



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΚΛΑΔΩΝ ΣΕ ΠΥΡΓΟΕΙΔΕΣ
ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ
ΠΛΩΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΙ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (Floating Production Storage Offloading
system - FPSO) ΣΕ ΝΕΡΑ ΜΕΓΑΛΟΥΣ ΒΑΘΟΥΣ»

ΜΙΧΑΗΛ ΜΗΤΣΑΚΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής : Σπύρος Α. Μαυράκος

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προσπάθεια για μείωση του κόστους, σε συνδυασμό με τεχνολογικά πλεονεκτήματα, έχει οδηγήσει σε αύξηση της χρήσης πλωτών εγκαταστάσεων αποθήκευσης και εκφόρτωσης (FPSOs) σε όλο τον κόσμο.

Οι πρόοδοι στην τεχνολογία πρόσδεσης μπορούν να ωθήσουν τα συστήματα FPSO από απλώς οριακές εφαρμογές πεδίου σε σχετικά ρηχά βάθη μέχρι αξιοποίηση κοιτασμάτων σε νερά βάθους αρκετών εκατοντάδων μέτρων.

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει μια πλήρη αξιολόγηση ενός πυργοειδούς συστήματος αγκύρωσης ενός συστήματος FPSO σε συγγραμικές και μη συγγραμικές περιβαλλοντικές συνθήκες σε νερά βάθους 1000m. Το πυργοειδές σύστημα αγκύρωσης υπό μελέτη αποτελείται από οκτώ γραμμές πρόσδεσης. Η εφαρμογή ενός συνδυασμού τριών τμημάτων αλυσίδας-συνθετικού σχοινιού-συρματόσχοινου θα υιοθετηθεί για την κατασκευή της γραμμής πρόσδεσης και θα προκύψουν τα πλεονεκτήματα από τη χρήση συνθετικών τεχνητών ιών HMPE (High Modulus Polyethylene).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>	<u>2</u>
<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</u>	<u>3</u>
<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	<u>12</u>
<u>Κεφάλαιο 1 - Σχεδιασμός συστημάτων πρόσδεσης για την αποτελεσματική διατήρηση της αγκυροβολημένης θέσης ενός συστήματος FPSO</u>	<u>14</u>
1.1 Πλωτές μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης (FPSO)	14
1.2 Εναλλακτικές μέθοδοι πρόσδεσης ενός συστήματος FPSO	15
1.3 Η έννοια της αγκυροβόλησης ενός σημείου (SPM)	17
1.4. Εξελιξείς στα πυργοειδή συστήματα πρόσδεσης ενός FPSO	22
<u>Κεφάλαιο 2 - Υλικά για γραμμές πρόσδεσης και υψηλής τεχνολογίας σχοινιά από συνθετικές ίνες</u>	<u>25</u>
2.1 Υλικά από συνθετικές ίνες σε σχέση με συμβατικές	25
2.2 Μηχανικές ιδιότητες των συνθετικών υλικών	27
2.3 Συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται για συνθετικά σχοινιά	28
2.4 Ίνες High Modulus για παραγωγή συνθετικών σχοινιών	30
2.5 Υλικά για την κατασκευή των συνθετικών σχοινιών	34
2.6 Φόρμες κατασκευής σχοινιών	35
2.7 Απολήξεις	37
2.8 Ιδιότητες σχοινιών συνθετικών ινών	38
2.8.1 Βάρος και ακαμψία	38

2.8.2 Αντοχή σε θραύση	39
2.9 Συγκριτική επισκόπηση των υλικών για τις γραμμές πρόσδεσης και την επιλογή των πιο υποσχόμενων	40
Κεφάλαιο 3 - Σχεδιασμός συστήματος αγκυροβόλησης	42
3.1 Διαμόρφωση του συστήματος πρόσδεσης	42
3.2 Σχέδιο πρόσδεσης	42
3.3 Κατηγορίες συστημάτων πρόσδεσης	44
3.4 Σύνδεσμοι	46
3.5 Άγκυρες	47
3.5.1 Ισχύς συγκράτησης άγκυρας	50
3.6 Τύποι γραμμών πρόσδεσης και επιλογή υλικών	52
3.6.1 Επιλογή αλυσίδας	52
3.6.2 Επιλογή συρματόσχοινων	55
3.6.3 Επιλογή συνθετικού σχοινιού	59
Κεφάλαιο 4 - Ανάλυση γραμμής πρόσδεσης	61
4.1 Γεωμετρία της αλυσοειδούς καμπύλης της γραμμής πρόσδεσης	61
4.2 Διαφορές του επιπέδου της εντατικής κατάστασης λόγω των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού της γραμμής πρόσδεσης	62
4.3 Χαρακτηριστικά μη γραμμικής ακαμψίας του συστήματος πρόσδεσης	64
4.4 Χαρακτηριστικά φόρτισης-μετατόπισης για το συνδιορισμένο σύστημα πρόσδεσης αλυσίδας-συνθετικού σχοινιού	66
Κεφάλαιο 5 - Περιβαλλοντικές δυνάμεις και κινήσεις του πλοίου	69
5.1 Περιβαλλοντικά δεδομένα	69
5.2 Οι δυνάμεις του ανέμου	69
5.3 Δυνάμεις κυμάτων	70
5.4 Οι δυνάμεις του ρεύματος	71
5.5 Σταθερές περιβαλλοντικές δυνάμεις	72

5.5.1 Σταθερές δυνάμεις του ανέμου	74
5.5.2 Σταθερές δυνάμεις ρεύματος	78
5.5.3 Σταθερές δυνάμεις κύματος	79
5.6 Δυνάμεις συχρότητας κύματος και κινήσεις του πλοίου	81
5.6.1 Δύναμη κίνησης Surge	83
5.6.2 Δύναμη κίνησης Sway	88
5.6.3 Δύναμη κίνησης Yaw	91
5.7 Slow Drift δυνάμεις και low frequency κινήσεις του πλοίου	95
5.7.1 Slow Drift δυνάμεις λόγω κυμάτων	95
5.7.2 Slow Drift δυνάμεις λόγω των ανέμων	101
Κεφάλαιο 6 – Η Διαδικασία για την ανάλυση του συστήματος πρόσδεσης	105
6.1 Κριτήρια σχεδιασμού συστήματος πρόσδεσης	105
6.1.1 Ορισμός της μέσης μετατόπισης, μέγιστης μετατόπισης και προσδιορισμός των ορίων μετατόπισης	105
6.1.2 Μέγιστη ένταση γραμμής πρόσδεσης	107
6.1.3 Μήκος γραμμής πρόσδεσης	108
6.1.4 Ισχύς συγκράτησης της άγκυρας	109
6.1.4.1 Ισχύς συγκράτησης αλυσίδας	109
6.2 Διαδικασία ανάλυσης πρόσδεσης	110
6.2.1 Head Environment (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε μηδέν μοίρες γωνία)	112
6.2.1.1 Surge μέση μετατόπιση (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε μηδέν μοίρες γωνία)	112
6.2.1.2 Surge μέγιστη μετατόπιση (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε μηδέν μοίρες γωνία)	116
6.2.1.3 Μέγιστη τάση γραμμής (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε μηδέν μοίρες γωνία)	119
6.2.1.4 Μέγιστο αναρτημένο μήκος (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε μηδέν μοίρες γωνία)	120
6.2.1.5 Μέγιστο φορτίο αγκύρωσης (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε μηδέν μοίρες γωνία)	120
6.2.2 Beam Environment (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε ενενήντα μοίρες γωνία)	121
6.2.2.1 Sway μέση μετατόπιση (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε ενενήντα μοίρες γωνία)	121

6.2.2.2 Sway μέγιστη μετατόπιση (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε ενενήντα μοίρες γωνία)	125
6.2.2.3 Sway μέγιστη τάση γραμμής (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε ενενήντα μοίρες γωνία)	127
6.2.2.4 Sway μέγιστο αναρτημένο μήκος (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε ενενήντα μοίρες γωνία)	128
6.2.2.5 Sway μέγιστο φορτίο άγκυρας (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε ενενήντα μοίρες γωνία)	129
6.2.3 Επίδραση του ανέμου, κύματος και ρεύματος στο FPSO με διαφορετικές γωνίες	130
6.2.3.1 Μέση μετατόπιση για γωνίες επίδρασης ρεύματος 40° και 0° για άνεμο και κύμα	138
6.2.3.2 Μέγιστη μετατόπιση για γωνίες επίδρασης ρεύματος 40° και 0° για άνεμο και κύμα	140
6.2.3.3 Μέγιστη τάση γραμμής για γωνίες επίδρασης ρεύματος 40° και 0° για άνεμο και κύμα	146
6.2.3.4 Μέγιστο αναρτημένο μήκος για 40° ρεύμα και για 0° γωνίες κλίσης ανέμου και κύματος	147
6.2.3.5 Μέγιστο φορτίο αγκύρωσης για γωνίες επίδρασης ρεύματος 40° και 0° για άνεμο και κύμα	147
<u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ</u>	149
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	151
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 - Χαρακτηριστικά φόρτισης-μετατόπισης του συστήματος πρόσδεσης</u>	154
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 - Σταθερές δυνάμεις ανέμου, ρεύματος και κυματισμού που επιδρούν στην πλατφόρμα για πλήρες φάσμα γωνιών</u>	158
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 - Συντελεστές πρόσθετης μάζας</u>	170
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4 – Πρωτοτάξιες κινήσεις και αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης</u>	173
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5 – Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις λόγω του κύματος και υπολογισμός της απόκρισης</u>	179
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 6 - Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις λόγω του ανέμου και υπολογισμός της απόκρισης</u>	182

Κατάλογος των Εικόνων

<u>1.1 Διάφορα σχέδια συστήματος πρόσδεσης.</u>	<u>16</u>
<u>1.2 Σύστημα πρόσδεσης σταθερού πύργου</u>	<u>18</u>
<u>1.3 Σύστημα πρόσδεσης με μονό άγκιστρο (Single anchor leg mooring – SALM)</u>	<u>19</u>
<u>1.4 Σύστημα πρόσδεσης αλυσοειδούς γραμμής με άγκυρα (Catenary anchor leg mooring – CALM)</u>	<u>20</u>
<u>1.5 Σύστημα πρόσδεσης εξωτερικού πυργίσκου (External turret)</u>	<u>21</u>
<u>1.6 Σύστημα πρόσδεσης εσωτερικού πυργίσκου (Internal Turret)</u>	<u>22</u>
<u>2.1 Κατασκευαστικοί τύποι σχοινιών</u>	<u>36</u>
<u>2.2 Απολήξεις</u>	<u>37</u>
<u>2.3 Συγκριτική εξέταση των ιδιοτήτων αλυσίδας συνθετικών σχοινιών και συρματόσχοινων</u>	<u>41</u>
<u>3.1 Τύποι πρόσδεσης</u>	<u>43</u>
<u>3.2 Κάτοψη του FPSO που δείχνει το μοντέλο πρόσδεσης που υιοθετήθηκε</u>	<u>44</u>
<u>3.3 Σύνδεσμοι</u>	<u>47</u>
<u>3.4 Διαφορετικοί τύποι αγκυρών</u>	<u>48</u>
<u>3.5 Δύναμη συγκράτησης άγκυρας.</u>	<u>52</u>
<u>3.6 Διατομές συρματόσχοινων</u>	<u>55</u>
<u>3.7 Κατασκευαστικοί τύποι συρματόσχοινων</u>	<u>56</u>
<u>4.1 Γεωμετρία της αλυσοειδούς καμπύλης της γραμμής πρόσδεσης</u>	<u>61</u>
<u>4.2 Ελαστικότητα γραμμής πρόσδεσης.</u>	<u>63</u>
<u>4.3 Φόρτιση-μετατόπιση καμπύλη ακαμψίας της γραμμής πρόσδεσης</u>	<u>156</u>
<u>4.4 Αναρτημένο μήκος σε σχέση με την μετατόπιση</u>	<u>157</u>
<u>4.5 Φόρτιση-Μετατόπιση για την πιο φορτισμένη γραμμή</u>	<u>157</u>
<u>5.1 Οι δυνάμεις του κυματισμού σε ένα πλωτό σκάφος</u>	<u>71</u>

<u>5.2 Ένδειξη της σύμβασης σημάτων που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη</u>	<u>72</u>
<u>5.3 Πλευρική όψη και κάτοψη της υπερκατασκευής</u>	<u>76</u>
<u>5.4 Ορισμός της προβαλλόμενης επιφάνειας της υπερκατασκευής.</u>	<u>77</u>
<u>5.5 Δυνάμεις από τον άνεμο κατά το διάμηκες στο FPSO</u>	<u>159</u>
<u>5.6 Δυνάμεις κατά το εγκάρσιο στο FPSO</u>	<u>160</u>
<u>5.7 Ροπή περί τον κατακόρυφο άξονα λόγω ανέμου στο FPSO</u>	<u>160</u>
<u>5.8 Δύναμη από τον άνεμο κατά το διάμηκες στην υπερκατασκευή</u>	<u>162</u>
<u>5.9 Δύναμη από τον άνεμο κατά το εγκάρσιο στην υπερκατασκευή</u>	<u>162</u>
<u>5.10 Ροπή περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα από την δράση του ανέμου στην υπερκατασκευή</u>	<u>163</u>
<u>5.11 Δύναμη από το ρεύμα κατά το διάμηκες στο FPSO</u>	<u>164</u>
<u>5.12 Δύναμη από το ρεύμα κατά το εγκάρσιο στο FPSO</u>	<u>164</u>
<u>5.13 Ροπή περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα από την δράση του ρεύματος στο FPSO</u>	<u>165</u>
<u>5.14 Μέση δευτεροτάξια δύναμη κατά το διάμηκες που ασκείται στο FPSO</u>	<u>166</u>
<u>5.15 Μέση δευτεροτάξια δύναμη που ασκείται κατά το εγκάρσιο που ασκείται στο FPSO</u>	<u>166</u>
<u>5.16 Μέση δευτεροτάξια ροπή περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα που ασκείται στο FPSO</u>	<u>167</u>
<u>5.17 Συνολική διαμήκης δύναμη στο FPSO</u>	<u>168</u>
<u>5.18 Συνολική εγκάρσια δύναμη στο FPSO</u>	<u>168</u>
<u>5.19 Συνολική ροπή περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα στο FPSO</u>	<u>169</u>
<u>5.20 Ορθογώνιο πλοίο</u>	<u>81</u>
<u>5.21 Υπολογισμός διαμήκους δύναμης (Surge force)</u>	<u>83</u>
<u>5.22 Διαμήκης μετατόπιση (Surge)</u>	<u>174</u>

<u>5.23 Συνάρτηση Μεταφοράς στη διαμήκη κίνηση (Surge RAO)</u>	<u>175</u>
<u>5.24 Φάσμα Pierson-Moskovich</u>	<u>87</u>
<u>5.25 Υπολογισμός της δύναμης κατά την εγκάρσια κατεύθυνση (Sway force)</u>	<u>88</u>
<u>5.26 Μετατόπιση κατά την εγκάρσια κατεύθυνση (Sway)</u>	<u>176</u>
<u>5.27 Συνάρτηση Μεταφοράς (Sway RAO)</u>	<u>177</u>
<u>5.28 Σχηματισμός ροπής περί τον κατακόρυφο άξονα περιστροφής (yaw moment)</u>	<u>91</u>
<u>5.29 Συχνότητα κύματος ροπή Yaw</u>	<u>178</u>
<u>5.30 Αδιάστατοι συντελεστές δυνάμεων μετατόπισης (R)</u>	<u>97</u>
<u>5.31 Φάσμα της αργά μεταβαλλόμενης απόκρισης για μετωπική πρόσπτωση των κυματισμών</u>	<u>181</u>
<u>5.32 Φάσμα της αργά μεταβαλλόμενης απόκρισης για πλευρική πρόσπτωση των κυματισμών</u>	<u>181</u>
<u>5.33 Φάσμα της αργά μεταβαλλόμενης απόκρισης για μετωπική πρόσπτωση του πεδίου ανέμου</u>	<u>184</u>
<u>5.34 Φάσμα της αργά μεταβαλλόμενης απόκρισης για πλευρική πρόσπτωση του πεδίου ανέμου</u>	<u>185</u>
<u>6.1 Περίπτωση 1: Γωνία πρόσπτωσης ανέμου, ρεύματος και κύματος 00 (Head condition)</u>	<u>113</u>
<u>6.2 Περίπτωση 2- Περιβαλλοντικές συνθήκες με πλευρική πρόσπτωση</u>	<u>122</u>
<u>6.3 Περίπτωση 3 - Περίπτωση 3 - Διεύθυνση πρόσπτωσης του ρεύματος στις 40°, άνεμος και κύμα στις 00 πρόσπτωσης</u>	<u>131</u>
<u>6.4 Η προκύπτουσα θέση ισορροπίας.</u>	<u>133</u>
<u>6.5 Κατεύθυνση των εφαρμοζόμενων δυνάμεων και ροπών στο πλοίο</u>	<u>134</u>
<u>6.6 Συνολικές διαμήκεις και εγκάρσιες δυνάμεις που δρουν στο FPSO</u>	<u>137</u>

6.7 Προσέγγιση της συνδυασμένης πρωτοτάξιας και αργά μεταβαλλόμενης κίνησης κατά την διαμήκη κατεύθυνση (surge)	142
6.8 Προσέγγιση της συνδυασμένης πρωτοτάξιας και αργά μεταβαλλόμενης μετακίνησης στην εγκάρσια (Sway) κατεύθυνση	144
6.9 Συνδυασμένη μέση και μέγιστη μετατόπιση.	145

Κατάλογος των Πινάκων

2.1 Γενικές ιδιότητες διαφόρων ειδών ινών	33
2.2 Μηχανικές ιδιότητες των συνθετικών σχοινιών	34
2.3 Βάρος ανά μονάδα μήκους	38
2.4 Αντοχή σε θραύση	40
3.1 Συντελεστές υπολογισμού της δύναμης συγκράτησης	51
3.2 Δύναμη θραύσης αλυσίδας	54
3.3 Αντοχή θραύσης συρματόσχοινου	58
4.1 Ιδιότητες κάθε τμήματος της γραμμής πρόσδεσης	67
5.1 Στοιχεία FPSO	73
5.2 Στοιχεία υπερκατασκευών	75
5.3 Δυνάμεις ανέμου και ροπές στο FPSO	159
5.4 Δυνάμεις από τον Άνεμο και Ροπές στην Υπερκατασκευή	161
5.5 Δυνάμεις και ροπές από το ρεύμα στο FPSO	163
5.6 Μέσες δευτεροτάξιες δυνάμεις και ροπές περί τον κατακόρυφο άξονα που ασκούνται στο FPSO	165
5.7 Συνολικές δυνάμεις και ροπές για συγγραμμική δράση των συνθηκών του περιβάλλοντος	167
5.8 Υπολογισμοί διαμήκους μετατόπισης (surge)	174
5.9 Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης για την διαμήκη κίνηση (Surge)	175

<u>5.10 Υπολογισμοί στην εγκάρσια κίνηση (Sway)</u>	176
<u>5.11 Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης για την εγκάρσια κίνηση (Sway)</u>	177
<u>5.12 Σχηματισμός ροπής Yaw</u>	178
<u>5.13 Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις και κινήσεις κατά την διαμήκη (surge) κίνηση</u>	180
<u>5.14 Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις και κινήσεις κατά την εγκάρσια (sway) κίνηση</u>	181
<u>5.15 Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις και κινήσεις λόγω του ανέμου στην διαμήκη κατεύθυνση (surge)</u>	183
<u>5.16 Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις και κινήσεις λόγω του ανέμου στην εγκάρσια κατεύθυνση (sway)</u>	184
<u>6.1 CBS των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της γραμμής πρόσδεσης.</u>	108
<u>6.2 Επιλεγμένες περιβαλλοντικές συνθήκες.</u>	112
<u>6.2a Αποτελέσματα</u>	120
<u>6.3 Ποσοστό αντοχής</u>	128
<u>6.4 Τιμές για τις δυνάμεις και τις ροπές εξαιτίας του ρεύματος για γωνία 40 °</u>	132
<u>6.5 Παραγόμενες εγκάρσιες δυνάμεις και ροπές στη θέση ισορροπίας (περίπτωση 3)</u>	135
<u>6.6 Διαμήκεις και εγκάρσιες δυνάμεις στη θέση ισορροπίας</u>	136
<u>6.7 Ποσοστό του CBS (περίπτωση 3)</u>	147

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ύπαρξη των συστημάτων αγκυροβόλησης οφείλεται στην αναγκαιότητα αγκύρωσης των πλωτών αντικειμένων στη θάλασσα. Σκοπός του συστήματος πρόσδεσης είναι η διατήρηση της θέσης του αγκυρωμένου αντικειμένου εντός δεδομένων ανοχών.

Ο παραδοσιακός τρόπος πρόσδεσης σε νερά μικρού βάθους είναι η χρήση αλυσίδας από χάλυβα ή συρματοσχοίνου με τη μορφή αλυσοειδούς (catenary). Ωστόσο, καθώς αυξάνεται το βάθος του νερού, η γωνία της αλυσοειδούς γίνεται πιο απότομη. Η μεγάλη κατακόρυφη δύναμη του αλυσοειδούς σε μια υπεράκτια πλατφόρμα μειώνει το ωφέλιμο φορτίο ή αυξάνει την απαιτούμενη πλευστότητα. Η απότομη γωνία του αλυσοειδούς παράγει αρχικά πολύ μικρή οριζόντια δύναμη αποκατάστασης και μπορεί να προκύψουν υπερβολικά μεγάλες μετατοπίσεις της πλατφόρμας.

Καθώς οι υπεράκτιες δραστηριότητες βαθμιαία μετακινούνται σε βαθύτερα νερά, το θεμελιώδες χαρακτηριστικό μιας αλυσοειδούς αγκυροβόλησης, δηλαδή το βάρος, γίνεται το μεγαλύτερο μειονέκτημα του. Το βάρος της αγκυροβόλησης γίνεται ένα σημαντικό ποσοστό των φορτίων θραύσης των γραμμών πρόσδεσης. Εκεί ακριβώς είναι που τα σχοινιά συνθετικών ινών έχουν εγγενές πλεονέκτημα έναντι των αντιστοίχων από χάλυβα. Ορισμένα άλλα πλεονεκτήματα θα προκύψουν επίσης από την εφαρμογή τους στο σχεδιασμό του συστήματος πρόσδεσης.

Για την κατασκευή των γραμμών πρόσδεσης θα υιοθετηθεί το σύστημα συνδυασμού τριών υλικών, αλυσίδας-συνθετικού σχοινοῦ-συρματοσχοίνου (από την άγκυρα έως το στο σημείο πρόσδεσης στο σκάφος -fairlead).

Οι νέες γενιές συστημάτων αγκυροβόλησης αναπτύχθηκαν όταν εγκαταστάθηκαν οι πρώτες πλωτές εξέδρες πετρελαίου και αρκετές γνώσεις αναπτύχθηκαν τα τελευταία 20 χρόνια.

Η ιδέα της πρόσδεσης ενός σημείου (SPM) θα υιοθετηθεί, με μια διαμόρφωση εσωτερικού πυργίσκου, για το FPSO σε βαθιά νερά. Ο πυργίσκος επιτρέπει στο σκάφος να προσανατολίζεται στον καιρό, ενώ παράγει ένα γεωσταθερό κύτος που φέρει τις γραμμές παραγωγής και πρόσδεσης. Ο πυργίσκος θα τοποθετηθεί μέσα στο σκάφος πίσω από την πλώρη του FPSO. Θα διερευνηθεί η περίπτωση όπου, όλες οι δυνάμεις από το περιβάλλον δρουν από τη μία κατεύθυνση, καθώς και η περίπτωση όπου οι περιβαλλοντικές δυνάμεις είναι μη συγγραμικές και το FPSO θα πάρει μια γωνία προς το κύμα, τον άνεμο και το ρεύμα, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ισορροπία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΡΟΣΔΕΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΗ
ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΓΚΥΡΟΒΟΛΗΜΕΝΗΣ ΘΕΣΗΣ
ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ FPSO

1.1 Πλωτές μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης (FPSO)

Η ζήτηση για προϊόντα υδρογονανθράκων έχει αυξηθεί σταθερά τα τελευταία χρόνια. Από γεωγραφική άποψη, νέες εξελίξεις συμβαίνουν σε όλες σχεδόν τις ηπείρους. Οι υπεράκτιες δραστηριότητες αυξάνονται κυρίως στον Κόλπο του Μεξικού, στη Βραζιλία, στη Βόρεια Θάλασσα, στη Νοτιοανατολική Ασία, στην Αυστραλία και στη Δυτική Αφρική.

Η ζήτηση παραγωγής ώθησε τόσο τους σχεδιαστές όσο και τους φορείς εκμετάλλευσης να αναζητήσουν και να βρουν τρόπους εξόρυξης για την βελτιστοποίηση των αναπτυξιακών τους σχεδίων. Η χρήση των συστημάτων Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) θεωρείται μία από τις πιο ελπιδοφόρες επιλογές ανάπτυξης και εκμετάλλευσης ενός κοιτάσματος και από τεχνολογικής άποψης αλλά και οικονομικών χαρακτηριστικών του έργου (Lovie 1996). Για την ανάπτυξη ενός απομακρυσμένου πεδίου, η χρήση των συστημάτων FPSO είναι σχεδόν πάντα μια ενδεδειγμένη λύση λόγω της έλλειψης υπάρχουσας υποδομής (Lee 1997).

Είτε ένα σύστημα FPSO βασίζεται σε μετατροπή ενός δεξαμενόπλοιου είτε σε καινούρια κατασκευή ειδικά σχεδιασμένη γι' αυτόν τον σκοπό, απαιτείται να έχει κατάλληλο σύστημα αγκυροβολίας που να το κρατά στην θέση του. Οι μονάδες FPSOs

έχουν δει τα τελευταία χρόνια μια μεγάλη αύξηση στη χρησιμοποίησή τους. Μαζί με αυτή την ανάπτυξη έχει παρουσιαστεί και η ανάγκη να μπορούν να αγκυροβολήσουν σε ακόμα μεγαλύτερα βάθη και με περισσότερες γραμμές αγκυροβολίας. Η Petrobas εγκατέστησε πρόσφατα το Barracuda FPSO σε νερά βάθους 2.700 ποδιών. Ο τελευταίος σχεδιασμός FPSO (P-37) από την Petrobas στοχεύει σε νερά βάθους που προσεγγίζει τα 3.000 πόδια.

1.2 Εναλλακτικές μέθοδοι πρόσδεσης ενός συστήματος FPSO

Ένα σύστημα πρόσδεσης στοχεύει στη διατήρηση ενός σταθμού FPSO στην θέση του είτε μόνιμα είτε με αποσυνδεδεμένο σύστημα, εξασφαλίζοντας την αδιάκοπη ροή των υδρογονανθράκων μεταξύ του υποθαλάσσιου συστήματος και του σκάφους.

Δύο τύποι αγκυροβολίων χρησιμοποιούνται συνήθως:

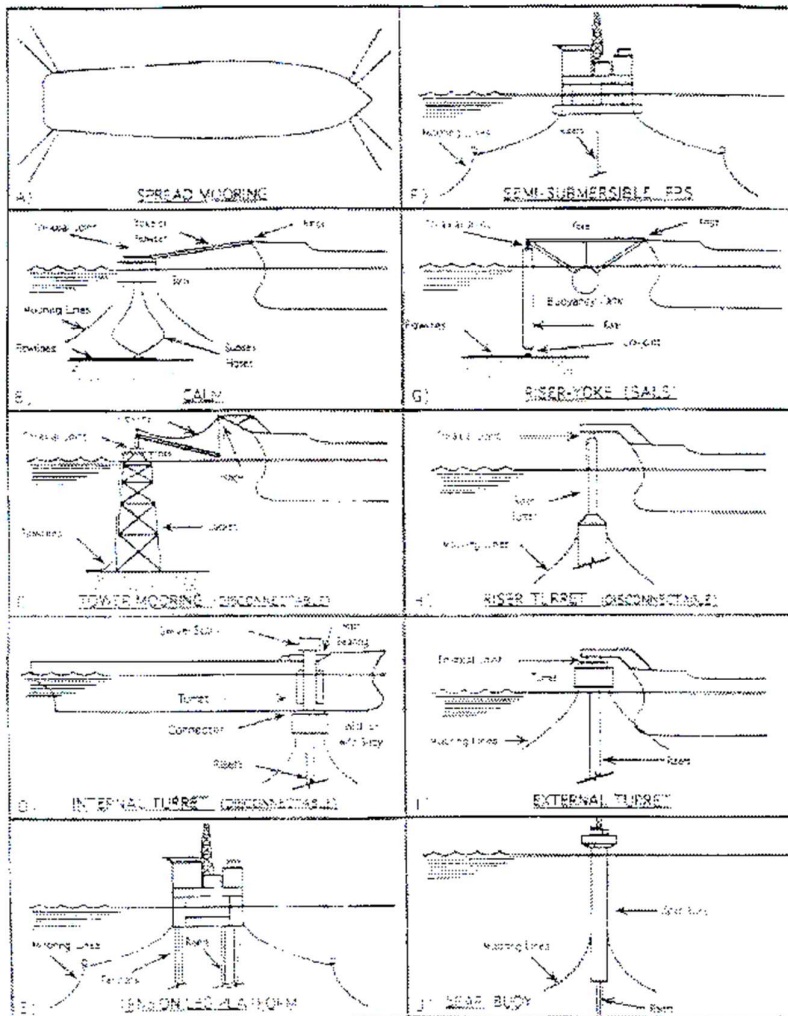
- Το συμβατικό σύστημα αγκυροβολίας και
- Το σύστημα αγκυροβολίας με ένα μόνο σημείο (SPM).

Τα συστήματα αγκυροβολίας με ένα μόνο σημείο (SPM) παρέχουν ικανότητα να προσανατολίζονται στον άνεμο και χρησιμοποιούνται συχνότερα για συστήματα FPSO που βασίζονται σε δεξαμενόπλοια (Lovie 1996).

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία συστημάτων SPM που περιλαμβάνουν:

- Αγκυροβολία αλυσοειδούς γραμμής με άγκυρα (CALM),
- Αγκυροβολία με μονό άγκιστρο (SALM),
- Αγκυροβολία πυργίσκων και
- Αγκυροβολία σταθερού πύργου.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται ορισμένα από τα συνήθη χρησιμοποιούμενα συστήματα αγκυροβολίας για FPSO (Σχήμα 1.1):



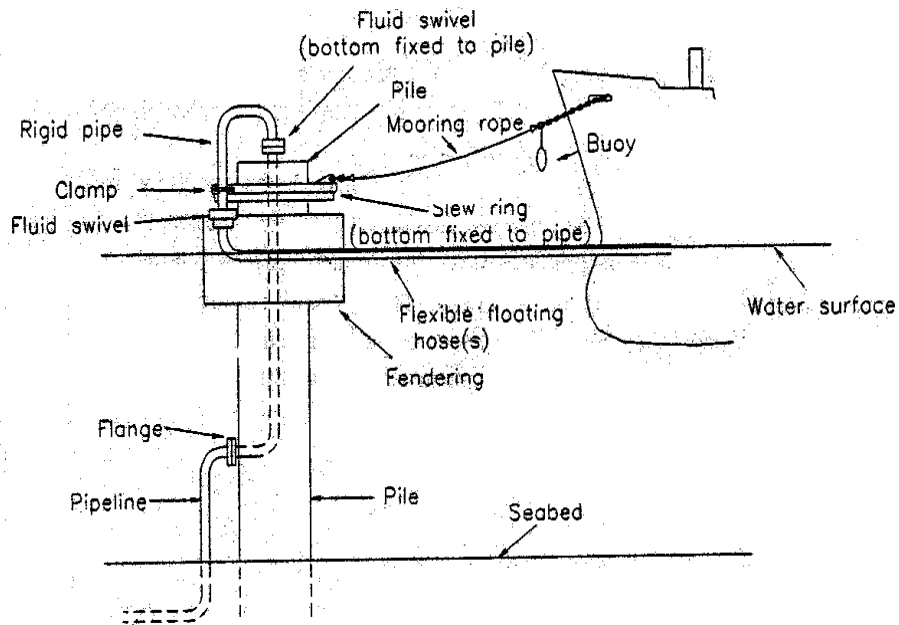
Εικόνα 1.1 Διάφορα σχέδια συστήματος πρόσδεσης

Κύριες παράμετροι σχεδιασμού που μπορεί να επηρεάσουν την επιλογή του τύπου αγκυροβολίας ενός συστήματος FPSO περιλαμβάνουν το μέγεθος του σκάφους, τις κινήσεις του σκάφους, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, το βάθος του νερού, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τις διατάξεις εκφόρτωσης και οπωσδήποτε τους αγωγούς μεταφοράς υδρογονανθράκων από τα κοιτάσματα και τις υποθαλάσσιες εγκαταστάσεις. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί είναι εάν οι εγκαταστάσεις μπορούν να επιθεωρηθούν και να εντοπιστούν πιθανά ελαττώματα προτού προκαλέσουν αστοχίες, όπως και εάν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν πιθανές επισκευές.

1.3 Η έννοια της αγκυροβόλησης ενός σημείου (SPM)

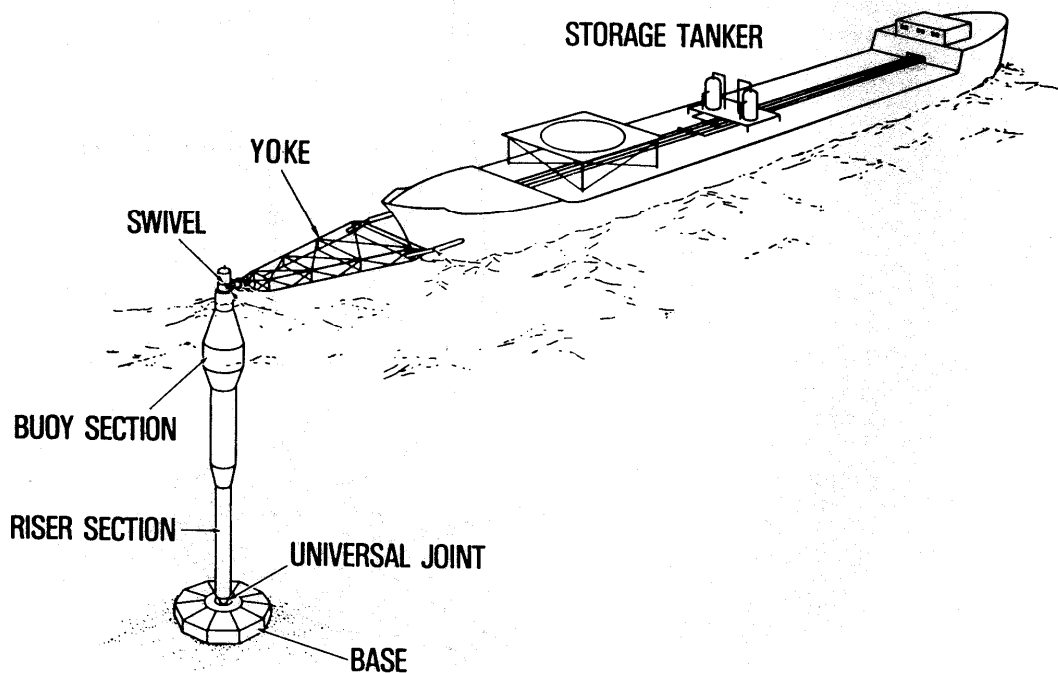
Τα συμβατικά συστήματα αγκυροβόλησης, στα οποία είναι ουσιαστικά ορισμένη η γωνία στροφής του σκάφους, είναι κατάλληλα για semi-submersibles, τα οποία δεν είναι πολύ ευαίσθητα στην γωνία προσβολής του προσπίπτοντος κύματος. Όμως από την άλλη μεριά, οι πλατφόρμες τύπου πλοίου (ship-shaped) είναι πολύ ευαίσθητες στην κατεύθυνση των κυμάτων σε ανοιχτή θάλασσα, εκτός και αν οι κλιματολογικές συνθήκες είναι πολύ ήπιες ή τα κύματα προσπίπτουν στην κατασκευή πάντοτε από την ίδια κατεύθυνση. Έτσι στην γενική περίπτωση, είναι συνήθως καλύτερο να επιτρέπεται στην πλατφόρμα να προσανατολίζεται στη συνιστάμενη διεύθυνση των επικρατουσών περιβαλλοντικών συνθηκών στην περιοχή εγκατάστασης, με περιστροφή γύρω από το σύστημα πρόσδεσής της, κάτι που μειώνει σημαντικά τις δυνάμεις αγκυροβολίας. Ως εκ τούτου, θα υιοθετηθεί η ιδέα της πρόσδεσης ενός σημείου (SPM).

Η απλούστερη διαμόρφωση αγκυροβολίας ενός FPSO, που να του επιτρέπει να προσανατολίζεται στον καιρό, είναι να εγκαταστήσει έναν σταθερό πύργο όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Ένας σταθερός πύργος είναι μια καλή εναλλακτική λύση εάν το βάθος του νερού και τα ύψη των κυμάτων δεν είναι τόσο μεγάλα. Ωστόσο, η ροπή κάμψης στον πύργο αυξάνεται με το βάθος του νερού και υπάρχει κίνδυνος εκτεταμένης ζημιάς σε περίπτωση ακόμα και μικρής σύγκρουσης από το σκάφος.



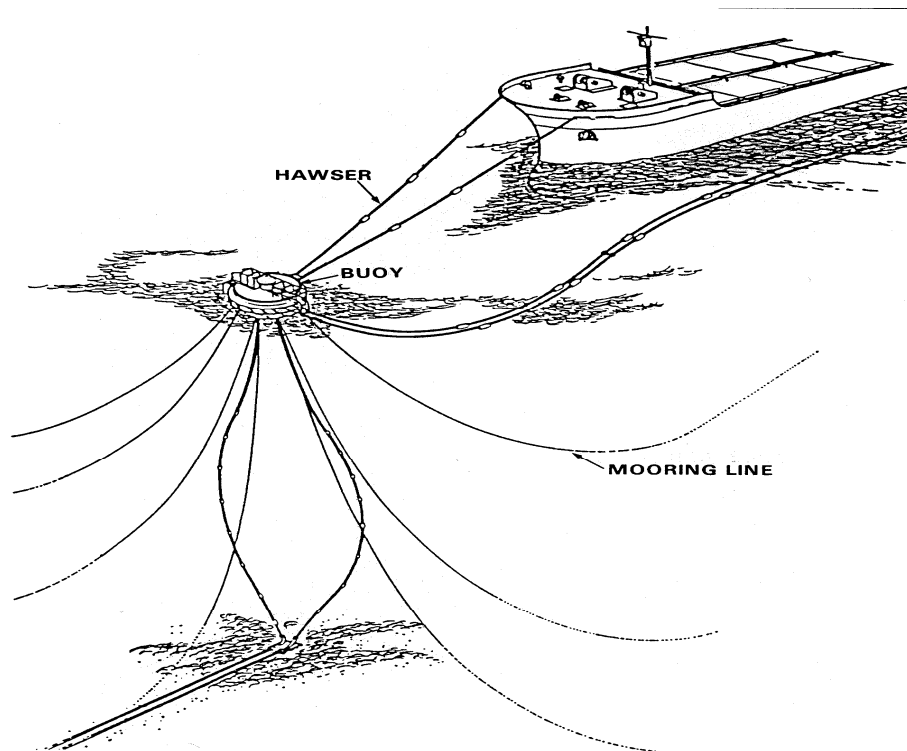
Εικόνα 1.2 Σύστημα πρόσδεσης σταθερού πύργου

Η αγκυροβόληση με μόνο άγκιστρο (SALM), όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 1.3, αποτρέπει τη ζημιά από σύγκρουση στα swivels, τοποθετώντας τα κάτω από το νερό και κάτω από το επίπεδο της καρίνας του δεξαμενόπλοιου. Οποιαδήποτε ζημιά θα επηρεάσει μόνο το απλό buoy επιφανείας, το οποίο είναι σχετικά φτηνό για επισκευή. Τα υποβρύχια swivels, όπως είναι προφανές, έχουν σοβαρά μειονεκτήματα συντήρησης.



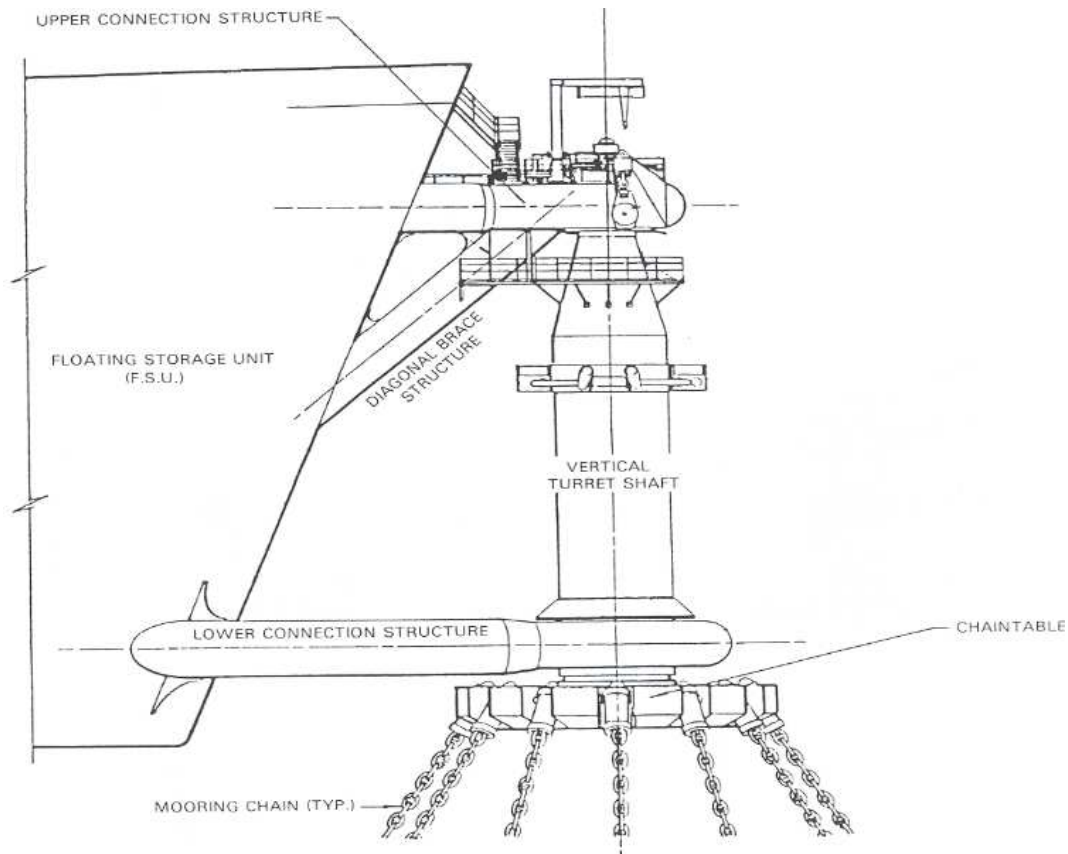
Εικόνα 1.3 Σύστημα πρόσδεσης με μονό άγκιστρο (Single anchor leg mooring – SALM)

Η πρόσδεση αλυσοειδούς γραμμής με άγκυρα (CALM) προκύπτει εάν ο σταθερός πύργος αντικατασταθεί από έναν πλωτήρα αγκυροβόλησης (Σχήμα 1.4). Το CALM είναι λιγότερο ευαίσθητο στο βάθος του νερού και στο ύψος του νερού και επίσης είναι λιγότερο πιθανό να προκληθεί ζημιά από σύγκρουση σε σχέση με την πρόσδεση σταθερού πύργου. Λόγω του γεγονότος ότι τα mooring και fluid swivels βρίσκονται πάνω στον πλωτήρα, οποιαδήποτε ζημιά από το σκάφος μπορεί να θέσει την μονάδα εκτός λειτουργίας για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα.



**Εικόνα 1.4 Σύστημα πρόσδεσης αλυσοειδούς γραμμής με άγκυρα
(Catenary anchor leg mooring – CALM)**

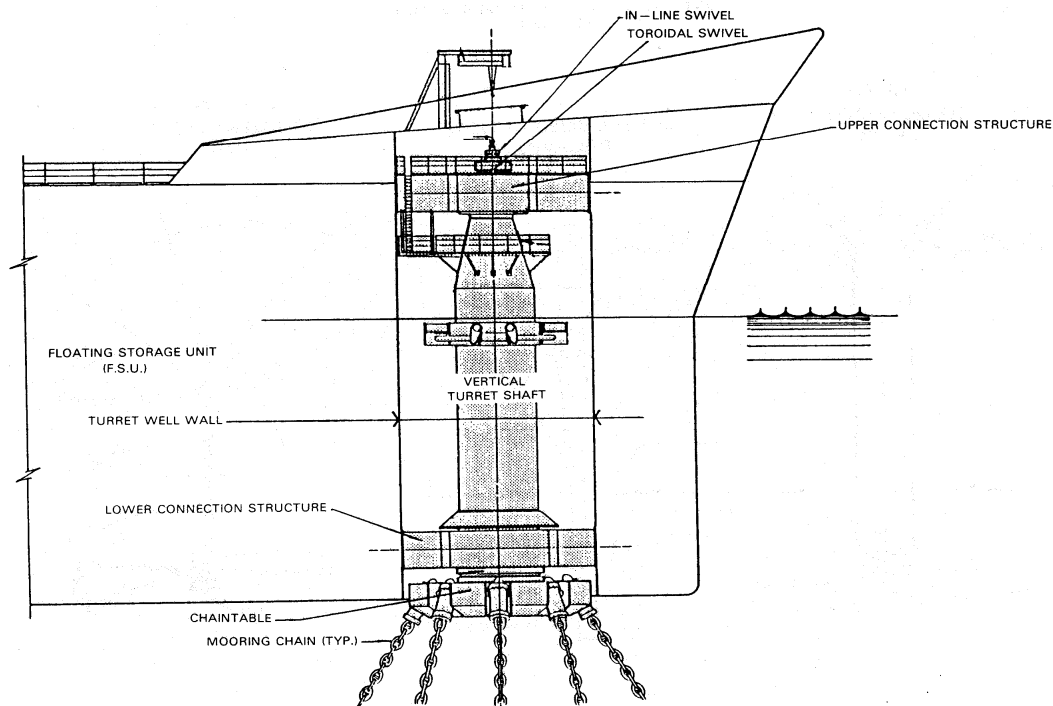
Ο πλωτήρας σε ένα σύστημα CALM μπορεί να αποφευχθεί και ο περιστρεφόμενος δίσκος και τα swivels συνδέονται απευθείας με την πλώρη ή την πρύμνη του δεξαμενόπλοιου. Το σύστημα ονομάζεται σύστημα εξωτερικής τοποθέτησης πυργίσκου και φαίνεται στο σχήμα 1.5. Αυτό μειώνει τον αριθμό αρθρωτών δομικών αρμών και περιστροφών στο σύστημα. Σε νερά μεγαλύτερου βάθους υπάρχει ένα ακόμα πλεονέκτημα λόγω του γεγονότος ότι θα χρειαζόταν ένας πολύ μεγάλος πλωτήρας για να στηρίξει το βάρος των γραμμών πρόσδεσης. Αλλά από την άλλη πλευρά οι απαιτήσεις συντήρησης αυξάνονται επειδή η εγκατάσταση είναι εκτεθειμένη στις έντονες καιρικές συνθήκες, χωρίς καμία προστασία.



Εικόνα 1.5 Σύστημα πρόσδεσης εξωτερικού πυργίσκου (External turret)

Μια άλλη εναλλακτική λύση είναι το σύστημα πυργίσκου να τοποθετηθεί στο εσωτερικό του σκάφους, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6 (σύστημα εσωτερικής τοποθέτησης πυργίσκου). Αυτό είναι βολικό όταν πρέπει να εγκατασταθεί μεγάλος αριθμός αγωγών παραγωγής, παροχής νερού, εξαγωγής και ελέγχου, και επομένως απαιτείται ένας μεγάλος πυργίσκος και περιστρεφόμενο σύστημα. Όταν η περιστρεφόμενη διάταξη γίνεται πολύ μεγάλη είναι καλύτερα προστατευμένη και με δυνατότητα πιο εύκολης συντήρησης σε έναν εσωτερικό πυργίσκο. Αν ο πυργίσκος είναι τοποθετημένος πίσω από την πλώρη, το δεξαμενόπλοιο θα πάρει μια γωνία προς τη θάλασσα, το κύμα, τον άνεμο και το ρεύμα, έτσι ώστε να επιτευχθεί ισορροπία στις καιρικές συνθήκες. Δεδομένου ότι οι ροπές διέπονται από τις δυνάμεις κυματισμού, αυτό θα κρατήσει το FPSO με πρόσωπο στον καιρό. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί

ένα σύστημα πρόωσης εγκαταστημένο στην πρύμνη του σκάφους για τον έλεγχο της γωνίας στροφής, αν ο πυργίσκος έχει τοποθετηθεί στο μέσο του πλοίου. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη σχεδιασμού του πυργοειδούς συστήματος αγκύρωσης που μπορούν να υιοθετηθούν, όταν αυτό τοποθετείται στο εσωτερικό του σκάφους. Τα ρουλεμάν μπορούν να τοποθετηθούν μέσα στο κύτος όπου οι εφαρμοζόμενες ροπές είναι μικρότερες αλλά η πρόσβαση για την εγκατάσταση και συντήρηση είναι δύσκολη ή ίσως είναι προτιμότερο να τοποθετηθούν στο επίπεδο του καταστρώματος. Στην περίπτωση μας και για νερά μεγάλου βάθους, θα υιοθετηθεί ένα εσωτερικό σύστημα αγκυροβόλησης πυργίσκου, τοποθετημένο εγκάρσια πίσω από την πλώρη, όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 1.6.



Εικόνα 1.6 Σύστημα πρόσδεσης εσωτερικού πυργίσκου (Internal Turret)

1.4 Εξελίξεις στα πυργοειδή συστήματα πρόσδεσης ενός FPSO

Σύμφωνα με τη φύση αυτού του συστήματος, όλες οι γραμμές πρόσδεσης, οι οποίες θα

μπορούσαν να είναι κατασκευασμένες από αλυσίδα, σύρμα, σχοινί υψηλής τεχνολογίας ή από συνδυασμό, θα συνδεθούν στο σκάφος στη βάση του πυργίσκου. Αυτή η σύνδεση θα μπορούσε να είναι ο τελευταίος κρίκος μιας αλυσίδας σε έναν chain table ή ένα σύστημα με fairleads, με τη γραμμή αγκυροβόλησης να συνδέεται με winches για να ρυθμίσει την θέση του σκάφους.

Ένα πυργοειδές σύστημα αγκυροβόλησης επιτρέπει στο σκάφος να προσανατολίζεται στον καιρό (μερικές φορές με την βοήθεια προωστήριας εγκατάστασης που αναφέρθηκε προηγούμενα) με το να επιτρέπει την περιστροφή του γύρω από τον πυργίσκο, φέροντας παράλληλα τις γραμμές παραγωγής και πρόσδεσης. Αυτό μειώνει ουσιαστικά τα περιβαλλοντικά φορτία. Οι γραμμές πρόσδεσης συνδέονται στον πυθμένα με αγκύρια ή πασάλους. Λόγω του γεγονότος ότι όλες οι γραμμές πρόσδεσης εισέρχονται στη βάση του πυργίσκου το σύστημα αναφέρεται ως αγκυροβόλιο με ένα σημείο (SPM).

Ο πυργίσκος μπορεί να τοποθετηθεί είτε στην περιοχή της πλώρης ή της πρύμνης του σκάφους, είτε να τοποθετηθεί εγκάρσια μέσα στο δεξαμενόπλοιο όπως παρουσιάσαμε στην προηγούμενη ενότητα (Εικόνα 1.5 - Σχήμα 1.6).

Αποτελείται από ένα μεγάλο σωλήνα που συνδέεται με το σκάφος μέσω ενός δακτυλιοειδούς ρουλεμάν. Το ρουλεμάν είναι το κύριο συστατικό και είναι ένα έδρανο μεγάλης διαμέτρου, συνήθως κυλίνδρου. Οι γραμμές αγκυροβόλησης συνδέονται με τον πυργίσκο, και το δακτυλιοειδές ρουλεμάν επιτρέπει την περιστροφή του σκάφους. Οι εύκαμπτοι σωλήνες (συνήθως ενισχυμένοι σωλήνες πολυμερούς υλικού για τη μεταφορά πετρελαίου / αερίου μεταξύ θαλάσσιου βυθού και FPSO) φέρνουν τα παραγόμενα πετρελαιοειδή στον πυργίσκο (Lunde 1997). Fluid swivels (παρέχουν τον περιστροφικό σύνδεσμο στο σύστημα μεταφοράς) μεταφέρουν τα πετρελαιοειδή στο σκάφος.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι επιθυμητό να έχουμε αυτά τα συστήματα πυργίσκων σε παθητική περιστροφή, πράγμα που απαιτεί μια αποτελεσματική διαμόρφωση, ιδιαίτερα στην περίπτωση, όπως συμβαίνει συχνά, που πολλοί πυργίσκοι είναι εκ των υστέρων τοποθετημένοι στο σκάφος στα πλαίσια μετατροπής. Η εγκατάσταση του συστήματος εδράνων με τον πυργίσκο εντός της κατασκευαστικής δομής του σκάφους απαιτεί εκτεταμένο σχεδιασμό και ανάλυση για να διασφαλιστεί ότι οι αμοιβαίες παραμορφώσεις τους δεν θα επηρεάσουν τη μακροζωία του συστήματος εδράνων. Η ελεύθερη λειτουργία των τριβέων είναι επίσης ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αξιοπιστία ενός συστήματος πρόσδεσης. Πρέπει να λιπαίνονται, κατά προτίμηση με αυτόματο σύστημα και να διαθέτουν σύστημα πολλαπλών παρεμβυσμάτων για την διατήρηση της στεγανότητας από το θαλάσσιο περιβάλλον. Πρέπει να εγκαθίσταται ένα σύστημα ανίχνευσης των διαρροών για την παρακολούθηση της στεγανότητας και την έγκαιρη προειδοποίηση για την φθορά των παρεμβυσμάτων (Brouwer 1996).

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης της πρόσδεσης ενός FPSO σε βαθιά νερά, όπως στην περίπτωσή μας, είναι η εφαρμογή ενός πυργοειδούς συστήματος αγκυροβόλησης. Αυτό θα διαφανεί στην συνέχεια της μελέτης σαν αποτέλεσμα των λόγων που θα προκύψουν από τη συγκριτική εξέταση των συστημάτων πρόσδεσης που θα οδηγήσει στην πιο κατάλληλη επιλογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΓΡΑΜΜΕΣ ΠΡΟΣΔΕΣΗΣ

ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΧΟΙΝΙΑ ΑΠΟ

ΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

2.1 Υλικά από συνθετικές ίνες σε σχέση με συμβατικές

Η εφαρμογή των ελαφρών, σχετικά χαμηλού συντελεστή συνθετικών τεχνητών ινών επιτρέπει στα προϊόντα να σχεδιαστούν ώστε στην ουσία να επιπλέουν, εξουδετερώνοντας στην ουσία το πρόβλημα του ιδίου-βάρους. Η γωνία της συνθετικής γραμμής στην πλατφόρμα είναι πολύ πιο ρηχή από αυτή της αλυσοειδούς καμπύλης των συρματοσχοίων. Οι κατακόρυφες δυνάμεις στην πλατφόρμα ελαχιστοποιούνται. Η οριζόντια συνιστώσα δύναμης είναι πολύ αποτελεσματική στην ελαχιστοποίηση των μετατοπίσεων της πλατφόρμας. Σχεδόν όλη η δύναμη επαναφοράς προέρχεται από την ελαστικότητα της γραμμής αγκυροβόλησης και συνεπώς οι κινήσεις της πλατφόρμας που προκαλούνται από την επίδραση των κυματισμών δεν παράγουν υψηλά φορτία.

Έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συρματοσχοίνα, επειδή είναι πολύ εύκαμπτα (πιο εύκολα στον χειρισμό) και μπορούν να απορροφήσουν τις επιβαλλόμενες δυναμικές καταπονήσεις μέσω έκτασης χωρίς να προκαλέσουν υπερβολικές δυναμικές τάσεις (Chaplin, Reading et al., 1992).

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι η μικρότερη τιμή του Young's Modulus σε σύγκριση με τα συρματοσχοίνα. Ως εκ τούτου είναι εξαιρετικά ελαστικά υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Η μέγιστη τάση στα συνθετικά σχοινιά, κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας, φθάνει ή υπερβαίνει τη μέγιστη τάση της τάξης του 25%, αφού από το όριο θραύσης, φθάνει ή υπερβαίνει τη μέγιστη τάση της τάξης του 25%, αφού

η μέγιστη τάση στα συνηθισμένα σχοινιά είναι 2%. Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης των συνθετικών κλάδων είναι συχνά μη γραμμική, καθώς η σχέση τάσης-καταπόνησης στα συρματόσχοινα είναι γραμμική. Επίσης, η απόσβεσή τους είναι μικρή και προκαλείται κυρίως από frictional interslipage μεταξύ των κλώνων (Triantafyllou 1997).

Επιπλέον, δεν διαβρώνονται (ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των συρματόσχοινων), μπορούν να ξεπεράσουν ορισμένα προβλήματα στο σχεδιασμό και την εγκατάσταση συστημάτων πρόσδεσης σε βαθιά νερά και κυρίως αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη μείωση του κόστους.

Αντίθετα, η τεχνολογία των σχοινιών από συνθετικές ίνες είναι σε μεγάλο βαθμό στο στάδιο της ανάπτυξης και ορισμένα υλικά και μηχανικές ιδιότητες των συνθετικών σχοινιών δεν είναι τόσο καλά επιβεβαιωμένα σε σύγκριση με αυτά των παραδοσιακών σχοινιών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά συντηρητικές σχεδιαστικές εφαρμογές, με αποτέλεσμα να εξουδετερώνονται τα πλεονεκτήματά τους.

Η μεγάλη δυναμική ενέργεια που αποθηκεύεται στα συνθετικά σχοινιά μπορεί να προκαλέσει διάφορες βλάβες στην εγκατάσταση και κινδύνους για την ανθρώπινη ζωή, εάν εφαρμοστούν υψηλές τάσεις στην γραμμική πρόσδεσης.

Η υπεριώδης ακτινοβολία (UV) μπορεί να αλλοιώσει τα χαρακτηριστικά ορισμένων ειδών σχοινιών από συνθετικές ίνες σε μεγαλύτερη ή μικρότερη έκταση. Κάποια άλλα είναι εντελώς ανεπηρέαστα. Για την αποφυγή των επιπτώσεων από την υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί τα συνθετικά σχοινιά να επένδυθουν ή να δεχθούν επεξεργασία με αναστολείς UV, οι οποίοι μετριάζουν το πρόβλημα (John F. Flory 1997). Η ακτινοβολία UV επηρεάζει μόνο τις ίνες στην επιφάνεια του σχοινιού, οι οποίες εκτίθενται στο ηλιακό φως. Αυτό μπορεί να είναι σημαντικό για τα μικρά

σχοινιά και σε μικρότερο βαθμό για τα σχοινιά μεγάλης διαμέτρου, ακόμη και αν δεν είναι επεξεργασμένα ή επενδεδυμένα.

Τα συνθετικά σχοινιά ενδέχομένως να υποφέρουν από δάγκωμα ψαριών και αυτό το φαινόμενο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί σε σχοινιά μικρών διαμέτρων και πιθανώς δεν αποτελεί πρόβλημα για μεγαλύτερα σχοινιά. Τα ψάρια συνήθως δαγκώνουν μόνο αντικείμενα, τα οποία πιστεύουν ότι είναι τροφή. Ένα μικρό σχοινί που δονείται ή ένα μικρό αντικείμενο μπορεί να τα προσελκύσει πιστεύοντας ότι είναι τροφή. Τα μεγάλα σχοινιά είναι πολύ λιγότερο πιθανόν να θεωρηθούν τροφή. Επίσης, λίγα ψάρια μπορούν να δαγκώσουν ένα μεγάλο σχοινί.

Όπου το δάγκωμα των ψαριών είναι γνωστό ή θεωρείται ότι αποτελεί πρόβλημα, το συνθετικό σχοινί μπορεί να επενδυθεί και να ενισχυθεί κατάλληλα (Bartholomew 1986). Η επένδυση που τοποθετείται σε ορισμένα σχοινιά συνθετικών ινών θα χρησιμεύσει ως προστασία. Παρόμοιος μανδύας τοποθετείται επίσης σε μερικά συρματόσχοινα για προστασία από τη διείσδυση και τη διάβρωση με θαλασσινό νερό. Η βλάβη που μπορεί να προκληθεί από το δάγκωμα του ψαριού, που διεισδύει σε μια τέτοια επένδυση, θα έχει μικρή επίδραση σε ένα σχοινί από συνθετικές ίνες. Αντίθετα μια τέτοια διείσδυση θαλασσινού νερού σε συρματόσχοινο θα προκαλέσει διάβρωση και πιθανή βλάβη.

2.2 Μηχανικές ιδιότητες των συνθετικών υλικών

Όσον αφορά τα σχοινιά συνθετικών ινών σε αντίθεση με τα συμβατικά, η ελάχιστη τάση είναι επίσης ένα κρίσιμο ζήτημα, καθώς ο λυγισμός των ινών πρέπει να αποφεύγεται. Αυτό επιτυγχάνεται σχεδιαστικά με το να διατηρείται ένα λογικό επίπεδο ελάχιστης τάσης σε ακραίες συνθήκες. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απαίτηση να

διατηρήται περίπου στο 5% της αντοχής θραύσης με περίοδο επανεμφάνισης των σχετικών συνθηκών (return conditions), 1 έτος (Banfield S. και N. 1998).

Τα υλικά των συνθετικών ινών σε αντίθεση με αυτά από χάλυβα είναι ιξωδοελαστικά (visco-elastic) στη συμπεριφορά. Τα ελαστικά μοντέλα μπορούν να είναι μόνο μια προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφορά τους. Η διακύμανση της ακαμψίας των σχοινιών από συνθετικές ίνες σε συνάρτηση με το επίπεδο φορτίου, το εύρος, τη συχνότητα και το ιστορικό σημαίνει ότι συχνά πρέπει να χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία τιμές ελαστικής ακαμψίας για να εκτιμηθεί σχεδιαστικά η αγκυροβόληση με σχοινί συνθετικών ινών. Για παράδειγμα, ο υπολογισμός των μέσω και αργά μεταβαλλόμενων αποκρίσεων της κατασκευής, μπορεί να απαιτεί τη χρήση χαμηλότερων τιμών ελαστικής ακαμψίας από εκείνες που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των πρωτοτάξιων αποκρίσεων στις συχνότητες του κύματος.

2.3 Συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται για συνθετικά σχοινιά

Τα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται για σχοινιά ινών μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- Νάιλον (επίσης γνωστό με τη χημική του ονομασία Πολυαμίδιο): Χρησιμοποιείται ευρέως στις γραμμές αγκυροβολίας και ρυμούλκησης από τη δεκαετία του 1950. Έχει το χαμηλότερο συντελεστή ακαμψίας, και έτσι ευνοείται εκεί όπου η μεγάλη επιμύκηση είναι η πιο σημαντική. Είναι η ισχυρότερη των κοινών ινών όταν είναι στεγνή. Ωστόσο, οι βρεγμένες ίνες νάυλον χάνουν περίπου το 10% της αντοχής τους, και τα βρεγμένα νάιλον σχοινιά μπορούν να χάσουν μέχρι και το 20% της αντοχής τους. Τα υγρά νάιλον σχοινιά υποφέρουν επίσης λόγω της ερπυσμού και της εσωτερικής τριβής κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης. Η προκύπτουσα μικρή διάρκεια ζωής

των μεγάλων σχοινιών από νάιλον, τα καθιστά γενικά ακατάλληλα για μόνιμες αγκυροβολίες βαθέων υδάτων (John F. Flory 1997).

- Πολυεστέρας: Τα σχοινιά πολυεστέρα είναι πολύ ανθεκτικά σε φορτία κυκλικής εφελκυστικής κόπωσης. Πολύ ισχυρό σχοινί πολυεστέρα με σχετικά υψηλό συντελεστή μπορεί να γίνει με τις νεότερες υψηλής ποιότητας ίνες πολυεστέρα που είναι τώρα διαθέσιμες. Μπορούν να είναι τόσο ισχυρά όσο το νάιλον όταν στεγνώνουν. Τα σχοινιά πολυεστέρα δεν χάνουν τη δύναμή τους όταν είναι βρεγμένα και είναι γενικά ισχυρότερα από το νάιλον σε υγρή κατάσταση. Έτσι, τα σχοινιά από πολυεστέρα αντικαθιστούν σχοινιά από νάιλον σε πολλές κρίσιμες συμβατικές θαλάσσιες εφαρμογές και είναι καλοί υποψήφιοι για συστήματα αγκυροβολίας σε μεγάλα βάθη.
- Πολυπροπυλένιο: Οι ίνες πολυπροπυλενίου είναι ελαφρύτερες από το νερό. Τα σχοινιά πολυπροπυλενίου προτιμώνται μερικές φορές για τον λόγο αυτό. Επιπλέον, προτιμώνται επειδή είναι φθηνότερες από τις άλλες. Ωστόσο, το προπυλένιο είναι ασθενέστερο από το νάιλον και τον πολυεστέρα. Το σχοινί πολυπροπυλενίου μπορεί να θερμανθεί και να χάσει τη δύναμή του κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης υψηλής ταχύτητας και μπορεί να έχουμε ερπυσμό σε υψηλά φορτία. Το πολυπροπυλένιο δεν είναι κατάλληλο για αγκυροβόλια σε μεγάλα βάθη.
- Πολυπροπυλένιο και πολυεστέρας: Οι ίνες πολυπροπυλενίου και πολυεστέρα συνδυάζονται μερικές φορές στην κατασκευή σχοινιών. Αυτά τα υβριδικά σχοινιά μπορούν να έχουν ιδιότητες ακαμψίας και αντοχής παρόμοιες με εκείνες των σχοινιών από πολυεστέρα αλλά με μικρότερο βάρος και κόστος και μπορούν να έχουν μεγαλύτερη αντοχή στην επιφανειακή τριβή και την ανάπτυξη θερμότητας από τα σχοινιά πολυπροπυλενίου.

2.4 Ίνες High Modulus για παραγωγή συνθετικών σχοινιών

Ο όρος High Modulus χαρακτηρίζει μια κατηγορία συνθετικών ινών που έχουν ελαστικά στοιχεία με χαρακτηριστικά σημαντικά υψηλότερα από τις συμβατικές ίνες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αυτές οι νεότερες ίνες έχουν επίσης σημαντικά υψηλότερες αντοχές στη θραύση. Αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- Aramid: Είναι η πρώτη από αυτές τις νέες συνθετικές ίνες υψηλής απόδοσης, παρουσιάστηκε ως dupont Kevlar στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Το Kevlar χρησιμοποιήθηκε σύντομα με επιτυχία σε συστήματα πρόσδεσης για σημαντικές οργάνων (Instrumentation Buoys).

Τα αρωματικά πολυαμίδια είναι ιοτρόποι ίνες που έχουν υποβληθεί σε φυγοκέντρωση διαλύτη. Οι ίνες αραμιδίου παράγονται με τον ίδιο τρόπο όπως και άλλες άλλες τεχνητές ίνες μέσω της διαδικασίας σταδίων πολυμερισμού, νηματοποίησης και έλξης. Το πολυμερές αραμιδίου μπορεί να κατασκευαστεί από αρωματική διαμίνη και τереφθαλικό οξύ. Τα αραμίδια έχουν πάνω από το διπλάσιο της αντοχής του νάυλον ή του πολυεστέρα. Η επιμήκυνση τους είναι 1% στην περιοχή λειτουργίας τους, η οποία είναι διπλάσια από τα συρματόσχοινα, αλλά μόνο το ¼ της ακαμψίας των σχοινιών από πολυεστέρα. Οι ιδιότητες συμπίεσης τους είναι κακές λόγω του σχηματισμού kink bands. Τα αραμίδια υποφέρουν από αλλοίωση λόγω της υπερϊώδους ακτινοβολίας. Η αντοχή τους στην τριβή δεν είναι τόσο καλή και υποφέρουν από φθορά. Έτσι, για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε πλεκτό κάλυμα για προστασία.

Υπάρχουν τρεις μεγάλες μάρκες αραμιδικών ινών. Αυτά είναι:

- Kevlar,

- Twaron και
- Technora.

Γραμμές πρόσδεσης με Kevlar έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε αρκετές πειραματικές εφαρμογές αγκυροβολίας πλατφορμών. Το Twaron Aramid Fiber, που κατασκευάζεται από την Akzo, είναι το ίδιο με το Kevlar. Η Technora, είναι μια συνθετική ίνα συμπολυμερούς κατασκευασμένη από την Teijin, έχει παρόμοιες ιδιότητες αλλά μπορεί να μην είναι τόσο επιρρεπής σε κόπωση αξονικής συμπίεσης όπως οι συμβατικές ίνες αραμιδίου (Burns 1994).

- Πολυαιθυλένιο υψηλού συντελεστή (HMPE): Πρόκειται για μια μορφή ινών από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας. Η πρώτη ίνα HMPE, Dyneema, αναπτύχθηκε από την DSM στην Ολλανδία σε συνεργασία με την Toyobo της Ιαπωνίας. Η πρώτη εμπορική ίνα HMPE, SpectraI, παρουσιάστηκε από την Allied στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Οι ίνες HMPE που συζητήθηκαν παράγονται με σχετικά δαπανηρή διαδικασία περιστρεφόμενου πηκτώματος. Μια παραλλαγή που διαμορφώνεται από μια διαδικασία περιστροφής και έλξης με τήξη έχει χαμηλότερες ιδιότητες. Τα πολύ μακρά μόρια του HMPE διαλύονται σε ένα πτητικό διαλύτη και περιστρέφονται μέσω ενός στροφέα. Στο διάλυμα τα μόρια που σχηματίζουν συστάδες στην στερεή κατάσταση απογυμνώνονται και παραμένουν σε αυτή την κατάσταση αφού το διάλυμα ψυχθεί για να δώσει νημάτια. Καθώς τραβιέται η ίνα, επιτυγχάνεται ένα πολύ υψηλό επίπεδο μακρομοριακού προσανατολισμού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα πολύ μεγάλη συνεκτικότητα και modulus (Graczyk T 1995). Οι ίνες HMPE είναι ελαφρύτερες από το νερό. Ως εκ τούτου, έχει υψηλότερη ειδική ισχύ από το αραμίδιο. Έχει σχετικά χαμηλό σημείο τήξης. Παρουσιάζει μια τάση για ερπυσμό και να μπορεί να διαρρηχθεί λόγω αυτού κάτω από συνεχή υψηλά φορτία. Το HMPE δεν παρουσιάζει προβλήματα κόπωσης αξονικής συμπίεσης. Έχει χαμηλό συντελεστή τριβής, πράγμα που σημαίνει

ότι μερικές φορές ο πυρήνας HMPE μπορεί να αποκολληθεί από το κάλυμμα της θήκης. Το HMPE δεν απορροφά νερό και έχει πολύ καλή αντοχή στην τριβή και επειδή δεν περιέχει δακτυλίους βενζολίου, δεν είναι επιρρεπείς σε επιθέσεις από επιθετικούς παράγοντες. Έχουν καλή αντίσταση στην υπεριώδη ακτινοβολία και σε συνάρτηση του βάρους είναι η ισχυρότερη ίνα στην αγορά (Stonor 1997).

- Αρωματικός Πολυεστέρας Υγρών Κρυστάλλων (LCAP): Σε συμβατικούς πολυεστέρες, οι μοριακές αλυσίδες είναι τυχαίες και ευέλικτες. Οι ίνες LCAP κατασκευάζονται με περαιτέρω προσανατολισμό των μοριακών αλυσίδων του πολυμερούς, μέσω ενός συνδυασμού ταχύτητας εξώθησης και σχεδίασης μετά την περιστροφή, ώστε να ληφθούν υψηλές ιδιότητες εφελκυσμού. Το πολυμερές εμφανίζει ανισότροπη συμπεριφορά στην κατάσταση τήξης και συνεπώς ο όρος Αρωματικό Υγρό Κρύσταλλο Πολυεστέρας (LCAP) (Graczyk T 1995).

Η Hoechst Celanese εισήγαγε πρόσφατα μια αρωματική πολυεστερική ίνα υγρού κρυστάλλου που ονομάζεται Vectram. Έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε καλώδια υψηλής απόδοσης και εισάγεται στους κατασκευαστές σχοινιών. Αυτή η κατηγορία ινών έχει καλύτερη αντοχή στην κόπωση αξονικής συμπίεσης και ερπυσμού από το αραμίδιο. Προς το παρόν, οι ίνες LCAP είναι πολύ πιο ακριβές από το αραμίδιο και το HMPE, αλλά υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής λιγότερο δαπανηρών ινών από αυτή τη διαδικασία.

- Πολυβενζοξαζόλη (PBO): Πρόκειται για μια νέα κατηγορία ινών, η οποία αναπτύχθηκε από την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ. Περιορισμένες ποσότητες PBO παράγονται τώρα και πραγματοποιούνται πειράματα για να διερευνηθεί η σκοπιμότητα για πιθανές εφαρμογές στην κατασκευή σχοινιών. Αυτή η πιο περίπλοκη ίνα είναι πολύ πιο ακριβή από τις άλλες. Το PBO έχει υψηλότερη αντοχή και υψηλότερο συντελεστή

από τις αναφερόμενες ίνες συνθετικού πολυμερούς, με εξαίρεση των Very High Modulus Aramids.

Οι γενικές ιδιότητες των διαφόρων ειδών ινών που αναφέρθηκαν πιο πάνω παρατίθενται για σύγκριση των ιδιοτήτων τους καθώς και με εκείνες του χαλύβδινου σύρματος στον ακόλουθο Πίνακα 2.1 (John F. Flory 1997).

Material	Specific Gravity	Specific Modulus, N/tex*	Specific Strength, N/tex*	Other Characteristics
Nylon (polyamide)	1.14	4	0.84	10-15% wet strength loss. Poor wet internal abrasion resistance. Moderate creep.
Polyester	1.38	10	0.84	Good wet internal abrasion resistance.
Polypropylene monofilament	0.91	8	0.73	Lighter than water, moderate creep, low strength.
Polypropylene multifilament	0.91	3.5	0.66	"
Aramid (Kevlar 29, Twaron, Technora)	1.44	49	2.03	Axial compression fatigue problem.
Aramid (Kevlar 49)	1.44	78	2.08	Extra high modulus.
HMPE (Spectra 900, Dyneema) High-Modulus Polyethylene.	0.94-0.97	124	2.65	Low melt point, high creep.
HMPE (Spectra 1000) High-Modulus Polyethylene.	0.94-0.97	175	3.10	Extra high modulus. High creep but less than S900.
LCAP (Vectran) Liquid Crystal Aromatic Polyester.	1.41	46	2.01	New fiber. Very little creep.
PBO (... Dow) Polybenzoxazole.	1.56	177	2.54	New fiber. Very high modulus. Expensive.
Steel (wire)	7.85	26	0.18	Typical properties. Corrodes.

* NOTES: Approximate values, actual properties may vary. The unit tex is the weight in grams of 1000 meters of material. $\text{Newton/tex} = 1 \text{ MN}/(\text{kg/m})$ where kg/m is rope linear density. Multiply Newtons/tex by 145,400 x SG to obtain lb/in².

Πίνακας 2.1 Γενικές ιδιότητες διαφόρων ειδών ινών

Ο κατάλογος των μηχανικών ιδιοτήτων για τα διάφορα συνθετικά σχοινιά, καθώς και εκείνων για σχοινιά από χάλυβα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα 2.2 (John F. Flory 1997).

Material	Rope Construction	Strength kN/cm ² *	Stiffness kN/cm ² *	Remarks
Nylon	braided	25	82	Dry strengths only, wet strength 10-20% less.
	plaited	20	87	
Polyester	braided	25	210	Wet and dry strengths. including jacket including jacket including jacket
	plaited	20	160	
	7-strand	45	400	
	parallel strand	50	550	
	parallel fiber	35	1000	
Aramid	36-strand	70	3,300	including jacket
	parallel strand	65	2,100	"
	parallel fiber	95	4,300	K29, inc. jacket
	parallel fiber	90	8,000	K49, inc. jacket
HMPE	braided	55	1,500	unjacketed
	7-strand	55	2,000	including jacket
	parallel strand	65	3,000	including jacket
Steel	7-strand	85	6,800	6x36 IWRC
	bridge strand	110	14,000	not including jacket
	solid bar	140	21,000	4340 steel

* NOTES: Approximate values, actual properties may vary widely. Cross sections based on cylindrical enclosed area including jacket where applicable. Multiply by 1430 to convert to lb/in².

Πίνακας 2.2 Μηχανικές ιδιότητες των συνθετικών σχοινιών

Αυτές οι τιμές είναι για σχοινιά διαμέτρου 50 έως 100 mm, με αντοχές θραύσης τουλάχιστον 1000 kN.

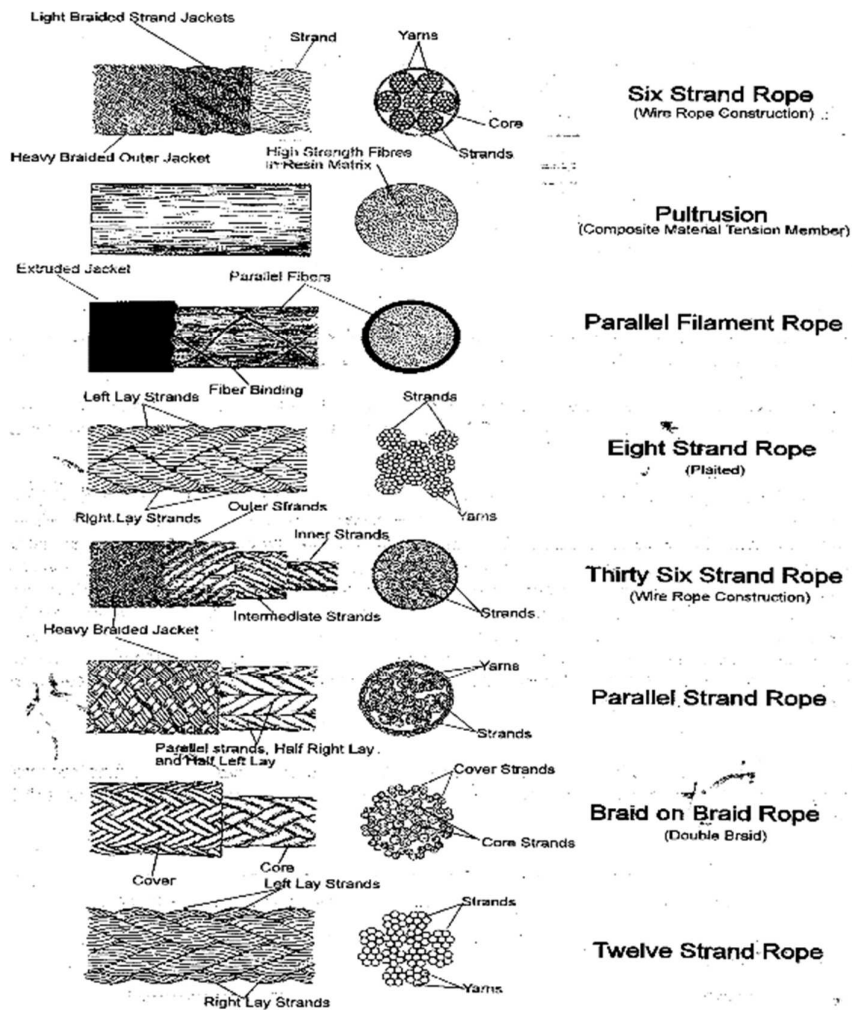
2.5 Υλικά για την κατασκευή των συνθετικών σχοινιών

Από τα ανωτέρω περιγραφέντα υλικά ινών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των σχοινιών από συνθετικές ίνες, τρία μπορούν να θεωρηθούν ως οι κύριοι υποψήφιοι για εφαρμογές αγκυροβόλησης στην ανοικτή θάλασσα. Αυτά είναι πολυεστέρες, αραμίδια και πολυαιθυλένιο υψηλού συντελεστή (HMPE).

Επιπλέον, πρέπει να αναφέρουμε ότι η ανάπτυξη αυτών των ινών προχωρεί γρήγορα, γεγονός που συχνά οδηγεί σε αλλαγές στις υφιστάμενες σειρές προϊόντων. Ακόμη και στο προϊόν ενός κατασκευαστή, υπάρχουν συχνά πολλές παραλλαγές με ειδικά πλεονεκτήματα. Οι πραγματικές ιδιότητες μπορούν επίσης να τροποποιηθούν με την πάροδο του χρόνου καθώς οι κατασκευαστές αναπτύσσουν βελτιωμένα φινιρίσματα, τα οποία λιπαίνουν την επιφάνεια και μειώνουν τη βλάβη στις ίνες καθώς τρίβονται μεταξύ τους. Απαιτούνται ακόμη εργασίες για τον καθορισμό τυποποιημένων τεχνικών ελέγχου για τη μέτρηση συγκεκριμένων ιδιοτήτων.

2.6 Φόρμες κατασκευής σχοινιών

Οι διάφορες συμβατικές και υψηλού συντελεστή ίνες που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να κατασκευαστούν σε σχοινιά με διαφορετικές διαμορφώσεις. Ορισμένες από τις κύριες μορφές που ενδείκνυται για αγκυροβόλια σε μεγάλα βάθη παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα 2.1



Εικόνα 2.1 Κατασκευαστικοί τύποι σχοινιών

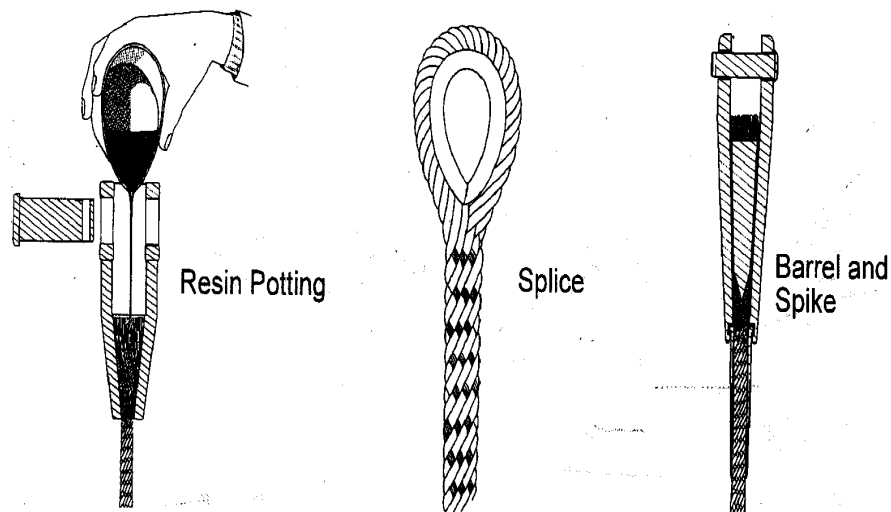
Ένα πλεονέκτημα της δομής ελικοειδούς σχοινιού είναι ότι τα νήματα μπορούν να υποστούν τοπικές βλάβες, αλλά να είναι αποτελεσματικά στη μεταφορά φορτίων σε άλλα σημεία του σχοινιού (OCIMF 1997 (δεύτερη έκδοση)). Οι κατασκευές τύπου παράλληλου κλώνου και έξι κλώνων τύπου σχοινιού επιτρέπουν την υψηλή μετατροπή της ίνας σε αντοχή σχοινιού, διατηρώντας παράλληλα μια ελικοειδή δομή που είναι επιδεκτική σε απολήξεις spliced.

2.7 Απολήξεις

Οι απολήξεις-τερματισμοί είναι κρίσιμοι για την απόδοση των σχοινιών συνθετικών ινών. Μπορούν να γίνουν τρεις διαφορετικές μορφές τερματισμού για σχοινιά από συνθετικές ίνες:

- Spliced τερματισμοί,
- Resin Potted Sockets,
- Barrel and spike τερματισμοί.

Στο παρακάτω σχήμα 2.2 εμφανίζονται αυτοί οι τρεις διαφορετικοί τύποι.



Εικόνα 2.2 Απολήξεις

Οι spliced απολήξεις θεωρούνται ως η βέλτιστη επιλογή για σχοινιά από συνθετικές ίνες.

2.8 Ιδιότητες σχοινιών συνθετικών ινών

2.8.1 Βάρος και ακαμψία

Το βάρος ανά μονάδα μήκους των σχοινιών από συνθετικές ίνες ποικίλλει λόγω διαφόρων παραγόντων όπως ο τύπος, η κατασκευή, ο κατασκευαστής και η διάμετρος. Συνεπώς, δεν είναι δυνατόν να αναπτυχθούν γενικευμένες σχέσεις μεταξύ βάρους και διαμέτρου και αυτά τα δεδομένα πρέπει να ληφθούν για συγκεκριμένα σχοινιά που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό. Ως αρχική ένδειξη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τύποι στον επόμενο πίνακα 2.3, βάσει των δεδομένων καταλόγου του κατασκευαστή.

Fibre rope type	Βάρος ανά μονάδα μήκους (N/m)
<i>Polyester</i>	$0.0067 d^2$ (d in mm)
<i>Aramid</i>	$0.00565 d^2$ (d in mm)
<i>HMPE</i>	$0.0062 d^2$ (d in mm)

Πίνακας 2.3 Βάρος ανά μονάδα μήκους

Το βυθισμένο βάρος αυτών των συρματόσχοινων ινών είναι συνήθως κοντά στο μηδέν επειδή οι σχετικές πυκνότητες αυτών των ινών κυμαίνονται από 0,94 έως 0,97 για HMPE έως 1,44 για το Aramid και 1,38 για τον πολυεστέρα όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1. Έτσι, τα σχοινιά HMPE μπορούν να θεωρηθούν ουδέτερα, ενώ τα υγρά βάρη από πολυεστέρα και αραμίδιο μπορούν να ληφθούν διαιρώντας τα βάρη που δίδονται στον προηγούμενο Πίνακα 2.3 κατά περίπου 4 (οι σχετικές πυκνότητες τους είναι περίπου 1,35-1,45).

Η αξονική ακαμψία των συνθετικών σχοινιών είναι μια κρίσιμη παράμετρος στην απόδοση ενός συστήματος αγκυροβόλησης κατασκευασμένου από συνθετικά σχοινιά σε σχέση με ένα σύστημα αγκύρωσης στο οποίο για την κατασκευή του χρησιμοποιούμε αλυσίδα ή συρματόσχοινο, δεδομένου ότι η αξονική τάση συμβάλλει σχεδόν καθ'ολοκληρία στην ακαμψία του συστήματος αγκυροβόλησης. Επομένως, η πλήρης κατανόηση αυτής της παραμέτρου είναι κρίσιμη για την επιτυχή χρήση των σχοινιών συνθετικών ινών σε εφαρμογές offshore και αυτό βρίσκεται ακόμα σε στάδιο έρευνας. Σύμφωνα με (Chaplin, Reading et al., 1992) τα σχοινιά συνθετικών ινών παρουσιάζουν φορτίο, εύρος φορτίου και ακαμψία εξαρτώμενη από τη συχνότητα. Επίσης, δείχνουν ότι υπάρχει διαφορά μεγαλύτερη από έναν συντελεστή δύο (2) μεταξύ της ακαμψίας κατά την εγκατάσταση, και ενός σχοινιού που έχει δουλέψει. Αυτός είναι βασικά ο λόγος για τον οποίο η εξαγωγή δεδομένων για την ακαμψία (AE) δεν μπορεί να βρεθεί σε γενική βάση. Ωστόσο, για τον αρχικό σχεδιασμό, οι τιμές AE μπορεί να θεωρηθούν ότι κυμαίνονται μεταξύ 5000 d^2 και 13000 d^2 όπου το d είναι σε mm, για σχοινιά πολυεστέρα. Για τα σχοινιά HMPE και Aramid, ως προκαταρκτική προσέγγιση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακαμψίες 3-4 φορές για πολυεστέρα ισοδύναμης διαμέτρου (CMPT 1998).

2.8.2 Αντοχή σε Θραύση

Η δύναμη θραύσης των σχοινιών από συνθετικές ίνες παρουσιάζει διαφοροποιήσεις λόγω του τύπου των ινών, της κατασκευής, του κατασκευαστή και του μεγέθους. Συνεπώς, κάθε λεπτομερής σχεδιασμός πρέπει να βασίζεται σε συγκεκριμένα δεδομένα. Για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τιμές που εμφανίζονται στον επόμενο πίνακα 2.4.

Fibre rope type	Breaking strength (N)
<i>Polyester</i>	$250 d^2$ (d in mm)
<i>Aramid</i>	$450 d^2$ (d in mm)
<i>HMPE</i>	$575 d^2$ (d in mm)

Πίνακας 2.4 Αντοχή σε Θραύση

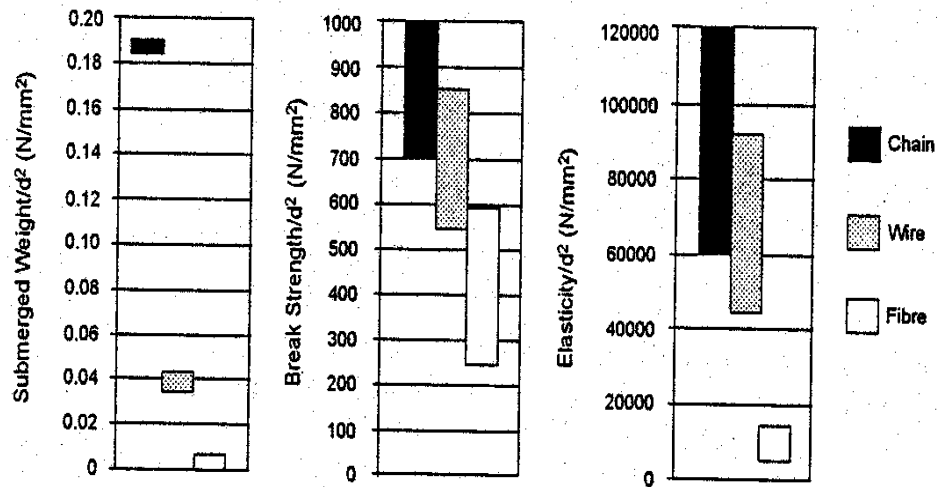
2.9 Συγκριτική επισκόπηση των χαρακτηριστικών των υλικών για χρήση τους στις γραμμές πρόσδεσης και την επιλογή των πιο υποσχόμενων

Οι τρεις βασικές παράμετροι για την επιλογή ενός συγκεκριμένου υλικού για την επιλογή της γραμμής πρόσδεσης είναι οι εξής:

- Η δύναμη θραύσης,
- Elastic (Young's) modulus,
- Βάρος ανά μονάδα μήκους (βυθισμένο).

Ο συντελεστής ελαστικότητας και το βυθισμένο βάρος ανά μονάδα μήκους συχνά καθορίζουν τη δύναμη θραύσης που απαιτείται για συγκεκριμένη διαμόρφωση μιας γραμμής πρόσδεσης. Καθώς η σχετική συμβολή των δυναμικών και στατικών φορτίων ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό, δεν είναι εφικτό να προσδιοριστεί εκ των προτέρων το βέλτιστο υλικό για το αγκυροβόλιο. Ωστόσο, μια συγκριτική ανασκόπηση των σημαντικών χαρακτηριστικών του υλικού για τις γραμμές αγκυροβόλησης πρέπει να δίνει μια ένδειξη των συνθηκών κάτω από τις οποίες μια συγκεκριμένη αγκυροβόληση είναι δυνατόν να λειτουργεί με τον καλύτερο τρόπο. Μια συγκριτική

ανασκόπηση των ιδιοτήτων σχοινιών, αλυσίδων και συρματόσχοινων παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα (CMPT 1998) (Σχήμα 2.3).



Εικόνα 2.3 Συγκριτική εξέταση των ιδιοτήτων αλυσίδας, συνθετικών σχοινιών και συρματόσχοινων

Σε αυτό το σχήμα φαίνεται το εύρος της αντοχής θραύσης, του συντελεστή ελαστικότητας και του βυθισμένου βάρους ανά μονάδα μήκους, που κανονικοποιείται από το τετράγωνο της ονομαστικής διαμέτρου της γραμμής πρόσδεσης. Είναι προφανές από το σχήμα 2.3 παραπάνω ότι καθώς αυξάνεται το βάθος του νερού, τα συνθετικά σχοινιά με σχετικά ουδέτερη συμπεριφορά παρέχουν μεγαλύτερη ευκαιρία για αποτελεσματικό station-keeping, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το μειονέκτημα του βάρους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

ΑΓΚΥΡΟΒΟΛΗΣΗΣ

3.1 Διαμόρφωση του συστήματος πρόσδεσης

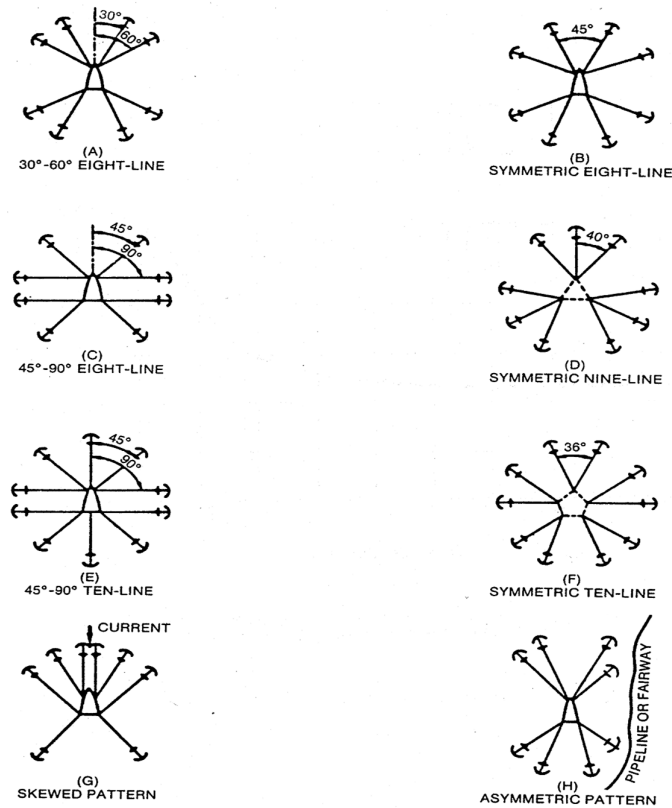
Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι εναλλακτικές λύσεις για αποτελεσματική συγκράτηση σε θέση της μονάδας FPSO. Αυτά μπορεί να είναι είτε ένα αγκυροβόλιο ενός σημείου είτε ένα σύστημα πολλαπλών κλάδων. Οι αγκυροβόλησεις ενός σημείου τείνουν να είναι μια πιο ενδεδειγμένη λύση και χρησιμοποιούνται συχνότερα για πλατφόρμες σχήματος πλοίου (ship-shaped), ενώ το σύστημα αγκύρωσης πολλαπλών κλάδων χρησιμοποιείται κυρίως για πλωτές ημιβυθιζόμενες κατασκευές (semi-subs).

Από την συγκριτική ανασκόπηση που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο μεταξύ των διαφόρων σχεδιάσεων αγκυροβόλησης με ένα σημείο και των σχετικών συμπερασμάτων, στην περίπτωση μας ενός FPSO σε βαθιά νερά αποφασίστηκε να υιοθετηθεί η ιδέα της αγκυροβόλησης μέσω πυργοειδούς συστήματος. Το σύστημα θα τοποθετηθεί εσωτερικά μέσα στο σκάφος για τους λόγους που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η θέση του πυργοειδούς συστήματος πρόσδεσης στο εσωτερικό θα βρίσκεται ακριβώς πίσω από την πλώρη του FPSO ακριβώς όπως φαίνεται στο Κεφάλαιο 1 (Σχήμα 1.6) επειδή όπως παρουσιάστηκε εκεί, με αυτόν τον τρόπο το FPSO θα υπόκειται σε πολύ μικρότερη περιβαλλοντική δύναμη αφού ο καιρός θα βρίσκεται στην πλώρη του σκάφους.

3.2 Σχέδιο πρόσδεσης

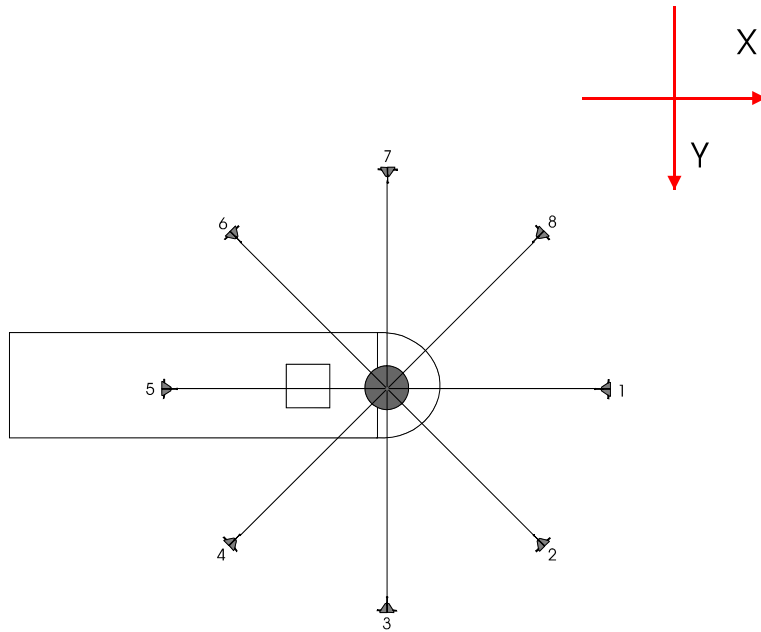
Υπάρχουν πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις των γραμμών πρόσδεσης γύρω

από το εσωτερικό σύστημα πυργίσκων του FPSO (Lee 1997). Τυπικές διατάξεις πρόσδεσης φαίνονται στο παρακάτω **Σχήμα 3.1**:



Εικόνα 3.1 Τύποι πρόσδεσης

Για το FPSO που εξετάζουμε, θα υιοθετηθεί σύστημα πρόσδεσης με οκτώ κλάδους συμμετρικό, με διάταξη ανά 45 μοίρες μεταξύ των κλάδων, όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 3.2.



Εικόνα 3.2 Κάτοψη του FPSO που δείχνει το μοντέλο πρόσδεσης που υιοθετήθηκε

3.3 Κατηγορίες συστημάτων πρόσδεσης

Οι γραμμές πρόσδεσης για τα αγκυροβόλια μπορούν να αποτελούνται από αλυσίδα, συρματόσχοινο, συνθετικό σχοινί ή συνδυασμό όλων αυτών. Υπάρχουν πολλοί δυνατοί τύποι υλικών γραμμής, μεγέθους και θέσης και μεγέθους βαρών συστοιχίας ή πλωτήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθούν οι απαιτήσεις του συστήματος πρόσδεσης. Μερικές από τις πιθανές εναλλακτικές κατασκευαστικές λύσεις για το σύστημα πρόσδεσης, προκύπτουν από τη χρήση των υλικών που προαναφέρθηκαν ή από ένα συνδυασμό αυτών (Brouwer 1996):

- Σύστημα με συρματόσχοινα: Επειδή το συρματόσχοινο είναι πολύ ελαφρύτερο από την αλυσίδα, το συρματόσχοινο παρέχει μεγαλύτερη δύναμη επαναφοράς για μια δεδομένη προένταση. Ωστόσο, για να αποφευχθεί η ανύψωση της άγκυρας απαιτείται πολύ μεγαλύτερο μήκος γραμμής κάτι που είναι αρκετά επιβαρυντικό για το συνολικό κόστος. Ένα άλλο μειονέκτημα οφείλεται στην φθορά

από τριβή εκεί που το σύρματόσχοινο έρχεται σε επαφή με τον βυθό της θάλασσας. Για τους παραπάνω λόγους, τα συστήματα αγκυροβόλησης μόνο με συρματόσχοινο σπάνια χρησιμοποιούνται για μόνιμα αγκυροβόλια.

- Σύστημα μόνο με αλυσίδα: Η αλυσίδα έχει δείξει ανθεκτικότητα σε πολλές υπεράκτιες εφαρμογές. Έχει καλύτερη αντοχή στην τριβή του πυθμένα και συμβάλλει σημαντικά στη συγκράτηση της άγκυρας. Εντούτοις, σε βαθιά νερά ένα σύστημα μόνο με αλυσίδα δημιουργεί ζήτημα βάρους αναφορικά με την ικανότητα φόρτισης λόγω του ιδίου βάρους και τις υψηλές απαιτήσεις αρχικής τάσης.

- Σύστημα μόνο με Συνθετικό Σχοινί: Τα σχοινιά από συνθετικές ίνες όπως παρουσιάζονται λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάζουν μεγάλα πλεονεκτήματα όσον αφορά το κόστος και την τεχνολογία, ειδικά για συστήματα αγκυροβολίας ανοικτής θάλασσας βαθέων υδάτων. Είναι πολύ ελαφριά, με ουδέτερη επιπλέουσα συμπεριφορά, παρέχοντας μεγαλύτερη δύναμη επαναφοράς πολύ αποτελεσματικά, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις μετακινήσεις της πλατφόρμας. Όμως λόγω του σχεδόν μηδενικού τους βάρους δεν είναι κατάλληλες για να αποτρέψουν την ανύψωση των αγκυρών σε μια αλυσοειδή διαμόρφωση. Επίσης, όπως τα συρματόσχοινα, υποφέρουν λόγω μακροχρόνιας τριβής όπου η γραμμή πρόσδεσης έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα της θάλασσας.

- Σύστημα συνδυασμού Συρματόσχοινου, Συνθετικού σχοινιού και αλυσίδας: Σύστημα αγκυροβολίας αποτελούμενο από συνδυασμό συρματόσχοινου και αλυσίδας ήταν ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος συνδυασμός υλικών, αλλά και η προσθήκη συνθετικού σχοινιού στη γραμμή αγκυροβόλησης μπορεί να οδηγήσει σε μια ακόμη πιο ελκυστική λύση, ειδικά για συστήματα αγκυροβολίας σε βαθιά νερά. Σε αυτό το σύστημα, το τμήμα αλυσίδας συνδέεται τυπικά με την άγκυρα. Αυτό παρέχει καλή αντοχή στην τριβή όπου η γραμμή πρόσδεσης έρχεται σε επαφή με τον βυθό και το

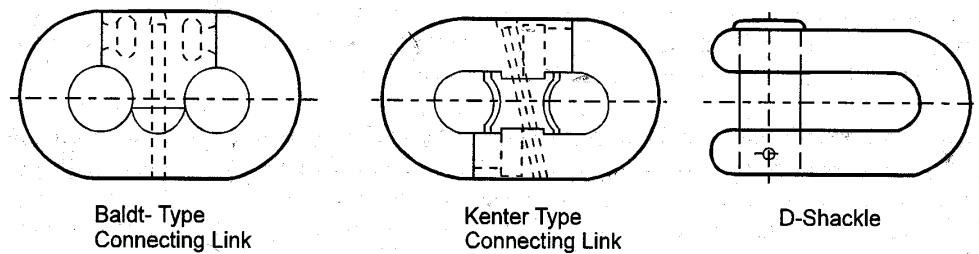
βάρος του συμβάλλει στην ικανότητα συγκράτησης της άγκυρας. Η επιλογή αλυσίδας ή συρματόσχοινου στο άκρο της μεριάς του σκάφους και ο τύπος τερματισμού εξαρτώνται από τις απαιτήσεις για τη ρύθμιση των τάσεων της γραμμής κατά τη λειτουργία. Το συνθετικό σχοινί θα είναι το μεσαίο τμήμα της γραμμής πρόσδεσης μεταξύ αλυσίδας και συρματόσχοινων ή αλυσίδας. Με σωστή επιλογή των μηκών κάθε τμήματος υλικού, μπορούν να ληφθούν συνδυασμένα πλεονεκτήματα μειωμένων απαιτήσεων προέντασης με υψηλότερη δύναμη επαναφοράς, βελτιωμένη ικανότητα συγκράτησης άγκυρας και καλή αντίσταση στην τριβή του πυθμένα.

Η χρήση συστήματος αγκυροβόλησης που αποτελείται από συνδυασμό συρματόσχοινου, συνθετικού σχοινιού και αλυσίδας θα υιοθετηθεί και στη δική μας περίπτωση για την πρόσδεση του FPSO σε βαθιά νερά. Κάθε γραμμή αγκυροβόλησης θα αποτελείται από ένα τμήμα συρματόσχοινου συνδεδεμένο στο άκρο του σκάφους, ένα τμήμα συνθετικού σχοινιού και στο τέλος από ένα τμήμα αλυσίδας που συνδέεται με την άγκυρα, όπου η γραμμή πρόσδεσης έρχεται σε επαφή με το βυθό της θάλασσας. Η χρησιμοποίηση του συρματόσχοινου ελαχιστοποιεί το κόστος, ελαχιστοποιώντας την απαιτούμενη ποσότητα αλυσίδας, ενώ παράλληλα εξουδετερώνει τις επιδράσεις υπεριώδους ακτινοβολίας UV στο συνθετικό σχοινί στην περίπτωση που το συνθετικό σχοινί προσαρτάτο στο σημείο προσαγωγής του κλάδου αγκύρωσης στο σκάφος και επομένως εκτίθετο σε ηλιακό φως.

3.4 Σύνδεσμοι

Οι σύνδεσμοι έχουν μεγάλη σημασία και είναι κρίσιμοι για την ακεραιότητα του γενικού συστήματος πρόσδεσης, καθώς εξασφαλίζουν την ασφαλή σύνδεση μεταξύ των τμημάτων της γραμμής πρόσδεσης. Στο ακόλουθο **Σχήμα 3.3**

απεικονίζονται σύνδεσμοι Kenter, Baldt και Type-D που χρησιμοποιούνται συνήθως στην βιομηχανία του offshore.

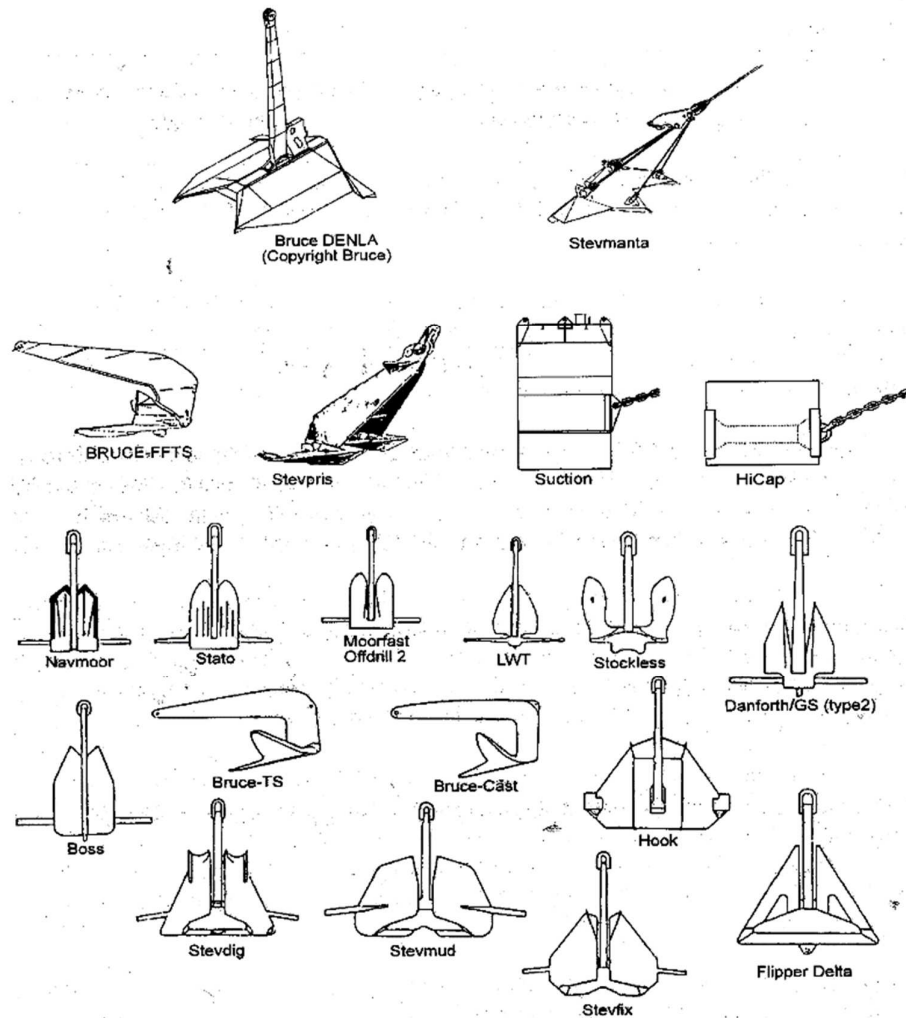


Εικόνα 3.3 Σύνδεσμοι

Το (DNV 1993) εισηγείται ότι η πιθανότητα αστοχίας του συνδέσμου, που τελικά θα επιλεγθεί, θα πρέπει να είναι αναλογικά της τάξης 1/10 σε σχέση με έναν κοινό σύνδεσμο. Επομένως, είναι σαφές ότι η προσεκτική επιλογή και ανάλυση των συνδέσμων είναι κρίσιμη για την ακεραιότητα της γραμμής πρόσδεσης. Έρευνες έχουν δείξει ότι η διάρκεια ζωής της κόπωσης των συνδέσμων Kenter, Baldt και Type-D είναι 0,2, 0,3-0,9 και ≥ 1 αντίστοιχα, φορές την αντίστοιχη διάρκεια κόπωσης των κοινών κρίκων.

3.5 Άγκυρες

Μια μεγάλη ποικιλία άγκυρών είναι διαθέσιμη στις μέρες μας. Μερικά από τις συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες άγκυρες φαίνονται στην επόμενη **Εικόνα 3.4**.



Εικόνα 3.4 Διαφορετικοί τύποι αγκυρών

Περιλαμβάνουν (χρησιμοποιούνται οι αγγλικοί όροι):

- Gravity anchors,
- Conventional drag anchors,
- High holding power drag embedment anchor,
- Drag embedment vertical lift (plate) anchors (VLA),
- Suction anchors,
- Hi-cap (concrete cylinder) anchors,
- Anchor piles.

Μια πλωτή εγκατάσταση μπορεί να βασίζεται στη χρήση ενός ή και περισσοτέρων τύπων αγκυρών για την συγκράτηση της κατασκευής, αν και είναι συνήθως πρακτική να χρησιμοποιείται ένα ενιαίο σύστημα αγκύρωσης.

Ο σχεδιασμός του συστήματος αγκύρωσης μπορεί να βασίζεται στην επίδραση των ακόλουθων παραγόντων (CMPT 1998):

- Γεωμορφολογικές και γεωτεχνικές συνθήκες εγκατάστασης,
- Ανάπτυξη χωροταξικού σχεδίου,
- Απαιτήσεις αγκύρωσης, συμπεριλαμβανομένων των κατακόρυφων και οριζόντιων δυνατοτήτων φόρτωσης, κυκλικών και τελικών συνθηκών,
- Μεθοδολογία εγκατάστασης,
- Απαιτήσεις επιθεώρησης συστήματος ή/και παροπλισμού,
- Επιπτώσεις στο κόστος,
- Σταθερότητα αγκύρωσης,
- Μόνιμη ή προσωρινή διάρκεια σχεδιασμού.

Ο σχεδιασμός των αγκυρών είναι ένα πεδίο διαρκούς έρευνας. Οι σημερινές ανάγκες εστιάζονται σε κατακόρυφα ανυψωτικά αγκύρια (VLA's) τα οποία μπορούν να υποβάλλονται σε μεγάλες κατακόρυφες συνιστώσες φορτίου ώστε να περιοριστούν τα μήκη αγκυροβόλησης στα βαθιά νερά. Τα VLA προσφέρουν καλές ευκαιρίες από άποψη κόστους και επαναχρησιμοποίησης, αν και κάποια μεμονωμένα κεφαλαιακά κόστη μπορεί να είναι συγκριτικά υψηλά. Προς το παρόν δεν χρησιμοποιούνται τόσο ευρέως όσο οι άγκυρες αναρρόφησης (suction anchors). Διεξάγονται διάφορες δοκιμές και η χρήση συστημάτων VLA για εγκαταστάσεις βαθέων υδάτων, στη Βραζιλία. Τα συστήματα αγκύρωσης Stevmanta και Denla είναι δύο άλλα νέα συστήματα που θα είναι κατάλληλα για μεγάλα βάθη, σε εδάφη αργιλίου και αργίλου.

3.5.1 Ισχύς συγκράτησης άγκυρας

Η ισχύς συγκράτησης μιας άγκυρας είναι συνάρτηση διάφορων παραγόντων, όπως:

- Ο τύπος της άγκυρας και, συνεπώς, η γεωμετρία της άγκυρας.
- Οι συνθήκες εδάφους του θαλάσσιου βυθού.
- Η συμπεριφορά της άγκυρας κατά την εναπόθεση, το άνοιγμα των άγκιστρων, η διείδυση των άγκιστρων, το βάθος διείδυσης της άγκυρας.

Εξαιτίας των παραπάνω λόγων, η πρόβλεψη του πόσο κρατάει η άγκυρα είναι μάλλον δύσκολη. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εμπειρική έκφραση (Larsen 1935) προκειμένου να ληφθούν τα δεδομένα απόδοσης της άγκυρας για συγκεκριμένη κατάσταση εδάφους και τύπο αγκύρωσης:

$$F = KW^a$$

Where :

$$K_{\min} W^a < F < K_{\max} W^a$$

and

$$W_{\min} < W < W_{\max}$$

Όπου

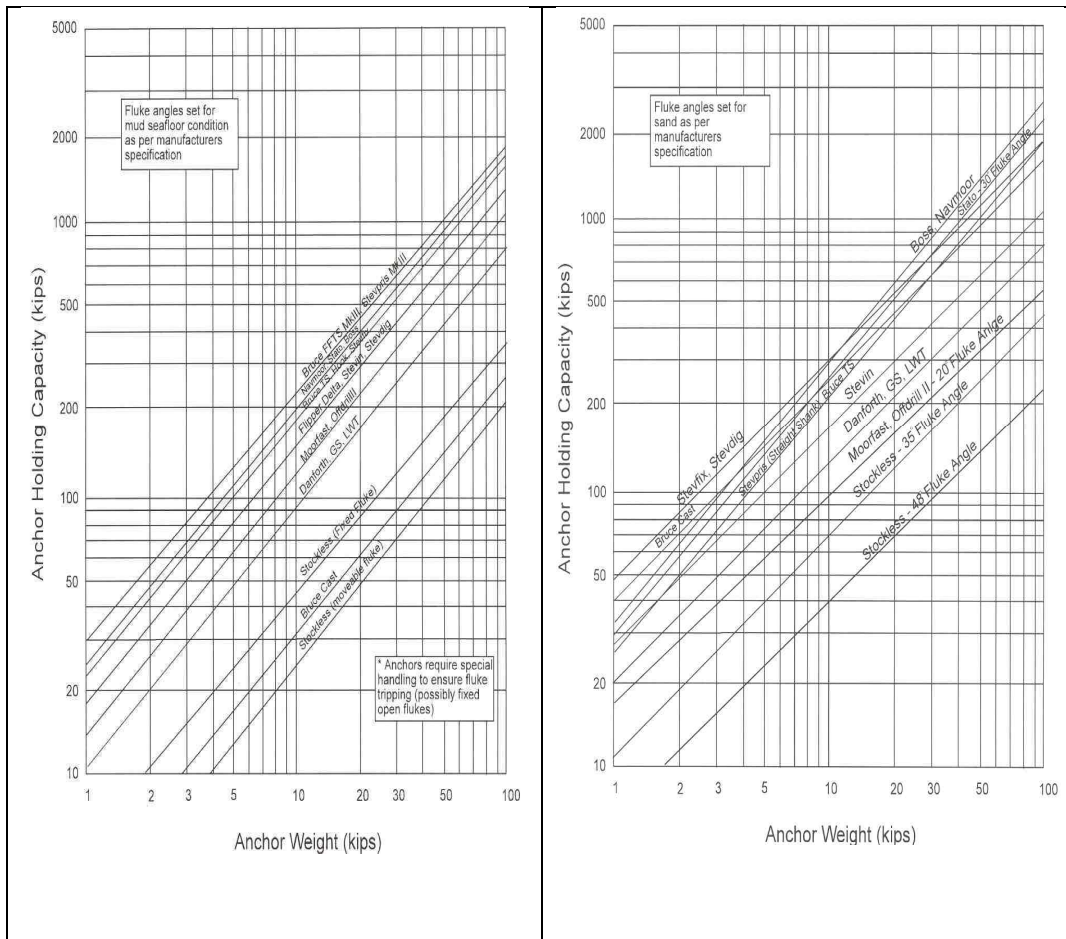
- W είναι το βάρος της άγκυρας σε kN,
- F είναι η προσφερόμενη από την άγκυρα δύναμη συγκράτησης σε kN και
- K, a είναι παράμετροι που αναφέρονται στο έδαφος και στον τύπο της άγκυρας.

K και a μπορούν να βρεθούν από τον ακόλουθο Πίνακα 3.1.

Anchor	Soil type	K_{min}	K_{max}	α	W_{min} (kN)	W_{max} (kN)
<i>Stocked:</i>						
	sand	29	58	0.70		
	soft clay	14.5	29	0.70	5	300
	firm clay	23	46	0.70		
<i>Bilateral (reversible - pivoting fluke):</i>						
Stevin	sand	28	56	0.85		
	soft clay	12.5	25	0.85	10	300
	firm clay	17.5	35	0.85		
Flipper - delta	sand	28	56	0.85		
	soft clay	12.5	25	0.85	3	270
	firm clay	17.5	35	0.85		
AMK2	sand/stiff clay	38	76	0.70	0.6	60
<i>Non-reversible:</i>						
Bruce(*)	sand	18	45	0.95	10	90
	soft clay	11	28	0.95		
Doris	soft clay	11	22	0.90	15	385
Catagrip	sand	63	126	0.75		
	soft clay	28	56	0.75	0.6	60
	firm clay	50	100	0.75		
Hook	sand	45	90	0.80	100	600
Stevpris	sand	58	116	0.80		
	soft clay	25	50	0.80	15	650
	firm clay	45	90	0.80		

Πίνακας 3.1 Συντελεστές υπολογισμού της δύναμης συγκράτησης

Η δύναμη συγκράτησης της άγκυρας μπορεί επίσης να εκτιμηθεί από τις ακόλουθες καμπύλες (API 1995), για το μαλακό χώμα ή την άμμο, που φαίνεται στην εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5 Δύναμη συγκράτησης άγκυρας

Το έδαφος στη θέση πρόσδεσης υπό εξέταση του FPSO είναι άμμος και ο συγκεκριμένος τύπος άγκυρας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί είναι το Flipper Delta-Stevdig όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4.

3.6 Τύποι γραμμών πρόσδεσης και επιλογή υλικών

3.6.1 Επιλογή αλυσίδας

Η επιλογή του υλικού και η κατασκευή αλυσίδας μεγάλης διαμέτρου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση μας, της αγκυροβόλησης ανοικτής θάλασσας FPSO σε βαθιά νερά, απαιτεί ακριβή αξιολόγηση. Πρέπει να έχουμε αλυσίδα

κατασκευασμένη σε συνεχές μήκος για καθένα από τις οκτώ γραμμές πρόσδεσης. Το γεγονός αυτό εξαλείφει την ανάγκη για συνδέσεις αλυσίδας και προβλήματα σχετικά με την κόπωση. Διαφορετικά, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν σύνδεσμοι με μεγάλη διάρκεια ζωής σε κόπωση όπως αυτοί που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα. Οι αλυσίδες κατηγοριοποιούνται σε σχέση με τους βαθμούς. Οι διαφορετικές ποιότητες αλυσίδας διακρίνονται από τις διαφορετικές αντοχές σε θραύση του χάλυβα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή. Στα συστήματα αγκυροβόλησης ανοικτής θάλασσας, η ORQ (Oil Rig Quality) αλυσίδα είναι η πιο δημοφιλής στους βαθμούς 3 και 4. Η αλυσίδα ποιότητας ORQ (Oil Rig Quality) είναι ευρέως διαδεδομένη, και με την πάροδο των ετών έχει αποδειχτεί ότι έχει γενικά καλή απόδοση. Ο βαθμός 4 από την άλλη πλευρά έχει αντοχή θραύσης καταλόγου (CBS) 130% της ισοδύναμης ποιότητας ORQ (Oil Rig Quality) ενώ ο βαθμός 3 έχει αντοχή θραύσης καταλόγου (CBS) 93% της ισοδύναμης ORQ (Oil Rig Quality) περίπου. Οι ιδιότητες βάρους και ακαμψίας της αλυσίδας είναι ανεξάρτητες από την ποιότητα. Για λόγους ανάλυσης πρόσδεσης, το βυθισμένο βάρος ανά μονάδα μήκους (w) και αξονική ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE) δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις για κάθε διάμετρο αλυσίδας, D (CMPT 1998):

$$\text{-βυθισμένο βάρος ανά μονάδα μήκους (w) = } 0,1875 \text{ N / m (D σε mm) (3.1)}$$

$$\text{-αξονική ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE) = } 90000 \text{ N / m (D σε mm) (3.2)}$$

Η δύναμη θραύσης είναι μια αβέβαιη παράμετρος λόγω του γεγονότος ότι η αντοχή του δεσμού της αλυσίδας πρέπει να είναι εξαιρετικά ομοιόμορφη προκειμένου να εξισωθεί η αντοχή του συνδέσμου με τη συνολική αντοχή της αλυσίδας. Η αντοχή θραύσης που δίνουν οι κατασκευαστές είναι η δύναμη θραύσης του καταλόγου (CBS) ενώ η αλυσίδα δοκιμάζεται μόνο μέχρι το φορτίο δοκιμής (proof load). Η ακόλουθη

εξίσωση δίνει τη δύναμη θραύσης του καταλόγου (CBS) ή το φορτίο δοκιμής για διαφορετικές ποιότητες αλυσίδας:

αντοχή θραύσης καταλόγου (CBS) ή φόρτιση δοκιμής = $c (44-0,08D) D^2 N$ (D είναι η διάμετρος σε mm) (3.3).

Όπου το c είναι συντελεστής ανάλογα με την κατηγορία υλικού και επιλέγεται σύμφωνα με τον ακόλουθο **Πίνακα 3.2**.

<u>Grade</u>	<u>Catalogue Break Strength</u>	<u>Proof Load</u>
ORQ	21.1	14.0
3	22.3	14.8
3S	24.9	18.0
4	27.4	21.6

Πίνακας 3.2 Δύναμη θραύσης αλυσίδας

Στην περίπτωση μας, θα επιλεγεί αλυσίδα βαθμού 4 από διάμετρο 0,12m (120mm). Ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις (3.1) - (3.2) - (3.3) οι τιμές για βυθισμένο βάρος ανά μονάδα μήκους (w), αξονική ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE) και δύναμη θραύσης καταλόγου (CBS) είναι

Βάρος βυθού ανά μονάδα μήκους (w) = $0,1875 \text{ N / m} = 2,7 \text{ kN / m}$ (D σε mm)

Αξονική ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE) = $90000 \text{ N / m} = 1296000 \text{ kN / m}$ (D σε mm)

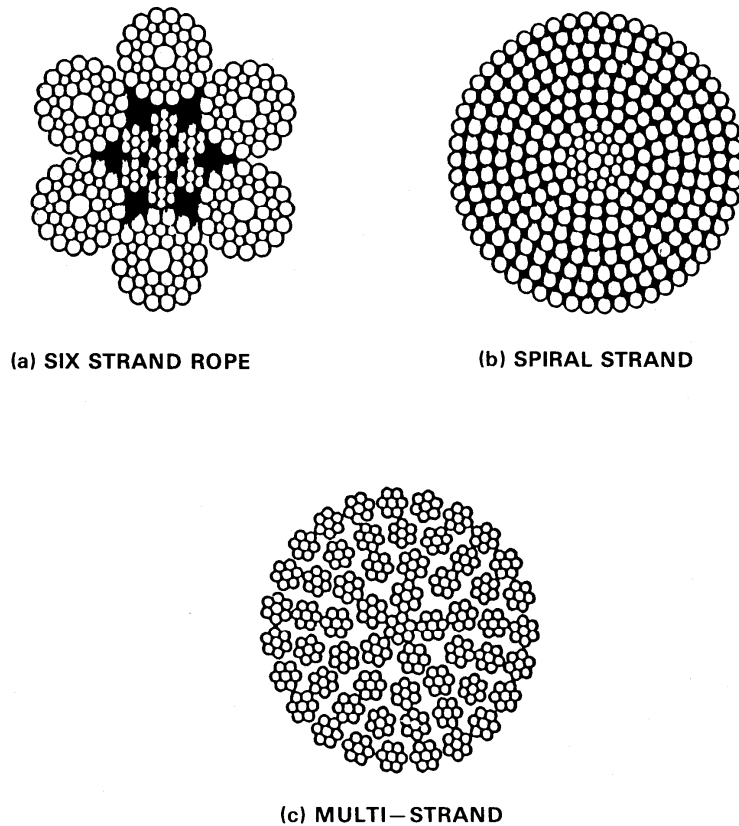
Δύναμη θραύσης καταλόγου (CBS) = $c (44-0,08D) N = 13572,864 \text{ kN}$ (D σε mm)

Όπου:

γ επιλέγεται για την αλυσίδα βαθμού 4 ισούται με 27,4.

3.6.2 Επιλογή συρματόσχοινων

Το τμήμα σχοινιού συρματόσχοινου κάθε σκέλους πρόσδεσης μπορεί να έχει διάφορες κατασκευές όπως φαίνεται στο παρακάτω **Σχήμα 3.6**.

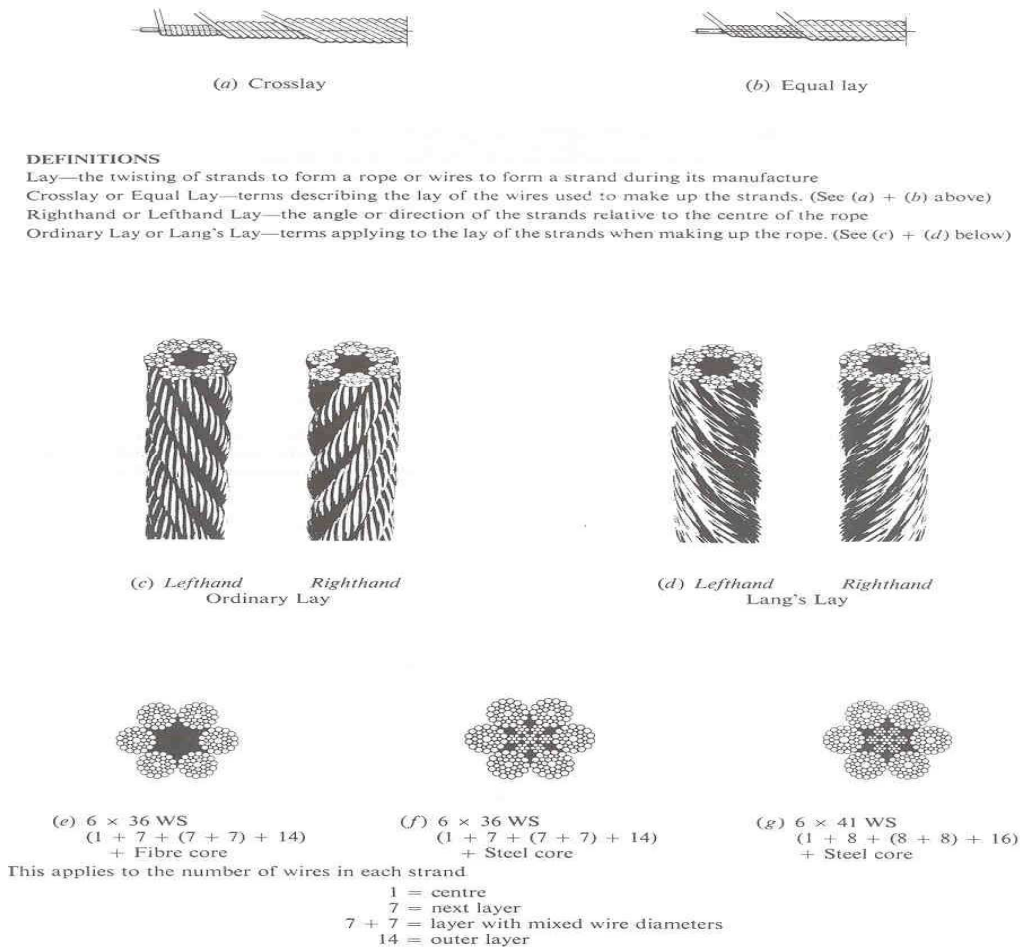


Σχήμα 3.6 Διατομές συρματόσχοινων

Ο τύπος κατασκευής συρματόσχοινου περιλαμβάνει έναν αριθμό κλώνων τυλιγμένων με την ίδια περιστροφική κατεύθυνση γύρω από έναν κεντρικό πυρήνα για το σχηματισμό του σχοινιού.

Ο αριθμός των κλώνων και των συρματιδίων σε κάθε κλώνα, ο σχεδιασμός πυρήνα και η τοποθέτηση των κλώνων διέπονται από τις απαιτήσεις ελάχιστου φορτίου θραύσης (MBL) και τις απαιτήσεις όσον αφορά την κόπωση σε καμπτικά φορτία. Η

συνιστώμενη κατασκευή τους είναι 6x36 ή 6x41 (6x37 τάξη). Η **Εικόνα 3.7** απεικονίζει αυτές τις κατασκευές των συρματοσχοίων (OCIMF 1997 (δεύτερη έκδοση)).



Εικόνα 3.7 Κατασκευαστικοί τύποι συρματοσχοίων

Η διάταξη Equal lay συνιστάται για γραμμές, όταν είναι διαθέσιμη, λόγω του υψηλότερου ελάχιστου ορίου θραύσης (MBL) από την διάταξη με εγκάρσιες περιελίξεις (Cross Lay). Ενώ οι γραμμές Lang έχουν ελαφρώς μεγαλύτερο ελάχιστο όριο θραύσης (MBL) από τις κανονικές γραμμές, αυτές έχουν μεγαλύτερη τάση να στρέφουν και να ξετυλίγουν τους κλώνους, κάτι που δεν είναι επιθυμητό όταν υπάρχουν συνθήκες σκόνης και υγρασίας. Γραμμές που είναι κατασκευασμένες από χαλύβδινα σύρματα με ανεξάρτητο χαλύβδινο πυρήνα (IWRC) συνιστώνται σε σχέση

με κλάδους που έχουν πυρήνα από συνθετικές ίνες για πολλούς και διαφόρους λόγους. Μια γραμμή χαλύβδινου καλωδίου IWRC έχει πολύ μεγαλύτερη αντοχή στη σύνθλιψη, υψηλότερο ελάχιστο όριο θραύσης (MBL) για δεδομένη διάμετρο και μεγαλύτερη διατήρηση της αντοχής όταν λυγίζει, χρησιμοποιείται δε περισσότερο για κινητές μονάδες γεώτρησης στην θάλασσα λόγω της πλευρικής ευκαμψίας και του χαμηλού κόστους. Η κατασκευή σπειροειδούς κλώνου χρησιμοποιείται συνήθως για FPSOs όπου η μεγαλύτερη διαμήκης ακαμψία και η δυνατότητα επίστρωσης με χιτώνιο πολυαιθυλενίου το κάνουν πιο κατάλληλο για εφαρμογές που αντέχουν περισσότερο στον χρόνο.

Το βάρος και η ακαμψία των συρματόσχοινων ενδέχεται να ποικίλλουν λόγω της διαφορετικής διαδικασίας κατασκευής και του κατασκευαστή. Σε πρώτη φάση για τον υπολογισμό του βυθιζόμενου βάρους ανά μονάδα μήκους (w) και της αξονικής ακαμψίας ανά μονάδα μήκους (AE) για το συρματόσχοινο βάσει της ονομαστικής διαμέτρου του, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες εξισώσεις για οποιαδήποτε διάμετρο, D (CMPT 1998):

Για το Six Strand (IWRC):

$$\text{-Βυθισμένου βάρους ανά μονάδα μήκους (w) = 0,034 N / m (D σε mm) (3.4)}$$

$$\text{-αξονική ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE) = 45000 N / m (D σε mm) (3.5)}$$

Για Spiral Strand:

$$\text{-Βυθισμένου βάρους ανά μονάδα μήκους (w) = 0,043 N / m (D σε mm) (3,6)}$$

$$\text{-αξονική ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE) = 90000 N / m (D σε mm) (3.7)}$$

Αυτές οι τιμές αναφέρονται σε νέα συρματόσχοινα.

Η δύναμη θραύσης εξαρτάται από την κατασκευή του σχοινιού καθώς και από την ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή. Θα πρέπει να εκτελούνται δοκιμές πιστοποίησης προκειμένου να επικυρωθεί η καθορισμένη από τον

κατασκευαστή αντοχή του συρματόσχοινου. Σαν πρώτη αναφορά στην αντοχή θραύσης των δύο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων κατασκευαστικά συρματόσχοινων για οποιαδήποτε ονομαστική διάμετρο D μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ακόλουθος

Πίνακας 3.3.

Specification	Ultimate Tensile Stress (N/mm ²)	Breaking Strength (N)
Six Strand (IWRC)	1770	$525 D^2$ (Dis in mm)
Six Strand (IWRC)	1860	$600 D^2$ (Dis in mm)
Spiral Strand	1570	$900 D^2$ (Dis in mm)

Πίνακας 3.3 Αντοχή Θραύσης συρματόσχοινου

Στην περίπτωση μας, θα επιλεγθεί συρματόσχοινο με σπειροειδή κατασκευή με διάμετρο 0.13m (130mm). Ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.6) - (3.7) και τον Πίνακα 3.3 οι τιμές για βυθισμένο βάρος ανά μονάδα μήκους (w), αξονική ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE) είναι

-Βυθισμένο βάρος ανά μονάδα μήκους (w) = $0,043 \text{ N / m} = 0,727 \text{ kN / m}$ (D σε mm)

-αξονική ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE) = $90000 \text{ N / m} = 1521000 \text{ kN / m}$ (D σε mm)

αντοχή θραύσης = $900 D^2 \text{ N} = 15210 \text{ kN}$ (D σε mm)

Ο γαλβανισμός των συρμάτων μπορεί να προσφέρει προστασία από τη διάβρωση. Για ανθεκτικότητα στη διάβρωση σε μόνιμα αγκυροβόλια, χρησιμοποιείται

τυπικά επένδυση από πολυαιθυλένιο ή πολυουρεθάνη. Το υλικό επένδυσης πρέπει να είναι τύπου υψηλής πυκνότητας. Συρματίδια ψευδαργύρου χρησιμοποιούνται μερικές φορές για την παροχή πρόσθετης προστασίας από τη διάβρωση για περίπου 5 χρόνια. Ένα υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται για να γεμίσει (πληρώσει) τους εσωτερικούς χώρους μεταξύ των συρμάτων για να ελαχιστοποιήσει την εξάπλωση της διάβρωσης με την είσοδο του θαλασσινού νερού.

Τα άκρα του τμήματος συρματόσχοινων θα πρέπει να τερματίζονται με sockets. Για μόνιμες αγκυροβόλησεις, οι υποδοχές θα πρέπει να είναι εφοδιασμένες με διατάξεις περιορισμού κάμψης συνδεδεμένες με την υποδοχή κατά τρόπο που να είναι υδατοστεγής και να εμποδίζει την είσοδο του θαλάσσιου νερού και να περιορίζει την κόπωση. Ο προσεκτικός έλεγχος ποιότητας, ο έλεγχος και η επιθεώρηση πρέπει να γίνονται πριν και κατά τη διάρκεια της κατασκευής του σχοινιού, προκειμένου να διασφαλιστούν οι προδιαγραφές σχεδιασμού, ειδικά το καθορισμένο ελάχιστο φορτίο θραύσης (MBL).

3.6.3 Επιλογή συνθετικού σχοινιού

Τα συνθετικά σχοινιά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν είναι κατασκευασμένα από πολυαιθυλένιο εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους (UHMWPE), περισσότερο γνωστό ως πολυαιθυλένιο υψηλής αντοχής (HMPE) ή πολυαιθυλένιο υψηλής απόδοσης. Τα σχοινιά HMPE όπως αναφέρεται στο προηγούμενο Κεφάλαιο 2 είναι ελαφρύτερα από το νερό που έχει σχετική πυκνότητα 0,97 (βλέπε προηγούμενο Κεφάλαιο 2 - Πίνακας 2.1) που σημαίνει ότι αντίθετα από τα αραμίδια, το νάιλον, τον πολυεστέρα και τον χάλυβα επιπλέουν. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας τους είναι χαμηλότερες από τις αραμίδια. Έχουν καλύτερη αντοχή στην τριβή, υψηλότερη τάση εφελκυσμού καθώς και καλύτερη υπεριώδη ακτινοβολία (UV)

και χημική αντίσταση. Δεδομένου ότι δεν απορροφούν νερό, η απόδοσή τους λέγεται ότι δεν χειροτερεύει (Graczyk T 1995). Είναι περίπου 40% ισχυρότερα από τα αραμίδια, πάνω από 3 φορές ισχυρότερα από το νάιλον ή τον πολυεστέρα και 10 φορές ισχυρότερες από τον χάλυβα, όπως φαίνεται στο Κεφάλαιο 2 - Πίνακας 2.1. Έχουν υψηλό συντελεστή και σχετικά μικρή έκταση μέχρι την θραύση της τάξης περίπου 3,5% παρόμοια με τις ίνες αραμιδίου. Ένα άλλο πλεονέκτημα του HMPE είναι ότι έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές σε βάθος περίπου 500m. Το ειδικό σχοινί από συνθετικές ίνες που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ονομάζεται SPECTRA 1000. Η διάμετρος του σχοινιού είναι 0,15m (150mm) με τις ακόλουθες ιδιότητες.

Η τιμή του βάρους ανά μονάδα μήκους στο νερό (w) λαμβάνεται από το Κεφάλαιο 2 – Πίνακας 2.3:

Βυθισμένο Βάρος ανά μονάδα μήκους (w) = $0,0062 D^2 \text{N} / \text{m} = 0,035 \text{ kN} / \text{m}$ (D σε mm)

Η διαδικασία, για το πως προκύπτουν οι τιμές της αξονικής ακαμψίας ανά μονάδα μήκους (AE) διέπεται από εξαιρετικά περίπλοκους μηχανισμούς όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο 2 (Chaplin, Reading et al., 1992). Για την εκτίμηση της αξονικής ακαμψίας ανά μονάδα μήκους (AE) χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

Αξονική ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE) = $4 * 13000 D^2 \text{N} / \text{m} = 1170000 \text{ kN} / \text{m}$ (D σε m)

Η τιμή αντοχής θραύσης λαμβάνεται από το Κεφάλαιο 2 - Πίνακας 2.4 με βάση επίσης το Κεφάλαιο 2 - Πίνακας 2.2 για την ονομαστική διάμετρο του συνθετικού σχοινιού D ως:

Αντοχή θραύσης = $575 D^2 \text{N} = 12937,5 \text{ kN}$ (D σε mm).

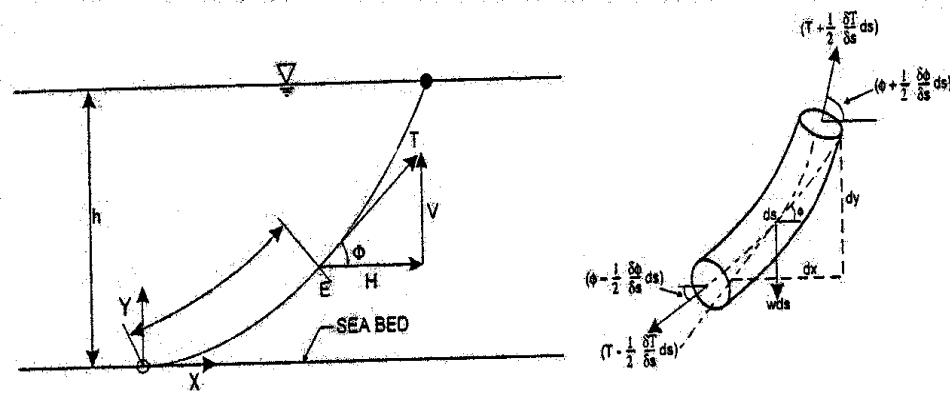
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΡΑΜΜΗΣ

ΠΡΟΣΔΕΣΗΣ

Η ακόλουθη ανάλυση λαμβάνει χώρα λαμβάνοντας υπόψη το βάρος της γραμμής πρόσδεσης, τις εφαρμοζόμενες εντάσεις στο ένα άκρο και με ή χωρίς ελαστικότητα.

4.1 Γεωμετρία της αλυσοειδούς καμπύλης της γραμμής πρόσδεσης

Για την περίπτωση της μη ελαστικής γραμμής σε ήρεμο νερό όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.1**, η λύση των εξισώσεων στατικής ισορροπίας εφαπτομενικά και κατά την κάθετο κατεύθυνση προς τη γραμμή για ένα στοιχείο της γραμμής πρόσδεσης, παρέχει την γεωμετρία της αλυσοειδούς για μια γραμμή πρόσδεσης.



Σχήμα 4.1 Γεωμετρία της αλυσοειδούς καμπύλης της γραμμής πρόσδεσης

Οι γραμμές πρόσδεσης έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο μήκος ώστε να αποκλειστεί η ανύψωση της άγκυρας. Επί πλέον υποθέτοντας ότι ο πυθμένας είναι οριζόντιος οδηγούμαστε στα ακόλουθα χρήσιμα αποτελέσματα:

Απαιτούμενο ελάχιστο μήκος γραμμής (ή αναρτημένο μήκος για μια δεδομένη τάση στο σημείο πρόσδεσης στο σκάφος -fairlead):

$$L = h \sqrt{\frac{2T}{\omega h} - 1} \quad (4.1)$$

Κάθετη δύναμη για μια δεδομένη ένταση στο σημείο πρόσδεσης στο σκάφος - fairlead:

$$V = \omega L \quad (4.2)$$

Οριζόντια δύναμη για μια δεδομένη ένταση στο σημείο πρόσδεσης στο σκάφος - fairlead:

$$H = T - \omega h \quad (4.3)$$

Οριζόντια έκταση [μήκος σε πλάγια όψη από το σημείο πρόσδεσης στο σκάφος (fairlead) έως το σημείο επαφής]:

$$X = \frac{H}{\omega} \sinh^{-1} \left(\frac{\omega L}{H} \right) \quad (4.4)$$

Όπου:

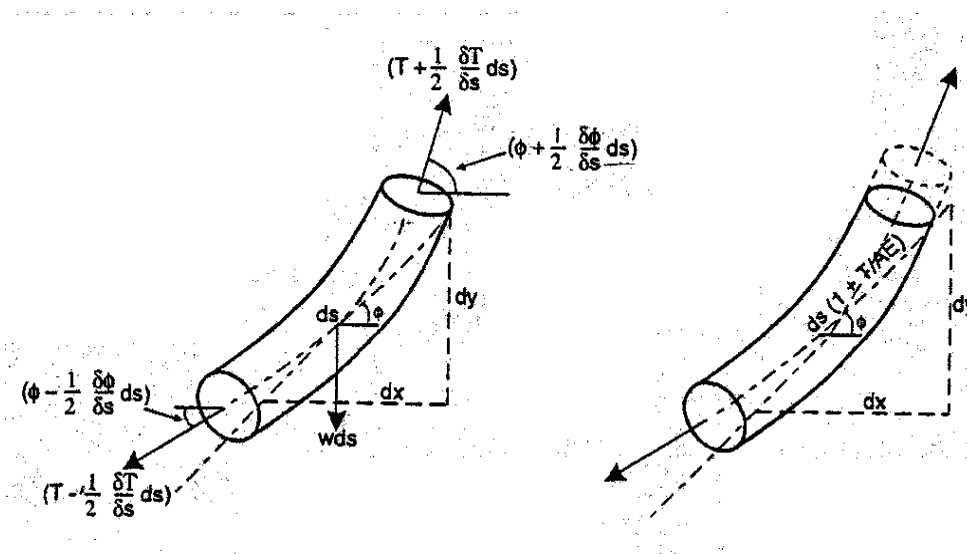
- T, είναι η ένταση (δύναμη) στην γραμμή πρόσδεσης,
- ω , είναι το βυθισμένο βάρος ανά μονάδα μήκους,
- h, είναι το βάθος του νερού.

4.2 Διαφορές του επιπέδου της εντατικής κατάστασης λόγω των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού της γραμμής πρόσδεσης

Οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού της γραμμής πρόσδεσης είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα επίπεδα έντασης. Για παράδειγμα, μια αλυσίδα -που είναι ο συγκεκριμένος τύπος υλικού όπου οι επιδράσεις της ελαστικότητας είναι λιγότερο σημαντικές- διαμέτρου 3 ιντσών και 1200 μέτρων μήκος

θα εκτείνεται περίπου 4 μέτρα σε λειτουργία στην περιοχή των 150-180 τόνων. Αν λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι οι τυπικές κινήσεις στην συχνότητα του κυματισμού είναι της τάξεως των 5-8m, είναι προφανές ότι η επιρροή της ελαστικότητας έχει μεγάλη σημασία και πρέπει να ληφθεί υπόψη (OCIMF 1997 (2η έκδοση)).

Ένα στοιχείο του κλάδου πρόσδεσης που έχουμε δείξει προηγουμένως για την μη ελαστική γραμμή αγκυροβόλησης παρουσιάζεται στο επόμενο Σχήμα 4.2 σε σύγκριση με αυτό για την γραμμή αγκυροβόλησης στην οποία η επίδραση της ελαστικότητας λαμβάνεται υπόψη.



Σχήμα 4.2 Ελαστικότητα γραμμής πρόσδεσης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την γεωμετρική διαμόρφωση της αλυσοειδούς στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ελαστικότητας (CMPT 1998)

Απαιτούμενο ελάχιστο μήκος γραμμής (ή αναρτημένο μήκος για μια δεδομένη τάση):

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{T^2 - H^2} \quad (4.5)$$

Κάθετη δύναμη για μια δεδομένη ένταση:

$$V = \omega L \quad (4.6)$$

Οριζόντια δύναμη για μια δεδομένη ένταση:

$$H = AE \sqrt{\left(\frac{T}{AE} + 1\right)^2 - \frac{2\omega h}{AE}} - AE \quad (4.7)$$

Οριζόντια έκταση (μήκος σε πλάγια όψη από το σημείο πρόσδεσης στο σκάφος - fairlead έως το σημείο επαφής):

$$X = \frac{H}{\omega} \sinh^{-1}\left(\frac{\omega L}{H}\right) + \frac{HL}{AE} \quad (4.8)$$

Τα παραπάνω αποτελέσματα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα για την μη εκτάσιμη γραμμή πρόσδεσης δείχνουν σαφώς ότι:

- Η οριζόντια έκταση θα αυξηθεί κατά $\frac{HL}{AE}$ (τη σημασία της συνεκτίμησης της ελαστικότητας) και
- Όταν η AE τείνει στο άπειρο τότε τα αποτελέσματα γίνονται όπως αυτά για την περίπτωση χωρίς ελαστικότητα.

4.3 Χαρακτηριστικά μη γραμμικής ακαμψίας του συστήματος πρόσδεσης

Η οριζόντια ακαμψία της γραμμής πρόσδεσης μπορεί να υπολογιστεί με τον καθορισμό της έκτασης της γραμμής πρόσδεσης για οποιαδήποτε οριζόντια δύναμη.

Στη συνέχεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί η μετατόπιση για ένα συγκεκριμένο σύνολο δυνάμεων.

Το πεδίο εφαρμογής περιλαμβάνει ένα ορισμένο μήκος στον πυθμένα και ένα μέρος αλυσοειδούς. Επομένως η ακαμψία "ξεκινά" με κάποια τάση (προένταση), η οποία συμβαίνει όταν δεν υπάρχει περιβαλλοντική φόρτιση. Στη συνέχεια, η διαφορά στην έκταση (από την άγκυρα στο fairlead) καθώς αυξάνεται η οριζόντια δύναμη, για την ανελαστική περίπτωση, δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$S - S_0 = X - X_0 - (L - L_0) = \frac{H}{\omega} \sinh^{-1} \left(\frac{\omega L}{H} \right) - \frac{H_0}{\omega} \left(\frac{\omega L_0}{H_0} \right) - h \sqrt{\frac{2T}{\omega h} - 1} + h \sqrt{\frac{2T_0}{\omega h} - 1} \quad (4.9)$$

Όπου:

- Οι τιμές ο αναφέρονται σε ποσότητες που σχετίζονται με την ένταση κατά την λειτουργία.
- Τα L και H (καθώς και τα L₀ και H₀ που σχετίζονται με την τάση λειτουργίας) πρέπει να υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.1) και (4.3) αντίστοιχα.

T από την εξίσωση (4.3) είναι:

$$H = T - \omega h \Leftrightarrow T = H + \omega h \quad (4.10)$$

Έτσι η εξίσωση 4.9 γίνεται:

$$S - S_0 = X - X_0 - (L - L_0) = \frac{H}{\omega} \sinh^{-1} \left(\frac{\omega L}{H} \right) - \frac{H_0}{\omega} \left(\frac{\omega L_0}{H_0} \right) - h \sqrt{\frac{2H}{\omega h} + 1} + h \sqrt{\frac{2H_0}{\omega h} + 1} \quad (4.11)$$

Το αντίστοιχο αποτέλεσμα για την περίπτωση αλυσοειδούς με ελαστικότητα είναι:

$$S - S_0 = X - X_0 - (L - L_0) = \frac{H}{\omega} \sinh^{-1} \left(\frac{\omega L}{H} \right) - \frac{H_0}{\omega} \left(\frac{\omega L_0}{H_0} \right) + \frac{L_T}{AE} (H - H_0) - (L - L_0) \quad (4.12)$$

Όπου:

- Οι τιμές ο αναφέρονται σε ποσότητες που σχετίζονται με την τάση λειτουργίας.
- Τα L και H (καθώς και τα L₀ και H₀ σχετικά με την τάση λειτουργίας) θα πρέπει να υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.5) και (4.7) αντίστοιχα.

- LT είναι το συνολικό μη τεντωμένο μήκος της γραμμής πρόσδεσης.

T από την εξίσωση (4.7) είναι:

$$\begin{aligned}
 H &= AE \sqrt{\left(\frac{T}{AE} + 1\right)^2 - \frac{2\omega h}{AE}} - AE \Leftrightarrow H + AE = AE \sqrt{\left(\frac{T}{AE} + 1\right)^2 - \frac{2\omega h}{AE}} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow H + AE = \sqrt{(T + AE)^2 - 2\omega h AE} \Leftrightarrow (H + AE)^2 + 2\omega h AE = (T + AE)^2 \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow T = \sqrt{(H + AE)^2 + 2\omega h AE} - AE \quad (4.13)
 \end{aligned}$$

Έτσι η εξίσωση (4.12) γίνεται:

$$\begin{aligned}
 S - S_0 &= X - X_0 - (L - L_0) = \frac{H}{\omega} \sinh^{-1}\left(\frac{\omega L}{H}\right) - \frac{H_0}{\omega} \left(\frac{\omega L_0}{H_0}\right) + \frac{L_T}{AE} (H - H_0) - \\
 &- \frac{1}{\omega} \sqrt{\left[\sqrt{(H + AE)^2 + 2\omega h AE} - AE\right]^2 - H^2} \quad (4.14)
 \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, για να επεξηγήσουμε τη μη γραμμική ακαμψία του συστήματος

πρόσδεσης, σχεδιάζουμε το H-H₀ έναντι του S-S₀ $\left(Stiffness = \frac{H - H_0}{S - S_0}\right)$.

4.4 Χαρακτηριστικά φόρτισης-μετατόπισης για το συνδυασμένο σύστημα πρόσδεσης αλυσίδας-συνθετικού σχοινιού

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3 αποφασίστηκε ότι το υπό σχεδίαση σύστημα αγκύρωσης του FPSO σε βαθιά νερά θα περιλαμβάνει κλάδους τριών τμημάτων, ήτοι αλυσίδας-συνθετικού σχοινιού-συρματοσχοινίου, από την άγκυρα μέχρι το το σημείο

πρόσδεσης στο σκάφος -fairlead. Με σωστή επιλογή του μήκους κάθε τμήματος, το συνδυασμένο σύστημα πρόσδεσης προσφέρει τα πλεονεκτήματα της απαίτησης για χαμηλότερη προένταση, μεγαλύτερη δύναμη επαναφοράς, αυξημένη ικανότητα συγκράτησης της άγκυρας και καλή αντοχή στην τριβή του πυθμένα. Πλεονεκτήματα, τα οποία έχουν μεγάλη σημασία για ένα αποτελεσματικό σύστημα πρόσδεσης για το FPSO σε βαθιά νερά. Τα επιλεγμένα μήκη για κάθε τμήμα καθώς και οι ιδιότητες για κάθε υλικό γραμμής πρόσδεσης συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 4.1.

<i>Specification</i>	<i>Diameter (in m)</i>	<i>Length (in m)</i>
<i>Spiral Strand</i>	0.13	150
<i>HMPE</i>	0.15	1650
<i>Grade 4</i>	0.12	1500

<i>Specification</i>	<i>Submerged Weight per unit length (ω) (in N/m)</i>	<i>Axial Stiffness per unit length (AE) (in N/m)</i>	<i>Breaking strength (CBS) (in N)</i>
<i>Spiral Strand</i>	726.700	1521000000	15210000
<i>HMPE</i>	34.875	1170000000	12937500
<i>Grade 4</i>	2700.000	1296000000	13572864

Πίνακας 4.1 Ιδιότητες κάθε τμήματος της γραμμής πρόσδεσης

Το συνολικό μήκος της γραμμής πρόσδεσης είναι 3300μ. Σύμφωνα με το σχέδιο συστήματος πρόσδεσης που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3-Σχήμα 3.2, δεδομένου ότι υιοθετείται το 45 μοίρες συμμετρικό σύστημα οκτώ γραμμών πρόσδεσης, το μήκος όλων των γραμμών πρόσδεσης θα είναι το ίδιο και ίσο με 3300m.

Το επόμενο βήμα είναι να βρούμε το βάρος ανά μονάδα μήκους της σύνθετης γραμμής αγκύρωσης (ω) στο νερό και την αξονική ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE), εκάστου κλάδου αγκύρωσης του συστήματος. Αυτές οι τιμές μπορούν να βρεθούν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

Βυθισμένο βάρος ανά μονάδα μήκους (ω)

$$\omega_{Chain} \times L_{Chain} + \omega_{Synthetic-ropes} \times L_{Synthetic-ropes} + \omega_{Wire-ropes} \times L_{Wire-ropes} = \omega_{Mooring-line} \times L_{Mooring-line}$$
$$\Rightarrow \omega_{Mooring-line} = 1.277 \text{ kN / m} (4.15)$$

Αξονική ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE)

$$AE_{Chain} \times L_{Chain} + AE_{Synthetic-ropes} \times L_{Synthetic-ropes} + AE_{Wire-ropes} \times L_{Wire-ropes} =$$
$$AE_{Mooring-line} \times L_{Mooring-line} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow AE_{Mooring-line} = 1243227.742 \text{ kN / m} (4.16)$$

Οι παραπάνω τιμές βάρους βάρους ανά μονάδα μήκους (ω) και αξονική ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE) για την γραμμή πρόσδεσης μπορούν να εφαρμοστούν στην εξίσωση (4.14) προκειμένου να ληφθεί η μετακίνηση του συστήματος για μια δεδομένη προένταση. Το συνολικό μη εκτατό μήκος της γραμμής πρόσδεσης LT αντιπροσωπεύει το συνολικό μήκος της γραμμής πρόσδεσης. Η επιλεγμένη τιμή για τη δύναμη προέντασης H_0 είναι της τάξεως των 2000kN και το βάθος του νερού είναι 1000m. Στη συνέχεια, το H- H_0 μπορεί να σχεδιαστεί κατά S-So (Load vs. Excursion) για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά δύναμης – μετατόπισης της γραμμής πρόσδεσης (Ακαμψία της γραμμής πρόσδεσης). Τα αποτελέσματα καθώς επίσης και η καμπύλη ακαμψίας της γραμμής πρόσδεσης (Εικόνα 4.3), η καμπύλη αναρτημένου μήκους ως προς την μετατόπιση (Σχήμα 4.4) και η δύναμη έναντι της μετατόπισης (Εικόνα 4.5) που χρησιμοποιούνται για την πιο φορτισμένη γραμμή παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΙ

ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

5.1 Περιβαλλοντικά δεδομένα

Η συλλογή και η επιλογή περιβαλλοντικών δεδομένων για ένα σύστημα πρόσδεσης FPSO είναι αρκετά περίπλοκη αλλά και πολύ σημαντική διαδικασία. Θα πρέπει να αναζητηθούν πληροφορίες από έμπειρους ειδικούς, για τον καθορισμό των ωκεανογραφικών και μετεωρολογικών συνθηκών του σημείου εγκατάστασης του σκάφους. Θα πρέπει να ληφθούν ιδιαίτερα υπόψη οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας των περιβαλλοντικών δυνάμεων που επιδρούν, πιο συγκεκριμένα το φάσμα κύματος και ανέμου.

Τα στατιστικά μοντέλα είναι απαραίτητα για την επαρκή περιγραφή όλων των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Οι αναγνωρισμένες στατιστικές μέθοδοι και μοντέλα θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την πλήρη εκτίμηση των βέλτιστων συνθηκών σχεδιασμού, διότι περιβαλλοντικά δεδομένα, όπως το ρεύμα-ο άνεμος-το κύμα, διέπονται από σχέσεις αλληλεπίδρασης στην υπό μελέτη περιοχή.

5.2 Οι δυνάμεις του ανέμου

Οι συνθήκες ανέμου που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία σχεδιασμού θα πρέπει να προσδιορίζονται σωστά από τα δεδομένα αιολικής ενέργειας που συλλέγονται και θα πρέπει να συμφωνούν με άλλες περιβαλλοντικές παραμέτρους που θεωρείται ότι συμβαίνουν ταυτόχρονα.

Δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται γενικά για να ληφθούν υπόψη οι συνέπειες του ανέμου για τη διαδικασία σχεδιασμού:

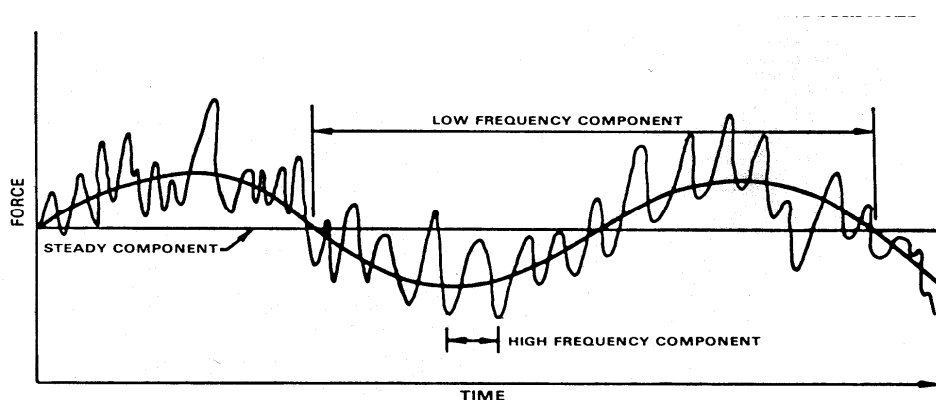
1. Οι δυνάμεις του ανέμου αντιμετωπίζονται ως σταθερές και υπολογίζονται με βάση τη μέση ταχύτητα του 1 λεπτού.
2. Η χρονικά μεταβαλλόμενη δύναμη του ανέμου υπολογίζεται με βάση ένα σταθερό στοιχείο, με βάση τη μέση ταχύτητα 1 ώρας, συν ένα στοιχείο που μεταβάλλεται με το χρόνο και υπολογίζεται από ένα κατάλληλο εμπειρικό φασματικό ρεύμα.

Το συστατικό που εξαρτάται από το χρόνο στη δεύτερη μέθοδο που περιγράφεται παραπάνω είναι επίσης γνωστό ως αργή δύναμη μετατόπισης (slow drift force) λόγω του ανέμου. Οι μέθοδοι πρόβλεψης αργής δύναμης μετατόπισης λόγω του ανέμου εμπεριέχουν έναν υψηλό βαθμό αβεβαιότητας, ιδιαίτερα σε ότι αφορά στο φάσμα της αιολικής ενέργειας, το οποίο προκύπτει από μετρημένα δεδομένα για την αιολική ενέργεια. Αυτό συμβαίνει λόγω του γεγονότος ότι τα περισσότερα από τα δεδομένα ανέμου μετριοούνται στη γη. Η εγκυρότητα αυτών των δεδομένων για τα υπεράκτια περιβάλλοντα είναι αμφισβητούμενη. Ορισμένα δεδομένα αιολικής ενέργειας που συλλέχθηκαν σε ορισμένες παράκτιες περιοχές έδειξαν μεγαλύτερη συνιστώσα χαμηλής συχνότητας από τα δεδομένα ανέμου που μετρήθηκαν στην ξηρά. Ως εκ τούτου, η επιλογή του φάσματος της αιολικής ενέργειας θα πρέπει να αντιμετωπιστεί με προσοχή, ώστε να διασφαλιστεί ότι αντιπροσωπεύει επαρκώς την αιολική ενέργεια σε χαμηλές συχνότητες που συνδέονται τυπικά με τις φυσικές συχνότητες των αγκυροβολημένων κατασκευών.

5.3 Δυνάμεις κυμάτων

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ κυμάτων του ωκεανού και ενός πλωτού σκάφους οδηγούν σε δυνάμεις που δρουν στο σκάφος, οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε τρεις

κατηγορίες (η γραφική αναπαράσταση φαίνεται στο σχήμα 5.1 παρακάτω):



Εικόνα 5.1 Οι δυνάμεις του κυματισμού σε ένα πλωτό σκάφος

1. Δυνάμεις πρώτης τάξης που κυμαίνονται στις συχνότητες των κυμάτων. Προκαλούν κινήσεις πρώτης τάξης οι οποίες είναι επίσης γνωστές ως υψηλής συχνότητας ή κινήσεις με την συχνότητα των κυμάτων.
2. Δυνάμεις δεύτερης τάξης με συχνότητες κάτω από τις συχνότητες των κυμάτων. Προκαλούν κινήσεις δεύτερης τάξης οι οποίες είναι επίσης γνωστές ως κινήσεις χαμηλής συχνότητας.
3. Σταθερό συστατικό των δυνάμεων δεύτερης τάξης που είναι γνωστό ως μέση δύναμη μετατόπισης κύματος (mean wave drift force). Αυτές οι δυνάμεις μπορούν να εκτιμηθούν με δοκιμές σε μοντέλα ή υπολογισμό.

5.4 Οι δυνάμεις του ρεύματος

Οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες ρευμάτων είναι:

1. Παλιρροιακά ρεύματα (που σχετίζονται με τις αστρονομικές παλίρροιες).
2. Ρεύματα λόγω θαλάσσιας κυκλοφορίας (που σχετίζονται με μοντέλα κυκλοφορίας ωκεανού).
3. Ρεύματα που παράγονται από θύελλα.

4. Βρόχο και δινορεύματα.

Το άθροισμα διανυσμάτων αυτών των τεσσάρων στοιχείων του ρεύματος είναι το συνολικό ρεύμα και η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ρεύματος σε καθορισμένη ανύψωση είναι το τρέχον προφίλ.

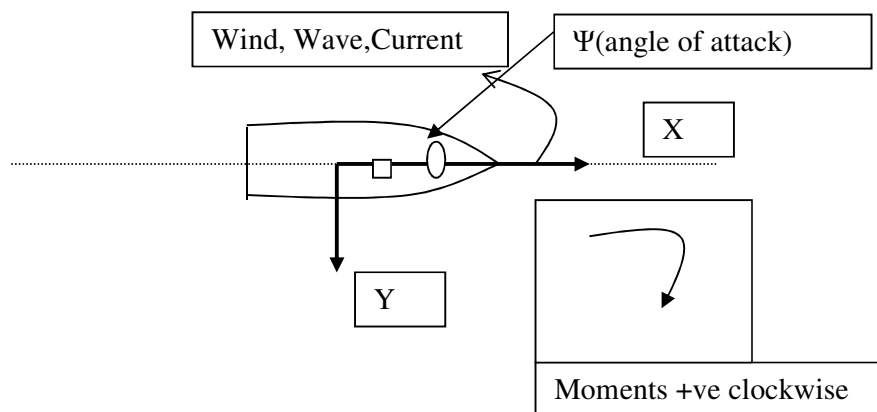
Οι δυνάμεις του ρεύματος κανονικά αντιμετωπίζονται ως δυνάμεις σταθερής κατάστασης σε μια ανάλυση πρόσδεσης. Μπορούν να εκτιμηθούν με δοκιμές μοντέλων ή με άμεσους υπολογισμούς.

Ο υπολογισμός όλων των περιβαλλοντικών δυνάμεων που περιγράφηκαν παραπάνω, στη περίπτωση μας, θα λάβει χώρα αναλυτικά στις ακόλουθες ενότητες.

5.5 Σταθερές περιβαλλοντικές δυνάμεις

Οι υπολογισμοί, προκειμένου να βρεθούν οι σταθερές δυνάμεις που οφείλονται στον άνεμο, στο ρεύμα και στο κύμα που επιδρούν στο FPSO για ένα πλήρες εύρος γωνιών, αζιμούθιου ακολουθούν.

Σε πρώτη φάση θα υιοθετηθεί μια σύμβαση συστήματος συντεταγμένων, η ίδια για όλες τις περιπτώσεις που πρέπει να λάβουμε υπόψη για το σκοπό αυτής της μελέτης. Εμφανίζεται στην εικόνα 5.2 παρακάτω με τα βέλη που δείχνουν προς τη θετική κατεύθυνση των αξόνων x και y:



Εικόνα 5.2 Ένδειξη της σύμβασης σημάνσεων που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη

Στη συνέχεια, όσον αφορά τις μονάδες δυνάμεων και ροπών που πρόκειται να υπολογιστούν, θα είναι kiloNewton (kN) για όλες τις δυνάμεις και kiloNewton * meter (kNm) για τις ροπές. Επιπλέον, οι ροπές θα είναι θετικές δεξιόστροφα, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2

Οι υπολογισμοί έγιναν για το πλωτό σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης (FPSO) της μελέτης μας με τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα 5.1.

Περιγραφή FPSO	
Εκτόπισμα	<i>250,000 ton</i>
L (μήκος)	<i>340 m</i>
Lbp (μήκος μεταξύ καθέτων)	<i>329.3 m</i>
B (Πλάτος)	<i>60 m</i>
D (Βάθος)	<i>50 m</i>
d (Βύθισμα)	<i>19.2 m</i>
Cb (Block coefficient)	<i>0.94</i>
AL (Longitudinal or Broadside wind area)	<i>3225 m²</i>
AT (Transverse or Head-on wind area)	<i>818 m²</i>

Πίνακας 5.1 Στοιχεία FPSO

5.5.1 Σταθερές δυνάμεις του ανέμου

Οι δυνάμεις ανέμου που δρουν στο FPSO για ένα πλήρες φάσμα γωνιών αζιμούθιου θα εκτιμηθούν σύμφωνα με την έκθεση BSRA (BSRA 1984). Οι δυνάμεις surge και sway (διαμήκεις και εγκάρσιες αντίστοιχα) και οι ροπές θα υπολογίζονται για 57 κόμβους = 29,83m / sec αέρα.

Σύμφωνα με την αναφορά BSRA για οποιαδήποτε δεδομένη γωνία ανέμου από την πλώρη, η προκύπτουσα δύναμη και η ροπή δίδονται αντιστοιχώς από τους ακόλουθους τύπους:

BSRA

Η προκύπτουσα δύναμη και ροπή

$$\begin{aligned} R_{AA} &= C_{xw} * A_L * V_w^2 \\ M_{AA} &= C_{Nw} * A_L * V_w^2 L_{OA} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Όπου C_{xw} , C_{Nw} είναι ο προκύπτων συντελεστής δύναμης και η αναφορά συντελεστή ροπής με τις τιμές που λαμβάνονται από την αναφορά BSRA (υπήρχε ένα σφάλμα εδώ στα γραφήματα που παρουσιάζονται στην αναφορά BSRA με τους συντελεστές πολλαπλασιασμένους $\times 10^3$ και $\times 10^4$ επί των δυνάμεων και των ροπών αντίστοιχα) για την προκύπτουσα δύναμη και ροπή αντίστοιχα.

Η προκύπτουσα δύναμη διακρίνεται σε εγκάρσια και διαμήκη δύναμη χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους τύπους:

$$\begin{aligned} R_{AA} &= C_{xw} * A_L * V_w^2 \\ Y_w &= R_{AA} * \sin \beta \\ X_w &= R_{AA} * \cos \beta \\ M_{AA} &= C_{Nw} * A * V_w^2 L_{OA} \end{aligned} \quad (5.2)$$

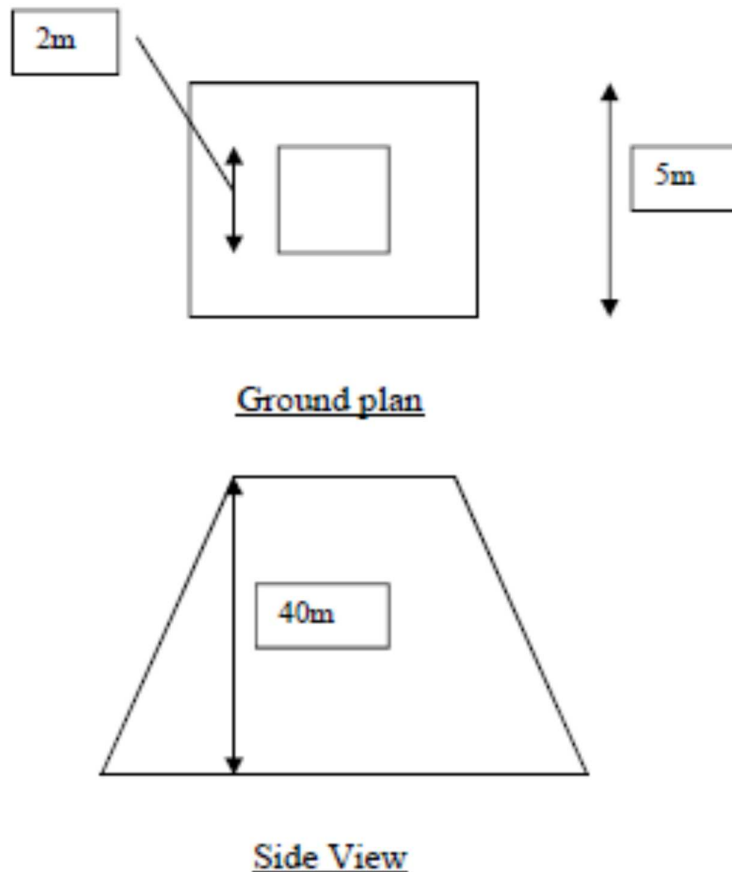
Όπου β είναι η γωνία της προκύπτουσας δύναμης από την πλώρη που καθορίζεται από τα γραφήματα BSRA για διάφορους τύπους πλοίων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των συντελεστών δεν είναι μη διαστασιοποιημένες και πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε οι χρησιμοποιούμενες μονάδες να είναι συνεπείς με εκείνες που χρησιμοποιούνται στην έκθεση BSRA. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο έχουμε αλλάξει τις μονάδες για την περίπτωση μας σε lb και lb * ft για τα στοιχεία του πλοίου μας σε πρώτη φάση (για να κάνουμε τους υπολογισμούς) και στη συνέχεια άλλαξαμε πάλι στο τελικό στάδιο σε kN και MN για τις δυνάμεις και τις ροπές αντίστοιχα για το τελικό αποτέλεσμα.

Στη συνέχεια, πρέπει να ληφθεί υπόψη η αεροδυναμική οπισθέλκουσα της υπερκατασκευής που τοποθετείται στο κατάστρωμα του πλοίου στη διαμήκη κατεύθυνση 50 m προς τα εμπρός. Τα στοιχεία της υπερκατασκευής παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2 και το σχέδιο κάτοψης καθώς και η πλάγια όψη φαίνονται στο Σχήμα 5.3.

<u>Στοιχεία υπερκατασκευών</u>	
Ύψος του πύργου	50m
Πλάτος της κορυφής του Πύργου	2m
Πλάτος της βάσης του Πύργου	5m
Στερεότητα του Πύργου	0.2

Πίνακας 5.2 Στοιχεία υπερκατασκευών



Εικόνα 5.3 Πλευρική όψη και κάτοψη της υπερκατασκευής

Η συνολική δύναμη που ασκείται στην υπερκατασκευή κάθετα προς την προβαλλόμενη επιφάνεια της κατασκευής δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$F_{total} = \frac{1}{2} * \rho * \vartheta * C_d * A_p * V^2 \quad (5.3)$$

ρ είναι η πυκνότητα του αέρα = 1.225 kg / m³,

ϑ είναι ο λόγος στερεότητας,

C_d είναι ο αδιαστατοποιημένος συντελεστής αντοχής που εξαρτάται από το σχήμα

του σώματος και από τον αριθμό του Reynold,

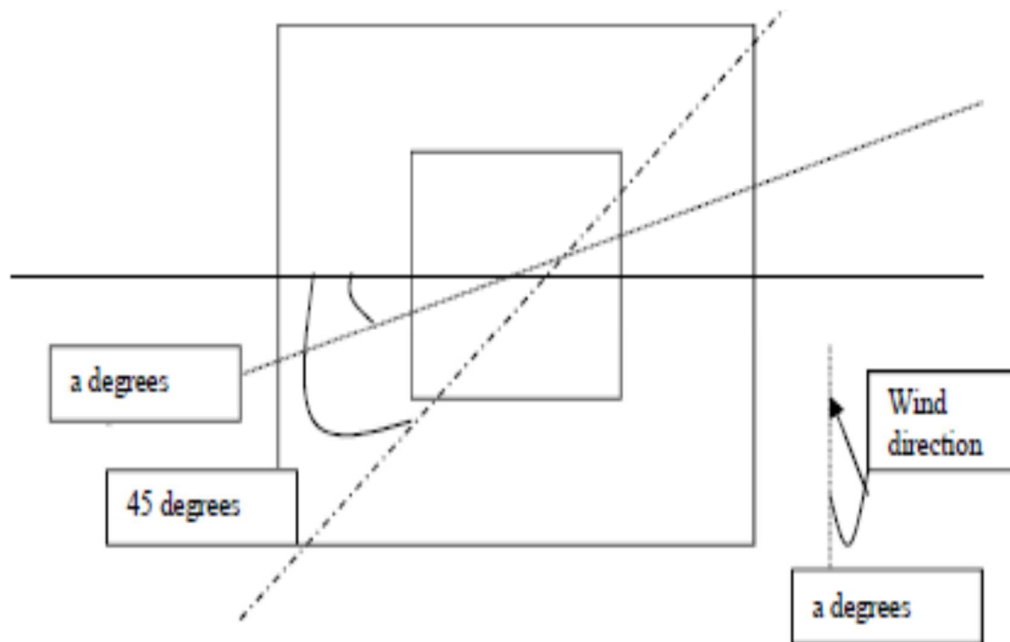
V είναι η ταχύτητα ανέμου = 29,83 m / sec,

A_p είναι η προβαλλόμενη περιοχή του πύργου.

Η διαμήκης δύναμη που ασκείται στην υπερκατασκευή είναι η ολική δύναμη πολλαπλασιασμένη με το \cos (της γωνίας πρόσκρουσης του ανέμου). Η εγκάρσια

δύναμη που ασκείται στον πύργο είναι η συνολική δύναμη πολλαπλασιασμένη με το \sin (της γωνίας πρόσκρουσης του ανέμου). Η εφαρμοζόμενη ροπή στρέψης είναι το προϊόν της εγκάρσιας δύναμης με τον μοχλοβραχίονα. Ο μοχλοβραχίονας στην περίπτωση μας είναι: Μοχλοβραχίονας = (Συνολικό μήκος / 2) - 50m = 120m (5.4)

Ένα σημαντικό ζήτημα είναι ο ορισμός και ο υπολογισμός της προβαλλόμενης περιοχής της υπερκατασκευής λαμβάνοντας υπόψη την αλλαγή της κατεύθυνσης της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου (εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4 Ορισμός της προβαλλόμενης επιφάνειας της υπερκατασκευής

Έχουμε :

$$\cos a = \frac{2}{k} \Rightarrow k = \frac{1}{\cos a} \Rightarrow K = 2 \times \frac{1}{\cos a} \quad (5.5)$$

$$\cos a = \frac{5}{l} \Rightarrow l = \frac{2.5}{\cos a} \Rightarrow L = 2 \times \frac{2.5}{\cos a}$$

Όπου K είναι η μικρή βάση του τραπεζοειδούς σχήματος της προβαλλόμενης περιοχής και L είναι η μεγάλη βάση του τραπεζοειδούς σχήματος της προβαλλόμενης

περιοχής. Έτσι, η προβαλλόμενη περιοχή είναι η περιοχή του τραπεζοειδούς.

Στον Πίνακα 5.3 του Παραρτήματος 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μαζί με τα αντίστοιχα γραφήματα για τις κατά το μήκος - surge (Σχήμα 5.5), κατά το εγκάρσιο – sway (Εικόνα 5.6) δυνάμεις, καθώς και για τις yaw-ροπές (Σχήμα 5,7), για κάθε γωνία πρόσπτωσης ανέμου.

Τα αποτελέσματα για τις δυνάμεις ανέμου που δρουν στην υπερκατασκευή παρουσιάζονται επίσης στο Παράρτημα 2. Τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται στον Πίνακα 5.4 και τα σχήματα (Σχήμα 5.8 - Σχήμα 5.9 - Σχήμα 5.10) αντιπροσωπεύουν γραφικά τις surge-διαμήκεις, sway-εγκάρσιες δυνάμεις και την yaw-ροπή στρέψης αντίστοιχα.

5.5.2 Σταθερές δυνάμεις ρεύματος

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων και των συναφών ροπών που οφείλονται στο ρεύμα έχει χρησιμοποιηθεί η Wise and English πηγή (J.W. English 1975).

Οι τύποι υπολογισμού των δυνάμεων και των ροπών είναι:

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{1}{2} * C_{xc} * \rho * V_c^2 * L_{BP} * T, \\ Y_c &= \frac{1}{2} * C_{yc} * \rho * V_c^2 * L_{BP} * T, \\ X_r &= \frac{1}{2} * C_{Nr} * \rho * V_c^2 * L_{BP}^2 * T. \end{aligned} \quad (5.6)$$

που:

ρ είναι η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού,

V_c είναι η ταχύτητα του ρεύματος,

L_{bp} είναι το μήκος μεταξύ καθέτων και

C_{xc} , C_{yc} , C_{Nr} είναι οι συντελεστές για το ρεύμα.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε Wise and English αποτελέσματα (για τις δυνάμεις και τις ροπές) απλά παίρνοντας την αναλογία των δυνάμεων και των ροπών

κάθε φορά για την υπόθεση Wise and English και για το πλοίο μας λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές στα χαρακτηριστικά των δύο πλοίων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να πούμε ότι η ταχύτητα του ρεύματος και για τις δύο περιπτώσεις είναι 3 κόμβοι = 1.542 m / sec. Οι σχετικοί τύποι είναι:

$$X_c = X_m \times \left(\frac{V_c}{V_m}\right)^2 \times \left(\frac{L_c * T_c}{L_m * T_m}\right) = X_m \times \left(\frac{L_c * T_c}{L_m * T_m}\right) \Rightarrow X_c = X_m \times 12.19 \text{ KNt} ,$$

$$Y_c = Y_m \times \left(\frac{V_c}{V_m}\right)^2 \times \left(\frac{L_c * T_c}{L_m * T_m}\right) = Y_m \times \left(\frac{L_c * T_c}{L_m * T_m}\right) \Rightarrow Y_c = Y_m \times 12.19 \text{ KNt} , \quad (5.7)$$

$$N_c = N_m \times \left(\frac{V_c}{V_m}\right)^2 \times \left(\frac{L_c^2 * T_c}{L_m^2 * T_m}\right) = N_m \times \left(\frac{L_c^2 * T_c}{L_m^2 * T_m}\right) \Rightarrow N_c = N_m \times 42.5 \text{ MN} * m$$

Οι συντελεστές για το ρεύμα μπορούν να βρεθούν από:

$$\frac{X_c}{\frac{1}{2} \rho * V_c^2 * L_{BP} * T} = C_{Xc},$$

$$\frac{Y_c}{\frac{1}{2} \rho * V_c^2 * L_{BP} * T} = C_{Yc}, \quad (5.8)$$

$$\frac{N_c}{\frac{1}{2} * \rho * V_c^2 * L_{BP}^2 * T} = C_{Nc}.$$

Στον Πίνακα 5.5 του Παραρτήματος 2 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα και οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις για τις surge-διαμήκειες (εικόνα 5.11), εγκάρσιες – sway (εικόνα 5.12) δυνάμεις και yaw-ροπές (εικόνα 5.13), για κάθε γωνία πρόσπτωσης του ρεύματος.

5.5.3 Σταθερές δυνάμεις κύματος

Σύμφωνα με την έκθεση BSRA (BSRA 1984), διαμήκειες και εγκάρσιες δυνάμεις και ροπές δίδονται αντιστοίχως από τους ακόλουθους τύπους:

$$\begin{aligned}
 FLd &= CLd * \rho * g * Lpp * (\bar{\xi}_w)_{1/3}^2 \\
 FTd &= CTd * \rho * g * Lpp * (\bar{\xi}_w)_{1/3}^2 \\
 Md &= CMd * \rho * g * Lpp^2 * (\bar{\xi}_w)_{1/3}^2
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

Που:

ρ είναι η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού,

Lpp είναι το μήκος μεταξύ καθέτων,

g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,

ξ_w είναι το σημαντικό ύψος κύματος (significant wave height) ίσο με 7,8 μέτρα στην περίπτωση μας. Οι CLd , CTd , CMd είναι οι σχετικοί συντελεστές για τις μέσες τιμές στον χρόνο των δυνάμεων και ροπών δεύτερης τάξης (mean wave force and yaw drift moment) που ασκούνται από το κύμα στην κατασκευή οι οποίες ελήφθησαν από την αναφορά BSRA.

Στον Πίνακα 5.6 του Παραρτήματος 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μαζί με τα αντίστοιχα γραφήματα για τις surge-διαμήκεις (Σχήμα 5.14), εγκάρσιες – sway (Σχήμα 5.15) δυνάμεις και yaw-ροπές (Σχήμα 5.16), για κάθε γωνία πρόσπτωσης του κύματος.

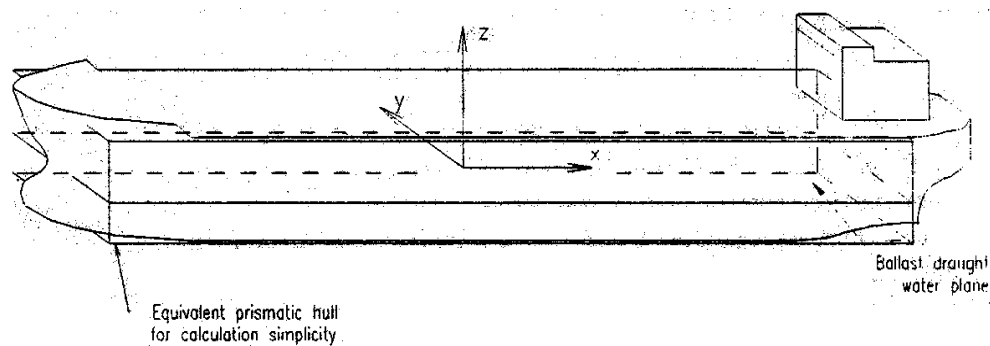
Στον Πίνακα 5.7 του Παραρτήματος 2 παρουσιάζονται οι συνολικές μέσες τιμές στον χρόνο των δυνάμεων και ροπών που επενεργούν στο FPSO μαζί με τα αντίστοιχα γραφήματα (για τις δυνάμεις surge-στη διαμήκη κατεύθυνση βλέπε Σχήμα 5.17, για τις δυνάμεις sway-στην εγκάρσια κατεύθυνση βλέπε Σχήμα 5.18 και για τις ροπές περί τον κατακόρυφο άξονα (yaw-ροπές) βλέπε Σχήμα 5.19). Οι δυνάμεις από όλες τις περιβαλλοντικές παραμέτρους έχουν προστεθεί με τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε σημείο η κατεύθυνση του ανέμου, του ρεύματος και του κύματος να είναι συγγραμικές, για το πλήρες εύρος γωνιών αζιμούθιου.

5.6 Δυνάμεις συχνότητας κύματος και κινήσεις του πλοίου

Όπως έχουμε περιγράψει προηγουμένως, οι δυνάμεις συχνότητας κύματος είναι δυνάμεις πρώτης τάξης που ταλαντεύονται στις συχνότητες των κυμάτων. Επομένως, οι κινήσεις του σκάφους συχνότητας κύματος είναι οι κινήσεις του σκάφους στη συχνότητα των κυμάτων.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται μερικοί υπολογισμοί για να εκτιμηθεί η απόκριση των πλοίων σε surge, sway και yaw, απαραίτητη για την ανάλυση του συστήματος πρόσδεσης. Αυτοί οι υπολογισμοί εκτελέστηκαν με το χέρι μαζί με τη χρήση ενός προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή που γράφτηκε στο Excel. Η μέθοδος μπορεί να δώσει μια εικόνα για τις διάφορες δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται σε μια πλατφόρμα τύπου πλοίου (ship-shaped) στην θάλασσα. Μπορεί επίσης να προσφέρει έναν τρόπο ελέγχου και επαλήθευσης των αποτελεσμάτων μιας πιο εξελιγμένης ανάλυσης, βοηθώντας παράλληλα τον αναλυτή να κατανοήσει και να αποκτήσει εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα αυτά.

Προκειμένου να υπολογιστούν οι κινήσεις surge, sway και yaw του FPSO, η μορφή του κύτους του FPSO θα αντικατασταθεί από ισοδύναμη φορτηγίδα. Το προκύπτον ορθογώνιο πλοίο παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 5.20.



Εικόνα 5.20 Ορθογώνιο πλοίο

Τα δεδομένα για το ισοδύναμο ορθογώνιο πλοίο μπορούν να βρεθούν από:

$$\Delta_{FPSO} = \Delta_{RECTANGULAR_SHIP} \quad (5.10)$$

Where:

$$\Delta_{FPSO} = (C_B \times L_F \times B_F \times d_F) \times \rho(\text{tonnes}) \quad (5.11),$$

$$\Delta_{RECTANGULAR_SHIP} = (L_B \times B_B \times d_B) \times \rho(\text{tonnes}) \quad (5.12).$$

Όπου:

C_B : Είναι ο block coefficient του FPSO,

L_F : Είναι το μήκος του FPSO,

B_F : Είναι το πλάτος του FPSO,

d_F : Είναι το βύθισμα του FPSO,

L_B : Είναι το μήκος του ορθογώνιου πλοίου,

B_B : Είναι το πλάτος του ορθογώνιου πλοίου,

d_B : Είναι το βύθισμα του ορθογώνιου πλοίου,

ρ : Είναι η πυκνότητα του νερού.

Ως εκτό του :

$$\Delta_{FPSO} = \Delta_{RECTANGULAR_SHIP} \Leftrightarrow$$

$$(C_B \times L_F \times B_F \times d_F) \times \rho = (L_B \times B_B \times d_B) \times \rho \Leftrightarrow$$

$$B_B = \frac{(C_B \times L_F \times B_F \times d_F) \times \rho}{(L_B \times d_B) \times \rho} \Leftrightarrow$$

$$B_B = C_B \times B_F \quad (5.13)$$

Επειδή:

$$L_F = L_B = L$$

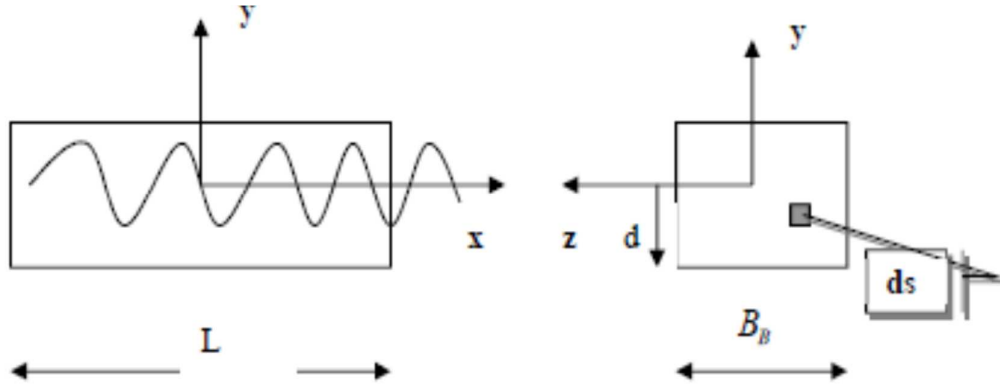
and

$$d_F = d_B = d.$$

Σε όλους τους υπολογισμούς, του surge, sway και yaw του FPSO, η πρόσθετη μάζα σε κάθε περίπτωση θα εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλους συντελεστές πρόσθετης μάζας (βλέπε Παράρτημα 3).

5.6.1 Δύναμη κατά την διαμήκη κατεύθυνση (Surge)

Το σύστημα αξόνων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της δύναμης surge του ορθογώνιου πλοίου στην διαμήκη και εγκάρσια όψη του πλοίου παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα 5.21.



Εικόνα 5.21 Υπολογισμός διαμήκους δύναμης (Surge force)

Οι δυνάμεις που επενεργούν στη δεξιά πλευρά του ορθογώνιου ισοδύναμου πλοίου μπορούν να γραφτούν ως:

$$\mathbf{F}_{RS} = \mathbf{F}_{PRS} + \mathbf{F}_{ARS} \quad (5.14)$$

Που

\mathbf{F}_{PRS} είναι η δύναμη λόγω του πεδίου πιέσεων της αδιατάρακτης ροής

(Froude-Krylov force) που δίνεται από τον τύπο:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{PRS} &= - \int_S \mathbf{p}_d * d_s * \vec{n} \Rightarrow \\ \mathbf{F}_{PRS} &= - \int_S \rho * g * 0.5 * H_w * e^{ky} * \cos(k \frac{L}{2} - \omega t) dy dz \Leftrightarrow \\ \mathbf{F}_{PRS} &= - \int_{-d - \frac{B_B}{2}}^0 \int_{-\frac{B_B}{2}}^{\frac{B_B}{2}} \rho * g * 0.5 * H_w * e^{ky} * dy * \cos(k \frac{L}{2} - \omega t) * dz \Leftrightarrow \\ \mathbf{F}_{PRS} &= - \rho * g * 0.5 * H_w * \left[\frac{1}{k} * (1 - e^{-kd}) \right] * B_B * \cos(k \frac{L}{2} - \omega t) \end{aligned} \quad (5.15)$$

και \mathbf{F}_{ARS} είναι η δύναμη λόγω της επιτάχυνσης της ροής (acceleration force)

στο δεξί μέρος που δίνεται από τον τύπο:

$$F_{ARS} = m_{avm_{right-hand-side}} \times \left. \begin{matrix} q_x \\ x=\frac{L}{2} \text{ and } y=-\frac{d}{2} \end{matrix} \right\} \quad (5.16)$$

Όπου:

$$m_{avm_{right-hand-side}} \text{ (Πρόσθετη μάζα στο δεξί μέρος)} =$$

$$= \frac{1}{2} * k_{avm} * \frac{\rho}{4} * \pi * d^2 * B_B \text{ (Κανν είναι ο συντελεστής πρόσθετης μάζας που}$$

τον παίρνουμε από τους πίνακες του Παραρτήματος 3) (5.17)

και a_x η επιτάχυνση των σωματιδίων του ρευστού κατά την οριζόντια

κατεύθυνση =

$$= 0.5 * H_w * \omega^2 * e^{-k\frac{d}{2}} * \sin\left(k\frac{L}{2} - \omega t\right) \quad (5.18).$$

Επομένως:

$$F_{ARS} = \left(\frac{1}{2} * k_{avm} * \frac{\rho}{4} * \pi * d^2 * B_B * 0.5 * H_w * \omega^2 * e^{-k\frac{d}{2}} \right) * \sin\left(k\frac{L}{2} - \omega t\right) \quad (5.19)$$

Έτσι, η συνολική δύναμη που ενεργεί στη δεξιά πλευρά της φορτηγίδας είναι:

$$F_{RS} = \left(-\rho * g * 0.5 * H_w * \left[\frac{1}{k} * (1 - e^{-kd}) \right] * B_B \right) * \cos\left(k\frac{L}{2} - \omega t\right) +$$

$$+ \left(\frac{1}{2} * k_{avm} * \frac{\rho}{4} * \pi * d^2 * B_B * 0.5 * H_w * \omega^2 * e^{-k\frac{d}{2}} \right) * \sin\left(k\frac{L}{2} - \omega t\right) \quad (5.20)$$

Οι δυνάμεις που επενεργούν στην αριστερή πλευρά του ορθογώνιου πλοίου μπορούν να υπολογιστούν με παρόμοιο τρόπο. Επομένως η συνολική δύναμη που ενεργεί στην αριστερή πλευρά δίνεται από:

$$F_{LS} = F_{PLS} + F_{ALS} \Rightarrow$$

$$F_{LS} = \left(\rho * g * 0.5 * \left[\frac{1}{k} * (1 - e^{-kd}) \right] * B_B \right) * \cos\left(-k\frac{L}{2} - \omega t\right) +$$

$$+ \left(\frac{1}{2} * k_{avm} * \frac{\rho}{4} * \pi * d^2 * B_B * 0.5 * H_w * \omega^2 * e^{-k\frac{d}{2}} \right) * \sin\left(-k\frac{L}{2} - \omega t\right) \quad (5.21)$$

Έτσι, η συνολική δύναμη που ασκείται στο ορθογώνιο πλοίο δίνεται από:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_S &= \mathbf{F}_{RS} + \mathbf{F}_{LS} \Rightarrow \\ \mathbf{F}_S &= \left\{ \begin{array}{l} -2 * \rho * g * 0.5 * H_w * \left[\frac{1}{k} * (1 - e^{-kd}) \right] * B_B * \sin\left(\frac{kL}{2}\right) - \\ -2 * \frac{1}{2} * k_{avm} * \frac{\rho}{4} * \pi * d^2 * B_B * 0.5 * H_w * \omega^2 * e^{-\frac{kd}{2}} * \cos\left(\frac{kL}{2}\right) \end{array} \right\} * \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (5.22)$$

Το μέτρο της δύναμης surge (κατά τον διαμήκη άξονα του πλοίου) παρουσιάζεται για μια σειρά κυματικών συχνοτήτων στο Παράρτημα 4-Πίνακας 5.8.

Η μετατόπιση κατά την διαμήκη κατεύθυνση (surge) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$x_{Surge} = \frac{F_{OSurge} / k_{Stiffness-Surge}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{n-Surge}} \right)^2 \right]^2 + \left(2 \frac{\omega}{\omega_{n-Surge}} d \right)^2}} \quad (5.23)$$

Όπου:

- F_{OSurge} είναι το παραπάνω υπολογισμένο πλάτος της δυνάμεως surge,
- ω είναι η συχνότητα κύματος,
- $\omega_{n-Surge}$ είναι η φυσική surge συχνότητα,
- $k_{Stiffness-Surge}$ είναι η ακαμψία του συστήματος αγκύρωσης κατά την διαμήκη (surge) κατεύθυνση, η οποία μπορεί να εκτιμηθεί από την καμπύλη ακαμψίας γραμμής πρόσδεσης και
- d είναι ο συντελεστής απόσβεσης.

Σχετικά με την απόσβεση της συχνότητας των κυμάτων μπορούμε να πούμε ότι εκτός από το rolling των σκαφών μονής γάστρας, οι φυσικές συχνότητες των κινήσεων

σώματος των πλωτών κατασκευών έχουν σχεδιαστεί για να βρίσκονται εκτός της περιοχής της συχνότητας των κυμάτων και έτσι η απόσβεση δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα. Η κλασική ανάλυση της δυναμικής απόκρισης ενός συστήματος μονού βαθμού ελευθερίας παρέχει λόγο απόσβεσης ως:

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega_n}$$

Όπου:

- ω_n είναι η φυσική συχνότητα του συστήματος,
- c είναι ο συντελεστής απόσβεσης και
- m είναι η μάζα του συστήματος.

Στην περίπτωσή μας η απόσβεση της συχνότητας των κυμάτων θα ληφθεί της τάξης του 15%.

Ο συντελεστής απόκρισης [response amplitude operator (RAO)] για surge (Surge-RAO) δίνεται από:

$$RAO_{Surge} = \frac{x_{Surge}}{0.5H_w} \quad (5.24)$$

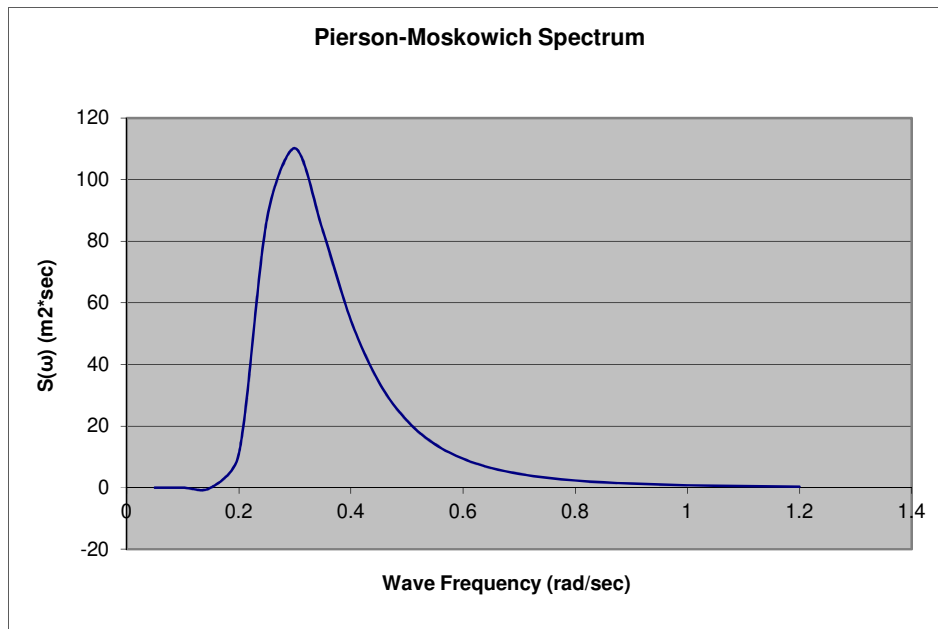
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα 4-Πίνακας 5.8-Σχήμα 5.22-Σχήμα 5.23.

Η απόκριση στην διαμήκη κατεύθυνση (surge) σε φυσικούς θαλάσσιους κυματισμούς βρίσκεται συνδυάζοντας τον συντελεστή απόκρισης στην διαμήκη κατεύθυνση (Surge-RAO) με ένα σωστά επιλεγμένο θαλάσσιο φάσμα. Η επιλογή του κατάλληλου θαλάσσιου φάσματος εξαρτάται από την υπό εξέταση τοποθεσία. Το θαλάσσιο φάσμα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση μας είναι το φάσμα Pierson-Moskovich λόγω του γεγονότος ότι προέκυψε από την ανάλυση ενός δείγματος

περίπου 400 φασμάτων που μετράται στον Βόρειο Ατλαντικό και χρησιμοποιείται ευρέως για τον χαρακτηρισμό των κυμάτων στον ανοιχτό ωκεανό . Το φάσμα Pierson-Moskovich υπολογίζεται από μια ημι-εμπειρική έκφραση όπως φαίνεται παρακάτω:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left[-\beta \left(\frac{g}{U\omega}\right)^4\right] \quad (5.25)$$

Στην έκφραση αυτή οι τιμές α και β είναι αδιαστατοποιημένοι παράμετροι που ορίζουν το φάσμα και U είναι η ταχύτητα ανέμου σε τυπικό ύψος 19.5 μέτρων πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια. Οι τιμές για α και β είναι $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$ $\beta = 0.74$ και η ταχύτητα ανέμου U επιλέγεται για να είναι 29.83 m / sec. Το προκύπτον φάσμα Pierson-Moskovich παρουσιάζεται στην επόμενη Εικόνα 5.24.



Εικόνα 5.24 Φάσμα Pierson-Moskovich

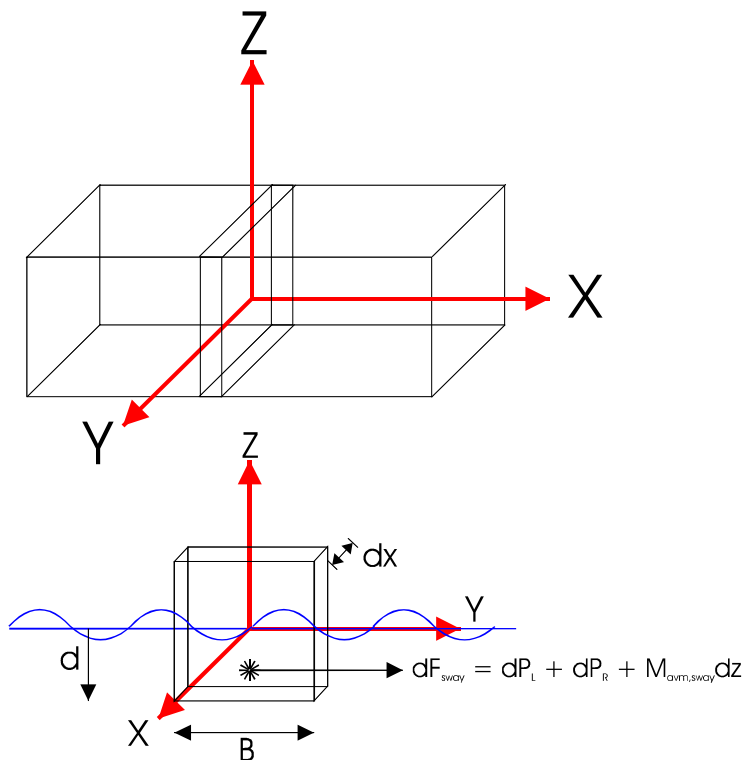
Το φάσμα της απόκρισης λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$RS(\omega)_{Surge} = S(\omega) \times RAO_{Surge}^2$$

Η περιοχή κάτω από το υπολογισμένο φάσμα απόκρισης είναι η διακύμανση της απόκρισης και η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης είναι η τυπική απόκλιση της απόκρισης (x_{rms}). Με βάση τη κατανομή Rayleigh των μέγιστων αποκρίσεων η σημαντική απόκριση (x_{sig}) είναι 2.0 φορές η απόκριση rms (x_{rms}) και η μέγιστη απόκριση (x_{max}) είναι 1.86 φορές η σημαντική απόκριση (x_{sig}). Οι προκύπτουσες τιμές συνοψίζονται στο Παράρτημα 4-Πίνακας 5.9.

5.6.2 Δύναμη κατά την εγκάρσια κατεύθυνση (Sway)

Η δύναμη κατά την εγκάρσια κατεύθυνση θα υπολογιστεί με χρήση της θεωρίας των λωρίδων (Σχήμα 5.25):



Εικόνα 5.25 Υπολογισμός της δύναμης κατά την εγκάρσια κατεύθυνση (Sway force)

$$F_{SWAY} = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} dF_{SWAY} \Leftrightarrow \quad (5.26)$$

$$F_{SWAY} = (dP_L + dP_R + m_{avm} * a_z) * L$$

Έτσι η συνολική δύναμη ταλάντωσης είναι η άθροιση της δύναμης πίεσης από το αδιατάρακτο πεδίο ροής (Froude-Krylov) και της δύναμης λόγω επιτάχυνσης των σωματιδίων του ρευστού και μπορεί να γραφτεί ως:

$$F_{SWAY} = F_{PSWAY} + F_{ASWAY} \quad (5.27)$$

Όπου:

F_{PSWAY} είναι η δύναμη λόγω του πεδίου πιέσεων που προκαλείται από την

αδιατάρακτη ροή (*Froude-Krylov force*) που δίνεται από:

$$F_{PSWAY} = L * \rho * g * 0.5 * H_w * \left[\frac{1}{k} * (1 - e^{-kd}) \right] * \left[\cos\left(k \frac{B_B}{2} + \omega t\right) - \cos\left(k \frac{B_B}{2} - \omega t\right) \right] \quad (5.28)$$

και F_{ASWAY} είναι η δύναμη λόγω επιτάχυνσης των σωματιδίων του ρευστού

(*acceleration force*) που δίνεται από:

$$F_{ASWAY} = \frac{1}{2} * k_{avm} * L * \rho * \pi * d^2 * e^{-k \frac{d}{2}} * \frac{2\pi^2 H_w}{T^2} \left[\sin\left(k \frac{B_B}{2} - \omega t\right) - \sin\left(k \frac{B_B}{2} + \omega t\right) \right] \quad (5.29)$$

(T είναι η περίοδος του κυματισμού).

Ως εκ τούτου, η συνολική δύναμη ταλάντωσης που επενεργεί στο ορθογώνιο πλοίο είναι:

$$F_{sway} = \left\{ \begin{array}{l} -2 * L * \rho * g * 0.5 * H_w * \left[\frac{1}{k} * (1 - e^{-kd}) \right] * \sin\left(k \frac{B_B}{2}\right) - \\ -2 * \frac{1}{2} * k_{avm} * L * \rho * \pi * d^2 * e^{-k \frac{d}{2}} * \frac{2\pi^2 H_w}{T^2} * \cos\left(k \frac{B_B}{2}\right) \end{array} \right\} * \sin(\omega t) \quad (5.30)$$

Η μετατόπιση sway μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$y_{sway} = \frac{F_{OSway} / k_{Stiffness-Sway}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{n-Sway}} \right)^2 \right]^2 + \left(2 \frac{\omega}{\omega_{n-Sway}} d \right)^2}} \quad (5.31)$$

Όπου:

- F_{OSway} είναι το παραπάνω υπολογισμένο πλάτος της δύναμης sway,
- ω είναι η συχνότητα κύματος
- ω_{n-Sway} είναι η φυσική συχνότητα ταλάντωσης
- $k_{Stiffness-Sway}$ είναι η ακαμψία αγκυροβόλησης στην εγκάρσια κατεύθυνση (sway), η οποία μπορεί να αξιολογηθεί από την καμπύλη ακαμψίας γραμμής πρόσδεσης και
- d είναι η ο συντελεστής απόσβεσης.

Ο συντελεστής απόκρισης [Response Amplitude Operator (RAO)] για την κίνηση sway (Sway-RAO) δίνεται από:

$$RAO_{Sway} = \frac{y_{sway}}{0.5H_w}$$

Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Παράρτημα 4-Πίνακας 5.10-Σχήμα 5.26-Σχήμα 5.27.

Η απόκριση της κατασκευής στην εγκάρσια κατεύθυνση (sway) σε φυσικούς θαλάσσιους κυματισμούς συχνότητας επιτυγχάνεται συνδυάζοντας το Sway-RAO με το φάσμα Pierson-Moskovich, με παρόμοιο τρόπο όπως στην περίπτωση της κίνησης

κατά την διαμήκη κατεύθυνση surge.

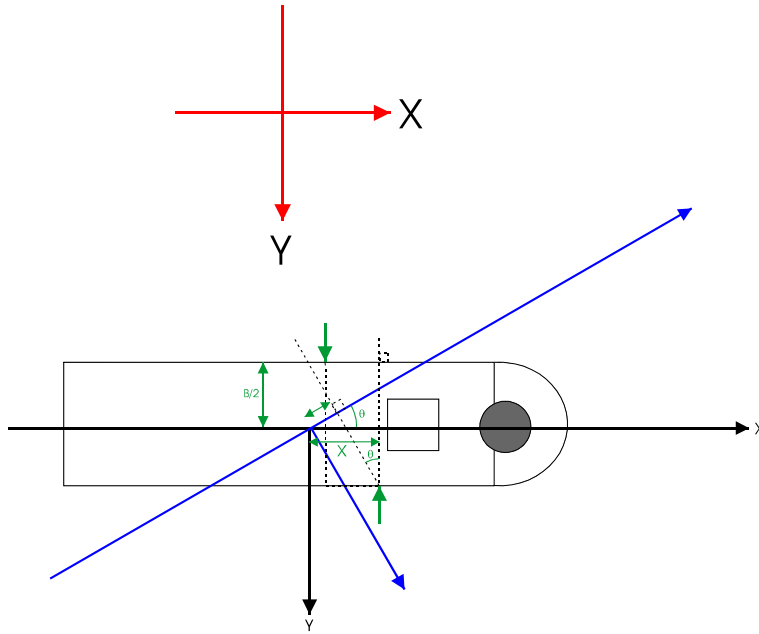
Το φάσμα απόκρισης λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$RS(\omega)_{sway} = S(\omega) \times RAO_{sway}^2$$

Η περιοχή κάτω από το υπολογισμένο φάσμα απόκρισης είναι η διακύμανση της απόκρισης και η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης είναι η τυπική απόκλιση της απόκρισης (Y_{rms}). Με βάση την κατανομή Rayleigh για τις μέγιστες αποκρίσεις, η σημαντική απόκριση (Y_{sig}) είναι 2.0 φορές η απόκριση rms (Y_{rms}) και η μέγιστη απόκριση (Y_{max}) είναι 1.86 φορές η σημαντική απόκριση (Y_{sig}). Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο Παράρτημα 4-Πίνακας 5.11.

5.6.3 Διαμόρφωση δύναμης Yaw

Σημειώνουμε ότι υπάρχει ομοιότητα με την περίπτωση του sway σε beam seas, αλλά η γεωμετρία όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.28 είναι λίγο πιο περίπλοκη.



Εικόνα 5.28 Σχηματισμός ροπής περί τον κατακόρυφο άξονα περιστοφής (yaw moment)

Οι δυνάμεις που προκαλούν ροπή περί τον κατακόρυφο άξονα περιστοφής (yaw moment) έχουν ένα τμήμα που οφείλεται στις δυνάμεις Froude-Krylon και ένα τμήμα που οφείλεται στην επιτάχυνση των σωματιδίων της ροής και υπολογίζεται με γνώση του συντελεστή πρόσθετης μάζας.

Η ροπή Froude-Krylon είναι:

$$M_F = \rho * g * H_w * \left[\frac{1}{k} (1 - e^{-kd}) \right] * \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left\{ \cos \left[k \left(x \cos \vartheta - \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) - \omega t \right] - \cos \left[k \left(x \cos \vartheta + \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) - \omega t \right] \right\} x dx \quad (5.32)$$

Η ροπή λόγω της πρόσθετης μάζας είναι:

$$M_A = K_{avm} * 0.5 * \rho * \pi * d^2 * e^{-k \frac{d}{2}} * \frac{\omega^2 * H_w}{2} * \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sin(kx \cos \vartheta - \omega t) \sin \vartheta dx$$

(5.33)

Επομένως, η συνολική ροπή yaw είναι:

$$\begin{aligned}
M_{YAW} &= \rho * g * 0.5 * H_w * \left[\frac{1}{k} (1 - e^{-kd}) \right] * \\
&* \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left\{ \cos \left[k \left(x \cos \vartheta - \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) - \omega t \right] - \cos \left[k \left(x \cos \vartheta + \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) - \omega t \right] \right\} x dx + \\
&+ K_{avn} * 0.5 * \rho * \pi * d^2 * e^{-k \frac{d}{2}} * \frac{\omega^2 * H_w}{2} * \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sin(kx \cos \vartheta - \omega t) \sin \vartheta x dx
\end{aligned}$$

(5.34)

Αλλά:

$$\begin{aligned}
&\cos \left[k \left(x \cos \vartheta - \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) - \omega t \right] - \cos \left[k \left(x \cos \vartheta + \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) - \omega t \right] = \\
&= \cos \left[k \left(x \cos \vartheta - \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) \right] \cos(\omega t) + \sin \left[k \left(x \cos \vartheta - \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) \right] \sin(\omega t) - \\
&- \cos \left[k \left(x \cos \vartheta + \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) \right] \cos(\omega t) - \sin \left[k \left(x \cos \vartheta + \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) \right] \sin(\omega t) = \\
&= \cos(\omega t) \left\{ \cos \left[k \left(x \cos \vartheta - \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) \right] - \cos \left[k \left(x \cos \vartheta + \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) \right] \right\} + \\
&+ \sin(\omega t) \left\{ \sin \left[k \left(x \cos \vartheta - \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) \right] - \sin \left[k \left(x \cos \vartheta + \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) \right] \right\} = \\
&= \cos(\omega t) \left[2 * \sin(kx \cos \vartheta) * \sin \left(k \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) \right] + \sin(\omega t) \left[-2 * \cos(kx \cos \vartheta) * \sin \left(k \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) \right] = \\
&= 2 \sin \left(k \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) * \sin(kx \cos \vartheta - \omega t)
\end{aligned}$$

Επομένως:

$$M_{YAW} = \left\{ \begin{aligned} &\rho * g * 0.5 * H_w * \left[\frac{1}{k} (1 - e^{-kd}) \right] * 2 \sin \left(k \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) + \\ &+ K_{avn} * 0.5 * \rho * \pi * d^2 * e^{-k \frac{d}{2}} * \frac{\omega^2 * H_w}{2} \sin \vartheta \end{aligned} \right\} * \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sin(kx \cos \vartheta - \omega t) x dx$$

(5.35)

Όπου:

$$\begin{aligned}
 & \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sin(kx \cos \vartheta - \omega t) x dx = \\
 & x \left(-\frac{1}{k \cos \vartheta} \right) \cos(kx \cos \vartheta - \omega t) - \left(-\frac{1}{k \cos \vartheta} \right) \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \cos(kx \cos \vartheta - \omega t) dx = \\
 & = x \left(-\frac{1}{k \cos \vartheta} \right) \cos(kx \cos \vartheta - \omega t) + \left(\frac{1}{k \cos \vartheta} \right)^2 \sin(kx \cos \vartheta - \omega t) = \\
 & = \left[\left(-\frac{L}{2k \cos \vartheta} \right) \cos\left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta - \omega t\right) - \left(\frac{L}{2k \cos \vartheta} \right) \cos\left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta + \omega t\right) \right] + \\
 & + \left[\left(\frac{1}{k \cos \vartheta} \right)^2 \sin\left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta - \omega t\right) + \left(\frac{1}{k \cos \vartheta} \right)^2 \sin\left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta + \omega t\right) \right] = \\
 & = \left(-\frac{L}{2k \cos \vartheta} \right) \left[\cos\left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta - \omega t\right) + \cos\left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta + \omega t\right) \right] + \\
 & + \left(\frac{1}{k \cos \vartheta} \right)^2 \left[\sin\left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta - \omega t\right) + \sin\left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta + \omega t\right) \right] = \\
 & = \left(-\frac{L}{2k \cos \vartheta} \right) \left[\cos\left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta\right) + \cos(\omega t) \right] + \\
 & + \left(\frac{1}{k \cos \vartheta} \right)^2 \left[\sin\left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta\right) + \cos(\omega t) \right] = \\
 & = \left\{ \left(-\frac{L}{2k \cos \vartheta} \right) \cos\left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta\right) + \left(\frac{1}{k \cos \vartheta} \right)^2 \sin\left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta\right) \right\} \cos(\omega t)
 \end{aligned}$$

Επομένως, η συνολική Yaw Moment είναι:

$$M_{YAW} = \left\{ \begin{aligned} & \rho * g * 0.5 * H_w * \left[\frac{1}{k} (1 - e^{-kd}) \right] * 2 \sin \left(k \frac{B_B}{2} \sin \vartheta \right) + \\ & + K_{avm} * 0.5 * \rho * \pi * d^2 * e^{-\frac{k d}{2}} * \frac{\omega^2 * H_w}{2} \sin \vartheta \end{aligned} \right\} * \quad (5.36)$$

$$* \left\{ \left(-\frac{L}{2k \cos \vartheta} \right) \cos \left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta \right) + \left(\frac{1}{k \cos \vartheta} \right)^2 \sin \left(k \frac{L}{2} \cos \vartheta \right) \right\} \cos(\omega t)$$

Τα αποτελέσματα φαίνονται στο **Παράρτημα 4 – Πίνακας 5.12**

5.7 Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις (Slow Drift) και αργά μεταβαλλόμενες κινήσεις (low frequency) του πλοίου

5.7.1 Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις λόγω κυμάτων

Το μέγεθος των βραδέως μεταβαλλόμενων δυνάμεων είναι κανονικά πολύ μικρότερο από τα φορτία συχνότητας κυμάτων, αλλά λόγω του συντονισμού με το αγκυροβολημένο σκάφος, αυτά έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν πολύ μεγάλα φορτία στο σύστημα πρόσδεσης. Πράγματι, η ύπαρξη της αγκυροβόλησης καθιστά τις αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις (slow drift) σημαντικές, ενώ μια κατασκευή ελεύθερα επιπλεύουσα δύσκολα θα εμφανίσει αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις.

Οι βραδέως μεταβαλλόμενες δυνάμεις wave drift είναι ανάλογες του τετραγώνου του πλάτους των διαφορετικών συνιστωσών του φάσματος των θαλάσσιων κυματισμών με αποτέλεσμα συχνότητα της αργά μεταβαλλόμενης διέγερσης να είναι ίση με τη διαφορά συχνοτήτων των διαφόρων συνιστωσών του φάσματος. Συνεπώς, σε αρμονικά κύματα, η αργά μεταβαλλόμενη δύναμη έχει μηδενική συχνότητα δηλ. είναι σταθερή δύναμη στο χρόνο. Επιπλέον, το τετράγωνο του εύρους των δυνάμεων ‘δεύτερης τάξης’ αυξάνονται με το τετράγωνο του ύψους κύματος.

Ο υπολογισμός της δύναμης slow drift πρέπει να ξεκινά με την έρευνα της διτετράγωνης συνάρτησης μεταφοράς (quadratic transfer function). Η δύναμη που προκύπτει από την υπέρθεση δύο μεμονωμένων κυμάτων σε διαφορετικές συχνότητες θα παρέχει την διτετράγωνη συνάρτηση μεταφοράς (quadratic transfer function). Αυτή η άμεση προσέγγιση δεν έχει βρει εκτεταμένη εφαρμογή εξαιτίας του κόστους εκτέλεσης μιας τέτοιας ανάλυσης με χρήση της θεωρίας της περίθλασης.

Ο Newman (Newman 1974) πρότεινε ότι για υπολογισμό βραδέως μεταβαλλόμενης δύναμης, η διτετράγωνη συνάρτηση μεταφοράς (quadratic transfer function) μπορεί να προσεγγιστεί με ένα συνδυασμό της συνάρτησης μεταφοράς μηδενικής συχνότητας (zero frequency transfer function) ή μέσης δευτεροτάξιας δύναμης (mean drift) όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$D(\omega, \omega + \mu) = \frac{1}{2}(D(\omega) + D(\omega + \mu)) \quad (5.37)$$

Οι εναλλακτικές υποθέσεις (όλες με τη χρήση των συντελεστών μεταβολής μέσης μετατόπισης) έδωσαν την έκφραση για το φάσμα της βραδέως μεταβαλλόμενης δύναμης, που παρουσιάζεται στην επόμενη εξίσωση:

$$S_F(\mu) = 8 \int_0^{\infty} S(\omega)S(\omega + \mu)[D(\omega, \omega + \mu)]^2 d\omega \quad (5.38)$$

Όπου:

- μ είναι η συχνότητα της αργά μεταβαλλόμενης δύναμης και
- $\omega, \omega + \mu$ είναι οι συχνότητες των αλληλεπιδρώντων κυμάτων

και D δίνεται από:

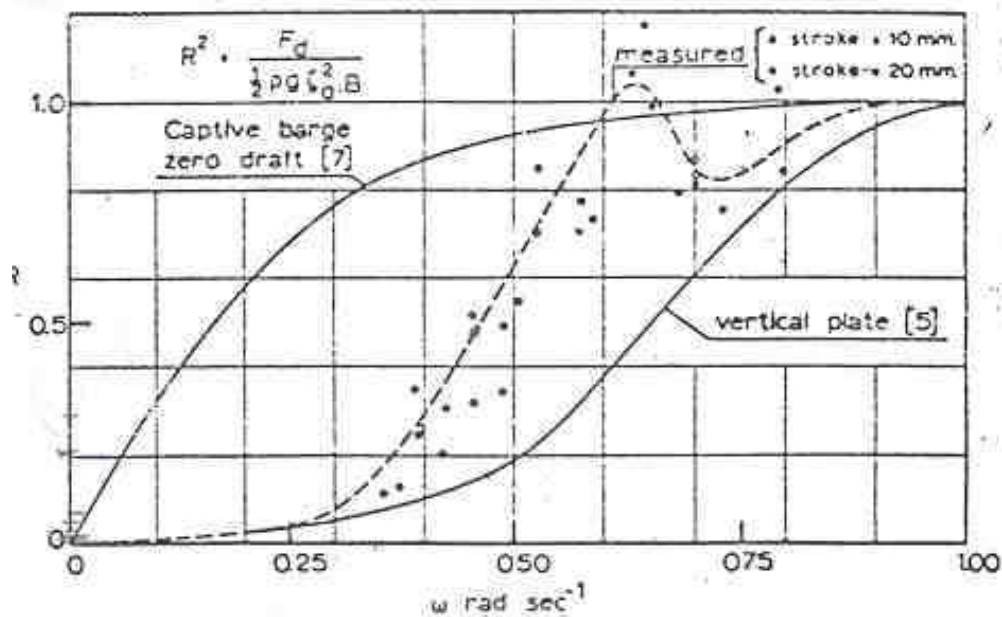
$$D(\omega, \omega + \mu) = \frac{1}{2} \rho g R^2 (\omega, \omega + \mu) B_B$$

Όπου:

- ρ είναι η πυκνότητα του νερού,
- g είναι η βαρυτική επιτάχυνση,
- BB είναι το πλάτος του πλοίου και
- R είναι οι αδιάστατοι συντελεστές της μέσης δευτεροτάξιας δύναμης (mean drift force)

Όλες οι μονάδες είναι rad / sec.

Με αυτό τον τρόπο το φάσμα της αργά μεταβαλλόμενης δύναμης μπορεί να υπολογιστεί με βάση συνάρτηση μεταφοράς των μέσων δυνάμεων. Οι αδιάστατοι συντελεστές δύναμης μετατόπισης R για head seas παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα 5.30, με γραφική αναπαράσταση που παρουσιάζεται σε άξονα συχνότητας κύματος (rad/sec).



Εικόνα 5.30 Αδιάστατοι συντελεστές δυνάμεων μετατόπισης (R)

Ως εκ τούτου, το φάσμα των δυνάμεων slow drift που προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση μπορεί να ληφθεί σε διαφορετικές συχνότητες μ . Στη συνέχεια, το φάσμα βραδείας μεταβολής της απόκρισης σε συχνότητα μ μπορεί να ληφθεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$RS(\omega) = \frac{SF(\mu)}{k^2_{Stiffness}} Q^2 \quad (5.39)$$

Όπου $K_{stiffness}$ είναι η ακαμψία του συστήματος πρόσδεσης και το Q είναι ο δυναμικός συντελεστής απόκρισης που δίνεται από την εξίσωση:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\mu}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\frac{\mu}{\omega_n}d\right)^2}} \quad (5.40)$$

Όπου ω_n είναι η φυσική συχνότητα του συστήματος και μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{mooringsystem-stiffness}}{M + M_{AVM}}} \quad (5.42)$$

Στον ανωτέρω τύπο, d είναι ο συντελεστής απόσβεσης. Η ανάγκη κατανόησης του βαθμού απόσβεσης για τον υπολογισμό των αργά μεταβαλλόμενων κινήσεων πλωτών αγκυρωμένων κατασκευών, έτυχε ιδιαίτερης προσοχής από τις αρχές της δεκαετίας του '80 και παραμένει ένας ενεργός τομέας έρευνας έως σήμερα.

Οι αποσβέσεις των αγκυροβολημένων κατασκευών προέρχονται από:

- Δεύτερης τάξης απόσβεση εκπεσμού (Wave drift damping),
- Απόσβεση λόγω ανέμου (Wind damping),

- Απόσβεση λόγω των δυνάμεων αντίστασης επί του κλάδου αγκύρωσης, απόσβεση λόγω της τριβής του επικαθήμενου στον πυθμένα τμήματος του κλάδου της ακύρωσης, καθώς τέλος και απόσβεση λόγω του υλικού του κλάδου αγκύρωσης (Mooring Line – drag damping).

Ειδικά για την απόσβεση της αγκυροβόλησης και την επίδρασή της στην απόσβεση των κινήσεων χαμηλής συχνότητας υπάρχουν τρεις μηχανισμοί που την προκαλούν (Huse 1991):

1. Η αλλαγή του σχήματος της αλυσοειδούς της γραμμής πρόσδεσης στην άνω διέγερση απόκρισης απαιτεί τα στοιχεία της γραμμής πρόσδεσης να κινούνται σε κατεύθυνση κάθετη προς τους άξονές τους και ως εκ τούτου η ενέργεια διαχέεται λόγω της έλξης του στοιχείου αγκυροβόλησης.
2. Η κίνηση της γραμμής σε συχνότητα κυμάτων εισάγει αποσβέσεις χαμηλής συχνότητας λόγω της τετραγωνικής φύσης της δύναμης οπισθέλκουσας.
3. Αυτές οι συνεισφορές δυνάμεων οπισθέλκουσας μπορούν να αυξηθούν σημαντικά ως αποτέλεσμα των ταλαντώσεων λόγω δινών (vortex induced vibrations), οι οποίες μπορούν να αυξήσουν τον συντελεστή οπισθέλκουσας. Οι ταλαντώσεις λόγω δινών (vortex induced vibrations) δεν θεωρούνται σημαντικές για τις αλυσίδες. Οι μετρήσεις απόσβεσης του υλικού και απόσβεσης της τριβής του εδάφους στις κινήσεις χαμηλής συχνότητας έχουν διερευνηθεί (Triantafyllou 1997) και έχουν αποδειχθεί να είναι αμελητέες.

Για ένα δεδομένο FPSO η συνολική slow drift απόσβεση εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την ταχύτητα του ρεύματος και το ύψος του κύματος, αλλά η τυπική συνολική απόσβεση είναι από 20% έως 25%. Αυτές οι τιμές μπορεί να

αυξηθούν σημαντικά σε βαθιά νερά λόγω της αγκυροβόλησης και της απόσβεσης riser/drag. Στην περίπτωση μας, η απόσβεση θα είναι της τάξης του 40%.

Η περιοχή κάτω από το υπολογισμένο βραδέως μεταβαλλόμενο φάσμα απόκρισης είναι η διακύμανση της απόκρισης και η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης είναι η τυπική απόκλιση της απόκρισης ($Slow-Drift_{rms}$). Η σημαντική τιμή της βραδέως μεταβαλλόμενης απόκρισης ($Slow-Drift_{sig}$) είναι 2,0 φορές η απόκριση rms ($Slow-Drift_{rms}$) και η μέγιστη απόκριση ($Slow-Drift_{max}$) υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Slow-Drift_{max} = Slow-Drift_{sig} \times F_R \quad (5.41)$$

Ο FR είναι ένας παράγοντας Rayleigh, ο οποίος μπορεί να προσδιοριστεί με την ακόλουθη εξίσωση (API 1995):

$$F_R = \sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{10800}{T_n}\right)} \quad (5.43)$$

Όπου T_n είναι η φυσική περίοδος του αγκυροβολημένου σκάφους. Τα αποτελέσματα για τις δυνάμεις και κινήσεις κύματος surge και sway slow drift παρουσιάζονται στο Παράρτημα 5 - Πίνακας 5.13 και Πίνακας 5.14 αντίστοιχα. Το προκύπτον φάσμα της αργά μεταβαλλόμενης απόκρισης παρουσιάζεται στο Παράρτημα 5 - σχήμα 5.31 και σχήμα 5.32 για τις συνθήκες head και beam αντίστοιχα.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για τους συντελεστές της μέσης δευτεροτάξιας απόσβεσης εκπεσμού (wave drift damping) για την συνθήκη beam και ότι αντί αυτού έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές για την συνθήκη head. Έτσι, οι τιμές του φάσματος των αργά μεταβαλλόμενων

δυνάμεων (slow drift) που προκύπτει για την κατεύθυνση αυτή, αποτελούν μια προσέγγιση.

5.7.2 Slow Drift δυνάμεις λόγω των ανέμων

Σε σταθερές κατασκευές η συνήθης πρακτική είναι ότι η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου υπολογίζεται σε 1 λεπτό και χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς των σταθερών φορτίων, αλλά για τις επιπλέον κατασκευές, είναι απαραίτητο να εξεταστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου.

Όταν παρατηρείται σε ένα σημείο, η ταχύτητα του ανέμου ποικίλλει ανάλογα με το χρόνο. Το γεγονός αυτό εξαρτάται από τους στροβιλισμούς ή τις ριπές που είναι εγγενές χαρακτηριστικό των διεργασιών ατμοσφαιρικής ανάμιξης και της τριβής πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής που επιδρά η ροή του ανέμου. Η ροή ανέμου περιέχει τυρβώδεις δομές ή δονήσεις. Λόγω των διαστάσεων αυτών των δονήσεων, η ταχύτητα του ανέμου ποικίλλει τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Η μη σταθερή φύση της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να παρουσιαστεί με διάφορους τρόπους. Το πιο κατάλληλο είναι μέσω ενός φάσματος ανέμου.

Για σκοπούς ανάλυσης του συστήματος αγκύρωσης, το φάσμα ταχύτητας ανέμου που επιλέγεται για την ανάλυση μπορεί είτε να μετατραπεί σε φάσμα δυνάμεων έτσι ώστε να μπορεί να προστεθεί στο βραδέως μεταβαλλόμενο φάσμα δυνάμεων λόγω κυμάτων προτού προχωρήσουμε στην ανάλυση απόκρισης ή η απόκριση που οφείλεται στις αργές δυνάμεις μετατόπισης μπορεί να υπολογιστεί και στη συνέχεια να προστεθεί στην απόκριση που λαμβάνεται από τις αργές μεταβαλλόμενες δυνάμεις κύματος.

Παρέχονται οι φασματικές πληροφορίες των ανέμων καθώς και η μέση ταχύτητα ανέμου σε διάρκεια μιας ώρας. Η μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου είναι της

τάξης των 29,83m / sec και το επιλεγμένο αιολικό φάσμα είναι το (Wills 1992) που είναι το τροποποιημένο φάσμα Kaimal προκειμένου να βελτιωθεί η προσαρμογή στα δεδομένα χαμηλής συχνότητας (μετρούμενη στο West Sole) . Το επονομαζόμενο φάσμα «Modified Kaimal» δίνεται από τον τύπο που φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{\omega S(\omega)}{u^{\overline{-2}}} = \frac{C \frac{n}{n_m}}{\left[\left(\frac{n}{n_m} \right)^{0.15} + \frac{9}{8} \left(\frac{n}{n_m} \right) \right]^{\frac{5}{3}}} \quad (5.44)$$

Όπου:

- n είναι η αναλογία $\frac{100 \omega}{V}$ (100m επιλέχθηκε ως κλίμακα μήκους),
- το n_m λαμβάνεται ίσο με 0.06,
- το \bar{V} είναι η μέση ταχύτητα στο ύψος που λαμβάνεται υπόψη
- $u^{\overline{-2}}$ είναι η διακύμανση της κυμαινόμενης ταχύτητας,
- C είναι της τάξης του 0.66.

Η σταθερή τιμή του C = 0.66 επελέγη από Wills για να δώσει την καλύτερη δυνατή προσαρμογή στο τμήμα χαμηλότερης συχνότητας του φάσματος, θεωρώντας ότι αυτό ήταν το σημαντικότερο μέρος του φάσματος για να αναπαραχθεί με ακρίβεια.

Η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να αναπαρασταθεί από τη σχέση:

$$V = V_o + u(t) \quad (5.44)$$

Η δύναμη του ανέμου F δίνεται από:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A (V_o + u(t))^2 \Rightarrow F = \frac{1}{2} \rho C_D A (V_o)^2 + \frac{1}{2} \rho C_D A (u(t))^2 + \rho C_D A V_o u(t) \quad (5.45)$$

Αν παραλείψουμε τον δεύτερο όρο επειδή το $u(t)$ είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το V_0 και είναι ακόμη μικρότερο, τότε:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A (V_0 + u(t))^2 \Rightarrow F = \frac{1}{2} \rho C_D A (V_0)^2 + \rho C_D A V_0 u(t) \quad (5.46)$$

Ως εκ τούτου, το φάσμα της δύναμης του ανέμου $SF(\mu)$ μπορεί να γραφτεί σε σχέση με το φάσμα του ανέμου Su ως:

$$SF(\mu)_{wind} = (\rho C_D A V_0)^2 S\omega(\mu)_{wind} \quad (5.47)$$

Όπου:

- ρ είναι η πυκνότητα του αέρα,
- Το C_D είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας V_0 είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου και
- A είναι η προβαλλόμενη περιοχή.

Στη συνέχεια, η βραδεία μεταβαλλόμενη απόκριση ανέμου παρόμοια με την αργή κυμαινόμενη απόκριση κύματος μπορεί να εκτιμηθεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$RS(\omega)_{wind} = \frac{SF(\mu)_{wind}}{k^2 Stiffness} Q^2 \quad (5.48)$$

Στη συνέχεια, η περιοχή κάτω από το υπολογισμένο βραδέως μεταβαλλόμενο φάσμα απόκρισης ανέμου είναι η διακύμανση της απόκρισης και η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης είναι η τυπική απόκλιση της απόκρισης ανέμου ($Slow-Drift_{wind-rms}$).

Η σημαντική βραδεία μεταβαλλόμενη απόκριση ($Slow-Drift_{wind-sig}$) είναι 2.0 φορές η απόκριση rms ($Slow-Drift_{wind-rms}$) και η μέγιστη απόκριση ($Slow-Drift_{wind-max}$) υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Slow-Drift_{wind-max} = Slow-Drift_{wind-sig} \times F_R$$

Όπου F_R είναι ο συντελεστής Rayleigh που δίνεται από την εξίσωση (5.43), η οποία μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.42).

Τα αποτελέσματα για τις δυνάμεις και τις κινήσεις του ανέμου για surge και sway slow drift παρουσιάζονται στο Παράρτημα 6 - Πίνακας 5.15 και Πίνακας 5.16 αντίστοιχα. Το προκύπτον φάσμα απόκρισης αργής μετατόπισης παρουσιάζεται στο Παράρτημα 6 - σχήμα 5.33 και σχήμα 5.34 για τις συνθήκες head και beam αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΔΕΣΗΣ

6.1 Κριτήρια σχεδιασμού συστήματος πρόσδεσης

Το σύστημα πρόσδεσης πρέπει να σχεδιάζεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις και να πληροί τα ακόλουθα κριτήρια σχεδιασμού:

6.1.1 Ορισμός της μέσης μετατόπισης, μέγιστης μετατόπισης και προσδιορισμός των ορίων μετατόπισης

Η μέση μετατόπιση ορίζεται ως η μετατόπιση του σκάφους λόγω του συνδυασμού των μέσων δυνάμεων ανέμου, ρεύματος και κύματος.

Η μέγιστη μετατόπιση ορίζεται ως η άθροιση της μέσης μετατόπισης συν τις κατάλληλες συνδυασμένες κινήσεις σε συχνότητες κυμάτων και αργά μεταβαλλόμενες (slow drift) κινήσεις του σκάφους. Η χρησιμοποίηση της ακόλουθης διαδικασίας θα οδηγήσει στον καθορισμό της μέγιστης μετακίνησης:

Ορισμοί

$(WF)_{\max}$ = Μέγιστη κίνηση πρώτης τάξης με συχνότητα αυτή του προσπίπτοντος κυματισμού

$(WF)_s$ = Σημαντική τιμή της κίνησης πρώτης τάξης

$(SD)_{\max}$ = Μέγιστη αργά μεταβαλλόμενη κίνηση (slow drift)

$(SD)_s$ = Σημαντική τιμή της αργά μεταβαλλόμενης κίνησης (slow drift)

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συνδυάσουν τη μετατόπιση λόγω συχνότητας κύματος και κινήσεων χαμηλής συχνότητας. Στην περίπτωσή μας θα υιοθετηθεί η ακόλουθη σχέση:

$$x_{dyn} = \max\left[(WF)_{\max} + (SD)_s, (WF)_s + (SD)_{\max}\right] \quad (6.1).$$

Επομένως, εάν $(WF)_{\max} + (SD)_s > (WF)_s + (SD)_{\max}$, τότε η μέγιστη μετατόπιση ορίζεται ως:

$$\text{Μέγιστη μετατόπιση} = \text{Μέση μετατόπιση} + (WF)_{\max} + (SD)_s \quad (6.2).$$

Διαφορετικά, εάν $(WF)_{\max} + (SD)_s < (WF)_s + (SD)_{\max}$ η μέγιστη μετατόπιση ορίζεται ως:

$$\text{Μέγιστη μετατόπιση} = \text{Μέση μετατόπιση} + (SD)_{\max} + (WF)_s \quad (6.3)$$

[API, 1995 # 43].

Οι μετατοπίσεις του FPSO πρέπει να ελέγχονται για να αποφευχθεί η πρόκληση βλάβης στα drilling risers. Άλλοι παράγοντες που καθορίζουν τα μέγιστα όρια μετατόπισης είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες και το βάθος του νερού. Οι επιτρεπόμενες μέγιστες μετατοπίσεις πρέπει να προσδιορίζονται με ανάλυση των drilling risers σε συνδυασμό με ανάλυση πρόσδεσης.

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες μετακινήσεις από την μέση θέση ισορροπίας της κατασκευής σε ηρεμούσες περιβαλλοντικές συνθήκες κυμαίνονται κανονικά από 5% έως 10% βάθους νερού για rigid risers. Γενικά, το πρώτο ισχύει για τις εργασίες σε ρηχά νερά ενώ το τελευταίο ισχύει για τις εργασίες βαθέων υδάτων. Η επιλογή των rigid risers και ο παραπάνω περιορισμός μετατόπισης υπαγορεύουν ότι τα rigid production risers θα αποσυνδεθούν σε περίπτωση σφοδρών καταιγίδων.

Ένας άλλος τύπος risers είναι τα flexible risers. Ένα flexible riser αποτελείται από ένα εύκαμπτο σωλήνα, ο οποίος κρέμεται σε αλυσοειδή μορφή από το FPSO στον πυθμένα. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες μετατοπίσεις συνήθως κυμαίνονται από 8% έως 12% του βάθους του νερού για deep water flexible risers, ανάλογα με τη διαμόρφωση των riser [API, 1995 # 43]. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες μετατοπίσεις για νερά μικρού

βάθους κυμαίνονται συνήθως από 15% έως 25% του βάθους του νερού. Τα flexible risers σχεδιάζονται συνήθως για να μπορούν να ανταποκριθούν στο κρίσιμο περιβάλλον σχεδιασμού ενώ παραμένουν συνδεδεμένοι με το σκάφος. Η εφαρμογή των flexible risers αποφασίζεται για την περίπτωση μας μαζί με ένα επιτρεπόμενο όριο μετατόπισης της τάξεως του 8% του βάθους των 1000 μέτρων.

6.1.2 Μέγιστη ένταση γραμμής πρόσδεσης

Παρόμοια με την περίπτωση των κινήσεων του σκάφους, η μέγιστη τάση της γραμμής πρόσδεσης ορίζεται ως η άθροιση της τάσης γραμμής που αντιστοιχεί στη μέση μετατόπιση του σκάφους συν τις κατάλληλες συνδυασμένες συχνότητες κυμάτων και slow drift εντάσεις. Έτσι, η μέγιστη τάση της γραμμής πρόσδεσης μπορεί να καθοριστεί με την ακόλουθη διαδικασία:

$(TWF)_{\max}$ = Μέγιστη τάση συχνότητας κύματος

$(TWF)_s$ = Σημαντική τάση συχνότητας κυμάτων

$(TSD)_{\max}$ = Μέγιστη τιμή της τάσης λόγω της μέγιστης τιμής της αργά

μεταβαλλόμενης κίνησης

$(TSD)_s$ = Σημαντική τιμή της τάσης λόγω της σημαντικής τιμής της αργά

μεταβαλλόμενης κίνησης

Αν, $(TWF)_{\max} + (TSD)_s > (TWF)_s + (TSD)_{\max}$ τότε, η μέγιστη ένταση ορίζεται ως:

$$\text{Μέγιστη τάση} = \text{Μέση τάση} + (TWF)_{\max} + (TSD)_s \quad (6.4).$$

Διαφορετικά, εάν η μέγιστη ένταση ορίζεται ως:

$$\text{Μέγιστη τάση} = \text{Μέση τάση} + (TSD)_{\max} + (TWF)_s \quad (6.5).$$

Η μέγιστη ένταση της γραμμής πρόσδεσης υπολογίζεται στη μέγιστη μετατόπιση του σκάφους. Η τάση στην πιο φορτωμένη γραμμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 50% της τελικής αντοχής της γραμμής. Η τελική αντοχή της γραμμής μπορεί να ληφθεί ως δύναμη θραύσης καταλόγου (CBS) των υλικών, υπό την προϋπόθεση ότι είναι νέα ή σε νέα κατάσταση. Στον Πίνακα 6.1 παρέχεται το CBS των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της γραμμής πρόσδεσης (βλέπε επίσης αναλυτική περιγραφή των ιδιοτήτων υλικών στο Κεφάλαιο 3).

<u>Γραμμή πρόσδεσης</u>	Προδιαγραφές υλικών	Στάθμη αντοχής (CBS) (σε N)
<u>Συρματόσχοινο</u>	Σπειροειδές <i>Πλέξιμο</i>	15210000
<u>Συνθετικό σχοινί</u>	<i>HMPE</i>	12937500
<u>Αλυσίδα</u>	<i>Grade 4</i>	13572864

Πίνακας 6.1 CBS των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της γραμμής πρόσδεσης

Το χρησιμοποιημένο ή φθαρμένο υλικό πρέπει να περιορίζεται σε μικρότερα φορτία σχεδιασμού. Οι προσαρμογές της γραμμής πρόσδεσης για την ελάφρυνση των εντάσεων μπορούν να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση.

6.1.3 Μήκος γραμμής πρόσδεσης

Το μήκος της γραμμής πρόσδεσης (εξωτερική γραμμή) θα πρέπει να επαρκεί για να επιτρέψει στις γραμμές να έρχονται σε επαφή με τον πυθμένα του ωκεανού

εφαπτομενικά στην άγκυρα όταν το σύστημα λάβει τη μέγιστη προβλεπόμενη μετατόπιση.

6.1.4 Δύναμη συγκράτησης της άγκυρας

Η δύναμη συγκράτησης της άγκυρας σε μια συγκεκριμένη κατάσταση του εδάφους αντιπροσωπεύει το μέγιστο παρατεταμένα εφαρμοζόμενο οριζόντιο φορτίο στο οποίο, αν ασκείται πάνω της, θα μπορούσε να αντισταθεί η άγκυρα πριν να συρθεί στο συγκεκριμένο έδαφος. Οι τύποι μαζί με τα γραφήματα, που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της δύναμης συγκράτησης για την άγκυρα Flipper Delta-Stevdig στην άμμο, παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3-Τμήμα 3.5.1.

Το μήκος της αγκυροβόλησης στον πυθμένα της θάλασσας (δηλαδή το τμήμα αλυσίδας που συνδέεται απευθείας με την άγκυρα που παραμένει πάνω στον πυθμένα της θάλασσας), θα συμβάλει επίσης στη δύναμη συγκράτησης αυτής της γραμμής πρόσδεσης και θα μειώσει το οριζόντιο φορτίο που επιβάλλεται στην άγκυρα.

6.1.4.1 Δύναμη συγκράτησης αλυσίδας

Η ενσωμάτωση της επίδρασης της τριβής που επενεργεί στο μήκος του τμήματος της αλυσίδας που βρίσκεται στον πυθμένα μειώνει απλά το οριζόντιο φορτίο όπως κινείται από το σημείο επαφής προς την άγκυρα. Η ισχύς συγκράτησης της αλυσίδας μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{Chain} = f x_g w_{Chain} \quad (6.6)$$

Όπου:

- P_{Chain} είναι η δύναμη συγκράτησης της αλυσίδας σε kN.
- f είναι ο αδιάστατος συντελεστής τριβής μεταξύ της αλυσίδας και του πυθμένα.

- x_g είναι το μήκος της αλυσίδας που έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα σε m.
- W_{Chain} είναι το βυθισμένο βάρος ανά μονάδα μήκους της αλυσίδας σε kN / m

Ο συντελεστής τριβής f , εξαρτάται από το εδαφικό υλικό στον πυθμένα του ωκεανού στη θέση αγκύρωσης. Στην περίπτωση αμμώδους πυθμένα λαμβάνεται ίσος με 1.

Έτσι το μέγιστο φορτίο που δέχεται η άγκυρα δίνεται από:

$$\text{Μέγιστο φορτίο άγκυρας} = \text{Μέγιστο οριζόντιο φορτίο της εξεταζόμενης γραμμής} - P_{Chain} \quad (6.7)$$

Όπως είναι προφανές, το υπολογισμένο μέγιστο φορτίο της άγκυρας πρέπει να είναι μικρότερο από την προβλεπόμενη ικανότητα συγκράτησης της άγκυρας, ώστε η άγκυρα να αντιστέκεται στην ολίσθηση στο συγκεκριμένο έδαφος.

6.2 Διαδικασία ανάλυσης πρόσδεσης

Ο σχεδιασμός του συστήματος πρόσδεσης του FPSO σε βάθος νερού 1000 μέτρων θα πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται κατωτέρω προκειμένου να πληρούνται τα κριτήρια σχεδιασμού όπως ορίζονται στο προηγούμενο τμήμα για τις επιλεγμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι εξεταζόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες είναι οι εξής:

- Κύμα, άνεμος και ρεύμα που επενεργεί στο FPSO στις 0° από την πλώρη (head seas).
- Κύμα, άνεμος και ρεύμα που επενεργεί στο FPSO 90° από την πλώρη (beam seas).
- Κύμα, άνεμος και ρεύμα που επενεργεί στο FPSO με διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι η δεύτερη περίπτωση (δηλαδή, όπου ο άνεμος, το κύμα και το ρεύμα ενεργούν στο FPSO σε 90°), είναι απίθανο να

συμβεί όταν ασχολούμαστε με ένα πυργοειδές σύστημα αγκύρωσης, ωστόσο το χρησιμοποιήσαμε στην ανάλυση γιατί δίνει μια ένδειξη των περιβαλλοντικών δυνάμεων που δρουν στο FPSO και στο σύστημα πρόσδεσης.

Τα ακόλουθα δεδομένα που θα παρουσιαστούν θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανάλυσης πρόσδεσης:

- Η περιγραφή FPSO δίνεται στο Κεφάλαιο 5-Πίνακας 5.1.
- Το σύστημα πρόσδεσης είναι ένα εσωτερικό πυργοειδές σύστημα αγκυροβόλησης τοποθετημένο μέσα στο FPSO 150 μέτρα από το μέσο του πλοίου. Το μοντέλο συμμετρικής πρόσδεσης των 45^ο με οκτώ γραμμές που υιοθετήθηκε παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 - Σχήμα 3.2 και η γραμμή αγκυροβόλησης κατασκευάζεται σύμφωνα με το σύστημα συνδυασμού αλυσίδας-συνθετικού σχοινιού-συρματόσχοινου (από την άγκυρα στο σημείο πρόσδεσης του κλάδου αγκύρωσης στο σκάφος - fairlead). Η πλήρης περιγραφή καθενός από τα διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των τμημάτων της γραμμής πρόσδεσης παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4-Πίνακας 4.1.
- Η άγκυρα που χρησιμοποιείται είναι τύπου Flipper Delta-Stevdig με βάρος αγκύρωσης ίσο με 268,8 kN (Κεφάλαιο 3 - Ενότητα 3.5.1).
- Η αρχική προένταση είναι της τάξεως των 2000kN.
- Οι περιβαλλοντικές συνθήκες παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.2.

<u>Περιβαλλοντικές συνθήκες</u>	
Ταχύτητα ανέμου (1-λεπτό, $\left(\frac{m}{sec}\right)$)	29.83
Σημαντικό ύψος κύματος (m)	7.8

Ταχύτητα ρεύματος $\left(\frac{m}{sec}\right)$	1.54
Βάθος νερού (m)	1000
Κατάσταση εδάφους πυθμένα	Άμμος

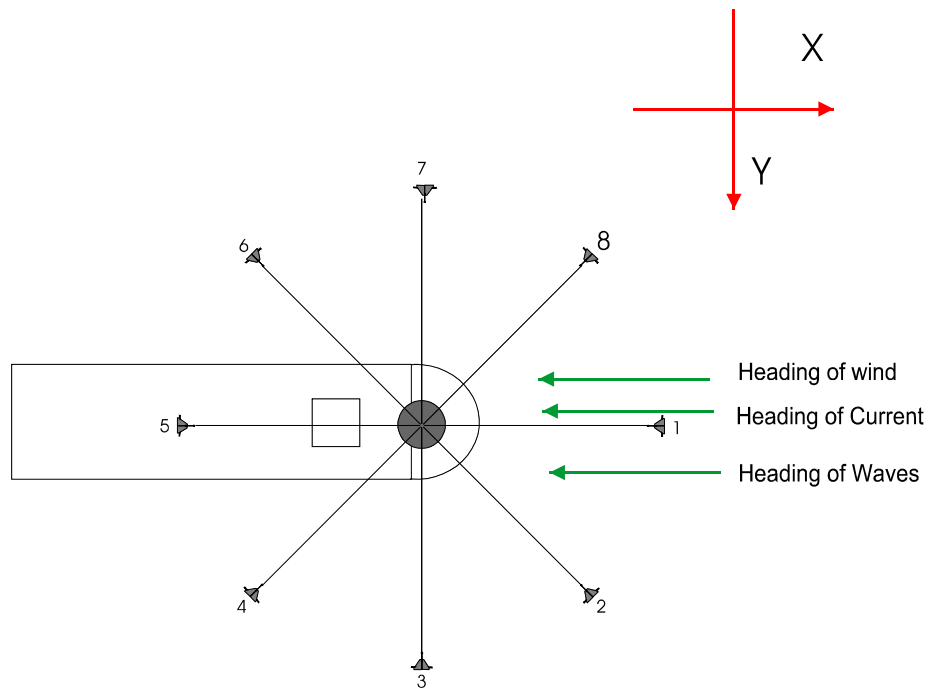
Πίνακας 6.2 Επιλεγμένες περιβαλλοντικές συνθήκες

6.2.1 Head Environment (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε μηδέν μοίρες γωνία πρόσπτωσης)

6.2.1.1 Μέση μετατόπιση στην διαμήκη κατεύθυνση (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε μηδέν μοίρες γωνία πρόσπτωσης)

Πρώτον, πρέπει να υπολογιστεί η μέση μετατόπιση η οποία ορίζεται ως η μετατόπιση του σκάφους λόγω του συνδυασμού μέσων δυνάμεων στον χρόνο λόγω ανέμου, ρεύματος και κύματος.

Οι σταθερές δυνάμεις ανέμου που δρουν στο FPSO (με την υπερκατασκευή) για το πλήρες εύρος γωνιών αζιμούθιου έχουν υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 5-Τμήμα 5.5.1. Η τιμή της σταθερής διαμήκου δύναμης του ανέμου για γωνία στις 0^ο από την πλώρη φαίνεται στο Παράρτημα 2 - ο πίνακας 5.3 είναι -299.609kN και η τιμή για την υπερκατασκευή στο Παράρτημα 2-πίνακας 5.4 είναι ίση με -9.538kN. Η σημασία του σημείου μείον όπως είναι προφανές από το επόμενο Σχήμα 6.1 είναι ότι οι δυνάμεις δείχνουν προς το αρνητικό του άξονα X.



**Εικόνα 6.1 Περίπτωση 1: Γωνία πρόσπτωσης ανέμου, ρεύματος και κύματος 0°
(Head condition)**

Οι σταθερές δυνάμεις ρεύματος που δρουν στο FPSO για το πλήρες εύρος γωνιών αζιμούθιου έχουν υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 5-Τμήμα 5.5.2. Η τιμή της δύναμης λόγω ρεύματος στην διαμήκη κατεύθυνση σε γωνία 0° σε σχέση με την πλώρη, φαίνεται στο Παράρτημα 2-πίνακας 5.5 και ισούται με -262.043 kN.

Οι (mean drift forces) που δρουν στο FPSO για το πλήρες εύρος γωνιών αζιμούθου έχουν υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 5-Τμήμα 5.5.3. Η τιμή για τη μέση δευτεροτάξια δύναμη λόγω κύματος στη διαμήκη κατεύθυνση (longitudinal mean wave drift force) σε γωνία 0° από την πλώρη, όπως φαίνεται στο Παράρτημα 2-Πίνακας 5.6 είναι -298.007kN.

Η συνολική μέση τιμή στο χρόνο για την μέση διαμήκη δύναμη (longitudinal force) σε γωνία 0° από την πλώρη, όπως φαίνεται στο Παράρτημα 2-Πίνακας 5.7, είναι 867.816kN.

Η μέση μετατόπιση που αντιστοιχεί στη μέση δύναμη μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$x_{mean} = \frac{F_{Steady-Surge}}{k_{Stiffness-Surge}} \quad (6.8)$$

Όπου:

- $F_{Steady-Surge}$ είναι το άθροισμα των σταθερών δυνάμεων ανέμου, ρεύματος και των κυμάτων (total steady state force) και
- $k_{Stiffness-Surge}$ είναι η ακαμψία του συστήματος αγκυροβόλησης σε κίνηση surge του FPSO.

Η ακαμψία του κύματος του συστήματος πρόσδεσης μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τα ακόλουθα βήματα:

I) Στην χαρακτηριστική του συστήματος αγκύρωσης καμπύλη επιβαλλόμενης εξωτερικής δύναμης – εκτροπής της κατασκευής από την θέση ισορροπίας της υπό μηδενική εξωτερική φόρτιση, φέρουμε γραμμή παράλληλη προς τον άξονα εκτροπής που να αντιστοιχεί στο μέσο εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο έως ότου η γραμμή τμήσει την καμπύλη ακαμψίας της γραμμής πρόσδεσης που φαίνεται στο Παράρτημα 1 - εικόνα 4.3. Στη συνέχεια, σχεδιάζουμε μια γραμμή εφαπτομενικά στην καμπύλη από αυτό το σημείο.

II) Η εφαπτομένη της γωνίας μεταξύ της γραμμής θα μας δώσει την ακαμψία της γραμμής πρόσδεσης. Η εφαπτομένη της γωνίας είναι ο λόγος της διαφορικής μεταβολής της δύναμης έναντι της διαφορικής μεταβολής της εκτροπής.

III) Λόγω του γεγονότος ότι το σύστημα πρόσδεσης αποτελείται από οκτώ γραμμές που απέχουν αζιμουθιακά μεταξύ τους γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του πυργοειδούς συστήματος αγκύρωσης του FPSO κατά 45 °, η surge stiffness του

συστήματος πρόσδεσης μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση (6.8) που φαίνεται παρακάτω:

$$k_{Stiffness-Surge} = \sum_{i=1}^n k_i \cos^2(45^\circ) \quad (6.9)$$

- Όπου n είναι ο αριθμός των γραμμών πρόσδεσης και
- k είναι η ακαμψία γραμμής πρόσδεσης η οποία στην περίπτωση surge μπορεί να υπολογιστεί με τον ακόλουθο τρόπο:

Η μέση δύναμη από τη δράση των περιβαλλοντικών παραγόντων παραλαμβάνεται από το σύστημα πρόσδεσης από τις γραμμές πρόσδεσης (1), (2), (8).

Επομένως η δύναμη στην πιο φορτωμένη γραμμή (1) δίνεται από:

$$\begin{aligned} F_{Total - Steady} &= F_1 + F_2 + F_8 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow F_{Total - Steady} &= F_1 + F_1 \cos(45^\circ) + F_1 \cos(45^\circ) \Rightarrow \\ \Rightarrow F_1 (1 + \sqrt{2}) &= 867.816 \text{ kN} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow F_1 &= 359.461 \text{ kN} \end{aligned}$$

Από την καμπύλη ακαμψίας της γραμμής πρόσδεσης που παρουσιάζεται στο **Παράρτημα 1-Εικόνα 4.3** η ακαμψία της γραμμής πρόσδεσης μπορεί να εκτιμηθεί σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω και είναι ίση:

$$k = \frac{400 - 300}{27.11 - 20.89} \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 16.077 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ως εκ τούτου η ακαμψία του συστήματος πρόσδεσης δίνεται από:

$$\begin{aligned}
k_{Stiffness-Surge} &= \sum_{i=1}^n k_i \cos^2(45^{\circ}) = k \cos^2(0^{\circ}) + k \cos^2(45^{\circ}) + k \cos^2(90^{\circ}) + \\
&+ k \cos^2(135^{\circ}) + k \cos^2(180^{\circ}) + k \cos^2(225^{\circ}) + k \cos^2(270^{\circ}) + k \cos^2(315^{\circ}) = \\
&= 2k + 4k \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right)^2 = 4k \Rightarrow \\
\Rightarrow k_{Stiffness-Surge} &= 4 \times 16.077 \frac{kN}{m} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow k_{Stiffness-Surge} &= 64.309 \frac{kN}{m}
\end{aligned}$$

(6.10)

Έτσι, από την εξίσωση (6.8) μπορεί να ληφθεί η αντίστοιχη μέση μετατόπιση surge:

(6.11)

$$\begin{aligned}
x_{mean} &= \frac{F_{Steady-Surge}}{k_{Stiffness-Surge}} \Rightarrow x_{Surge-mean} = \frac{867.816 \frac{kN}{m}}{64.309 \frac{kN}{m}} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow x_{Surge-mean} &= 13.494m
\end{aligned}$$

6.2.1.2 Μέγιστη μετατόπιση κατά την διαμήκη κατεύθυνση (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε μηδέν μοίρες γωνία)

Ο υπολογισμός της κίνησης στην εγκάρσια κατεύθυνση λόγω των πρωτοτάξιων φορτίσεων των κυματισμών έγινε στο Κεφάλαιο 5-Τμήμα 5.6.1. Για αυτούς τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η ακαμψία πρόσδεσης για surge που υπολογίστηκε παραπάνω στην εξίσωση (6.10). Η διαδικασία περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5-Τμήμα 5.6.1. Τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς για τις πρωτοτάξιες αποκρίσεις σε συχνότητες θαλάσσιων κυματισμών και για τον συντελεστή απόκρισης στην διαμήκη

κίνηση (surge RAO) παρουσιάζονται στο Παράρτημα 4 - Πίνακας 5.8 - Σχήμα 5.22 - Σχήμα 5.23, ενώ η σημαντική και μέγιστη τιμή της πρωτοτάξιας απόκρισης παρουσιάζεται στο Παράρτημα 4 - Πίνακας 5.9.

Η σημαντική τιμή της πρωτοτάξιας απόκρισης καθώς και οι αντίστοιχες μέγιστες αποκρίσεις φαίνονται στις επόμενες εξισώσεις (6.12) και (6.13) αντίστοιχα:

$$x_{WF-sig} = 4.718m \quad (6.12)$$

$$x_{WF-max} = 8.775m \quad (6.13)$$

Ο υπολογισμός της διαμήκουσ απόκρισης της κατασκευής υπό την επιδραση αργά μεταβαλλόμενων μέσων δευτεροτάξιων φορτίσεων από το κύμα (slow drift wave) και τον άνεμο περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5-Τμήμα 5.7.1 και Κεφάλαιο 5-Τμήμα 5.7.2 αντίστοιχα. Για τους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιήθηκε η ακαμψία surge του συστήματος πρόσδεσης που υπολογίστηκε στην εξίσωση (6.10) στη μέση θέση μετατόπισης. Οι υπολογισμοί για αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις (slow drift) και αποκρίσεις λόγω δράσης κύματος παρουσιάζονται στο Παράρτημα 5-Πίνακας 5.13- Σχήμα 5.31.

Η σημαντική και η μέγιστη τιμή της αργά μεταβαλλόμενης κίνησης της κατασκευής στην διαμήκη κατεύθυνση (surge slow drift) λόγω της δράσης φυσικών θαλάσσιων κυματισμών παρουσιάζονται στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$x_{SDwavesig} = 25.447m \quad (6.14)$$

$$x_{SDwavemax} = 36.294m \quad (6.15)$$

Οι υπολογισμοί για τις αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις και αποκρίσεις λόγω της επίδρασης του ανέμου παρουσιάζονται στο Παράρτημα 6 - Πίνακας 5.15 - Σχήμα 5.33.

Η σημαντική και η μέγιστη τιμή της αργά μεταβαλλόμενης απόκρισης στην διαμήκη κατεύθυνση λόγω της δράσης του ανέμου παρουσιάζονται στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$x_{SDwind\&sig} = 6.379m \quad (6.14)$$

$$x_{SDwind\&max} = 9.122m \quad (6.15)$$

Στη συνέχεια, η μέγιστη μετατόπιση ορίζεται ως η άθροιση της μέσης μετατόπισης συν τις κατάλληλα συνδυασμένες πρωτοτάξεις και αργά μεταβαλλόμενες (slow drift) μετακινήσεις του σκάφους. Η συνδυασμένη μετατόπιση λόγω των πρωτοτάξεων και αργά μεταβαλλόμενων (slow drift) μετακινήσεων του σκάφους δίνεται από την εξίσωση (6.1), έτσι στην περίπτωση μας είναι:

$$(6.16)$$

$$\begin{aligned} x_{dyn} &= \max[(x_{WF-max} + x_{SD-sig}), (x_{WF-sig} + x_{SD-max})] \Rightarrow \\ \Rightarrow x_{dyn} &= \max[(4.718m + 36.294m + 9.122m), (8.775m + 25.447m + 6.379m)] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow x_{dyn} &= \max[(4.718m + 36.294m + 9.122m)] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow x_{dyn} &= 50.134m \end{aligned}$$

Προσθέτοντας τη μέγιστη συνδυασμένη κίνηση κύματος και slow drift στη μέση μετατόπιση μπορεί να υπολογιστεί η μέγιστη μετατόπιση του σκάφους:

$$(6.17)$$

$$\begin{aligned} x_{max} &= x_{mean} + x_{dyn} \Rightarrow \\ x_{max} &= (13.494 + 50.134)m = 63.628m \end{aligned}$$

Η τιμή αυτή θα πρέπει να ελέγχεται με τα όρια μετατόπισης που καθορίζονται από την ανάλυση των drilling risers και άλλους παράγοντες που αναλύονται στην

ενότητα 6.1.1. Η μέγιστη surge μετατόπιση είναι της τάξης του 6,4% του βάθους του νερού και είναι μικρότερη από το συνιστώμενο μέγιστο πολύ συντηρητικό όριο μετατόπισης - δεδομένου ότι το εύρος κυμαίνεται μεταξύ 8% και 12% - 8% του βάθους του νερού.

6.2.1.3 Μέγιστη τάση γραμμής (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε μηδέν μοίρες γωνία)

Η μέγιστη τάση γραμμής, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη μετατόπιση των 63.628m, μπορεί να υπολογιστεί, χρησιμοποιώντας το Παράρτημα 1-Σχήμα 4.5 για την πιο φορτισμένη γραμμή, με την εισαγωγή στο γράφημα της τιμής της εκτροπής. Έτσι, η τιμή για την οριζόντια τάση στη γραμμή είναι 3100kN. Στη συνέχεια, η τιμή για τη μέγιστη τάση γραμμής μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$T_{xmax} = 3100N + wh$$

Που:

- w είναι το βάρος ανά μονάδα μήκους και
- h είναι το βάθος του νερού

Έτσι, τα προκύπτοντα ποσοστά είναι 32% της αντοχής θραύσης καταλόγου για την αλυσίδα, 34% της αντοχής θραύσης του καταλόγου για το σχοινί συνθετικών ινών και 29% της αντοχής θραύσης καταλόγου (CBS) για το συρματόσχοινο που χρησιμοποιείται. Αυτές οι τιμές είναι μικρότερες από το συνιστώμενο όριο έντασης 50% της CBS για κάθε υλικό που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.2α.

<u>Γραμμή πρόσδεσης</u>	Προδιαγραφές υλικών	Στάθμη αντοχής (CBS) (ποσοστό %)
<u>Συρματόσχοινο</u>	Σπειροειδές <i>Πλέξιμο</i>	29%
<u>Συνθετικό σχοινί</u>	<i>HMPE</i>	34%
<u>Αλυσίδα</u>	<i>Grade 4</i>	32 %

Πίνακας 6.2α Αποτελέσματα

6.2.1.4 Μέγιστο αναρτημένο μήκος (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε μηδέν μοίρες γωνία)

Το μέγιστο αναρτημένο μήκος, που αντιστοιχεί στη μέγιστη μετατόπιση των 63.628m, μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το Παράρτημα 1 - Σχήμα 4.4 για την πιο φορτισμένη γραμμή, με την είσοδο στο γράφημα της τιμής της εκτροπής. Το μέγιστο μήκος της αιωρούμενης γραμμής για τη μέγιστη μετατόπιση είναι 2414.908mm. Αυτή η τιμή είναι μικρότερη από το συνολικό εξωτερικό μήκος των 3300 μέτρων. Επομένως δεν αναμένεται ανύψωση της άγκυρας.

6.2.1.5 Μέγιστο φορτίο άγκυρας (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε μηδέν μοίρες γωνία)

Το μέγιστο φορτίο άγκυρας μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (6.7), όπου η (ικανότητα συγκράτησης της αλυσίδας) δίνεται από την εξίσωση (6.8). Έτσι, το μέγιστο φορτίο στην άγκυρα είναι:

$$\begin{aligned}
Maximum - Anchor - Load_{Surge} &= 3100kN - P_{Chain} \Rightarrow \\
\Rightarrow Maximum - Anchor - Load_{Surge} &= 3100kN - \left[1 \times (3300 - 2414.908)m \times 2.7 \frac{kN}{m} \right] \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow Maximum - Anchor - Load_{Surge} &= 710.252kN
\end{aligned}$$

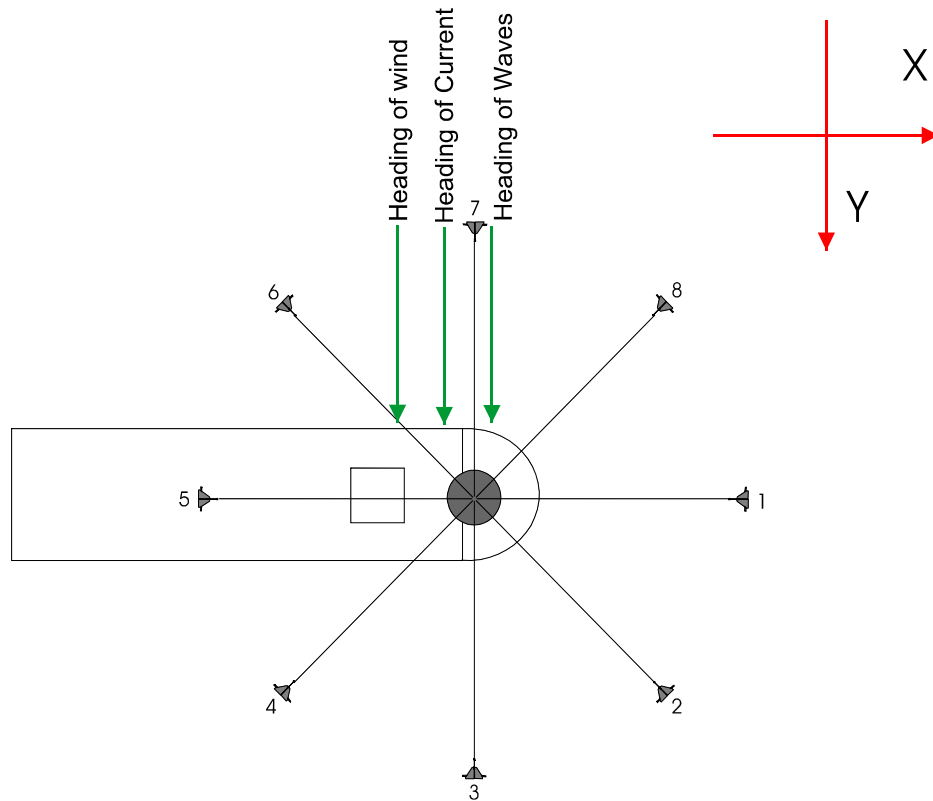
(6.18)

Το μέγιστο φορτίο της άγκυρας είναι 710.252kN το οποίο είναι μικρότερο από την ικανότητα συγκράτησης άγκυρας 3136 kN για την άγκυρα 268.8kN στην άμμο.

6.2.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες με πλευρική πρόσπτωση (Beam Environment) επί του σκάφους (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε ενενήντα μοίρες γωνία πρόσπτωσης)

6.2.2.1 Μέση μετατόπιση στην εγκάρσια διεύθυνση (sway) (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε ενενήντα μοίρες γωνία)

Πρέπει να υπολογιστεί η μέση μετατόπιση, η οποία ορίζεται ως η μετατόπιση του σκάφους λόγω του συνδυασμού σταθερών δυνάμεων ανέμου, ρεύματος και μέσου κύματος, που δρουν στο σκάφος στις 90° από την πλώρη (Σχήμα 6.2).



Εικόνα 6.2 Περίπτωση 2- Περιβαλλοντικές συνθήκες με πλευρική πρόσπτωση

Η σταθερή δύναμη (εγκάρσια) δύναμη του ανέμου (sway) για τη γωνία πρόσπτωσης των 90° από την πλώρη που παρουσιάζεται στο Παράρτημα 2-πίνακας 5.3 και η τιμή για την υπερκατασκευή στο Παράρτημα 2-πίνακας 5.4 και είναι 1132kN και 9.23kN αντίστοιχα.

Η σταθερή δύναμη (εγκάρσια) τιμή δύναμης sway του ρεύματος για τη γωνία πρόσπτωσης των 90° από την πλώρη που παρουσιάζεται στο Παράρτημα 2-Πίνακας 5.5 είναι 804.32kN.

Η μέση τιμή της δευτεροτάξιας δύναμης λόγω κύματος στην εγκάρσια κατεύθυνση (sway) για τη γωνία πρόσπτωσης των 90° από την πλώρη, φαίνεται στο Παράρτημα 2-πίνακας 5.6 και είναι 1811.726kN.

Η συνολική μέση τιμή στο χρόνο της εγκάρσιας δύναμης (sway) για τη γωνία πρόσπτωσης των 90° από την πλήρη παρουσιάζεται στο Παράρτημα 2-Πίνακας και είναι της τάξεως των 3757.276kN.

Η μέση μετατόπιση που αντιστοιχεί στη δύναμη σταθερής κατάστασης μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$y_{mean} = \frac{F_{Steady-Sway}}{k_{Stiffness-Sway}} \quad (6.19)$$

Όπου:

- $F_{Steady-Sway}$ είναι το άθροισμα των μέσων τιμών των δυνάμεων λόγω ανέμου, ρεύματος και κυματισμών στην εγκάρσια κατεύθυνση (sway) και
- $k_{Stiffness-Sway}$ είναι η ακαμψία του συστήματος αγκυροβόλησης στην κίνηση sway του FPSO.

Η sway ακαμψία μπορεί να εκτιμηθεί κατά τρόπο παρόμοιο με τη διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 6.2.1.1 για τον υπολογισμό της ακαμψίας της γραμμής πρόσδεσης. Η sway ακαμψία του συστήματος πρόσδεσης μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τα ακόλουθα βήματα:

I. Σχεδιάζουμε μια γραμμή παράλληλη προς τον άξονα εκτροπής σε απόσταση ίση με την τιμή της μέσης δύναμης στην εγκάρσια κατεύθυνση (sway) υπό την κλίμακα του άξονα του φορτίου μέχρις ότου η γραμμή αυτή να τμήσει την χαρακτηριστική καμπύλη ακαμψίας του σχεδιασθέντος συστήματος αγκύρωσης που φαίνεται στο Παράρτημα 1-σχήμα. Φέρουμε στη συνέχεια μια γραμμή εφαπτομενικά στην καμπύλη από αυτό το σημείο.

II. Η εφαπτομένη της γωνίας μεταξύ της γραμμής και του οριζόντιου άξονα θα μας δώσει την ακαμψία της γραμμής πρόσδεσης. Η εφαπτομένη της γωνίας είναι ο λόγος

της διαφορικής μεταβολής της δύναμης έναντι της διαφορικής μεταβολής της εκτροπής.

III. Λόγω του σχεδιασμού του συστήματος αγκυροβόλησης (45 ° οκτώ γραμμών πρόσδεσης Κεφάλαιο 3-Σχήμα 3.2), η ακαμψία του συστήματος αγκυροβόλησης κατά την εγκάρσια κατεύθυνση μπορεί να υπολογιστεί με την ίδια εξίσωση (6.9) όπως στην περίπτωση της διαμήκουσ κίνησης (surge) αλλά αυτή τη φορά το k θα είναι διαφορετικό όπως είναι προφανές από το Βήμα II.

Η μέση τιμή της δύναμης που ασκείται στο σκάφος, παραλαμβάνεται από το σύστημα πρόσδεσης και ειδικότερα από τις γραμμές πρόσδεσης (6), (7), (8). Επομένως η δύναμη στην πιο φορτωμένη γραμμή (7) δίνεται από:

$$\begin{aligned} F_{Total-Steady} &= F_6 + F_7 + F_8 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow F_{Total-Steady} &= F_7 + F_7 \cos(45^0) + F_7 \cos(45^0) \Rightarrow \\ \Rightarrow F_7(1 + \sqrt{2}) &= 3757.276kN \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow F_7 &= 1556.315kN \end{aligned}$$

Από την καμπύλη ακαμψίας της γραμμής πρόσδεσης που παρουσιάζεται στο Παράρτημα 1-σχήμα 4.3 η ακαμψία της γραμμής πρόσδεσης μπορεί να εκτιμηθεί σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω και είναι ίση:

$$k = \frac{1600 - 1500}{83.17 - 79.47} \frac{kN}{m} = 27.027 \frac{kN}{m}$$

Επειτα:

$$k_{Stiffness-Sway} = 4k \Rightarrow k_{Stiffness-Sway} = 108.108 \frac{kN}{m} \quad (6.20).$$

Έτσι, από την εξίσωση (6.19) μπορεί να ληφθεί η αντίστοιχη μέση surge μετατόπιση:

$$y_{mean} = \frac{F_{Steady-Sway}}{k_{Stiffness-Sway}} \Rightarrow y_{mean} = 34.735m \quad (6.21).$$

6.2.2.2 Μέγιστη μετατόπιση στην εγκάρσια διεύθυνση (Sway) λόγω ανέμου, κύματος και ρεύματος σε ενενήντα μοίρες γωνία πρόσπτωσης

Ο υπολογισμός της απόκρισης στην εγκάρσια διεύθυνση (sway) λόγω των πρωτοτάξιων φορτίσεων της κατασκευής από την δράση των κυματισμών, παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, Τμήμα 5.6.2. Για αυτούς τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η ακαμψία αγκυροβόλησης κατά την εγκάρσια κατεύθυνση (sway) που υπολογίστηκε παραπάνω στην εξίσωση (6.20). Η διαδικασία περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5-Τμήμα 5.6.2. Τα αποτελέσματα για τις πρωτοτάξιες αποκρίσεις λόγω της δράσης των θαλάσσιων κυματισμών, όπως και ο συντελεστής απόκρισης στην εγκάρσια κίνηση (surge RAO) παρουσιάζονται στο Παράρτημα 4-Πίνακας 5.10-Σχήμα 26.-Σχήμα 5.27 , ενώ η σημαντική και μέγιστη τιμή της εγκάρσιας πρωτοτάξιας απόκρισης (sway) στο Παράρτημα 4-Πίνακας 5.11.

Η σημαντική τιμή της πρωτοτάξιας απόκρισης στη συχνότητα του κυματισμού κατά την εγκάρσια κατεύθυνση (sway) καθώς και οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές εμφανίζονται στις επόμενες εξισώσεις (6.22) και (6.23) αντίστοιχα:

$$y_{WF-sig} = 7.369m \quad (6.22)$$

$$y_{WF-max} = 13.706 \quad (6.23)$$

Η εκτίμηση της απόκρισης στην εγκάρσια κατεύθυνση (sway) που οφείλεται στις αργά μεταβαλλόμενες φορτίσεις από το κύμα (slow drift wave) και στις αντίστοιχες φορτίσεις από τον άνεμο περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5-Τμήμα 5.7.1 και Κεφάλαιο 5-Τμήμα 5.7.2 αντίστοιχα. Για τους υπολογισμούς αυτούς έχει χρησιμοποιηθεί η ακαμψία του συστήματος πρόσδεσης κατά την εγκάρσια μετακίνηση (sway) που υπολογίζεται στην εξίσωση (6.20) στη μέση θέση μετατόπισης. Οι υπολογισμοί για τις

αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις από το κύμα (slow drift) και οι αντίστοιχες αποκρίσεις παρουσιάζονται στο Παράρτημα 5-Πίνακας 5.14 -Σχήμα 5.32. Η σημαντική και η μέγιστη τιμή της αργά μεταβαλλόμενης μετακίνησης του σκάφους κατά την εγκάρσια κίνηση (sway slow drift), δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$y_{SDwavesig} = 32357m \quad (6.24)$$

$$y_{SDwavemax} = 47.54m \quad (6.25)$$

Οι υπολογισμοί για τις αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις και αποκρίσεις (slow drift) κατά την εγκάρσια κατεύθυνση λόγω της δράσης του ανέμου παρουσιάζονται στο Παράρτημα 6-Πίνακας 5.16 -Σχήμα 5.34.

Η σημαντική και η μέγιστη τιμή της αργά μεταβαλλόμενης απόκρισης (sway slow drift) λόγω της δράσης του ανέμου δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$y_{SDwind-sig} = 13.643m \quad (6.26)$$

$$y_{SDwind-max} = 19.51m \quad (6.27)$$

Στη συνέχεια, η μέγιστη μετατόπιση ορίζεται ως η άθροιση των μέσων μετατοπίσεων συν τις κατάλληλες συνδυασμένες μετατοπίσεις στις συχνότητες κύματος και στις αργά μεταβαλλόμενες (slow drift) κινήσεις του σκάφους. Η συνδυασμένη μετατόπιση λόγω εκείνης που αντιστοιχεί στη συχνότητα κύματος και εκείνης που οφείλεται στην αργά μεταβαλλόμενη (slow drift) κίνηση δίδονται από την εξίσωση (6.1), έτσι στην περίπτωση μας είναι:

$$\begin{aligned} y_{dyn} &= \max\left[(y_{WF-max} + y_{SD-sig}), (y_{WF-sig} + y_{SD-max})\right] \Rightarrow \\ &\Rightarrow y_{dyn} = \max\left[(7.369m + 47.54m + 19.51m), (13.706m + 32.357m + 13.643m)\right] \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow y_{dyn} = 74.419m \end{aligned} \quad (6.28)$$

Προσθέτοντας τη μέγιστη συνδυασμένη συχνότητα κύματος και slow drift κίνηση μετατόπισης στη μέση μετατόπιση, η μέγιστη μετατόπιση του σκάφους μπορεί να ληφθεί ως εξής:

$$y_{\max} = y_{\text{mean}} + y_{\text{dyn}} \Rightarrow y_{\max} = 34.755m + 74.419m = 109.174m \quad (6.29)$$

Η τιμή αυτή θα πρέπει να ελέγχεται με τα όρια μετατόπισης που καθορίζονται από την ανάλυση των drilling risers και άλλους παράγοντες που αναλύονται στην ενότητα 6.1.1.

Η μέγιστη μετατόπιση sway είναι της τάξης του 10,9% του βάθους του νερού και είναι πάνω από το υπέρ-συντηρητικό όριο μετατόπισης 8%, αλλά μεταξύ της συνιστώμενης περιοχής 8% έως 12% του βάθους του νερού.

6.2.2.3 Μέγιστη τάση γραμμής κατά την εγκάρσια (sway) πρόσπτωση των συνθηκών του περιβάλλοντος (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε ενενήντα μοίρες γωνία)

Η μέγιστη τάση γραμμής, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη μετατόπιση των 109,74 m (εξίσωση (6.29)), μπορεί να υπολογιστεί, χρησιμοποιώντας το Παράρτημα 1 - Σχήμα 4.5 για την πιο φορτισμένη γραμμή, με δεδομένο την τιμή εκτροπής. Έτσι η τιμή για την οριζόντια τάση είναι 4400kN. Στη συνέχεια, η τιμή για τη μέγιστη τάση γραμμής μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$T_{x,\max} = 4400kN + \omega h \quad (6.30)$$

Όπου:

- ω είναι το βάρος ανά μονάδα μήκους και
- h είναι το βάθος του νερού

Έτσι, τα ποσοστά που προκύπτουν είναι 41,82% της αντοχής θραύσης καταλόγου για την αλυσίδα, 43,9% της αντοχής θραύσης καταλόγου για το σχοινί συνθετικών ινών και 37,3% της αντοχής θραύσης καταλόγου (CBS) για το συρματόσχοινο που χρησιμοποιείται. Αυτές οι τιμές είναι μικρότερες από το συνιστώμενο όριο έντασης 50% της CBS για κάθε υλικό που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.3.

<u>Γραμμή πρόσδεσης</u>	Προδιαγραφές υλικών	Στάθμη αντοχής (CBS) (ποσοστό %)
<u>Συρματόσχοινο</u>	Σπειροειδές <i>Πλέξιμο</i>	37.3%
<u>Συνθετικό σχοινί</u>	<i>HMPE</i>	43.9%
<u>Αλυσίδα</u>	<i>Grade 4</i>	41.82%

Πίνακας 6.3 Ποσοστό αντοχής

6.2.2.4 Μέγιστο αναρτημένο μήκος κατά την εγκάρσια (sway) πρόσπτωση των συνθηκών του περιβάλλοντος (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε ενενήντα μοίρες γωνία)

Το μέγιστο αναρτημένο μήκος, που αντιστοιχεί στη μέγιστη μετατόπιση των 109,74m, μπορεί να υπολογιστεί, χρησιμοποιώντας το Παράρτημα 1 - Σχήμα 4.4 για

την πιο φορτισμένη γραμμή, χρησιμοποιώντας την τιμή της εκτροπής ως δεδομένο. Το μέγιστο μήκος του ανυψωμένου τμήματος της γραμμής για τη μέγιστη μετατόπιση είναι 2802.019mm. Αυτή η τιμή είναι μικρότερη από το συνολικό εξωτερικό μήκος των 3300 μέτρων. Επομένως δεν αναμένεται ανύψωση της άγκυρας.

6.2.2.5 Μέγιστο φορτίο άγκυρας κατά την εγκάρσια (sway) πρόσπτωση των συνθηκών του περιβάλλοντος (άνεμος, κύμα και ρεύμα σε ενενήγτα μοίρες γωνία)

Το μέγιστο φορτίο της άγκυρας μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση (6.7), όπου η (ικανότητα συγκράτησης της αλυσίδας) δίνεται από την εξίσωση (6.8). Έτσι, το μέγιστο φορτίο της άγκυρας είναι:

$$\begin{aligned}
 \text{Maximum - Anchor - Load}_{Surge} &= 4400\text{kN} - P_{Chain} \Rightarrow \\
 \Rightarrow \text{Maximum - Anchor - Load}_{Surge} &= 4400\text{kN} - \left[1 \times (3300 - 2802.019)\text{m} \times 2.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right] \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \text{Maximum - Anchor - Load}_{Surge} &= 3055.451\text{kN}
 \end{aligned}$$

(6.31)

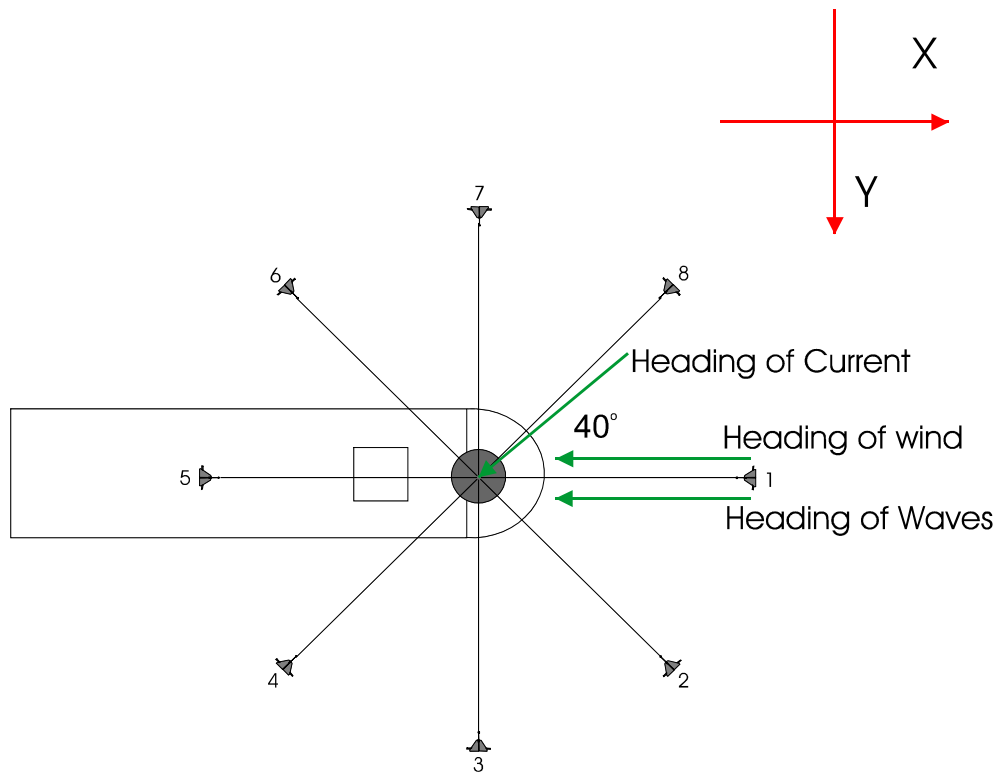
Το μέγιστο φορτίο αγκύρωσης είναι 3055.451kN το οποίο είναι μικρότερο από την ικανότητα συγκράτησης άγκυρας 3136 kN για την άγκυρα 268.8kN στην άμμο.

6.2.3 Επίδραση του ανέμου, κύματος και ρεύματος στο FPSO με διαφορετικές γωνίες

Η ενσωμάτωση ενός πυργοειδούς συστήματος αγκυροβόλησης έχει αποφασισθεί ως ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την πρόσδεση του FPSO για διάφορους λόγους, που αναλύονται εκτενώς στο Κεφάλαιο 1. Ένα πυργοειδές σύστημα αγκυροβόλησης επιτρέπει στο σκάφος να προσανατολίζεται στον καιρό γύρω από τον πυργίσκο. Για ένα FPSO, η σχετική κατεύθυνση του ανέμου και των κυμάτων θα έχει μεγάλη σημασία εξαιτίας του γεγονότος ότι μη συγγραμικές συνθήκες ρευματός, κύματος και άνεμος θα οδηγήσουν σε μια μη βέλτιστη διεύθυνση για κάποιες από τις δυνάμεις που αυτό θα τις οδηγήσει να αυξηθούν σημαντικά. Επομένως, μια υπόθεση συγγραμικών καιρικών συνθηκών - όπως οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν στα δύο προηγούμενα κεφάλαια 6.2.1 και 6.2.2) - μπορεί να μην είναι συντηρητική όταν αναφέρονται στις δυνάμεις πρόσδεσης ενός πλοίου που περιστρέφεται πάνω στον καιρό.

Θα παρουσιαστεί μια μέθοδος για να δείξει πώς είναι δυνατόν να αντιμετωπιστεί αυτή η συμπεριφορά, μέσω της περίπτωσης που θα συζητηθεί λεπτομερώς παρακάτω.

Στην περίπτωση αυτή η κατεύθυνση των περιβαλλοντικών παραγόντων θα είναι όπως φαίνεται στο επόμενο Σχήμα 6.3.



Εικόνα 6.3 Περίπτωση 3 - Διεύθυνση πρόσπτωσης του ρεύματος στις 40°, άνεμος και κύμα στις 0^ο πρόσπτωσης

Η γωνία προσβολής του ρεύματος θα είναι 40° από την πλώρη και η κατεύθυνση του ανέμου / κύματος στις 0°. Υπολογίζεται αρχικά ότι η γωνία στροφής του σκάφους είναι στις 0°. Λόγω της κατεύθυνσης του ρεύματος, εφαρμόζεται στο σκάφος μια ροπή στρέψης δεξιόστροφα. Αυτό συνοδεύεται από τη δημιουργία διαμήκων και εγκάρσιων δυνάμεων που εφαρμόζονται στο σκάφος λόγω της δράσης του ρεύματος. Λόγω της παραγόμενης εγκάρσιας δύναμης από τη δράση του ρεύματος, εφαρμόζεται ισόποση δύναμη από τον πυργίσκο προς το πλοίο προς την αντίθετη κατεύθυνση (δείχνοντας τον αρνητικό άξονα-y σε σχέση με την σύμβαση που υιοθετήθηκε). Αυτή η δύναμη πολλαπλασιασμένη με την απόσταση του πυργίσκου από το μέσον του πλοίου (βραχίονας μοχλού), η οποία είναι 150 m, θα παράγει μια αντιωρολογιακή (αρνητική) ροπή στρέψης. Οι τιμές για τις παραπάνω δυνάμεις και

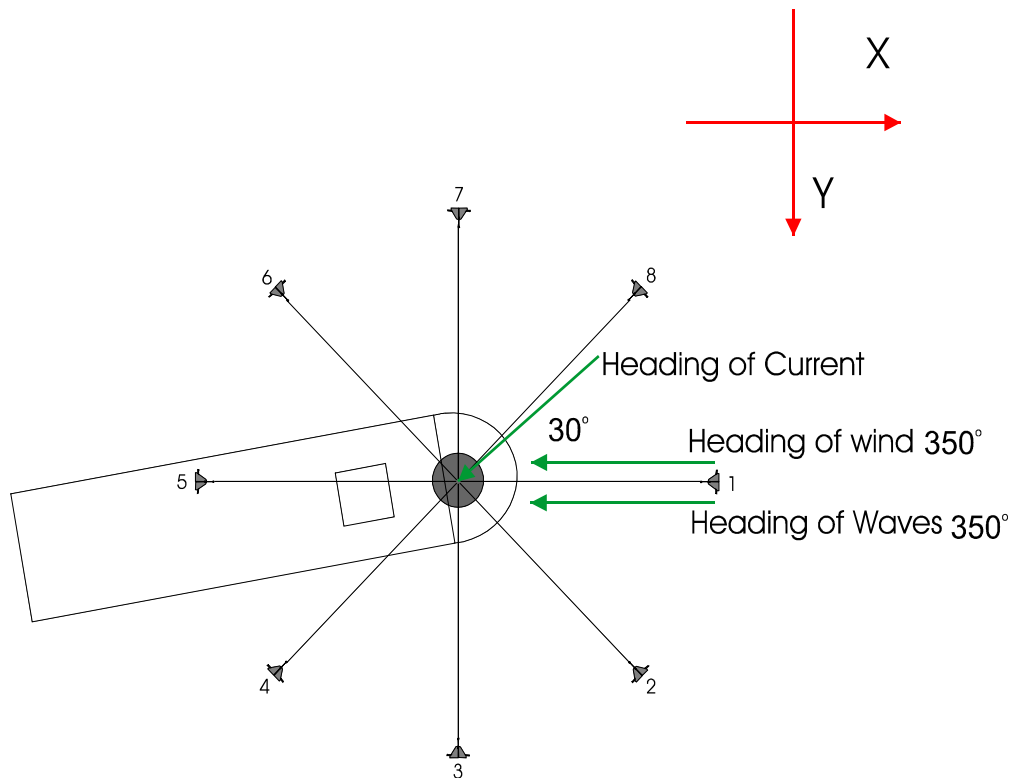
ροπές συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.4. Οι τιμές για τις δυνάμεις και τις ροπές για τη γωνία ρεύματος 40° λαμβάνονται από το Παράρτημα 2-πίνακας 5.5.

	<u>Current</u>	<u>Turret</u>
<u>Διαμήκης δύναμη(kN)</u>	-121.881	
<u>Εγκάρσια Δύναμη(kN)</u>	426.582	
<u>Ροπή στρέψης(MNm)</u>	5.734	-63.987

Πίνακας 6.4 Τιμές για τις δυνάμεις και τις ροπές εξαιτίας του ρεύματος για γωνία 40 °

Από τον παραπάνω Πίνακα 6.4 είναι προφανές ότι το πλοίο θα γυρίσει αριστερόστροφα επειδή η τιμή του στροφέα (63,987MNm) είναι μεγαλύτερη από την τιμή ροπής του ρεύματος 5,734MNm. Αλλά αν το σκάφος γυρίσει η γωνία του ανέμου / κύματος θα αλλάξει και αυτό θα οδηγήσει σε επιπλέον ροπές και εγκάρσιες δυνάμεις από τον άνεμο και τα κύματα, ενώ ταυτόχρονα η τρέχουσα γωνία προσβολής μειώνεται.

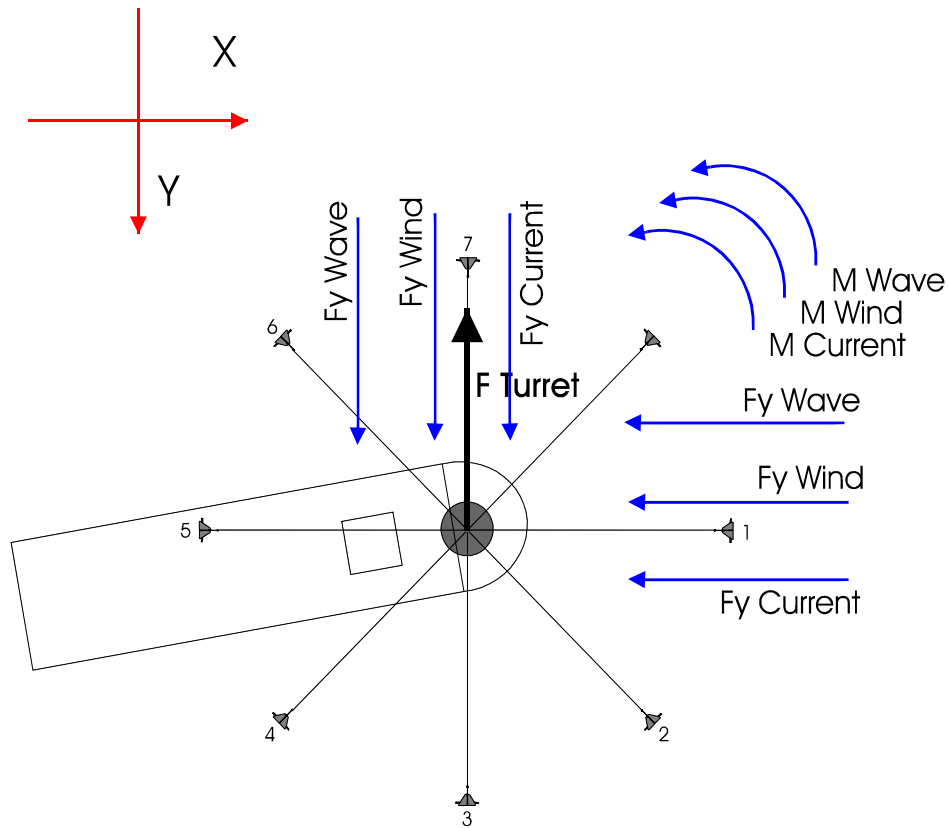
Αυτό οδηγεί σε μείωση της ροπής στρέψεως από το ρεύμα που εφαρμόζεται. Η γωνία στροφής του σκάφους παρουσιάζεται στο επόμενο Σχήμα 6.4.



Εικόνα 6.4 Η προκύπτουσα θέση ισορροπίας

Σε ένα πυργοειδές σύστημα αγκύρωσης, το σκάφος είναι ελεύθερο να περιστρέφεται στο οριζόντιο επίπεδο για να επιτευχθεί η θέση ισορροπίας. Η θέση ισορροπίας επιτυγχάνεται όταν οι ροπές στρέψης κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού που εφαρμόζονται στο δοχείο είναι ίσες με τις αντιωρολογιακές.

Η κατεύθυνση όλων των εφαρμοζόμενων δυνάμεων και ροπών στο πλοίο παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα 6.5.



Εικόνα 6.5 Κατεύθυνση των εφαρμοζόμενων δυνάμεων και ροπών στο πλοίο

Οι ροπές κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού όπως είναι προφανές από το Σχήμα 6.6 είναι οι ροπές που επιβάλλονται από τη δράση του σταθερού ρεύματος, του ανέμου και των κυμάτων (M_c , M_{wind} , M_{wave}). Η μόνη αριστερόστροφη ροπή παράγεται από το πυργοειδές σύστημα αγκυροβόλησης. Η εξωτερική δύναμη στον άξονα y που εφαρμόζεται στο σκάφος είναι το άθροισμα των σταθερών δυνάμεων ρεύματος, αέρα και κύματος (F_{yc} , F_{ywind} , F_{ywave}). Μία ίση δύναμη στην αντίθετη κατεύθυνση δημιουργείται από το σύστημα πρόσδεσης για να αντέχει την εφαρμοζόμενη εξωτερική δύναμη. Αυτή η δύναμη πολλαπλασιάζεται με την απόσταση από τη μέση του πλοίου και παράγει μια αντίθετη από τη φορά των δεικτών του ρολογιού ροπή (M_{turret}), η οποία αντιστέκεται στη δράση των δεξιόστροφα ροπών από

το ρεύμα, άνεμο και κύμα (Mc, Mwind, Mwave). Για γωνία θ θα ληφθεί η αντίδραση των ροπών. Η τιμή της γωνίας θ μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική διαδικασία.

Η γωνία θ για την οποία θα ληφθεί η αντίδραση των ροπών είναι 10° (Εικόνα 6.5). Στη συνέχεια, οι παραγόμενες εγκάρσιες δυνάμεις και ροπές που οφείλονται στη δράση όλων των περιβαλλοντικών παραμέτρων (Παράρτημα 2 - Πίνακας 5.3 - Πίνακας 5.4 - Πίνακας 5.5 - Πίνακας 5.6) και λόγω του συστήματος αγκυροβόλησης πυργίσκων συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.5. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γωνία προσβολής του ανέμου στο πλοίο και την υπερκατασκευή είναι η τρέχουσα γωνία προσβολής και η γωνία προσβολής κύματος είναι όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5.

	<u>Εγκάρσια Δύναμη(kN)</u>	<u>Ροπή στρέψης(MNm)</u>
<u>Άνεμος (πλοίο με υπερκατασκευή)</u>	-163.285	-10
<u>Wave Drift</u>	-194.195	-2.747
<u>Ρεύμα</u>	302.227	4.991
<u>Πυργίσκος</u>		8.288

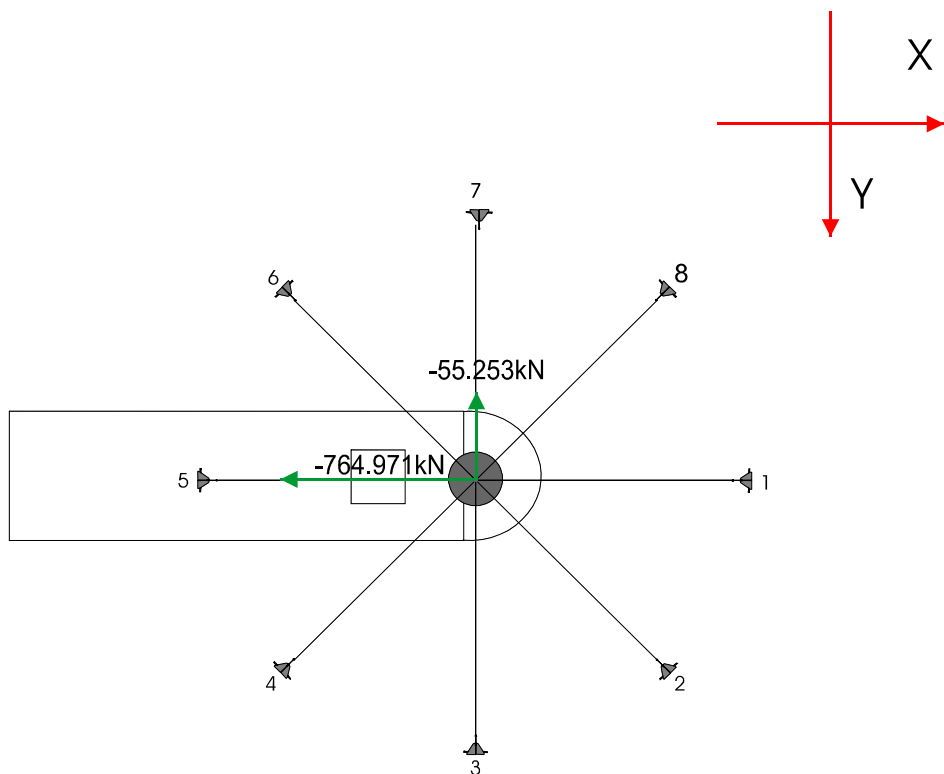
**Πίνακας 6.5 Παραγόμενες εγκάρσιες δυνάμεις και ροπές στην θέση ισοροπίας
(περίπτωση 3)**

Επομένως είναι προφανές ότι η θέση ισορροπίας θα ληφθεί υπό γωνία. Στη συνέχεια, οι δυνάμεις που δρουν στο FPSO (Διαμήκης και εγκάρσια) συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.6:

	<u>Εγκάρσια Δύναμη(kN)</u>	<u>Ροπή στρέψης(MNm)</u>
<u>Άνεμος (πλοίο)</u>	-250.977	-154.76
<u>Άνεμος (υπερκατασκευή)</u>	-8.325	-8.325
<u>Wave Drift</u>	-315.609	-194.195
<u>Ρεύμα</u>	-190.23	302.227
<u>Σύνολο Δυνάμεων</u>	-764.971	-55.253

Πίνακας 6.6 Διαμήκεις και εγκάρσιες δυνάμεις στη θέση ισορροπίας

Έτσι η συνολική διαμήκης και εγκάρσια δύναμη που δρουν στο FPSO παρουσιάζονται στο επόμενο Σχήμα 6.6.



Εικόνα 6.6 Συνολικές διαμήκειες και εγκάρσιες δυνάμεις που δρουν στο FPSO

Η μέση χρονικά οριζόντια δύναμη (στον άξονα x) στο σύστημα πρόσδεσης λαμβάνεται από τις γραμμές πρόσδεσης (1), (2), (8). Επομένως η δύναμη στην πιο φορτισμένη γραμμή (1) δίνεται από:

$$\begin{aligned}
 F_{Total-Steady} &= F_1 + F_2 + F_8 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow F_{Total-Steady} &= F_1 + F_1 \cos(45^0) + F_1 \cos(45^0) \Rightarrow \\
 \Rightarrow F_1(1 + \sqrt{2}) &= 764.971 kN \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow F_1 &= 316.861 kN
 \end{aligned}
 \tag{6.32}$$

Η δύναμη επί της γραμμής πρόσδεσης (8) δίνεται από:

$$\begin{aligned}
 F_8 &= F_1 \cos(45^0) \Rightarrow \\
 \Rightarrow F_8 &= 224.054 kN
 \end{aligned}
 \tag{6.33}$$

Η μέση χρονικά οριζόντια δύναμη (επί του άξονα y) στο σύστημα πρόσδεσης

λαμβάνεται από τις γραμμές πρόσδεσης (6), (7), (8). Επομένως η δύναμη στην πιο φορτισμένη γραμμή (1) δίνεται από:

$$\begin{aligned}
 F_{Total-Steady} &= F_6 + F_7 + F_8 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow F_{Total-Steady} &= F_7 + F_7 \cos(45^\circ) + F_7 \cos(45^\circ) \Rightarrow \\
 \Rightarrow F_7(1 + \sqrt{2}) &= 55.253kN \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow F_7 &= 22.886kN
 \end{aligned} \tag{6.34}$$

Η πρόσθετη δύναμη στη γραμμή αγκυροβόλησης (8) δίνεται από:

$$\begin{aligned}
 F_8 &= F_7 \cos(45^\circ) \Rightarrow \\
 \Rightarrow F_7 &= 22.886kN
 \end{aligned} \tag{6.35}$$

Έτσι, η συνολική δύναμη στη γραμμή πρόσδεσης (8) δίνεται από:

$$\begin{aligned}
 F_8 &= F_1 \cos(45^\circ) + F_7 \cos(45^\circ) \Rightarrow \\
 \Rightarrow F_8 &= 240.237kN
 \end{aligned} \tag{6.36}$$

Όπως είναι προφανές, η πιο φορτισμένη γραμμή είναι η γραμμή (1) επειδή $316.861kN > 240.237kN$ και αυτό είναι αρκετά φυσικό επειδή η δύναμη στη διαμήκη κατεύθυνση είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή στην εγκάρσια κατεύθυνση.

6.2.3.1 Μέση μετατόπιση για γωνίες επίδρασης ρεύματος 40° και 0° για άνεμο και κύμα

Πρώτον, η μέση μετατόπιση θα υπολογιστεί λόγω του συνδυασμού των μέσων τιμών στον χρόνο των διαμήκων δυνάμεων που οφείλονται στον άνεμο, το ρεύμα και στο κύμα (wave drift), όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5.

Η δύναμη στην πιο φορτισμένη γραμμή πρόσδεσης (1) είναι 316.861kN. Από την καμπύλη ακαμψίας γραμμής πρόσδεσης που παρουσιάζεται στο Παράρτημα 1- σχήμα 4.3 η ακαμψία της γραμμής πρόσδεσης μπορεί να εκτιμηθεί σύμφωνα με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω και είναι ίση:

$$k = \frac{400 - 305}{27.11 - 20.82} \frac{kN}{m} = 15.9 \frac{kN}{m} \quad (6.37)$$

Ως εκ τούτου η ακαμψία του συστήματος πρόσδεσης δίνεται από:

$$k_{Stiffness-Surge} = 4 \times 15.9 \frac{kN}{m} = 63.6 \frac{kN}{m} \quad (6.38)$$

Έτσι, από την εξίσωση (6.8) μπορεί να ληφθεί η αντίστοιχη μέση απόκλιση surge:

$$x_{mean} = \frac{F_{Steady-Surge}}{k_{Stiffness-Surge}} \Rightarrow x_{Surge-mean} = \frac{764.971}{63.6} \frac{kN}{\frac{kN}{m}} \Leftrightarrow \quad (6.39)$$

$$\Leftrightarrow x_{Surge-mean} = 12.028m$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η μέση μετατόπιση για τις συνολικές εγκάρσιες δυνάμεις, όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5.

Η ακαμψία του συστήματος πρόσδεσης δίνεται από (Σημειώστε ότι η ακαμψία είναι η ίδια με την περίπτωση του surge):

$$k_{Stiffness} = 63.6 \frac{kN}{m} \quad (6.40)$$

Έτσι, μπορεί να επιτευχθεί η αντίστοιχη μέση απομάκρυνση κατά την εγκάρσια κατεύθυνση (sway):

$$y_{mean} = \frac{F_{Steady-Sway}}{k_{Stiffness}} \Rightarrow x_{mean} = \frac{55.253 \frac{kN}{m}}{63.6 \frac{kN}{m}} \Leftrightarrow \quad (6.41)$$

$$\Leftrightarrow y_{mean} = 0.869m$$

Έτσι, η συνδυασμένη μέση μετατόπιση δίνεται από:

$$\text{Συνδυασμένη μέση μετατόπιση} = \sqrt{12.028^2 + 0.869^2} = 12.059m \quad (6.42)$$

6.2.3.2 Μέγιστη μετατόπιση για γωνίες επίδρασης ρεύματος 40° και 0° για άνεμο και κύμα

Η διαδικασία για την εκτίμηση της σημαντικής και της μέγιστης τιμής των πρωτοτάξιων και των αργά μεταβαλλόμενων συνιστωσών της μετατόπισης κατά την διαμήκη (surge) διεύθυνση, για την περίπτωση όπου η κατεύθυνση κύματος είναι στις μηδέν μοίρες (μετωπική πρόσπτωση), παρουσιάζεται στην Ενότητα 6.2.1.2. Η ίδια διαδικασία θα χρησιμοποιηθεί και εδώ με τη μόνη διαφορά ότι η τιμή για την ακαμψία του συστήματος πρόσδεσης είναι 63,6kN / m αντί 64,309kN / m. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια:

Απόκριση στη συχνότητα κύματος (πρωτοτάξια απόκριση):

$$x_{WF-sig} = 4.718m \quad (6.43)$$

$$x_{WF-max} = 8.775m \quad (6.44)$$

Αργά μεταβαλλόμενες συνιστώσες της μετατόπισης (Slow Drift) λόγω ανέμου:

$$x_{SDwind-sig} = 6.51m \quad (6.45)$$

$$x_{SDwind-max} = 9.31m \quad (6.46)$$

Αργά μεταβαλλόμενες συνιστώσες της μετατόπισης (Slow Drift) λόγω κυμάτων:

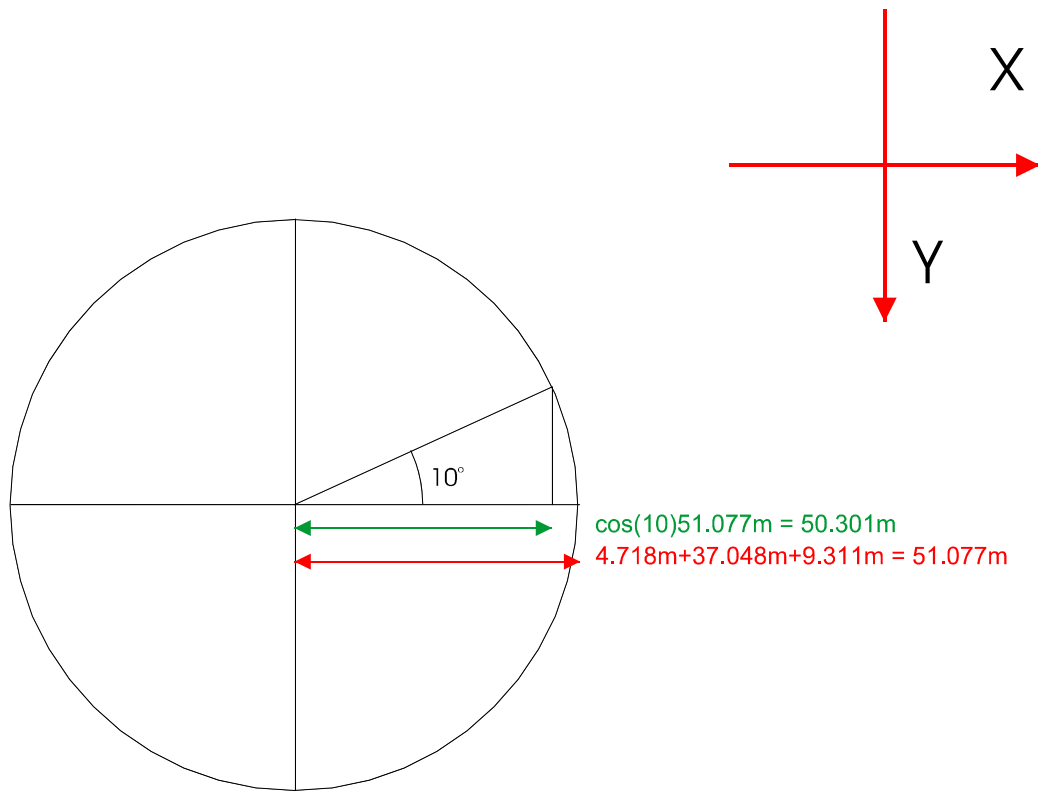
$$x_{SDwavesig} = 25.97m \quad (6.47)$$

$$x_{SDwavemax} = 37.048m \quad (6.48)$$

Η συνδυασμένη τιμή της πρωτοτάξιας και της αργά μεταβαλλόμενης συνιστώσας της μετατόπισης δίδονται από την εξίσωση (6.1), που στην περίπτωση μας είναι:

$$\begin{aligned} x_{dyn} &= \max[(x_{WF-max} + x_{SD-sig}), (x_{WF-sig} + x_{SD-max})] \Rightarrow \\ \Rightarrow x_{dyn} &= \max[(4.718m + 37.048m + 9.311m), (8.775m + 25.97m + 6.511m)] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow x_{dyn} &= 51.077m \end{aligned} \quad (6.49)$$

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω τιμές αναφέρονται στην μετωπική περίπτωση πρόσπτωσης (Head Condition) ενώ η γωνία στροφής του σκάφους στην παρούσα περίπτωση είναι 10°. Έτσι, θα εισάγουμε την ακόλουθη προσέγγιση (Εικόνα 6.7).



Εικόνα 6.7 Προσέγγιση της συνδυασμένης πρωτοτάξιας και αργά μεταβαλλόμενης κίνησης κατά την διαμήκη κατεύθυνση (surge)

Έτσι, η τιμή για τη συνδυασμένη μετατόπιση κατά την διαμήκη κατεύθυνση λόγω πρωτοτάξιων και αργά μεταβαλλόμενων κινήσεων είναι περίπου 50.301m.

Η διαδικασία για τον υπολογισμό της σημαντικής και της μέγιστης τιμής των πρωτοτάξιων και αργά μεταβαλλόμενων συνιστωσών των μετακινήσεων κατά την εγκάρσια κατεύθυνση (sway) λόγω της δράσης των κυματισμών, για την περίπτωση όπου η κατεύθυνση κύματος είναι ενενήντα μοίρες, παρουσιάζεται στην Ενότητα 6.2.2.2. Θα χρησιμοποιηθεί η ίδια διαδικασία και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Απόκριση στη συχνότητα κύματος:

$$y_{WF-sig} = 7.369m \quad (6.50)$$

$$y_{WF-max} = 13.706m \quad (6.51)$$

Αργά μεταβαλλόμενες συνιστώσες της μετατόπισης (Slow Drift) λόγω ανέμου:

$$y_{SDwind-sig} = 27.176m \quad (6.52)$$

$$y_{SDwind-max} = 38.861m \quad (6.53)$$

Αργά μεταβαλλόμενες συνιστώσες της μετατόπισης (Slow Drift) λόγω κύματος:

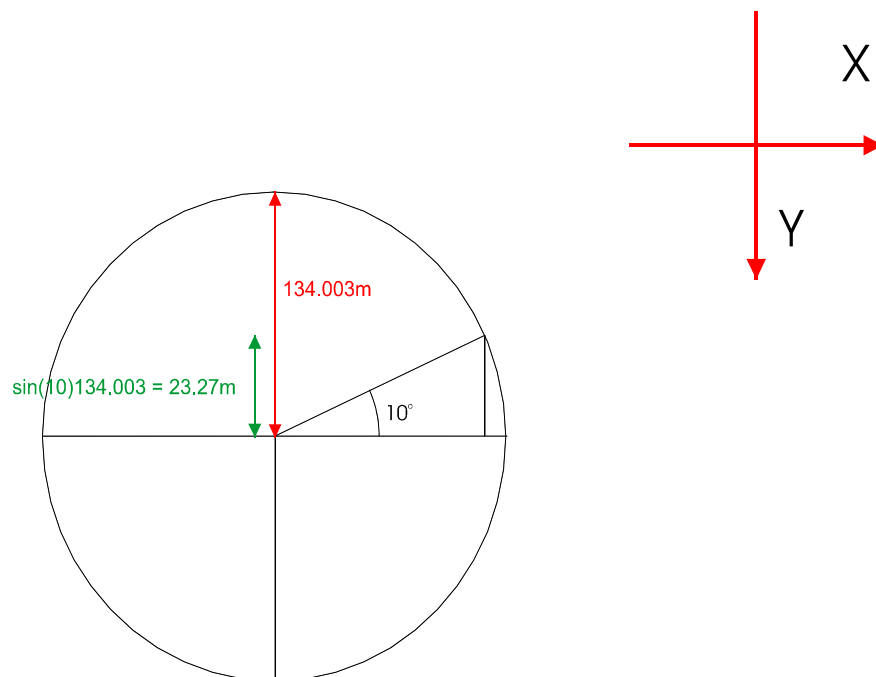
$$y_{SDwavesig} = 61.707m \quad (6.54)$$

$$y_{SDwavemax} = 87.773m \quad (6.55)$$

Η συνδυασμένη πρωτοτάξια και αργά μεταβαλλόμενη μετακίνηση είναι:

$$\begin{aligned} y_{dyn} &= \max\left[(y_{WF-max} + y_{SD-sig}), (y_{WF-sig} + y_{SD-max})\right] \Rightarrow \\ \Rightarrow y_{dyn} &= \max\left[(7.369m + 87.773m + 38.861m), (13.706m + 61.707m + 27.176m)\right] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow y_{dyn} &= 134.003m \end{aligned} \quad (6.56)$$

Αλλά όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτές οι τιμές αναφέρονται στην Beam Condition ενώ η γωνία στροφής του σκάφους είναι στην προκειμένη περίπτωση είναι 10°. Επομένως, θα εισάγουμε την προσέγγιση που φαίνεται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 6.8).



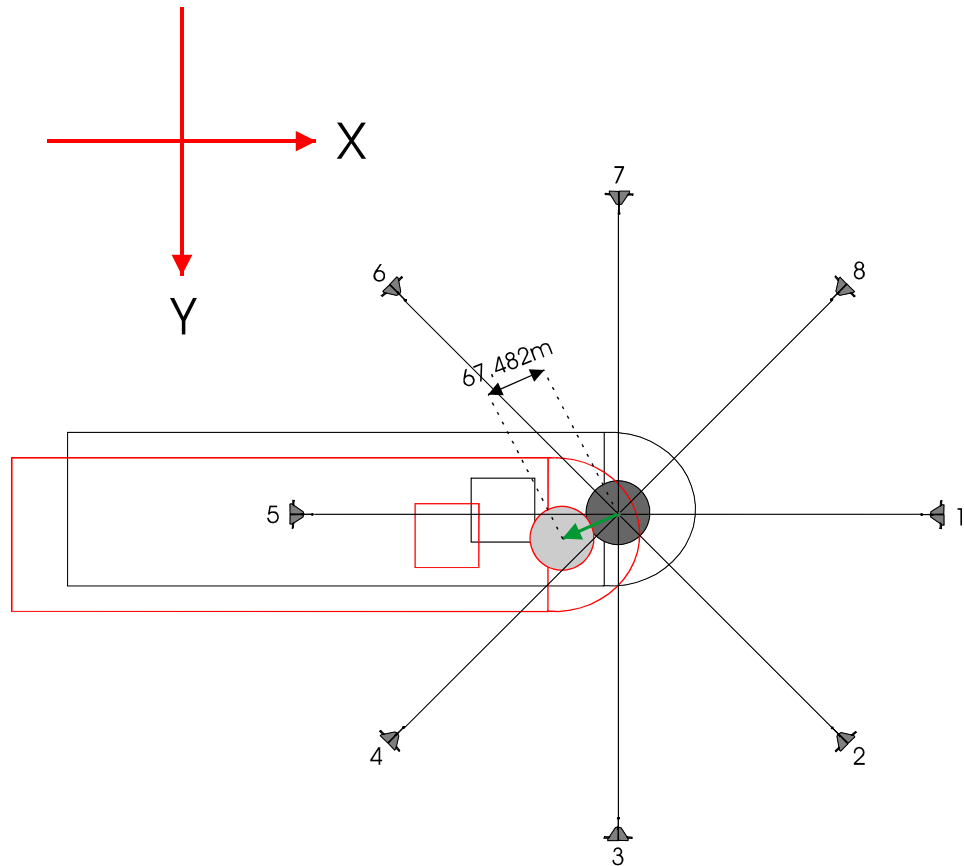
Εικόνα 6.8 Προσέγγιση της συνδυασμένης πρωτοτάξιας και αργά μεταβαλλόμενης μετακίνησης στην εγκάρσια (Sway) κατεύθυνση

Έτσι, η τιμή για τη συνδυασμένη πρωτοτάξια και αργά μεταβαλλόμενη συνιστώσα της μετακίνησης (slow drift) κατά την εγκάρσια κατεύθυνση είναι περίπου 23,27 μέτρα.

Με βάση τα προηγούμενα, το πλάτος της συνδυασμένης πρωτοτάξιας και αργά μεταβαλλόμενης συνιστώσας της μετατόπισης κατά την διεύθυνση της ισορροπίας του

$$\text{σκάφους θα είναι} = \sqrt{50.301^2 + 23.27^2} = 55.423m \quad (6.57)$$

Προσθέτοντας τη συνδυασμένη μέση και μέγιστη μετατόπιση, μπορούμε να υπολογίσουμε την μέγιστη μετατόπιση του σκάφους Σχήμα 6.9:



Εικόνα 6.9 Συνδυασμένη μέση και μέγιστη μετατόπιση

$$\text{Μέγιστη μετατόπιση σκάφους} = 12.059\text{m} + 55.423\text{m} = 67.482\text{m} \quad (6.58)$$

Η τιμή αυτή θα πρέπει να ελέγχεται με τα όρια μετατόπισης που καθορίζονται από την ανάλυση των drilling risers και άλλους παράγοντες που αναλύονται στην ενότητα 6.1.1.

Η μέγιστη μετατόπιση sway είναι της τάξης του 6,75% του βάθους του νερού και είναι πάνω από το όριο εκτροπής 8%.

6.2.3.3 Μέγιστη τάση γραμμής για γωνίες επίδρασης ρεύματος 40° και 0° για άνεμο και κύμα

Η μέγιστη τάση γραμμής, αν προσθέσουμε τη συνδυασμένη κίνηση κύματος και slow drift στη μέση μετατόπιση, μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη μετατόπιση σκάφους σε διαμήκη κατεύθυνση:

$$\begin{aligned}x_{\max} &= x_{\text{mean}} + x_{\text{dyn}} \Rightarrow \\x_{\max} &= (12.028 + 50.301)m = 62.329m\end{aligned}\tag{6.59}$$

Η μέγιστη τάση στην πιο φορτισμένη γραμμή (1) που αντιστοιχεί στην ανωτέρω διαμήκη μέγιστη μετατόπιση των 62,329m (διαφορετική από τη μέγιστη μετατόπιση του σκάφους), μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το Παράρτημα 1-σχήμα 4.5 για την πιο φορτισμένη γραμμή με εισαγωγή της τιμής της εκτροπής. Έτσι η τιμή για την οριζόντια τάση είναι 3040kN. Στη συνέχεια, η τιμή για τη μέγιστη τάση γραμμής μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$T_{x\max} = 3040N + ah\tag{6.60}$$

Που:

- w είναι το βάρος ανά μονάδα μήκους και
- h είναι το βάθος του νερού

Έτσι, τα προκύπτοντα ποσοστά είναι 31,8% της αντοχής θραύσης καταλόγου για την αλυσίδα, 33,37% της αντοχής θραύσης καταλόγου για το σχοινί συνθετικών ινών και 28,38% της αντοχής θραύσης καταλόγου (CBS) για το συρματόσχοινο που χρησιμοποιείται. Αυτές οι τιμές είναι μικρότερες από το συνιστώμενο όριο έντασης 50% της CBS για κάθε υλικό που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.7.

<u>Γραμμή πρόσδεσης</u>	Προδιαγραφές υλικών	Στάθμη αντοχής (CBS) (ποσοστό %)
<u>Συρματόσχοινο</u>	Σπειροειδές Πλέξιμο	28.38%
<u>Συνθετικό σχοινί</u>	HMPE	33.37%
<u>Αλυσίδα</u>	Grade 4	31.8 %

Πίνακας 6.7 Ποσοστό CBS (περίπτωση 3)

6.2.3.4 Μέγιστο αναρτημένο μήκος για 40° ρεύμα και για 0° γωνίες κλίσης ανέμου και κύματος

Το μέγιστο αναρτημένο μήκος, που αντιστοιχεί στη μέγιστη μετατόπιση των 62,329 μ., μπορεί να υπολογιστεί, χρησιμοποιώντας το Παράρτημα 1 - Σχήμα 4.4 για την πιο φορτισμένη γραμμή με εισαγωγή της τιμής της εκτροπής. Το μέγιστο ανυψωμένο μήκος της γραμμής για τη μέγιστη μετατόπιση είναι 2385.806m. Αυτή η τιμή είναι μικρότερη από το συνολικό μήκος των 3300 μέτρων. Επομένως δεν αναμένεται ανύψωση άγκυρας.

6.2.3.5 Μέγιστο φορτίο άγκυρας για γωνίες επίδρασης ρεύματος 40° και 0° για άνεμο και κύμα

Το μέγιστο φορτίο άγκυρας μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση (6.7), όπου

η (ικανότητα συγκράτησης της αλυσίδας) δίνεται από την εξίσωση (6.8). Έτσι, το μέγιστο φορτίο στην άγκυρα είναι:

$$\begin{aligned}
 \text{Maximum - Anchor - Load}_{Surge} &= 3040\text{kN} - P_{Chain} \Rightarrow \\
 \Rightarrow \text{Maximum - Anchor - Load}_{Surge} &= 3040\text{kN} - \left[1 \times (3300 - 2385,806)\text{m} \times 2,7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right] \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \text{Maximum - Anchor - Load}_{Surge} &= 571,68\text{kN}
 \end{aligned}$$

(6.61)

Το μέγιστο φορτίο αγκύρωσης είναι 571,68 kN το οποίο είναι μικρότερο από την ικανότητα συγκράτησης άγκυρας 3136 kN για την άγκυρα 268,8 kN σε αμμώδη πυθμένα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο στόχος της παρούσας μελέτης ήταν να προσδιοριστούν τα πλεονεκτήματα που συνδέονται με τα πυργοειδή συστήματα αγκυροβόλησης και η εφαρμογή των συρματόσχοινων από συνθετικές ίνες, προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική συγκράτηση μιας μονάδας FPSO σε βαθιά νερά.

Τα σύγχρονα τεχνολογικά εξελιγμένα δεξαμενόπλοια και οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις δημιούργησαν την ανάγκη καλύτερης κατηγορίας σχοινιών και υλικών. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την απαιτούμενη αντοχή, την εκτατότητά τους, το σχετικά χαμηλό κόστος και την ανθεκτικότητα στην αλλοίωση από περιβαλλοντικούς παράγοντες καθιστούν τα προηγμένα συνθετικά σχοινιά σημαντικούς υποψήφιους για εφαρμογές αγκυροβόλησης υπεράκτιων κατασκευών.

Προκρίνεται ως λύση η ενσωμάτωση του εσωτερικού πυργοειδούς συστήματος να τοποθετείται ακριβώς πίσω από την πλώρη του FPSO. Ως εναλλακτική λύση, το πυργοειδές σύστημα μπορεί να τοποθετηθεί σε θέση πλησιέστερη στο μέσο του πλοίου. Εντούτοις στην περίπτωση αυτή θα χρειαζόταν ένα ενεργό σύστημα προωθητήρων για τον έλεγχο της γωνίας διεύθυνσης, το οποίο θα μπορούσε να είναι ασύμφορο ως προς το κόστος της επένδυσης.

Η παρούσα εργασία ολοκληρώθηκε με την ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών ενός πυργοειδούς συστήματος αγκυροβόλησης με επίδραση του ανέμου, κύματος και ρεύματος συγγραμικά σε συνθήκες μετωπικής πρόσπτωσης και για μη συγγραμικές συνθήκες ανέμου, κύματος και ρεύματος που δρουν στο FPSO με διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Η διαμόρφωση του εσωτερικού πυργοειδούς συστήματος επιτρέπει στο FPSO να προσανατολίζεται στις καιρικές συνθήκες ενώ περιστρέφεται γύρω από τον πυργίσκο. Αυτό ουσιαστικά μειώνει τα περιβαλλοντικά

φορτία που διαφορετικά θα υπήρχαν εάν το FPSO φορτιζόταν από την πλευρική κατεύθυνση (beam) με όλες τις περιβαλλοντικές παραμέτρους να είναι συγγραμικές.

Η παραπάνω διαπίστωση επιβεβαιώθηκε και από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν. Διαπιστώθηκαν διαφορετικές γωνίες φόρτισης και παρατηρήθηκε ότι οι δυνάμεις που επενεργούν στο FPSO αυξήθηκαν σημαντικά όταν το FPSO υποβάλλεται σε φόρτιση από την εγκάρσια κατεύθυνση (beam). Λόγω του γεγονότος ότι οι συνθήκες πλευρικής πρόσπτωσης των συνθηκών του περιβάλλοντος (Beam Conditions) μπορούν να αποφευχθούν, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η διαμόρφωση του πυργοειδούς συστήματος αγκυροβολίας είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους πρόσδεσης των FPSO.

Η εφαρμογή του HMPE (High Modulus Polyethylene), το οποίο είναι ελαφρύτερο από το νερό με σχετική πυκνότητα 0,97, απομακρύνει το πρόβλημα του ίδιου βάρους ελαχιστοποιώντας τους σχετικούς περιορισμούς. Το στοιχείο της οριζόντιας δύναμης που παράγεται είναι πολύ αποτελεσματικό στην ελαχιστοποίηση των μετατοπίσεων της πλατφόρμας. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι ελαχιστοποιήθηκαν διαστασιολογικά οι διάμετροι καθενός από τα διαφορετικά τμήματα του συστήματος πρόσδεσης και αυτό επέτρεψε σημαντικές μειώσεις στους παράγοντες κόστους του συστήματος πρόσδεσης και της μελέτης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Brouwer, H. (1996). Developments in designing of FPSO mooring system. CPD Seminar - Floating production and storage installations, London , UK, IMarE Conferences and Symposia 1996.
2. Lee, M.-Y. (1997). FPSO Mooring: Design and Reulatory Considerations. Offshore Technology Conference, Houston Texas.
3. Lovie, P. (1996). “Floating production . The turnkey option.” Journal of Offshore Technology (JOT).
4. Lunde, P. J. P. A. (1997). Latest breakthrough in mooring for FPSO systems: The forgiving Tanker/Turret Interface. Offshore Technology Conference, Houston Texas, Offshore Technology Conference.
5. Davies et al., (2001), Stiffness and Durability of deep water Synthetic mooring lines, Risers, Mooring and Anchoring for Deep Waters, September, London.
6. Berryman CT, (2002), Laboratory study of used HMPE MODU mooring lines, OTC
7. Corbetta I, Sloan F, (2001) HMPE Mooring line trial for Scarabeo III, OTC 13272.
8. (PDF) Synthetic Mooring Lines for Depths to 3000 Meters. Available from: https://www.researchgate.net/publication/254518327_Synthetic_Mooring_Lines_for_Depths_to_3000_Meters [accessed Jul 11 2018].
9. Banfield S. and C. N. (1998). “Evaluation of fibre rope properties for offshore mooring.” Ocean Engng: 861-880.
10. Bartholomew, C. A. (1986). Synthetic Fibre Rope in Open Ocean Towing. Proceedings of the Ninth International Tug Convention, London,UK.
11. Burns, R. F. (1994). “Synthetic fibre rope - applications grow.” Sea Technology Vol35: 10-12.
12. Chaplin, C. R., U. Reading, et al. (1992). Appraisal of lightweight moorings for deep water. OTC 92, 24th Annual Offshore Technology Conf., Houston, Tx,USA.

13. CMPT (1998). Floating structures: a guide for design and analysis, Oilfield Publication Limited.
14. Graczyk T, J. T., Brebbia C.A (1995). High performance ropes for catenary mooring. ODRA, Faculty of Maritime Technology, Technical University of Szczecimn, Poland.
15. John F. Flory, H. A. M. K., Mike R.Parsey (1997). Fiber ropes for ocean engineering. Civil Engineering in the Oceans Conference.
16. OCIMF (1997 (Second edition)). Mooring Equipment Guidelines, Witherby.
17. Stonor, R. W. P. (1997). Synthetic fibres for deepwater moorings. Worldwide Deepwater Technologies, London, UK.
18. Triantafyllou, M. S. (1997). Cable Mechanics for Moored Floating Systems. USA, Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of technology Cambridge.
19. BSRA (1984). Reasearch Investigation for the Improvement of Ship Mooring Methods.
20. Huse, E. (1991). New Developments in Prediction of Mooring System Damping. OTC, Houston.
21. J.W. English, D. A. W. (1975). Tank and Wind Tunnel Tests for a Drill-ship with Dynamic Positioning Control. OTC, Dallas, Texas.
22. Newman, J. N. (1974). Second - ordert,slowly varing forces on vessels in irregular waves. Proc.Int.Symp.Dynamics Marine Vehicles and Structures in Waves, London.
23. Wills, J. A. B. (1992). "Offshore wind structure measurements at the West Sole gas platform." Wind Eng. and Ind. Aerodynamics: 2465-2475.
24. Araujo, J. B. (1997). Design, material selection and installation of the mooring system for the South Marlim FPSO in 1,420 meters of water. Conf on Progress in Economics, Design and Installation of Moorings & Anchors to Realise the Potential of Deep Water Fields, Aberdeen, UK, IIR Ltd.
25. C.A .Martins, M. R. M., Leite A.J.P , Aranha J.A.P (1997). Quasi-linear model of a tanker in a turret configuration. ISOPE, Honolulu.

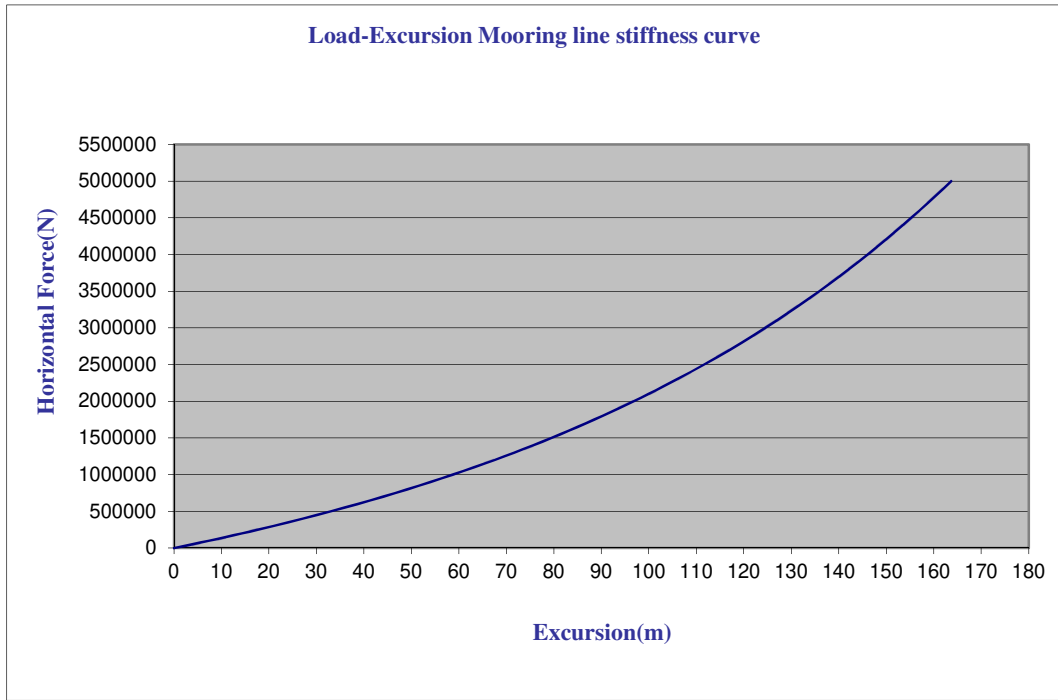
26. Dercksen, A. and L. F. E. Hoppe (1994). On the analysis of mooring systems using synthetic ropes. OTC 94, 26th Annual Offshore Technology Conf., Houston, Tx, USA.
27. MER (1999). Mooring on the ropes? MER.
28. Winkler, M. M. and H. A. McKenna (1995). The polyester rope taut leg mooring concept: a feasible means for reducing deepwater mooring cost and improving station keeping performance. OTC 95, 27th Annual Offshore Technology Conf., Houston, Tx, USA.
29. Yeardley, J. and K. M. Frith (1996). The use of polyester mooring lines for ultra deepwater applications. Intl Conf on Mooring & Anchoring, Aberdeen, UK, IBC Technical Services.
30. ISO 18692, (2007). Fibre ropes for offshore station keeping – Polyester
31. API RP 2SM (2001), Recommended Practice for Design, Manufacture, Installation, and Maintenance of Synthetic Fiber Ropes for Offshore Mooring, 2001
32. Det Norske Veritas (2010). DNV-OS-E301: Offshore standard - position mooring
33. Det Norske Veritas (2010). DNV-RP-C205 Recommended practice Environmental conditions and Environmental loads, October 2010
34. ABS (2011), Guidance Notes on the Application of Fiber Rope for Offshore Mooring, August 2011
35. Davies, P., Francois, M., Grosjean, F., Baron, P., Salomon, K. and Trassoudaine, D., (2002) Synthetic mooring lines for depths to 3000 meters. In Proc. of the 2002 Offshore Technology Conference (OTC), Houston, USA
36. Johanning, L., Smith, G. and Wolfram, J., (2007) Measurements of static and dynamic mooring line damping and their importance for floating WEC devices, Ocean Engineering, 34, 1918-1934

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Χαρακτηριστικά φόρτισης-μετατόπισης του συστήματος πρόσδεσης

<i>Γραμμή πρόσδεσης Submerged Weight ανά μονάδα μήκους (ω) (in N/m)</i>		<i>Γραμμή πρόσδεσης Αξονική Ακαμψία ανά μονάδα μήκους (AE) (in N/m)</i>	
1277.742045		1243227273	
Ho (in N)		Lo(in m)	
2000000		2029.695888	
H		H-Ho	S-So
2000000		0	0.00
2100000	2067.713	100000	7.37
2200000	2105.038	200000	14.32
2300000	2141.706	300000	20.89
2400000	2177.752	400000	27.11
2500000	2213.205	500000	33.02
2600000	2248.093	600000	38.64
2700000	2282.443	700000	44.00
2800000	2316.277	800000	49.11
2900000	2349.62	900000	54.00
3000000	2382.49	1000000	58.69
3100000	2414.909	1100000	63.18
3200000	2446.892	1200000	67.49
3300000	2478.458	1300000	71.63
3400000	2509.622	1400000	75.62
3500000	2540.398	1500000	79.47
3600000	2570.802	1600000	83.17
3700000	2600.845	1700000	86.75
3800000	2630.54	1800000	90.22
3900000	2659.9	1900000	93.56
4000000	2688.934	2000000	96.81
4100000	2717.653	2100000	99.95
4200000	2746.067	2200000	103.00
4300000	2774.186	2300000	105.96
4400000	2802.019	2400000	108.83
4500000	2829.573	2500000	111.62
4600000	2856.857	2600000	114.34
4700000	2883.879	2700000	116.98
4800000	2910.645	2800000	119.56
4900000	2937.164	2900000	122.06
5000000	2963.441	3000000	124.51
5100000	2989.483	3100000	126.90
5200000	3015.295	3200000	129.23
5300000	3040.885	3300000	131.50
5400000	3066.257	3400000	133.72
5500000	3091.417	3500000	135.90
5600000	3116.37	3600000	138.02
5700000	3141.12	3700000	140.10
5800000	3165.673	3800000	142.13
5900000	3190.034	3900000	144.13
6000000	3214.206	4000000	146.08

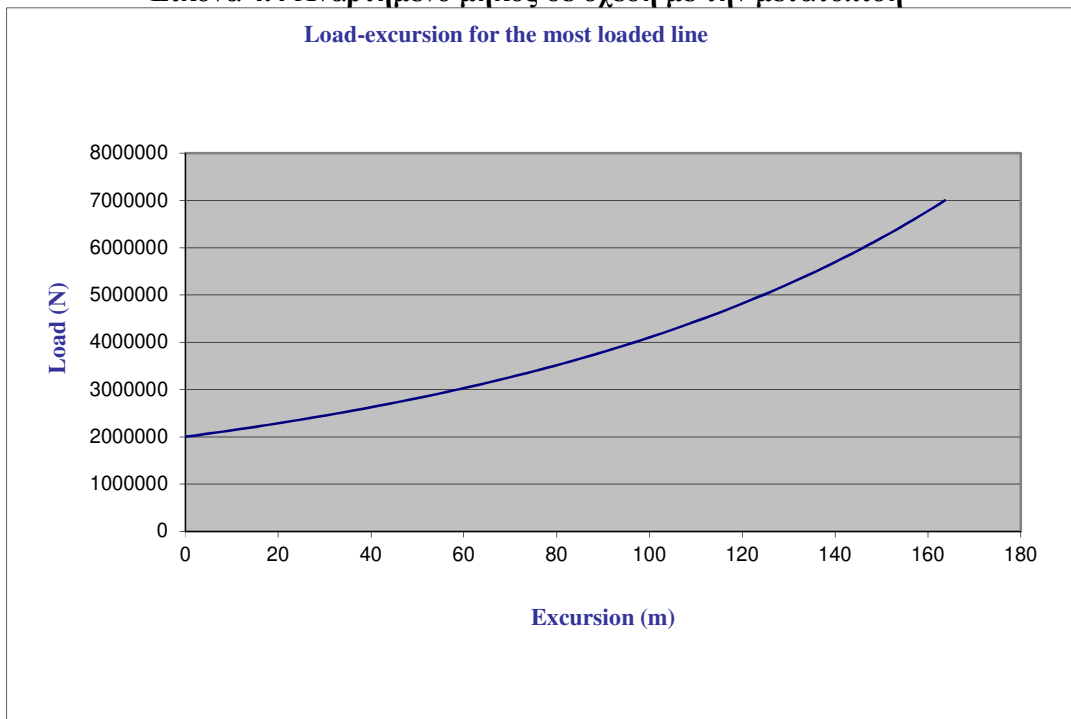
6100000	3238.193	4100000	147.99
6200000	3262.001	4200000	149.86
6300000	3285.632	4300000	151.70
6400000	3309.09	4400000	153.51
6500000	3332.38	4500000	155.28
6600000	3355.505	4600000	157.02
6700000	3378.467	4700000	158.72
6800000	3401.271	4800000	160.40
6900000	3423.92	4900000	162.05
7000000	3446.416	5000000	163.67



Εικόνα 4.3 Φόρτιση-μετατόπιση καμπύλη ακαμψίας της γραμμής πρόσδεσης



Εικόνα 4.4 Αναρτημένο μήκος σε σχέση με την μετατόπιση



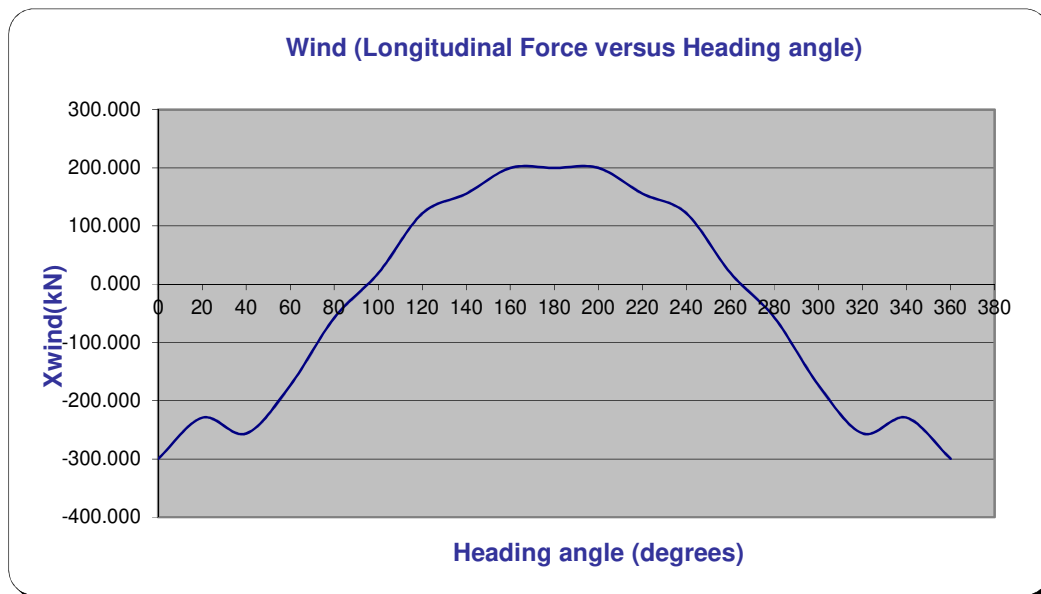
Εικόνα 4.5 Φόρτιση-Μετατόπιση για την πιο φορτισμένη γραμμή

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

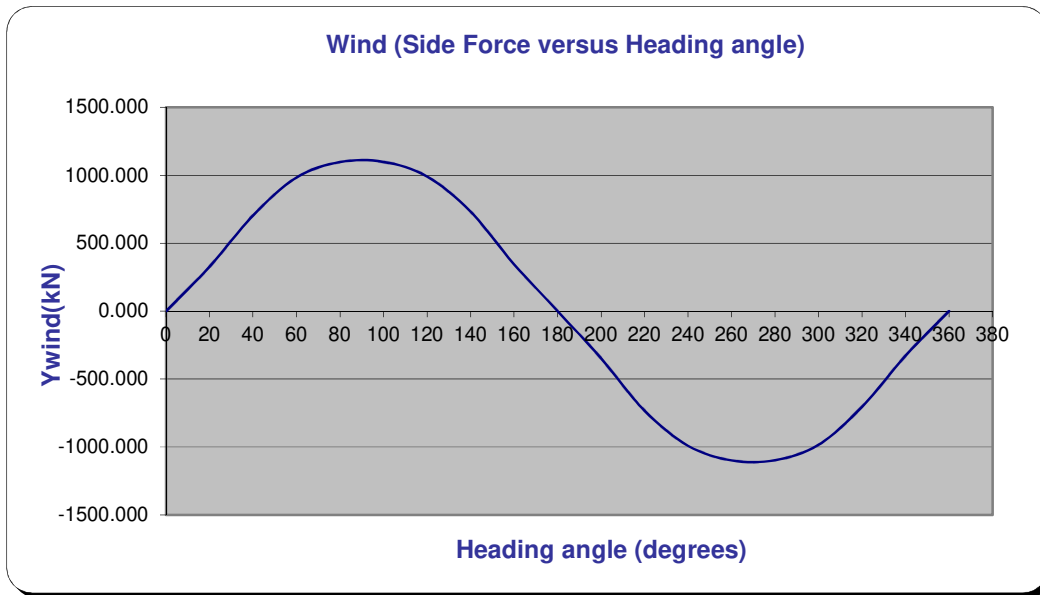
Άνεμος

Angle of Attack (degrees)	Cresultant	β (degrees)	β (rad)	CNw	Xwind(kN)	Ywind(kN)	Nwind(MN*m)
0	-0.0006	0	0	0	-299.609	0.000	0.000
20	-0.0008	-55	-0.9599	0.000115	-229.132	327.234	19.523
40	-0.0015	-70	-1.2217	0.00015	-256.181	703.852	25.465
60	-0.002	-80	-1.3963	0.000075	-173.422	983.525	12.732
80	-0.0022	-87	-1.5184	0.000015	-57.495	1097.062	2.546
100	-0.0022	-91	-1.5882	-0.00008	19.173	1098.400	-13.581
120	-0.002	-97	-1.693	-0.00016	121.711	991.254	-27.163
140	-0.0015	-102	-1.7802	-0.0002	155.731	732.655	-33.953
160	-0.0008	-120	-2.0944	-0.00014	199.740	345.959	-23.767
180	-0.0004	-180	-3.1416	0	199.740	0.000	0.000
200	-0.0008	120	2.0944	-0.00014	199.740	-345.959	23.767
220	-0.0015	102	1.7802	-0.0002	155.731	-732.655	33.953
240	-0.002	97	1.693	-0.00016	121.711	-991.254	27.163
260	-0.0022	91	1.5882	-0.00008	19.173	-1098.400	13.581
280	-0.0022	87	1.5184	0.000015	-57.495	-1097.062	-2.546
300	-0.002	80	1.3963	0.000075	-173.422	-983.525	-12.732
320	-0.0015	70	1.2217	0.00015	-256.181	-703.852	-25.465
340	-0.0008	55	0.9599	0.000115	-229.132	-327.234	-19.523
360	-0.0006	0	0	0	-299.609	0.000	0.000

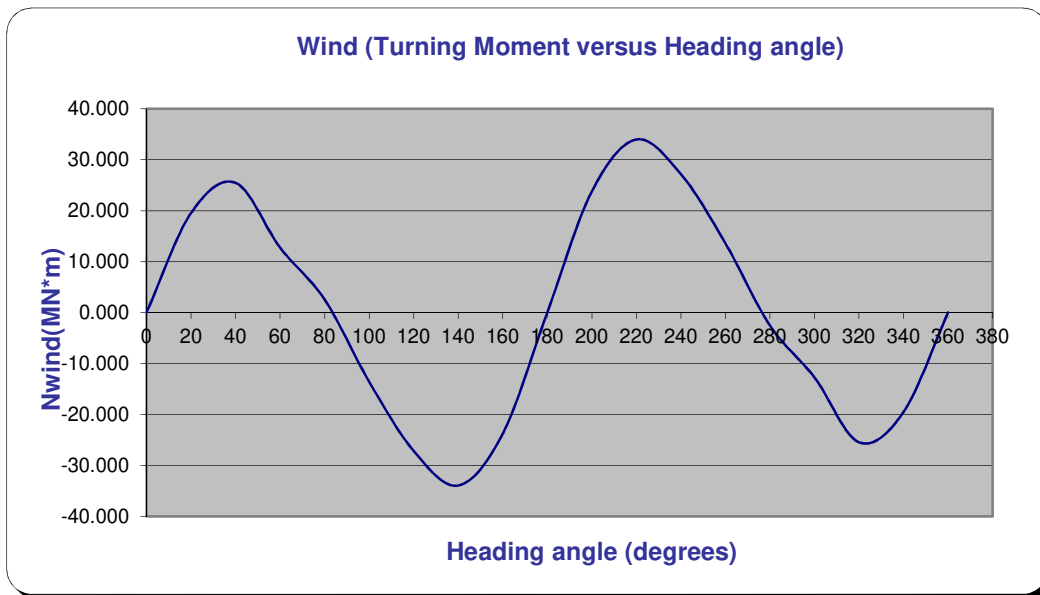
Πίνακας 5.3 Δυνάμεις ανέμου και ροπές στο FPSO



Εικόνα 5.5 Δυνάμεις από τον άνεμο κατά το διάμηκες στο FPSO



Εικόνα 5.6 Δυνάμεις κατά το εγκάρσιο στο FPSO

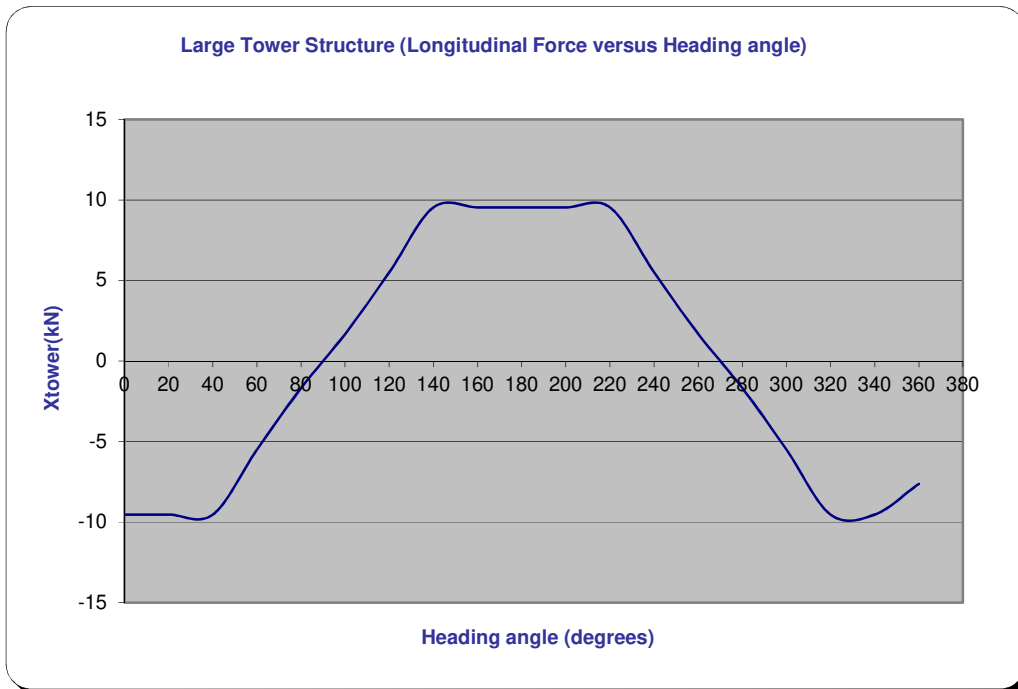


Εικόνα 5.7 Ροπή περί τον κατακόρυφο άξονα λόγω ανέμου στο FPSO

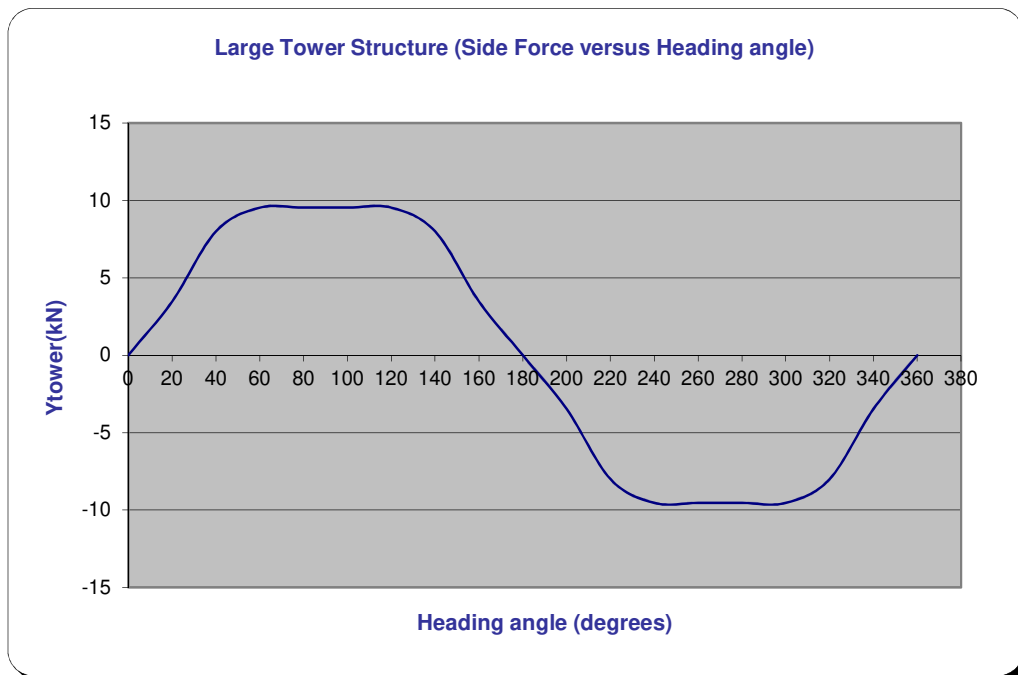
Άνεμος -Υπερκατασκευή

Angle of Attack (degrees)	Angle of Attack (rad)	See associated analysis(degrees)	See associated analysis(rad)	Ap	ρ	Cd	θ	Total force(N)
0	0	0	0	175	1.225	0.50	0.2	9537.853522
20	0.34906585	20	0.34906585	186.2311	1.225	0.50	0.2	10149.97172
40	0.6981317	40	0.698131701	228.4463	1.225	0.50	0.2	12450.78351
60	1.04719755	30	0.523598776	202.0726	1.225	0.50	0.2	11013.3646
80	1.3962634	10	0.174532925	177.6997	1.225	0.50	0.2	9684.990286
100	1.74532925	10	0.174532925	177.6997	1.225	0.50	0.2	9684.990286
120	2.0943951	30	0.523598776	202.0726	1.225	0.50	0.2	11013.3646
140	2.44346095	40	0.698131701	228.4463	1.225	0.50	0.2	12450.78351
160	2.7925268	20	0.34906585	186.2311	1.225	0.50	0.2	10149.97172
180	3.14159265	0	0	175	1.225	0.50	0.2	9537.853522
200	3.4906585	20	0.34906585	186.2311	1.225	0.50	0.2	10149.97172
220	3.83972435	40	0.698131701	228.4463	1.225	0.50	0.2	12450.78351
240	4.1887902	30	0.523598776	202.0726	1.225	0.50	0.2	11013.3646
260	4.53785606	10	0.174532925	177.6997	1.225	0.50	0.2	9684.990286
280	4.88692191	10	0.174532925	177.6997	1.225	0.50	0.2	9684.990286
300	5.23598776	30	0.523598776	202.0726	1.225	0.50	0.2	11013.3646
320	5.58505361	40	0.698131701	228.4463	1.225	0.50	0.2	12450.78351
340	5.93411946	20	0.34906585	186.2311	1.225	0.50	0.2	10149.97172
360	6.28318531	0	0	140	1.225	0.50	0.2	7630.282818
Xt(kN)	Yt(kN)	Lever arm	Nt(MN*m)					
-9.5378535	0	120	0					
-9.5378535	3.4714948	120	0.416579374					
-9.5378535	8.0032094	120	0.960385125					
-5.5066823	9.5378535	120	1.144542423					
-1.6817809	9.5378535	120	1.144542423					
1.6817809	9.5378535	120	1.144542423					
5.5066823	9.5378535	120	1.144542423					
9.5378535	8.0032094	120	0.960385125					
9.5378535	3.4714948	120	0.416579374					
9.5378535	0.00	120	1.40223E-16					
9.5378535	-3.4714948	120	-0.416579374					
9.5378535	-8.0032094	120	-0.960385125					
5.5066823	-9.5378535	120	-1.144542423					
1.6817809	-9.5378535	120	-1.144542423					
-1.6817809	-9.5378535	120	-1.144542423					
-5.5066823	-9.5378535	120	-1.144542423					
-9.5378535	-8.0032094	120	-0.960385125					
-9.5378535	-3.4714948	120	-0.416579374					
-7.6302828	0.000000	120	0.000000					

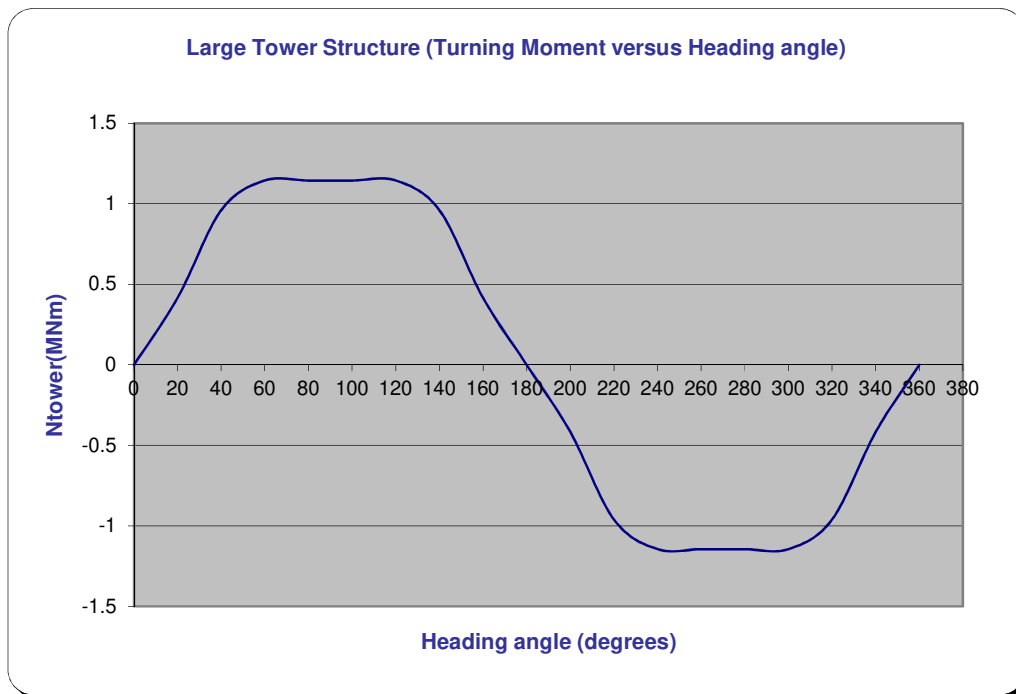
Πίνακας 5.4 Δυνάμεις από τον Άνεμο και Ροπές στην Υπερκατασκευή



Εικόνα 5.8 Δύναμη από τον άνεμο κατά το διάμηκες στην υπερκατασκευή



Εικόνα 5.9 Δύναμη από τον άνεμο κατά το εγκάρσιο στην υπερκατασκευή

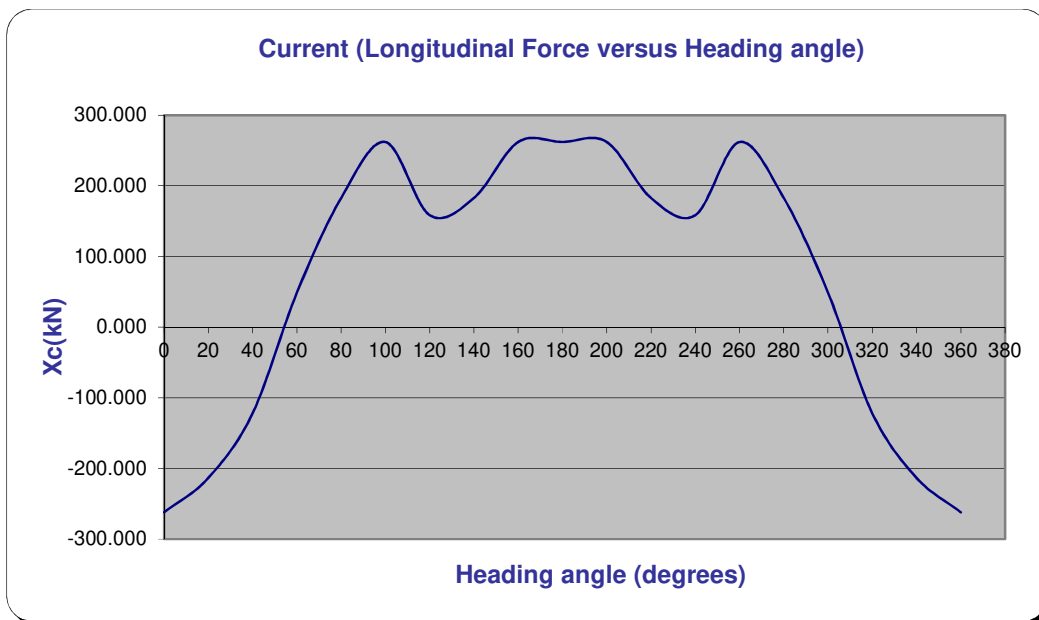


Εικόνα 5.10 Ροπή περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα από την δράση του ανέμου στην υπερκατασκευή

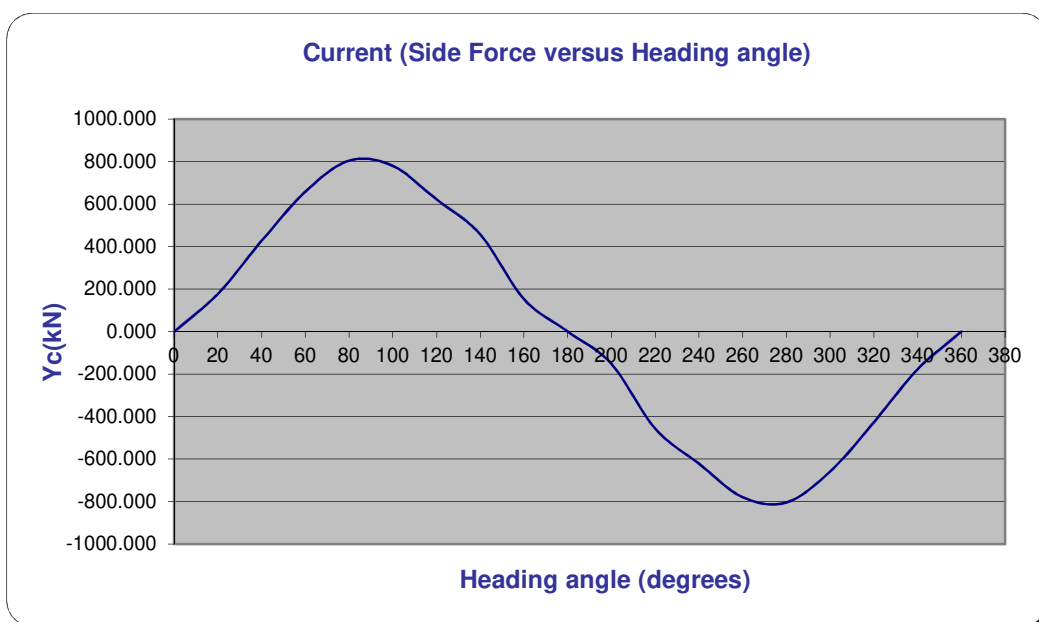
Ρεύμα

Angle of Attack (degrees)	Cxc	Cyc	CNc	Xc(KN)	Yc(KN)	Nc(MN*m)
0	-0.0000244012	0.0000000000	0.0000000000	-262.043	0.000	0.000
20	-0.0000198615	0.0001645663	0.0000000337	-213.291	176.727	4.248
40	-0.0000113494	0.0003972291	0.0000000454	-121.881	426.582	5.734
60	0.0000045398	0.0006128678	0.0000000269	48.752	658.156	3.398
80	0.0000170241	0.0007490606	-0.0000000168	182.821	804.412	-2.124
100	0.0000244012	0.0007263618	-0.0000000749	262.043	780.036	-9.451
120	0.0000147542	0.0005788196	-0.0000001431	158.445	621.591	-18.052
140	0.0000170241	0.0004256026	-0.0000001346	182.821	457.052	-16.990
160	0.0000244012	0.0001418675	-0.0000000749	262.043	152.351	-9.451
180	0.0000244012	0.0000000000	0.0000000000	262.043	0.000	0.000
200	0.0000244012	-0.0001418675	0.0000000749	262.043	-152.351	9.451
220	0.0000170241	-0.0004256026	0.0000001346	182.821	-457.052	16.990
240	0.0000147542	-0.0005788196	0.0000001431	158.445	-621.591	18.052
260	0.0000244012	-0.0007263618	0.0000000749	262.043	-780.036	9.451
280	0.0000170241	-0.0007490606	0.0000000168	182.821	-804.412	2.124
300	0.0000045398	-0.0006128678	-0.0000000269	48.752	-658.156	-3.398
320	-0.0000113494	-0.0003972291	-0.0000000454	-121.881	-426.582	-5.734
340	-0.0000198615	-0.0001645663	-0.0000000337	-213.291	-176.727	-4.248
360	-0.0000244012	0.0000000000	0.0000000000	-262.043	0.000	0.000

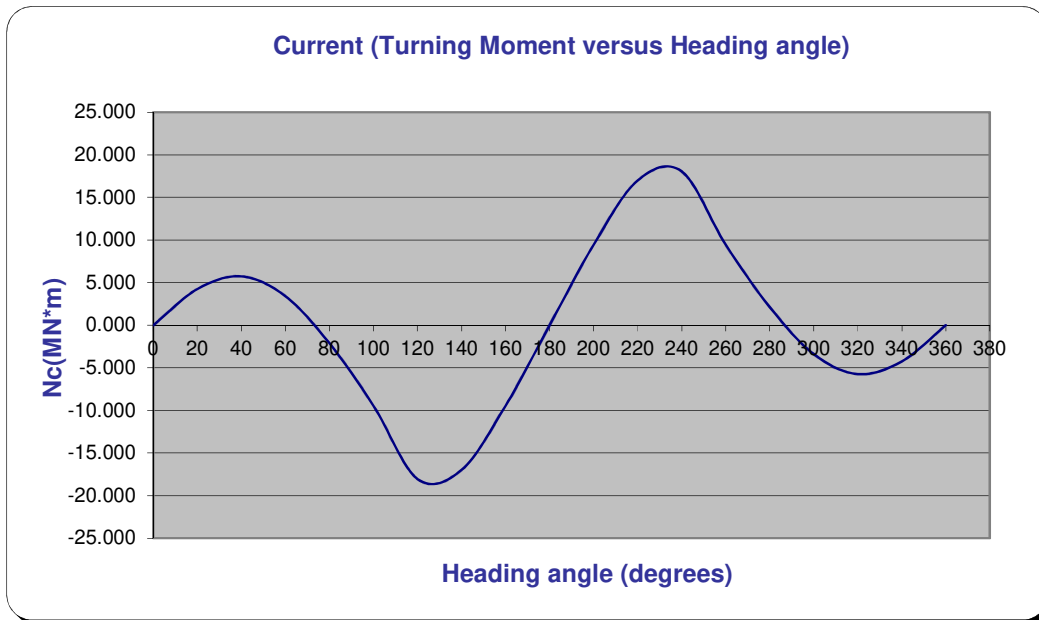
Πίνακας 5.5 Δυνάμεις και ροπές από το ρεύμα στο FPSO



Εικόνα 5.11 Δύναμη από το ρεύμα κατά το διάμηκες στο FPSO



Εικόνα 5.12 Δύναμη από το ρεύμα κατά το εγκάρσιο στο FPSO

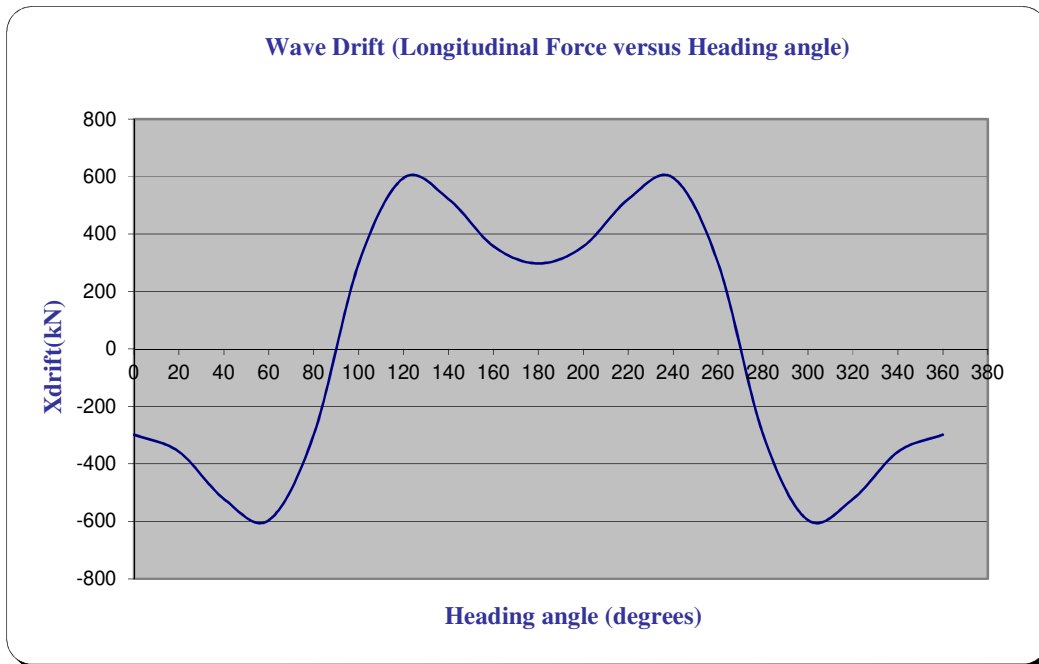


Εικόνα 5.13 Ροπή περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα από την δράση του ρεύματος στο FPSO

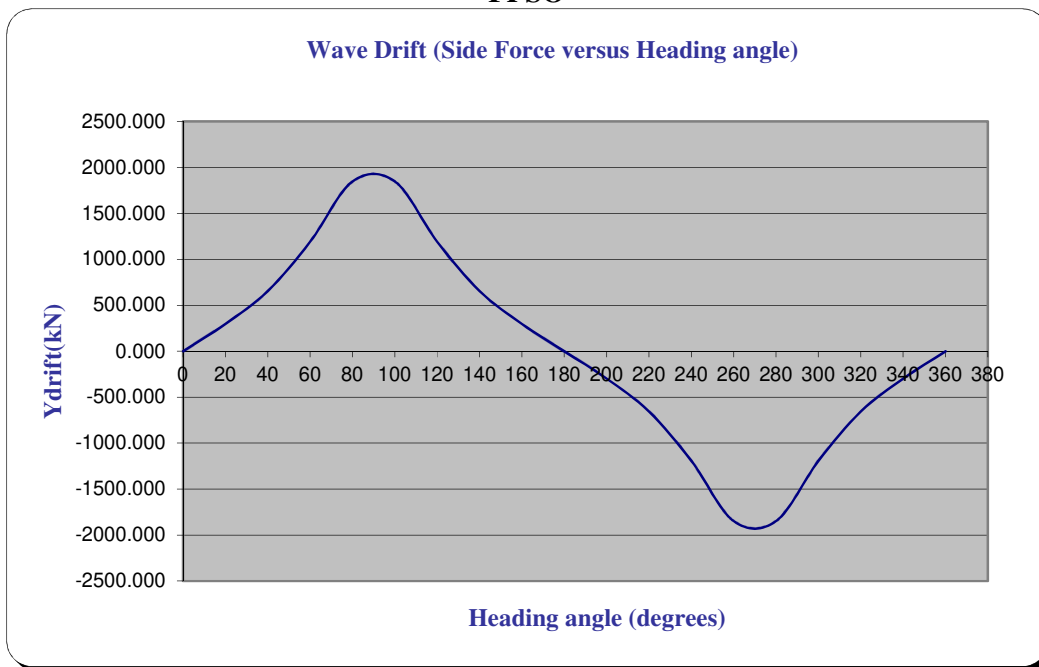
Κύμα

Angle of Attack (degrees)	CLd	CTd	CMd	Xdrift(kN)	Ydrift(kN)	Mdrift(MN*m)
0	-0.0025	0	0	-298.007	0.000	0.000
20	-0.003	0.0025	0.00014	-357.609	298.007	5.495
40	-0.00438	0.0055	0.000175	-521.513	655.616	6.869
60	-0.005	0.01	0.000125	-596.015	1192.030	4.907
80	-0.0025	0.0155	0	-298.007	1847.646	0.000
100	0.0025	0.0155	-0.00016	298.007	1847.646	-6.281
120	0.005	0.01	-0.00019	596.015	1192.030	-7.458
140	0.00438	0.0055	-0.00014	522.109	655.616	-5.495
160	0.003	0.0025	-0.00005	357.609	298.007	-1.963
180	0.0025	0	0	298.007	0.000	0.000
200	0.003	-0.0025	0.00005	357.609	-298.007	1.963
220	0.00438	-0.0055	0.00014	522.109	-655.616	5.495
240	0.005	-0.01	0.00019	596.015	-1192.030	7.458
260	0.0025	-0.0155	0.00016	298.007	-1847.646	6.281
280	-0.0025	-0.0155	0	-298.007	-1847.646	0.000
300	-0.005	-0.01	-0.00013	-596.015	-1192.030	-4.907
320	-0.00438	-0.0055	-0.00018	-521.513	-655.616	-6.869
340	-0.003	-0.0025	-0.00014	-357.609	-298.007	-5.495
360	-0.0025	0	0	-298.007	0.000	0.000

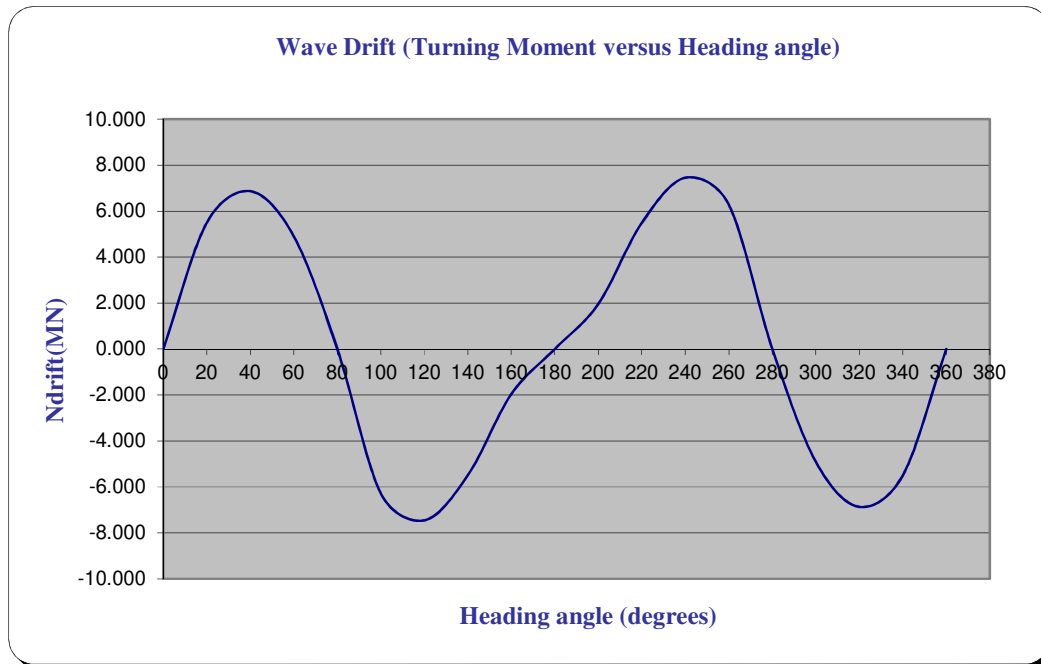
Πίνακας 5.6 Μέσες δευτεροτάξιες δυνάμεις και ροπές περί τον κατακόρυφο άξονα που ασκούνται στο FPSO



Εικόνα 5.14 Μέση δευτεροτάξια δύναμη κατά το διάμηκες που ασκείται στο FPSO



Εικόνα 5.15 Μέση δευτεροτάξια δύναμη που ασκείται κατά το εγκάρσιο που ασκείται στο FPSO

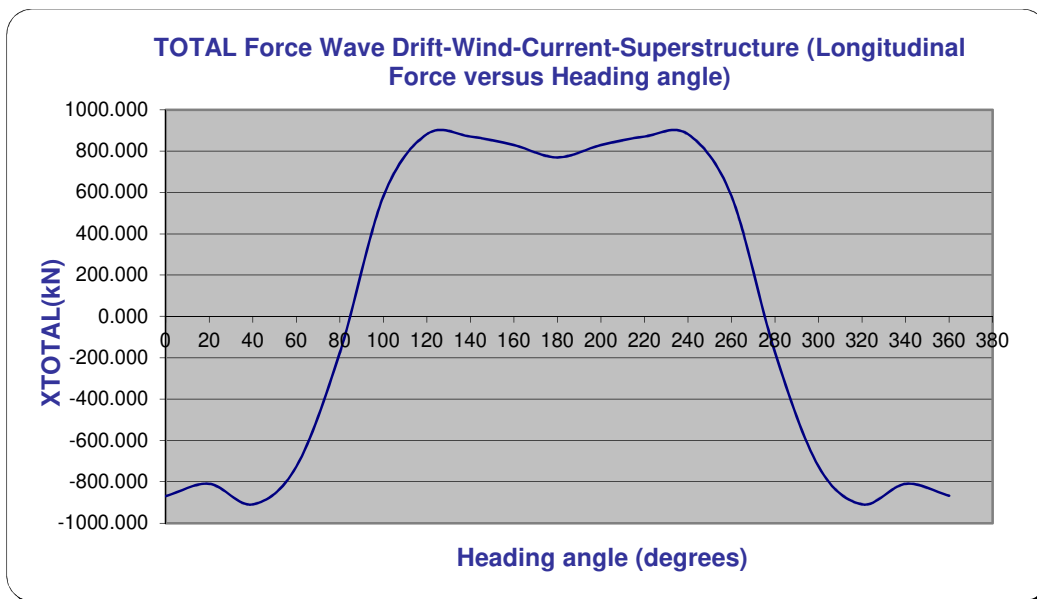


Εικόνα 5.16 Μέση δευτεροτάξια ροπή περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα που ασκείται στο FPSO

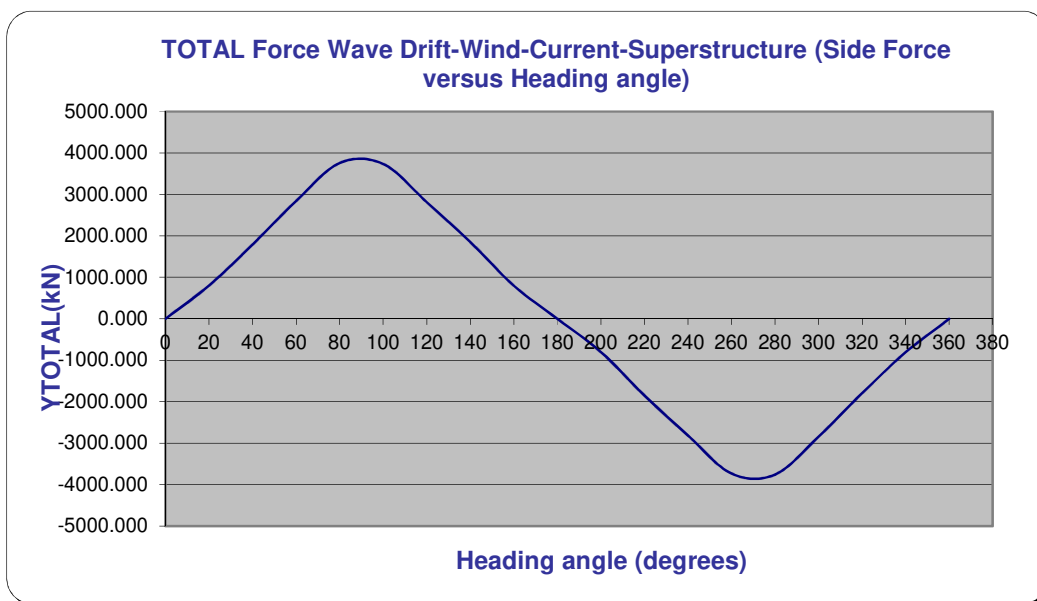
Συνολικές φορτίσεις

Angle of Attack (degrees)	XTOTAL(kN)	YTOTAL(kN)	NTOTAL(MN*m)
0	-867.816	0.000	0.000
20	-808.188	804.937	29.622
40	-907.730	1792.894	38.890
60	-725.393	2841.866	22.016
80	-174.119	3757.276	1.401
100	580.662	3734.238	-28.334
120	880.879	2813.030	-51.694
140	868.816	1852.168	-55.618
160	827.548	799.286	-34.825
180	767.946	0.000	0.000
200	827.548	-799.286	34.825
220	868.816	-1852.168	55.618
240	880.879	-2813.030	51.694
260	580.662	-3734.238	28.334
280	-174.119	-3757.276	-1.401
300	-725.393	-2841.866	-22.016
320	-907.730	-1792.894	-38.890
340	-808.188	-804.937	-29.622
360	-867.816	0.000	0.000

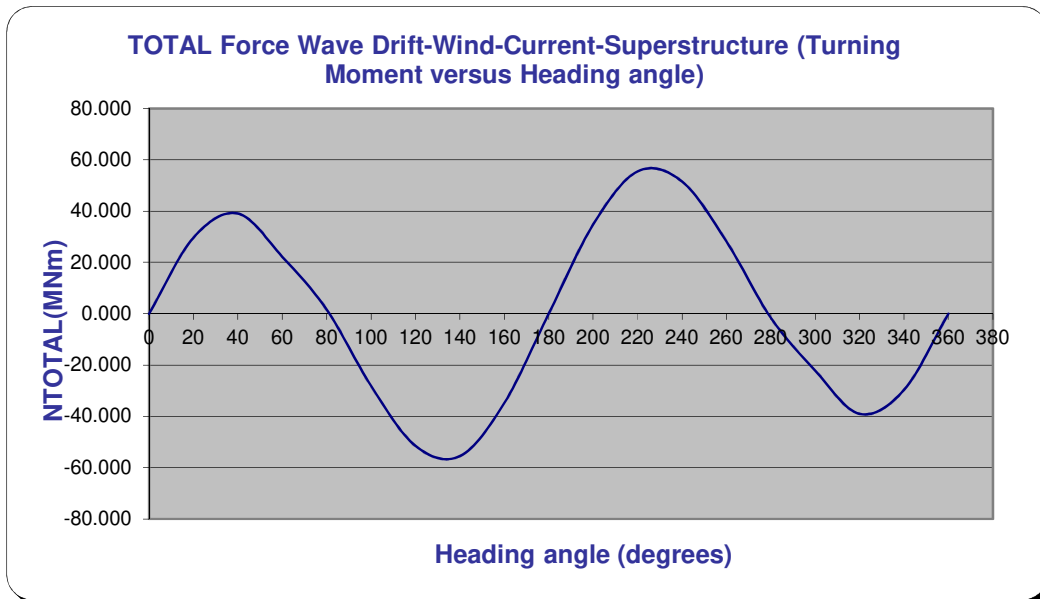
Πίνακας 5.7 Συνολικές δυνάμεις και ροπές για συγγραμμική δράση των συνθηκών του περιβάλλοντος



Εικόνα 5.17 Συνολική διαμήκης δύναμη στο FPSO






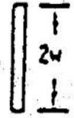
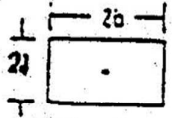
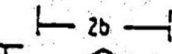



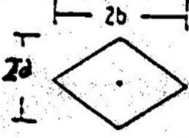
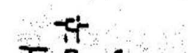
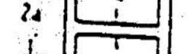
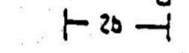
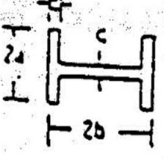
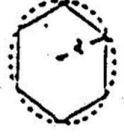
Εικόνα 5.18 Συνολική εγκάρσια δύναμη στο FPSO



Εικόνα 5.19 Συνολική ροπή περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα στο FPSO

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΜΑΖΑΣ

SHAPE	ADDED MASS PER UNIT LENGTH	MOTION
	CIRCLE	$\pi r c^2$
	ELLIPSE	$\pi a b^2$
	ELLIPSE	$\pi a^2 b$
	PLATE	πw^2
	RECTANGLE	$a/b = 1.00$ $\pi a^2 b^2$
		$a/b = 10$ 1.14 $\pi a^2 b^2$
		$a/b = 5$ 1.21 $\pi a^2 b^2$
		$a/b = 2$ 1.36 $\pi a^2 b^2$
		$a/b = 0.5$ 1.51 $\pi a^2 b^2$
	DIAMOND	$a/b = 0.5$ 1.70 $\pi a^2 b^2$
		$a/b = 0.2$ 1.98 $\pi a^2 b^2$
		$a/b = 0.1$ 2.23 $\pi a^2 b^2$
		$a/b = 0.1$ 2.23 $\pi a^2 b^2$ (Wendel 1950)
	I-BEAM	$2.11 \pi a^2 b^2$ (Patton 1965)
	REGULAR POLYGON	$n = 3$ 0.654 πa^2
		$n = 4$ 0.787 πa^2
		$n = 5$ 0.823 πa^2
		$n = 6$ 0.857 πa^2
	OR	$n = \infty$ 1.000 πa^2 (Wendel 1950)

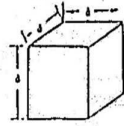


SPHERE $\frac{2}{3} \rho \pi R^3$



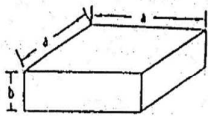
ELLIPTOID OF REVOLUTION $k \frac{1}{3} \rho \pi b^3$

d/b	k
0.01	0.6340
0.10	0.6148
0.20	0.6016
0.40	0.5712
0.60	0.5447
0.80	0.5211
1.00	0.5000
2.00	0.4200
3.00	0.3660
5.00	0.2956
7.00	0.2511
10.00	0.2071



CUBE $0.7 \rho a^3$

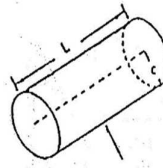
(Sarpkaya 1960, Yu 1945)



RECTANGULAR BLOCK $k \rho a^2 b$

b/a	k
0.5	1.32
0.6	1.15
0.8	0.86
1.0	0.70
1.2	0.57
1.6	0.45
2.0	0.35
4.0	0.30
8.0	0.26
1.6	0.22

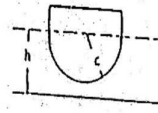
(Sarpkaya 1960)



$L/(2c)$

$L/(2c)$	k
1.2	0.62
2.5	0.78
5.0	0.90
9.0	0.96
∞	1.00

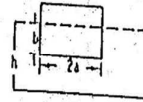
$\rho \pi c^2 L$ (Wendel 1950)



FLOATING CYLINDER $k \frac{\pi}{2} c^2$

b/c	k
1.2	1.03
1.5	1.45
2.0	1.22
3.0	1.09
5.0	1.03
∞	1.00

(Dai 1977)



FLOATING RECTANGLE k_1

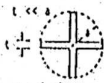
$2k_2 \rho a b$

b/h	0.2	0.5	1.0	2.0
0.0	4.75	2.14	1.10	0.67
0.2	4.92	2.25	1.29	0.70
0.4	5.43	2.63	1.66	1.16
0.6	6.63	3.56	2.53	2.02
0.8	10.15	6.46	5.23	4.62

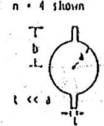
h/b k_2

1.1	5.52
1.2	3.49
1.5	2.11
3.0	1.35
8.0	1.21
∞	1.19

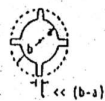
(Dai 1977, Flagg and Newman 1971)



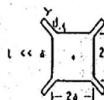
EQUALLY SPACED MULTIPLE FINES $2\rho \pi a^2 / 2^{4/n}$ for $n \geq 3$ (Bryson 1954)



CIRCLE WITH TWO SYMMETRIC FINES $\rho \pi a^2 \left(1 - \frac{a^2}{b_1^2} - \frac{a^2}{b_2^2} \right)$ (Newman 1977)



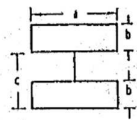
CIRCLE WITH EQUALLY SPACED MULTIPLE FINES $2\rho \pi b^2 \left(\frac{1 + (a/b)^n}{2} \right)^{4/n} - \frac{1}{2} \left(\frac{a}{b} \right)^2$ for $n \geq 3$ (Bryson 1954)



FINNED SQUARE $\frac{d}{a}$

0.05	1.61
0.10	1.72
0.25	2.19

(Wendel 1950)



TANDEM RECTANGLES $2Aab$

c/a	0.1	0.2	0.4	1.0
0.5	3.2	1.6	0.75	---
1.0	3.0	2.0	1.1	0.35
1.5	4.4	2.3	1.3	0.45
2.0	4.9	2.7	1.5	0.55
3.0	5.4	2.9	1.6	0.60
4.0	5.6	3.0	1.6	0.70

(Sarpkaya 1960)



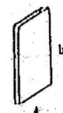
CIRCULAR DISK $\frac{8}{3} \rho c^3$



ELLIPTICAL DISK $\frac{b/a}{\pi} \rho \pi a^2$

1.000	1.000
1	0.900
2	0.826
1.5	0.758
1.0	0.637

(Hunk 1934)



RECTANGULAR PLATE $\frac{b/a}{\pi} \rho \pi a^2$

1.0	0.579
1.25	0.642
1.59	0.704
2.0	0.757
2.5	0.801
4.0	0.872
5.0	0.897
8.0	0.934
10.0	0.947
∞	1.000

(Heyerhoff 1970)



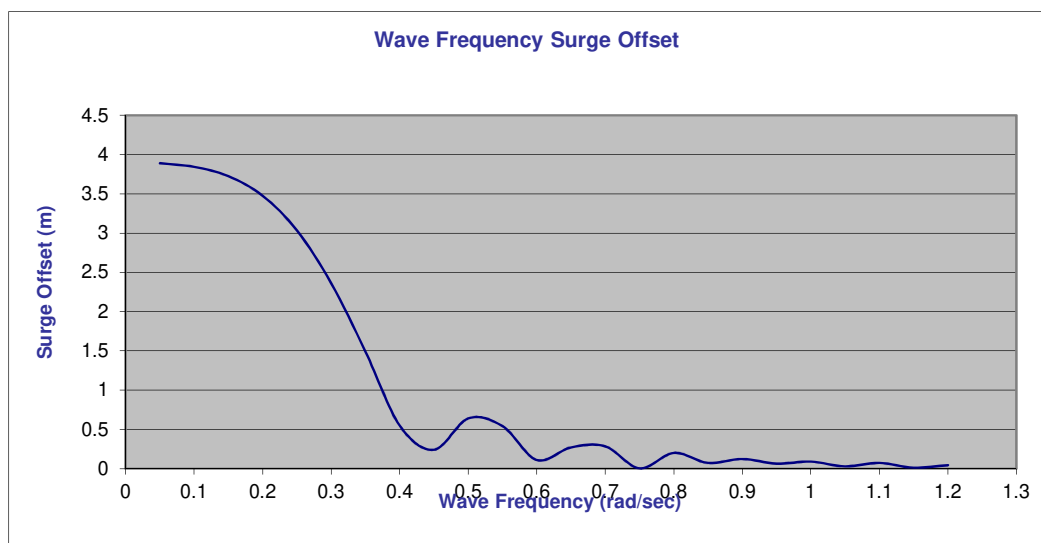
TRIANGULAR PLATE $\frac{\rho a^3 (\tan \theta)^{3/2}}{3a}$ (Nielsen 1960)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4

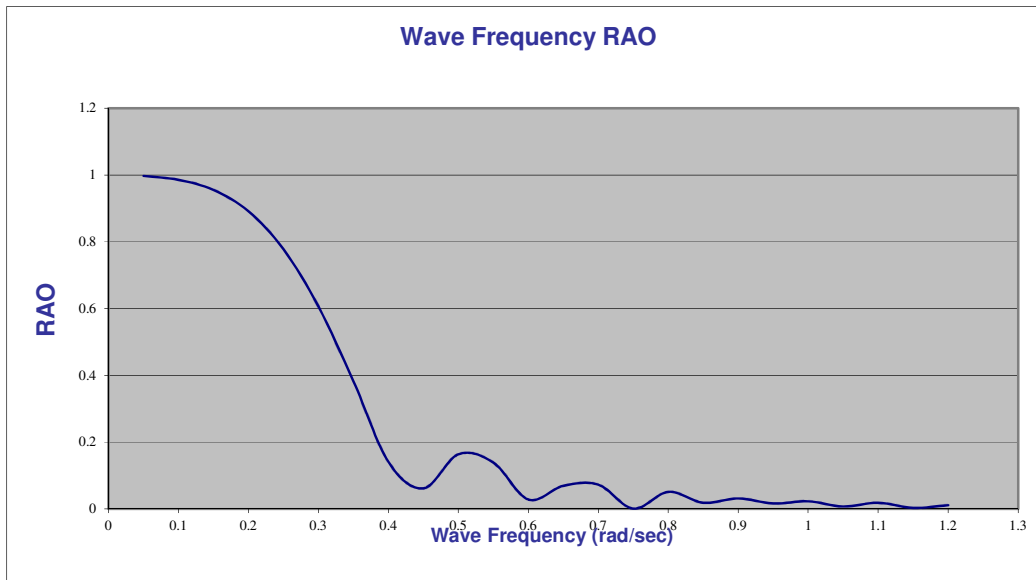
Πρωτοτάξιες κινήσεις στη διαμήκη κατεύθυνση (surge) και αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης

<u>Surge Calculations</u>					
ω	k	Fosurge(kN)	X''	X	RAO
0.05	0.000254842	3553.947747	0.0097233	3.8893328	0.997264808
0.1	0.001019368	14050.00785	0.0384398	3.8439757	0.985634805
0.15	0.002293578	30636.82181	0.08382	3.7253344	0.955213951
0.2	0.004077472	50816.2676	0.1390295	3.4757365	0.891214485
0.25	0.00637105	69303.66023	0.1896096	3.0337531	0.777885398
0.3	0.009174312	77730.36579	0.2126644	2.3629377	0.605881464
0.35	0.012487258	66799.95945	0.1827596	1.4919153	0.382542397
0.4	0.016309888	32121.78042	0.0878828	0.5492672	0.140837754
0.45	0.020642202	-17833.11645	-0.0487901	0.2409385	0.061779115
0.5	0.0254842	-58406.19916	-0.1597949	0.6391797	0.163892244
0.55	0.030835882	-59879.50777	-0.1638258	0.5415729	0.138864843
0.6	0.036697248	-14547.5828	-0.0398011	0.1105586	0.028348351
0.65	0.043068298	41773.06854	0.114288	0.270504	0.069360007
0.7	0.049949032	50919.40009	0.1393116	0.2843094	0.072899855
0.75	0.05733945	-832.1633823	-0.0022767	0.0040475	0.001037828
0.8	0.065239551	-46875.90749	-0.1282489	0.200389	0.051381784
0.85	0.073649337	-19362.47019	-0.0529743	0.0733208	0.018800196
0.9	0.082568807	36487.52924	0.0998271	0.1232434	0.03160086
0.95	0.091997961	21191.37946	0.057978	0.0642416	0.016472195
1	0.101936799	-32794.30259	-0.0897227	0.0897227	0.023005828
1.05	0.112385321	-11783.19432	-0.0322379	0.0292408	0.007497628
1.1	0.123343527	32301.63826	0.0883748	0.0730371	0.01872745
1.15	0.134811417	-6194.019679	-0.0169464	0.0128139	0.003285613
1.2	0.146788991	-23276.30577	-0.0636822	0.0442238	0.011339425

Πίνακας 5.8 Υπολογισμοί διαμήκους μετατόπισης (surge)



Εικόνα 5.22 Διαμήκης μετατόπιση (Surge)



Εικόνα 5.23 Συνάρτηση Μεταφοράς στη διαμήκη κίνηση (Surge RAO)

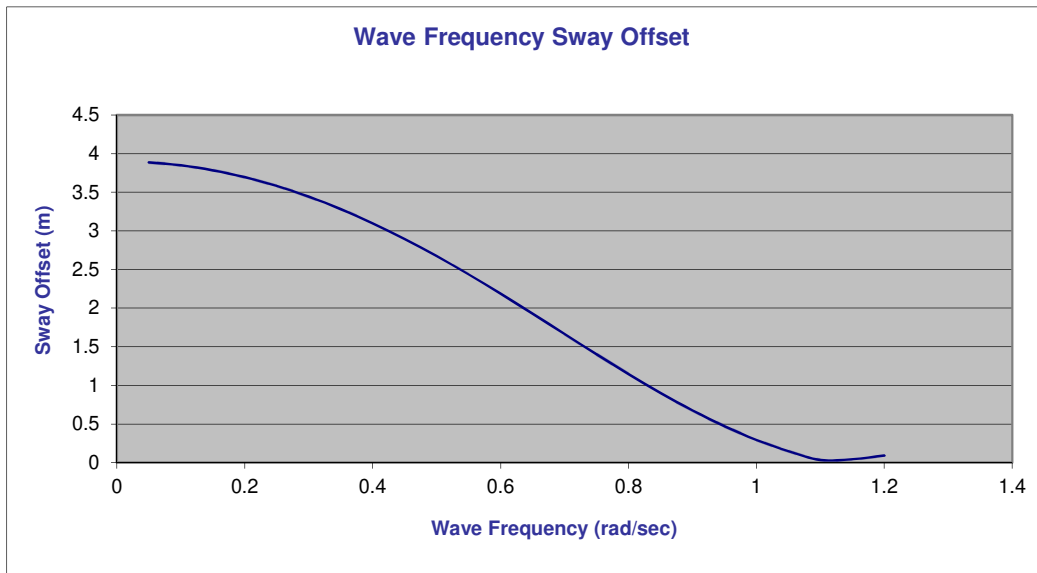
	x	RAO	S(w)	RS(w)	Xsig	Summasio n	Xmax	
	0.05	3.889	0.997	0.000	0.000	4.717605	5.56395	8.774746
	0.1	3.844	0.986	0.000	0.000			
	0.15	3.725	0.955	0.000	0.000			
	0.2	3.476	0.891	10.896	8.654			
	0.25	3.034	0.778	87.057	52.679			
	0.3	2.363	0.606	110.188	40.449			
	0.35	1.492	0.383	83.365	12.200			
	0.4	0.549	0.141	54.286	1.077			
	0.45	-0.241	-0.062	34.205	0.131			
	0.5	-0.639	-0.164	21.718	0.583			
	0.55	-0.542	-0.139	14.091	0.272			
	0.6	-0.111	-0.028	9.377	0.008			
	0.65	0.271	0.069	6.400	0.031			
	0.7	0.284	0.073	4.474	0.024			
	0.75	-0.004	-0.001	3.196	0.000			
	0.8	-0.200	-0.051	2.329	0.006			
	0.85	-0.073	-0.019	1.728	0.001			
	0.9	0.123	0.032	1.303	0.001			
	0.95	0.064	0.016	0.997	0.000			
	1	-0.090	-0.023	0.773	0.000			
	1.05	-0.029	-0.007	0.606	0.000			
	1.1	0.073	0.019	0.481	0.000			
	1.15	-0.013	-0.003	0.386	0.000			
	1.2	-0.044	-0.011	0.312	0.000			

Πίνακας 5.9 Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης για την διαμήκη κίνηση (Surge)

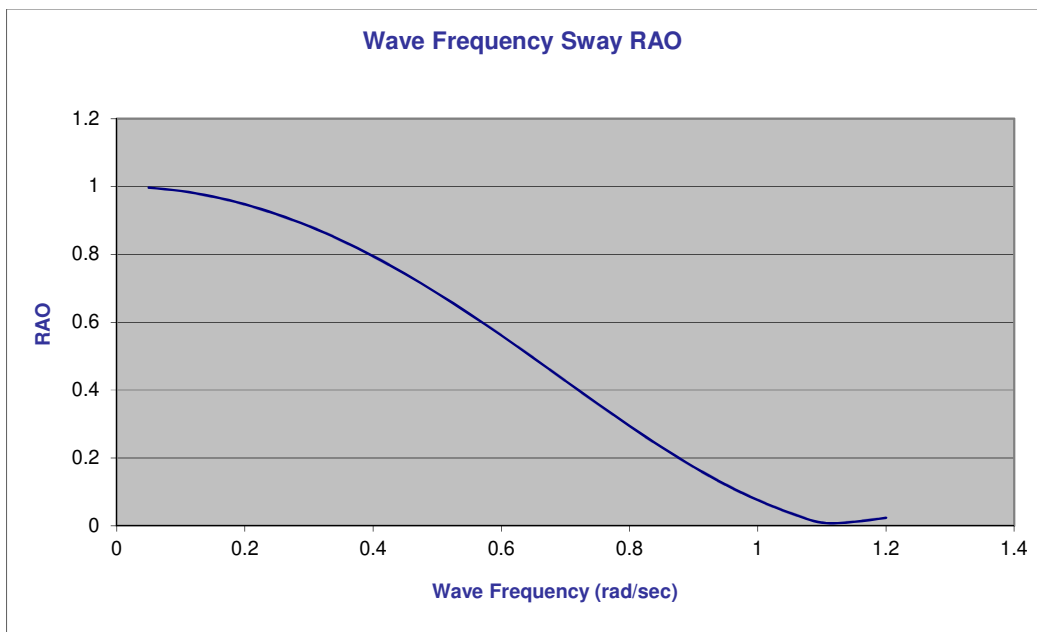
Πρωτοτάξιες κινήσεις στη εγκάρσια κατεύθυνση (sway) και αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης

Sway Calculations					
ω	k	Fosway(MN)	y''	y	RAO
0.05	0.00025484	5.4503448	0.009718	3.88714	0.996703
0.1	0.00101937	21.585308	0.038486	3.848615	0.986824
0.15	0.00229358	47.759066	0.085153	3.784596	0.970409
0.2	0.00407747	82.903627	0.147815	3.695385	0.947535
0.25	0.00637105	125.54292	0.22384	3.581446	0.918319
0.3	0.00917431	173.81557	0.309909	3.443439	0.882933
0.35	0.01248726	225.50959	0.402079	3.282276	0.841609
0.4	0.01630989	278.11295	0.49587	3.099185	0.794663
0.45	0.0206422	328.88454	0.586394	2.895774	0.742506
0.5	0.0254842	374.95015	0.668528	2.674113	0.68567
0.55	0.03083588	413.4268	0.737131	2.436798	0.62482
0.6	0.03669725	441.57705	0.787323	2.187007	0.560771
0.65	0.0430683	456.99095	0.814805	1.928533	0.494496
0.7	0.04994903	457.78893	0.816228	1.665771	0.427121
0.75	0.05733945	442.83298	0.789562	1.403666	0.359914
0.8	0.06523955	411.92696	0.734457	1.147589	0.294254
0.85	0.07364934	365.98147	0.652537	0.903166	0.231581
0.9	0.08256881	307.11389	0.547578	0.676022	0.173339
0.95	0.09199796	238.65279	0.425513	0.471482	0.120893
1	0.1019368	165.01844	0.294224	0.294224	0.075442
1.05	0.11238532	91.458653	0.163069	0.147908	0.037925
1.1	0.12334353	23.633588	0.042138	0.034825	0.008929
1.15	0.13481142	-32.936765	-0.05873	0.044405	0.011386
1.2	0.14678899	-73.522593	-0.13109	0.091034	0.023342

Πίνακας 5.10 Υπολογισμοί στην εγκάρσια κίνηση (Sway)



Εικόνα 5.26 Μετατόπιση κατά την εγκάρσια κατεύθυνση (Sway)



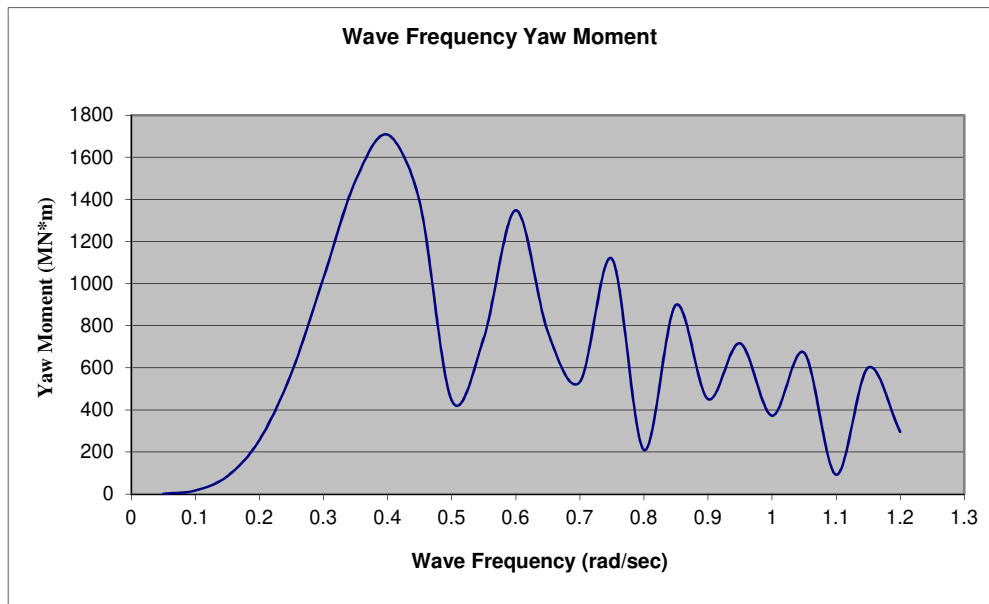
Εικόνα 5.27 Συνάρτηση Μεταφοράς (Sway RAO)

ω	x	RAO	S(w)	RS(w)	Xsig	Summasion	Xmax
0.05	3.887	0.997	0.000	0.000	7.368904	13.575185	13.70616
0.1	3.849	0.987	0.000	0.000			
0.15	3.785	0.970	0.000	0.000			
0.2	3.695	0.948	6.892	6.188			
0.25	3.581	0.918	72.165	60.857			
0.3	3.443	0.883	100.656	78.469			
0.35	3.282	0.842	79.391	56.233			
0.4	3.099	0.795	52.754	33.313			
0.45	2.896	0.743	33.599	18.524			
0.5	2.674	0.686	21.465	10.092			
0.55	2.437	0.625	13.978	5.457			
0.6	2.187	0.561	9.324	2.932			
0.65	1.929	0.494	6.374	1.559			
0.7	1.666	0.427	4.460	0.814			
0.75	1.404	0.360	3.189	0.413			
0.8	1.148	0.294	2.325	0.201			
0.85	0.903	0.232	1.726	0.093			
0.9	0.676	0.173	1.301	0.039			
0.95	0.471	0.121	0.996	0.015			
1	0.294	0.075	0.772	0.004			
1.05	0.148	0.038	0.606	0.001			
1.1	0.035	0.009	0.481	0.000			
1.15	-0.044	-0.011	0.385	0.000			
1.2	-0.091	-0.023	0.312	0.000			

Πίνακας 5.11 Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης για την εγκάρσια κίνηση (Sway)

Yaw Calculations		
ω	k	Moyaw(MN*m)
0.05	0.000254842	1.090520268
0.1	0.001019368	17.27553426
0.15	0.002293578	85.41947212
0.2	0.004077472	257.3521991
0.25	0.00637105	575.5239771
0.3	0.009174312	1027.335137
0.35	0.012487258	1489.43143
0.4	0.016309888	1707.856847
0.45	0.020642202	1389.715453
0.5	0.0254842	445.8216708
0.55	0.030835882	739.0734004
0.6	0.036697248	1348.249823
0.65	0.043068298	771.2780093
0.7	0.049949032	532.3551865
0.75	0.05733945	1118.47375
0.8	0.065239551	209.9694785
0.85	0.073649337	898.5275086
0.9	0.082568807	451.2836955
0.95	0.091997961	716.570855
1	0.101936799	372.4738149
1.05	0.112385321	672.01258
1.1	0.123343527	92.20241867
1.15	0.134811417	600.6581904
1.2	0.146788991	295.5644743

Πίνακας 5.12 Σχηματισμός ροπής Yaw



Εικόνα 5.29 Συχνότητα κύματος ροπή Yaw

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5

Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις λόγω του κύματος και υπολογισμός της απόκρισης

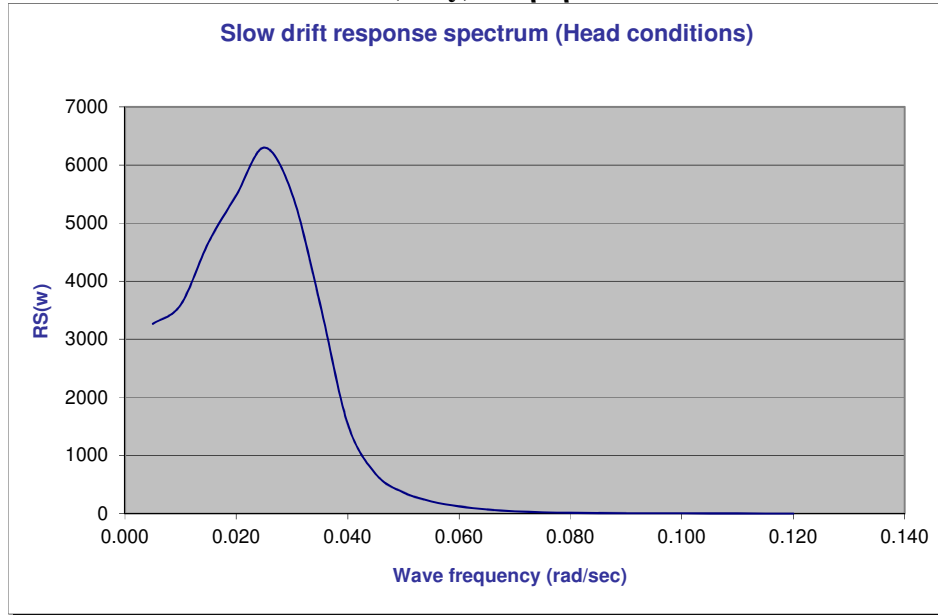
μ	SF(μ)	RS(ω)	Q	Xsig	Summasion
0.005	12686584.659	3265.512	1.01075	25.97562	168.6831759
0.010	13138204.405	3594.228	1.042018		
0.015	15620472.743	4667.221	1.088987	FR	Xmax
0.020	16829348.359	5480.349	1.136871	1.426278	37.04844635
0.025	18791451.545	6298.858	1.15343		
0.030	18091162.737	5507.710	1.099241	Ω_n	Tn
0.035	15297316.334	3624.918	0.9698	0.034	184.7058824
0.040	9374422.423	1542.117	0.808029		
0.045	6300010.228	685.119	0.656981		
0.050	5096883.582	365.410	0.533431		
0.055	4376051.253	210.783	0.437237		
0.060	3741574.075	124.302	0.363121		
0.065	3011744.408	70.897	0.305665		
0.070	2377580.809	40.673	0.26057		
0.075	1884616.726	23.968	0.22467		
0.080	1509607.024	14.565	0.195685		
0.085	1221119.715	9.099	0.171973		
0.090	1221119.715	7.140	0.152339		
0.095	1221119.715	5.682	0.135902		
0.100	1221119.715	4.580	0.122005		
0.105	1221119.715	3.733	0.110149		
0.110	1221119.715	3.074	0.099953		
0.115	1221119.715	2.554	0.09112		
0.120	1221119.715	2.141	0.083416		

Πίνακας 5.13 Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις και κινήσεις κατά την διαμήκη (surge) κίνηση

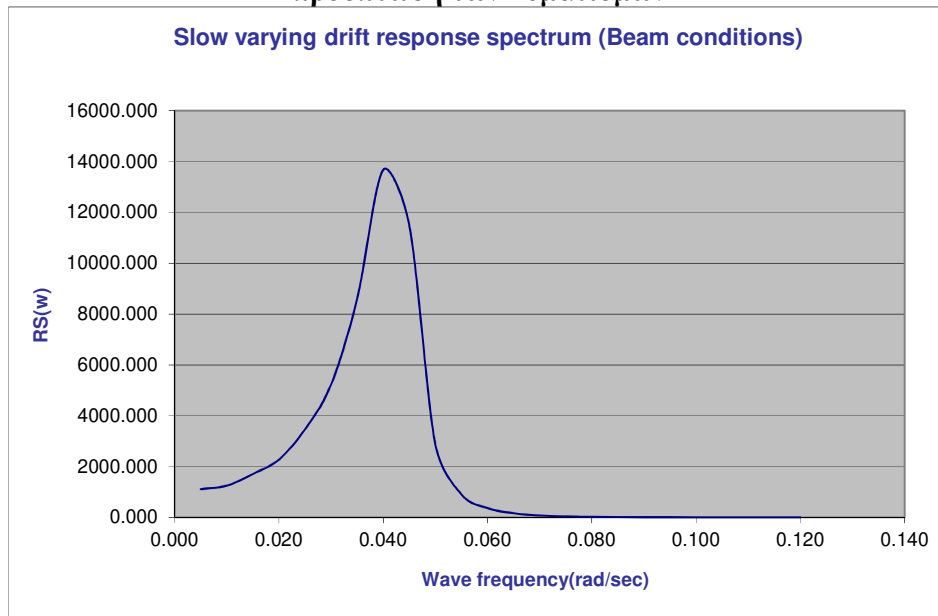
μ	SF(μ)	RS(ω)	Q	Xsig	Summasion
0.005	12686584.659	1114.028	1.013056	32.35757	261.753134
0.010	13138204.405	1249.548	1.054305		
0.015	15620472.743	1709.183	1.13085	FR	Xmax
0.020	16829348.359	2279.248	1.258114	1.469202	47.5398003
0.025	18791451.545	3468.343	1.468719		
0.030	18091162.737	5228.129	1.837798	Ω_n	Tn
0.035	15297316.334	8604.785	2.564013	0.033279	188.706394
0.040	9374422.423	13670.535	4.128367		
0.045	6300010.228	11490.154	4.616896		
0.050	5096883.582	2866.620	2.563838		
0.055	4376051.253	904.892	1.554587		
0.060	3741574.075	365.678	1.068759		
0.065	3011744.408	162.587	0.794313		
0.070	2377580.809	78.420	0.620873		
0.075	1884616.726	40.729	0.502575		

0.080	1509607.024	22.502	0.417389		
0.085	1221119.715	13.058	0.353522		
0.090	1221119.715	9.664	0.304126		
0.095	1221119.715	7.335	0.264967		
0.100	1221119.715	5.687	0.233293		
0.105	1221119.715	4.487	0.207242		
0.110	1221119.715	3.596	0.185512		
0.115	1221119.715	2.920	0.167166		
0.120	1221119.715	2.399	0.151514		

Πίνακας 5.14 Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις και κινήσεις κατά την εγκάρσια (sway) κίνηση



Εικόνα 5.31 Φάσμα της αργά μεταβαλλόμενης απόκρισης για μετωπική πρόσπτωση των κυματισμών



Εικόνα 5.32 Φάσμα της αργά μεταβαλλόμενης απόκρισης για πλευρική πρόσπτωση των κυματισμών

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 6

**Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις λόγω του ανέμου και
υπολογισμός της απόκρισης**

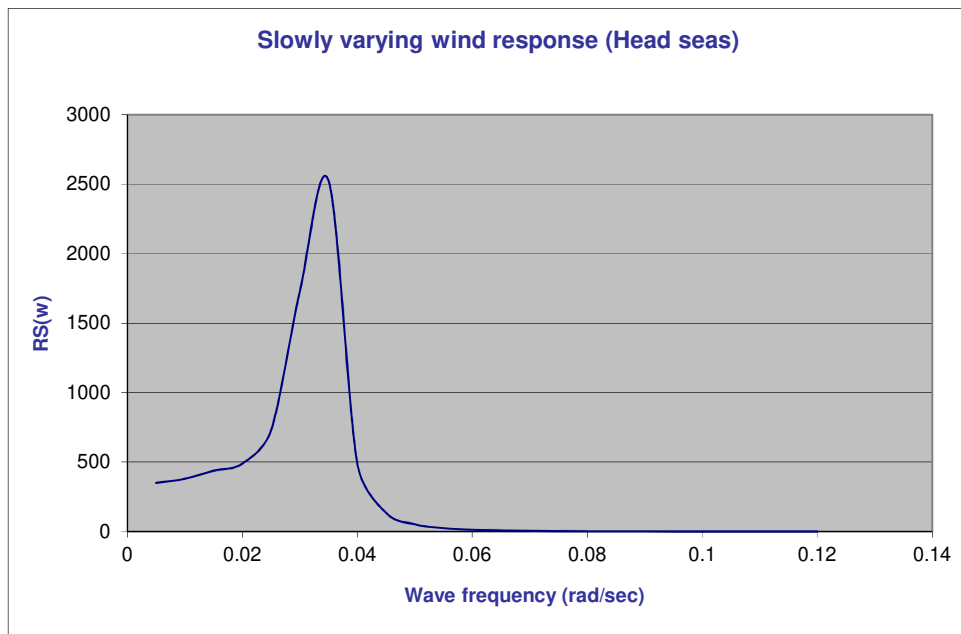
ω	S(ω)	Q	Force spectrum	[Fwind/ku(t)*Q]2	RS(ω)	SM	MULT
0.005	29.63373	1.01075	9120.225236	23.55838884	698.123	0.5	349.0615
0.01	17.86003	1.042018	5496.692195	25.03852139	447.1887	2	894.3775
0.015	12.4686	1.088987	3837.399526	27.34659347	340.9738	1	340.9738
0.02	9.378086	1.136871	2886.246754	29.80436861	279.5079	2	559.0159
0.025	7.392556	1.15343	2275.170006	30.67895086	226.7959	1	226.7959
0.03	6.021829	1.099241	1853.308263	27.864008	167.7923	2	335.5846
0.035	5.026649	0.9698	1547.026755	21.688124	109.0186	1	109.0186
0.04	4.276444	0.808029	1316.13982	15.056074	64.38646	2	128.7729
0.045	3.694099	0.656981	1136.914431	9.953231	36.76822	1	36.76822
0.05	3.231285	0.533431	994.4763831	6.561671	21.20263	2	42.40525
0.055	2.856267	0.437237	879.0589066	4.408518	12.5919	1	12.5919
0.06	2.547407	0.363121	784.0026636	3.040613	7.745678	2	15.49136
0.065	2.289485	0.305665	704.6232669	2.154521	4.932742	1	4.932742
0.07	2.071509	0.26057	637.5378206	1.565690	3.24334	2	6.48668
0.075	1.88536	0.22467	580.247764	1.163983	2.194526	1	2.194526
0.08	1.724925	0.195685	530.8713978	0.883027	1.523154	2	3.046309
0.085	1.585519	0.171973	487.9672205	0.681994	1.081315	1	1.081315
0.09	1.4635	0.152339	450.4141958	0.535157	0.783203	2	1.566405
0.095	1.355998	0.135902	417.3287438	0.425903	0.577524	1	0.577524
0.1	1.260722	0.122005	388.0060268	0.343251	0.432744	2	0.865488
0.105	1.175825	0.110149	361.8776673	0.279782	0.328975	1	0.328975
0.11	1.099803	0.099953	338.4808059	0.230384	0.253376	2	0.506753
0.115	1.03142	0.09112	317.4351249	0.191463	0.197479	1	0.197479
0.12	0.969654	0.083416	298.4255613	0.160457	0.155588	0.5	0.077794
						sum=	3072.719
						E=	10.2424
						Xwind_{sig}	6.400749
						(Xwind_{max}	9.153072

**Πίνακας 5.15 Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις και κινήσεις λόγω του ανέμου στην
διαμήκη κατεύθυνση (surge)**

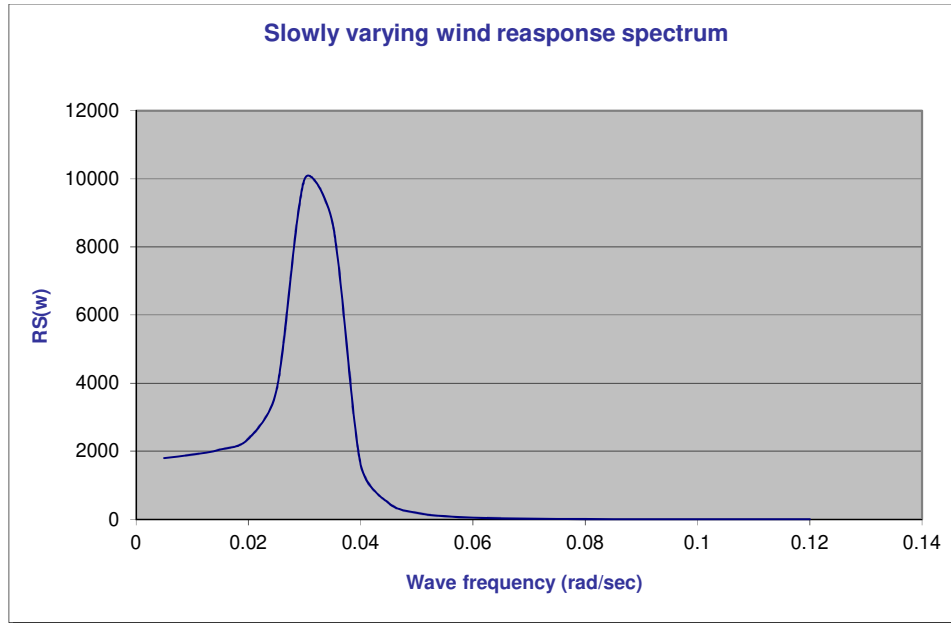
ω	S(ω)	Q	Force spectrum	[Fwind/ku(t)*Q]2	RS(ω)	SM	MULT
0.005	29.63373	1.01075	32791.38289	107.0332714	3171.795	0.5	1585.898
0.01	17.86003	1.042018	19763.12358	113.7579855	2031.721	2	4063.442
0.015	12.4686	1.088987	13797.20719	124.2442928	1549.153	1	1549.153
0.02	9.378086	1.136871	10377.37775	135.4107489	1269.894	2	2539.787
0.025	7.392556	1.15343	8180.277227	139.3842549	1030.406	1	1030.406
0.03	6.021829	1.099241	6663.491228	126.5950725	762.3339	2	1524.668
0.035	5.026649	0.9698	5562.269063	98.53606233	495.3062	1	495.3062
0.04	4.276444	0.808029	4732.124882	68.40454658	292.5282	2	585.0564
0.045	3.694099	0.656981	4087.727602	45.22070077	167.0498	1	167.0498
0.05	3.231285	0.533431	3575.597643	29.81176135	96.33029	2	192.6606
0.055	2.856267	0.437237	3160.619003	20.02930276	57.20903	1	57.20903
0.06	2.547407	0.363121	2818.848314	13.81447411	35.19109	2	70.38217
0.065	2.289485	0.305665	2533.443061	9.788674312	22.41102	1	22.41102
0.07	2.071509	0.26057	2292.240185	7.113428682	14.73553	2	29.47106

0.075	1.88536	0.22467	2086.256218	5.288343663	9.970431	1	9.970431
0.08	1.724925	0.195685	1908.725588	4.011871878	6.920176	2	13.84035
0.085	1.585519	0.171973	1754.465438	3.098516737	4.912757	1	4.912757
0.09	1.4635	0.152339	1619.445131	2.431389298	3.558339	2	7.116678
0.095	1.355998	0.135902	1500.487792	1.935012992	2.623874	1	2.623874
0.1	1.260722	0.122005	1395.059208	1.559498352	1.966093	2	3.932187
0.105	1.175825	0.110149	1301.1158	1.271140623	1.494638	1	1.494638
0.11	1.099803	0.099953	1216.993377	1.046705825	1.15117	2	2.30234
0.115	1.03142	0.09112	1141.324524	0.869879086	0.897211	1	0.897211
0.12	0.969654	0.083416	1072.976444	0.729008564	0.706886	0.5	0.353443
						Sum=	13960.34
						E=	46.53448
						Xwindsig	13.64324
						Xwindmax	19.50983

Πίνακας 5.16 Αργά μεταβαλλόμενες δυνάμεις και κινήσεις λόγω του ανέμου στην εγκάρσια κατεύθυνση (sway)



Εικόνα 5.33 Φάσμα της αργά μεταβαλλόμενης απόκρισης για μετωπική πρόσπτωση του πεδίου ανέμου



Εικόνα 5.34 Φάσμα της αργά μεταβαλλόμενης απόκρισης για πλευρική πρόσπτωση του πεδίου ανέμου