4.4}$$

Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται σχηματικά το ποσοστό μείωσης της δύναμης συγκράτησης σε συνάρτηση με την γωνία έλξης της άγκυρας.



Εικόνα 4.4 – Επίδραση της γωνίωσης στην μείωση της δύναμη συγκράτησης, για άγκυρες με $a_0 = 15°, 20°, 25°$ αντίστοιχα

Για παράδειγμα, μια άγκυρα με $a_0 = 20^\circ$ που δέχεται μια ελκτική δύναμη υπό γωνία $\alpha = 15^\circ$ θα λειτουργήσει στο 60% της μέγιστης δύναμης συγκρατήσεως της.

Κεφάλαιο 5^{ο}
Στατική Συμπεριφορά – Ομογενές Μέσο Πρόσδεσης (Αλυσίδα)

5.1 Απαιτήσεις Μέσου Πρόσδεσης

Όπως αναφέρθηκε (Κεφάλαιο 2ο), οι απαιτήσεις από το μέσο πρόσδεσης περιλαμβάνουν τα εξής:

Απαίτηση 4: Το σκοινί πρέπει να τραβάει την άγκυρα με κατεύθυνση τέτοια που να της επιτρέπει να προσφέρει την απαιτούμενη δύναμη συγκράτησης.

Απαίτηση 5: Το σκοινί πρέπει να είναι πρακτικό στη χρήση και στην αποθήκευση/στοίβαγμα στο σκάφος.

Απαίτηση 6: Το σκοινί πρέπει να μειώνει τις τάσεις στην άγκυρα και στον εξοπλισμό του σκάφους (Tensile stresses) που οφείλονται στον κυματισμό της θάλασσες ή σε ξαφνικές ριπές ανέμου.

Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τις Απαιτήσεις 4 και 5 που αφορούν την στατική συμπεριφορά του σκοινιού.

Προφανώς άκαμπτες συσκευές (πχ ράβδος από χάλυβα) δεν πληρούν τις παραπάνω απαιτήσεις. Επίσης αποκλείονται τα καλώδια καθώς δεν συντελούν στην μείωση τάσεων. Υποψήφια υλικά είναι αλυσίδες, σκοινιά από ίνες κλωστοϋφαντουργίας (textile rope) ή από συνθετικές ίνες (πχ. nylon), ή κάποιος συνδυασμός αυτών. Θεωρούμε ότι τα υλικά αυτά είναι ομογενή, τα φυσικά χαρακτηριστικά τους δηλαδή είναι σταθερά σε όλο το μήκος τους (μάζα ανά μονάδα μήκους, ελαστικότητα, οριακό φορτίο θραύσης, βάρος κλπ.).

5.2 Βασικές Εξισώσεις Ομογενούς Σκοινιού / Αλυσίδας

Δεδομένου w και βάθους (ύψους από τον πυθμένα) H (βλ. Εικόνα 3.1), θεωρούμε L_{up} το ελάχιστο μήκος μέσου πρόσδεσης (αλυσίδας ή βαρύ σκοινιού) ικανό να κρατήσει το στέλεχος της άγκυρας οριζόντιο για μια ελκτική δύναμη F *(ίσου μεγέθους με την τάση To που εφαρμόζεται στο μέσο πρόσδεσης).*

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις αλυσοειδούς καμπύλης που χαρακτηρίζει την γεωμετρία του μέσου πρόσδεσης υποβρυχίως (Εικόνα 3.4) και τις παρακάτω αδιάστατες μεταβλητές:

$$X_1 = \frac{wl}{F} \qquad L = \frac{wL_{up}}{F} \qquad H_1 = \frac{wH}{F} \tag{5.1}$$

Όπου:

w η κάθετη δύναμη (λόγω βαρύτητας) ανά μονάδα μήκους ποντισμένης αλυσίδας
H αδιάστατο ύψος από τον πυθμένα (η προβολή της αλυσοειδούς)
F (= To) η οριζόντια τάση της αλυσοειδούς (στο βυθό και στο σκάφος)
L_{up} το μήκος της ανασηκωμένης αλυσοειδούς
l η οριζόντια προβολή του μήκους της ανασηκωμένης αλυσοειδούς
Προκύπτει η σχέση [1]:

$$L = \sqrt{H_1^2 + 2H_1} \tag{5.2}$$

Και συνεπώς η σχέση μεταξύ του μήκους της ανασηκωμένης αλυσίδας και της οριζόντιας τάσης T_0:

$$L_{up} = \sqrt{H^2 + 2\frac{F}{w}H} \tag{5.3}$$

Η κρίσιμη δύναμη έλξης Fc, ικανή να ανυψώσει όλο το μήκος L της αλυσίδας από τον πυθμένα προκύπτει ως :

$$F_c = w\frac{L_{up}^2 - H^2}{2H} \tag{5.4}$$

Αυτή είναι η μέγιστη ελκτική δύναμη που μπορεί να εφαρμοστεί από το σκάφος προς το μέσο πρόσδεσης μήκους L με υποθαλάσσιο βάρος w ανά μονάδα μήκους, που εξασφαλίζει ότι το στέλεχος της άγκυρας παραμένει οριζόντιο.

5.3 Γωνίωση (Angulation)

Όταν η ελκτική δύναμη F γίνει μεγαλύτερη της οριακής δύναμης Fc, το ομογενές μέσο πρόσδεσης δεν εφάπτεται πλέον του πυθμένα στο «μάτι» του στελέχους της άγκυρας Η δύναμη F(α) θα εφαρμόζεται στην άγκυρα υπό γωνία α που σχηματίζει η εφαπτόμενη στην αλυσίδα/σχοινί στο σημείο πρόσδεσης με την άγκυρα, με τον πυθμένα («γωνίωση»). Η δύναμη που εξασκείται στην άγκυρα από το μέσο πρόσδεσης θα έχει κάθετη συνιστώσα τάσης F(α) sinα που τείνει να ξεθάψει την άγκυρα και μειώνει τη δύναμη συγκράτησης. Η οριζόντια συνιστώσα της τάσης $F_x = cosa\, F(a)$

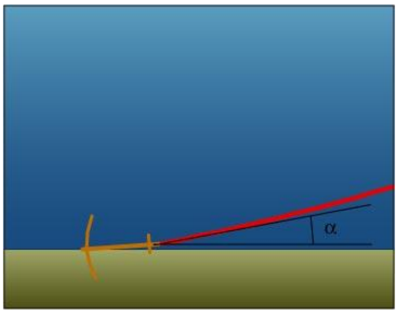
Για μικρές τιμές της γωνίας α, τη μείωση της δύναμης συγκρατήσεώς εκτιμάται από την ακόλουθη σχέση:

$$F(a) = F_c \cos a \tag{5.5}$$

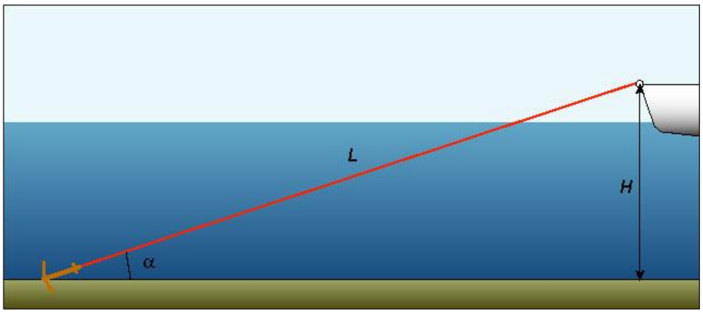
Στην περίπτωση χρήσης ελαφρού μέσου πρόσδεσης (πχ. σχοινιού από ίνες νάιλον ή κλωστοϋφαντουργίας) η γωνίωση θα είναι αναπόφευκτη ακόμα κα σε χαμηλές συνθήκες φόρτισης. Η διατήρησή της σε χαμηλή τιμή, ώστε να μην προκαλέσει αστοχία του συστήματος αγκυροβόλησης, απαιτεί υψηλή τιμή αναλογίας $N = L/H$ (μήκος εκτάματος σκοινιού / βάθος). Δεδομένου ότγπι το σχήμα του σκοινιού θα προσεγγίσει την ευθεία γραμμή κάτω από συνθήκες φόρτισης, η γωνία α θα προσεγγίσει την τιμή *arcsin (H/L). Από την* αναλογία L/H = 10:1 προκύπτει:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{1}{10}\right) \tag{5.6}$$

Δηλαδή γωνίωση 5,7 μοιρών, ανεξάρτητα της ελκτικής δύναμης.



Εικόνα 5.1a – Γωνίωση



Εικόνα 5.1b – Σκοινένιο μέσο πρόσδεσης (περίπτωση ακραίας δύναμης έλξης)

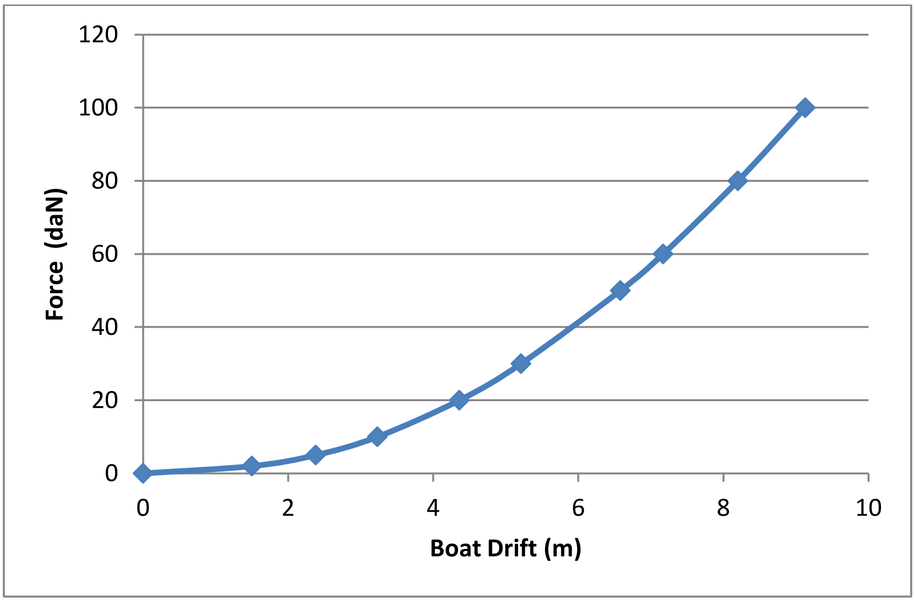
5.4 Ελκτική Δύναμη – Μετακίνηση Σκάφους

Η γνώση της σχέσης μεταξύ της δύναμης έλξης και της οριζόντιας μετατόπισης του σκάφους, είναι σημαντική για τη μελέτη της μετακίνησης του αγκυροβολημένου σκάφους και των δυνάμεων που επηρεάζουν την αγκυροβόληση υπό ριπές αέρα.

Η σχέση αυτή περιγράφεται από την εξίσωση (6.6) που ακολουθεί, η οποία προκύπτει από την αλυσοειδή γεωμετρία [1] (Εικόνα 3.4).

$$l = \frac{F_x}{w} \sinh^{-1}\left(\frac{w}{F_x}\sqrt{H + 2\frac{F_x}{w}}\right) \tag{5.7}$$

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η σχέση ελκτικής δύναμης-μετατόπισης σκάφους για το παράδειγμα της Εικόνας (2.6)



Εικόνα 5.2 – Γράφημα Μετατόπισης Σκάφους – Ελκτικής Δύναμης

Η σχέση αυτή είναι μη γραμμική. Σημειώνουμ επίσης ότι ισχύει για «χαμηλές» φορτίσεις/τάσεις, αφού όταν το μέσο πρόσδεσης τεντωθεί πλήρως και η ψευδοελαστικότητά του μηδενιστεί, η αναγκαία δύναμη για την μετατόπιση του σκάφους θα αυξάνεται με διαφορετικό τρόπο (γραμμικό) απαιτώντας ελαστική παραμόρφωση του μέσου, μέχρι το όριο θραύσης του.

5.5 Συμπεράσματα

Συγκρίνουμε τα δύο είδη ομογενούς σκοινιού, με βάση τις Απαιτήσεις 4 και 5:

Κριτήριο	**Αλυσίδα**	**Σκοινί**
Έλξη της άγκυρας παράλληλα στον πυθμένα	Ναι	Όχι, εκτός αν γίνει χρήση μεγάλης αναλογίας L/H
Ευκολία στην αποθήκευση	Ναι, αλλά μεγάλο βάρος	Ναι
Ευκολία στον χειρισμό	Ναι (με αυτοματισμό)	Ναι

Εικόνα 5.3 – Συγκριτικός Πίνακας Περιπτώσεων Ομογενούς Σκοινιού

Κανένα είδος ομογενούς μέσου πρόσδεσης δεν ικανοποιεί πλήρως τις ανάγκες αγκυροβόλησης κάτω από όλες τις συνθήκες, που περιλαμβάνουν αντίξοες καιρικές συνθήκες που αναπτύσσονται δυνάμεις πολύ υψηλής φόρτισης. Στο επόμενο κεφάλαιο θα μελετήσουμε την στατική συμπεριφορά ετερογενούς μέσου πρόσδεσης.

Κεφάλαιο 6ο Στατική Συμπεριφορά – Ετερογενές Μέσο Πρόσδεσης

Ο λόγος για τον οποίο ένα σκοινί μέσο πρόσδεσης δεν εφάπτεται του πυθμένα είναι η απουσία βάρους στο κάτω μέρος του, το οποίο και συνδέεται με την άγκυρα. Αντίστοιχα, ένα μέσο πρόσδεσης εξ' ολοκλήρου από αλυσίδα συχνά δεν είναι επιθυμητό λόγω του μεγάλου βάρους που προσθέτει η αλυσίδα «ικανού» εκτάματος όταν αποθηκεύεται στην πλώρη του σκάφους . Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη χρήσης ενός μέσου πρόσδεσης, το οποίο θα είναι βαρύτερο στο χαμηλότερο μέρος του και ελαφρύτερο στο άνω μέρος του.
Στην πράξη, δύο εναλλακτικοί τρόποι πρόσδεσης χρησιμοποιούνται:

- Η προσθήκη *βοηθητικού βάρους* (kellet) σε nylon σκοινί, σχετικά κοντά στην άγκυρα
- *Μικτό μέσο πρόσδεσης*. Η συνδυαστική χρήση αλυσίδας (στο κάτω μέρος) και σκοινιού (στο ανώτερο μέρος).

Και οι δύο περιπτώσεις εξετάζονται παρακάτω.

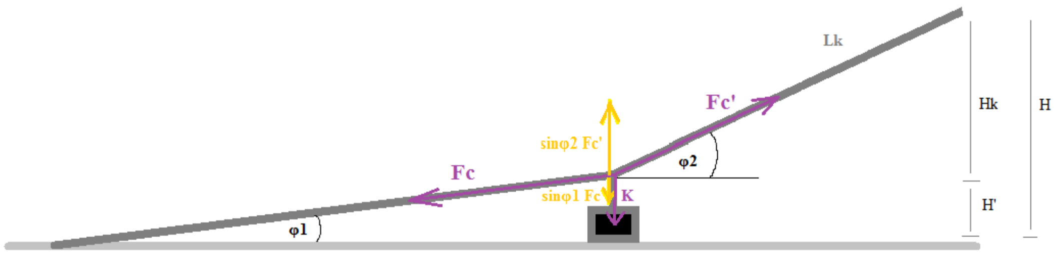
6.1 Προσθήκη Βοηθητικού Βάρους (kellet)

Στο σκοινί πρόσεδης προστίθεται (δένεται) μάζα βάρους $\boldsymbol{K}$ σε απόσταση $\boldsymbol{L_k}$ από το σημείο πρόσδεσης στο σκάφος, έτσι ώστε το σκοινί και βάρος Κ να παραμένει πάνω στον πυθμένα όπως στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 6.1). Αυτό τείνει να κρατά τη γωνία φ_1 σε «ανεκτές» χαμηλές τιμές (δηλαδή κοντά στο 0) ώστε να εφαρμόζεται η τάση πάνω στην άγκυρα σχεδόν παράλληλα με τον πυθμένα [14].

Εφόσον το σημείο πάνω στο σκοινί που δένεται το βοηθητικό βάρος ισορροπεί, εφαρμόζοντας ισορροπία δυνάμεων σε αυτό το σημείο, καταλήγουμε στην παρακάτω προσεγγιστική σχέση:

$$F_c^{'}\, sin\varphi_2 \;=\; F_c^{'} + \frac{H_c}{L_k} \;=\; K + sin\varphi_1 F_c \;\approx\; K + F_c\,\frac{H}{L_k} \qquad (6.1)$$

Όπου η Fc είναι η δύναμη συγκρατήσεως του σκοινιού.



Εικόνα 6.1 – Ομογενές μέσο πρόσδεσης με προσθήκη βοηθητικού βάρους, ισορροπία δυνάμεων στο σημείο τοποθέτησης

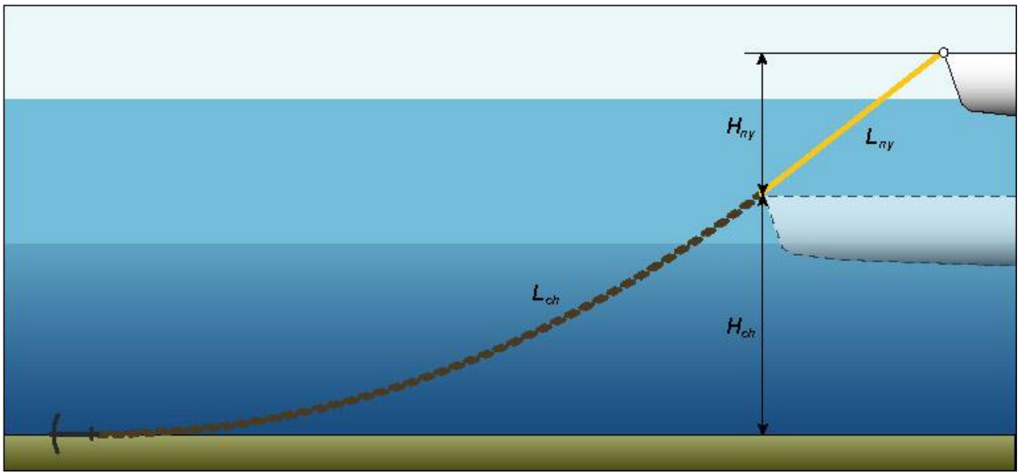
Η δύναμη που τείνει να ανασηκώσει την άγκυρα από τον οριζόντιο άξονα του πυθμένα, είναι η κάθετη συνιστώσα της τάσης του σκοινιού $F_c \sin\varphi_1$. (Στο σημείο όπου εφαρμόζεται η δύναμη K: $K + F_c \sin\varphi_1 = F_c' \sin\varphi_2$). Η δύναμη αυτή είναι ελάχιστη όταν η κάθετη συνιστώσα της F_c είναι μηδενική, όταν δηλαδή η άγκυρα έλκεται παράλληλα με τον πυθμένα. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας το kellet σε κοντινή απόσταση από την άγκυρα, ώστε η γωνία φ_1 να είναι η ελάχιστη δυνατή.

Ένα ομογενές κλωστουφαντουργικό μέσο πρόσδεσης με προσθήκη βοηθητικού βάρους, έχει την ίδια απόδοση με αλυσίδα ίδιου μήκους και διπλάσιας μάζας. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι η συμπύκνωση του βάρους χαμηλά στο μέσο σύνδεσης είναι αποτελεσματικότερη συγκριτικά με την περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής του βάρους σε όλο το μήκος του. Δυστυχώς, λόγω περιορισμού στο χειρισμό, τα εξαρτήματα βοηθητικού βάρους περιορίζονται σε μάζα μέχρι 22kg περίπου, η οποία –αναλόγως του μεγέθους σκάφους κλπ- μπορεί να είναι ανεπαρκής σε δυσμενείς συνθήκες ανέμου, εκτός και αν η αναλογία ***L / H*** είναι πολύ μεγάλη. Επιπλέον, η χρήση βοηθητικού βάρους μειώνει σημαντικά την ακτίνα αιώρησης ***R*** (swinging).

6.2 Μικτό Μέσο Πρόσδεσης

Ο συνδυασμός σκοινιού (πχ κλωστουφαντουργίας) στο άνω μέρος και αλυσίδας στο κάτω μέρος (μικτό μέσο πρόσδεσης) υπερισχύει, αν και λιγότερο αποτελεσματικός έναντι της χρήσης βοηθητικού βάρους ίδιας μάζας για ίσο μήκος μέσου πρόσδεσης. Προτιμάται η χρήση nylon σκοινιού λόγω μικρού βάρους, οπότε το τμήμα αυτό γίνεται ευθεία γραμμή, μόλις η ελκτική δύναμη ξεπεράσει κάποια τιμή.

Έστω ότι το ομογενές μέσο πρόσδεσης από αλυσίδα μήκους L_{ch} ανυψώνεται εξ' ολοκλήρου από τον πυθμένα σε ύψος H_{ch}, που θα αποτελούσε το μέγιστο επιτρεπτό βάθος αγκυροβόλισης σε συνθήκες ισχυρής φόρτισης. Εάν προστεθεί ένα τμήμα μήκους L_{ny} nylon σκοινιού μεταξύ του άκρου της αλυσίδας και του σημείου πρόσδεσης με το σκάφος, το μέγιστο επιτρεπτό βάθος αγκυροβόλισης αυξάνεται κατά H_{ny}.



Εικόνα 6.2 – Μικτό Μέσο Πρόσδεσης

Το ύψος H_{ny} υπολογίζεται προσεγγιστικά από την ακόλουθη γεωμετρική σχέση

$$H_{ny} \approx L_{ny} \frac{2L_{ch}H_{ch}}{L_{ch}^2 - H_{ch}^2} \tag{6.2}$$

που προκύπτει από την ανάλυση των δυνάμεων (τάσης) στο σημείο που ενώνεται η αλυσίδα με το σκοινί.

Για παράδειγμα, σε αλυσίδα μήκους L_{ch} 25 m που παρέχει H_{ch} 5 m αν προστεθεί nylon σκοινί μήκους L_{ny} 12m, παρέχει επιπλέον H_{ny} 10 m επιτρεπτού βάθους αγκυροβόλησης. Το ίδιο αποτέλεσμα επιτυγχάνουμε με τη χρήση μακρύτερης αλυσίδας κατά 11 m,, με σημαντικό όμως επιπλέον βάρος.

6.3 Ελαστικό Μέσο Πρόσδεσης

Μέχρι αυτό το σημείο έχουμε υποθέσει ότι το μέσο πρόσδεσης είναι ανελαστικό. Υπό την οπτική της στατικής μελέτης, παρατηρούμε μια αύξηση της ακτίνας αιώρησης, γεγονός που υποδεικνύει ελαστικότητα του μέσου. Θα εξετάσουμε την επιμήκυνση του μέσου πρόσδεσης ως συνάρτηση της ελκτικής δύναμης F, που ισούται με την τάση T που εφαρμόζεται στο μέσο πρόσδεσης από το σκάφος.

Για μια μεταλλική ράβδο μήκους L, εφ' όσον η τάση T δεν υπερβαίνει το όριο ελαστικότητας του υλικού (για να προκαλέσει πλαστική παραμόρφωση ή/και θραύση), η επιμήκυνση είναι ανάλογη της τάσης. Έστω L_0 το μήκος για T=0 , A η διατομή της ράβδου και E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Το μήκος της ράβδου είναι γραμμική συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στη ράβδο, με την ακόλουθη σχέση:

$$L = L_0\left(1 + \frac{T}{EA}\right) \tag{6.3}$$

Ο κοινός χάλυβας έχει μέτρο ελαστικότητας E=200 GPa.

Μία αλυσίδα είναι περισσότερο ελαστική από μια μεταλλική ράβδο ίσου μήκους, οπότε θεωρούμε μια επιμήκυνση 20% επιπλέον, για την ίδια τάση.

Ένα nylon σκοινί έχει μέτρο ελαστικότητας E=2 – 4 GPa (περίπου 50 – 100 φορές μεγαλύτερη από τον κοινό χάλυβα), αλλά η επιμήκυνση δεν είναι ανάλογη της τάσης σε υψηλές τιμές (λόγω πλαστικής παραμόρφωσης και θραύσης)

6.4 Σχέση Ελκτικής Δύναμης και Μετατόπισης Σκάφους

Η μελέτη της στατικής σχέσης μεταξύ ελκτικής δύναμης και οριζόντιας μετατόπισης του σκάφους είναι σημαντικές για την πρόβλεψη της κίνησης του σκάφους και των δυνάμεων που επηρεάζουν την αγκυροβόληση υπό ριπές ανέμου. Η ελαστικότητα του μέσου πρόσδεσης πρέπει να ληφθεί υπ’ όψη. Συγκρίνουμε τις καμπύλες της οριζόντιας μετατόπισης του σκάφους όπως προκύπτουν από το παρακάτω δύο παραδείγματα περιπτώσεων αγκυροβόλησης με αλυσίδα, και αγκυροβόλησης με συνδυασμό αλυσίδας και σκοινιού. Εφαρμόζουμε οριζόντια δύναμη στο σκάφος όταν το μέσο πρόσδεσής είναι τεντωμένο και πλήρως ανασηκωμένο από τον πυθμένα.

Στοιχεία Παραδείγματος:

H = 10 m

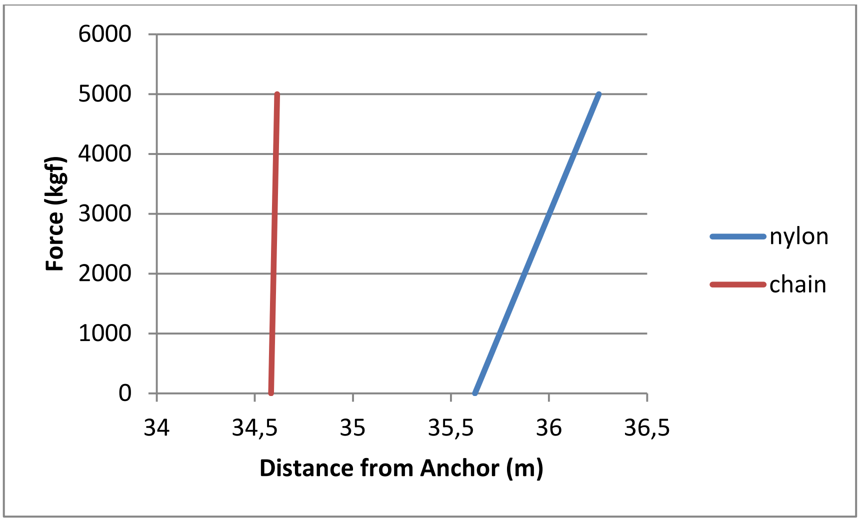
Χαρακτηριστικά 1^{ου} μέσου σύνδεσης: 36 m αλυσίδας διαμέτρου 10 mm

Χαρακτηριστικά 2^{ου} μέσου σύνδεσης: 25 m αλυσίδας διαμέτρου 10 mm + 12 m nylon σκοινί διαμέτρου 22 mm

Σημειώνουμε ότι μια χαλύβινη αλυσίδα 10 mm παρουσιάζει όριο θραύσης 5000 kgf [9]

και ένα κοινό nylon σκοινί διαμέτρου 22 mm παρουσιάζει όριο θραύσης 7776 kgf. [10]

Οπότε εξετάζουμε την συμπεριφορά των δύο περιπτώσεων ασκώντας οριζόντια αυξανόμενη δύναμη μέχρι 5000 kgf.



Εικόνα 6.3 – Γράφημα μετατόπισης σκάφους λόγω ελαστικότητας του μέσου πρόσδεσης

Παρατηρούμε ότι λόγω της ελαστικότητας του nylon σκοινιού, σε μεγάλες τιμές της ελκτικής δύναμης, το μικτό μέσο σύνδεσης (χαλύβδυνη αλυσίδα και nylon σκοινί) παρουσιάζει πιο προοδευτική συμπεριφορά συκριτικά με το ομογενές μέσο πρόσδεσης (αμιγώς χαλύβδινη αλυσίδα). Η συμπεριφορά αυτή βοηθά στην μείωση των τάσεων λόγω δυνατών ριπών ανέμου.

6.5 Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις ετερογενούς μέσου πρόσδεσης (βοηθητικό βάρος, αλυσίδα και σκοινί), με βάση τις απαιτήσεις που ορίσαμε για το μέσο πρόσδεσης (Απαίτηση 4 και 5), καταλήγουμε τον παρακάτω συγκριτικό πίνακα:

Κριτήριο	**Βοηθητικό Βάρος (kellet)**	**Μικτό Μέσο Πρόσδεσης (Αλυσίδα + Σκοινί)**
Έλξη της άγκυρας παράλληλα στον πυθμένα	Ναι, αλλά περιορισμένα λόγω του περιορισμένου βάρους του kellet	Ναι
Ευκολία στην αποθήκευση	Όχι	Ναι
Ευκολία στον χειρισμό	Όχι (τοποθέτηση και αφαίρεση του kellet)	Ναι

Εικόνα 6.3 Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για τα είδη Ετερογενούς Μέσου Πρόσδεσης

Θεωρητικά, ο συνδυασμός Σκοινί + Βοηθητικό Βάρος δίνει την καλύτερη αναλογία *Αποτελεσματικότητα/Βάρος*, παρά μόνο όμως εάν το Βοηθητικό Βάρος είναι τοποθετημένο κοντά στην άγκυρα. Καθώς τα μεγάλης μάζας βοηθητικά βάρη είναι απαιτητικά έως επικίνδυνα στον χειρισμό τους, είναι ακατάλληλα σε συνθήκες δυνατών ανέμων, εκτός αν η αναλογία *έκταμα σκοινιού/ βάθος αγκυροβόλησης* είναι πολύ μεγάλη. Στην ίδια τιμή μάζας (που αποθηκεύεται επί του σκάφους), ένα μικτό μέσο πρόσδεσης είναι ελαφρώς λιγότερο αποτελεσματικό, αλλά δεν διαθέτει κανένα από τα μειονεκτήματα της εναλλακτικής λύσης αγκυροβόλησης με βοηθητικό βάρος.

Κεφάλαιο 7^{ο}
Δυναμική Συμπεριφορά – Ομογενές Μέσο Πρόσδεσης

7.1 Απαιτήσεις Μέσου Πρόσδεσης

Από τις Απαιτήσεις για το μέσο πρόσδεσης, η *Απαίτηση 6: «Το σκοινί πρέπει να μειώνει τις τάσεις στην άγκυρα και στον εξοπλισμό του σκάφους λόγω κυμάτων ή ριπών ανέμου»*, αφορά τη δυναμική συμπεριφορά του. Όπως έχουμε αναφέρει τα άκαμπτα μέσα πρόσδεσης (πχ χαλύβινη ράβδος) δεν πληρούν τις Απαιτήσεις 4 και 5, οπότε περιοριζόμαστε σε εύκαμπτες συσκευές (πχ. αλυσίδα ή σκοινί) που επιτρέπουν στο σκάφος να μετατοπίζεται οριζόντια. Αυτή η μετακίνηση ονομάζεται **Surging**. Λόγω της μάζας/αδράνειας του σκάφους, αυτή η κίνηση προκαλεί δυναμικά φαινόμενα αύξησης τάσης (overtensions), τα οποία δύναται να είναι κατά πολύ μεγαλύτερα των ελκτικών δυνάμεων που τα προκαλούν, και εξαρτώνται από το υλικό του μέσου πρόσδεσης και τις μεταβολές της ελκτικής δύναμης στο χρόνο.

7.2 Τέλειο Ελατήριο

Για να εξετάσουμε την συμπεριφορά διαφορετικών ειδών μέσων πρόσδεσης κατά την αγκυροβόληση κάτω από δυναμικά μεταβαλλόμενα φορτία, ξεκινάμε αναλύοντας τη συμπεριφορά ενός τέλειου ελατηρίου ως μέσου πρόσδεσης σκάφους σε σταθερό σημείο (πχ. στην προκυμαία). Σε αυτή την περίπτωση η επιμύκυνση του ελατηρίου είναι ανάλογη της τάσης T. Έστω L_0 το μήκος για μηδενική τάση T = 0 και σ το μέτρο ελαστικότητάς του, τότε το μήκος L μεταβάλλεται γραμμικά με την τάση T:

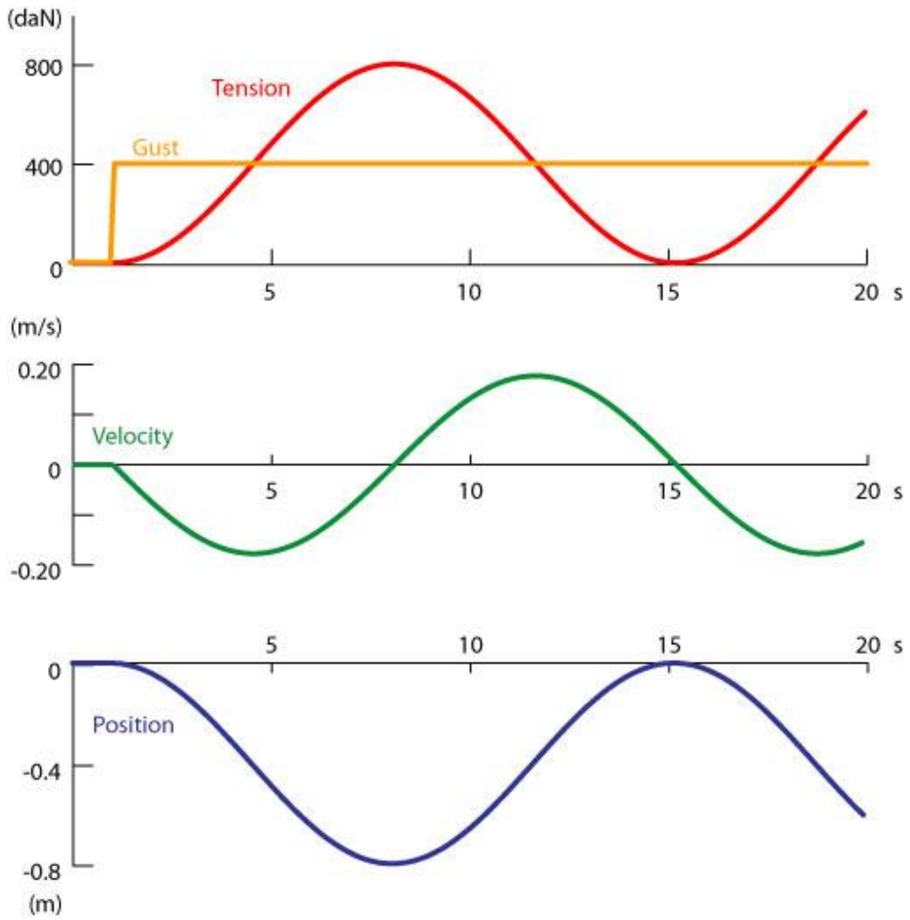
$$L = L_o + T/\sigma \qquad (7.1)$$

Και η επιμήκυνσή του $\varDelta L$ $(L - Lo)$ υπολογίζεται ως εξής:

$$\varDelta L = {}^{T}\!/_{\sigma} \qquad (7.1')$$

7.3 Προφίλ Στιγμιαίας Ριπής Ανέμου

Εξετάζουμε την συμπεριφορά του κατά τα παραπάνω προσδεμένου σκάφους όπου M = μάζα = 4,9 t και η ελαστικότητα του μέσου πρόσδεσης $\sigma = 1000,$ στην περίπτωση που η δύναμη του ανέμου αυξηθεί απότομα. Έστω π.χ. ότι η δύναμη λόγω αντίστασης στον άνεμο αυξηθεί ξαφνικά λόγω ριπής ανέμου από F=0 σε F_g = 400 daN. Το σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει την διακύμανση της τάσης του ελατηρίου, της ταχύτητας και της θέσης του σκάφους στο χρόνο, σε σχέση με το σημείο εκκίνησης:



Εικόνα 7.1 – Γράφημα Τάσης ενός Τελείου Ελατηρίου για στιγμιαία ριπή ανέμου

Το σκάφος εκτελεί μία γραμμική ταλάντωση λόγω της μεταβολής του μήκους του ελατηρίου L, κατά τον διαμήκη άξονά του (surging).

Σύμφωνα με τον νόμο του Νεύτωνα, το σκάφος αρχίζει να κινείται με επιτάχυνση $\boldsymbol{\gamma}$ όπου:

$$\gamma = (T - F)/M \qquad (7.2)$$

Καθώς το ελατήριο επιμηκύνεται, η δύναμη T αυξάνεται μέχρι να γίνει ίση με F_g με αποτέλεσμα η επιτάχυνση εκείνη τη χρονική στιγμή να μηδενιστεί. Το σκάφος βρίσκεται στο σημείο στατικής ισορροπίας του: $\Delta L_g = F_g/\sigma$ (7.3)

(στο παράδειγμα σε απόσταση x=0,4 m από το σημείο έναρξης).

Η μέγιστη ταχύτητά του είναι: $V_{max} = F_g/\sqrt{\sigma M}$ (7.4)

(= 0,18 m/s για το παράδειγμα).

Μετά το σκάφος αρχίζει να επιβραδύνει.

Στη συνέχεια φθάνει στην ακραία θέση: $\Delta L_{max} = 2F_g/\sigma = 2\Delta L_g$ (7.5)

(μέγιστη μετατόπιση = 0,8 m για το παράδειγμα), στην οποία η ταχύτητά του είναι ξανά μηδενική,

και η τάση του ελατηρίου μέγιστη: $T_{max} = 2F_g$ (7.6)

(μέγιστη τάση = 800 daN για το παράδειγμα).

Στη συνέχεια η κίνηση αντιστρέφεται: το σκάφος επιταχύνει προς τα εμπρός, διασχίζει το σημείο στατικής ισορροπίας, και η παραπάνω ακολουθία επαναλαμβάνεται. Η διακύμανση όλων των παραμέτρων (θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση, τάση) είναι ημιτονοειδής με περίοδο :

$$T = 2\pi\sqrt{M/\sigma} \qquad (7.7)$$

(περίοδος =14 s για το παράδειγμα).

Στην πράξη, η τριβή μεταξύ νερού και γάστρας του σκάφους, αποσβένει αυτήν την ταλάντωση.

Καθώς η ακραία θέση X_{max} και η μέγιστη τάση T_{max} της ταλάντωσης δεν εξαρτώνται από την μάζα του σκάφους, παρατηρούμε ότι σκάφη μεγάλου εκτοπίσματος δεν έχουν αρνητικές επιπτώσεις λόγω της μάζας τους σε αυτήν την κίνηση.

Σημαντικό είναι επίσης να σημειώσουμε, παρότι δεν είναι εμφανές στις παραπάνω εξισώσεις, ότι το τέλειο ελατήριο είναι πιο αποτελεσματικό από οποιαδήποτε άλλη ελαστική διάταξη για την απορρόφηση/περιορισμό των δυναμικών τάσεων. Οπότε οποιαδήποτε άλλη μη γραμμική ελαστική ή ψευδοελαστική διάταξη που χρησιμοποιείται ως μέσο πρόσδεσης (πχ. αλυσίδα ή nylon σκοινί), υπόκειται σε υπερβάσεις της τάσης (overtensions) μεγαλύτερες από το διπλάσιο της ελκτικής δύναμης της ριπής ανέμου.

Εάν η ελκτική δύναμη έχει αρχική τιμή $F_0 > 0$, η συμπεριφορά είναι η ίδια αλλά η μέγιστη τάση μειώνεται κατά F_0 :

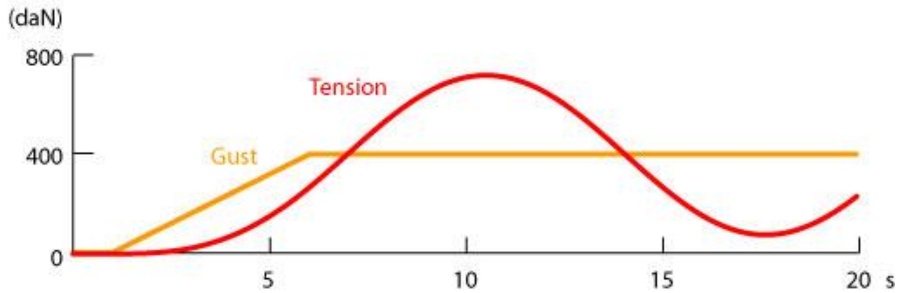
$$T_{max} = 2F_g - F_0 \tag{7.8}$$

(πχ. αν η αντίσταση στον άνεμο συνεπάγεται σε σταθερή ελκτική δύναμη ίση με 100 daN, μια απότομη αύξηση της δύναμης λόγω ριπής ανέμου στα 400 daN θα προκαλέσει τάση T_{max} = 700 daN)

7.4 Τραπεζοειδές Προφίλ Ριπής Ανέμου (Trapezoidal – profiled gust)

Στην πραγματικότητα, μια ριπή ανέμου δεν αποκτά την μέγιστη τιμή της ακαριαία. Επιπλέον, δεν παραμένει στο επίπεδο αυτό επ’ αόριστον. Μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση είναι το τραπεζοειδές προφίλ στο οποίο μπορούμε να ορίσουμε τον χρόνο ανόδου, την χρονική διάρκεια στη μέγιστη τιμή και τον χρόνο αποσύνθεσης (decay time). Καθώς στις σχεδιαστικές παραμέτρους του συστήματος αγκυροβόλησης υπεισέρχονται οι μέγιστες τάσεις, μελετάμε μόνο το πρώτο, ανοδικό τμήμα.

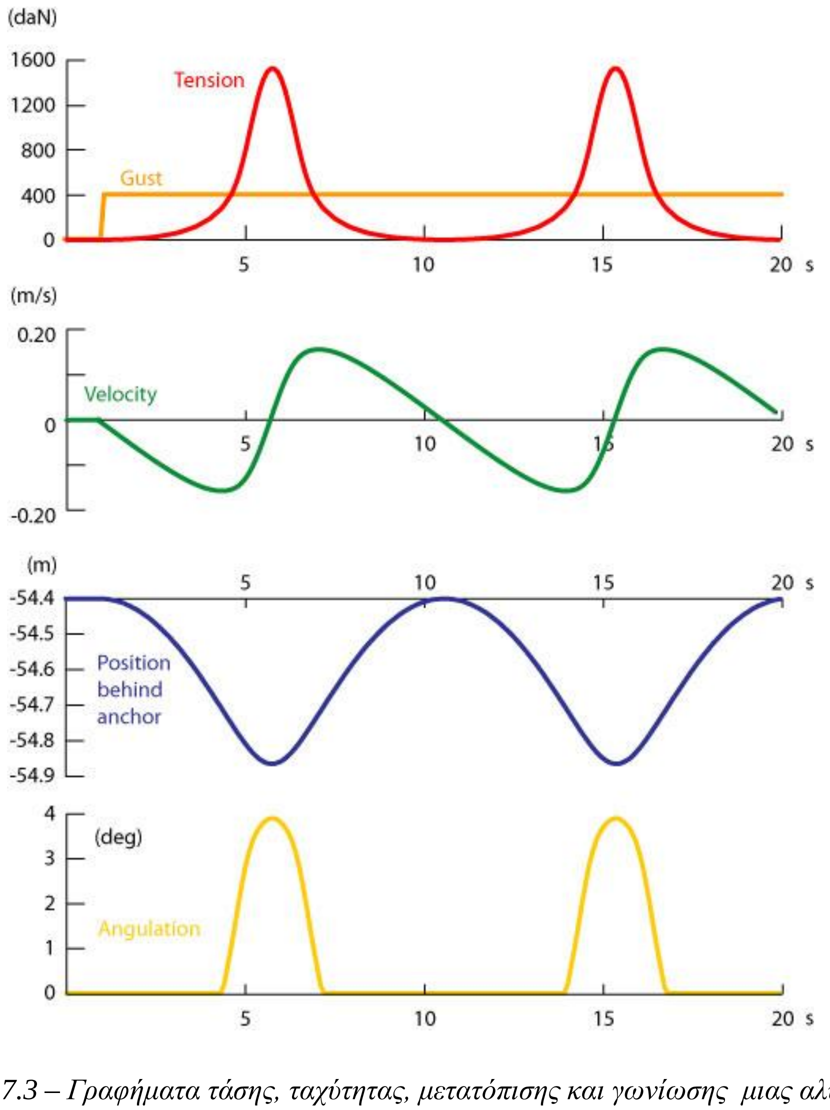
Στο παράδειγμα που ακολουθεί., όπως φαίνεται στην εικόνα 7.2, η ριπή αυξάνεται σταδιακά από 0 – 400 daN σε χρονικό διάστημα 5 s. Σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη τάση μειώνεται κατά 10% συγκριτικά με την περίπωση της στιγμιαίας ριπής ανέμου, λόγω της επιρροής του εκτοπίσματος του σκάφους. Overtensions είναι μεγαλύτερα για βαρύτερα σκάφη, αλλά η διακύμανση παραμένει σε εύρος 20%.



Εικόνα 7.2 - Γράφημα Τάσης ενός Τελείου Ελατηρίου για τραπεζοειδές προφίλ ριπής ανέμου

7.5 Ομογενές Μέσο Πρόσδεσης - Αλυσίδα

Παραθέτουμε το παρακάτω παράδειγμα και την ανάλυσή του. Έστω το ίδιο σκάφος 5 t, αγκυροβολεί σε βάθος 5 m χρησιμοποιώντας 55 m αλυσίδας 8 mm. Ο άνεμος εφαρμόζει πάγια δύναμη 100 daN, αλλά ανεμένονται ρυπές αέρα διπλάσιας ταχύτητας, που συνεπάγονται δυνάμεις 4 φορές υψηλότερες (αφού η αεροδυναμική αντίσταση του σκάφους εξαρτάται από το τετράγωνο της ταχύτητας του ανέμου). Η οριακή τάση ικανή να ανυψώσει όλο το μέσο πρόσδεσης είναι 393 daN, οπότε θεωρούμε ότι μία δύναμη 400 daN θα ήταν ανεκτή στατικά, διατηρώντας μια σχεδόν μηδενική γωνίωση. Από τα παρακάτω διαγράμματα όμως παρατηρούμε ότι η πραγματικότητα, υπό το πρίσμα της δυναμικής σκοπιάς, είναι διαφορετική.



Εικόνα 7.3 – Γραφήματα τάσης, ταχύτητας, μετατόπισης και γωνίωσης μιας αλυσίδας για στιγμιαία ριπή ανέμου

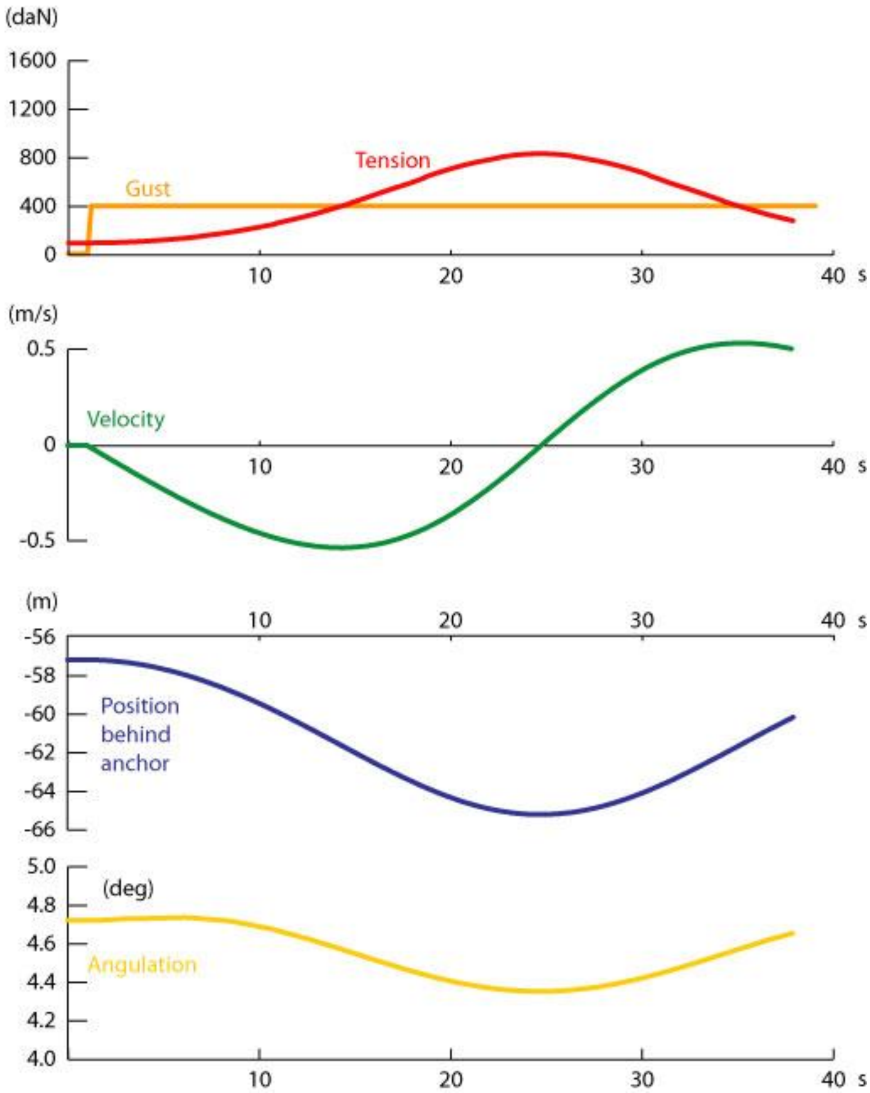
Πρωτίστως παρατηρούμε πως η διακύμανση των παραμέτρων δεν είναι πλέον ημιτονοειδής, λόω της μη γραμμικότητας της σχέσης θέσης-δύναμης όταν χρησιμοπιείται χαλύβδινη αλυσίδα αντί για τέλειο ελατήριο. Για τον ίδιο λόγο, οι μέγιστη τάση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση αγκυροβόλησης με χρήση μέσου πρόσδεσης που συμπεριφέρεται ως τέλειο ελατήριο. Σε αυτό το παράδειγμα η μέγιστη υπέρταση (maximum overtension) αγγίζει σχεδόν την τιμή των 1600 daN, δηλαδή 4 φορές την αρχική δύναμη της ριπής. Σημειώνουμε επίσης ότι 1067 daN (2400 lb) δίνεται το μέγιστο φορτίο χρήσης μιας αλυσίδας από ανοξείδωτο χάλυβα 8mm. Υπό αυτή την φόρτιση, το σύστημα αγκυροβόλησης θα αστοχήσει.

Επίσης, η άγκυρα κατά πάσα πιθανότητα θα ξεσύρει κάτω από αυτή την τάση και με γωνίωση 4 μοιρών. Περισσότερη αλυσίδα δεν θα βοηθήσει ουσιαστικά. 100 m παραπάνω αλυσίδας θα διατηρούσε την άγκυρα επίπεδη στον πυθμένα, αλλά τα μέγιστα της τάσης θα παραμείνουν σε πολύ υψηλά επίπεδα, τάξεως 1100 daN. Η λύση που επιβάλλεται σε τέτοιες αντίξοες συνθήκες είναι η χρήση δεύτερης ή και τρίτης άγκυρας, ώστε να μοιραστεί το συνολικό φορτίο σε περισσσότερα του ενός συστήματος αγκυροβόλησης που καθένα εξ’ αυτών θα υπόκειται στο αντίστοιχο κλάσμα των μεγίστων δυνάμεων που περιγράφονται παραπάνω.

Όπως και στη περίπτωση του τέλειου ελατηρίου, το εκτόπισμα του σκάφους δεν επηρεάζει την κατάσταση.

7.6 Ομογενές Μέσο Πρόσδεσης – Nylon Σκοινί

Στο ίδιο παράδειγμα σκάφους αντικαθιστούμε την αλυσίδα με ένα 18 mm (3/4 in) nylon σκοινί μήκους 55 m (180 ft). Παραθέτουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης:



Εικόνα 7.4 – Γραφήματα τάσης, ταχύτητας, μετατόπισης και γωνίωσης ενός σκοινιού για στιγμιαία ριπή ανέμου

Παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά του nylon σκοινιού προσεγγίζει συμπεριφορά ενός τέλειου ελατηρίου με μέτρια σκληρότητα. Η αναλογία όμως του εκτάματος είναι μεγάλη (11:1) ενώ η γωνίωση παραμένει στις 4,5 μοίρες ανεξάρτητα της τάσης, καθώς το σκοινί είναι σχεδόν τεντωμένο. Παρ’ όλα αυτά, υπάρχουν άγκυρες σχεδιασμένες ειδικά για την περίπτωση nylon σκοινιού ως μέσο πρόσδεσης, και οι οποίες σε πυθμένα καλής ποιότητας, λειτουργούν σωστά, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται βοηθητικό βάρος.

7.7 Συμπεράσματα

Συγκρίνουμε τις δύο περιπτώσεις ομογενούς μέσου πρόσδεσης βάσει των τριών απαιτήσεων (*Απαίτηση 4, 5 και 6):*

Κριτήριο	**Αλυσίδα**	**Σκοινί**
Έλξη της άγκυρας παράλληλα στον πυθμένα	Ναι	Όχι, εκτός και αν γίνει χρήση μεγάλης αναλογίας εκτάματος
Ευκολία στην αποθήκευση	Ναι, αλλά μεγάλο βάρος	Ναι
Ευκολία στον χειρισμό	Ναι (με αυτοματισμό)	Ναι
Μείωση των τάσεων εφελκυσμού	Όχι	Ναι

Εικόνα 7.5 – Συγκριτικός πίνακας στοιχείων δυναμικής συμπεριφοράς ομογενών μέσων πρόσδεσης

Συμπεραίνουμε ότι ένα μέσο πρόσδεσης εξ'ολοκλήρου από αλυσίδα είναι δύσχρηστο και επικίνδυνο για την αγκυροβόληση, και επιρρεπές στο «σύρσιμο» της άγκυρας. Από την άλλη, ένα μέσο πρόσδεσης εξ' ολοκλήρου από nylon σκοινί είναι ασφαλές στο χειρισμό του, χρειάζεται όμως μεγάλη αναλογία εκτάματος οπότε θα αποδειχτεί δύσχρηστο σε «στενά» αγκυροβόλια. Όμως σε ισχυρές ριπές ανέμου, ακόμα και η αλυσίδα ως μέσο πρόσδεσης απαιτεί μεγάλη αναλογία εκτάματος ώστε να διατηρήσει την άγκυρα σχεδόν παράλληλη με τον πυθμένα. Ο συνδυασμός αλυσίδας στο κάτω μέρος με σκοινί στο πάνω μέρος δείχνει ο ιδανικός συνδυασμός για μικρά σκάφη. Επίσης, η χρήση βοηθητικής άγκυρας με σχοινί και kellet δείχνει επιβεβλημένη σε περίπτωση δυσμενών καιρικών συνθηκών με ισχυρές ριπές ανέμου.

Κεφάλαιο 8^{ο}
Δυναμική Συμπεριφορά – Ετερογενές Μέσο Πρόσδεσης

8.1 Εισαγωγή

Τα αποτελέσματα της μελέτης της δυναμικής συμπεριφοράς ομογενών μέσων πρόσδεσης, και της στατικής συμπεριφοράς δείχνουν ότι [8]:

- Ένα nylon μέσο πρόσδεσης δεν εφάπτεται της επιφάνειας του πυθμένα σε περίπτωση φόρτωσης, λόγω ανεπαρκούς ποντισμένου βάρους ανά μονάδα μήκους.
- Η μεγάλη μάζα ενός μέσου πρόσδεσης από αλυσίδα δεν εμποδίζει την ανάπτυξη ισχυρών υπερτάσεων σε περίπτωση δυσμενών καιρικών συνθηκών και ασταθών ανέμων, καθώς το υλικό έχει ελάχιστη ελαστικότητα, και η μάζα του τμήματος που είναι κοντύτερα στο σκάφος δεν προσφέρει κάποιο πλεονέκτημα.

Οπότε επανεξετάζουμε τα δύο είδη ετερογενών μέσων πρόσδεσης : το συνδυασμό χαλύβινης αλυσίδας και nylon σκοινιού(μικτό μέσο πρόσδεσης), και την προσθήκη βοηθητικού βάρους σε nylon σκοινί.

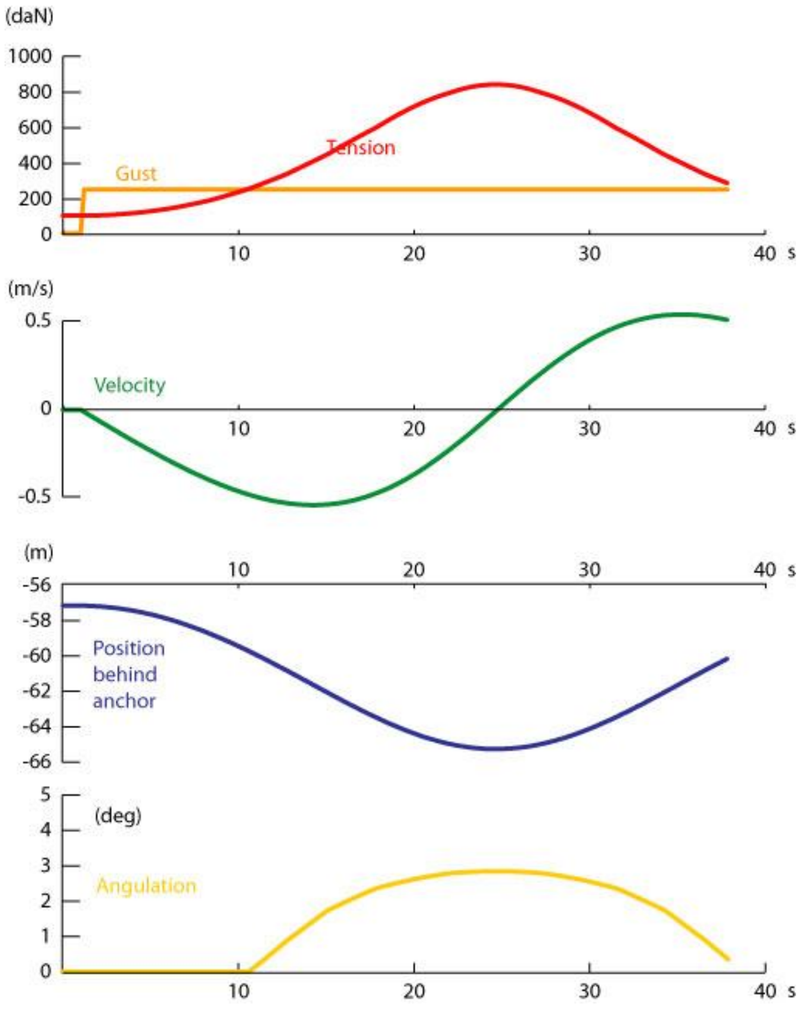
Η εναλλακτική του μικτού μέσου πρόσδεσης χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- Ένα σταθερό μέρος αλυσίδας μέτριου μήκους συνδεμένο με nylon σκοινί μεγάλου μήκους: Ανεξάρτητα από το βάθος αγκυροβόλησης, χρησιμοποιείται όλη η αλυσίδα συν το απαραίτητο μήκος σκοινιού.
- Μια μεγάλου μήκους αλυσίδα η οποία εκτυλίγεται ανάλογα με το ύψος του νερού, η οποία στη συνέχεια συνδέεται με το σταθερό σημείο του σκάφους μέσω ενός μετρίου μήκους nylon σκοινί.

Σημείωση: Στα παραδείγματα που ακολουθούν, διατηρούμε το ύψος νερού σταθερό και ίσο με 5 m και την αναλογία εκτάματος 11:1.

8.2 Σκοινί Μεγάλου Μήκους + Βοηθητικό Βάρος

Στο κεφάλαιο μελέτης της στατικής συμπεριφοράς παρατηρήσαμε ότι η αποτελεσματικότητα του βοηθητικού βάρους είναι μέγιστη εάν τοποθετηθεί κοντά στην άγκυρα. Η δυναμική συμπεριφορά του κάτω από μεταβαλλόμενες τιμές φόρτισης, δηλαδή διακύμανση/μεταβολές της τάσης, της ταχύτητας και της θέσης του σκάφους είναι όμοιες με την περίπτωση σκοινιού χωρίς το βοηθητικό βάρος (λόγω της ελαστικότητας του σκοινιού), αλλά η γωνίωση στην άγκυρα μειώνεται σημαντικά: Με την προσάρτιση ενός βοηθητικού βάρους 25 kg σε ένα nylon σκοινί (18 mm) μήκους 55 m, η γωνίωση παραμένει μικρότερη των 3 μοιρών. Για την διατήρηση μηδενικής γωνίωσης θα ήταν απαραίτητο βοηθητικό βάρος 73 kg..

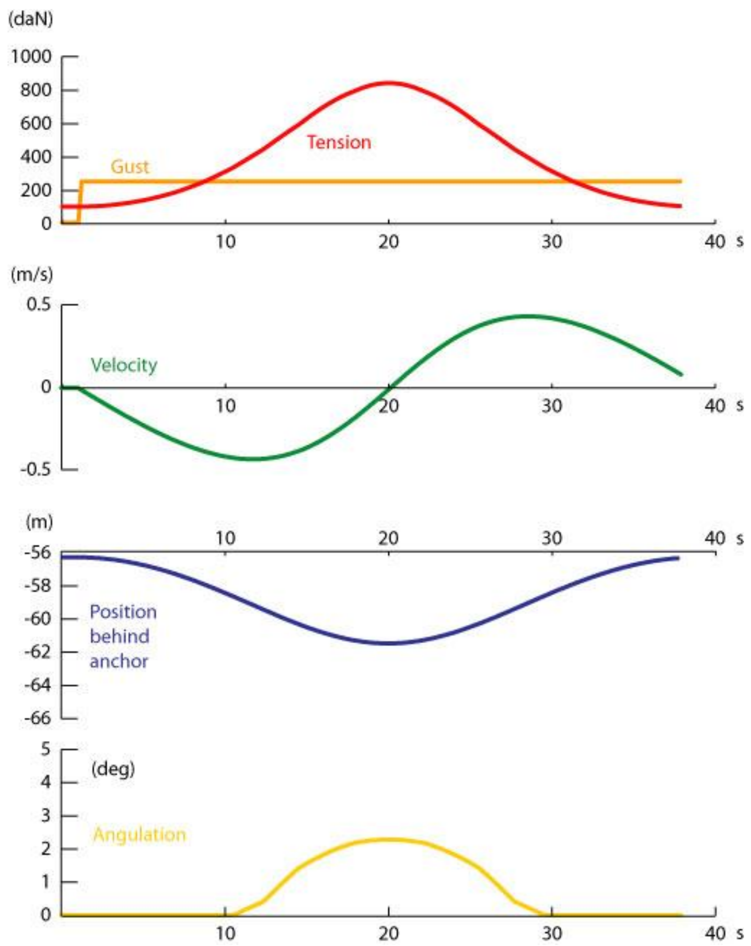


Εικόνα 8.1 – Γραφήματα τάσης, ταχύτητας, μετατόπισης σκάφους και γωνίωσης για πρόσδεση με σκοινί με την προσθήκη βοηθητικού βάρους, για στιγμιαία ισχυρή ριπή ανέμου

8.3 Αλυσίδα Μικρού Μήκους + Nylon Σκοινί Μεγάλου Μήκους

Αυτό η μέθοδος μέσο πρόσδεσης μπορεί να θωρηθεί αντίστοιχη της εκδοχής *Σκοινί + Βοηθητικό Βάρος*, στο οποίο αντικαθιστούμε το βοηθητικό βάρος κοντά στην άγκυρα με αλυσίδα ορισμένου μήκους. Για συγκεριμένη ζητούμενη μάζα αλυσίδας, μια βαριά (ανά μονάδα μήκους) αλυσίδα μικρού εκτάματος προτιμάται έναντι μιας ελαφρύτερης μεγάλου μήκους, καθώς το βάρος της θα συγκεντρωθεί σε μικρή απόσταση από την άγκυρα. Στο παράδειγμα δίνεται αλυσίδα 10 mm μήκους 20 m προσαρτημένη σε nylon σκοινί 18 mm μήκους 35 m.

Πέραν της μικρότερης περιόδου ταλάντωσης, η διακύμαση της έντασης και της ταχύτητας είναι περίπου η ίδιες με εκείνες της περίπτωσης *Σκοινί Μεγάλου Μήκους + Βοηθητικό Βάρος*. Αντίθετα, η διακύμανση των μεταβλητών θέσης και γωνίωσης είναι μικρότερες.

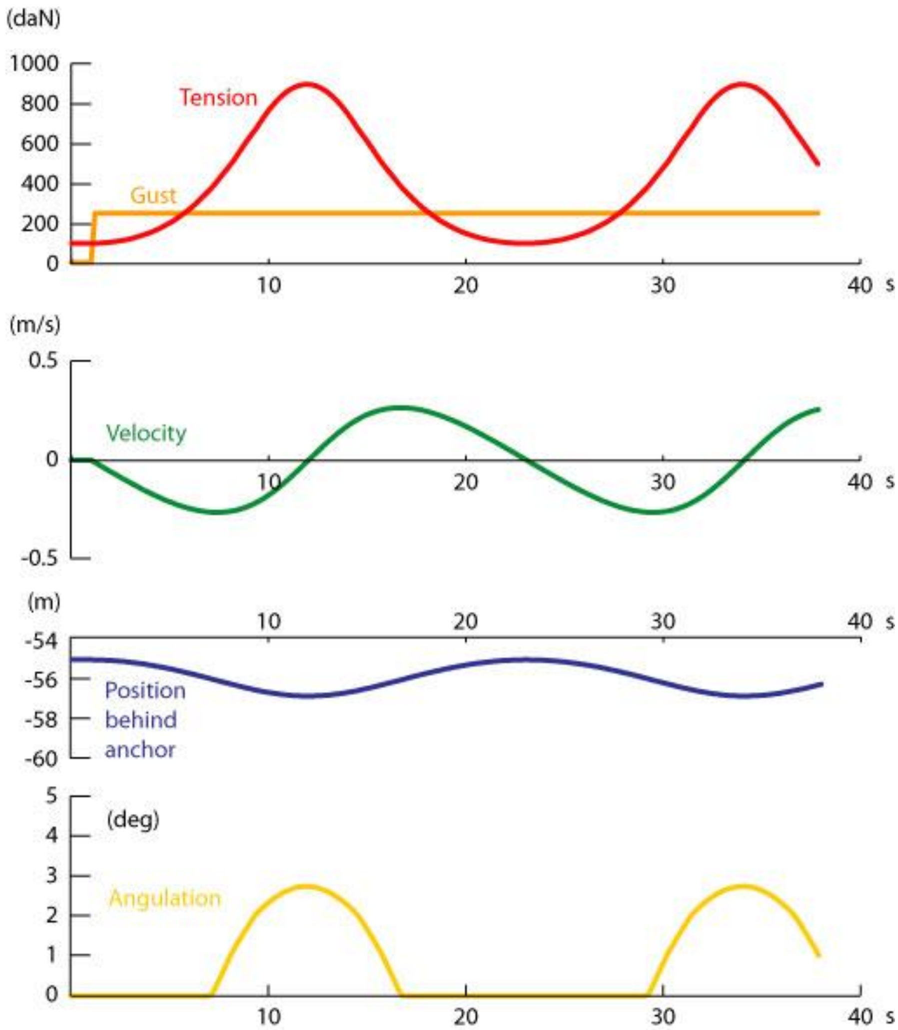


Συνοψίζοντας, για μικρή αύξηση του συνολικού βάρους του σκάφους (πχ. 18 kg) ένα τμήμα χοντρής αλυσίδας έναντι ενός βοηθητικού βάρους ίσου βάρους είναι αποτελεσματικότερο, και πιο εύκολο στο χειρισμό. Επιπλέον, το τμήμα αλυσίδας που βρίσκεται παράλληλα στον πυθμένα, είναι πιο ανθεκτικό στην φθορά της τριβής.

Εικόνα 8.2 – Γράφηματα τάσης, ταχύτητας, μετατόπισης και γωνίωσης ενός ετερογενούς μέσου πρόσδεσης μικρού μήκους αλυσίδας + μεγάλου μήκους σκοινιού, για στιγμιαία ριπή ανέμου

8.4 Αλυσίδα μεγάλου μήκους + Nylon σχοινί μικρού μήκους

Το πρόβλημα με τα προαναφέρντα μέσα πρόσδεσης είναι η χρήση τους σε καταστάσεις ισχυρού ανέμου. Από την άλλη, η χρήση εξ' ολοκλήρου αλυσίδας πάσχει από overtensions λόγω έλειψης ελαστικότητας. Οπότε θεωρώντας τις παραμέτρους του παραδείγματος σταθερές, χρησιμοποιούμε 45 m αλυσίδας σε συνδυασμό με 10 m nylon σκοινί. Οπότε έχουμε συνολικά μέσο πρόσδεσης μήκους 55 m, το οποίο περιλαμβάνει ένα μικρό ελαστικό τμήμα μέχρι το σημείο σύνδεσης με το σκάφος.



Εικόνα 8.3 – Γραφήματα τάσης, ταχύτητας, μετατόπισης και γωνίωσης ενός ετερογενούς μέσου πρόσδεσης μεγάλου μήκους αλυσίδας + μεγάλου μήκους nylon σκοινιού, για στιγμιαία ριπή ανέμου

Παρατηρούμε ότι η περίοδος ταλάντωσης μειώνεται, η υπερτάσεις και η γωνίωση αυξάνονται ελάχιστα, αλλά η ταχύτητα και η ακτίνα αιώρησης μειώνονται σημαντικά. Συγκρίνοντας με την περίπτωση *Αλυσίδα Μικρού Μήκους + Nylon Σκοινί Μεγάλου Μήκους*, αυξάνοντας το βάρος το σκάφους κατά 16 kg (με το πρόσθετο βάρος της αλυσίδας) επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη ασφάλεια και άνεση επί του σκάφους. Επιπλέον, η εναλλακτική αυτή προσαρμόζεται εύκολα σε μεγάλύτερου βάθους αγκυροβόληση, καθώς το διαθέσιμο μήκος αλυσίδας είναι μόνιμα προσαρτημένο σε μια nylon επέκταση μεγάλου μήκους.

8.5 Συμπεράσματα

Επανεξετάζουμε τις τρεις περιπτώσεις βάσει των κριτιρίων όπως έχουν οριστεί στην ενότητα της στατικής συμπεριφοράς (Απαιτήσεις 4, 5,6):

Κριτήριο	**Σκοινί Μεγάλου Μήκους + Kellet**	**Μικρή Αλυσίδα + Μεγάλου Μήκους Σκοινί**	**Μεγάλου Μήκους Αλυσίδα + Μικρού Μήκους Σκοινί**
Έλξη της άγκυρας παράλληλα στον πυθμένα	Ναι, αλλά περιορισμένα λόγω του περιορισμένου βάρους του kellet	Ναι	Ναι
Ευκολία στην αποθήκευση	No (kellet)	Ναι	Ναι , αλλά πολύ βαρύ
Ευκολία στον χειρισμό	Όχι (τοποθέτηση και αφαίρεση του kellet)	Μέτρια (μετάβαση από την αλυσίδα στο σκοινί)	Ναι (με αυτοματισμό)
Μείωση των τάσεων εφελκυσμού	Ναι	Ναι	Ναι
Μειώνει την ακτίνα αιώρησης	Όχι	Μετρίως	Ναι
Ανθεκτικό στην τριβή με τον πυθμένα	Όχι	Συνήθως	Πάντα

Εικόνα 8.4 – Συγκριτικός πίνακας Αποτελεσμάτων για την δυναμική συμπεριφορά των περιπτώσεων Ετερογενούς Μέσου Πρόσδεσης

Προφανώς, η περίπτωση *Αλυσίδα Μεγάλου Μήκους + Nylon Σκοινί Μηκρού Μήκους* υπερισχύει. Στην πράξη όμως η αναλογία αυτή δεν είναι απόλυτη καθώς οι διαφορές στην απόδοση είναι μικρές.

Κεφάλαιο 9ο
Χρήση άγκυρας 4 kg τύπου Delta για αγκυροβόληση μικρού σκάφους

9.1 Σχεδιαστικές Παράμετροι

Παραθέτουμε στοιχεία μιάς άγκυρας τύπου Delta βάρους 4kg, από γαλβανισμένο χάλυβα που διατίθεται στο εμπόριο από διάφορους κατασκευαστές (πχ. [11]).

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, συνιστάται χρήση αλυσίδας διαμέτρου τουλάχιστον 6-7 mm (1/4 in) για σκάφη μήκους μέχρι 7m (Appendix 1).

Από τα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία που παραθέσαμε (Εικόνα 4.2) υπολογίζουμε κατά προσέγγιση την μέγιστη δύναμη συγκράτησης F_h που προσφέρει αυτού του τύπου η άγκυρα σε ιδανικό πυθμένα, από τη σχέση (5.1) Fh = KM, χρησιμοποιώντας συντελεστή K = 83 => KM = 83x 4 kg => F_h = 332 kgf $\approx$ 326 daN (K = 83 εχει μετρηθεί για τη Delta).

Θα εξετάσουμε τον τρόπο που αυτή η άγκυρα θα χρησιμοποιηθεί για ασφαλή αγκυροβόληση μηχανοκίνητου σκάφους, σε ιδανικό πυθμένα. Επίσης, κάτω από ποιές συνθήκες εκτιμάται ότι θα χρειαστεί (πχ σε ισχυρό άνεμο ή θύελλα) να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με δεύτερη άγκυρα πχ. βοηθητική ίδιου τύπου και βάρους, ώστε να κατανεμηθεί το συνολικό φορτίο.

Έστω σκάφος μήκους L_{vessel} = 7 m, μέγιστου ύψους εξάλλων h = 1,5 m και μάζας M = 1000 kg.

Υποθέτουμε ότι τα εξής μέσα είναι διαθέσιμα για να χρησιμοποιηθούν για την αγκυροβόληση:

-κύρια άγκυρα τύπου Delta 4Kg

-βοηθητική άγκυρα τύπου Delta 4Kg

-βοηθητικό βάρος (Kellet) 15Kg

-αλυσίδα διαμέτρου 8 mm (1/4’’) με υποθαλάσσιο βάρος w_{chain} = 1,4 kg/m, και όριο θραύσης breaking load = 3300 kgf [9] και μήκους τουλάχιστον 25 μέτρων

- nylon σκοινί διαμέτρου 12 mm με w_n=0,094 kg/m και breaking load = 2571 kgf [11] και μήκους τουλάχιστον 100 μέτρων

(Σημείωση: 1 kgf = 0,98 daN → 1kgf ≈ 1 daN).

Έστω ότι επιχειρείται αγκυροβόληση σε βάθος 4 μέτρων, οπότε προσθέτοντας το ύψος της δέστρας από την επιφάνεια της αγκυρας (~1m) το ενεργό ύψος είναι H = 5 m.

Έστω ότι ο συντελεστής C_d (drag coefficient) της επιφάνειας των εξάλλων του σκάφους είναι C_d =1 (κοινή περίπτωση).

Θεωρούμε συνθήκες πυκνότητας ρ_α του αέρα σε θερμοκρασία T_a = 20° C, $\rho_\alpha = 1{,}2\ \ kg/m^3$

Θεωρούμε ότι η προσήνεμη πλευρά του σκάφους μπορεί να βρεθεί υπό γωνία 30° μεταξύ του άξονα του σκάφους και της κατεύθυνσης του ανέμου. Συνεπώς η μέγιστη (συντηρητικώς) ενεργή επιφάνεια S των εξάλλων που θα προβάλλεται στον άνεμο, εκτιμάται ως:

$$S = sin30 L_{vessel} h \rightarrow\ S = 5{,}25\, m^2$$

Θα εξετάσουμε τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο αγκυροβολημένο σκάφος με άνεμο ισχύος 5-12 κλίμακας Beaufort [12] που αντιστοιχεί σε μέση ταχύτητα ανέμου V_a από 10m/s έως και 35 m/s.

Θεωρούμε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικτό μέσο πρόσδεσης (αλυσίδας και σκοινιού), αναλογία εκτάματος/βάθος τουλάχιστον N = 5:1, δηλαδή ελάχιστο συνολικό μήκος μέσου πρόσδεσης $L = 25\ m$.

Για N = 5:1 και χρήση αμιγώς αλυσίδας ως μέσο πρόσδεσης, υπολογίζουμε την οριακή δύναμη F_c (5.2) κατά την οποία το στέλεχος της άγκυρας παραμένει οριζόντιο, για αλυσίδα μήκους L.

$$F_c = w\frac{L^2-H^2}{2H} = 1{,}4\ \frac{25^2-5^2}{10}\frac{kg}{m}\frac{m^2}{m}\ \rightarrow\ F_c = 84\, kgf$$

Η μέση δύναμη που ασκεί ο άνεμος στο αγκυροβολημένο σκάφος (και ισοδυμεί με την μέση τάση φόρτισης του μέσου σύνδεσης) υπολογίζεται από τη σχέση (3.1)

$$F_w = \frac{1}{2}\rho_a C_s S V_a^2$$

Συνυπολογίζοντας τα ακρότατα της ταλάντωσης του σκάφους (λόγω ριπών), στα οποία η τάση στην αλυσίδα διπλασιάζεται, καταλήγουμε στον ακόλουθο πίνακα υπολογισμού της μέσης τάσης φόρτισης του μέσου πρόσδεσης F_w για ακραίες συνθήκες ανέμου::

Beaufort Scale	**V (m/s)**	**Fw (kgf)**	**2Fw (kgf) λόγω της ταλάντωσης**
5	10	32	64
6	12	46	93
7	15	72	145
8	19	116	232
9	23	170	340
10	27	234	469
11	31	309	618
12	35	394	788

Εικόνα 9.1 – Πίνακας υπολογισμών της δύναμης του ανέμου στο σκάφος

Παρατηρούμε ότι για συνθήκες 12 Beaufort, η μέση δύναμη φόρτισης από τον άνεμο απαιτεί τη χρήση τουλάχιστον δύο αγκύρων (με ιδανικές συνθήκες πόντισης/βυθού, χωρίς γωνίωση κλπ) ώστε να προσφέρουν αθροιστικά επαρκή δύναμη συγκράτησης 2x332 kgf = 664 kgf

Η εκτιμώμενη μέγιστη τάση που εφαρμόζεται στο σύστημα πρόσδεσης με αλυσίδα ($2Fw$) γενικώς είναι μεγαλύτερη της οριακής δύναμης Fc που ανασηκώνει ολόκληρη την αλυσίδα. Για καιρικές συνθήκες που συνεπάγονται υψηλές τιμές φόρτισης, είναι απαραίτητη: α) η χρήση πρόσθετου εκτάματος ελαστικού σχοινιού, αφενός για καλύτερη απόσβεση των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την ταλάντωση, αφετέρου για να αποφευχθεί η γωνίωση στην άγκυρα. Αν δεν αποσβεστούν αυτές οι φορτίσεις η άγκυρα θα ανασηκωθεί, η δύναμη συγκράτησής της θα μειωθεί και το σκάφος θα «ξεσύρει». Β) η χρήση δεύτερης άγκυρας ώστε να κατανεμηθεί το συνολικό φορτίο.

Για διπλάσια αναλογία N (έκταμα/βάθος), N = 10:1, με χρήση 25 m σκοινιού και 25 m αλυσίδας, ισχύουν τα παρακάτω:

$$F_{c_{2N}} = F_{c_{chain_{2N}}} + F_{c_{nylon_{2N}}}$$

Όπου θεωρούμε $H_{ch} = 2\ m$ οπότε:

$$F_{c_{chain_{2N}}} = w\ \frac{{L_{ch}}^2 - {H_{ch}}^2}{2H_{ch}} = 1{,}4\ \frac{25^2-2^2}{4} \quad => \ F_{c_{chain_{2N}}} = 217{,}35\ kgf$$

$$F_{c_{nylon_{2N}}} = w\ \frac{{L_{ny}}^2 - {H_{ny}}^2}{2H_{ny}} => F_{c_{nylon_{2N}}} = 0{,}094\ \frac{25^2-3^2}{6}\frac{kg}{m}\frac{m^2}{m} \ => F_{c_{nylon_{2N}}} = 9{,}65\ kgf$$

Άρα $F_{c_{2N}} = 227\ kgf$

Η χρήση ελαστικού μέσου 10 μέτρων στο πάνω μέρος αποσβένει τα overtensions και μειώνει τα απότομα τραντάγματα του σκάφους όταν αυτό εκτελεί ταλάντωση.

Παρατηρούμε ότι η δύναμη συγκρατήσεως της άγκυρας είναι μικρότερη της εξωτερικής δύναμης για άνεμο 8-12 Beaufort. Το σκάφος είναι ασφαλές μόνο στις περιπτώσεις των 5 και 6 και 7 Beaufort.

Εξετάζουμε την χρήση και δεύτερης (βοηθητικής) άγκυρας Delta 4Kg με nylon σκοινί ίδιου μήκους (L=50 m d = 12mm και w_n = 0,094 kg/m) με τη χρήση βοηθητικού βάρους $W_k = 15\ kg$ g, ώστε να εξασφαλίσει την απαραίτητη δύναμη συγκράτησης που προσφέρει αυτή η άγκυρα.

Υπολογίζουμε την οριακή δύναμη F_{c_k} (6.2) για την οποία το στέλεχος της βοηθητικής άγκυρας συνεχίζει να παραμένει οριζόντιο:

$$F_{c_k} = F_c + K\frac{L_k}{H} \quad \rightarrow \quad F_{c_k} = w_n\frac{L^2-H^2}{2H} + K\frac{L_k}{H} \quad \rightarrow$$

$$\rightarrow \ F_{c_k} = \ 0{,}094\frac{50^2-5^2}{10}\frac{kgf}{m}\frac{m^2}{m} + 15\frac{48}{5}kgf \quad \rightarrow F_{c_k} = \ 167{,}3\ kgf$$

(Από αυτό προκύπτει ότι χρειάζεται ή μεγαλύτερο kellet για να αξιοποιηθεί η μέγιστη δύναμη συγκράτησης της άγκυρας 332 kgf ή/και μεγαλύτερο έκταμα. Πχ. 32 kg kellet με αυτό το έκταμα, ή 70Μ εκταμα με 21 kg kellet – που είναι και ένα κοινό βάρος kellet)

Οι τάσεις λόγω εξωτερικών δυνάμεων θα μοιραστούν στα δύο μέσα πρόσδεσης και κατ’επέκταση στις δύο άγκυρες. Οπότε ελέγχουμε εάν η οριακή δύναμη της κάθε άγκυρας είναι μεγαλύτερη της F_w. Παρατηρούμε ότι για 5-9 Beaufort, η δύναμη έλξης της κάθε άγκυρας Fw είναι μικρότερη της οριακής δύναμης Fc και F_{c_k} της κάθε άγκυρας αντίστοιχα. Συνεπώς για 10-12 Beaufort η άγκυρες θα ανασηκωθούν, οι δυνάμεις συγκρατήσεώς τους θα μειωθούν και το σκάφος κινδυνεύει να «ξεσύρει». Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των οριακών δυνάμεων κατά τις οποίες το στέλεχος των αγκυρών παραμένει οριζόντιο στις δύο περιπτώσεις συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

	Συνολική F_h	**F_c (κύρια άγκυρα)**	**F_{c_k} (βοηθητική άγκυρα) (kellet), W_k=15**
N = 5:1	332 kgf	84 kgf	-
N = 10:1	2 x 332 =664 kgf	227 kgf	167 kgf

Εικόνα 9.2 – Πίνακας αποτελεσμάτων υπολογισμού οριακής δύναμης F_c & F_{c_k}

Ακολουθεί πίνακας με τις οριακές δυνάμεις F_{c_k} που αντιστοιχούν σε διαφορετικά βάρη kellet, σε ενεργό ύψος αγκυροβόλησης H=4 m, κάνοντας χρήση σκοινιού μήκους L=50:

W_k (kg)	**F_{c_k} (kgf)**
5	71,26
10	119,26
15	167,26
20	215,26
25	263,26
30	311,26
35	359,26

Εικόνα 9.3 – Πίνακας τιμών οριακής δύναμης F_{c_k} για διάφορα βάρη kellet

Παρατηρούμε ότι ένα kellet 20 kg έχει σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα με μια αλυσίδα διπλάσιας συνολικής μάζας, επιβεβαιώνοντας το ότι ένα βοηθητικό βάρος τοποθετημένο σε κοντινή απόσταση από την άγκυρα έχει το ίδιο αποτέλεσμα με ένα μέσο πρόσδεσης με διπλάσιο ισοκατανεμημένο βάρους σε όλο το μήκος του.

Κεφάλαιο 10^{ο}

Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων και Στάδια Ανάπτυξης Λύσης

10.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Η ακριβής επίλυση των εξισώσεων από τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, υπάρχει η ανάγκη να λυθούν σύνθετα προβλήματα που δεν επιδέχονται ακριβούς επίλυσης, και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι.

Μία τέτοια μέθοδος είναι και η αριθμητική μέθοδος επίλυσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων, που ενδείκνυται για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δύναται να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα.

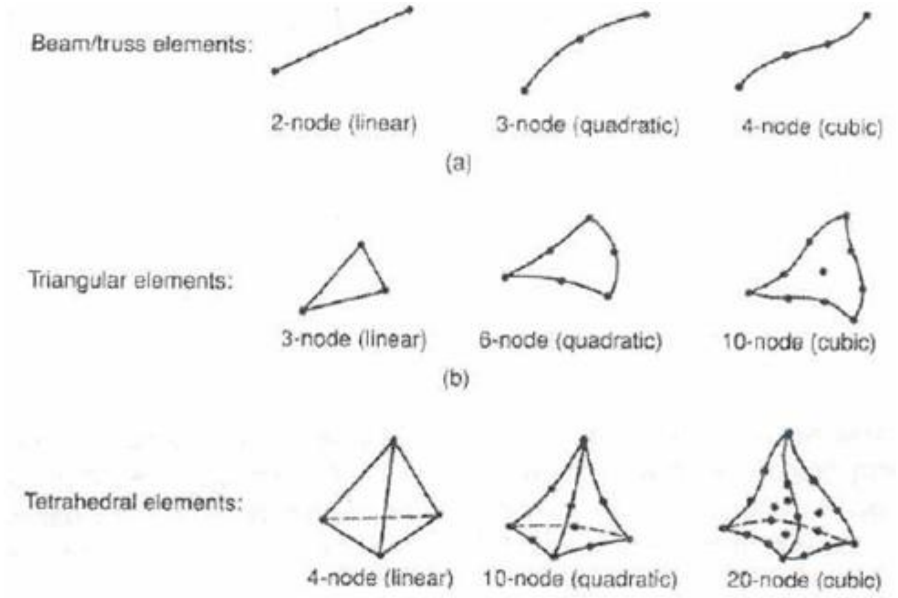
10.2 Στάδια Ανάπτυξης ενός μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων

Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή η εισαγωγή της γεωμετρίας, η γένεση πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης, αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (FINITE ELEMENT MODELING), η οποία συνήθως εκτελείται με τη βοήθεια κατάλληλου προ-επεξεργαστή (Pre-processor).

Ο προ-επεξεργαστής ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικειμένου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά συστήματα FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες, ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD (μερικές φορές και τα δύο). Συστήματα που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD, είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD, είτε μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Η απευθείας σύνδεση με CAD κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος, διότι εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης, την απώλεια δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού-ανάλυσης-αλλαγής. Περαιτέρω, η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας. Πράγματι, σήμερα τα περισσότερα υβριδικά συστήματα μοντελοποίησης μπορούν να κτίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για την ανάλυση.

Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία του κατάλληλου πλέγματος και η κατανομή κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια του τρισδιάστατου χώρου (κελύφη, επίπεδη εντατική ή επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση).

Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος όπως την πυκνότητα πλέγματος. Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (element library). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν. Ακολουθεί εικόνα (Εικόνα 10.1) τυπικών πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 10.1 Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (α) μονοδιάστατα, (β) δισδιάστατα και (γ) τρισδιάστατα προβλήματα

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης. Επίσης, οι άγνωστοι, ή αλλιώς οι βαθμοί ελευθερίας, συσχετίζονται με τους κόμβους. Οι άγνωστοι περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας, κ.ο.κ. Κατόπιν, καθορίζονται οι οριακές συνθήκες οι οποίες πρέπει να εκφρασθούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, μερικές φορές τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να γεννηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους. Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα. Οι περισσότεροι μοντελοποιητές πεπερασμένων στοιχείων επίσης παρέχουν έναν αριθμό τρόπων εύκολου καθορισμού των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν για ελαστικές κατασκευές το μέτρο ελαστικότητας Young (E) και το λόγο Poisson (v) Το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών διαχειρίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική ιδιότητα για την αποφυγή επίλυσης του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις. Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετα-επεξεργαστής (Post-Processor). Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους κατηγοριοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι υπό μορφή ζωνών ισοτασικών επιφανειών, κυρίως με χρήση χρωματικής κλίμακας.

Κεφάλαιο 11ο
SolidWorks 2012

11.1 Εισαγωγή

Το Solidworks είναι ένα 3D μηχανολογικό CAD (Computer Aided Design) πρόγραμμα, προιόν της Dassault Systèmes SolidWorks Corp., θυγατρική της Dassault Systèmes S. A. Λειτουργεί σε σύστημα Microsoft Windows και αποτελεί εργαλείο για πάνω από δύο εκατομμύρια μηχανικούς και σχεδιαστές σε περισσότερες από 165.000 εταιρείες παγκοσμίως. Συμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή, μεχρι τον Ιούλιο του 2012 υπήρχαν εγκατεστημένες περισσότερες από 1,5 εκατομμύριο άδειες παγκοσμίως, ένα μεγάλο ποσοστό μεταξύ των οποίων είναι για εκπαιδευτική χρήση.

Ιστορικά, η SolidWorks Corporation ιδρύθηκε το 1993 από τον Jon Hirschtick με έδρα το Waltham, Μασαχουσέτη, ΗΠΑ, ο οποίος προσέλαβε μια ομάδα μηχανικών για την οικοδόμηση μιας εταιρείας που ανέπτυξε 3D CAD λογισμικό, εύκολο στη χρήση, με προσιτή τιμή και διαθέσιμο στην επιφάνεια εργασίας των Windows. Κυκλοφόρησε το πρώτο της προιόν, SolidWorks 95, το 1995. Η SolidWorks σήμερα κυκλοφορεί διάφορες εκδόσεις του CAD λογισμικού SolidWorks,καθώς και τα eDrawings (εργαλείο συνεργασίας) και DraftSight (2D CAD). Το 1997 η Dassault Systèmes S.A., γνωστή για το CATIA CAD λογισμικό της, απέκτησε την εταιρεία και αυτή τη στιγμή κατέχει το 100% των μετοχών της.

Εικόνα 11.1 SolidWorks 2012

Το SolidWorks 2012 έχει τη δυνατότητα:

- o Τρισδιάστατης παραμετρικής μοντελοποίησης χρησιμοποιώντας Features (χαρακτηριστικά)
- o Συναρμολόγησης των προϊόντων που έχουν ήδη σχεδιαστεί (Assembly)
- o Δημιουργία ολοκληρωμένων μηχανολογικών σχεδίων (Drawings)
- o Δημιουργία αρχείων προσομοίωσης (Simulation)

11.2 Σχεδιασμός άγκυρας Delta μάζας 4kg

Μετρήθηκαν οι διαστάσεις της συγκεκριμένης άγκυρας από αρχεία του κατασκευαστή Lewmar. Για τον σχεδιασμό της συναρμολογημένης διάταξης (Assembly) σχεδιάστηκαν ξεχωριστά τα εξής τρία αντικείμενα (Parts):

1. Ο βραχίονας της άγκυρας (base.prt)
2. Η κεφαλή της άγκυρας (head.prt)
3. Η μύτη της άγκυρας (peak.prt)

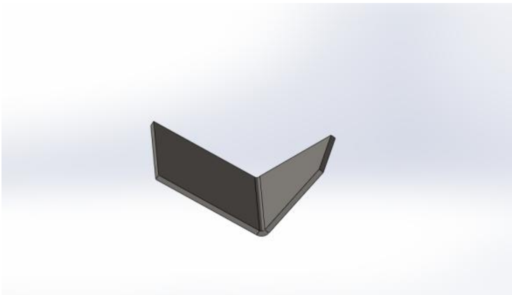
1. Βραχίονας

Διαθέτοντας τις ακριβής διαστάσεις του βραχίονα, κατασκευάστηκε το 2D σχέδιο το οποίο στη συνέχεια έγινε «extruded» στο απαραίτητο πλάτος. Στη συνέχεια έγινε πολλαπλή χρήση της εντολής “Fillet” για την εξομάλυνση των γωνιών του αντικειμένου.

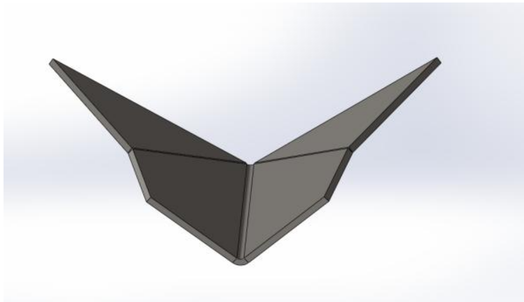
Εικόνα 11.2 – Φωτορεαλιστική απεικόνιση του βραχίονα της άγκυρας

2. Κεφαλή της Άγκυρας

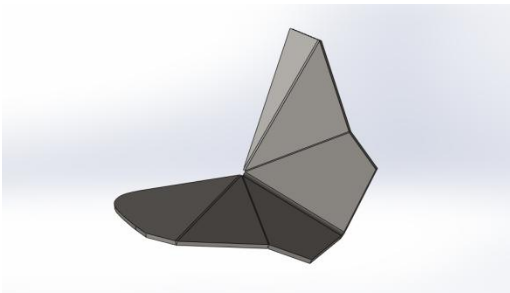
Χρησιμοποιήθηκε η εντολή Base Flange για την δημιουργία λεπτής μεταλλικής επιφάνειας, η οποία στη συνέχεια – με τηνδημιουργία βοηθητικών Plane - αναδιπλώθηκε και κόπηκε με πολλαπλή χρήση των εντολών Edge Flange και Extruded Cut. Τέλος, για την δημιουργία της συμπαγούς κυλινδρικής ένωσης μεταξύ των δύο φτερών της κεφαλής της άγκυρας, έγινε χρήση της εντολής Extruded Boss/Base. Ακολουθεί αλληλουχία εικόνων με διαδοχικά στάδια της σχεδίασης.



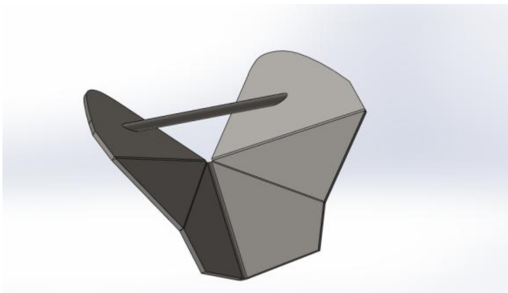
Εικόνα 11.3 – Στάδιο σχεδίασης της κεφαλής της άγκυρας



Εικόνα 11.4 – Στάδιο σχεδίασης της κεφαλής της άγκυρας



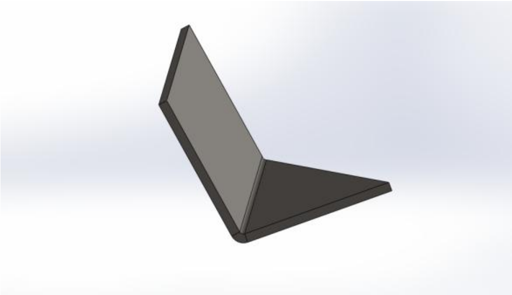
Εικόνα 11.5 – Στάδιο σχεδίασης της κεφαλής της άγκυρας



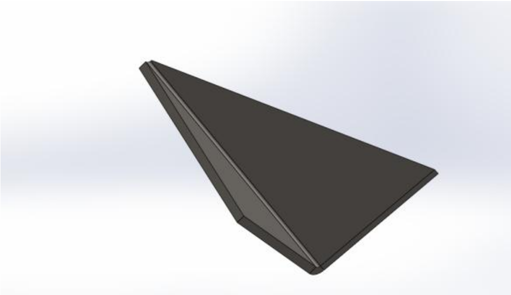
Εικόνα 11.6 – Στάδιο σχεδίασης της κεφαλής της άγκυρας

3. Μύτη Άγκυρας

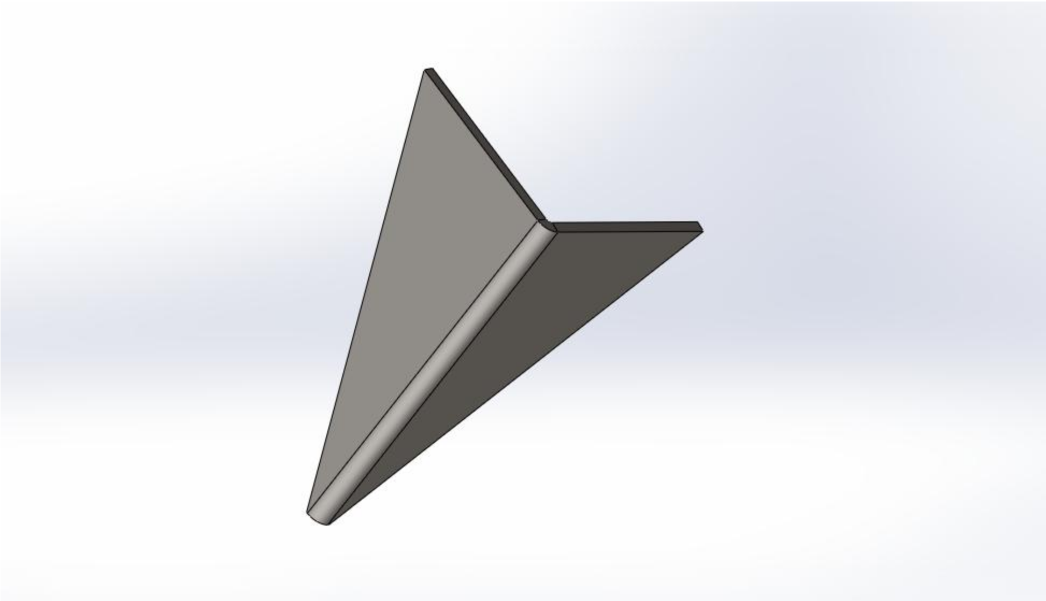
Χρησιμοποιήθηκε η εντολή Sheet Metal και Base Flange για την δημιουργία επίπεδου λεπτής μεταλλικής επιφάνειας, το οποίο στη συνέχεια με την εντολή Edge Flange προεκτάθηκε και αναδιπλώθηκε. Στη συνέχεια κόπηκε (Extruded Cut) ώστε το αντικείμενο να πάρει το τελικό του σχήμα. Ακολουθούν φωτορεαλιστικές εικόνες σταδίων σχεδίασης:



Εικόνα 11.7 – Στάδιο σχεδίασης της μύτης της άγκυρας



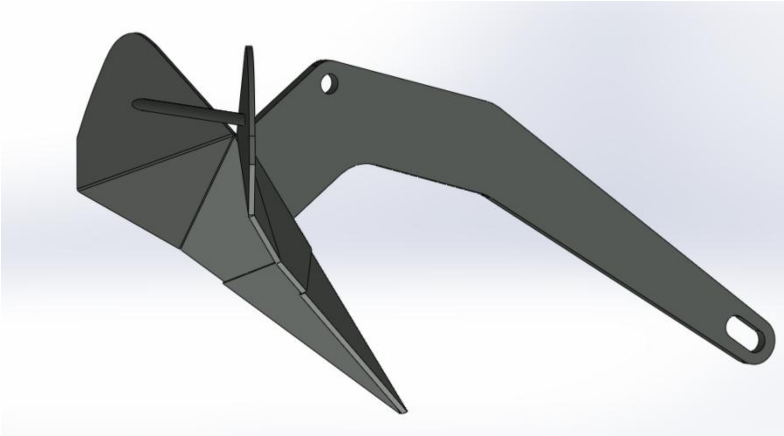
Εικόνα 11.8 – Στάδιο σχεδίασης της μύτης της άγκυρας



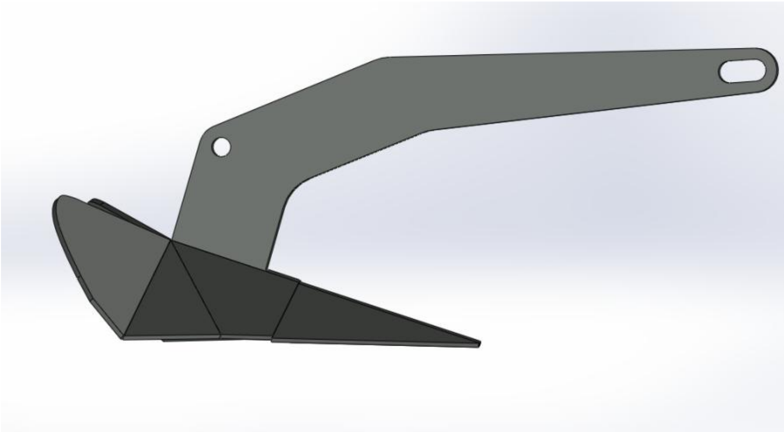
Εικόνα 11.9 – Στάδιο σχεδίασης της μύτης της άγκυρας

4. Άγκυρα (Assembly)

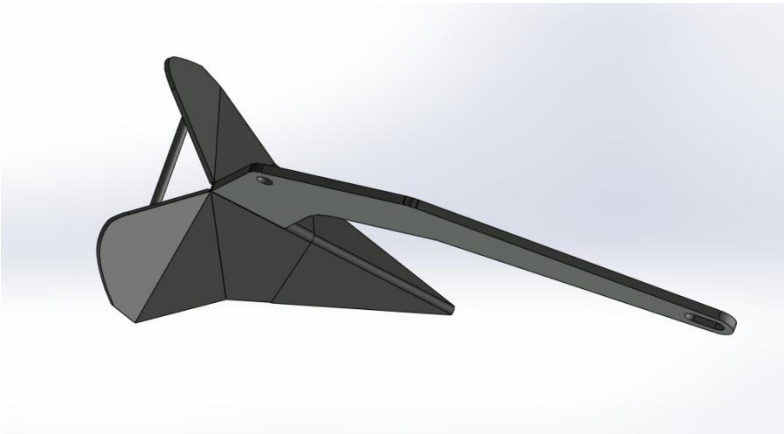
Για το Assembly ενώθηκαν η βάση με την κεφαλή και η κεφαλή με την μύτη, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα mates. Ακολουθούν εικόνες από το αποτέλεσμα:



Εικόνα 11.10 – Ολοκληρωμένο Assembly της άγκυρας



Εικόνα 11.11 – Ολοκληρωμένο Assembly της άγκυρας

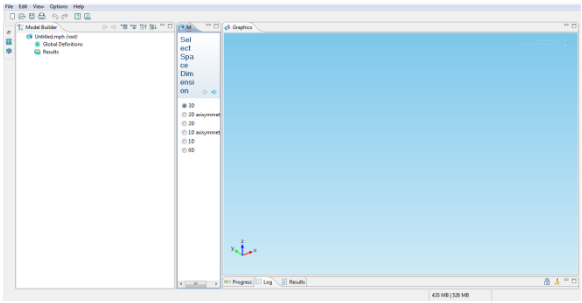


Εικόνα 11.12 – Ολοκληρωμένο Assembly της άγκυρας

Κεφάλαιο 12ο
Comsol Multiphysics 4.2a

12.1 Εισαγωγή

Το COMSOL Multiphysics 4.2a είναι ένα λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA), επίλυσης και προσομοίωσης διαφόρων φυσικών και μηχανικών εφαρμογών. Πέραν του περιβάλλοντος εργασίας βασισμένο στην συμβατική φυσική, επιτρέπει την χρήση μερικών διαφορικών εξισώσεων (PDE's). Η ανάπτυξη του Comsol ξεκίνησε από μεταπτυχιακούς φοιτητές, βασισμένο σε κώδικα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια μεταπτυχιακού course, στο Royal Institute of Technology στην Στοκχόλμη της Σουηδίας.



Εικόνα 12.1 – Comsol Multiphysics 4.2a

Εικόνα 12.2 – Comsol Multiphysics 4.2a περιβάλλον εργασίας

Λόγω του φιλικού περιβάλλοντός του προς το χρήστη, δεν απαιτείται μια εις βάθος γνώση μαθηματικών ή αριθμητικής ανάλυσης. Η δομή του λογισμικού επιτρέπει το χτίσιμο ή την εισαγωγή 2D/3D μοντέλων προσδιορίζοντας σχετικές φυσικές ποσότητες (πχ. ιδιότητες υλικών, φορτία, περιορισμούς, πηγές κλπ), παρά προσδιορίζοντας τις σχετικές εξισώσεις. Το πρόγραμμα συνδυάζει ένα σύνολο από μερικές διαφορικές εξισώσεις (PDEs) που αντιπροσωπεύουν το φυσικό μοντέλο εξ ολοκλήρου. Στη συνέχεια επιλέγεται το είδος της μελέτης/ανάλυσης που επιδιώκεται. Το Comsol διαθέτει την δυνατότητα διαφορετικών τύπων ανάλυσης, μεταξύ των οποίων θερμικής, αντοχής, στατικής και εξαρτημένης χρόνου ανάλυσης, γραμμικής και μη γραμμικής, καθώς και ανάλυσης ιδιοτιμών (ιδιοσυχνοτήτων).

Για την επίλυση των PDEs το COMSOL Multiphysics 4.2a χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method, FEM). Το λογισμικό τρέχει τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων παράλληλα με προσαρμοζόμενο πλέγμα και έλεγχο σφαλμάτων, χρησιμοποιώντας ποικιλία αριθμητικών solvers (linear, non linear, direct).

Η συγκεκριμένη προσεγγιστική μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων δύναται να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και να εφαρμοστεί σε εύρος προβλημάτων, ανεξαρτήτως γεωμετρικής πολυπλοκότητας.

Για την επίλυση ενός προβλήματος με τη χρήση του Comsol Multiphysics, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Κατασκευή της γεωμετρίας του αντικειμένου (στο περιβάλλον του Comsol Multiphysics 4.2a ή σε άλλο πρόγραμμα CAD)
2. Προσδιορισμός της φυσικής του προβλήματος - οριακές συνθήκες (boundary settings)
3. Δημιουργία του πλέγματος (Meshing)
4. Επίλυση του προβλήματος (Solving)
5. Μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων (Post-Processing)

12.2 Εισαγωγή Στοιχείων και Χρήση του Comsol Multiphysics 4.2a για την Μελέτη Αντοχής της Άγκυρας Delta 4kg

Ανοίγοντας το πρόγραμμα Comsol Multiphysics 4.2a επιλέγουμε 3D Space Dimension

Στο παράθυρο Add Physics επιλέγουμε Solid Mechanics

Στο παράθυρο Select Study Type επιλέγουμε Stationary

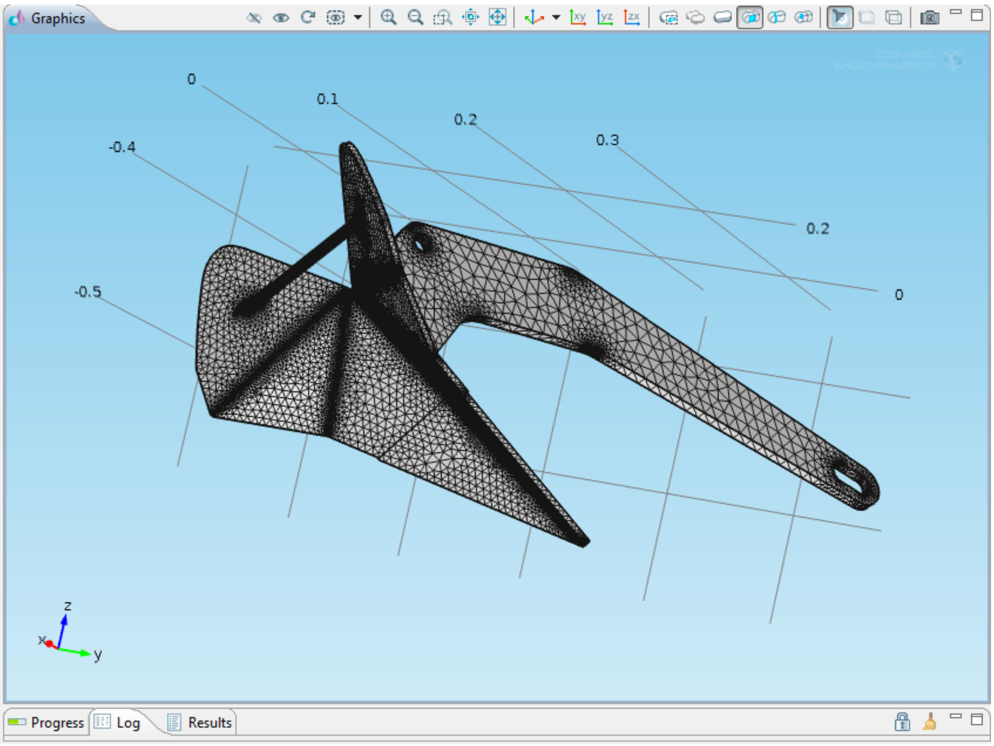
Στο δένδρο επιλογών Model Builder επιλέγουμε Geometry και με δεξί κλικ → Import

Εισάγουμε το CAD αρχείο της άγκυρας Delta (4kg) σε μορφή .STEP

Στο Model Builder επιλέγουμε Materials →Material Library → Tool Steels → H11 AISI 610

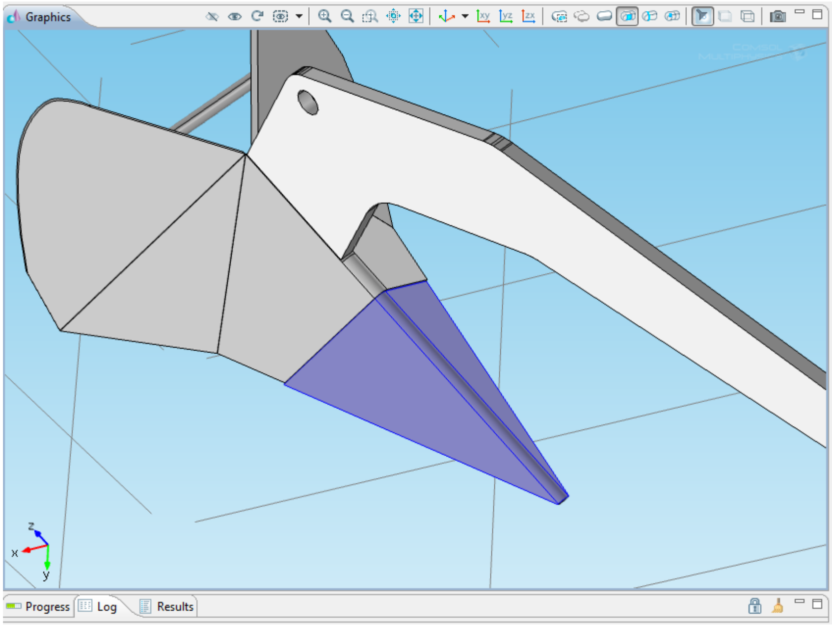
Στο Model Builder επιλέγουμε Mesh και στην καρτέλα που μας ανοίγεται επιλέγουμε User-Controlled Mesh. Στο Model Builder κάτω από την επιλογή Mesh → Size, και στο παράθυρο που ανοίγει δεξιά επιλέγουμε Predefined → Extra Fine.

Επιλέγουμε Build All

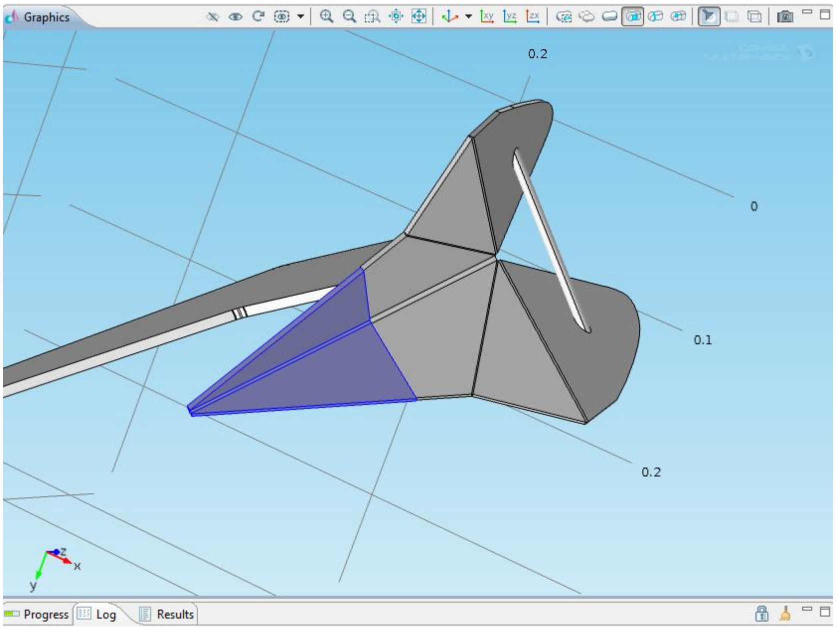


Εικόνα 12.3 – Mesh

Έχοντας λοιπόν εισάγει τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου και δημιουργήσει το πλέγμα, στο Model Builder κάνοντας δεξί κλικ στο Solid Mechanics →Fixed Constraint επιλέγουμε τις επιφάνειες της άγκυρας που θεωρούμε ότι έχουν διεισδύσει στον πυθμένα.

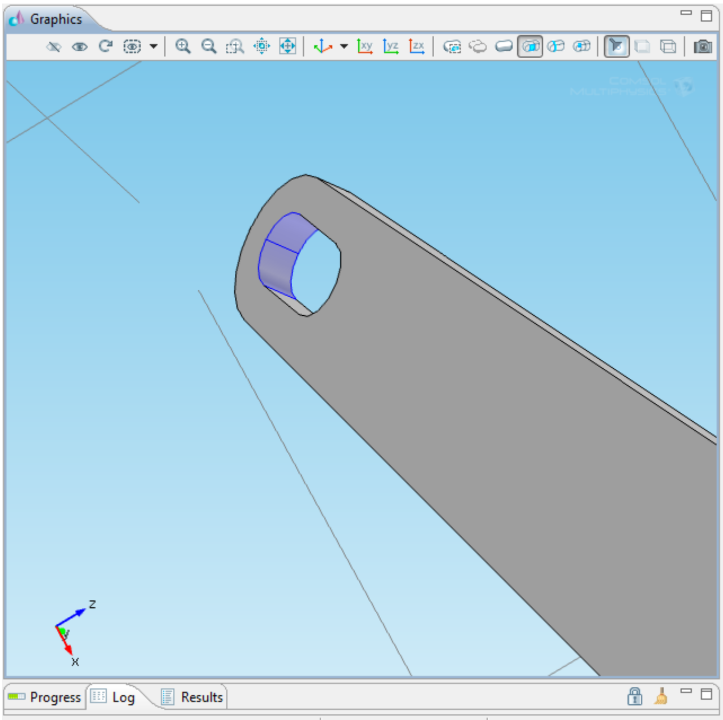


Εικόνα 12.4a – Fixed Constraint



Εικόνα 12.4b – Fixed Constraint

Στην συνέχεια επαναλαμβάνοντας το προηγούμενο βήμα, στην επιλογή Boundary Load επιλέγουμε τις επιφάνειες στο εσωτερικό του «ματιού» (anchor’s pulling eye), στις οποίες εφαρμόζεται η ελκτική δύναμη F, σε διεύθυνση παράλληλη με τον πυθμένα.



Εικόνα 12.5 – Boundary Load στο «μάτι» της άγκυρας

Τέλος, στο δένδρο επιλογών του Model Builder επιλέγουμε Study → Compute.

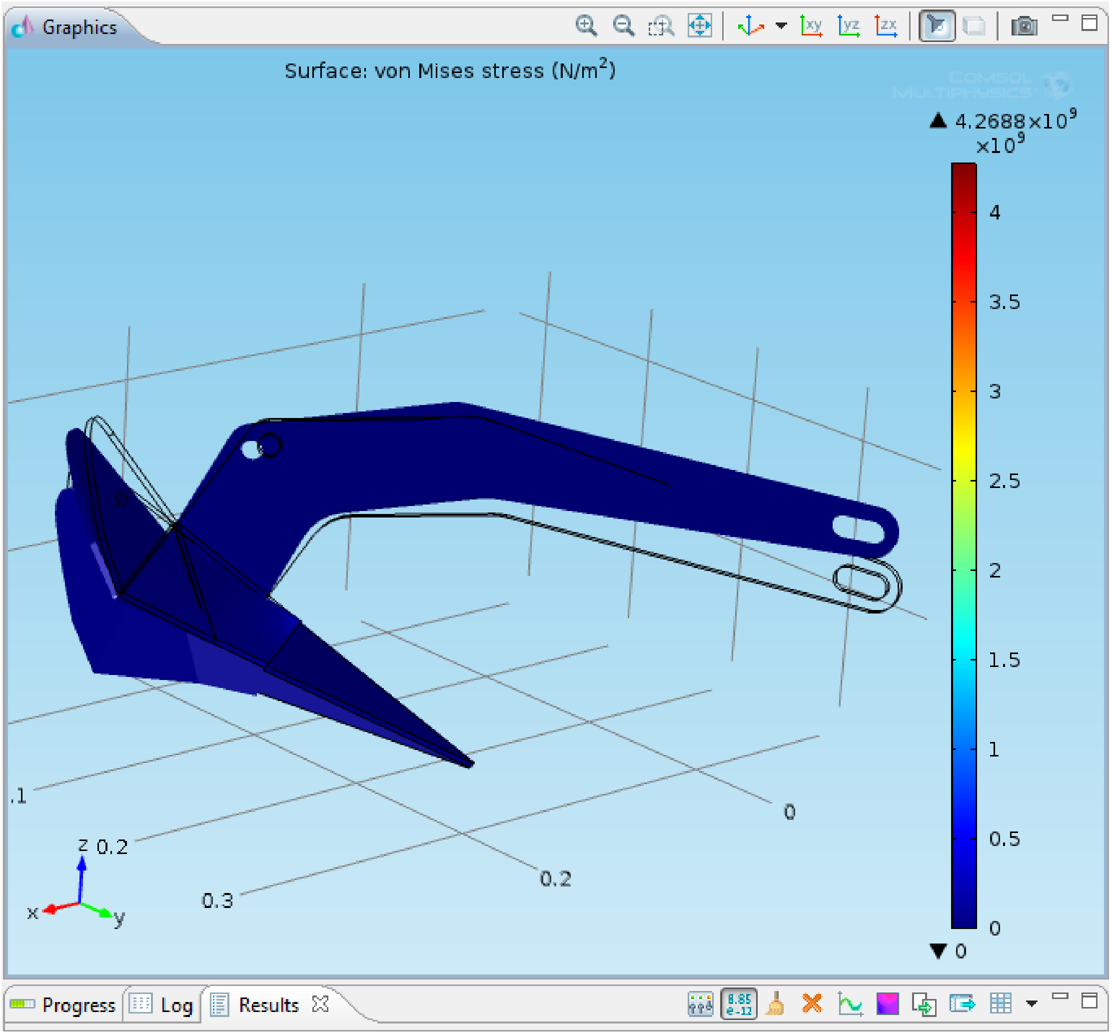
Επαναλαμβάνουμε τα δύο τελευταία βήματα την διαδικασίας με διαφορετικά ορίσματα, καθώς μελετάμε την επίδραση διαφορετικών δυνάμεων έλξης. Συγκεκριμένα μελετάμε την συμπεριφορά της Delta (4kg) άγκυρας σε τρεις περιπτώσεις:

1. Σε ακραίες πραγματικές συνθήκες αγκυροβολίας (12 Beaufort) όπου $F_w = 3080\ N \Rightarrow F_x = 1200\ N$
2. Στην δύναμη που αγγίζει το όριο θραύσης του nylon σκοινιού ($F_x = 14400N$)
3. Στην δύναμη που αγγίζει το όριο θραύσης της χαλύβδινης αλυσίδας ($F_x = 18000\ N$)

12.3 Αποτελέσματα

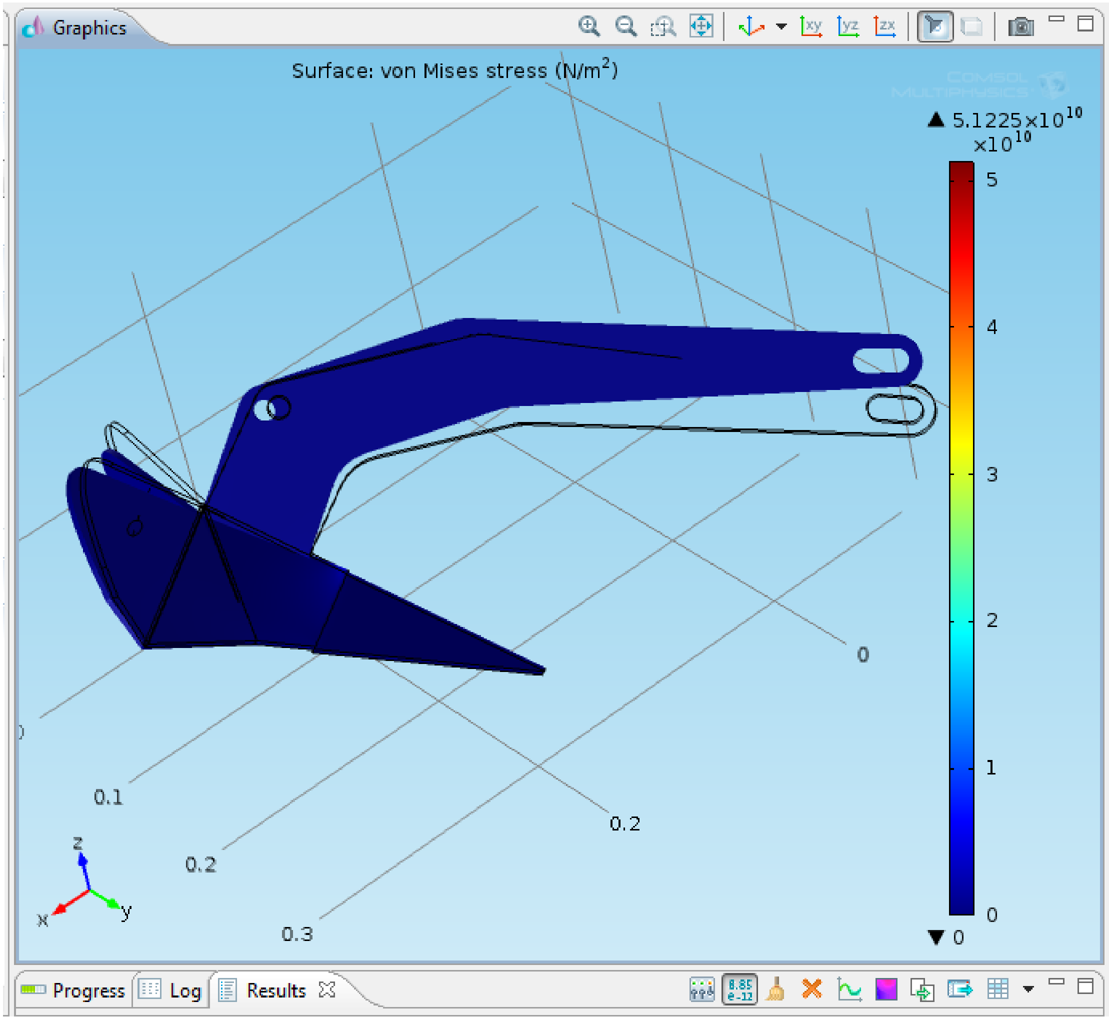
Ακολουθούν snapshots των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας στο Comsol Multiphysics 4.2a:

1η Περίπτωση



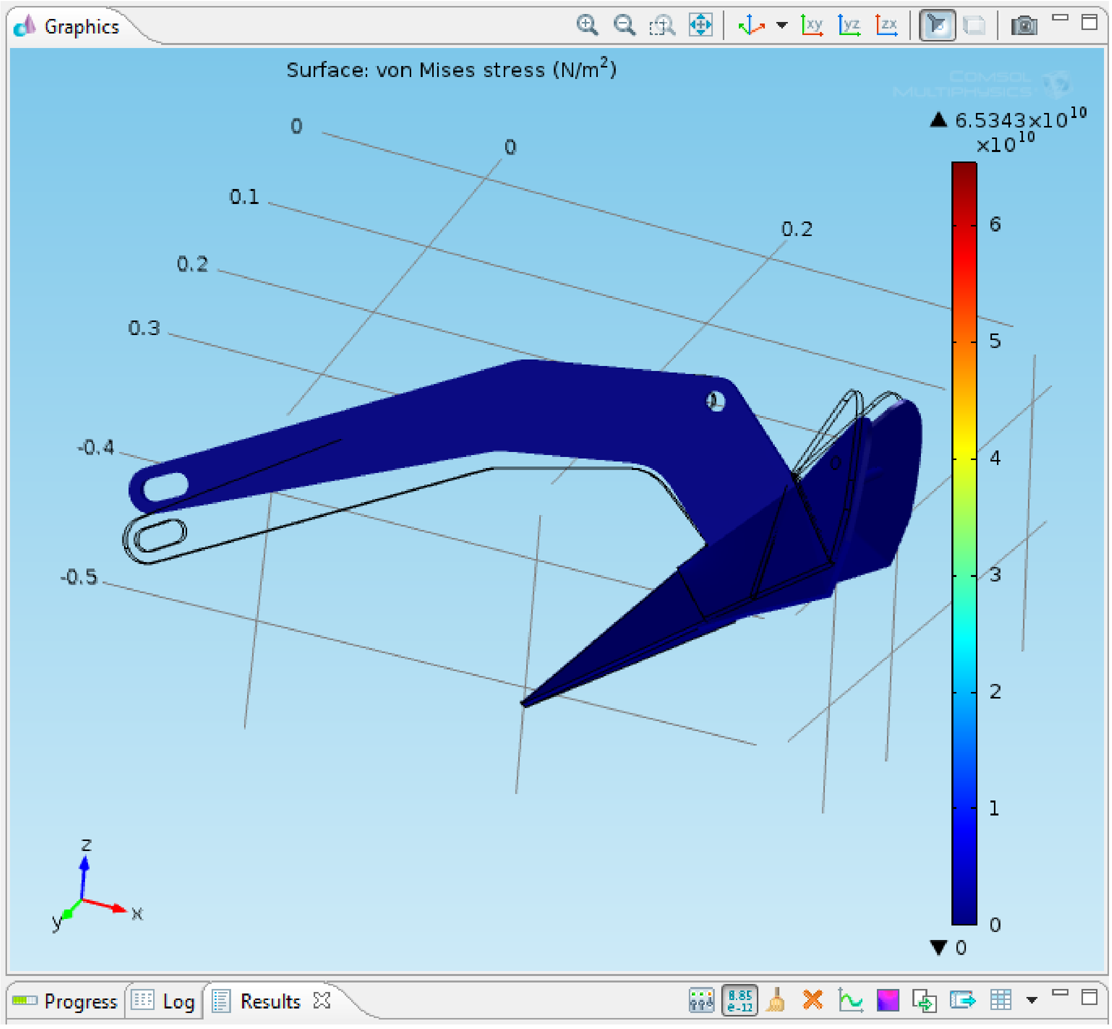
Εικόνα 12.6 – φόρτιση της άγκυρας σε περίπτωση ακραίων καιρικών συνθηκών (12 Beaufort)

2^{η} Περίπτωση



Εικόνα 12.7 – Φόρτιση άγκυρας στο όριο θραύσης του nylon σκοινιού

3η Περίπτωση



Εικόνα 12.8 – Φόρτιση άγκυρας στο όριο θραύσης της χαλύβδινης αλυσίδας

Συμπεράσματα

Δόθηκε μια αναλυτική περιγραφή των στοιχείων που αποτελούν τον τυπικό εξοπλισμό αγκυροβόλησης σκαφών. Περιγράφηκε με λεπτομέρεια η λειτουργία της άγκυρας και των διαφόρων μέσων πρόσδεσης της με το σκάφος, καθώς και οι αναγκαίες προϋποθέσεις ώστε να λειτουργήσει επαρκώς το σύστημα για να εξασφαλίσει την ασφαλή αγκυροβόληση.

Αναλύθηκαν οι δυνάμεις που δρουν πάνω στο σκάφος και το σύστημα αγκυροβόλησης και αναλύθηκε η λειτουργία του συστήματος σε υψηλές συνθήκες φόρτισης.

Οι παραπάνω αναλύσεις, στοιχεία και υπολογισμοί χρησιμοποιήθηκαν για να εξεταστεί η χρήση άγκυρας τύπου Delta 4KG ως κύριας και βοηθητικής μικρού σκάφους για ασφαλή αγκυροβόληση σε συνήθης αλλά και σε ακραίες καιρικές συνθήκες (5-12 Beaufort). Οι εκτιμήσεις των δυνάμεων φόρτισης έγιναν για σκάφος μήκους 7m, μέγιστο ύψος εξάλλων 1m, με αεροδυναμικό συντελεστή οπισθέλκουσας C_d =1. Εξετάστηκαν οι μέθοδοι και παράμετροι αγκυροβόλησης του σκάφους με την κύρια μόνο και με συνδυασμό κύριας και βοηθητικής άγκυρας. Η ανάλυση έδειξε ότι χρειάζεται ικανό έκταμα από nylon σκοινί και στις δύο άγκυρες, καθώς και βοηθητικό βάρος (kellet) για να αξιοποιηθεί η μέγιστη δύναμη συγκράτησης που προσφέρουν συνδυαστικά οι δύο αυτές άγκυρες

Η συγκεκριμένη άγκυρα σχεδιάστηκε με ακρίβεια με χρήση CAD και μελετήθηκε αναλυτικά με χρήση πεπερασμένων στοιχείων η μηχανική συμπεριφορά της κάτω από ισχυρές φορτίσεις. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι ακόμα και στην περίπτωση αγκυροβόλησης σκάφους σε ακραίες καιρικές συνθήκες (πχ άνεμος 12 Beaufort) που οι δυνάμεις στην άγκυρα μεγιστοποιούνται ή/και όταν εφαρμόζονται τάσεις ίσες με τα όρια θραύσης των λοιπών εξαρτημάτων αγκυροβόλησης (σκοινί, αλυσίδα), η άγκυρα δεν παραμορφώνεται ή αστοχεί. Συνεπώς, εφόσον έχει ποντιστεί σωστά και έχει αποκτήσει πρόσφυση σε ιδανικό πυθμένα, η άγκυρα δεν θα αποτελέσει τον «αδύναμο κρίκο» του συστήματος αγκυροβόλησης.

Βιβλιογραφία

[1] Catenary Mooring Lines, University of Michigan, by L.O Garza Rios, 1997
http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/91661/Publication_No_333.pdf?sequence=1

[2] On the holding power of ship's anchors, some aspects of the holding abilities of anchors, model-anchor experiments and their correlation with full-scale data, by Karel Jan Saurwalt
http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Hm3MiqQLysUJ:repository.tudelft.nl/assets/uuid:641fc700-fac5-4242-8a48-0be2b08848a9/P_1801_1298.pdf+&cd=9&hl=en&ct=clnk&gl=gr

[3] Physics for Game Programmers, by Grant Palmer

[4] "Ultimate Holding Power" www.yachtingmonthly.com December 2006 (p.62-72)
http://www.newmorning.info/page65/files/Yachting%20anchor%20test.pdf

[5] "Which anchor is best?" www.yachtingmonthly.com November 2009 (p.25-33)
http://www.manson-marine.co.nz/Anchor%20Tests/Yachting%20Monthly%20-Anchor%20Test%20Nov09.pdf

[6] http://www.dulhunty.com/dmp2.htm

[7] http://www.go2marine.com/productcenters/anchoring/

[8] http://alain.fraysse.free.fr/sail/rode/rode.htm

[9] http://www.anchorlift.com/chains_and_ropes.html

[10] http://www.engineeringtoolbox.com/nylon-rope-strength-d_1513.html

[11] http://www.lewmar.com/products.asp?id=8743&lid=23571)

[12] http://www.metoffice.gov.uk/weather/marine/guide/beaufortscale.html

[13] The holding power of anchors, Sir Geoffrey Ingram Taylor, published in "The Yachting Monthly" and "Motor Boating Magazine", April 1934
http://www.petersmith.net.nz/boat-anchors/docs/taylor-the-holding-power-of-anchors-1934.pdf

[14] http://yachtpals.com/anchoring

[15] http://en.wikipedia.org/wiki/G._I._Taylor

[16] NCEL Handbook for Marine Geotechnical Engineering, 1985
http://wetlands.simplyaquatics.com/d/14871-1/App_g.pdf

[17] Tirupathi R. Chandrupatla, Asok D. Belegundu: Εισαγωγή στα Πεπερασμένα Στοιχεία για Μηχανικούς, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2005

1. Anchoring & Docking

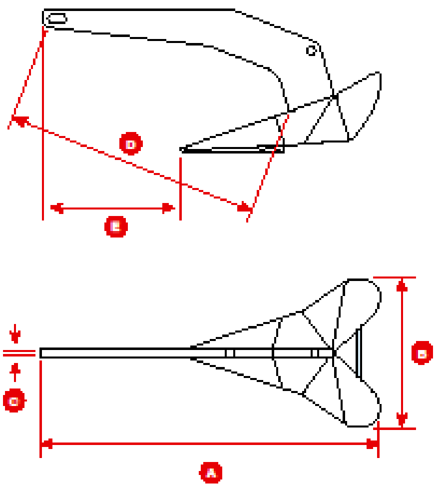
Delta® Anchor

Selection guide

	ANCHOR WEIGHT kg	lb	BOAT LENGTH OVERALL 6 m / 20 ft	9.2 m / 30 ft	12.2 m / 40 ft	15.2 m / 50 ft	18.3 m / 60 ft	21.3 m / 70 ft	24.4 m / 80 ft	27.4 m / 90 ft
Delta®	4	9								
Delta®	6	14								
Delta®	10	22								
Delta®	16	35								
Delta®	20	44								
Delta®	25	55								
Delta®	32	70								
Delta®	40	88								
Delta®	50	110								
Delta®	63	140								

Lighter shading represents the upper limit of model. If in doubt, move up a model.
This information is for guidance only, please consult the relevant Classification Society for specific certification requirements.

Dimensions Diagram



Galvanized Delta® Anchor

Stainless Steel Delta® Anchor

Delta® Anchor Stainless and Galvanised Specifications

GALVANIZED Part No.	STAINLESS Part No.	ANCHOR WEIGHT kg	lb	RECOMMENDED CHAIN SIZE mm	in	A mm	A in	B mm	B in	C mm	C in	D mm	D in	E mm	E in
0057404		4	9	6–7	¼	514	20¼	230	9	8	5/16	387	15¼	210	8¼
0057406	0057306	6	14	6–7	¼	593	23⅜	265	10⅜	10	⅜	450	17⅝	243	9⅝
0057410	0057310	10	22	8	5/16	695	27⅜	310	12¼	13	½	526	20⅝	282	11⅛
0057416	0057316	16	35	8	5/16	812	32	362	14¼	13	½	614	24⅛	328	13
0057420	0057320	20	44	10	⅜	877	34½	392	15⅜	16	⅝	663	26⅛	357	14
0057425	0057325	25	55	10	⅜	945	37¼	415	16⅜	16	⅝	713	28	387	15¼
0057432	0057332	32	70	10	⅜	1023	40¼	453.5	17⅜	20	¾	775	30½	425	16¾
0057440	0057340	40	88	10	⅜	1103	43½	489	19¼	20	¾	833	32¾	437	17¼
0057450	0057350	50	110	12	½	1175	46¼	523	20⅝	20	¾	890	35	479	18⅞
0057463	0057363	63	140	12	½	1270	50	567	20⅝	22	⅞	963	38	508	20