



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Θαλασσίων Κατασκευών

Διπλωματική Εργασία:

Η μεταλλική κατασκευή εμπορικών πλοίων που πλέουν στον αρκτικό και υποαρκτικό κύκλο

Εκπονών: Σωτήρης Κατσαρδής

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Κ. Χατζηγεωργίου

Αθήνα, Ιούλιος 2017

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα πινάκων, εικόνων και διαγραμμάτων	7
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή.....	7
Κεφάλαιο 2 ^ο : Περιβάλλον πλεύσης.....	7
Κεφάλαιο 3 ^ο : Ανάλυση της μεθόδου εύρεσης των φορτίων σχεδιασμού.....	7
Κεφάλαιο 4 ^ο : Γενικά χαρακτηριστικά ενός παγοθραυστικού	8
Κεφάλαιο 5 ^ο : Πλαστική Σχεδίαση.....	8
Κεφάλαιο 6 ^ο : Απαιτήσεις υλικών και μέθοδοι κατασκευής.....	9
Κεφάλαιο 7 ^ο : Κανονισμοί για πλεύση στην Αρκτική	9
Κεφάλαιο 8 ^ο : Μεταλλική κατασκευή του πλοίου	9
Κεφάλαιο 9 ^ο : Παραδείγματα μεταλλικής κατασκευής αρκτικών πλοίων	10
Ορολογίες.....	11
Χαρακτηριστικά πάγου.....	11
Είδη πάγου	11
Κατηγορίες πάγου σε λίμνες	12
Μορφές πάγου	12
Πυκνότητα του πάγου	12
Χαρακτηριστικά επιφάνειας πάγου	13
Κίνηση του πάγου.....	13
Στρώματα πάγου συνδεδεμένα με τη στεριά	14
Ορολογία κατά την πλοήγηση.....	14
Ορολογία Σχεδιασμού του Πλοίου.....	15
Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας	18
Κεφάλαιο 1^ο : Ιστορική αναδρομή	19
1.1 Εισαγωγή.....	19
1.2 Απαρχή των παγοθραυστικών	20
1.3 Σύγχρονη ιστορία.....	24
Βιβλιογραφία.....	26
Κεφάλαιο 2^ο : Περιβάλλον πλεύσης.....	27
2.1.1 Αναγκαιότητα της πλεύσης στον Αρκτικό κύκλο.....	27
2.1.2 Αρκτικές διαδρομές.....	29
2.2.1 Γενική Περιγραφή του Στρώματος Πάγου.....	32
2.2.2 Περιγραφή των κυριότερων ειδών πάγου σύμφωνα με την ηλικία τους.....	34

<i>New ice</i>	34
<i>Frazil ice</i>	34
<i>Grease ice</i>	35
<i>Slush</i>	35
<i>Shuga</i>	35
<i>Nilas</i>	36
<i>Young ice</i>	36
<i>Grey ice</i>	36
<i>Grey-white ice</i>	36
<i>First-year ice</i>	37
<i>Second-year ice</i>	37
<i>Multi-year ice</i>	37
2.2.3 Περιγραφή των κυριότερων ειδών πάγου σύμφωνα με την μορφή τους	38
<i>Brash ice</i>	38
<i>Fast ice</i>	38
<i>Floe</i>	39
<i>Pack ice</i>	39
<i>Pancake ice</i>	40
<i>Rafting</i>	40
<i>Ridging (Κορυφογραμμή)</i>	41
<i>Iceberg (Παγόβουνο)</i>	41
2.3 Καιρικές Συνθήκες στην Αρκτική.....	43
2.4 Κύριοι παράμετροι του πάγου	44
2.5 Περιγραφή της επίδρασης της θερμοκρασίας :	46
2.5.1 Στην κατασκευή του πλοίου	46
2.5.2 Στην κατασκευή του πλοίου λόγω παρουσίας πάγου.....	49
2.6 Φορτίο Πάγου.....	51
2.7 Περιγραφή της φόρτισης από στρώμα πάγου	52
Βιβλιογραφία.....	56
Κεφάλαιο 3^ο: Ανάλυση της μεθόδου εύρεσης των φορτίων σχεδιασμού.....	57
3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά του πάγου	57
3.1.1 Κρυσταλλική δομή.....	57
3.1.2 Πάχος του πάγου.....	57
3.1.3 Πυκνότητα	58

3.1.4 Αντοχή σε εφελκυσμό	58
3.1.5 Αντοχή σε κάμψη.....	58
3.1.6 Αντοχή σε διάτμηση	58
3.1.7 Αντοχή σε θλίψη.....	59
3.2 Επιφάνεια φόρτισης.....	59
3.3 Υποβαλλόμενη πίεση.....	62
3.4 Ύψος φόρτισης	66
3.5 Ολική φόρτιση λόγω πάγου	67
3.6 Σημείο σχεδιασμού.....	68
Βιβλιογραφία.....	71
Κεφάλαιο 4^ο : Γενικά χαρακτηριστικά ενός παγοθραυστικού.....	72
4.1 Γενικά χαρακτηριστικά του παγοθραυστικού.....	72
4.2 Παγοθραυστική διαδικασία	72
4.3 Μέγεθος και διαστάσεις	73
4.3.1 Πλάτος	74
4.3.2 Κοίλο.....	74
4.3.3 Βύθισμα.....	74
4.3.4 Μέγιστη Φορτωτική Ικανότητα	75
4.4 Type Ship.....	77
4.5 Κύρια τμήματα του πλοίου και τα είδη τους.....	78
4.5.1 Σχεδίαση γάστρας.....	78
4.5.2 Σχήμα της πλώρης	79
4.5.3 Πλώρη.....	79
4.5.4 Είδη Πλώρης	80
4.5.5 Μέσο Τμήμα	84
4.5.6 Σχήμα της πρύμνης.....	84
Βιβλιογραφία.....	85
Κεφάλαιο 5^ο : Πλαστική Σχεδίαση.....	86
5.1 Εισαγωγή	86
5.2 Μοντέλο εκτεταμένου ελάσματος	87
5.3 Ανάλυση αστοχίας δύο και τριών κόμβων.....	88
5.3.1 Αστοχία δύο κόμβων	88
5.3.2 Αστοχία τριών κόμβων	89
5.4 Μεμβράνη και τελική ρήξη του ελάσματος	90

5.5 Στατική, ημι-στατική και δυναμική μέθοδο φόρτισης	93
5.6 Στατική και δυναμική αντοχή χάλυβα	94
5.7 Πλαστικός σχεδιασμός	95
Βιβλιογραφία.....	99
Κεφάλαιο 6^ο : Απαιτήσεις Χαρακτηριστικών Χάλυβα.....	100
6.1 Υλικά.....	100
6.2 Κλάσεις διαφορετικών υλικών.....	101
6.3 Χάλυβας.....	102
6.4 Επιλογή ποιότητας χάλυβα βάση θερμοκρασία σχεδιασμού.....	103
6.5 Διάβρωση	105
6.6 Επιστρώσεις.....	106
Βιβλιογραφία.....	107
Κεφάλαιο 7^ο : Κανονισμοί για πλεύση στην Αρκτική	108
7.1 Ανάλυση των κανονισμών.....	108
7.2 Απαιτήσεις ενίσχυσης μέσω των κανονισμών	110
7.3 Απαιτήσεις για τα ελάσματα	111
7.4 Σύγκριση Κανονισμών Συμφώνα με τη Μέθοδο Μελέτης.....	111
7.4.1 Εισαγωγή	111
7.4.2 Δομικές απαιτήσεις	112
7.4.3 Φορτίσεις Σχεδίασης στον Πολικό Κώδικα (IACS).....	112
7.4.4 Φορτίσεις Σχεδίασης του Νορβηγικού Νηογνώμονα.....	112
7.4.5 Πλώρη.....	113
7.4.6 Μέσο Τμήμα	117
7.4.7 Πρυμναία περιοχή.....	119
7.5 Αποτελέσματα της Ανάλυσης.....	121
Βιβλιογραφία.....	122
Κεφάλαιο 8^ο : Μεταλλική κατασκευή του πλοίου	123
8.1 Εισαγωγή	123
8.2 Φορτίσεις στην ανοικτή θάλασσα.....	124
8.2.1 Διάμηκες φορτίο.....	124
8.2.2 Εγκάρσιο φορτίο.....	126
8.2.3 Τοπικό φορτίο.....	129
8.3 Ασκούμενα φορτία στην Αρκτική.....	130
8.4 Εισαγωγή στην ενίσχυση του πλοίου	131

8.5 Γενικά χαρακτηριστικά ενίσχυσης παγοθραυστικών.....	133
8.5.1 Δομική σχεδίαση της γάστρας.....	133
8.5.2 Δομική ενίσχυση.....	133
8.5.3 Τοπική αντοχή.....	134
8.6 Τοπικά χαρακτηριστικά της μεταλλικής κατασκευής.....	134
8.7 Συνδέσεις ενισχυτικών.....	136
8.8 Ανάλυση ενισχυτικών.....	138
8.8.1 Απόσταση μεταξύ ενισχυτικών	138
8.8.2 Κύρια ενισχυτικά	138
8.8.3 Εγκάρσια επέκταση των ενισχυτικών.....	139
8.8.4 Μη συμμετρική ή διαγώνια ενίσχυση.....	140
8.8.5 Σχεδιασμός των δευτερευόντων ενισχυτικών	140
Βιβλιογραφία.....	142
Κεφάλαιο 9^ο : Παραδείγματα μεταλλικής κατασκευής αρκτικών πλοίων	143
9.1 Μεταλλική κατασκευή των αρκτικών πετρελαιοειδών πλοίων.....	143
9.1.1 Σχεδίαση μέσου τμήματος.....	143
9.1.2 Σύγκριση σχεδίασης των ζωνών ενίσχυσης του μέσου τμήματος	144
9.1.3 Σύγκριση βάρους της μεταλλικής κατασκευής των δύο τύπων της ζώνης σχεδίασης	146
9.1.4 Διαστασιολόγηση των ενισχυτικών της ζώνης πάγου.....	147
9.2 Μεταλλική κατασκευή πλοίων υγροποιημένου φυσικού αερίου	149
9.2.1 Συστήματα μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου	149
9.2.2 Χαρακτηριστικά και διαφορές σφαιρικών δεξαμενών και δεξαμενών μεμβράνης	149
9.2.3 Σχεδιασμός πλοίων μεταφοράς LNG στην Αρκτική.....	150
9.2.4 Σύγκριση των ενισχύσεων μεταξύ των κανονισμών PC7 και Ice 1A	151
9.2.4 Σχεδιασμός αρκτικών πλοίων μεταφοράς LNG.....	154
Βιβλιογραφία.....	158
Επίλογος/Συμπεράσματα	159
Παράρτημα Α : Βασικά χαρακτηριστικά παγοθραυστικών	160
Παράρτημα Β : Κανονισμοί DNV και IACS	164
Παράρτημα Γ_α : Γενική Διάταξη Υβριδικού Παγοθραυστικού.....	172
Παράρτημα Γ_β : Γραμμές σχεδίασης υβριδικού παγοθραυστικού	176

Περιεχόμενα πινάκων, εικόνων και διαγραμμάτων

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

ΚΕΦ-Ι.1: Εξέλιξη της σχεδίασης των ρωσικών παγοθραυστικών.....	20
ΚΕΦ-Ι.2: Σημαντικά ταξίδια των παγοθραυστικών στη σύγχρονη ιστορία.	21
ΚΕΦ-Ι.3: Σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις στα αρκτικά παγοθραυστικά.	22
ΚΕΦ-Ι.4: Παράδειγμα προφίλ ενός πυρηνικού παγοθραυστικού πλοίου.	23

Κεφάλαιο 2^ο: Περιβάλλον πλεύσης

ΚΕΦ-ΙΙ.1: Μέση έκταση του στρώματος πάγου από το 1979 έως το 2011.	27
ΚΕΦ-ΙΙ.2: Κοιτάσματα στην Αρκτική.....	28
ΚΕΦ-ΙΙ.3: Χάρτης Αρκτικών διαδρομών.	30
ΚΕΦ-ΙΙ.4: Γεωμετρία του πάγου στην επιφάνεια της θάλασσας.	33
ΚΕΦ-ΙΙ.5: Frazil Ice	34
ΚΕΦ-ΙΙ.6: Grease Ice.	35
ΚΕΦ-ΙΙ.7: Shuga.	35
ΚΕΦ-ΙΙ.8: Nilas.	36
ΚΕΦ-ΙΙ.9: Grey-White Ice.	36
ΚΕΦ-ΙΙ.10: First-year Ice.	37
ΚΕΦ-ΙΙ.11: Brash Ice.	38
ΚΕΦ-ΙΙ.12: Fast Ice.	38
ΚΕΦ-ΙΙ.13: Floe.	39
ΚΕΦ-ΙΙ.14: Pack Ice.....	39
ΚΕΦ-ΙΙ.15: Pancake Ice.....	40
ΚΕΦ-ΙΙ.16: Rafting.....	40
ΚΕΦ-ΙΙ.17: Ridging.....	41
ΚΕΦ-ΙΙ.18: Iceberg.....	41
ΚΕΦ-ΙΙ.19: Σύγκριση διαφόρων ειδών πάγου.	42
ΚΕΦ-ΙΙ.20: Εύρος θερμοκρασίας ανά μήνα.	43
ΚΕΦ-ΙΙ.21: Ημερήσια και Νυκτερινή διάρκεια στην Αρκτική.	44
ΚΕΦ-ΙΙ.22: Κύκλος ισορροπίας πάχους πολυετούς πάγου.	45
ΚΕΦ-ΙΙ.23: Διάγραμμα τάσης/Ανηγμένη Επικύμανση.	47
ΚΕΦ-ΙΙ.24: Χαρακτηριστικά βασικών ναυπηγικών χαλύβων.	48
ΚΕΦ-ΙΙ.25: Σύνθεση και ανάλυση της μελέτης σχεδιασμού.	50
ΚΕΦ-ΙΙ.26: Διάγραμμα πίεσης/επιφάνειας επαφής.	51
ΚΕΦ-ΙΙ.27: Ζώνη υψηλής πίεσης.	55

Κεφάλαιο 3^ο: Ανάλυση της μεθόδου εύρεσης των φορτίων σχεδιασμού

ΚΕΦ-ΙΙΙ.1: Κανονική και ιδανική επιφάνεια επαφής.....	60
ΚΕΦ-ΙΙΙ.2: Ιδανική επιφάνεια για δομικά μέρη του σκελετού.....	61
ΚΕΦ-ΙΙΙ.3: Ιδανική επιφάνεια για τα οριζόντια ενισχυτικά.....	61

ΚΕΦ-III.4: Προσομοίωση της κρούσης του παγοθραυστικού.....	62
ΚΕΦ-III.5: Γεωμετρία του ρευστού πάγου.....	63
ΚΕΦ-III.6: Μετρήσεις στο εργαστήριο και σε πλοία σε μικρή επιφάνεια.....	64
ΚΕΦ-III.7: Ονομαστική επιφάνεια και περιοχή υψηλότερων τάσεων.....	64
ΚΕΦ-III.8: Παραδοχή της γραμμικής επιφάνειας φορτισης.....	65
ΚΕΦ-III.9: Η μέτρηση της επιφάνειας επαφής με μετρητικά όργανα και τα αποτελέσματα της μέσης πίεσης.....	65
ΚΕΦ-III.10: Ανάλυση της επιφάνειας επαφής.....	67
ΚΕΦ-III.11: Στατιστική ανάλυση του φορτίου του πάγου στα ενισχυτικά βασισμένη σε μετρήσεις φορτίων στη Βαλτική.....	68
ΚΕΦ-III.12: Διαδικασία καθορισμού των δομικών διαστάσεων χρησιμοποιώντας διαφορετικά δομικά όρια σχεδίασης για διαφορετικές συχνότητες.....	69
ΚΕΦ-III.13: Επιλογή ενίσχυσης χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά όρια σχεδίασης και περιόδους φορτίου.....	70

Κεφάλαιο 4^ο : Γενικά χαρακτηριστικά ενός παγοθραυστικού

ΚΕΦ-IV.1: Διάγραμμα Μήκους/ Πλάτους,Κοίλου,Βυθίσματος μόνο για παγοθραυστικά. ..	73
ΚΕΦ-IV.2: Διάγραμμα Μήκους/ Πλάτους,Κοίλου,Βυθίσματος για όλα τα πλοία.	74
ΚΕΦ-IV.3: Διάγραμμα Μήκους/ Μέγιστου ωφέλιμου φορτίου.	75
ΚΕΦ-IV.4: Γραφικός ορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών γάστρας.....	79
ΚΕΦ-IV.5: Straight Stem with Parallel Buttocks.	80
ΚΕΦ-IV.6: Concave Stem.....	80
ΚΕΦ-IV.7: High Flare Angles.	81
ΚΕΦ-IV.8: Spoon Bow with Reamers.	82
ΚΕΦ-IV.9: Semi Spoon Bow with Chines.....	82
ΚΕΦ-IV.10: Επίπεδη πλώρη	83
ΚΕΦ-IV.11: Πλώρη Thyssen-Waas.....	83
ΚΕΦ-IV.12: Παράδειγμα σχεδίασης πρύμνης	84

Κεφάλαιο 5^ο : Πλαστική Σχεδίαση

ΚΕΦ-V.1: Διαγράμματα μηχανισμών πλαστικής αστοχίας.....	87
ΚΕΦ-V.2: Σχηματικό διάγραμμα πακτωμένου ελάσματος με ομοιόμορφη φόρτιση.....	89
ΚΕΦ-V.3: Διανομή των καμπτικών τάσεων.....	89
ΚΕΦ-V.4: Σχηματικό διάγραμμα τριών κόμβων.....	90
ΚΕΦ-V.5: Σχηματικό διάγραμμα της μεμβράνης.....	90
ΚΕΦ-V.6: Σχηματικό διάγραμμα του μηχανισμού αστοχίας της μεμβράνης.....	91
ΚΕΦ-V.7: Μηχανικές ιδιότητες του υλικού.....	92
ΚΕΦ-V.8: Στατική και δυναμική αντοχή χάλυβα.....	94
ΚΕΦ-V.9: Συμμετρική φόρτιση τριών κόμβων.....	96
ΚΕΦ-V.10: Ασύμμετρη φόρτιση τριών κόμβων.....	96
ΚΕΦ-V.11: Διάγραμμα Τάσης/Επιμήκυνσης.....	97
ΚΕΦ-V.12: Διάγραμμα πίεσης-παραμόρφωσης.....	98

Κεφάλαιο 6^ο : Απαιτήσεις υλικών και μέθοδοι κατασκευής

ΚΕΦ-VI.1: Διάγραμμα Αστοχίας κατά την επιμήκυνση/Θερμοκρασίας για κλάσεις χάλυβα A και EH.....	101
ΚΕΦ-VI.2: Πίνακας κλάσεων υλικών από τον IACS S6.2.....	104
ΚΕΦ-VI.3: Πίνακας κλάσεων υλικών από τον IACS I2.....	104

Κεφάλαιο 7^ο : Κανονισμοί για πλεύση στην Αρκτική

ΚΕΦ-VII.1: Αντιστοίχιση κλάσεων διάφορων νηογνωμόνων.....	109
ΚΕΦ-VII.2: Φορτία σχεδίασης.....	114
ΚΕΦ-VII.3: Φορτία σχεδίασης.....	115
ΚΕΦ-VII.4: Πάχος ελασμάτων σε χαμηλές κλάσεις.....	116
ΚΕΦ-VII.5: Πάχος ελασμάτων σε υψηλές κλάσεις.....	116
ΚΕΦ-VII.6: Παράγοντες επιφάνειας γάστρας.....	117
ΚΕΦ-VII.7: Πάχος ελασμάτων για υψηλότερες κλασεις.....	118
ΚΕΦ-VII.8: Φορτία σχεδιασμού, μέσο τμήμα.....	118
ΚΕΦ-VII.9: Πάχος ελασμάτων για χαμηλότερες κλασεις.....	119
ΚΕΦ-VII.10: Πάχος ελάσματος για πλεύση ανάποδα.....	119
ΚΕΦ-VII.11: Πάχος ελάσματος για πλεύση ανάποδα.....	120
ΚΕΦ-VII.12: Πάχος ελάσματος χωρίς πλεύση ανάποδα.....	120
ΚΕΦ-VII.13: Πάχος ελάσματος χωρίς πλεύση ανάποδα.....	121

Κεφάλαιο 8^ο : Μεταλλική κατασκευή του πλοίου

ΚΕΦ-VIII.1: Πλοίο σε πλάγιο κυματισμό.....	124
ΚΕΦ-VIII.2: Πλοίο σε κατάσταση Hogging και Sagging.....	125
ΚΕΦ-VIII.3: Παράγοντας που επηρεάζει την καμπτική ροπή.....	126
ΚΕΦ-VIII.4: Κρουστικές φορτίσεις στην πλώρη.....	126
ΚΕΦ-VIII.5: Παράδειγμα παραμόρφωσης λόγω των εγκάρσιων φορτίων.....	127
ΚΕΦ-VIII.6: Τρόπος υπολογισμού εγκάρσιας φόρτισης.....	128
ΚΕΦ-VIII.7: Τοπική δομή ενίσχυσης.....	129
ΚΕΦ-VIII.8: Διανομή του φορτίου του πάγου κατά μήκος του πλοίου	
ΚΕΦ-VIII.9: Ζώνη ενίσχυσης κατά IACS UR.....	130
ΚΕΦ-VIII.10: Παράδειγμα πίνακας παραγόντων γάστρας.....	131
ΚΕΦ-VIII.11: Δομή πλάγιου τοιχώματος του εγκάρσια ενισχυμένου μέσου τμήματος.....	133
ΚΕΦ-VIII.12: Δομή πλάγιου τοιχώματος του διαμήκου ενισχυμένου μέσου τμήματος.....	134
ΚΕΦ-VIII.13: Παράδειγμα σύνδεσης των ενισχυτικών.....	135
ΚΕΦ-VIII.14: Παραδείγματα ενώσεων ενισχυτικών.....	136
ΚΕΦ-VIII.15: Τοποθέτηση των ενισχύσεων σύμφωνα με τους κανονισμούς.....	138
ΚΕΦ-VIII.16: Διαγώνια ενίσχυση.....	139
ΚΕΦ-VIII.17: Διάταξη πλάγιων διαμήκων ενισχυτικών και οι ασκούμενες τάσεις όπως απεικονίζεται με βάση την FEM.....	140

Κεφάλαιο 9^ο: Παραδείγματα μεταλλικής κατασκευής αρκτικών πλοίων

ΚΕΦ-ΙΧ.1: Μέθοδος σχεδίασης “εξελιγμένου” τύπου.....	143
ΚΕΦ-ΙΧ.2: Μέθοδος σχεδίασης “υβριδικού” τύπου.....	144
ΚΕΦ-ΙΧ.3: Πίνακας χαρακτηριστικών των δύο τύπων Αρκτικών πετρελαιοφόρων.....	145
ΚΕΦ-ΙΧ.4: Μέσες τομές πετρελαιοφόρων ανάλογα με τον τύπο τους.....	146
ΚΕΦ-ΙΧ.5: Διανομή του βάρους της μεταλλικής κατασκευής στα δομικά της μέρη.....	147
ΚΕΦ-ΙΧ.6: Τύπου μεμβράνης.....	150
ΚΕΦ-ΙΧ.7: Σφαιρικού τύπου.....	150
ΚΕΦ-ΙΧ.8: 1A Ice class / Τύπος μεμβράνης και PC 7 Ice class / Τύπος μεμβράνης.....	153
ΚΕΦ-ΙΧ.9: 1A Ice class / Σφαιρικού τύπου και PC 7 Ice class / Σφαιρικού τύπου.....	153
ΚΕΦ-ΙΧ.10: Ζώνες ενίσχυσης με βάση την κλάση Ice 1A και την κλάση PC7.....	153
ΚΕΦ-ΙΧ.11: FE model for membrane tank type LNG carrier.....	154
ΚΕΦ-ΙΧ.12: FE model for spherical tank LNG carrier.....	155
ΚΕΦ-ΙΧ.13: Κλασική θέση φόρτισης λόγω πάγου στο μέσο τμήμα κατά το διάμηκες.....	155
ΚΕΦ-ΙΧ.14: Κλασική θέση φόρτισης λόγω πάγου στο μέσο τμήμα κατά το εγκάρσιο.....	156
ΚΕΦ-ΙΧ.15: Κλασική θέση φόρτισης λόγω πάγου στους ώμους.....	156
ΚΕΦ-ΙΧ.16: Κλασική θέση φόρτισης λόγω πάγου κατά το εγκάρσιο.....	157
ΚΕΦ-ΙΧ.17: Κύριες φορτίσεις στο πλοίο.....	157
ΚΕΦ-ΙΧ.18: Φορτίο στον σκελετό της μεταλλική κατασκευής	157

Ορολογίες

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σύνολο ορισμών εκ των οποίων κάποιοι πιθανόν να χρησιμοποιηθούν με την αγγλική τους ορολογία λόγω απουσίας αντίστοιχης ελληνικής. Οι ορολογίες αυτές αναφέρονται κυρίως στο περιβάλλον του Αρκτικού και υπό-Αρκτικού κύκλου (οι οποίες είναι διεθνώς αναγνωρισμένες από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό) και σε διάφορα μέρη του παγοθραυστικού πλοίου. Ορολογίες οι οποίες απαιτούν περαιτέρω σχολιασμό θα σημειώνονται αναλόγως.

Χαρακτηριστικά πάγου

Είδη πάγου

Sea Ice: Οποιοδήποτε είδος πάγου το οποίο βρίσκεται στη θάλασσα και έχει δημιουργηθεί από θαλασσινό νερό.

New Ice: Πρόκειται για έναν γενικό όρο που αποδίδεται στα στρώματα πάγου που είναι σχετικά νέα και αποτελείται από τις υποκατηγορίες frazil ice, grease ice, slush και shuga.

Frazil Ice: Διάσπαρτα λεπτά κομμάτια πάγου που επιπλέει στη θάλασσα.

Grease Ice: Πρόκειται για κομμάτια πάγου μεγαλύτερης έκτασης και πάχους από την κατηγορία Frazil Ice.

Slush: Αποτελείται από μίγμα χιονιού και πάγου σε στεριά ή θάλασσα.

Shuga: Πάγος σπογγώδους μορφής και μεγαλύτερης πυκνότητας από την κατηγορία Grease Ice .

Nilas: Λεπτή σχετικά εύκαμπτη συνεχής επιφάνεια πάγου.

- **Dark Nilas:** Υποκατηγορία της προαναφερθέντος με πάχος έως και 5 εκατοστά και σκούρο χρώμα.
- **Light Nilas:** Υποκατηγορία της προαναφερθέντος με πάχος μεγαλύτερο από 5 εκατοστά και ανοιχτό χρώμα.

Young Ice: Είδος πάγου που κατηγοριοποιείται από πλευρά ηλικίας ανάμεσα στην κατηγορία Nilas και First-year Ice .

- **Grey Ice:** Υποκατηγορία της προαναφερθέντος με πάχος από 10 έως 30 εκατοστά το οποίο κάτω από πίεση δημιουργεί κοιλάδα (Raft).
- **Grey-White Ice:** Υποκατηγορία της προαναφερθέντος με πάχος από 10 έως 30 εκατοστά το οποίο κάτω από πίεση δημιουργεί κορυφογραμμή (Ridge).

First-Year Ice (Πάγος πρώτου χρόνου): Στρώμα πάγου το οποίο δεν έχει περάσει ακόμα μία καλοκαιρινή περίοδο με πάχος από 30 εκατοστά και έχει 3 υποκατηγορίες .

- **Thin First-Year Ice:** First-year ice με 30-70 εκατοστά πάχος.
- **Medium First-Year Ice:** First-year ice με 70-120 εκατοστά πάχος.
- **Thick First-Year Ice:** First-year ice με πάνω από 120 εκατοστά πάχος.

Old Ice: Θαλάσσιος πάγος που έχει επιβιώσει τουλάχιστον μία καλοκαιρινή περίοδο και μπορεί να κατηγοριοποιηθεί και ως second-year ice ή multi-year ice.

Second-Year Ice (Πάγος δεύτερου χρόνου): Είναι στρώμα πάγου που ανήκει στη κατηγορία Old ice και έχει επιβιώσει μία καλοκαιρινή περίοδο. Είναι παχύτερο και έχει μικρότερη πυκνότητα από την κατηγορία First-Year Ice.

Multi-year Ice: Είναι στρώμα πάγου που ανήκει στη κατηγορία Old ice και έχει επιβιώσει τουλάχιστον 2 καλοκαιρινές περιόδους. Είναι παχύτερο και έχει μικρότερη πυκνότητα από την κατηγορία Second-Year Ice.

Κατηγορίες πάγου σε λίμνες

Lake Ice: Στρώμα πάγου που δημιουργήθηκε στην επιφάνεια της λίμνη ανεξαρτήτως μορφής.

New Lake Ice: Νεοσχηματισμένο στρώμα πάγου με πάχος μικρότερο από 5 εκατοστά.

Thin Lake Ice: Στρώμα πάγου που συνίσταται από διάφορα χρώματα με πάχος 5-15 εκατοστά.

Medium Lake Ice: Πρόκειται για τον περαιτέρω σχηματισμό των κατηγοριών Floes και Fast ice, με 15-30 εκατοστά σε πάχος.

Thick Lake Ice: Στρώμα πάγου από 30 έως 70 εκατοστά πάχος.

Very Thick Lake Ice: Πρόκειται για τον περαιτέρω σχηματισμό των κατηγοριών Floes και Fast ice, με πάχος πάνω από 70 εκατοστά.

Μορφές πάγου

Pancake Ice: Στρώμα πάγου κυκλικής μορφής με διάμετρο έως 3 μέτρα και πάχος έως 10 εκατοστά.

Ice Cake: Οποιασδήποτε μορφής στρώμα πάγου με διάμετρο μικρότερη των 20 μέτρων.

Small Ice Cake: Στρώμα πάγου της κατηγορίας **Ice Cake** με διάμετρο μικρότερη από 2 μέτρα.

Floe: Στρώμα πάγου οποιασδήποτε μορφής με διάμετρο μεγαλύτερη από 20 μέτρα. Κατηγοριοποιούνται με βάση το διάμηκες μέγεθός του :

- **Small Floe:** Από 20 μέχρι 100 μέτρα μήκος.
- **Medium Floe:** Από 100 μέχρι 500 μέτρα μήκος.
- **Big Floe:** Από 500 μέχρι 2000 μέτρα μήκος.
- **Vast Floe:** Από 2 μέχρι 10 χιλιόμετρα μήκος.
- **Giant Floe:** Μεγαλύτερο από 10 χιλιόμετρα σε μήκος.

Brash Ice : Συσσώρευση πάγου που αποτελείται από θραύσματα που δεν υπερβαίνουν τα 2 μέτρα σε διάμετρο και πρόκειται για κομμάτια των άλλων μορφών του πάγου. Μπορεί επίσης να βρεθεί στα κανάλια που ανοίχτηκαν από τα παγοθραυστικά.

Fast Ice: Πρόκειται για πάγο ο οποίος δημιουργείται και παραμένει κοντά στην ακτή και κινείται παράλληλα με την ακτή .

Grounded Ice: Πρόκειται για επιπλέοντα πάγο ο οποίος παρασύρθηκε σε ρηχά νερά.

Πυκνότητα του πάγου

Συγκέντρωση πάγου: Ο λόγος αυτός εκφράζεται σε δέκατα και περιγράφει το ποσοστό της επιφάνειας του νερού που είναι καλυμμένο από πάγο.

Consolidated Ice: Πρόκειται για επιπλέοντα πάγο του οποίου η συγκέντρωση είναι 10/10 και τα κομμάτια του πάγου είναι μεταξύ του παγωμένα.

Compact Ice: Πρόκειται για επιπλέοντα πάγο του οποίου η συγκέντρωση είναι 10/10 και το νερό δεν είναι ορατό.

Very Close Ice: Πρόκειται για επιπλέοντα πάγο του οποίου η συγκέντρωση είναι από 10/10 έως 9/10.

Close Ice: Πρόκειται για επιπλέοντα πάγο του οποίου η συγκέντρωση είναι από 8/10 έως 7/10, αποτελούμενο από κομμάτια πάγου τα οποία στην πλειονότητά τους έρχονται σε επαφή.

Open Ice: Πρόκειται για επιπλέοντα πάγο του οποίου η συγκέντρωση είναι από 6/10 έως 5/10, αποτελούμενο από κομμάτια πάγου τα οποία στην πλειονότητά τους δεν έρχονται σε επαφή.

Very Open Ice: Πρόκειται για επιπλέοντα πάγο του οποίου η συγκέντρωση είναι από 3/10 έως 1/10.

Open Water: Πρόκειται για μία μεγάλη έκταση θαλασσιάς επιφάνειας η οποία είναι εύκολα πλοηγήσιμη και η συγκέντρωση είναι 1/10.

Bergy Water: Πρόκειται για θαλάσσια επιφάνεια ελεύθερη στρώματος πάγου στην οποία όμως υπάρχουν σποραδικά μεγάλα κομμάτια πάγου με συγκέντρωση μικρότερη από 1/10.

Ice Free: Θαλάσσια επιφάνεια με παντελής απουσία πάγου.

Χαρακτηριστικά επιφάνειας πάγου

Level Ice: Στρώμα πάγου το οποίο είναι ανεπηρέαστο στην παραμόρφωση.

Deformed Ice: Γενικός όρος που αναφέρεται στα στρώματα πάγου τα οποία παραμορφώνονται κατά την επαφή και συμπίεσή τους, τα οποία είτε βυθίζονται ή υψώνονται.

Rafted Ice: Τύπος παραμορφωμένου στρώματος πάγου το οποίο δημιουργήθηκε από την ένωση δύο άλλων και το οποίο παραμένει οριζόντια μετά την συνένωση.

Finger Rafted Ice: Υποκατηγορία του παραπάνω τύπου πάγου. Πρόκειται για στρώμα πάγου τύπου Rafted Ice το οποίο κατά τη δημιουργία του εμφανίζει στο σημείο συνένωσης σχήμα που παρομοιάζει δάκτυλα, εξού και ο όρος Finger.

Ridge: Ένα τοίχος πάγου το οποίο δημιουργείται λόγω της επαφής και συμπίεσης δύο στρωμάτων μεταξύ τους. Το μέρος του όγκου το οποίο βυθίζεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας υπό την ασκούμενη πίεση λέγεται Keel ενώ το μέρος που είναι ορατό λέγεται Sail.

Ridged Ice: Πρόκειται για κομμάτια πάγου, κυρίως πρώτου χρόνου (First-year Ice), τα οποία έχουν συγκεντρωθεί γύρω από το τοίχος πάγου.

Hummock: Πρόκειται για έναν λόφο από κομμάτια σπασμένου πάγου τα οποία έχουν ωθηθεί το ένα πάνω από το άλλο λόγω της ασκούμενης πίεσης. Το υποθαλάσσιο κομμάτι του λόφου αυτού ονομάζεται hummock. Η μάζα πάγου αυτή είναι συνήθως σταθερά ενωμένη με αποτέλεσμα να αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στην πορεία του παγοθραυστικού.

Hummocked Ice: Σχεδόν παρόμοια με την κατηγορία λοφώδους πάγου (Hummock). Πρόκειται για μάζα συγκεντρωμένου πάγου, η οποία όμως δεν έχει προλάβει να ομογενοποιηθεί με αποτέλεσμα να φέρει μικρότερη αντίσταση στην πορεία του παγοθραυστικού.

Κίνηση του πάγου

Fracturing: Πρόκειται για την παραμόρφωση και αστοχία του στρώματος πάγου κατά την επιβολή πίεσης. Παρατηρείται περισσότερο σε κατηγορίες πάγου μεγάλης συγκέντρωσης όπως very close ice, compact ice, και consolidated ice.

Hummocking: Πρόκειται για την διαδικασία κατά την οποία διάφορα κομμάτια πάγου συγκεντρώνονται με αποτέλεσμα τον σχηματισμό λοφώδους πάγου, Hummock.

Ridging: Πρόκειται για την διαδικασία κατά την οποία έρχονται σε επαφή στρώματα πάγου, δημιουργώντας το τοίχος πάγου, Ridge.

Rafting: Πρόκειται για την διαδικασία κατά την οποία το ένα στρώμα πάγου καλύπτεται από ένα άλλο. Πιο σύνηθες φαινόμενο στις κατηγορίες new ice και young ice.

Finger Rafting: Πρόκειται για υποκατηγορία του παραπάνω τύπου πάγου η οποία κατά την επαφή των στρωμάτων πάγων εμφανίζει σχήμα δακτύλων, εξού και ο όρος Finger.

Weathering: Πρόκειται για την διαδικασία κατά την οποία με το πέρασμα του χρόνου το σχήμα και τα χαρακτηριστικά του πάγου αλλάζουν.

Diverging: Κίνηση η οποία έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της συγκέντρωσης του στρώματος πάγου στην επιφάνεια της θάλασσας.

Compacting: Κίνηση η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης του στρώματος πάγου στην επιφάνεια της θάλασσας και μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση των στρωμάτων αυτών.

Shearing: Πρόκειται για την κίνηση του στρώματος του πάγου η οποία έχει ως αποτέλεσμα την φόρτισή του με διατμητικές τάσεις.

Rumbled Ice: Κομμάτια πάγου τα οποία προέρχονται από άλλους τύπους πάγου τα οποία συγκεντρώνονται σε ένα μέρος.

Στρώματα πάγου συνδεδεμένα με τη στεριά

Glacial Ice: Κομμάτια πάγου τα οποία προέρχονται από μεγάλους παγετώνες είτε από τη στεριά ή από επιπλέοντα παγόβουνα στη θάλασσα.

Glacier: Πρόκειται για τον λεγόμενο παγετώνα δηλαδή ένας εξαιρετικά μεγάλος όγκο χιονιού και πάγου ο οποίος επεκτείνεται συνεχώς τόσο στην στεριά όσο και στην θάλασσα.

Ice Shelf: Πρόκειται για ένα μεγάλο κομμάτι πάγου με πάχος από 2 έως 50 μέτρα από το επίπεδο της θάλασσας, το οποίο είναι σε επαφή με την ακτή. Έχει συνήθως μεγάλο μήκος και επίπεδη επιφάνεια ή ελάχιστα επικλινείς. Το πάχος του παραμένει σταθερό ή αυξάνεται ανάλογα με το πάχος του χιονιού που θα συγκεντρωθεί στην επιφάνειά του.

Ορολογία κατά την πλοήγηση

Beset: Κατάσταση στην οποία το πλοίο δεν μπορεί να κινηθεί λόγω του πάγου που το περιβάλλει.

Clutter: Πρόκειται για σήμα το οποίο ανακλάται στην επιφάνεια της θάλασσας ή του πάγου και το οποίο μπορεί να αλλοιώσει το κυρίως σήμα που ανακλάται από εμπόδια όπως παγόβουνα κλπ.

Ice Belt: Περιοχή της γάστρας του πλοίου η οποία είναι ενισχυμένη ώστε να δέχεται τα φορτία του πάγου.

Ice Draft: Το βύθισμα το οποίο πρέπει να έχει το πλοίο ώστε το στρώμα πάγου να έρχεται σε επαφή με την <<ζώνη πάγου>> (Ice Belt).

Ice Horn: Σφηνοειδής μορφής κατασκευή πάνω από το πηδάλιο ώστε να προστατεύεται όταν κινείται ανάποδα.

Ice-Strengthened: Ενίσχυση της γάστρας για πλεύση σε θάλασσα καλυμμένη από στρώμα πάγου.

Ramming: Πρόκειται για διαδικασία κατά την οποία το παγοθραυστικό πλοίο επιχειρώντας να σπάσει τον πάγο συγκρούεται επαναλαμβανόμενα με το στρώμα πάγου αυτό.

Στρατηγικός σχεδιασμός: Πρόκειται για σχεδιασμό ενός πλάνου πλοήγησης με την προϋπόθεση ότι η πλεύση γίνεται στην ανοιχτή θάλασσα απουσία πάγου για μερικές μέρες ή βδομάδες.

Τακτικός σχεδιασμός: Πρόκειται για σχεδιασμό ενός πλάνου πλοήγησης με την προϋπόθεση ότι η πλεύση γίνεται σε παγωμένα νερά. Είναι πλάνο μικρής διάρκειας και περιλαμβάνει διάφορες πιθανές καταστάσεις που μπορούν να συναντηθούν στην Αρκτική περιοχή.

Ορολογία Σχεδιασμού του Πλοίου

AC-DC: Τύπος ηλεκτρικού συστήματος μετάδοσης στο οποίο μία γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος τροφοδοτεί έναν κινητήρα σταθερού ρεύματος ο οποίος είναι συνδεδεμένος με την προπέλα του πλοίου.

AC-FFC-AC: Τύπος ηλεκτρικού συστήματος μετάδοσης στο οποίο μία γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος τροφοδοτεί έναν κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος ο οποίος είναι συνδεδεμένος με την προπέλα του πλοίου. Μεταξύ της γεννήτριας και του κινητήρα βρίσκεται ένα σύστημα ελέγχου συχνότητας (FFC) το οποίο ελέγχει το σήμα από τον κινητήρα.

Astern: Στο πίσω μέρος ή προς την πρύμνη. Πρυμναία.

Bollard pull: Η δυνατότητα ρυμούλκησης σε μηδενική ταχύτητα.

Buckling: Η αστοχία ενός κατασκευαστικού εξαρτήματος λόγω λυγισμού.

Coverage: Η επιφάνεια κάλυψης της θάλασσας από πάγο.

Denting: Σχηματισμός μόνιμου βέλους κάμψης στο έλασμα.

Framing: Πρόκειται για πλαίσια τα οποία στηρίζουν την δομή του πλοίου και αντιστέκονται στα ασκούμενα φορτία.

Freeboard: Η απόσταση από την ίσαλο μέχρι το ανώτερο κατάστρωμα.

Flare angle: Γωνία μετρούμενη από κατακόρυφο άξονα μέχρι το τοίχωμα του πλοίου.

Ice horn: Σφηνοειδής μορφής κατασκευή πάνω από το πηδάλιο ώστε να προστατεύεται όταν κινείται ανάποδα.

Icebreaker: Οποιοδήποτε πλοίο το οποίο μπορεί να πλεύσει σε έντονες συνθήκες πάγου, έχοντας τις κατάλληλες διαστάσεις και ισχύ.

Ice strengthened ships: Πλοία τα οποία έχουν ενισχυθεί στην περιοχή της γάστρας αλλά χρειάζονται παγοθραυστικό για να τα συνοδέψουν σε έντονη παρουσία πάγου.

Ice going ships: Οποιοδήποτε πλοίο μπορεί να πλεύσει σε πάγο, ανεξαρτήτως αν υπάρχει βοηθητικό παγοθραυστικό.

Ice management: Οποιαδήποτε ενέργεια που γίνεται για να μειώσει την αλληλεπίδραση του πάγου με την μεταλλική κατασκευή.

Isotropic materials : Πρόκειται για υλικά τα οποία έχουν ομοιόμορφα χαρακτηριστικά σε όλο την μάζα του υλικού.

Longitudinal taper: Πρόκειται για σταδιακή αλλαγή στο σχήμα του πλοίου από μεγαλύτερο πλάτος στην πλώρη σε μικρότερο στην πρύμνη.

Orthotropic materials : Πρόκειται για υλικά που διαφέρουν κατά μήκος τριών αμοιβαίως ορθογώνιων διπλών αξόνων με περιστροφική συμμετρία.

Parallel mid body: Πρόκειται για το παράλληλο τμήμα του πλοίου, του οποίου τα τοιχώματα είναι επίπεδα και συνήθως κατακόρυφα.

Reamers: Πρόκειται για την πλάτυνση της γάστρας στην πλώρη για την μείωση της επαφής του πάγου με το μέσο τμήμα και την βελτίωση της ελκτικότητας.

Shoulder crushing: Φαινόμενο κατά το οποίο το πλατύτερο μέσο τμήμα του πλοίου περνά από το στενότερο παγωμένο κανάλι.

Stem: Το πιο πρωραίο τμήμα του πλοίου. Αποτελεί συνέχεια της τρόπιδας (keel).

Tripping: Η αστοχία ενός ελάσματος εντός του πλευρικού τοιχώματος του πλοίου.

Type ship: Ο όρος *Type ship* αναφέρεται σε πλοία τα οποία έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με τους κανονισμούς *Πρόληψης της Ρύπανσης στον Αρκτικό κύκλο* (Arctic Shipping Pollution Regulations). Ο όρος αυτός δεν αναφέρεται σε παγοθραυστικά πλοία αλλά σε πλοία τα οποία είναι σχεδιασμένα και ενισχυμένα για πλεύση σε παγωμένα νερά με στρώμα πάγου σχετικά μικρού πάχους.

Trim: Η διαφορά μεταξύ του βυθίσματος στην πρυμναία και πρωραία κάθετο. Η λεγόμενη διαγωγή.

Αρκτική κλάση πλοίου: Πλοίο σχεδιασμένο σύμφωνα με τους κανόνες για την πρόληψη της ρύπανσης στο Αρκτικό και υπό-Αρκτικό κύκλο (Arctic Shipping Pollution Regulations).

Γωνία ισάλου: Γωνία μετρούμενη μεταξύ μίας ευθείας εφαπτόμενης στην ίσαλο και την οριζόντια γραμμή.

Γωνία Buttocks: Γωνία μετρημένη μεταξύ της ισάλου και της εφαπτομένης στο διάμηκες τμήμα.

Όλκιμο: Υλικό που μπορεί να υποστεί διέλαση, εύκαμπτο.

Παράλληλο τμήμα: Το τμήμα του πλοίου που βρίσκεται στο μέσο του μήκους του και κρατάει σταθερή την γεωμετρία του κατά το διάμηκες.

Πολική κλάση πλοίου: Πλοίο σχεδιασμένο σύμφωνα με τους κανόνες της Διεθνούς Ένωσης Νηογνομόνων για πλεύση στην αρκτική.

Πρυμναία γωνία: Γωνία μετρούμενη μεταξύ της γωνίας του προφίλ της πρύμνης με την ίσαλο γραμμή.

Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Ο στόχος της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας είναι η καταγραφή των απαιτούμενων βημάτων που είναι απαραίτητα για την μελέτη και κατασκευή της μεταλλικής δομής ενός παγοθραυστικού πλοίου. Αρχικά, για να μπορέσουμε να έχουμε μία επαρκή αντίληψη του περιβάλλοντος πλεύσης, θα αναφερθούμε στις συνθήκες που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή της Αρκτικής ενώ, στη συνέχεια, θα αναλύσουμε τον τρόπο με τον οποίο ορίζονται οι φορτίσεις οι οποίες ασκούνται σε αυτό. Επίσης, θα χρησιμοποιήσουμε τόσο τους εμπειρικούς κανόνες των διάφορων νηογνωμόνων όσο και την πλαστική και ελαστική θεώρηση ώστε να αποκτήσουμε τις αναγκαίες πληροφορίες για την κατανόηση των βασικών διαφορών μεταξύ πλοίων ανοικτής θάλασσας και παγοθραυστικών. Τέλος, θα παρουσιαστούν παραδείγματα τόσο μεταφοράς πετρελαιοειδών όσο και μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με λεπτομέρειες για την κατασκευή της μεταλλικής δομής τους.

Κεφάλαιο 1^ο : Ιστορική αναδρομή

1.1 Εισαγωγή

Κατά τις τελευταίες τέσσερις με πέντε δεκαετίες, πολλές εξελίξεις στην τεχνολογία των παγοθραυστικών έχουν πραγματοποιηθεί μέσω της εφαρμογής της σύγχρονης θαλάσσιας τεχνολογίας για το σχεδιασμό και τη λειτουργία των πολικών πλοίων. Αυτές οι καινοτόμες ιδέες έχουν εφαρμοστεί με στόχο τη βελτίωση των συστημάτων πρόωσης και μείωση της αντίστασης που συναντούν τα πλοία κατά τη διάρκεια της παγοθραυστικής διαδικασίας. Επίσης, τα σύγχρονα συστήματα πλοήγησης και πληροφοριών (π.χ. χάρτες, δορυφορικές εικόνες, κλπ) τα οποία έχουν προσαρτηθεί στα καινούργια πλοία επιτρέπουν τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του πάγου κατά μήκος της διαδρομής τους σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και είναι σε θέση να χαράξουν μια τακτική πορεία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα παγοθραυστικά πλοία να ταξιδέψουν σε απομακρυσμένες πολικές περιοχές πράγμα το οποίο αποτελούσε άπιαστο στόχο πριν από λίγα χρόνια.

Πολλά έθνη έχουν συμβάλει στην εξέλιξη αυτή, με το σχεδιασμό και την κατασκευή πολικών πλοίων και με τη δρομολόγηση ταξιδιών σε διάφορες περιοχές της Αρκτικής και της Ανταρκτικής. Μερικά από τα ταξίδια ορόσημο κατά τη διάρκεια των τελευταίων τεσσάρων με πέντε δεκαετιών παρατίθενται στον Πίνακα ΚΕΦ-1.2.

Η αφορμή πίσω από αυτές τις τεχνολογικές εξελίξεις έχει προέλθει από:

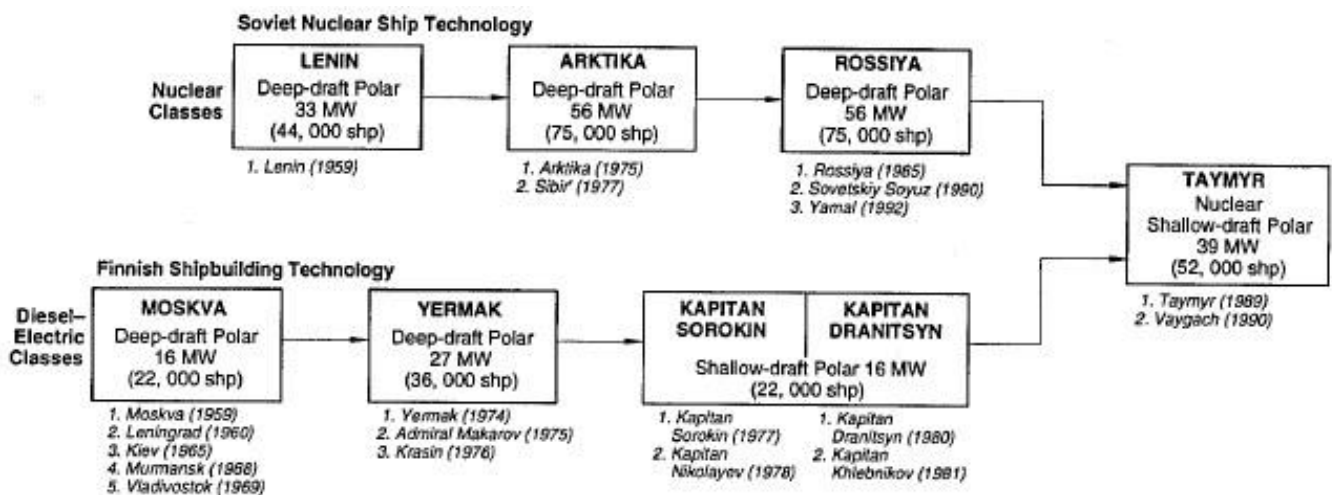
1. Την εξερεύνηση φυσικών πόρων γύρω από τη λεκάνη της Αρκτικής.
2. Την ανάπτυξη της Βόρειας Θαλάσσιας Οδού, από την πρώην Σοβιετική Ένωση, ως αναπόσπαστο μέρος της ανάπτυξης του συνόλου της Ρωσικής Αρκτικής.
3. Την ανάγκη για αποστολή πλοίων με σκοπό τη μεταφορά προσωπικού, υλικοτεχνικής υποστήριξης και θαλάσσιας έρευνα στην Αρκτική. Αν και η εξερεύνηση κοιτασμάτων υδρογονανθράκων στη νότια θάλασσα Μποφόρ έχει σχεδόν σταματήσει, συζητούνται σχέδια για τις εξελίξεις στις υπεράκτιες περιοχές της ρωσικής Αρκτικής για την παραγωγή πόρων υδρογονανθράκων και για την μεταφορά τους στις παγκόσμιες αγορές. Είναι αναμενόμενο λοιπόν ότι η εξόρυξη και η ανάγκη που θα προκύψει για την μεταφορά τον πόρων θα έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη των θαλασσίων οδών της Αρκτικής.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι, αν και οι τεχνολογικές βελτιώσεις που ενσωματώθηκαν στο σχεδιασμό και την κατασκευή ενός παγοθραυστικού έχουν βοηθήσει να αυξησει τις επιδόσεις του σε πλεύση στον πάγο, είναι σημαντικό να έχουμε ένα εξειδικευμένο καπετάνιο και πλήρωμα να λειτουργεί το πλοίο, ώστε να αξιοποιεί αυτά τα πλεονεκτήματα στο μέγιστο βαθμό. Για έναν σχεδιαστή η απόδοση των παγοθραυστικών εξαρτάται κυρίως από τους κατασκευαστικούς περιορισμούς των σκαφών και τις δεξιότητες πλοήγησης στον πάγο του πληρώματος. Ως εκ τούτου, η εκπαίδευση και η εμπειρία του πληρώματος ενός παγοθραυστικού αποτελούν σημαντικά στοιχεία για την επίδοσή του αφού ένα πεπειραμένο και έμπειρο πλήρωμα που κατέχει εκτενείς γνώσεις, μπορεί να αποτρέψει ή γρήγορα να ξεπεράσει πολλές δυσκολίες κατά το μιας διαδρομής.

1.2 Απαρχή των παγοθραυστικών

Η ιστορία της κατασκευής παγοθραυστικών πλοίων άρχισε με την ανάπτυξη των πλοίων με ατμοπρόωση. Χωρίς την εξέλιξη του συστήματος πρόωσης αυτού δεν θα μπορούσε να επιχειρηθεί η εξόρμηση στον παγωμένο Αρκτικό. Ένα από τα πρώτα παγοθραυστικά, με όνομα Norwich, κατασκευάστηκε το 1836 για τον ποταμό Hudson. Είχε τροχό/κουπί στη πρύμνη για την πρόωση του και ήταν, για την εποχή του, πολύ αποτελεσματικό άνοιγμα καναλιών, παραμένοντας στην υπηρεσία για 87 χρόνια.

Με το τέλος του δέκατου ένατου αιώνα, τα παγοθραυστικά κατασκευάζονταν πλέον μόνο με έλικα σταθερού βήματος και με προωστήρια εγκατάσταση ατμού. Τα πρώτα παγοθραυστικά δεν είχαν αρκετή ισχύ και η μορφή του κύτους ήταν προσαρμοσμένη στη λογική της ανοικτής θάλασσας με περισσότερο επικλινείς γωνίες πλήρης για να δημιουργεί μια κάθετη δύναμη για να σπάσει ο πάγος μέσω κάμψης. Πολλά καινοτόμα σχέδια προτάθηκαν και κατασκευάστηκαν για να αυξηθεί η αποδοτικότητα των παγοθραυστικών. Για παράδειγμα, η εξαιρετικά επιτυχημένη "sloop-shaped" πλήρη προτάθηκε για πρώτη φορά και κατασκευάστηκε από τον Ferdinand Steinhaus στο Αμβούργο το 1871. Το 1892, Weedermann εφηύρε και κατοχύρωσε μια συσκευή η οποία πρέπει να τοποθετείται μπροστά από ένα πλοίο με πρωραίο τμήμα που δεν είναι κατάλληλο για θραύση πάγου ώστε να αυξάνει τις παγοθραυστικές του ικανότητες. Αυτές οι σχεδιάσεις χρησιμοποιούνται ακόμα σε ολλανδικά ποτάμια και κανάλια.



ΚΕΦ-Ι.1: Εξέλιξη της σχεδίασης των ρωσικών παγοθραυστικών

<i>Polar ship/flag</i>	<i>Time of year</i>	<i>Route/location</i>	<i>Significance</i>
<i>Lenin</i> USSR	Summer 1960	Northern Sea Route	World's first nuclear surface ship commences icebreaking escort duties
<i>Manhattan</i> USA	Autumn 1969	Northwest Passage	Experimental voyages to test the feasibility of commercial tankers in the Arctic
<i>Louis S. St. Laurent</i> and <i>Canmar Explorer II</i> Canada	Aug 1976	Northwest Passage	Successful escort of a drill ship from the Atlantic to the Canadian Beaufort Sea
<i>Arktika</i> USSR	Aug 1977	Murmansk to the North Pole and return	First surface ship to reach the geographic North Pole (17 Aug)
<i>Sibir' and Kapitan Myshevskiy</i> USSR	May–Jun 1978	Northern Sea Route (north of Novosibirskiy Islands)	First high-latitude "trans-Arctic" ice escort
Polar icebreakers and icebreaking carriers USSR	Navigation season 1978–79	Barents and Kara seas	First successful year-round navigation from Murmansk to Dudinka on the Yenisey River
<i>Polar Star</i> and <i>Polar Sea</i> USA	1979–86	Bering, Chukchi, and Beaufort seas	Arctic marine transportation ("trafficability") studies around Alaska
<i>Polar Sea</i> USA	Jan–Mar 1981	Bering Sea to Beaufort Sea	First winter transit to Pt. Barrow, Alaska
<i>Polar Star</i> USA	Dec 1982–Mar 1983	Antarctica	First high-latitude (above 60°S) circumnavigation of Antarctica in modern times
<i>Leonid Brezhnev</i> and 12 other icebreakers USSR	Oct–Nov 1983	North coast of Chukotka, Siberia	Rescue of 50 cargo ships trapped in ice
<i>Arctic</i> Canada	Aug 1985	Bent Horn, Cameron Island	First cargo of crude oil from the Canadian Arctic
<i>Vladivostok</i> and <i>Somov</i> USSR	Jun–Sep 1985?	Near Russkaya Station, Hobbs Coast, Antarctica	Rescue of Soviet Antarctic Expedition flagship drifting in heavy ice
Three SA-15 icebreaking carriers USSR	Nov–Dec 1985	Northern Sea Route	Experimental navigation season extension with sailings from Vancouver to Arkangel'sk
<i>Icebird</i> FRG	Fall 1985–Summer 1986	Australian Antarctic stations and Japan to Prudhoe Bay, Alaska	Bipolar resupply operations to Antarctica and Prudhoe Bay
<i>Polarstern</i> FRG	Jul–Aug 1986	Weddell Sea, Antarctica	Winter oceanographic operations
<i>Sibir'</i> USSR	May–Jun 1987	Central Arctic Basin	Evacuate drift station 27 and establish drift station 29; second surface ship to reach the geographic North Pole (25 May)
SA-15 icebreaking carriers USSR	Summer 1989	Europe to Japan via the Northern Sea Route	Soviet arctic carriers under charter to Western shippers for commercial voyages across the top of the Soviet Union
<i>Rossiya</i> USSR	Aug 1990	Central Arctic Basin	Transit to the North Pole (8 Aug) with Western tourists aboard
<i>Arctic</i> Canada	Jun 1991	Northwest Passage to the Polaris Mine, Little Cornwallis Island	Earliest seasonal surface ship transit in eastern reaches of the Northwest Passages; mine reached 23 Jun
<i>Sovetskiy Soyuz</i> USSR	Jul–Sep 1991	Central Arctic Basin and Northern Sea Route	Transit to the North Pole and along the Northern Sea Route with Western tourists
<i>Oden</i> and <i>Polarstern</i> Sweden and FRG	Aug 1991	Central Arctic Basin	International Arctic Ocean Expedition; reached the North Pole on 7 Sep
<i>Sovetskiy Soyuz</i> Russia	Jul and Aug 1992	Central Arctic Basin	Reached the North Pole on 13 Jul and 23 Aug
<i>Yamal</i> Russia	Jul and Aug 1993	Central Arctic Basin	Reached the North Pole three times on 13 Jul, 8 and 30 Aug
<i>Yamal</i> and <i>Kapitan Branitsyn</i> Russia	Jul 1994	Central Arctic Basin	Reached the North Pole on 21 Jul
<i>Yamal</i> Russia	Aug 1994	Central Arctic Basin	Reached the North Pole on 5 and 20 Aug
<i>Louis S. St. Laurent</i> and <i>Polar Sea</i> Canada and USA	Aug 1994	Trans-Arctic Ocean Bering Strait to Svalbard	Reached the North Pole on 22 Aug; encountered <i>Yamal</i> at the North Pole

2

ΚΕΦ-Ι.2: Σημαντικά ταξίδια των παγοθραυστικών στη σύγχρονη ιστορία

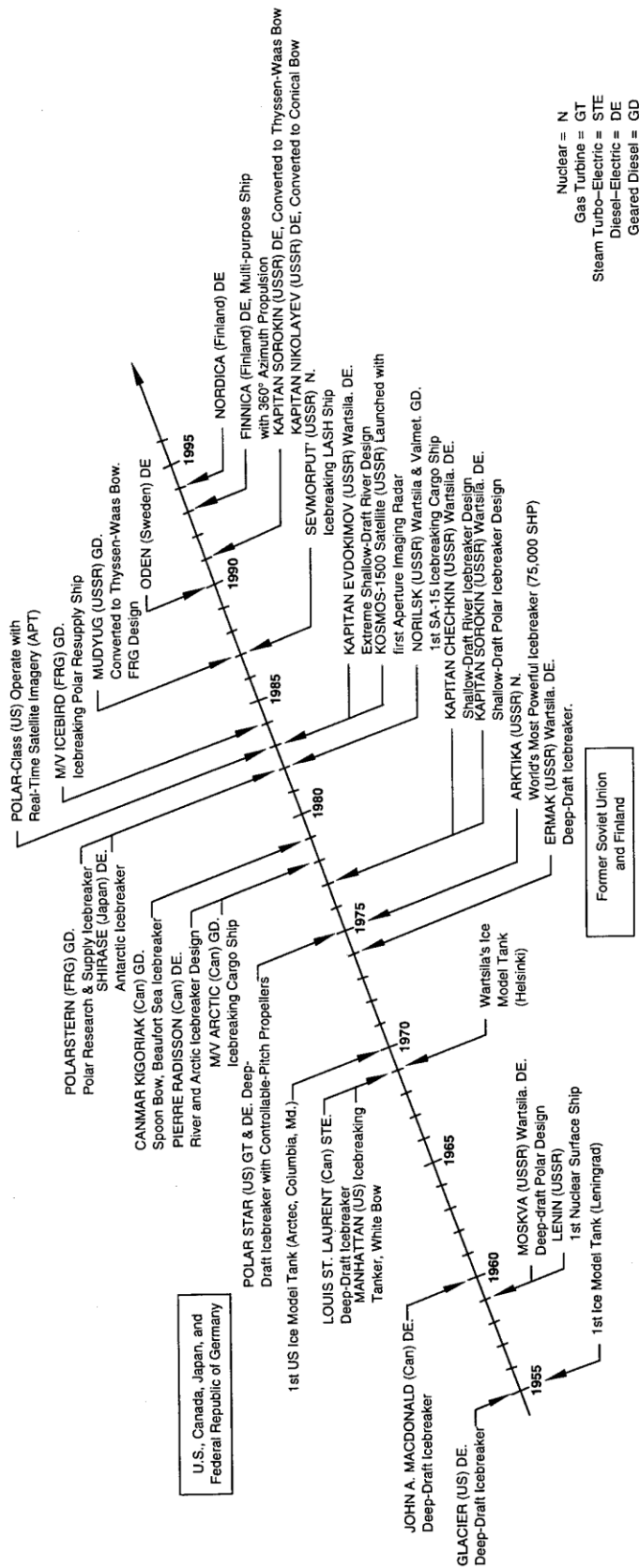
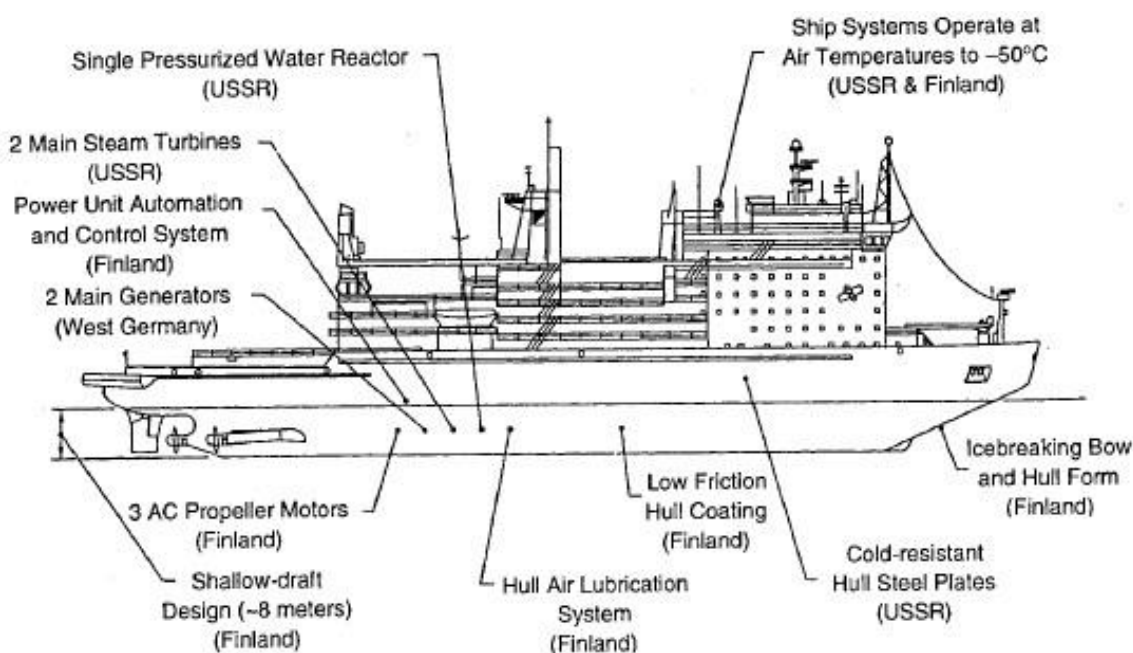


Figure 2. Significant events in the development of polar ship technology since 1955 (after Brigham 1987).

Μέχρι το 1900, ήταν γνωστό ότι, ενώ τα πλοία με αμβλεία πλώρη ήταν αποτελεσματικά στη διάσπαση πάγου σε κλειστές διαδρομές και χώρους, όπως ποτάμια, λίμνες και άλλες προστατευόμενες περιοχές, οι επιδόσεις τους μειώνονταν σημαντικά στο ανοικτό στρώμα πάγου, όπου λόγω της σχετικά ογκώδους πλώρης τους, έσπρωχναν τον πάγο συσσωρεύοντάς τον στην πλώρη και αυξάνοντας την αντίσταση του. Από την άλλη πλευρά, τα πλοία με σφηνοειδή πλώρη και λεπτόγραμμη πρύμνη δεν είχαν καμία τάση να συσσωρεύουν τον πάγο στην πλώρη. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα όλα τα παγοθραυστικά "ανοικτής θάλασσας" από το 1901 και έπειτα, να κατασκευάζονται με σφηνοειδής πλώρη και λεπτόγραμμη πρύμνη. Με την πάροδο των ετών, η σφηνοειδής πλώρη έγινε γνωστή ως η "συμβατική" πλώρη για την κατασκευή των παγοθραυστικών και τα άλλα σχήματα συμπεριλήφθησαν στην κατηγορία των "μη συμβατικών" πλωρών.

Η ανάπτυξη της μορφής της πλώρης παρέμεινε στάσιμη στις αρχές και στα μέσα του 20ου αιώνα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί εν μέρει σε άλλες προτεραιότητες που προέκυψαν από τους δύο παγκόσμιους πολέμους και από την επιβράδυνση της οικονομικής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια της μεγάλης ύφεση στην αρχή της δεκαετίας του 1930. Παρά αυτήν την στασιμότητα στο σχεδιασμό της πλώρης, άλλες καινοτομίες εισήχθησαν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Το ρωσικό παγοθραυστικό Yermak, που χτίστηκε το 1899 και ήταν εξοπλισμένο με μηχανική ισχύ 7,46 MW (10.000 hp), είχε σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη της τεχνολογία των παγοθραυστικών πλέοντας σε περιοχές αδιαπέραστες από τους προκατόχους του. Το 1933, η diesel-ηλεκτρική πρόωση εισήχθη στο σουηδικό παγοθραυστικό Ymer. Το 1947, το καναδικό παγοθραυστικό πλοίο Abgeweit εισήγαγε τις διπλές έλικες οι οποίες ήταν προσαρτημένες στην περιοχή της πλώρης. (Ωστόσο, η χρήση των ελίκων στη πλώρη έχει πλέον διακοπεί λόγω της παρεμβολής τους με τον πάγο.)



ΚΕΦ-1.4: Παράδειγμα προφίλ ενός πυρηνικού παγοθραυστικού πλοίου

1.3 Σύγχρονη ιστορία

Το Σχήμα ΚΕΦ-1.4 δείχνει μία περίληψη των σημαντικών προόδων στην τεχνολογία των πολικών παγοθραυστικών πλοίων κατά τη διάρκεια των τελευταίων τεσσάρων δεκαετιών, από τη Φινλανδία και την πρώην Σοβιετική Ένωση, καθώς και από τις ΗΠΑ, τον Καναδά, τη Γερμανία και την Ιαπωνία. Η Φινλανδία και η Σοβιετική Ένωση μαζί, έχουν σημειώσει τεράστια συμβολή στην ανάπτυξη των πολικών πλοίων. Η Σοβιετική Ένωση χρησιμοποίησε για πρώτη φορά πυρηνική τεχνολογία για να τροφοδοτήσει το παγοθραυστικό Λένιν, που χτίστηκε το 1959 με προωστήρια ισχύ 29 MW (39.000 hp). Η φινλανδική ναυπηγική εταιρεία, Wärtsilä Shipyard (τώρα Kveerner Masa-Yards), κατασκεύασε πολλά παγοθραυστικά για τη Σοβιετική Ένωση και συνέβαλλε εκτεταμένα στην εξέλιξη του σχεδιασμού και ανάπτυξης του συμβατικού κινητήρα στα παγοθραυστικά. Στις μέρες μας, τα τεχνολογικά επιτεύγματα των τελευταίων δεκαετιών χρησιμοποιούνται, πια, στο σύνολό τους συγκεντρωμένα στα νέα παγοθραυστικά, όπως το Taymyr-class (ΚΕΦ-1.4), χτισμένο στο Ελσίνκι με Σοβιετικά συστήματα πυρηνικής πρόωσης που είχαν εγκατασταθεί στην Αγία Πετρούπολη.

Ομοίως, οι εξελίξεις στις ΗΠΑ και τον Καναδά έχουν συμβάλει σε αλλαγές σε βασικούς τομείς της τεχνολογίας των παγοθραυστικών (π.χ., μορφή γάστρας και πλώρης, αεριοστρόβιλοι, και έλικες ελεγχόμενου βήματος). Το 1969, το αμερικανικό τροποποιημένο δεξαμενόπλοιο Μανχάταν κατασκευάστηκε με δεκαπλάσια μετατόπιση από τα προηγούμενα παγοθραυστικά, αυξάνοντας την ικανότητα εμβολισμού. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, οι σύγχρονες τεχνολογίες κύτους και πρόωσης εφαρμόστηκαν και στα πλοία που επιχειρούσαν στην Αρκτική (π.χ., το Ιαπωνικό Shirase, και το γερμανικό Polarstern). Επίσης τα τρία παγοθραυστικά Max Waldeck το 1980, Mudyug το 1986 και Kapitän Sorokin το 1991 ήταν τα πρώτα που κατασκευάστηκαν με την πλήρη μορφής Thyssen-Waas. Τα αποτελέσματα των δοκιμών μεγάλης κλίμακας στην ανοικτή θάλασσα και πάγο δείχνουν ότι αυτή η αλλαγή στην πλώρη του Mudyug αύξησε της παγοθραυστικές ικανότητες του και μείωσε την αντίσταση, μειώνοντας έτσι την εγκατεστημένη ισχύ. Ωστόσο, υπήρχαν προβλήματα τόσο στην ανοικτή θάλασσα με την παρουσία μέτριας συμπεριφοράς σε κυματισμούς όσο και στον πάγο όπου το μπροστινό μέρος του πλοίου μάζευε τον πάγο αυξάνοντας την αντίσταση.

Το 1979, το καναδικό παγοθραυστικό Kigoriak χτίστηκε με πλήρη σε μορφή “sroon-shaped” για επιχειρήσεις στη Θάλασσα Μποφόρ. Εκτεταμένες δοκιμές μεγάλης κλίμακας έδειξαν ότι ακόμη και αυτή η σύγχρονη εκδοχή της “sroon-shaped” πλώρης αντιμετώπιζε και αυτή προβλήματα με την συγκέντρωση πάγου. Ωστόσο, αυτά τα προβλήματα επιλύθηκαν με τη χρήση βαφής και ενός συστήματος διοχέτευσης νερού με σκοπό να μειώσει την τριβή μεταξύ των σπασμένων κομματιών πάγου και του κύτους. Το σύστημα διοχέτευσης νερού αυτό μεταφέρει αρκετούς τόνους νερού κάθε δευτερόλεπτο και το διασκορπά στη κορυφή του πάγου μπροστά από την πλώρη. Αυτό βοηθά τα κομμάτια πάγου να μετακινούνται πιο εύκολα από την περιοχή της πλώρης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, πολλά πλοία στον Καναδά χτίστηκαν με πλήρη “sroon-shaped”. Μερικά από τα πιο πρόσφατα παγοθραυστικά που κατασκευάστηκαν στην Ευρώπη έχουν επίσης

κατασκευαστεί και αυτά με πλήρη της ίδιας μορφής, π.χ., το σουηδικό παγοθραυστικό Oden, που χτίστηκε το 1989, το ρωσικό παγοθραυστικό Karitän Νικολάγιεφ, ανακατασκευάστηκε το 1990, και τα φινλανδικά παγοθραυστικά Finnica και Nordica, που κατασκευάστηκε το 1993 και το 1994.

Με την εισαγωγή των επιστρώσεων χαμηλής τριβής και των βοηθητικών συστημάτων, οι δυνατότητες των σημερινών παγοθραυστικών ενισχύθηκαν σε μεγάλο βαθμό, έτσι ώστε να μπορούν να αποκτήσουν σταθερή απόδοση σε όλους τους τύπους των συνθηκών πάγου. Με επαρκή μετατόπιση, ισχύ και βοηθητικά συστήματα, τα παγοθραυστικά μπορούν πλέον να πλέουν ανεξάρτητα των συνθηκών πάγου, με ασφάλεια όλο το χρόνο στην Αρκτική. Όπως και στο παρελθόν, η κατασκευή των μελλοντικών παγοθραυστικών και των φορτηγών-παγοθραυστικών πλοίων θα συνδέεται στενά με τις οικονομικές συνθήκες και πιέσεις. Τέλος, η επιλογή μεταξύ παγοθραυστικών πλοίων και παγοθραυστικών πλοίων πολλαπλών χρήσεων θα υπαγορεύονται από τις ανάγκες των μελλοντικών εξελίξεων και του εμπορίου.

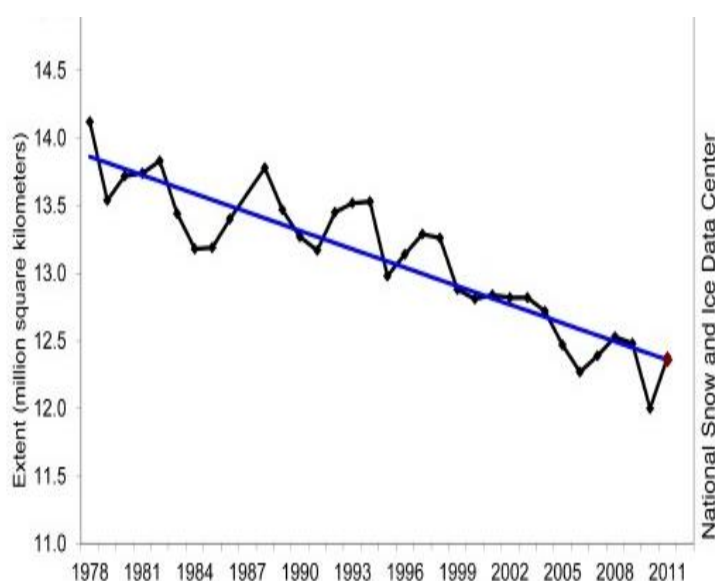
Βιβλιογραφία

- *Northern Sea Route Reconnaissance Study A Summary of Icebreaking Technology*, Devinder S. Sodhi, 1995.

Κεφάλαιο 2^ο : Περιβάλλον πλεύσης

2.1.1 Αναγκαιότητα της πλεύσης στον Αρκτικό κύκλο

Κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές του 1980, το ενδιαφέρον για την έρευνα και την ανάπτυξη της Αρκτικής ήταν πολύ υψηλό λόγω της αναμενόμενης εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη της Αρκτικής μειώθηκε και κατά συνέπεια ο όγκος των σχετικών επενδύσεων μειώθηκαν στο ελάχιστο. Η τάση αυτή άλλαξε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και αρχές της δεκαετίας του 2000, όταν η υπερθέρμανση του πλανήτη έγινε παγκόσμιο θέμα ενδιαφέροντος. Στοιχεία αποκαλύπτουν ότι το κάλυμμα πάγου στην Αρκτική συρρικνώνεται χρόνο με το χρόνο. Σύμφωνα με το Εθνικό Κέντρο Δεδομένων Χιονιού και Πάγου, η έκταση της Αρκτικής μειώνεται με ρυθμό 3,5% ανά δεκαετία (ΚΕΦ-II.1). Αυτές οι περιβαλλοντικές αλλαγές μπορεί να οδηγήσουν στην ανάγκη για επαναξιολόγηση τόσο των θαλάσσιων διόδων εμπορίου όσο και των προσπαθειών εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων της Αρκτικής. Περισσότερο από το 70% του μέσου όρου των πόρων ανεξερεύνητου πετρελαίου εκτιμάται ότι βρίσκεται στις παρακάτω περιοχές στην : Αλάσκα ,Αμερίσια Λεκάνη, Ανατολική Γροιλανδία, Ανατολική Θάλασσα του Μπάρεντς και Δυτική Γροιλανδία . Εκτιμάται επίσης ότι περίπου το 84% του ανεξερεύνητο πετρελαίου και φυσικού αερίου εμφανίζεται στις αντίστοιχες περιοχές. Παρ' όλο που μεγάλο κομμάτι των κοιτασμάτων αυτών είναι αδύνατο να προσεγγισθούν αφού στις μελέτες δεν υπολογίστηκαν παράγοντες, όπως οι επιπτώσεις των μόνιμων πάγων ή το ωκεάνιο βάθος του νερού των ανεξερεύνητων κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, πιστεύεται ότι θα αποτελέσει κερδοφόρα επένδυση. Αυτά τα πρόσφατα γεγονότα που προέκυψαν οδήγησαν στην αναβίωση του ενδιαφέροντος των επενδυτών και κατά συνέπεια των ναυτιλιακών εταιριών οι οποίες έστρεψαν το ενδιαφέρον τους στην μελέτη και σχεδίαση πλοίων ικανών για πλεύση στον Αρκτικό κύκλο.

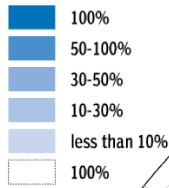


ΚΕΦ-II.1: Μέση έκταση του στρώματος πάγου από το 1979 έως το 2011

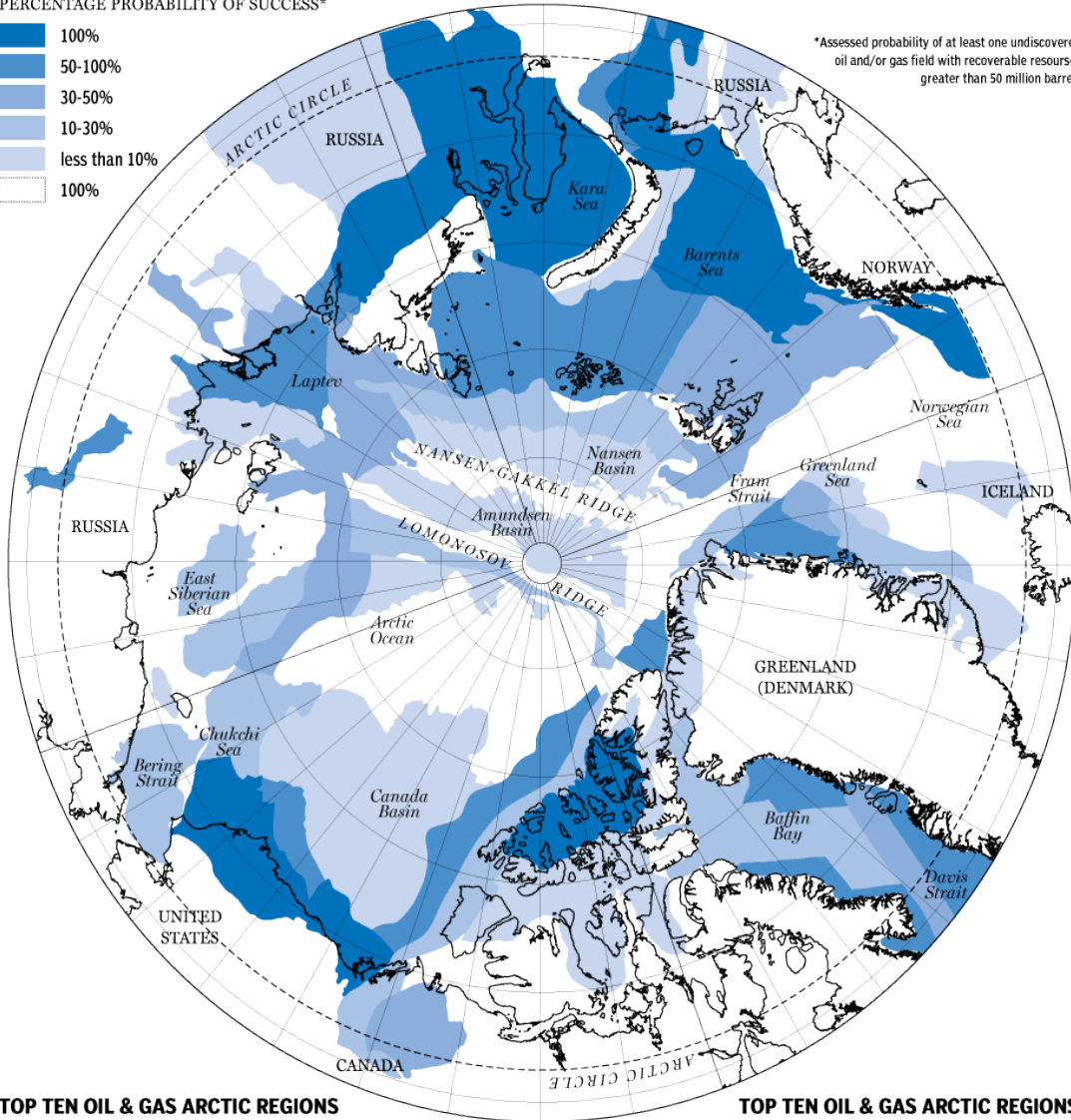
NORTHERN RESERVES

PETROLEUM POTENTIAL OF THE ARCTIC

PERCENTAGE PROBABILITY OF SUCCESS*

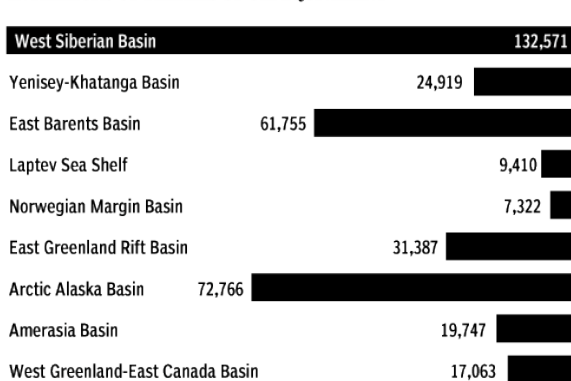


*Assessed probability of at least one undiscovered oil and/or gas field with recoverable resources greater than 50 million barrels

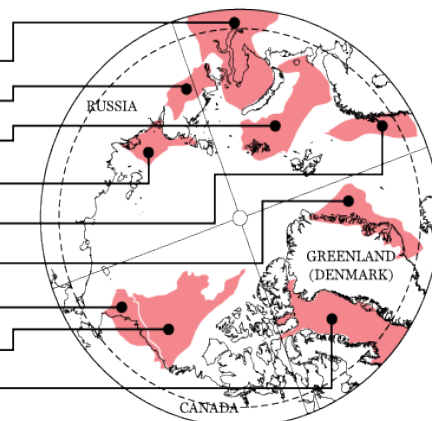


TOP TEN OIL & GAS ARCTIC REGIONS

IN MILLIONS OF BARRELS OF OIL EQUIVALENT



TOP TEN OIL & GAS ARCTIC REGIONS



SOURCE: USGS

RICHARD JOHNSON / NATIONAL POST

ΚΕΦ-ΙΙ.2: Κοιτάσματα στην Αρκτική

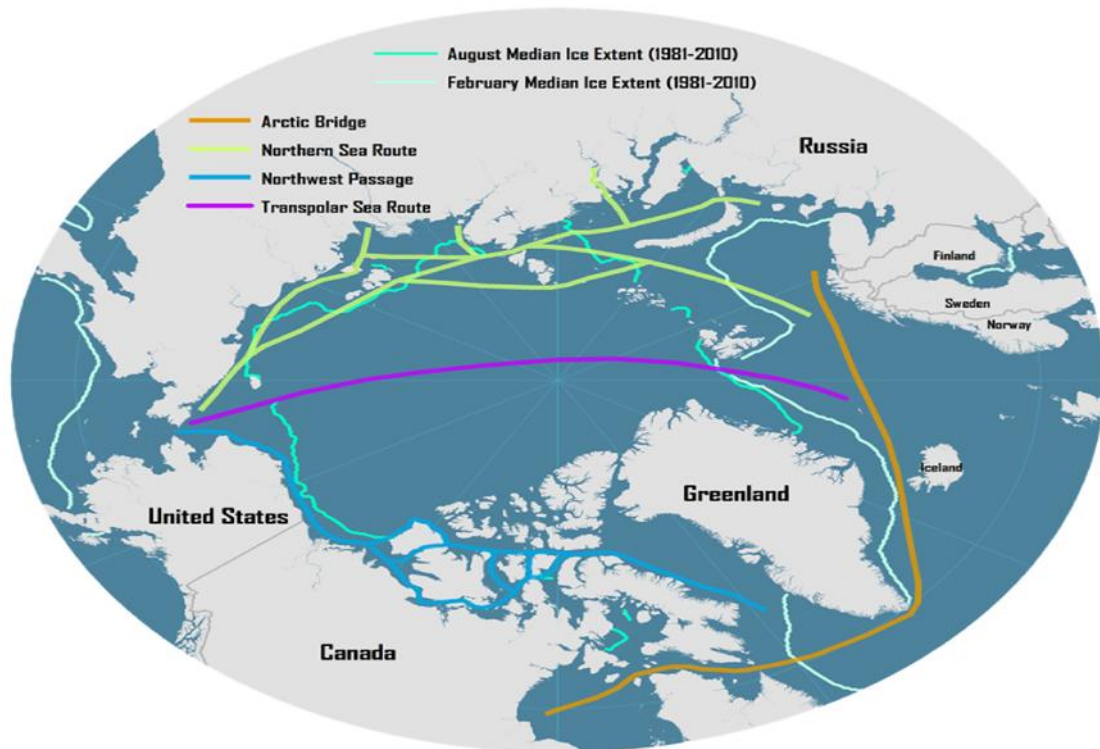
2.1.2 Αρκτικές διαδρομές

Εκτός από το ενδιαφέρον για τα τον ορυκτό πλούτο της αρκτικής, η αλλαγή του κλίματος του πλανήτη προσφέρει νέες ευκαιρίες και για τα διεθνή δίκτυα μεταφορών, ιδίως με την τάση υποχώρησης του πάγου γύρω από τον Βόρειο Πόλο. Αν αυτή η τάση συνεχιστεί, μέρη της Αρκτικής θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πιο αξιόπιστα για την πλοήγηση, τουλάχιστον κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών ή και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Οι κύριες Αρκτικές διαδρομές (ΚΕΦ-II.3) περιλαμβάνουν:

- Τη **Βόρεια Θαλάσσια Διαδρομή (Northern Sea Route)** κατά μήκος της αρκτικής ακτής της Ρωσίας. Η συγκεκριμένη θαλάσσια διαδρομή είναι πιθανό να είναι απαλλαγμένη από πάγο πρώτη και θα μειώσει τη θαλάσσια διαδρομή μεταξύ Ανατολική Ασία και τη Δυτική Ευρώπη από 21.000 χιλιόμετρα , χρησιμοποιώντας τη διώρυγα του Σουέζ , σε 12.800 χιλιόμετρα, μειώνοντας τον χρόνο του ταξιδιού κατά 10-15 ημέρες.
- Το **Βορειοδυτικό Πέρασμα (Northwest Passage)** του Καναδικού Αρκτικού Ωκεανού θα μπορούσε να αρχίσει να χρησιμοποιείται σε τακτική βάση από το 2020, μειώνοντας σημαντικά τις αποστάσεις για τη ναυτιλία. Η θαλάσσια διαδρομή μεταξύ Ανατολικής Ασίας και Δυτικής Ευρώπης θα μειωθεί από 24,000 χιλιόμετρα, χρησιμοποιώντας τη διώρυγα του Παναμά, σε περίπου 13.600 χιλιομέτρων χρησιμοποιώντας το Βορειοδυτικό Πέρασμα. Το 2007 το Βορειοδυτικό Πέρασμα ήταν ανοιχτό κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, για πρώτη φορά στην καταγραμμένη ιστορία, αλλά μένει να δούμε πόσο αξιόπιστο είναι το πέρασμα αυτό.
- Την **Αρκτική Γέφυρα (Arctic Bridge)** που συνδέει το ρωσικό λιμάνι του Μούρμανσκ ή το νορβηγικό λιμάνι Narvik με την καναδική λιμάνι του Τσόρτσιλ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, ως επί το πλείστον για εμπόριο σιτηρών.
- Την **Δια-Αρκτική Θαλάσσια Οδό (Transpolar Sea Route)** η οποία χρησιμοποιεί το κεντρικό τμήμα της Αρκτικής για να συνδέσει τα στενά του Μπερινγκ και τον Ατλαντικό Ωκεανό του Μούρμανσκ. Η διαδρομή αυτή είναι υποθετική, δεδομένου ότι δεν έχουν παρατηρηθεί συνθήκες χωρίς πάγο.

Παρακάτω παρατίθενται 3 παραδείγματα τις μειώσεις της απόστασης ανάμεσα στην **Βόρεια Θαλάσσια Διαδρομή** και τις σημερινές διαδρομές.

Από Rotterdam έως	Yokohama	Shanghai	Vancouver
Suez Canal/Panama Canal	20,600 km	19,300 km	16,400 km
Northern Sea Route	8,500 km	14,875 km	12,850 km



ΚΕΦ-II.3: Χάρτης Αρκτικών διαδρομών

Γενικότερα, παρ' όλα τα πλεονεκτήματά τους, η εξέταση των αρκτικών διαδρομών, για σκοπούς εμπορικής ναυσιπλοΐας, παραμένει ένα θεωρητικό εγχείρημα, κυρίως για τρεις βασικούς λόγους:

- Πρώτον, είναι αβέβαιο σε ποιο βαθμό η υποχώρηση των αιωνίων καλυμμάτων πάγου είναι επιβεβαιωμένο φαινόμενο ή απλώς μέρος ενός μακροπρόθεσμου κλιματικού κύκλου. Ακόμη και αν τα Αρκτικά δρομολόγια έμεναν κανονικά ανοιχτά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, θα εξακολουθούσαν να παραμένουν κλειστά για την εμπορική ναυσιπλοΐα κατά τους χειμερινούς μήνες. Από το 2010, οι συνθήκες ελεύθερης προέλευσης (με απουσία πάγου) για τις περισσότερες ναυτιλιακές διαδρομές της Αρκτικής κράτησαν μόνον περίπου 30 ημέρες. Δεδομένου ότι οι ναυτιλιακές εταιρίες αναζητούν σίγουρες και συνεπείς υπηρεσίες, αυτή η εποχικότητα έχει ως αποτέλεσμα περιορισμένο εμπορικό ενδιαφέρον.
- Δεύτερον, υπάρχει πολύ περιορισμένη οικονομική δραστηριότητα γύρω από τον Αρκτικό Κύκλο, πράγμα που σημαίνει ότι οι ναυτιλιακές υπηρεσίες που διασχίζουν την Αρκτική δεν έχουν καμία ευκαιρία για ενεργό εμπόριο καθώς τη διασχίζουν. Έτσι, σε αντίθεση με άλλες μεγάλες εμπορικές ναυτιλιακές γραμμές υπάρχει περιορισμένη δυνατότητα δημιουργίας εσόδων για τη ναυτιλία κατά μήκος της διαδρομής της Αρκτικής, η οποία απαγορεύει την εμφάνιση κόμβων μεταφόρτωσης και ανεφοδιασμού. Η Αρκτική είναι κατάλληλη για εμπόριο του οποίου οι υπηρεσίες συνδέουν άμεσα ένα λιμάνι (πηγή) με ένα άλλο λιμάνι (προορισμό). Αυτή η κατάσταση θα μπορούσε να βελτιωθεί εάν οι εκμεταλλεύσιμοι πόροι

(πετρέλαιο και τα ορυκτά) γύρω από την Αρκτική άρχιζαν να εξάγονται σε μεγαλύτερες ποσότητες, πράγμα που θα ευνοούσε την χύδην ναυτιλία.

- Η Αρκτική παραμένει άγνωστο τοπίο όσον αφορά την πρόγνωση του καιρού, γραφημάτων και την οικοδόμηση ενός συστήματος πλοήγησης, γεγονός που συνεπάγεται αβεβαιότητες και αναξιопιστία στην πλοήγηση στην περιοχή. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να γίνουν σημαντικές προσπάθειες για να εξασφαλισθεί ότι η πλοήγηση μπορεί να λάβει χώρα με ένα ασφαλή τρόπο και με καλά καθορισμένες και ελεγχόμενες διαδρομές. Επίσης, τα πλοία πρέπει να έχουν πιστοποιηθεί για να πλέουν σε αρκτικές συνθήκες, γεγονός που αυξάνει το κόστος.

Με βάση όλα τα παραπάνω επιχειρήσεις θαλάσσιων μεταφορών δεν έχουν αρχίσει ακόμη να ξεετάζουν σοβαρά την εκμετάλλευση της Αρκτικής. Παρόλα αυτά, η άνοδος των τιμών των καυσίμων των πλοίων και το slow-steaming μπορεί να θεωρηθούν κίνητρα για την ανάπτυξη εξειδικευμένων υπηρεσιών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν την Αρκτική ως συντόμευση μεταξύ των μεγάλων αγορών του βόρειου ημισφαιρίου. Με αυτόν τον τρόπο, οι ναυτιλιακές υπηρεσίες θα έχουν τη δυνατότητα να μετριάσουν την απόσταση με αποτέλεσμα μείωση στην ταχύτητα καθώς και στην κατανάλωση καυσίμων.

2.2.1 Γενική Περιγραφή του Στρώματος Πάγου

Η περιγραφή των συνθηκών του πάγου με έναν τρόπο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό των πλοίων διαφέρει από τον γεωφυσικό τρόπο που περιγράφεται ο πάγος. Έτσι, είναι χρήσιμο να εξετάσουμε πώς ένας σχεδιαστής βλέπει την ύπαρξη των στρωμάτων πάγου.

Ο πάγος καλύπτει κυρίως θάλασσες που βρίσκονται ως επί το πλείστον στα υψηλά βόρεια ή νότια γεωγραφικά πλάτη (Αρκτική και Ανταρκτική), όπου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές και οι ώρες της ημέρας είναι σύντομες το χειμώνα. Ο θαλάσσιος πάγος μπορεί, ωστόσο, να βρεθεί σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη, όπως η Κασπία Θάλασσα. Οι κύριες καιρικές παράμετροι που αποτελούν τη βάση του σχεδιασμού για τα πλοία περιλαμβάνουν:

- Περιγραφή του καλύμματος του πάγου.
- Τη θερμοκρασία της θάλασσας και του αέρα.
- Τη διάρκεια των διαφόρων περιόδων.

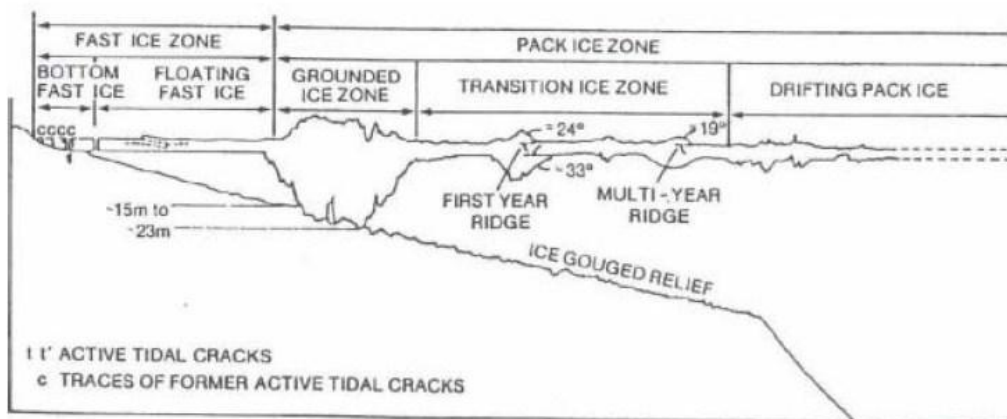
Το φυσικό κάλυμμα του πάγου είναι συνήθως δυναμικό (*Drifting pack ice*), κινούμενο από τις κινητήριες δυνάμεις που προκαλούνται από τον άνεμο ή τα διάφορα ρεύματα. Οι κινητήριες δυνάμεις αυτές σπάνε το κάλυμμα πάγου, δημιουργώντας είτε πεδιάδες πάγου όταν τα επίπεδα αποκλίνουν είτε κορυφογραμμές όταν τα πεδία συγκλίνουν και συγκρούονται μεταξύ τους. Οι κορυφογραμμές πάγου (*Ice ridges*) αποτελούν το μεγαλύτερο εμπόδιο για την πλεύση αφού ακόμη και μικρά υψώματα πάγου μπορούν να αποτελέσουν εμπόδιο για το πλοίο. Οι κορυφογραμμές αυτές έχουν τριγωνική ή τραπεζοειδή διατομή και οι μεγαλύτερες κορυφογραμμές είναι περίπου 30 μέτρα πάχος. Έτσι, ένα τυπικό περιβάλλον πλεύσης στον Αρκτικό κύκλο αποτελείται από κάποιο τμήμα πάγου καθώς και ανοικτή θάλασσα με κορυφογραμμές πάγου διάσπαρτα ανάμεσα τους.

Η κίνηση του πάγου δημιουργεί διαφορετικές ζώνες. Κοντά στην ακτή είναι η στάσιμη ζώνη πάγου (*Fast ice zone*) όπου ο πάγος δεν σπάει και μένει στάσιμος, λόγω της στήριξης του από την στεριά ή από κορυφογραμμές που είναι υψηλότερες από το βάθος της θάλασσας (*Grounded ice zone*). Σε ορισμένες ακτές αυτή η ζώνη είναι εκτεταμένη (για παράδειγμα, η Θάλασσα Πιτσόρα στη Ρωσία), αν και σε απότομες ακτές, χωρίς νησιά, αυτή η ζώνη μπορεί να είναι αμελητέα (όπως στις βόρειο-ανατολικές ακτές της Σαχαλίνης). Έξω από τη ζώνη αυτή, ο πάγος σπάει και κινείται. Η ζώνη όπου γίνεται αισθητή η επίδραση της ακτογραμμής ονομάζεται μεταβατική ζώνη. Παραδείγματα αυτού του είδους θαλασσών είναι η θάλασσα Μποφόρ (Beaufort Sea) και εκείνη της βορειότερης Βαλτικής (δυτικοί άνεμοι ωθούν τον πάγο κατά τη φινλανδική ακτή).

Σε αυτές τις μεταβατικές ζώνες (*Transition ice zone*) όπου το κάλυμμα του πάγου συχνά συγκλίνει, η κάλυψη της θαλάσσιας επιφάνειας τείνει να είναι ολική με μεγάλες κορυφογραμμές. Εάν ο πάγος αποκλίνει στη ζώνη μετάβασης η κάλυψη τείνει να είναι μικρότερη και οι κορυφογραμμές λιγότερο έντονες. Το μέγεθος της κορυφογραμμής στη μεταβατική ζώνη είναι στοχαστικό. Τα στατιστικά στοιχεία των κορυφογραμμών έχουν

μελετηθεί εντόνως και συχνά συνάγεται το συμπέρασμα ότι το μέγεθος τους (και πυκνότητα) ακολουθεί μια εκθετική κατανομή πιθανοτήτων.

Τέλος, περιμετρικά της μεταβατικής ζώνης βρίσκεται η ζώνη συνεχόμενου πάγου (*Pack ice zone*). Είναι ωστόσο δύσκολο να δούμε τη διαφορά μεταξύ της μεταβατικής ζώνης και της συνεχιζόμενης ζώνης πάγου και αυτή η διαφορά δεν έχει σημασία για το σχεδιασμό του πλοίου. Αυτές οι διαφορετικές ζώνες πάγου απεικονίζονται στην Εικόνα ΚΕΦ-II.4 :



ΚΕΦ-II.4: Γεωμετρία του πάγου στην επιφάνεια της θάλασσας

Συνεχίζοντας, θα εστιάσουμε στην μορφή της επιφάνειας του πάγου. Ο πάγος ο οποίος βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας ονομάζεται *Sail* και ο πάγος που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια *Keel*. Το μέγεθος της κορυφογραμμής εξαρτάται από το πάχος του πάγου και από τις δυνάμεις που τον κινούν. Για παράδειγμα στην Βαλτική το *sail* του πάγου εκτίνεται μεταξύ 1 με 2 μέτρα και το *keel* εκτίνεται μεταξύ 7 με 12 μέτρων. Στις πολικές περιοχές το πάχος του *keel* μπορεί να φτάσει από 20 έως 30 μέτρα ή και περισσότερο. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα, οι κορυφογραμμές αυτές λόγω του μεγάλου πάχους τους φτάνουν μέχρι τον πυθμένα της θάλασσας.

Με το πέρασ του χρόνου, το νερό μεταξύ των σπασμένων κομματιών του *sail*, *keel* και του στρώματος πάγου παγώνει, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πυκνού ενοποιημένου στρώματος συσσωρευμένου πάγου. Το ενοποιημένο αυτό στρώμα πάγου είναι σε πάχος περίπου 1,4 με 1,8 φορές μεγαλύτερο από το προηγούμενο στρώμα, αποτελεί την προαναφερόμενη κορυφογραμμή πίεσης (*pressure ridge*) και θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια στην πορεία του πλοίου.

Άλλη μία χαρακτηριστική μορφή πάγου αποτελεί το *rubble field* (χαλικωτό πεδίο) ή αλλιώς *hutmocked ice* (λοφώδης πάγος) το οποίο αποτελείται από κομμάτια σπασμένου πάγου τα οποία προέρχονται κυρίως από την επαφή του πάγου με την στεριά ή την επαφή του *keel* με τον πυθμένα της θάλασσας ή από την μεταβατική ζώνη ως αποτέλεσμα της πίεσης που τους ασκείται από τις δυνάμεις που ασκούνται στον πάγο. Όπως και το κλασικό στρώμα πάγου, ο λοφώδης πάγος και οι κορυφογραμμές πίεσης οι οποίες επιβιώνουν την περίοδο τήξης τους, παρομοιάζουν τα χαρακτηριστικά του πολυετούς πάγου, δηλαδή αποτελούνται από πάγο με μεγαλύτερη αντοχή και μειωμένη περιεκτικότητα σε αλάτι ενώ το σχήμα τους

γίνεται λείο. Ο πολυετής λοφώδεις πάγοι και κορυφογραμμές πίεσης αποτελούν με τη σειρά τους σημαντικό εμπόδιο στην πορεία των πλοίων.

Τέλος, κομμάτια πολυετούς πάγου που σχηματίστηκαν σε κλειστούς κόλπους και έχουν ικανό πάχος μπορεί να αποκοπούν από την περιοχή αυτή και να επιπλεύσουν προς την ανοικτή θάλασσα προβάλλοντας με τη σειρά τους εμπόδιο στην πλεύση του πλοίου. Παρόμοια προβλήματα δημιουργούν και τα παγόβουνα, τα οποία είναι μεγάλα κομμάτια πάγου τα οποία αποκόπηκαν από τις άκρες παγετώνων και σκορπίστηκαν στην ανοικτή θάλασσα στην αρκτική και υποαρκτική ζώνη.

2.2.2 Περιγραφή των κυριότερων ειδών πάγου σύμφωνα με την ηλικία τους

Η ηλικία του πάγου είναι σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητές του. Για παράδειγμα, η αντοχή του πάγου εξαρτάται από το ποσοστό σε θαλασσινό νερό στον όγκο του πάγου δηλαδή το ποσοστό αλατότητας. Το ποσοστό αυτό θαλασσινού νερού μειώνεται σημαντικά όταν το στρώμα πάγου λιώνει την περίοδο του καλοκαιριού και του φθινόπωρου αφού το χλωριούχο νάτριο διοχετεύεται μέσω των πόρων ξανά στη θάλασσα. Για αυτό το λόγο και ο πάγος που έχει 'επιβιώσει' πολλές περιόδους και έχει λιγότερο ποσοστό άλατος στον όγκο, έχει μεγαλύτερη αντοχή και φέρει μεγαλύτερη αντίσταση κατά την παγοθραυστική διαδικασία.

Η κατηγοριοποίηση του πάγου σύμφωνα με την ηλικία του παρατίθεται παρακάτω (η ονοματολογία των ειδών πάγου θα παρατεθεί στα αγγλικά λόγω απουσίας ελληνικής):

New ice

Χρησιμοποιείται ως όρος για τον πάγο που σχηματίστηκε πρόσφατα το οποίο περιλαμβάνει: *frazil ice, grease ice, slush, shuga and nilas*.

Frazil ice

Με τον όρο 'Frazil ice' αναφερόμαστε στη αρχική δομή του θαλάσσιου πάγου. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, πρόκειται για ένα λεπτό στρώμα πάγου μόλις μερικά εκατοστά το οποίο είναι διεσπαρμένο στην επιφάνεια της θάλασσας.



ΚΕΦ-ΙΙ.5: Frazil Ice

Grease ice

Αργότερα στην δημιουργία του θαλάσσιου πάγου και αφού το στρώμα πάγου συνεχίσει να παγώνει έχουμε την περαιτέρω πήξη του και τη δημιουργία του λεγόμενου 'Grease ice'. Το στρώμα αυτό πάγου συμπεριφέρεται σαν υγρό υψηλού ιξώδους.



ΚΕΦ-II.6: Grease Ice

Slush

Χιόνι το οποίο έχει αναμιχθεί με θαλασσινό ή μη νερό το οποίο μπορεί να βρίσκεται τόσο στην επιφάνεια της θάλασσας όσο και στην στεριά. Έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την παραπάνω κατηγορία πάγου.

Shuga

Πρόκειται για συγκέντρωση κομματιών πάγου διαμέτρου μερικών εκατοστών τα οποία δημιουργήθηκαν από τις παραπάνω κατηγορίες πάγου ή από κομμάτια πάγου που προϋπήρχαν στο βυθό της θάλασσας.



ΚΕΦ-II.7: Shuga

Nilas

Μια λεπτή ελαστική επιφάνεια πάγου η οποία κάτω από πίεση ή κάμψη λόγω των κυμάτων μπορεί να σπάσει λαμβάνοντας τη μορφή που φαίνεται παρακάτω . Έχει αδιαφανής μορφή, φτάνει μέχρι 10 εκατοστά πάχος και μπορεί να χωριστεί σε δύο υποκατηγορίες : dark nilas και light nilas ανάλογα με το χρώμα του στρώματος.



ΚΕΦ-II.8: Nilas

Young ice

Με τον όρο 'Young ice' αναφερόμαστε στην συνένωση πάγου τύπου 'rancake ice' με το παραμένον στρώμα πάγου δημιουργώντας ένα στρώμα πάχους από 10 έως 30 εκατοστά. Οι κρύσταλλοι του πάγου αυτού έχουν 1 χιλιοστό διάμετρο και από πλευρά της ηλικίας κατηγοριοποιείται ανάμεσα στον πάγο τύπου 'nilas' και πάγο πρώτου χρόνου. Τέλος, χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες: grey ice και grey-white ice.

Grey ice

Η υποκατηγορία αυτή έχει πάχος 10-15 εκατοστά και είναι πιο εύθραυστο από τον τύπο 'nilas'.

Grey-white ice

Η υποκατηγορία αυτή έχει πάχος 15-30 εκατοστά και είναι εξίσου εύθραυστο με την παραπάνω κατηγορία.



ΚΕΦ-II.9: Grey-White Ice

First-year ice

Μόλις σχηματιστεί το πρώτο στερεό στρώμα πάγου αρχίζει η διαδικασία δημιουργίας του πάγου πρώτου χρόνου (first-year ice) καθώς το στρώμα του προϋπάρχοντος νέου πάγου (young ice) συνεχίζει να μεγαλώνει με κατεύθυνση το βυθό της θάλασσας. Το πάχος του στρώματος αυτού ποικίλει ανάλογα με την υποκατηγορία στην οποία ανήκει. Υπάρχουν 3 υποκατηγορίες πάγου πρώτου χρόνου : ο λεπτός πάγος (30-70 εκατοστά), ο μέσου πάχους πάγος (70-120 εκατοστά) και ο μεγάλου πάχους πάγος (120-200 εκατοστά). Τέλος, υπάρχει περίπτωση το πάχος του στρώματος αυτού να ξεπεράσει τα 200 εκατοστά σε περίπτωση δημιουργίας κορυφογραμμής.



ΚΕΦ-ΙΙ.10: First-year Ice

Second-year ice

Ο πάγος δεύτερου χρόνου είναι, όπως δείχνει και το όνομά του, ένα στερεό στρώμα πάγου που επιβίωσε το λιώσιμο της δεύτερης καλοκαιρινής περιόδου. Επειδή είναι παχύτερο και μικρότερης πυκνότητας από τον πάγο πρώτου χρόνου επιπλέει σε μεγαλύτερο ύψος και λόγω της μειωμένης αλατότητας του έχει μεγαλύτερη αντοχή στην θραύση από τον πάγο πρώτου πάγου. Το είδος του πάγου αυτού είναι το πιο κοινό είδος πάγου που συναντούμε στην Ανταρκτική και σε κάποιες περιοχές της Αρκτικής.

Το στρώμα του πάγου αυτού αποτελείται από κορυφογραμμές (ridges) και κοιλάδες (rafts) και γενικά η μορφή της επιφάνειάς του είναι αρκετά τραχύτερη από εκείνη του πρώτου χρόνου.

Multi-year ice

Με τον όρο 'Multi-year ice' αναφερόμαστε σε στρώμα πάγου πάχους τουλάχιστον 3 μέτρα που επιβίωσε παραπάνω από δύο καλοκαιρινές περιόδους. Αποτελείται από νεοδημιουργηθείς κορυφογραμμές μεγάλου πάχους που ονομάζονται 'hummocks' και έχει σχεδόν μηδενική αλατότητα.

2.2.3 Περιγραφή των κυριότερων ειδών πάγου σύμφωνα με την μορφή τους

Η μορφή την οποία έχει αποκτήσει το στρώμα πάγου είναι μεγάλης σημασίας για την εξέταση των φορτίσεων που θα ασκηθούν κατά την παγοθραυστική διαδικασία στη δομή του πλοίου.

Brash ice

Πρόκειται για συγκέντρωση κομματιών πάγου διαμέτρου έως και 2 μέτρα τα οποία προέρχονται από διάσπαση παλαιότερων στρωμάτων πάγου. Το είδος του πάγου αυτού είναι κοινό κυρίως σε περιοχές όπου διασταυρώνονται θαλάσσια ρεύματα.



ΚΕΦ-II.11: Brash Ice

Fast ice

Πρόκειται για ένα στρώμα θαλάσσιου πάγου το οποίο δημιουργείται και παραμένει παράλληλα με την ακτογραμμή ή μεταξύ στρωμάτων πάγου και παγόβουνων. Το είδος του πάγου αυτού μπορεί να δημιουργεί επί τόπου από το θαλασσινό νερό ή από την συγκέντρωση πλατιών κομματιών πάγου που βρέθηκαν στην ακτή λόγω των διάφορων θαλασσίων ρευμάτων και το μήκος τους μπορεί να εκτείνεται από μερικά μέτρα έως πολλές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Μετά τη δημιουργία του ενσωματώνεται σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες : old, second-year, ή multiyear.



ΚΕΦ-II.12: Fast Ice

Floe

Με τον όρο 'Floe' εννοούμε οποιαδήποτε συνεχή επιφάνεια πάγου και την κατηγοριοποιούμε σύμφωνα με το μέγεθός της:

- Giant: μέχρι 10 χιλιόμετρα μήκος
- Vast: 2-10 χιλιόμετρα μήκος
- Big: 500-2000 μέτρα μήκος
- Medium: 100-500 μέτρα μήκος
- Small: 20-100 μέτρα μήκος
- Cake ice: <20 μέτρα μήκος



ΚΕΦ-II.13: Floe

Pack ice

Πρόκειται για όρο τον οποίο χρησιμοποιούμε για να αναφερθούμε σε οποιαδήποτε συγκέντρωση στρωμάτων πάγου εκτός του τύπου 'fast ice' χωρίς να μας ενδιαφέρει το είδος του. Το είδος του στρώματος αυτού κατηγοριοποιείται σύμφωνα με την αναλογία επιφάνειας πάγου με την συνολική επιφάνεια και οι κατηγορίες είναι: πολύ ανοιχτή (με την αναλογία να κυμαίνεται από 10% έως 30%), ανοιχτή (40% με 60%, όπου πολλά κομμάτια πάγου είναι σε επαφή), κλειστή (70%-90%), πολύ κλειστή (90% με 99%), και συνεχής (100%, όπου τα κομμάτια πάγου είναι ενωμένα).



ΚΕΦ-II.14: Pack Ice

Pancake ice

Κυρίως κυκλικού σχήματος κομμάτια πάγου από 30 εκατοστά έως 3 μέτρα σε διάμετρο και 10 εκατοστά πάχος το οποίο αυξάνεται περιμετρικά του κομματιού λόγω της επαφής μεταξύ. Προέρχεται κυρίως από κομμάτια άλλων ειδών πάγου όπως ice, shuga, nilas ή slush τα οποία παίρνουν το σχήμα τους λόγω επαφής μεταξύ τους και από τους διάφορους κυματισμούς.



ΚΕΦ-II.15: Pancake Ice

Rafting

Λόγω των δυνάμεων που ασκούνται από τα ρεύματα αέρα και θάλασσας τα διάσπαρτα κομμάτια πάγου έρχονται σε επαφή και ενώνονται μεταξύ τους. Το είδος του πάγου αυτού αποτελείται από νεοδημιουργηθέν πάγο με πάχος από 40 μέχρι 60 εκατοστά. Για πάχος μεγαλύτερο από 60 εκατοστά η σύγκρουση των κομματιών πάγου είναι πιθανότερο να δημιουργήσει κορυφογραμμές (ridges, βλέπε παρακάτω) παρά την παρακάτω συνένωση (rafting).



ΚΕΦ-II.16: Rafting

Ridging (Κορυφογραμμή)

Η κορυφογραμμή δημιουργείται από σπασμένο στρώμα πάγου το οποίο ωθήθηκε προς τα πάνω. Αυτό προέρχεται από τη σύγκρουση μεταξύ δύο στρωμάτων και την ένωσή τους σε ένα ενιαίο. Οι κορυφογραμμές οι οποίες είναι σχετικά νέες έχουν τραχεία μορφή ενώ εκείνες που έχουν επιβιώσει την περίοδο του καλοκαιριού έχουν εξομαλυνθεί. Το βυθισμένο τμήμα της κορυφογραμμής λέγεται keel ενώ το υψωμένο sail.



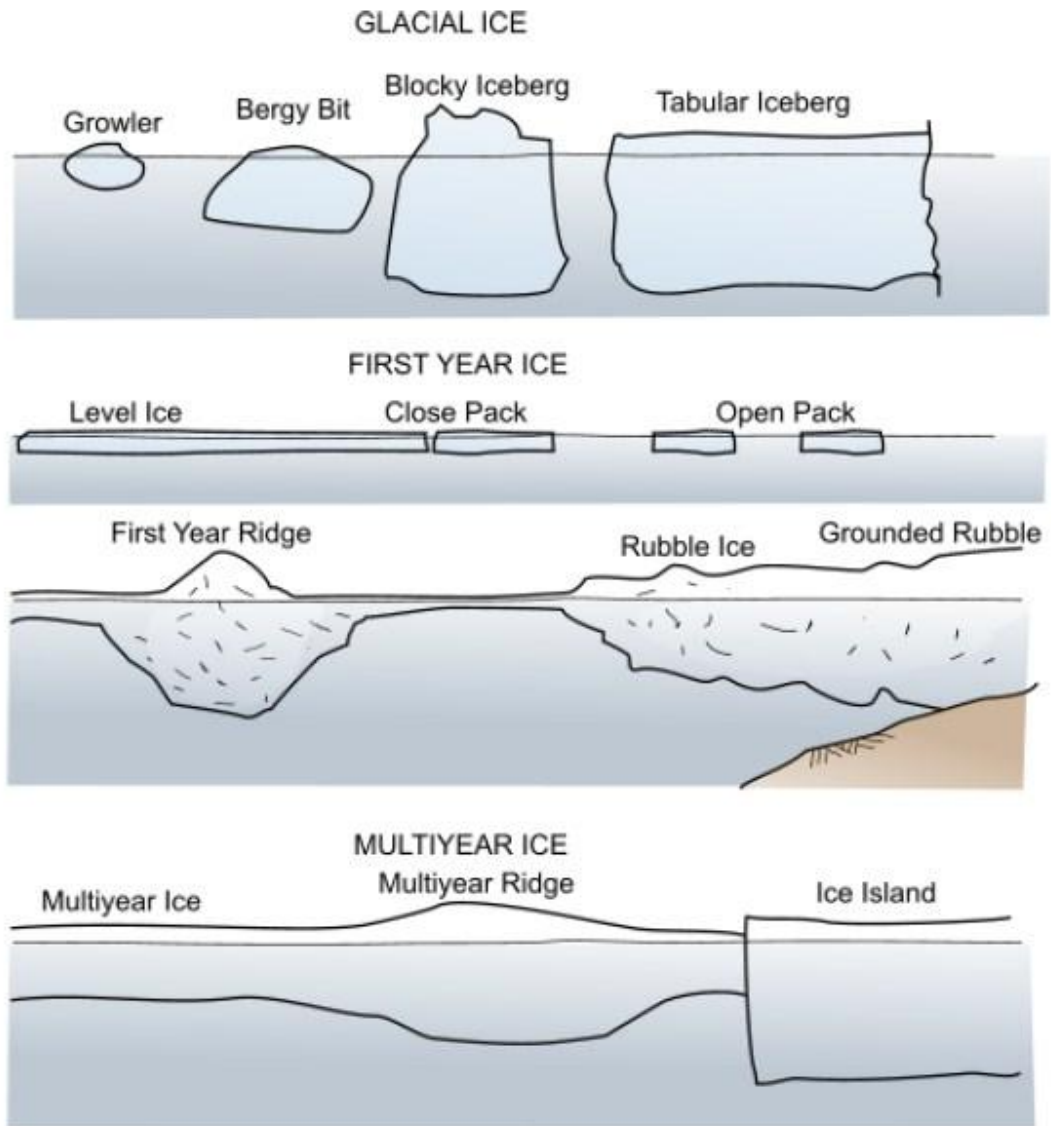
ΚΕΦ-ΙΙ.17: Ridging

Iceberg (Παγόβουνο)

Το παγόβουνο πρόκειται για ένα τεράστιο κομμάτι πάγου, το οποίο δεν έχει συγκεκριμένο σχήμα, έχει ύψος μεγαλύτερο από 5 μέτρα και αποκολλήθηκε από κάποιον παγετώνα. Πρόκειται για μεγάλα κομμάτια πάγου που επιπλέουν στην θάλασσα και δεν αποτελούνται από θαλασσινό νερό.



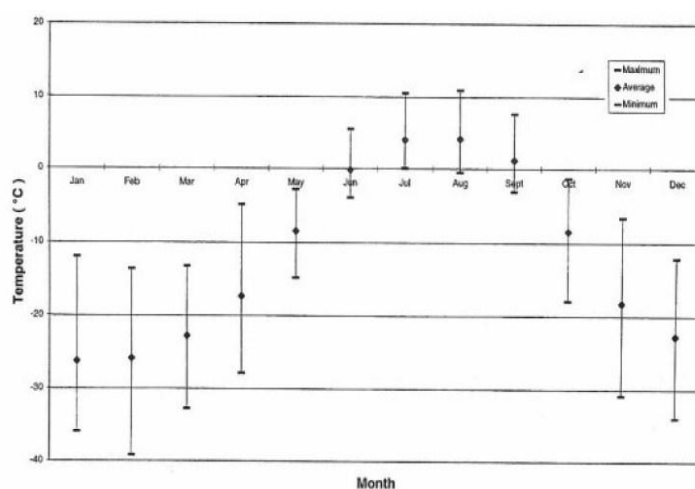
ΚΕΦ-ΙΙ.18: Iceberg



ΚΕΦ-ΙΙ.19: Σύγκριση διαφόρων ειδών πάγου

2.3 Καιρικές Συνθήκες στην Αρκτική

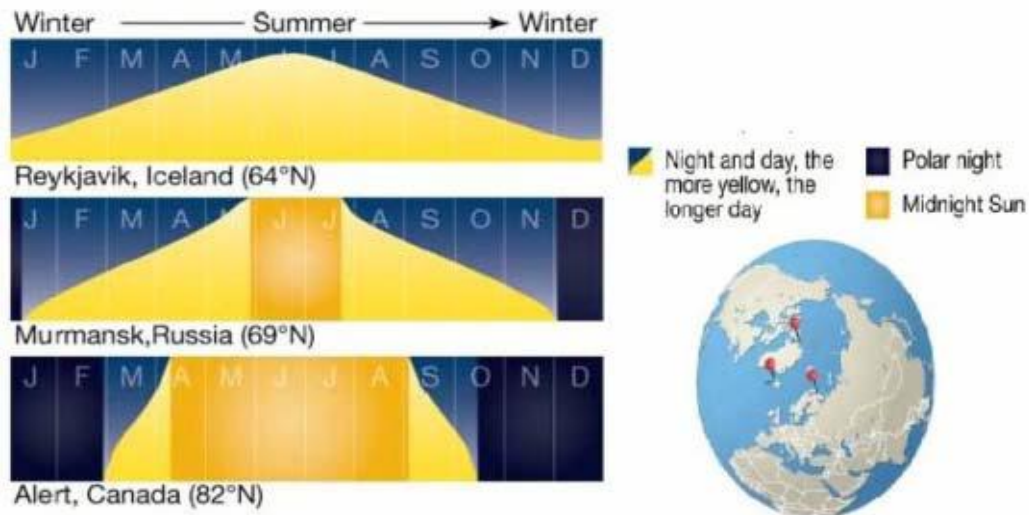
Οι χαμηλές θερμοκρασίες πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό του πλοίου. Στις βορειότερες περιοχές της Αρκτικής συχνά συναντούμε έως -40 C . Η χαμηλή θερμοκρασία αυτή επηρεάζει τα υλικά κατασκευής και θέτει επίσης τις απαιτήσεις για τα μηχανήματα καταστρώματος, διαμονής και κύριας μηχανής. Τυπική προϋπόθεση είναι ότι το πλοίο πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί σε θερμοκρασία -35 C . Επίσης, η θερμοκρασία θα πρέπει να ορίζεται προσεκτικά, αφού η τιμή που μας ενδιαφέρει είναι κυρίως ο μέσος όρος. Η μέση θερμοκρασία στο παρακάτω διάγραμμα αντιπροσωπεύει τη μέση ημερήσια θερμοκρασία σε όλο το εύρος του έτους. Τέλος, η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού είναι απαραίτητη για τον καθορισμό των συστημάτων ψύξης του πλοίου όπου χρησιμοποιείται συνήθως η θερμοκρασία των -2°C .



ΚΕΦ-II.20: Εύρος θερμοκρασίας ανά μήνα

Σε χαμηλές θερμοκρασίες, όταν όμως δεν υπάρχει στρώμα πάγου, το σπρέι της θάλασσας μπορεί να παγώσει τα καταστρώματα και την υπερκατασκευή. Ο ψεκασμός δημιουργείται κυρίως από το κύμα της πλώρης του πλοίου και κατευθύνεται προς το κατάστρωμα από τον ισχυρό άνεμο. Έτσι, για κατεύθυνση ανέμου $\pm 45^{\circ}$ από την τρόπιδα προκαλούνται πιο έντονα φαινόμενα. Μέτρα αντιμετώπισης, όπως αλλαγή της πορείας ή της ταχύτητας είναι οι καλύτεροι τρόποι για την αποφυγή δημιουργίας πάγου, αλλά χρειάζεται και ο αντίστοιχος κατάλληλος σχεδιασμός.

Τέλος, η ορατότητα είναι συχνά περιορισμένη σε θάλασσες που καλύπτονται από πάγο. Μειωμένη ορατότητα μπορεί να είναι αποτέλεσμα βροχής, χιονιού ή ομίχλης. Σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη, επίσης, την ημερήσια περίοδο κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η χρονική περίοδος κατά την οποία ο ήλιος είναι πάνω από τον ορίζοντα είναι περιορισμένη και οι περισσότερες από τις εργασίες πρέπει να εκτελούνται στο σκοτάδι. Τέλος, μέτρα για τη βελτίωση της ορατότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικά στο σχεδιασμό της γέφυρας του πλοίου.



ΚΕΦ-II.21: Ημερήσια και Νυκτερινή διάρκεια στην Αρκτική

2.4 Κύριοι παράμετροι του πάγου

Ένα πλοίο το οποίο πλέει σε φυσικό, πρώτου χρόνου πάγο συναντά ανάλογο πάχος, ποσοστό ανοικτής θάλασσας και κορυφογραμμές. Η περιγραφή του τρόπου διέλευσης των πλοίων από τέτοιου είδους πάγο απαιτεί τις παρακάτω πληροφορίες:

Κάλυψη του πάγου C *Μερίδα της επιφάνειας της θάλασσας που καλύπτεται από πάγο.*

Επίπεδο πάχος του πάγου h_i *Εάν υπάρχουν πολλά διαφορετικά πάχη, αυτά δίνονται σε σχέση με την κάλυψη της περιοχής κάθε πάχους.*

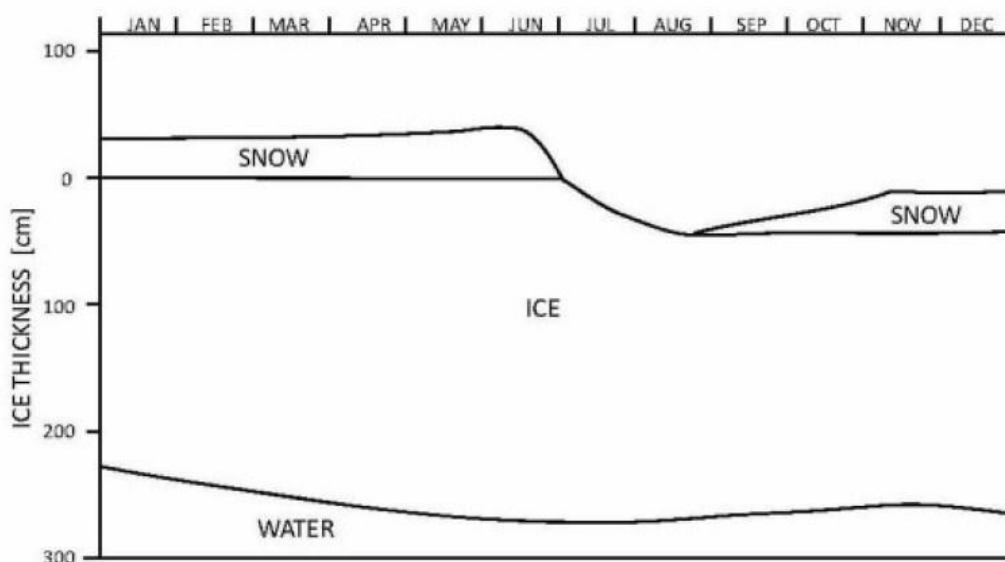
Μέσο μέγιστο πάχος κορυφογραμμών H_R *Στο οποίο αγνοούμε το μέρος πάνω από το νερό.*

Πυκνότητα κορυφογραμμών i *Αριθμός κορυφογραμμών κατά μήκος ενός ευθύγραμμου τμήματος διαδρομής (κορυφογραμμές / km).*

Γενικότερα, η κάλυψη της επιφάνειας της θάλασσας από ακίνητο κάλυμμα πάγου είναι περίπου 90% και το μέγιστο πάχος του πάγου στο περιοχές πρώτου έτους πάγου είναι συνήθως 1 m (στην Βαλτική) και 2 m στην Αρκτική. Επίσης, το μέσο πάχος κορυφογραμμής στη Βαλτική είναι περίπου 5 m, ενώ η πυκνότητα κορυφογραμμή κυμαίνεται 4-10 κορυφογραμμές / km. Αν το μέσο πάχος κορυφογραμμής είναι περισσότερο από 10 m, οι συνθήκες παγετού μπορεί να θεωρηθούν έντονες.

Η σημαντικότερη παράμετρος του πάγου για το σχεδιασμό των πλοίων είναι, ωστόσο, η ύπαρξη του πολυετούς πάγου. Για πολλές θαλάσσιες περιοχές είναι σαφές ότι ο πολυετής πάγος δεν υπάρχει καθόλου αφού λιώνει κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Βαλτική, Okhotsk Θάλασσα, βόρεια της Κασπίας Θάλασσας, Θάλασσας της Αζοφικής, θαλάσσια οδός Saint Lawrence). Από την άλλη, σε άλλες περιοχές, είναι σαφές ότι η πολυετής πάγος πρέπει να υπολογίζεται στο σχεδιασμό του πλοίου (Beaufort Sea, Baffin Bay, ρωσική ανατολική Αρκτική θάλασσα, όπως το Laptev Θάλασσα).

Αν ο πάγος επιβιώσει την εποχή του καλοκαιριού, δημιουργεί πολυετή πάγο (multi-year ice). Όταν ο πάγος αρχίζει να λιώνει κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, το αλάτι που υπάρχει στο κάλυμμα του πάγου διοχετεύεται στο θαλασσινό νερό, ενώ ο πάγος λιώνει κυρίως στην επιφάνεια σχηματίζοντας λίμνες. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, ο πάγος αρχίζει να πήζει ξεκινώντας από το κάτω μέρος. Αυτός ο κύκλος της τήξης και πήξης γρήγορα φτάνει σε ένα πάχος ισορροπίας για τον πολυετή πάγο, περίπου 1,8 έως 2,5 μέτρα. Οι κύκλοι του φαινομένου αυτού, ώστε να φτάσουμε στο παραπάνω αποτέλεσμα είναι σχετικά περιορισμένοι σε αριθμό, όχι περισσότεροι από 20 (20 χρόνια, βλέπε Εικόνα ΚΕΦ-II.22). Όταν η πρωτοετής κορυφογραμμή (First-year ridges) επιβιώνει την καλοκαιρινή περίοδο, τα κενά στην κορυφογραμμή γεμίζουν με φρέσκο νερό και το μέρος της, πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, λιώνει. Αυτό παράγει ελαφρώς κυματοειδούς μορφής στις άνω και κάτω επιφάνειες και αρκετά ομοιόμορφο πάχος, συνήθως λίγο μεγαλύτερο από 5 μέτρα. Αυτές οι πολυετής κορυφογραμμές μπορεί να εκτείνονται σε μεγάλες οριζόντιες εκτάσεις, αρκετές εκατοντάδες μέτρα κατά μήκος.



ΚΕΦ-II.22: Κύκλος ισορροπίας του πάχους του πολυετούς πάγου

Οι απαιτήσεις για τις επιδόσεις ενός πλοίου στον πάγο, που δίνονται στις λειτουργικές προδιαγραφές του, περιλαμβάνουν συνήθως το μέγιστο πάχος του πάγου όπου το πλοίο μπορεί να πλεύσει ανεμπόδιστο. Καθώς η αντίσταση που φέρει ο πάγος κυμαίνεται στο χρόνο με βάση το τρόπο με τον οποίο σπάει, τα πλοία δεν μπορούν να διατηρήσουν μια πολύ χαμηλή ταχύτητα συνεχώς, αλλά υπάρχει περίπτωση να σταματήσουν όταν η αντίσταση αυτή μεγιστοποιηθεί. Ως οριακό πάχος δίνεται εκείνο στο οποίο το πλοίο μπορεί να κρατήσει μια συνεχή ταχύτητα. Συνήθως μια ταχύτητα της τάξης των τριών κόμβων, κατά μέσο όρο, χρησιμοποιείται ως ελάχιστη δυνατή συνεχή ταχύτητα ενώ στη συνέχεια η ισχύς του πλοίου ορίζεται ανάλογα.

Καθώς ακόμη και οι μέσου πάχους κορυφογραμμές έχουν μέγεθος τέτοιο ώστε να προκαλέσει μεγάλη αντίσταση, υψηλότερη από την ώθηση που παράγει το πλοίο, τα πλοία πρέπει να είναι σε θέση να διασχίσουν τις κορυφογραμμές, χρησιμοποιώντας την αδράνεια τους. Η ικανότητα διείσδυσης κορυφογραμμών συγκεκριμένου πάχους μπορεί να δοθεί ως

κατασκευαστική απαίτηση. Γενικότερα είναι εξαιρετικά πολύπλοκο να υπολογίσουμε με ακρίβεια το είδος και το πάχος του πάγου που θα συναντήσει ένα πλοίο στην Αρκτική οπότε και χρησιμοποιούμε το λεγόμενο ισοδύναμο πάχος πάγου. Με άλλα λόγια, το μέσο πάχος του συνόλου του πάγου στην περιοχή. Υποθέτοντας ότι οι κορυφογραμμές είναι τριγωνικής διατομής με γωνία 25° ως προς τη βάση, μια εξίσωση για το ισοδύναμο πάχος (H_{eq}) του πάγου μπορεί να θεωρηθεί η παρακάτω:

$$H_{eq} = (C - 4.28 * \mu * HR) * h_i + 2.14 * \mu * HR^2$$

Αυτό το ισοδύναμο πάχος του πάγου χρησιμοποιείται για να περιγράψει την απόδοση του πλοίου στις γενικές συνθήκες πάγου όπου οι κορυφογραμμές είναι μικρότερες από εκείνες που θα σταματούσε το πλοίο.

Το κάλυμμα χιονιού στην κορυφή του πάγου επηρεάζει την απόδοση του πλοίου αλλά όχι τα φορτία που παράγει ο πάγος. Ο λόγος για αυτό είναι ότι το χιόνι επηρεάζει τις δυνάμεις τριβής. Εάν η πλώρη του πλοίου είναι πολύ επίπεδη, δεδομένου ότι συχνά είναι ώστε να έχουμε καλή απόδοση κατά την θραύση του πάγου, η επίδραση του χιονιού αυξάνεται. Δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι τρόποι για να λάβουμε υπόψη την κάλυψη του χιονιού και η παρούσα κοινή πρακτική που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της επιφάνειας πάγου με την παρουσία χιονιού είναι να χρησιμοποιηθεί ένα ισοδύναμο πάχος, h_{eq} , το οποίο λαμβάνεται από τη σχέση μεταξύ του πάχους του πάγου h_i και του πάχους του χιονιού h_s :

$$h_{eq} = h_i + \kappa * h_s$$

όπου ο συντελεστής κ συνήθως ορίζεται σε περίπου 1/3.

2.5 Περιγραφή της επίδρασης της θερμοκρασίας :

2.5.1 Στην κατασκευή του πλοίου

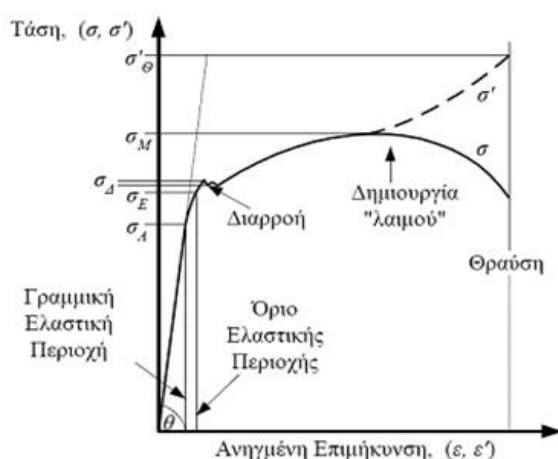
Σε αντίθεση με το περιβάλλον που πλέει η πλειονότητα των σκαφών όπου οι συνθήκες θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως ήπιες, η πλεύση στον αρκτικό και υπό-αρκτικό κύκλο ενέχει σημαντικές προκλήσεις. Αρχικά, η μεγάλη διαφορά στη θερμοκρασία τόσο του θαλασσινού νερού όσο και του ατμοσφαιρικού αέρα αποτελεί παράγοντα διαφοροποίησης των ιδιοτήτων των κατασκευαστικών υλικών του πλοίου οι οποίες θα πρέπει να προβλεφτούν κατά τη μελέτη τις κατασκευής αυτού. Πριν εξετάσουμε πώς οι χαμηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν τις ιδιότητες της μηχανικής των συγκεκριμένων μετάλλων και των κραμάτων, θα πρέπει να αναθεωρήσουμε τα γενικά αποτελέσματα της χαμηλής θερμοκρασίας στις ιδιότητες των μετάλλων. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, η σκληρότητα, αντοχή διαρροής, αντοχή σε εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας, και αντοχή σε καταπόνηση σε όλα τα μέταλλα και τα κράματα αλλάζει.

Δυστυχώς, τα περισσότερα μέταλλα και κράματα γίνονται ψαθυρά σε μειωμένες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα οι δομές που κατασκευάζονται από αυτά να ρωγματώνουν ή

να αστοχούν ξαφνικά σε χαμηλές θερμοκρασίες όταν φορτίζονται με τάσεις σε επίπεδα στα οποία θα μπορούσαν να φορτιστούν, άφοβα, σε κανονικές θερμοκρασίες. Η ψαθυρή θραύση, γενικά, χαρακτηρίζεται από μικρή ή καθόλου παραμόρφωση του μετάλλου στην περιοχή της αστοχίας.

Ο τύπος αστοχίας που είναι ο ευνοϊκότερος και προέρχεται από τον συνδυασμό αντοχής και σκληρότητας του υλικού είναι ο όλκιμος, κατά τον οποίο έχουμε σημαντική πλαστική παραμόρφωση πριν την αστοχία.

Η όλκιμότητα συνήθως εκφράζεται μέσω της ποσοστιαίας επιμήκυνσης του μήκους και την μείωση της επιφάνειας της διατομής ενός δοκιμίου, συγκεκριμένου υλικού, που μελετάται. Επομένως, η όλκιμότητα είναι το μέτρο της παραμόρφωσης που μπορεί να υποστεί ένα δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει. Από την άλλη πλευρά, η σκληρότητα είναι το χαρακτηριστικό του μετάλλου που του επιτρέπει να απορροφά ενέργεια μέσω πλαστικής παραμόρφωσης κατά την κρούση αντί να αστοχεί κατά την επίδραση υψηλών συγκεντρωτικών τάσεων.



ΚΕΦ-II.23: Διάγραμμα τάσης/Ανηγμένης Επιμήκυνσης

Είναι δυνατόν ένα μέταλλο να παρουσιάζει υψηλή όλκιμότητα σε μία δοκιμή αντοχής, αλλά να συμπεριφέρεται με εύθραυστο τρόπο όταν αυτό χρησιμοποιείται σε μέσες θερμοκρασίες, χαμηλότερες από αυτές που προοριζόταν.

Στο μικρομηχανικό επίπεδο η θραύση ενός υλικού είναι είτε όλκιμη, στην οποία περίπτωση το υλικό αστοχεί μετά από σημαντική τοπική πλαστική παραμόρφωση, ή ψαθυρή, στην οποία περίπτωση η ρωγμή διαδίδεται με ελάχιστη πλαστική παραμόρφωση. Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει μία αντιστοιχία πρώτης τάξης μεταξύ του επιπέδου της σκληρότητας και του τρόπου αστοχίας. Η αλλαγή από όλκιμη σε ψαθυρή κατάσταση προκαλεί σημαντική πτώση στην αντοχή σε θραύση. Έτσι, προκύπτει ότι το πρώτο μέλημα για την αντιμετώπιση της σχέσης αντοχής-σκληρότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι ο έλεγχος της ψαθυρής κατάστασης.

Οι διαφορετικές επιδράσεις της χαμηλής θερμοκρασίας στην όλκιμότητα των μετάλλων μπορεί να εξηγηθούν από την επίδραση των χαμηλών αυτών θερμοκρασιών σε δύο βασικά χαρακτηριστικά του μετάλλου. Αυτά είναι, το επίπεδο της τάσης κατά την οποία αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση και το επίπεδο της τάσης κατά την οποία αστοχεί. Μικρή διαφορά

μεταξύ των δύο παραπάνω ορίων δεν επιτρέπει μεγάλη παραμόρφωση πριν την θραύση. Έτσι, σε χαμηλές θερμοκρασίες ο κοινός χάλυβας έχει εξαιρετικά περιορισμένη πλαστική περιοχή με αποτέλεσμα να αστοχεί χωρίς να έχουμε πρώτα ένδειξη πλαστικής παραμόρφωσης.

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται τα τέσσερα βασικά ήδη ναυπηγικού χάλυβα με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά τους:

Property	Grade A	Grade B	Grade D	Grade E
% of Carbon	0.21 max	0.21 max	0.21 max	0.18 max
% of Manganese	2.5 times %C min	0.8 times %C min	0.6 times %C min	0.7 times %C min
% of Silicon	0.5 max	0.35 max	0.1 – 0.35	0.1 – 0.35
% of Phosphorous	0.035 max	0.035 max	0.035 max	0.035 max
% of Sulphur	0.035 max	0.035 max	0.035 max	0.035 max
% of Aluminum	–	–	0.015 min	–
Ultimate Tensile Strength (N/mm ²)	400-520			
Yield Strength (N/mm ²)	235			
% Elongation	22			
Temperature at which Impact test is done (deg Cel)	NA	0	-20	-40

ΚΕΦ-ΙΙ.24: Χαρακτηριστικά βασικών ναυπηγικών χάλυβων

Γενικότερα, όλα τα συστήματα και ο εξοπλισμός του πλοίου πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργήσουν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η απαίτηση αυτή περιλαμβάνει τον εξοπλισμό του καταστρώματος, όπως βαρούλκα πρόσδεσης, γερανοί, και καταπακτές του φορτίου, καθώς και για την πλοήγηση και τον εξοπλισμό έκτακτης ανάγκης, όπως σωσίβιες λέμβοι και αντιπυρικός εξοπλισμός. Η λειτουργία σε πολικές συνθήκες επίσης απαιτεί ειδική μεταχείριση του γενικότερου σχεδίου του πλοίου, κυρίως για τις περιοχές του πλοίου που είναι εκτεθειμένες στον παγετό, χιόνι ή βροχή. Επίσης, η γέφυρα, ο εξοπλισμός πρόσδεσης και συσκευές ανύψωσης πρέπει να έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να εγγυώνται επαρκή ορατότητα. Τα υλικά κατασκευής του κύτους του πλοίου και για όλων των εκτεθειμένων εξοπλισμών πρέπει να έχουν την κατάλληλη αντοχή ώστε να εγγυάται η ακεραιότητά τους σε χαμηλές θερμοκρασίες.

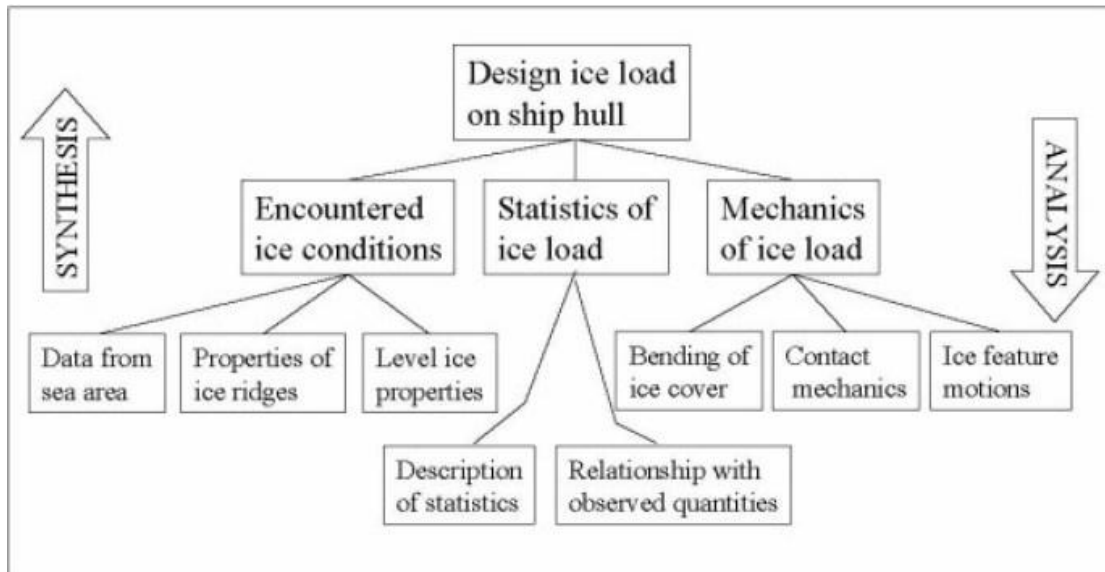
2.5.2 Στην κατασκευή του πλοίου λόγω παρουσίας πάγου

Εκτός από τις εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, εξίσου σημαντική είναι η ύπαρξη πάγου, που δημιουργεί νέες μορφές φορτίσεων, οι οποίες πρέπει να αντιμετωπιστούν διαφορετικά σε σύγκριση με την κλασική μελέτη της τοπικής και ολικής αντοχής ενός συμβατικού πλοίου.

Εάν το πλοίο πρόκειται να πλεύσει σε πάγο, αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την πρώιμη φάση του σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός για την ικανότητα πλεύσης σε πάγο επηρεάζει όλα τα χαρακτηριστικά του πλοίου όπως το σχήμα της γάστρας, τις κύριες διαστάσεις, αντοχή της μεταλλικής κατασκευής, μηχανημάτων και εξοπλισμού. Εάν οι απαιτήσεις για πλεύση σε πάγο δεν είναι πολύ υψηλές, διότι περιορίζεται σε ήπιες συνθήκες πάγου ή περιστασιακή είσοδο κατά τη διάρκεια του χειμώνα σε παγωμένα νερά (υπό-Αρκτική περιοχή), τότε αρκεί το σχήμα της γάστρας να σχεδιαστεί βασισμένο σε εκείνο για ανοικτές θάλασσες και η ενίσχυση της μεταλλικής κατασκευής γίνεται σύμφωνα με τους αντίστοιχους κανονισμούς των νηογνυμένων για πλεύση στον υπό-Αρκτικό κύκλο. Από την άλλη πλευρά, η γάστρα ενός πλοίου το οποίο θα πλεύσει σε καταστάσεις έντονου παγετού και για μεγάλα χρονικά διαστήματα πρέπει να σχεδιαστεί κάτω από αυστηρά κριτήρια. Συχνά παρατηρείται ότι η μελέτη και σχεδίαση ενός τέτοιου πλοίου, υψηλών προδιαγραφών πλεύσης σε πάγο, στηρίζεται τόσο στους κανονισμούς των αντίστοιχων νηογνυμένων όσο και σε μία πιο άμεση προσέγγιση που αφορά τα χαρακτηριστικά της διαδρομής που θα ακολουθήσει το πλοίο. Αυτή η άμεση προσέγγιση στο σχεδιασμό ξεκινά με τον καθορισμό των συνθηκών του πάγου και στη συνέχεια ακολουθείται από την εκτίμηση της επαρκούς απόδοσης και αντοχής σε πάγο βασιζόμενοι στις παραπάνω καθορισμένες συνθήκες.

Ο άμεσος σχεδιασμός αυτός απαιτεί επαρκή γνώση των συνθηκών του πάγου στην περιοχή πλεύσης, σε μορφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό της απόδοσης και αντοχής του πλοίου. Απαιτεί επίσης επαρκή περιγραφή των προβλεπόμενων λειτουργιών του πλοίου. Αυτή η ευρεία βάση γνώσεων που απαιτούνται για τον άμεσο σχεδιασμό του κύτους του πλοίου απεικονίζεται στον πίνακα ΚΕΦ-II.25.

Κατ' αρχάς, όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό σχέδιο πρέπει να είναι γνωστοί. Αυτό είναι αδύνατο στην πράξη και έτσι το πραγματικό σχέδιο, στην καλύτερη περίπτωση, είναι ένα μίγμα των άμεσων και συμβατικών μεθόδων. Το συμβατικό σχέδιο βασίζεται σε δεδομένα από προηγούμενα σχέδια καθώς και στις πληροφορίες που αντλούμε από τους αντίστοιχους κανονισμούς.



ΚΕΦ-ΙΙ.25: Σύνθεση και ανάλυση της μελέτης σχεδιασμού

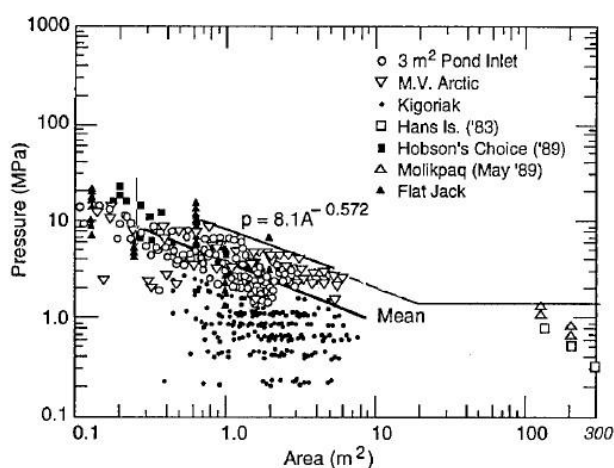
Ο σχεδιασμός της ικανότητας πλεύσης στον πάγο περιλαμβάνει τρεις βασικές πτυχές: πρώτον, τα κατασκευαστικά κομμάτια του πλοίου πρέπει να έχουν επαρκή αντοχή, δεύτερον, η πλεύση του πλοίου σε πάγο πρέπει να πληρεί τις λειτουργικές απαιτήσεις του πλοιοκτήτη και τρίτον τα συστήματα και ο εξοπλισμός του πλοίου πρέπει να λειτουργούν σε θερμοκρασίες που συναντώνται στην επιχειρησιακή περιοχή του. Η γάστρα του πλοίου και ειδικότερα το παράλληλο τμήμα και η πλώρη πρέπει να είναι επαρκώς ενισχυμένο ώστε να φέρει το φορτίο του πάγου. Τα μηχανήματα πρόωσης και ο άξονας της έλικας πρέπει επίσης να έχουν επαρκή αντοχή ώστε να αντέχουν τις συνεχείς ταλαντευτικές τάσεις λόγω σύγκρουσης με τον πάγο. Η μελέτη της αντοχής περιλαμβάνει επίσης τον έλεγχο για την αντοχή σε κόπωση, ακόμη και αν ο πάγος που προκαλεί κόπωση δεν επιφέρει μεγάλα φορτία σε σχέση με την ικανότητα του πλοίου. Τέλος, ο σχεδιασμός πρέπει να περιλαμβάνει έλεγχο σχετικά με την ανταπόκριση στους κραδασμούς από την ταλαντευτική φόρτιση λόγω του πάγου και τη μετάδοση του θορύβου. Η αντιμετώπιση τόσο του θορύβου όσο και των δονήσεων είναι διαφορετική από εκείνη σε συνθήκες ανοικτής θάλασσας, αφού η διέγερση από τον πάγο προέρχεται κυρίως από την πλώρη η οποία δέχεται και τις μεγαλύτερες φορτίσεις.

Η απόδοση του ικανού για πλεύση σε πάγο πλοίου αξιολογείται, επίσης, από την ταχύτητα του κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες πάγου. Για πολλά πλοία η ταχύτητα ανάποδα είναι επίσης ένα χαρακτηριστικό στοιχείο του σχεδιασμού τους, αφού συχνά θα πρέπει να αλλάξουν πορεία λόγω ύπαρξης πάγου μεγάλου πάχους τον οποίο δεν μπορούν να διασχίσουν, οπότε θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να αναζητήσει μια πιο ήπια διαδρομή. Τέλος, πολύ σημαντική και άμεσα συνδεδεμένη με την ταχύτητα είναι η επιλογή προωστήριας μηχανής επαρκούς ισχύος.

Οι παραπάνω απαιτήσεις επηρεάζουν τόσο το σχήμα της γάστρας όσο και το σχεδιασμό του μηχανοστασίου. Επιπλέον, προκειμένου να διευκολυνθεί η λειτουργία του πληρώματος, ο σχεδιασμός της γέφυρας χρειάζεται ειδική προσοχή ώστε να έχουμε επαρκή ορατότητα προς όλες τις διευθύνσεις.

2.6 Φορτίο Πάγου

Συμπίεση του πάγου που έχει ως αποτέλεσμα χαμηλό ρυθμό επιμήκυνσης/κατάθλιψης προκαλεί παραμόρφωση ερπυσμού με ή χωρίς μικρό-ρωγμές. Οι σχέσεις μεταξύ επιβαλλόμενων τάσεων και της έντασης της παραμόρφωσης ερπυσμού σε χαμηλές τιμές ρυθμού επιμήκυνσης/κατάθλιψης είναι γνωστές και προβλεπόμενες. Για υψηλότερους ρυθμούς επιμήκυνσης/κατάθλιψης ($> 1CT_3 \text{ s}^{-1}$), ο πάγος αστοχεί με εύθραυστο τρόπο, καταλήγοντας σε αστάθειες που προκαλούνται από μακρορωγμάτωση. Ο μηχανισμός αστοχίας με εύθραυστο τρόπο, δεν έχει κατανοηθεί πλήρως. Τα φορτία αστοχίας και η πίεση που επιβάλλεται εξαρτάται και από το είδος του φορτίου, π.χ., μονοαξονικό ή πολυαξονικό. Προς το παρόν, η εξάρτηση της αστοχίας υπό την επιβολή θλιπτικών τάσεων του πάγου κάτω από πολυαξονική φόρτωση με διαφορετικούς ρυθμούς κατάθλιψης μελετάται από τους ερευνητές σε όλο τον κόσμο. Έχουν υπάρξει προσπάθειες συσχέτισης των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα πλοίο ή μία δομή λόγω πολυαξονικής σύνθλιψης του πάγου με την θλιπτική αντοχή του πάγου, αλλά αυτές οι προσπάθειες για την απόκτηση εμπειρικών σχέσεων μέσω της χρήσης πολλών συντελεστών δεν υπήρξαν καρποφόρες. Αν και η γνώσεις μας για τις δυνάμεις που ασκούνται κατά από την καμπτική και θλιπτική αστοχία του πάγου σε χαμηλές τιμές ρυθμούς κατάθλιψης, η κατανόηση του μηχανισμού ψαθυρής αστοχίας εξακολουθεί να είναι ελλιπής για υψηλούς ρυθμούς κατάθλιψης και σε πολυαξονική κατάσταση τάσεων. Έχει γίνει προσπάθεια ώστε η ανάπτυξη των εμπειρικών τύπων να γίνει με βάση τα αποτελέσματα δοκιμών μικρής κλίμακας σε εργαστηριακό περιβάλλον χωρίς μεγάλη επιτυχία. Γενικότερα, τα δεδομένα που λαμβάνουμε για την κατασκευή ενός παγοθραυστικού πλοίου, όπως η αντοχή του πάγου σε διάφορες φορτίσεις, προέρχονται κυρίως από εμπειρικούς τύπους που αναπτύχθηκαν από μεγάλης κλίμακας θαλάσσιες δοκιμές. Ένα τέτοιο παράδειγμα παρατίθεται παρακάτω. Τα δεδομένα παρέχουν εμπειρικές τιμές για πραγματική πίεση που θα χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό.



ΚΕΦ-II.26: Διάγραμμα πίεσης/επιφάνειας επαφής

2.7 Περιγραφή της φόρτισης από στρώμα πάγου

Η απόδοση ενός πλοίου στον πάγο εξαρτάται, από την δυνατότητά του να σπάσει το στρώμα πάγου και από την ευκολία με την οποία κινείται σε αυτό. Από τα εμπόδια που μπορεί να βρει ένα παγοθραυστικό στην πορεία του, το μεγαλύτερο είναι η κορυφογραμμή πάγου. Έτσι, η απόδοση ενός παγοθραυστικού είναι άμεσα συνδεδεμένη με την δυνατότητά του να σπάει τις κορυφογραμμές αυτές. Με τη σειρά της, η απόδοση της θραύσης του στρώματος αυτού μετριέται σύμφωνα με τη δυνατότητα του πλοίου να διασχίζει τις κορυφογραμμές αυτές.

Η ολική αντίσταση του πάγου ορίζεται ως το άθροισμα της αντίστασης του θαλασσινού νερού και της αντίστασης λόγω της παγοθραυστικής διαδικασίας. Επίσης, η αντίσταση λόγω του πάγου μπορεί να χωριστεί σε αντίσταση στην περιοχή της πλώρης και αντίσταση στην περιοχή του μέσου τμήματος. Το μέσο τμήμα του πλοίου περικλείεται από την γάστρα, η οποία είναι συνήθως κατακόρυφη και η αντίσταση στην περιοχή αυτή εξαρτάται από τον συντελεστή τριβής μεταξύ του πάγου και του υλικού της γάστρας.

Η παγοθραυστική διαδικασία των κορυφογραμμών πρόκειται για μία μέθοδο η οποία εξαρτάται από μία ή περισσότερες συγκρούσεις της πλώρης με το στρώμα πάγου οι οποίες ακολουθούνται από στιγμιαία προσάραξη του πλοίου πάνω στο στρώμα αυτό. Η περίοδος της διαδικασίας αυτής τελειώνει όταν το πλοίο διασχίσει το εμπόδιο αυτό ή ακινητοποιηθεί από αυτό. Αν το πλοίο δεν μπορέσει να διασχίσει το εμπόδιο, θα κινηθεί ανάποδα και θα επιχειρήσει ξανά την ίδια διαδικασία. Η αντίσταση λόγω των κορυφογραμμών πάγου εξαρτάται από το πάχος, το οποίο είναι διαφορετικό σε διαφορετικά σημεία της γάστρας. Σύμφωνα με τα παραπάνω, φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι η αντίσταση αυτή θα κυμαίνεται κατά διάρκεια της διαδικασίας.

Όταν αναλύουμε τα φορτία που ασκούνται στην γάστρα, είναι σημαντικό να τα κατηγοριοποιούμε σε ολικά και τοπικά. Τα τοπικά φορτία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο περιπτώσεις. Πρώτον, μπορεί να αναφέρονται σε οποιοδήποτε κομμάτι της γάστρας σαν μονάδα ή δεύτερον, να αποτελούν κομμάτι του υπολογισμού της ολικής φόρτισης. Από την άλλη πλευρά, τα ολικά φορτία αναφέρονται στην φόρτιση, η οποία προέρχεται από το άθροισμα των κύριων φορτίσεων σε όλη την επιφάνεια του πλοίου τα οποία ασκούνται ταυτόχρονα.

Κατά τον υπολογισμό των φορτίων λόγω των κορυφογραμμών, συχνά, παρουσιάζονται προβλήματα τα οποία πηγάζουν από την έλλειψη της πλήρους κατανόησης της κατασκευής, των μοντέλων υπολογισμού των παραμορφώσεων και πειραματικών δεδομένων μεγάλης κλίμακας. Τα παραπάνω δεδομένα, συνήθως, προέρχονται από την καταγραφή τους με μετρητικά όργανα τα οποία προσαρτούνται τόσο σε θαλάσσιες εξέδρες όσο και σε διάφορα παγοθραυστικά πλοία..

Γενικά, το φορτίο που ασκείται από την κορυφογραμμή εξαρτάται και από τον τρόπο αστοχίας της. Οι συνηθέστεροι τρόποι αστοχίας είναι οι παρακάτω :

1. Θρυμματίωση (Crushing)
2. Κάμψη (Bending)
3. Ρωγμάτωση στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο (Spalling)
4. Διάσπαση (Splitting)
5. Διάτμηση (Shearing)

Αν η κινητική ενέργεια του πλοίου που θα μεταφερθεί στο στρώμα πάγου είναι αρκετά μεγάλη υπάρχει περίπτωση η επιφάνεια του πάγου να θρυμματιστεί. Θρυμματισμός του πάγου ορίζεται ως η αστοχία του στρώματός του σε μικρά κομμάτια. Γενικά, οι μεγαλύτερες φορτίσεις που εμφανίζονται στην επιφάνεια του πλοίου συνδέονται με την παρουσία θρυμματισμού. Καθώς ο πάγος αστοχεί, τα κομμάτια που δημιουργούνται πρέπει να αποβάλλονται από την περιοχή της πλώρης, οπότε η ύπαρξη μίας ροής η οποία θα τα μετακινεί είναι απαραίτητη. Μελέτες έχουν δείξει ότι ο θρυμματισμός του πάγου συμβαίνει κάτω από υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης όπου δεν υπάρχει τέλεια επαφή του πάγου με τη γάστρα. Επίσης, οι ζώνες υψηλής πίεσης, κατά την αστοχία αυτή, δημιουργούνται κυρίως στην περιοχή επαφής με αποτέλεσμα την εμφάνιση τοπικών τάσεων. Η εμφάνιση των περιοχών αυτών καθώς και συχνότητά τους είναι τυχαία. Τέλος, μελέτες έχουν δείξει ότι η τάση που αναπτύσσεται στις περιοχές αυτές συγκεντρώνεται κυρίως στο κέντρο της περιοχής με αποτέλεσμα τα συγκεκριμένα σημεία να θεωρούνται υψίστης σημασίας. Πηγαίνοντας ένα βήμα παρακάτω, σε αυτές τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων μπορεί να θεωρηθεί ότι το φορτίο κατανέμεται πάνω σε μία λεπτή γραμμή που ξεκινά από το κέντρο προς τις γωνίες της επιφάνειας.

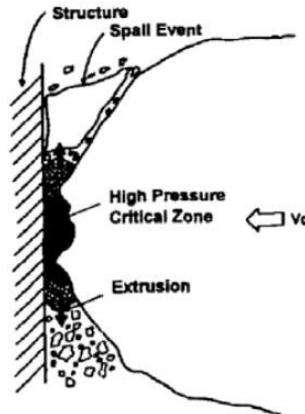
Ένας ακόμα τρόπος αστοχίας αποτελεί η ρωγμάτωση με κατεύθυνση εκτός του οριζόντιου επιπέδου επαφής με την κατασκευή. Στην περίπτωση αυτή, όταν ένα πλοίο διασχίζει τον πάγο, ο πάγος ρωγματώνεται προς το εσωτερικό του μέρος ξεκινώντας από την περιοχή επαφής. Λόγω της κατεύθυνσης της ρωγμάτωσης, κομμάτια πάγου της επιφάνειας επαφής υποχωρούν, μειώνοντας έτσι την επιφάνεια επαφής. Σύμφωνα με μελέτες, η αποκοπή του πάγου αυτή επηρεάζει άμεσα το μέγεθος, τον αριθμό και την περιοχή εμφάνισης των ζωνών υψηλής πίεσης. Επίσης, βρέθηκε ότι η ρωγμές αυτές θα διαδοθούν σε φορτία χαμηλότερα από ότι προέβλεπε η μαθηματική ανάλυση της αστοχίας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, οι ερευνητές να φτάσουν στο συμπέρασμα ότι κατά την αστοχία του πάγου με τον τρόπο αυτό, ασκούνται μικρότερες τάσεις στην μεταλλική κατασκευή. Επίσης, φάνηκε ότι η ρωγμή διαδίδεται με αυξημένο ρυθμό στην περιοχή της ελεύθερης επιφάνειας που δεν έρχεται σε επαφή με το την δομή της γάστρας. Στην ΚΕΦ-II.27 φαίνονται τόσο τα κομμάτια του πάγου που σπάνε όσο και η δημιουργία των ζωνών υψηλής πίεσης στην περιοχή επαφής. Η ακρίβεια της απεικόνισης αυτής εξαρτάται σημαντικά από την αλληλεπίδραση των επιφανειών της γάστρας και του πάγου. Τόσο το μέγεθος όσο και η γεωμετρία του πάγου και της γάστρας επηρεάζουν την ελεύθερη επιφάνεια, κατά την επαφή των δύο δομών, η οποία επηρεάζει άμεσα το μέγεθος των κομματιών που σπάνε. Στην περίπτωση του επίπεδου στρώματος πάγου, η επιφάνεια η οποία αλληλεπιδρά είναι μειωμένη σε σχέση με την αντίστοιχη που αλληλεπιδρά κατά την κρούση με τις κορυφογραμμές πάγου όπως επίσης και η αντίστοιχη ελεύθερη επιφάνεια. Στην ΚΕΦ-II.27, παρατηρείται η γωνία που δημιουργείται μεταξύ του σπασμένου και του σταθερού πάγου. Η γωνία αυτή είναι σημαντική διότι καθορίζει την ευκολία με την οποία τα κομμάτια που

σπάνε θα απομακρυνθούν από το σημείο επαφής. Για μικρές γωνίες, η απομάκρυνση του πάγου είναι δυσκολότερη με αποτέλεσμα τα κομμάτια που δεν απομακρύνονται έγκαιρα να θρυμματίζονται μεταξύ της γάστρας και του πάγου. Το ίδιο ισχύει αν η σχετική ταχύτητα του στρώματος με την γάστρα είναι μεγάλη αφού δίνει λιγότερο χρόνο στον πάγο να απομακρυνθεί από την περιοχή επαφής, παγιδεύοντας και θραύοντάς τον. Συνοψίζοντας, παρατηρείται ότι η ρωγμάτωση με κατεύθυνση εκτός του οριζόντιου επιπέδου επαφής με την κατασκευή μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα χαρακτηριστικά των ζωνών υψηλής πίεσης.

Η αστοχία σε κάμψη ενισχύεται από την ύπαρξη κεκλιμένων δομών. Στην περίπτωση του παγοθραυστικού, η κρούση του στον πάγο θα έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση καμπτικής φόρτισης η οποία θα σπάσει τον πάγο. Η παραπάνω περιγραφή ορίζεται ως η καμπτική αστοχία του πάγου. Ύστερα από την αστοχία του πάγου, τα κομμάτια του πάγου, που απομακρύνονται προς τα πλάγια και κυρίως προς τον πυθμένα, συνεχίζουν να ασκούν φορτίσεις στην μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Γενικά, η αστοχία με κάμψη θεωρείται προτιμότερη των άλλων τρόπων αστοχίας, αφού συνήθως οδηγεί σε εμφάνιση μικρότερων φορτίσεων στην κατασκευή.

Η διάσπαση αναφέρεται στον τρόπο ρωγμάτωσης του πάγου. Στην περίπτωση αυτή, η μορφή της ρωγμής μπορεί να δημιουργείται πάνω στο επίπεδο επαφής ή εκτός του επιπέδου αυτού. Η ρωγμάτωση του πάγου εκτός του επιπέδου επαφής περιέχει τόσο ακτινική όσο και περιφερειακή ρωγμάτωση. Κατά την διαδικασία της διάσπασης, δύο είναι οι απαιτήσεις για την δημιουργία ρωγμάτωσης : 1) για να σχηματιστεί η ρωγμή θα πρέπει να προϋπάρχει ατέλεια στην περιοχή, 2) πρέπει να ασκηθεί μία αρκετά μεγάλη φόρτιση. Επίσης, μελέτες έδειξαν ότι η αστοχία λόγω διάσπασης εξαρτάται από το μέγεθος τη ελεύθερης επιφάνειας, την ψαθυρότητα καθώς και το μέγεθος της δομής του πάγου. Επειδή οι κορυφογραμμές πάγου δίνουν μεγαλύτερη ελεύθερη επιφάνεια επαφής από τον επίπεδο πάγο, η πιθανότητα εμφάνισης διάσπασης είναι σχετικά μικρή. Τέλος, για να ενισχυθεί η αστοχία με διάσπαση, είναι δυνατό να επηρεάσουμε τα χαρακτηριστικά της ελεύθερης επιφάνειας, καθαρίζοντας τον πάγο στην κορυφογραμμή.

Η αστοχία με διάτμηση στις κορυφογραμμές του πάγου εμφανίζεται, κυρίως, στο κατακόρυφο επίπεδο. Η αστοχία παίρνει μέρος, κυρίως, κατά το πλάτος της κορυφογραμμής λόγω των διατμητικών τάσεων ενώ η εμφάνιση τέτοιου είδους αστοχίας είναι συχνότερη για μικρές, σχετικά, κορυφογραμμές πάγου. Τέλος η συχνότητα εμφάνισης της αστοχίας αυτής συνδέεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του πάγου.



ΚΕΦ-ΙΙ.27: Ζώνη υψηλής πίεσης

Η παρατήρηση της επιφάνειας πάγου μπορεί να οδηγήσει στον διαχωρισμό των τρόπων αστοχίας. Αν και η παρατήρηση του φαινομένου βοηθάει στην κατανόησή του, η εξακρίβωση των φορτίσεων που ασκούνται κάθε φορά στην περιοχή επαφής είναι αδύνατη. Επίσης, οι παραδοχές που χρησιμοποιούνται καθώς και οι αβεβαιότητες που δημιουργείται λόγω αυτών, κάνουν την κατανόηση και πρόβλεψη του τρόπου αστοχίας του πάγου ακόμα δυσκολότερη.

Τέλος, ο πιο κοινός τρόπος θραύσης του πάγου είναι με τη βοήθεια καμπτικών τάσεων αφού το πλοίο δεν είναι ικανό να διασχίσει το στρώμα πάγου βασιζόμενο μόνο στην ώθηση από την έλικα. Αυτό συμβαίνει διότι ακόμα και η πιο μικρή κορυφογραμμή πάγου μπορεί να δημιουργήσει αντίσταση μεγαλύτερη της αντίστοιχης ώθησης. Οπότε, το πλοίο στηρίζεται στην αδράνειά του για να διασχίσει με επιτυχία τον πάγο. Επίσης, απορρόφηση της κινητικής ενέργειας από το στρώμα πάγου εξαρτάται άμεσα με την συχνότητα της παγοθραυστικής διαδικασίας όπως επίσης, από το μέγεθος της δομής του πάγου. Γενικά, σε θεωρητική βάση, είναι ευκολότερο να μελετούμε την αλληλεπίδραση γάστρας-πάγου μέσω των ενεργειακών αρχών.

Βιβλιογραφία

- *Ice-Induced Loading on Ship Hull during Ramming*, Orjan Fredriksen, 2012.
- *Ice-Induced Loads on Ship Hulls*, Herman Holm, 2012.
- *Ship-Ice interaction in ship design: theory and practice*, Kaj Riska, 2010
- *International ship and offshore structures congress*, 2012.
- *Guidance for Arctic Shipping*, ABS, 2010.
- *Proposed Icebreaker for Shipping LNG from the Canadian Arctic*, Robert Dick.
- *Review of Ship-ice Interaction Mechanics*, Finnish-Canadian research project, 1990.
- *Steels: For Low Temperatures Applications*, J.W. Morris Jr., 1993.
- *Strength assessment of ice strengthened ships*, Alexandros Gioldasis, 2016.
- *The Influence of Ice Classification on Design of an LNG Tanker*, Roy Andre Pedersen, 2013.
- *Global ice ridge ramming loads based on full scale data and specific energy approach*, Job Kramers, 2016.
- *Design of ice breaking ships. Encyclopedia of life support systems*, Kaj Riska, 2010.
- *Study of specific energy of mechanical destruction of ice for calculation of ice load on ships and offshore structures*, V. Tsuprik, 2013.
- *Field observations on ice failure modes*, T. Karna and P. Jochmann, 2003.
- *Floe ice–sloping structure interactions*, W. Lu, 2014.

Κεφάλαιο 3ο: Ανάλυση της μεθόδου εύρεσης των φορτίων σχεδιασμού

3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά του πάγου

3.1.1 Κρυσταλλική δομή

Ο θαλάσσιος πάγος είναι υλικό το οποίο αποτελείται από στερεό πάγο, αέριο, άλμη και διάφορα άλλα είδη στερεών αλάτων η ύπαρξη των οποίων εξαρτάται από την θερμοκρασία. Ανάλογα τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν, ο πάγος μπορεί να λάβει διαφορετική κρυσταλλική δομή. Η πιο κοινές κρυσταλλικές δομές που λαμβάνει ο πάγος είναι η κοκκώδεις (granular), η κιονοειδής (columnar) και η ασυνεχής κιονοειδής (discontinuous columnar). Αρχικά, όταν το νερό της θάλασσας αρχίζει να παγώνει, προσπαθεί να αποβάλλει το αλάτι το οποίο συνυπάρχει στην μάζα του. Όμως μέρος αυτού δεν αποβάλλεται επιτυχώς από το νερό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αποθήκες άλμης μέσα στο στρώμα πάγου.

Το ποσό του αλατιού το οποίο παγιδεύεται εξαρτάται άμεσα από της περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η αλατότητα (salinity), ρυθμό αύξησης του στρώματος πάγου καθώς και αν το στρώμα αυτό είναι πρώτου χρόνου ή πολυετές. Τέλος κατά τους θερινούς μήνες το στρώμα πάγου λιώνει με αποτέλεσμα να απελευθερώνει ένα ποσοστό των εναποθέσεων άλατος στη θάλασσα, μειώνοντας την αλατότητα και αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά του στρώματος. Γενικά, στρώματα πάγου με μικρότερο ποσοστό αλατότητας έχει αυξημένη αντοχή, για το λόγο αυτό το στρώμα πολυετούς πάγου είναι πιο στιβαρό από εκείνο πρώτου χρόνου.

3.1.2 Πάχος του πάγου

Το πάχος του πάγου είναι μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για τον καθορισμό της φόρτισης σχεδίασης της δομής του πλοίου. Τόσο η αντοχή όσο και ο τρόπος αστοχίας του πάγου είναι άμεσα συνδεδεμένα με το πάχος και επηρεάζονται έντονα από το πάχος και μέγεθος της κορυφογραμμής. Για τον μηχανικό, η παράμετρος αυτή είναι η πιο σημαντική για την μελέτη και την πρόβλεψή της.

Για τον πάγο πρώτου χρόνου, το πάχος του στρώματος είναι άμεσα συνδεδεμένο με την ατμοσφαιρική θερμοκρασία, το ρυθμό πήξης, την ταχύτητα του αέρα, τον τύπο και το πάχος του χιονιού, την επιφανειακή ακτινοβολία και τα θερμά ρεύματα του ωκεανού. Η ατμοσφαιρική θερμοκρασία και ο ρυθμός πήξης αποτελούν τους κύριους παράγοντες για την αύξηση του πάχους του στρώματος, για το λόγο αυτό στην Αρκτική συναντούνται μεγαλύτερα στρώματα πάγου. Την χειμερινή εποχή το στρώμα πάγου μπορεί να φτάσει έως και 2 μέτρα. Για τον πολυετή πάγο, μπορεί να συναντήσουμε πολύ μεγαλύτερα πάχη λόγω της αυξημένης περιόδου ανάπτυξής του.

3.1.3 Πυκνότητα

Η πυκνότητα του πάγου αποτελεί μία ακόμα σημαντική παράμετρο για την μελέτη της συμπεριφοράς του.

Η πυκνότητα καθορίζει το βάρος και η διαφορά μεταξύ της πυκνότητας του πάγου και του θαλασσινού νερού καθορίζει την δύναμη λόγω της άνωσης του πάγου. Η δύναμη αυτή αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες φόρτισης του πλοίου το οποίο πλέει ανάμεσα σε στρώματα και κορυφογραμμές πάγου. Επίσης, κατά την μελέτη της δομής του πλοίου είναι σημαντικό να προσδιορίζουμε και το βάρος της μάζας του πάγου σε περίπτωση που έχουμε έντονα αυξημένη συγκέντρωσή του λόγω των φορτίσεων λόγω αυξημένης αδράνειας.

3.1.4 Αντοχή σε εφελκυσμό

Ο επαρκής καθορισμός της αντοχής σε εφελκυσμό του πάγου αποτελεί σημαντική παράμετρος του και καθορίζει την φόρτιση την οποία είναι σε θέση να αντέξει ο πάγος πριν αστοχήσει. Η παράμετρος αυτή είναι εξαιρετική σημαντική για δομές οι οποίες αλληλεπιδρούν με θαλάσσιο πάγο όπως πλοία και εξέδρες. Πιο συγκεκριμένα, το επίπεδο στρώμα πάγου είναι αποδοτικό να αστοχεί υπό κατακόρυφες καμπτικές φορτίσεις οι οποίες με την σειρά τους εξαρτώνται άμεσα από την αντοχή σε εφελκυσμό. Παρ' όλα αυτά, η μέτρηση της αντοχής αυτής είναι πολύπλοκη, αναξιόπιστη και χρονοβόρα, με αποτέλεσμα να μην έχει μελετηθεί εκτενώς. Γενικότερα η τιμή της αντοχής κυμαίνεται από 0,2 MPa έως 2 MPa.

3.1.5 Αντοχή σε κάμψη

Η αντοχή σε εφελκυσμό του θαλάσσιου πάγου δεν αποτελεί βασικό δομικό χαρακτηριστικό του, όμως είναι σημαντικό να το γνωρίζουμε αφού το μεγαλύτερο μέρος της αστοχίας του πάγου περιστρέφεται γύρω από αυτή την μορφή αστοχίας. Επίσης, η μελέτη της καμπτικής αντοχής είναι εξαιρετικά σημαντική στην περίπτωση των κορυφογραμμών πάγου. Τέλος, επειδή η καμπτική αντοχή είναι εύκολο να μετρηθεί, υπάρχει μεγάλος αριθμός πειραματικών δεδομένων. Γενικά, η καμπτική αντοχή του πάγου κυμαίνεται από 1 MPa και κάτω ανάλογο με το ποσοστό αλατότητας του στρώματος.

3.1.6 Αντοχή σε διάτμηση

Η αντοχή σε διάτμηση, του πάγου, σπάνια χρησιμοποιείται από τον μελετητή αφού το στρώμα δεν αστοχεί κάτω από διατμητικές φορτίσεις αλλά από εφελκυστικές, αφού η αντοχή σε εφελκυσμό είναι μικρότερη. Παρ' όλα αυτά αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη φόρτιση του πλοίου αφού η δομή του υπόκειται σε πολυαξονικές φορτίσεις οι οποίες περιέχουν τόσο διατμητικές όσο και εφελκυστικές και θλιπτικές φορτίσεις.

3.1.7 Αντοχή σε θλίψη

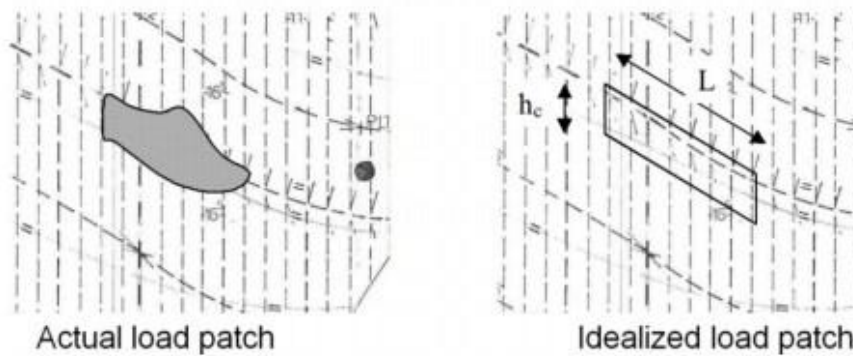
Λόγω του ότι είναι σύνηθες για τον πάγο να αστοχεί υπό θλιπτικές φορτίσεις, Η αντοχή σε θλίψη αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό του. Η αστοχία του πάγο σε θλίψη λαμβάνει χώρα κυρίως κατά την κρούση του πλοίου σε κορυφογραμμές και γενικότερα, στρώματα πάγου με μεγάλο πάχος. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή σε θλίψη είναι πολυάριθμοι. Κάποιοι από αυτούς είναι η θερμοκρασία, η πυκνότητα, η αλατότητα, ο τύπος του πάγου, το μέγεθος των κρυστάλλων της δομής του και η κατεύθυνσή τους.

3.2 Επιφάνεια φόρτισης

Όταν υπολογίζουμε τα φορτία του πάγου, συνήθως θεωρούμε μία επιφάνεια επαφής παρόμοια με αυτή που εικονίζεται παρακάτω. Η επιφάνεια φόρτιση ορίζεται ως ένα τμήμα της περιοχής της γάστρας του πλοίου το οποίο έρχεται σε επαφή με τον πάγο. Στην περίπτωση της σύγκρουσης με κορυφογραμμή πάγου, η επιφάνεια αυτή θεωρείται λεπτότερη κατά τον κατακόρυφο άξονα και μακρύτερη κατά τον οριζόντιο. Όπως φαίνεται και από την εικόνα η θεωρούμενη επιφάνεια επαφής εξαρτάται από τη γεωμετρία του αντίστοιχου στρώματος πάγου, χρησιμοποιώντας πάντα την ιδανική παραδοχή του (idealized ice patch).

Γενικότερα είναι δύσκολο να δώσουμε έναν επαρκή ορισμό για τον υπολογισμό της επιφάνειας επαφής. Πιο συγκεκριμένα, εκτεταμένη μελέτη των πειραμάτων, από μετρήσεις σε πραγματικά παγοθραυστικά, έδειξε ότι η εμφάνιση τοπικών φορτίσεων είναι τυχαία. Ακόμα και κάτω από παρόμοιες συνθήκες σύγκρουσης τόσο η επιφάνεια όσο και τα φορτία κρούσης ήταν διαφορετικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζεται περαιτέρω πειραματισμός για να εξετασθούν αυτά τα τυχαία αποτελέσματα. Γενικότερα, πιστεύεται ότι ο κύριος λόγος που ευθύνεται για τα αποτελέσματα αυτά είναι η ανισοτροπία που εμφανίζει η δομή του πάγου. Ο πάγος περιέχει πολλές ατέλειες όπως ρωγμές, πόρους, εγκλείσματα και άλλα μειονεκτήματα. Επίσης, τόσο η περιοχή όσο και το μέγεθος των ατελειών αυτών είναι τυχαία. Σύμφωνα με μελέτες, η ανισοτροπία της αντοχής του πάγου κυμαίνεται σε ποσοστό 40-55% ενώ το κατά πόσο η ανισοτροπία αυτή επηρεάζει τη φόρτιση του πλοίου πρέπει να εξετασθεί περαιτέρω.

Η επιφάνεια επαφής είναι προφανές ότι θα περιέχει σφάλμα το οποίο μάλιστα θα αλλάζει από πλοίο σε πλοίο και από στρώμα πάγου σε στρώμα πάγου. Οπότε, για πρακτικούς λόγους η επιφάνεια που ορίζουμε είναι πιο απλή με τετραγωνική γεωμετρία για ευκολότερη ανάλυση. Αυτό συμβαίνει, κυρίως, επειδή η πραγματική γεωμετρία της επιφάνειας επαφής δεν είναι δυνατό να προβλεφτεί, ακόμα και με εκτενείς υπολογισμούς. Οπότε και χρειάζεται ο ορισμός μίας ιδανικής επιφάνειας επαφής.



ΚΕΦ-III.1: Κανονική και ιδανική επιφάνεια επαφής

Για να ορίσουμε την επιφάνεια επαφής πρέπει να πρώτα να εξετάσουμε τις παραμέτρους που επηρεάζουν το τοπικό φορτίο του πάγου οι οποίες είναι η πίεση p_c , το ύψος του φορτίου h_c και το μήκος του φορτίου L . Πρέπει να σημειωθεί ότι η πίεση ποτέ δεν υπολογίζεται απευθείας. Η πίεση λόγω του πάγου F εξάγεται μόνο σαν μέτρηση από μετρητικά όργανα σε επιφάνεια A_g και ορίζεται ως F/A_g . Οι περιοχές των μετρητικών οργάνων που έχουν χρησιμοποιηθεί κυμαίνονται κυρίως από 1 cm^2 έως μερικά τετραγωνικά.

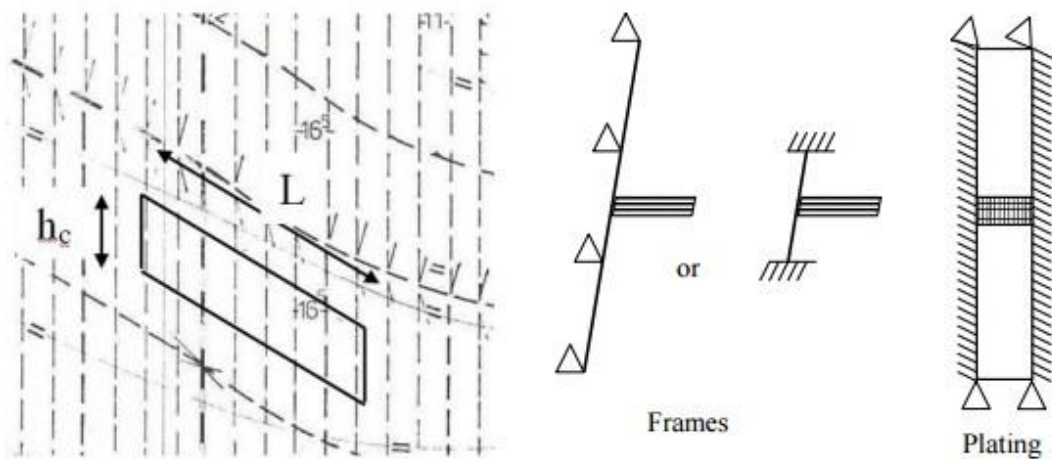
Γενικά, το ύψος του φορτίου είναι δύσκολο να υπολογιστεί, αν όχι αδύνατο, αλλά η τιμή του $q \times h_c \times s$ μπορεί να μετρηθεί βασιζόμενη, για παράδειγμα, στο αντίκτυπο που έχει στα κατακόρυφα ενισχυτικά αφού η φόρτιση δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από το ύψος αν είναι μικρότερη από το μήκος του ενισχυτικού. Η μέτρηση του γραμμικού φορτίου q χρησιμοποιώντας την παραμόρφωση των ενισχυτικών, με τις απλοποιήσεις που φαίνονται στην εικόνα ΚΕΦ-III.3, αποτελεί παράδειγμα της εμπειρικής μέτρησης της δύναμης F . Επίσης, η μέτρηση αυτή μπορεί να γίνει και λαμβάνοντας υπόψη όλη την δομή του πλοίου. Τέλος, μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι παράμετροι οι οποίες μπορούν να εξετασθούν επαρκώς είναι η δύναμη που ασκεί ο πάγος σε συγκεκριμένες περιοχές και το γραμμικό φορτίο q . Άλλες παράμετροι λαμβάνονται εμπειρικά μέσα από τα φυσικά χαρακτηριστικά τους. Παρακάτω δίνεται μία σχέση που περιέχει τις παραπάνω αναφορές :

$$F = p_c \cdot h_c \cdot s$$

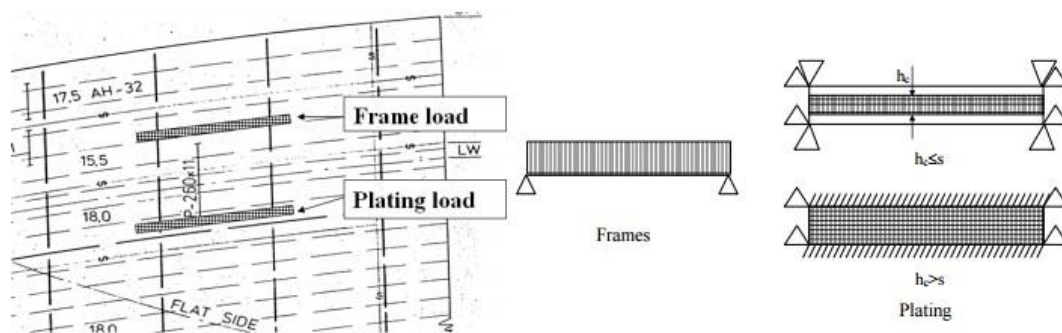
Όπου το h_c είναι το ύψος του φορτίου και s το μήκος του ενισχυτικού που φορτίζεται. Από την άλλη πλευρά, το οριζόντια ενισχυτικά μπορεί να φορτίζονται και σε όλο το μήκος τους L οπότε η τοπική φόρτιση στο ενισχυτικό είναι :

$$F = p_c \cdot h_c \cdot L$$

Τα διαγράμματα που περιγράφουν την επιφάνεια της φόρτισης σχεδίασης δείχνουν ότι, όταν σχεδιάζεται ένα δομικό στοιχείο η επιφάνεια επαφής του φορτίου ορίζεται στο σημείο στο οποίο η καταπόνηση θα είναι εντονότερη. Αυτό μεταφράζεται σε επιφάνεια φορτίου συμμετρική προς το κέντρο φόρτισης, για ελάσματα και στο μέσο του ενισχυτικού, για δοκούς. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται, όπου δίνεται μεγάλη σημασία στον ορισμό των οριακών συνθηκών. Η χρήση του απλουστευμένου αυτού ορισμού της επιφάνειας θεωρείται επαρκής αφού πιο πολύπλοκες μέθοδοι χάνουν το πλεονέκτημά τους λόγω της αβεβαιότητας του αποτελέσματος.



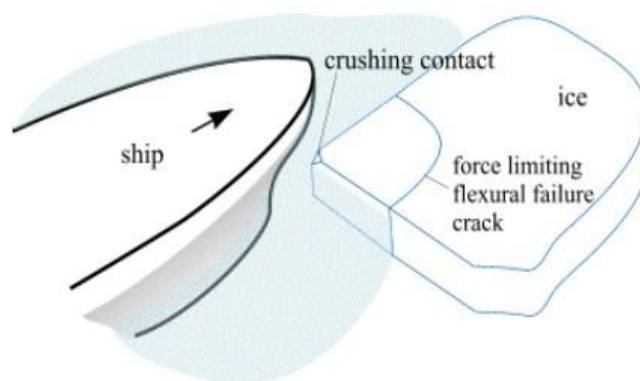
ΚΕΦ-III.2: Ιδανική επιφάνεια για δομικά μέρη του σκελετού.



ΚΕΦ-III.3: Ιδανική επιφάνεια για τα οριζόντια ενισχυτικά.

3.3 Υποβαλλόμενη πίεση

Ο ορισμός της πίεσης του πάγου είναι πολύπλοκη και υπάρχουν αρκετές αμφιλεγόμενες θεωρίες. Συχνά, η πίεση λόγω του πάγου περιγράφεται ως ο μέσος όρος της τάσης φόρτισης σε μία επιφάνεια. Συνήθως, η επιφάνεια αυτή είναι η περιοχή όπου υπάρχουν μετρητικά όργανα ή ορίζεται σύμφωνα με συγκεκριμένες γεωμετρικές απαιτήσεις. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να μελετήσουμε την αλληλεπίδραση μεταξύ του πλοίου και ενός επίπεδου στρώματος πάγου, θα ορίσουμε επιφάνεια $D \cdot h_i$ όπου D η διάμετρος και h_i το πάχος του πάγου. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχουν μεγάλες διαφορές στο μέγεθος της πίεσης σε διαφορετικές ονομαστικές επιφάνειες επαφής ασχέτως των συνθηκών. Η ονομαστική επιφάνεια επαφής ορίζεται από το συνδυασμό της γεωμετρίας του πάγου και της μεταλλικής δομής του πλοίου όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.



ΚΕΦ-III.4: Προσομοίωση της κρούσης του παγοθραυστικού

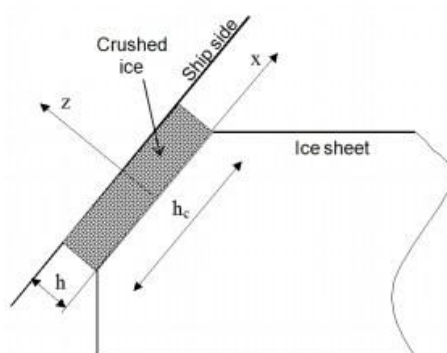
Γενικότερα, έχουν προταθεί αρκετά μοντέλα για τον υπολογισμό της πίεσης του πάγου. Το πρώτο μοντέλο το οποίο προτάθηκε από τον Korzhavin θεωρούσε την πίεση ως ομοιόμορφη και ανάλογη της θλιπτικής αντοχής του πάγου. Οι αναλογικοί συντελεστές εξαρτώνται από τη μορφή της επιφάνειας επαφής και την ποιότητα της επαφής ενώ η θλιπτική αντοχή εξαρτάται από την θερμοκρασία του πάγου και το ρυθμό επιμήκυνσης. Το 1990 έγινε εκτεταμένη έρευνα για να ξεκαθαρίσει την αναλογία των παραγόντων που επηρεάζουν την πίεση αλλά όταν τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τελικά η πίεση εξαρτάται από τις μεθόδους μέτρησης και τις συνθήκες των δοκιμών, με αποτέλεσμα η χρήση της εξίσωσης του Korzhavin να σταματήσει.

Οι εντονότερες τάσεις λόγω του πάγου συμβαδίζουν με την θραύση αστοχίας του. Με τον όρο θραύση εννοούμε την αστοχία του πάγου σε πολύ μικρά κομμάτια. Επειδή ο πάγος πρέπει να σπάσει σε όλη την επιφάνεια κατά την επαφή, είναι προφανές ότι εμφανίζεται ένα 'ρεύμα' των θραυσμένων κομματιών από το κέντρο της επαφής μέχρι το εξωτερικό τμήμα. Ρώσοι επιστήμονες έχουν αναλύσει την ροή αυτή του πάγου θεωρώντας τον θραυσμένο πάγο ως ιξώδους ρευστού. Ο τρόπος σχηματισμού της επιφάνειας κατά τη

Θραύση φαίνεται στο σχήμα ΚΕΦ-III.5. Με βάση αυτές τις παραδοχές και τις εξισώσεις ροής του λεπτού φιλμ ρευστού του Reynolds, προέκυψε η ακόλουθη μορφή για την πίεση :

$$p \propto \left(\left(\frac{h_c}{2} \right)^2 - x^2 \right)^{1/4} .$$

Η αναλογικότητα των παραγόντων εξαρτάται από την (εμπειρική) αντοχή του πάγου η οποία προέρχεται από μετρήσεις που έχουν γίνει στα μηχανικά χαρακτηριστικά του πάγου. Τόσο τα χαρακτηριστικά ιξώδους όσο και η αντοχή του πάγου, έχουν συνδυαστεί για να εξαχθεί ο παράγοντας της αντοχής του πάγου. Αυτή η μορφή της πίεσης του πάγου χρησιμοποιήθηκε για να καθοριστεί μία φόρμουλα για την δύναμη φόρτισης χρησιμοποιώντας τις ενεργειακές αρχές για την κρούση μεταξύ μίας δομής πάγου και ενός πλοίου. Από την άλλη πλευρά, το μεγάλο μειονέκτημα της φόρμουλας αυτής είναι οι παραδοχές που γίνονται για την εξαγωγή της (όπως το ιξώδες, το πάχος του φιλμ και η επιφάνεια κρούσης). Ο μεγάλος αριθμός των παραδοχών είχε ως αποτέλεσμα να μην χρησιμοποιηθεί αρκετά έξω από την Ρωσία εκτός από την περίπτωση του σχετικά νέου συνόλου κανονισμών από τον Διεθνή Οργανισμό Νηογνωμόνων (IACS) .



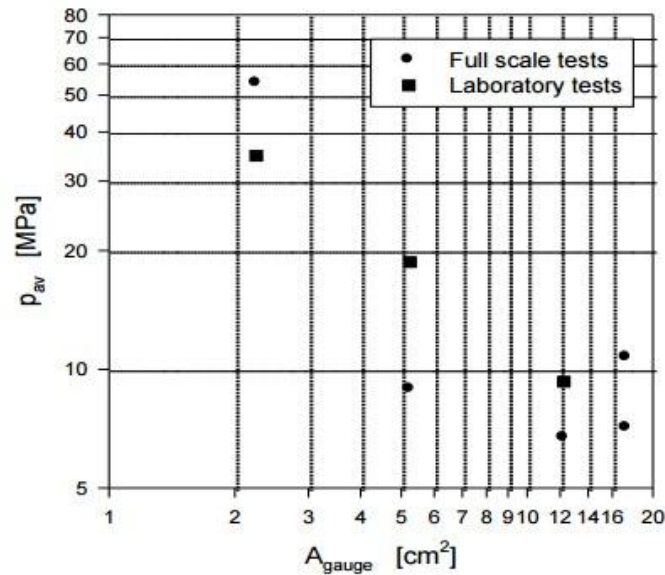
ΚΕΦ-III.5: Γεωμετρία του ρευστού πάγου.

Η τρίτη σχέση η οποία χρησιμοποιείται για την εύρεση της πίεσης είναι βασισμένη στην παρατήρηση ότι η επιφάνεια επαφής εξαρτάται από το μέγεθος της τάσης που επιβάλλεται στον πάγο. Σύμφωνα με τον Sanderson (1988), μετά την συλλογή πολλών πειραματικών αποτελεσμάτων, το άνω όριο της σχέσης πίεσης-επιφάνειας επαφής ορίζεται από τη σχέση:

$$p_{av} = 8.1 \cdot A^{-0.57}$$

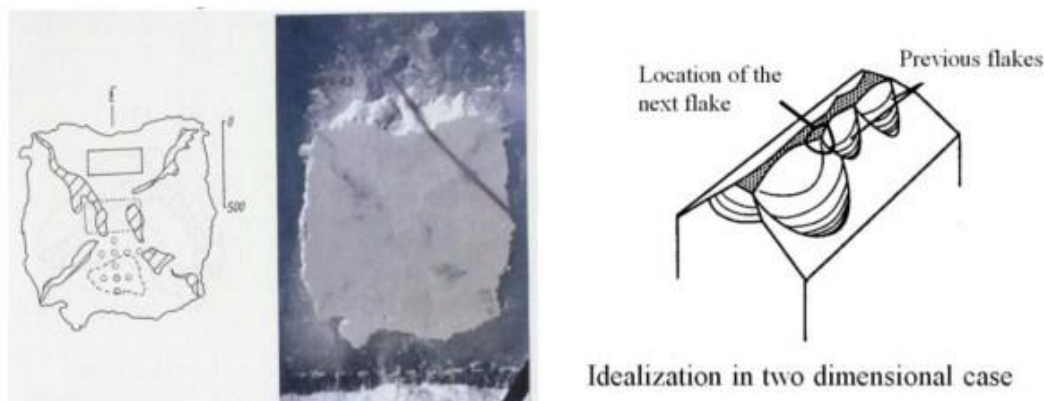
Όπου p είναι σε MPa και το A είναι σε m^2 . Τόσο ο εκθέτης όσο και ο πολλαπλασιαστής της παραπάνω σχέσης έχει εξετασθεί τόσο από τον Riska (1987) καθώς και τον Frederking (1999). Τα πειραματικά δεδομένα έδειξαν ότι ο πολλαπλασιαστής κυμαίνεται από 2 έως 10 ενώ ο εκθέτης κυμαίνεται από -0,3 έως -0,6. Τα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των παραπάνω σταθερών, έχουν εξαχθεί από δοκιμές με ένα ευρύ φάσμα μεγέθους επιφανειών μέχρι και $100 m^2$. Τέλος, η μεγαλύτερη δυνατή

τάση που μπορεί να επιβληθεί, εμφανίζεται κατά την (θεωρητική) αλλαγή του πάγου σε ρευστό (όπως αναφέρθηκε παραπάνω) και φτάνει σε ύψος 100 MPa στους -10°C .



ΚΕΦ-III.6: Μετρήσεις στο εργαστήριο και σε πλοία σε μικρή επιφάνεια.

Τα μειονεκτήματα της σχέσης πίεσης-επιφάνειας επαφής είναι ότι προέρχεται από εμπειρικά δεδομένα ενώ η επιστημονική βάση της για τον ορισμό της επιφάνειας είναι περιορισμένη. Επίσης, η σχέση πίεσης-επιφάνειας επαφής βασίζεται στη παρατήρηση ότι μέσα στην ονομαστική επιφάνεια υπάρχει μία γραμμική περιοχή από την οποία μεταφέρεται η δύναμη (Riska, 1990). Αυτό το φαινόμενο έχει μελετηθεί εκτενώς από το σχέδιο JOIA στην Ιαπωνία. Στο σχήμα ΚΕΦ-III.7 φαίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και η περιοχή που προαναφέρθηκε. Το σχήμα αυτό δημιουργείται από την επιφάνεια στην οποία εντοπίζεται η εντονότερη τάση ενώ οι άλλες περιοχές υποχωρούν. Το σχήμα το οποίο δημιουργείται φαίνεται να έχει την κατεύθυνση των διαγωνίων της διατομής, (Riska et al 1990).

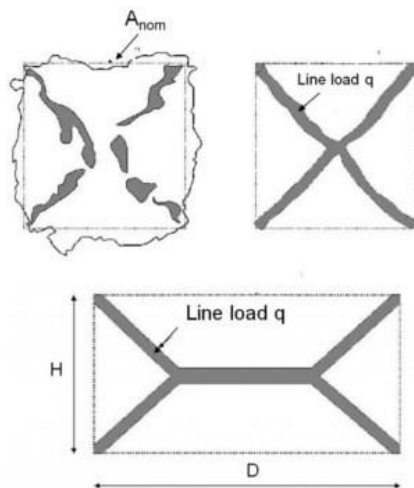


ΚΕΦ-III.7: Ονομαστική επιφάνεια και περιοχή υψηλότερων τάσεων.

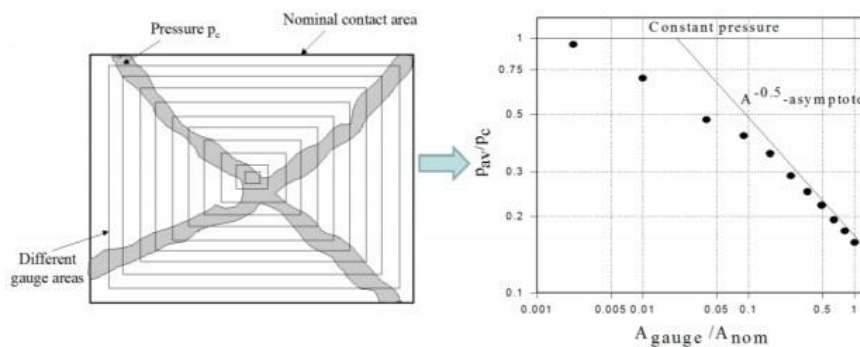
Έχει εξεταστεί μία απλοποίηση της περίπτωσης στο σχήμα ΚΕΦ-III.7, η οποία βασίζεται στο γεγονός ότι το γραμμικό φορτίο q (πίεση \times πλάτος) είναι σταθερό. Με αυτόν τον τρόπο η πίεση και πλάτος δεν χρειάζεται να καθορισθεί. Αυτή η απλοποίηση οδηγεί σε μία γραμμική μορφή πάνω στην ονομαστική επιφάνεια με πλάτος D και ύψος H όπως φαίνεται στο σχήμα ΚΕΦ-III.8. Με τον τρόπο αυτό, η μέση πίεση σε όλη την ονομαστική επιφάνεια μπορεί να καθορισθεί, αν θεωρήσουμε το πλάτος πολύ μικρότερο από το μήκος, ίση με :

$$p_{av} = q \cdot \left(\frac{2\sqrt{2}-1}{\sqrt{C}} - \sqrt{C} \right) \cdot A_{nom}^{-0.5}$$

Όπου το o λόγος $C=D/H$. Έτσι, η σχέση επιφάνειας επαφής-πίεσης λαμβάνεται μέσα από την παραδοχή μίας γραμμικής επιφάνειας επαφής. Προφανώς, μία τέτοια παραδοχή φέρει σφάλματα, αφού η απλοποίηση της επιφάνειας επαφής αγνοεί φορτία τα οποία είναι σίγουρο ότι θα εμφανιστούν έξω από την γραμμική επιφάνεια του φορτίου q . Η μορφή αυτή της επιφάνειας πίεσης έχει μελετηθεί και με τη χρήση μετρητικών οργάνων όπως φαίνεται και στο σχήμα ΚΕΦ-III.9. Στη περίπτωση της μέτρησης αυτής, η επιφάνεια της πίεσης φαίνεται να έχει ασταθές πλάτος ενώ ο εκθέτης της σχέσης επιφάνειας επαφής-πίεσης ισούται με $-0,5$.



ΚΕΦ-III.8: Παραδοχή της γραμμικής επιφάνειας φόρτισης.



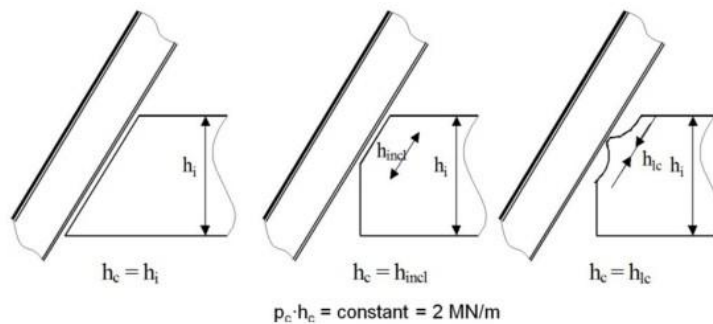
ΚΕΦ-III.9: Η μέτρηση της επιφάνειας επαφής με μετρητικά όργανα και τα αποτελέσματα της μέσης πίεσης.

Μετά την παρουσίαση των παραπάνω τριών σχέσεων για τον καθορισμό της πίεσης του πάγου, πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση επιφάνειας επαφής-πίεσης είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη. Επίσης, χρησιμοποιούνται και διάφοροι συνδυασμοί μεταξύ των παραπάνω σχέσεων όπως η αναλογικότητα της πίεσης του πάγου με την θλιπτική αντοχή (του Korzhavin) και η μορφή της επιφάνειας επαφής από το υδροδυναμικό μοντέλο. Γενικά, εκτός του υδροδυναμικού μοντέλου δεν υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις για την διανομή της πίεσης στην επιφάνεια. Άλλη μία θεωρία η οποία ονομάζεται 'hot spot' και θεωρεί ότι η πίεση λόγω του πάγου μεταφέρεται μέσω μικρών κυκλικών επιφανειών. Η λογική πίσω από την θεωρία αυτή είναι ότι η δομική ευκαμψία της μεταλλικής κατασκευής έχει σχέση με την διανομή της πίεσης (Riska, 2002).

Ένα επίσης πρόβλημα στην μελέτη της πίεσης του πάγου είναι ότι, τόσο η θερμοκρασία όσο και ο ρυθμός θραύσης του πάγου επηρεάζουν την μορφή της αστοχίας (Sodhi, 1998). Έχει παρατηρηθεί ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες ή/και σε υψηλούς ρυθμούς θραύσης ο πάγος αστοχεί με ψαθυρό τρόπο, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται οι γραμμικές ζώνες πίεσης που αναφέρθηκαν παραπάνω. Από την άλλη πλευρά, αν η θερμοκρασία είναι υψηλότερη και ο ρυθμός θραύσης μειωμένος τότε παρατηρείται ένας πιο όλκιμος τρόπος αστοχίας του πάγου, με αποτέλεσμα, το ποσοστό της ονομαστικής επιφάνειας που δέχεται φορτίσεις είναι πολύ μεγαλύτερο, αν και η γραμμική περιοχή συνεχίζει να δέχεται τα εντονότερα φορτία. Επίσης, στην όλκιμη αστοχία, το φορτίο που επιβάλλεται στην περιοχή επαφής είναι εντονότερο από την ψαθυρή περίπτωση. Τέλος, έχουν προταθεί διάφορες τιμές για τον ορισμό του σημείου αλλαγής από την ψαθυρή στην όλκιμη κατάσταση αστοχίας με πιο ευρέως χρησιμοποιημένο σημείο στους -10°C και 5 mm/s .

3.4 Ύψος φόρτισης

Γενικότερα, η επιφάνεια φόρτισης είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Αν και σε κάποιες περιπτώσεις τόσο το μήκος της επιφάνειας L όσο και το ύψος h_c δίνονται από τους κανονισμούς, συνήθως ο σχεδιαστής πρέπει να λάβει υπόψη του τις μειονεκτικότερες διαστάσεις για την επιφάνεια. Ένα παράδειγμα της γεωμετρίας της επιφάνειας επαφής για τον καθορισμό των διαστάσεων δίνεται από το ύψος h_c που χρησιμοποιεί ο Φιλανδικός-Σουηδικός νηογνώμονας. Στους κανονισμούς αναφέρεται ότι το μέγεθος του φορτίου δίνεται από το γραμμικό φορτίο q το οποίο καθορίστηκε μετά από εκτενής ανάλυση των αστοχιών λόγω πάγου σε διάφορα πλοία. Η ανάλυση αυτή έδωσε στο q τιμή ίση με 2 MN/m . Επίσης, στους κανονισμούς το ύψος φορτίου θεωρείται ίσο με το πάχος του πάγου συν 800 mm . Η επιλογή αυτή οδήγησε σε υποεκτίμηση της φόρτισης των ελασμάτων και κυρίως στα διαμήκη ενισχυτικά. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα το καθορισμένο ύψος να μειωθεί ενώ ο συντελεστής της επιφάνειας επαφής έμεινε ο ίδιος και αυτό οδήγησε στην αύξηση των τιμών της υπολογιζόμενης πίεσης. Τέλος, σε περίπτωση που το φορτίο επιβάλλεται σε γραμμική επιφάνεια το ύψος πρέπει να θεωρηθεί ακόμα μικρότερο και οι τιμές των πιέσεων ακόμα μεγαλύτερες.



ΚΕΦ-III.10: Ανάλυση της επιφάνειας επαφής.

3.5 Ολική φόρτιση λόγω πάγου

Η ολική δύναμη του πάγου F , ή αλλιώς F_n , καθορίζεται με την ανάλυση της σχετικής κίνησης και κρούσης των δύο σωμάτων του πλοίου και του πάγου. Αυτή η ανάλυση πρέπει να περιέχει την σχέση της δύναμης φόρτισης F_n με τον ρυθμό παραμόρφωση του πάγου. Υπάρχουν δύο εμπειρικοί τύποι που δίνουν την τιμή της φόρτισης F_n και οι οποίοι εν μέρει αγνοούν την επιφάνεια επαφής. Η πρώτη εξίσωση αναλύει την κρούση μεταξύ των δύο σωμάτων και εξάγει την τιμή της φόρτισης λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό παραμόρφωσης του πάγου στην επιφάνεια επαφής. Η μορφή της κρούσης στην οποία αναφέρεται η εξίσωση αυτή είναι η κρούση ενός πλοίου με ένα σαφώς μικρότερο κομμάτι πάγου στη μία μεριά της πλώρης. Η εξίσωση αυτή είναι ουσιαστικά μονοδιάστατη και με τη λύση της εξάγεται η μέγιστη δύναμη λόγω του πάγου. Αυτή η απλοποιημένη μορφή βασίζεται ουσιαστικά στην ενεργειακή θεωρία και περιέχει μία σταθερά για την πίεση καθώς και την σχέση επιφάνειας επαφής-πίεσης. Η τελική εξίσωση είναι η :

$$F_n = C \cdot p_0^{0.36} \cdot v_{ship}^{1.28} \cdot \Delta^{0.64}$$

Όπου C είναι ο παράγοντας που περιέχει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επαφής, P_0 είναι η σταθερά της πίεσης, v_{ship} είναι η ταχύτητα του πλοίου και Δ είναι το εκτόπισμα.

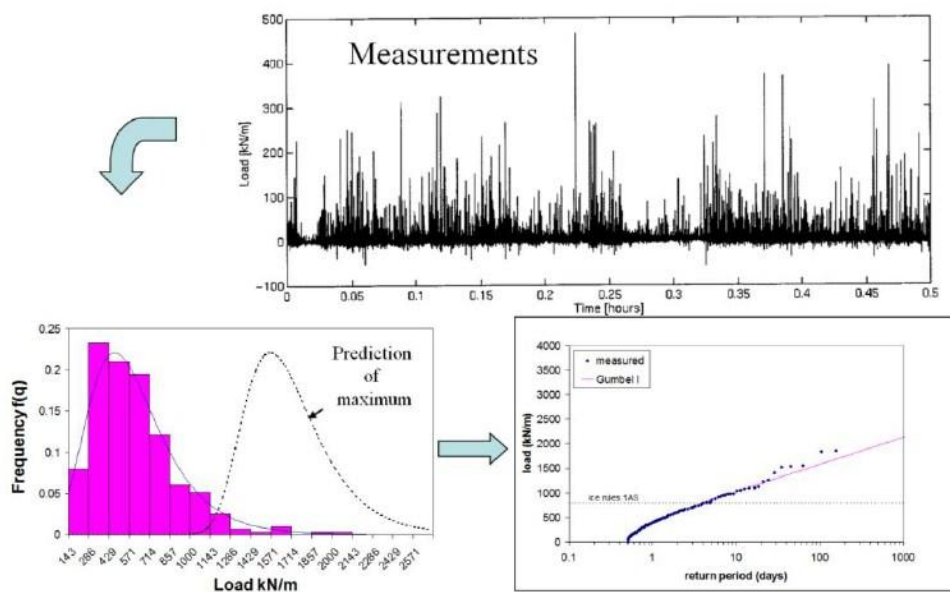
Η άλλη εξίσωση η οποία υπολογίζει την ολική δύναμη έχει εξαχθεί από πειραματικά δεδομένα σε κρούση του πλοίου με πολυετή πάγο. Στην περίπτωση αυτή, υπολογίστηκε τόσο η κρούση του πάγου πάνω όσο και η περαιτέρω επαφή του με τη γάστρα του πλοίου. Τέλος, η σχέση αυτή αναφέρεται στη σύγκρουση του πλοίου με κομμάτι πάγου το οποίο είναι σχετικά μεγάλο συγκρινόμενο με το εκτόπισμα του πλοίου. Η εξίσωση ορίζεται ως εξής :

$$F_n = C \cdot \sin^{0.2} \varphi \cdot \sqrt{\Delta A_{wp}} \cdot v_{ship}$$

Όπου το C περιέχει την εξάρτηση της σχέσης από την αντοχή του πάγου. Αυτός ο υπολογισμός έχει βασιστεί στην θεωρία την οποία έχει αναπτύξει ο Riska. Τέλος, η παραπάνω σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό της διατμητικής φόρτισης και καμπτικής ροπής της γάστρας του πλοίου.

3.6 Σημείο σχεδιασμού

Το μοντέλο του σημείου σχεδίασης περιέχει την επιτρεπόμενη δομική αντίδραση στις φορτίσεις που επιβάλλονται και την συχνότητα στην οποία εμφανίζονται. Η δομική αυτή αντίδραση μπορεί να αναφέρεται στη μέγιστη τάση διαρροής (ή σε μικρότερες τάσεις λόγω του συντελεστή ασφάλειας), σε τάσεις οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την πλαστική παραμόρφωση ή σε μικρές τοπικές παραμόρφωσης. Όταν ο ορισμός του φορτίου προέρχεται από πειραματικά και στατιστικά δεδομένα, όπως και συμβαίνει τις περισσότερες φορές, θα πρέπει να ακολουθείται από τον ορισμό της συχνότητας εμφάνισης. Επίσης, η διαδικασία της εύρεσης του φορτίου σχεδίασης πρέπει να συμπεριλαμβάνει και την ανάλυση των στατιστικών στοιχείων του φορτίου τα οποία περιέχουν την πρόγνωση των μέγιστων φορτίων και την συχνότητά τους. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο σχήμα ΚΕΦ-III.11 για φορτία στα ενισχυτικά για την περιοχή της Βαλτικής. Στο παρακάτω σχήμα μπορεί να γίνει μία σημαντική παρατήρηση. Το φορτίο του κύματος φαίνεται ότι ακολουθεί σε γενικές γραμμές το σχήμα του κύματος το οποίο επιβάλλει το φορτίο ενώ το φορτίο λόγω του πάγου δεν έχει συσχετιστεί μέχρι και σήμερα με τα χαρακτηριστικά του πάγου. Στην περίπτωση αυτή, η στατιστική ανάλυση του φορτίου του πάγου γίνεται με απευθείας μέτρηση του φορτίου.



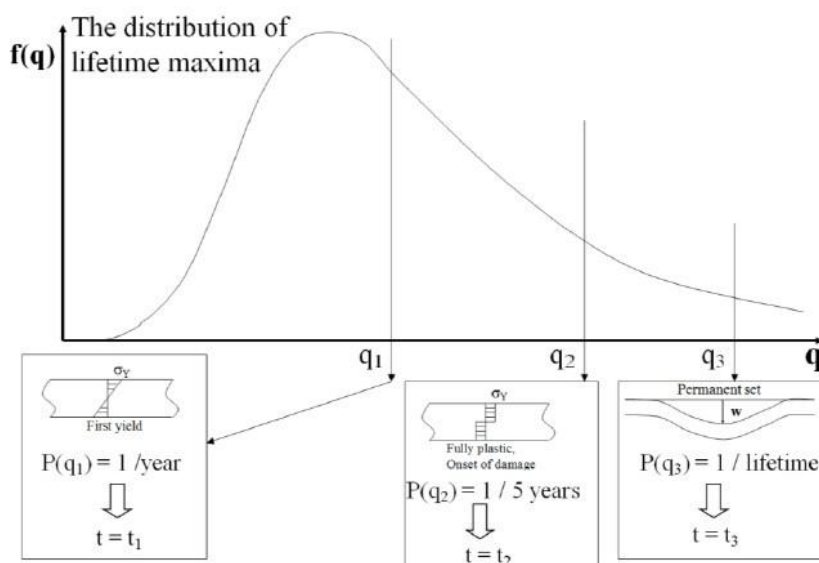
ΚΕΦ-III.11: Στατιστική ανάλυση του φορτίου του πάγου στα ενισχυτικά βασισμένη σε μετρήσεις φορτίων στη Βαλτική.

Το επόμενο βήμα στον καθορισμό του σημείου σχεδίασης είναι η ανάλυση της δομικής αντίδρασης του πλοίου και την επιβολή του φορτίου. Αρχικά, απαραίτητος είναι ο καθορισμός του φορτίου. Για τα φορτία του πάγου θα ήταν λογικό να

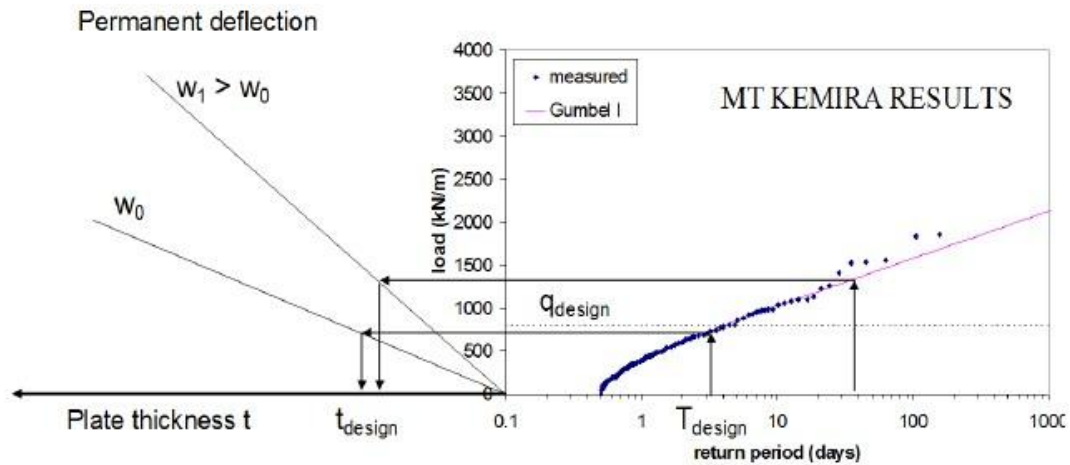
χρησιμοποιήσουμε την πίεση του πάγου ως γνώμονα για την στατιστική ανάλυση. Αυτό όμως δεν είναι εφικτό αφού, η μέτρηση των τιμών αυτών παίρνει πολύ χρόνο με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται σαν δεδομένα οι φορτίσεις που επιβάλλονται στα ενισχυτικά. Η δομική ανάλυση δίνει την σχέση μεταξύ του μέγιστου επιτρεπόμενου βέλους κάμψης w , του φορτίου q και των δομικών διαστάσεων όπως το πάχος t των ελασμάτων. Η σχέση ορίζεται ως εξής :

$$w = f(q; t)$$

Όπου η συνάρτηση f καθορίζεται από την δομική ανάλυση χρησιμοποιώντας την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιώντας την σχέση αυτή, μπορούν να καθοριστούν τα διάφορα δομικά ενισχυτικά στοιχεία σύμφωνα με συγκεκριμένες οριακές συνθήκες όπως η μέγιστη παραμόρφωση ή η περίοδος των φορτίων. Αυτή η διαδικασία για τον καθορισμό του πάχους του ελάσματος φαίνεται στην εικόνα ΚΕΦ-III.12. Η απόφαση για τις οριακές συνθήκες που θα τεθούν όπως το οριακό φορτίο και η συχνότητα εμφάνισης. Επίσης, στην εικόνα ΚΕΦ-III.12 φαίνεται ότι για διαφορετικά φορτία σχεδίασης, η επιλογή της ενίσχυσης μπορεί να είναι παρόμοια αν επιλεγούν οι αντίστοιχες συχνότητες.



ΚΕΦ-III.12: Διαδικασία καθορισμού των δομικών διαστάσεων χρησιμοποιώντας διαφορετικά δομικά όρια σχεδίασης για διαφορετικές συχνότητες.



ΚΕΦ-III.13: Επιλογή ενίσχυσης χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά όρια σχεδίασης και περιόδους φορτίου.

Λόγος του διαμήκου σχήματος της ορισμένης επιφάνειας επαφής είναι προφανές ότι η εγκάρσια μέθοδος ενίσχυσης δίνει ελαφρότερη κατασκευή από την διαμήκη μέθοδο σχεδίασης. Ο τρόπος ορισμού του σημείου σχεδίασης μπορεί να αλλάξει σε περίπτωση που βασίζεται στην πλαστική περιοχή ή σε περιορισμένες μόνιμες παραμορφώσεις όπου η εκτεταμένη πλαστική αντοχή του υλικού χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς. Κατά την πλαστική σχεδίαση, σημαντικό είναι να ελέγχεται η συχνότητα εμφάνισης του φορτίου σχεδίαση και να επιτρεπόμενη παραμόρφωση να επιλέγεται ανάλογα. Γενικότερα, δεν υπάρχει επαρκής εμπειρία στα αποτελέσματα της σχεδίασης αυτής.

Βιβλιογραφία

- Ice Load Prediction Formulas for Icebreaking Cargo Vessels, Kyungsik Choi.
- Ice-Induced Loading on Ship Hull during Ramming, Orjan Fredriksen, 2012.
- Ice-Induced Loads on Ship Hulls, Herman Holm, 2012.
- *Polar Ship Design Standards – State of the Art, and Way Forward*, Andrew M. Kendrick.
- *Review of Ship-ice Interaction Mechanics, Finnish-Canadian research project, 1990.*
- *Ships in ice: The interaction process and principles of design*, Bin Zou, 1996.
- *The Influence of Ice Classification on Design of an LNG Tanker*, Roy Andre Pedersen, 2013.
- *Design of ice breaking ships*, Kaj Riska.
- FSICR 2008: Finnish-Swedish ice class rules 2008.
- GUIDELINES 2010: Guidelines for the application of the Finnish-Swedish Ice Class Rules.

Κεφάλαιο 4^ο : Γενικά χαρακτηριστικά ενός παγοθραυστικού

4.1 Γενικά χαρακτηριστικά του παγοθραυστικού

Τα παγοθραυστικά πλοία που θα κατασκευάζονται στο μέλλον θα μπορούσαν να έχουν την σχεδιάσή τους βασισμένη στην είδη υπάρχουσα τεχνολογία ή να στηριχθούν σε νέες τεχνολογικές εξελίξεις στην ναυπηγική. Η εμπειρία που έχει αποκτηθεί τα προηγούμενα χρόνια μπορεί μεν να βοηθήσει τον κατασκευαστή να αποφύγει λάθη του παρελθόντος αλλά από την άλλη πλευρά η επίμονη χρήση κατασκευαστικών μεθόδων των προηγούμενων ετών μπορεί να αποτελέσει τροχοπέδη στην εξέλιξη νέων αποδοτικότερων τρόπων κατασκευής και πλεύσης. Η ανάπτυξη της παγοθραυστικής τεχνολογίας θα πρέπει να συνδυάζει τόσο την πλήρη κατανόηση των σημερινών κατασκευαστικών μεθόδων όσο και την ενσωμάτωση νέων.

Στο παράρτημα Α βρίσκονται πληροφορίες για παλαιά και νέα παγοθραυστικά. Το παράρτημα αυτό περιέχει πληροφορίες για αμιγώς παγοθραυστικά και παγοθραυστικά-εμπορικά πλοία από τις παρακάτω χώρες : Αργεντινή, Καναδάς, Δανία, Φιλανδία, Ιαπωνία, Σουηδία, Ηνωμένο Βασίλειο, Ρωσία (πρώην Σοβιετική Ένωση), Ηνωμένες Πολιτείες και Γερμανία. Υπάρχει επίσης λίστα με πλοία που είναι ικανά για πλεύση στον πάγο με πάχος τουλάχιστον 0,3 μέτρα. Η λίστα αυτή περιέχει τεχνικά χαρακτηριστικά για κάθε πλοίο όπως επίσης καθώς και άλλου είδους πληροφορίες.

Στα τεχνικά χαρακτηριστικά εμπεριέχονται το μήκος, πλάτος, βύθισμα, κοίλο, εκτόπισμα, φορτωτική ικανότητα, είδος πρόωσης, εγκατεστημένη ισχύς, ταχύτητα, τύπος πλώρης κλπ.

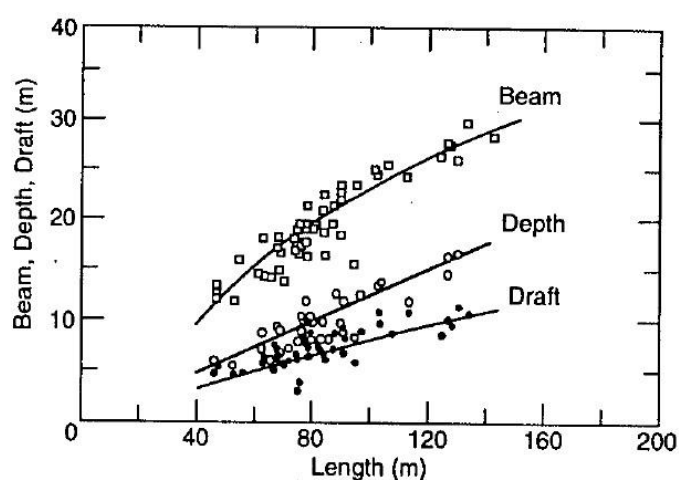
Στα μη τεχνικά χαρακτηριστικά εμπεριέχονται το όνομα του πλοίου, όνομα αδερφών πλοίων, κλάση πάγου, χρόνος ναυπήγησης και ναυπηγείο κατασκευής.

4.2 Παγοθραυστική διαδικασία

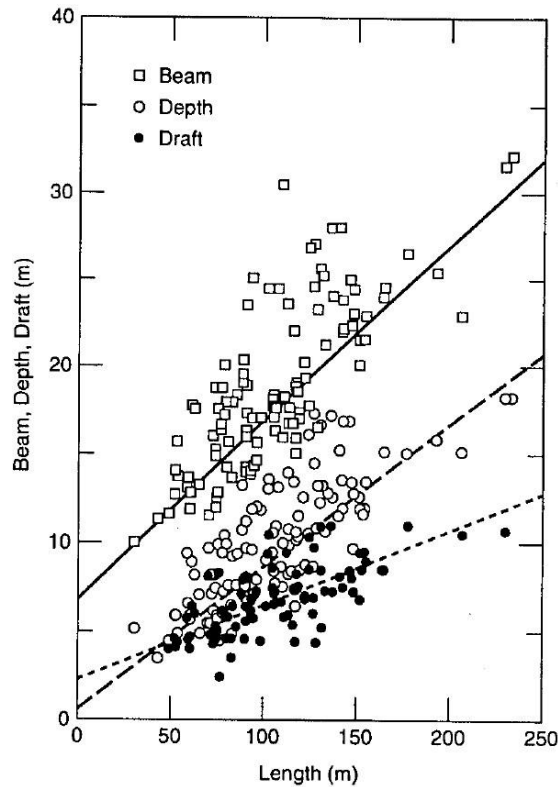
Η θραύση του πάγου αποτελεί μια κυκλική επαναλαμβανόμενη διαδικασία όπου ο πάγος "αστοχεί" σε διάφορα σημεία. Όσο το πλοίο προχωρά μέσα στη παγωμένη επιφάνεια ο πάγος ρωγματώνεται σε όλη την επιφάνεια επαφής του με την πλώρη ενώ στη συνέχεια απωθεί τον σπασμένο πάγο όσο η γάστρα περνά από πάνω του. Καθώς ο πάγος απωθείται προς τα κάτω αυξάνεται η πίεση στην περιοχή επαφής μεταξύ του πάγου και της γάστρας αυξάνοντας της δύναμη τριβής στην επιφάνεια αυτή. Η θραύση του πάγου μπορεί να συνεχιστεί και κατά την βύθισή του. Το σπάσιμο και κατ' επέκταση η βύθιση του πάγου οφείλεται κυρίως στην αστοχία του λόγω κρουστικών καμπτικών τάσεων οι οποίες ρωγματώνουν το επίπεδο του πάγου αρκετά μέτρα μπροστά από την επιφάνεια επαφής. Παρακάτω αποτυπώνονται τόσο ο τρόπος βύθισης στην πλώρη όσο και ο τρόπος ρωγμάτωσης του πάγου στο επίπεδο.

4.3 Μέγεθος και διαστάσεις

Οι κύριες διαστάσεις των παγοθραυστικών πλοίων είναι το μήκος, το πλάτος, το βύθισμα και το κοίλο. Το κοίλο είναι η απόσταση από το κατάστρωμα μέχρι την τρόπιδα ενώ το βύθισμα είναι η απόσταση από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι την τρόπιδα. Στον πίνακα ΚΕΦ-IV.1 απεικονίζονται το πλάτος, το κοίλο και το βύθισμα σε σχέση με το μήκος για τα αμιγώς παγοθραυστικά πλοία ενώ στον πίνακα ΚΕΦ-IV.2 απεικονίζεται το σύνολο των παγοθραυστικών πλοίων, εμπορικών και μη. Είναι προφανές ότι η διασπορά στο διάγραμμα 5α είναι σαφώς μικρότερη από εκείνη του ΚΕΦ-IV.2 αφού στο πρώτο εμπεριέχονται μόνον τα αμιγώς παγοθραυστικά πλοία ενώ στο δεύτερο εμπεριέχονται όλα τα πλοία της λίστας.



ΚΕΦ-IV.1: Διάγραμμα Μήκους/ Πλάτους,Κοίλου,Βυθίσματος μόνο για παγοθραυστικά



ΚΕΦ-IV.2: Διάγραμμα Μήκους/ Πλάτους,Κοίλου,Βυθίσματος για όλα τα πλοία

4.3.1 Πλάτος

Στον πίνακα ΚΕΦ-IV.1, ο λόγος μήκους προς πλάτος των αμιγώς παγοθραυστικών πλοίων διαφέρει από 3,6 έως 4,6 για μήκος από 40 μέχρι 140 μέτρα. Τα πλοία που επιχειρούν στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής εμφανίζονται στενότερα από εκείνα της Φιλανδίας, Σουηδίας και Ρωσίας. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι στην Βαλτική και στο Αρκτικό κομμάτι της Ρωσίας συνηθίζεται η πλεύση με κορυφή. Από τον πίνακα ΚΕΦ-IV.2 υπολογίζουμε ότι το πλάτος αυξάνεται με ρυθμό 0,102 m/m μήκους αρχίζοντας από τα 6,7 μέτρα.

4.3.2 Κοίλο

Στον πίνακα ΚΕΦ-IV.1, ο λόγος μήκους προς κοίλο των αμιγώς παγοθραυστικών πλοίων διαφέρει από 8,9 έως 8,2 για μήκος από 40 μέχρι 140 μέτρα. Ο λόγος αυτός αυξάνεται για τα εμπορικά πλοία ενώ είναι μικρότερος για τα αμιγώς παγοθραυστικά. Από τον πίνακα ΚΕΦ-IV.2 υπολογίζουμε ότι το κοίλο αυξάνεται με ρυθμό 0,08 m/m μήκους.

4.3.3 Βύθισμα

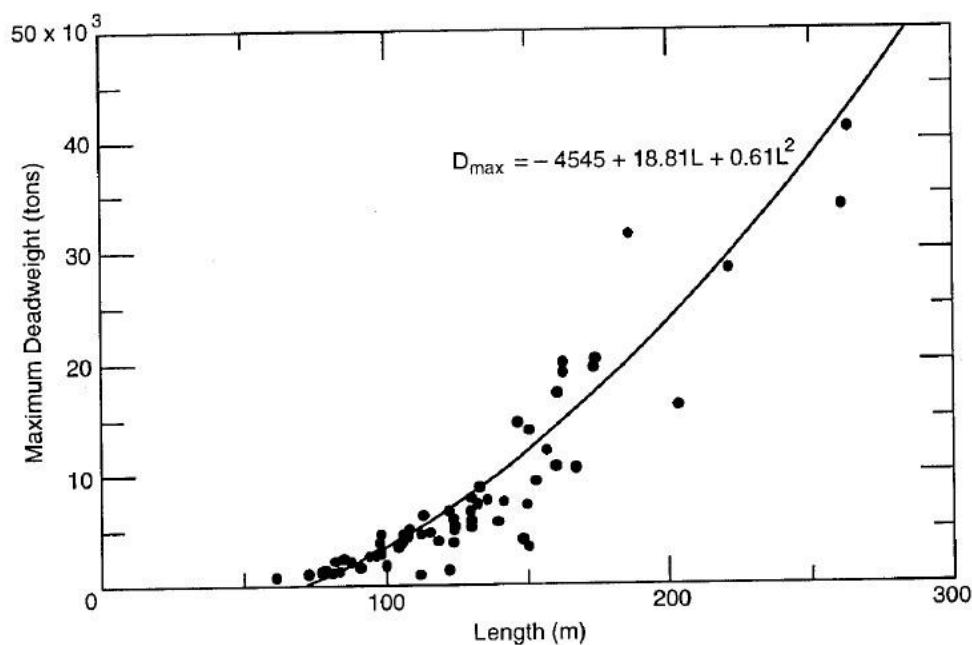
Στον πίνακα ΚΕΦ-IV.1, ο λόγος μήκους προς πλάτος των αμιγώς παγοθραυστικών πλοίων διαφέρει από 11,4 έως 12,2 για μήκη από 40 μέχρι 140 μέτρα. Από τον πίνακα ΚΕΦ-IV.2 υπολογίζουμε ότι αυξάνεται με ρυθμό 0,042m/m μήκους.

4.3.4 Μέγιστη Φορτωτική Ικανότητα

Στον πίνακα 6 απεικονίζεται η γραφική παράσταση του μέγιστου φορτίου σε σχέση με το μήκος των πλοίων του παραρτήματος Α και η οποία έχει εξίσωση:

$$D_{\max} = -4545 + 18.81 L + 0.61 L^2$$

Όπου D_{\max} το μέγιστο φορτίο και L το μήκος του πλοίου.



ΚΕΦ-IV.3: Διάγραμμα Μήκους/ Μέγιστου ωφέλιμου φορτίου

Η γάστρα του πλοίου εκτίθεται σε διάφορες περιβαλλοντικές δυνάμεις κατά τη διάρκεια της ζωής της. Οι δυνάμεις αυτές περιλαμβάνουν το υδροστατικό φορτίο, φορτία από τα κύματα, φορτία ανέμου και κρουστικά φορτία λόγω της επαφής του με τον πάγο. Το φορτίο που δέχεται το πλοίο κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης με τον πάγο αποτελεί το σημαντικότερο κομμάτι της εκτίμησης για το σχεδιασμό του, δεδομένου ότι δρα στην Αρκτική και στις παρακείμενες περιοχές. Για έναν σχεδιαστή-μηχανικό, η επιλογή του κατάλληλου φορτίου σχεδιασμού του πάγου ήταν πάντα μια πρόκληση, λόγω της μεταβλητότητας του από περιοχή σε περιοχή καθώς και της περιπλοκότητας της διαδικασίας αλληλεπίδρασης μεταξύ της γάστρας και του πάγου.

Από μηχανικής απόψεως, η αλληλεπίδραση γάστρας-πάγου και γενικότερα πλοίου-πάγου χαρακτηρίζεται από μία συνεχή διαδικασία θραύσης του πάγου και κόπωση του πλοίου. Η ρωγμή ξεκινά συνήθως από ατέλειες και ανωμαλίες στην δομή του πάγου και οδηγεί σταδιακά στη θραύση και θρυμματισμό του. Κατά συνέπεια, η επιφάνεια επαφής μεταξύ του πάγου και της γάστρας μειώνεται και η πίεση στη διεπιφάνεια γάστρας-πάγου αναδιανέμεται. Επιπλέον, το φορτίο στη μάζα του πάγου αναδιανέμεται και προκαλεί επιπλέον θρυμματισμό. Η πίεση στις περιοχές όπου η διεπιφάνεια γάστρας-πάγου είναι

μειωμένη, αυξάνεται σημαντικά. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται κρίσιμες ζώνες και είναι αυτές που ορίζουν που πρέπει να στρέψει ο μελετητής την προσοχή του για την αντιμετώπιση των λεγόμενων τοπικών φορτίσεων. Οι κρίσιμες ζώνες αυτές μπορούν να εντοπιστούν και να αναλυθούν μέσω της μεθόδου FMS .

Η τροχιά των ρωγμών που αναπτύσσονται στην δομή του πάγου είναι αυτές που ορίζουν το μέγεθος και τη γεωμετρία των θρυμματισμένων κομματιών και κατά συνέπεια επηρεάζουν άμεσα τη δομή, τον αριθμό το μέγεθος και την πυκνότητα των κρίσιμων ζωνών. Η κατεύθυνση της ρωγμής είναι τυχαία αφού εξαρτάται από τις ατέλειες και ανωμαλίες της εκάστοτε δομής πάγου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι κρίσιμες ζώνες να χαρακτηρίζονται και αυτές από την ίδια τυχαία φύση. Τα παραπάνω έχουν επιβεβαιωθεί και από δοκιμές παγοθραυστικών κατά τις οποίες οι ζώνες υψηλής πίεσης καθώς και η πυκνότητά τους συνεχώς μεταβάλλονταν. Παρ'όλα αυτά η τυχαία φύση των τοπικών φορτίσεων και κρίσιμων ζωνών μπορούν να γίνει διαχειρίσιμη μέσα από την προμπαμπλιστική ανάλυση τους. Συνήθως, τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν κατά την ανάλυση αυτή προέρχονται από τα αποτελέσματα διαφόρων δοκιμών. Με αυτό τον τρόπο τα στοιχεία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του φορτίου σχεδιασμού της δομής.

Η δομή της γάστρας του πλοίου είναι ένας πολύπλοκος συνδυασμός ελασμάτων, ενισχυτικών και υποστηριγμάτων. Στην πραγματικότητα, η αντοχή του πλοίου χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες. Αυτές είναι η πρωτογενής, η δευτερογενής και η τριτογενής. Η πρωτογενής ή ολική αντοχή συνδέεται άμεσα με την αντοχή της γάστρας σαν δοκό και τα φορτία τα οποία αναπτύσσονται σε αυτήν ονομάζονται ολικά. Η δευτερογενής ή ημιτοπική αντοχή συνδέεται με την ανάλυση της αντοχής των εξωτερικών ελασμάτων του πλοίου. Τέλος η τριτογενής ή τοπική αντοχή συνδέεται με την αντοχή της περιοχής μεταξύ δύο νομέων ή δύο ενισχυτικών και πρέπει να είναι σε θέση να αντέξει τα υψηλά φορτία που δημιουργούνται λόγω της θραύσης του πάγου.

4.4 Type Ship

Η δομή του πλοίου πρέπει να σχεδιάζεται και να κατασκευάζεται ώστε να αντέχει τόσο τα ολικά όσο και τα τοπικά φορτία που εμφανίζονται. Ο πιο κοινός παράγοντας που επηρεάζει την ολική αντοχή είναι η πυκνότητα των διαμήκων ενισχυτικών τα οποία ενισχύουν την αντοχή του πλοίου, κατά την παγοθραυστική διαδικασία, κυρίως στις μεγαλύτερες κλάσεις παγοθραυστικών. Η παραπάνω κατάσταση λαμβάνει χώρα όταν η πλήρη ανυψώνεται και σκαρφαλώνει πάνω από το στρώμα πάγου. Μικρότερης κλάσεις αρκτικών πλοίων, το λεγόμενο Type ship και γενικά πλοία τα οποία δεν προορίζονται μόνο για πλεύση σε παγωμένα νερά, όπως λίμνες, δεν χρειάζονται πυκνότερα διαμήκη ενισχυτικά από τα πλοία που επιχειρούν στην ανοικτή θάλασσα αφού οι καμπτικές φορτίσεις που ασκούνται στα πλοία αυτά δεν υπερβαίνουν τις φορτίσεις στα κοινά πλοία ανοικτής θάλασσας σε κατάσταση έντονης θαλασσοταραχής. Η δομή σε τοπικό επίπεδο πρέπει να μπορεί να αντισταθεί σε αστοχία σε κάμψη, διάτμηση, λυγισμό και tripping. Αν και η αστοχία σε κάμψη είναι κατά κανόνα η πιο συνήθης διαδικασία αστοχίας, η εμπειρία μας έχει δείξει ότι ο λυγισμός των ενισχυτικών και το tripping αποτελούν τα πιο επικίνδυνα είδη αστοχίας. Ένα Type ship δεν πρέπει ποτέ να χρησιμοποιείται για έντονη παγοθραυστική διαδικασία όπου υπάρχει κίνδυνος η πλήρη να υψωθεί πάνω από το στρώμα πάγου διότι υπάρχει πιθανότητα να υποστεί ζημία στον πυθμένα. Ο ίδιος κίνδυνος υπάρχει και σε περίπτωση ερματισμού όπου η πλεύση γίνεται εντόνως έμπρυμα και υπάρχει πιθανότητα ο πυθμένας να συγκρουστεί με κομμάτια πάγου. Γενικότερα η πιθανότητα αστοχίας στο πυθμένα μετά από σύγκρουση με κομμάτια πάγου είναι πολύ πιο πιθανή αφού είναι λιγότερο ενισχυμένος από την ζώνη πάγου της γάστρας.

Στα παραδοσιακά παγοθραυστικά, τα ελάσματα στηρίζονται από τα κύρια ενισχυτικά με πυκνότητα περίπου 40 εκατοστά. Τα κύρια ενισχυτικά αυτά στηρίζονται στα ανάλογα διαμήκη ενισχυτικά που και αυτά με τη σειρά τους στηρίζονται στα κύρια εγκάρσια ενισχυτικά (Web frames) ή στις φρακτές. Το κέλυφος (grillage) αυτό που σχηματίζεται από τις εγκάρσιες και διαμήκεις ενισχύσεις στηρίζει την κύρια δομή και λαμβάνει τα ολικά φορτία ενώ τα κύρια ενισχυτικά λαμβάνουν τα τοπικά φορτία. Τα παραπάνω είναι βασισμένα στην λογική ότι η αρχική αστοχία θα ξεκινήσει από τις καμπτικές φορτίσεις των κύριων διαμήκων ενισχυτικών (girder) και ως αποτέλεσμα η απόσταση (spacing) μεταξύ τους πρέπει να είναι μικρή. Το παραπάνω λύνει κατά ένα μέρος το πρόβλημα της διαμήκους αντοχής του πλοίου με αποτέλεσμα ο κίνδυνος πια να εντοπίζεται στο λυγισμό των ενισχυτικών.

Η γνώση των επικίνδυνων περιοχών έχει ως αποτέλεσμα την εξέλιξη και προσαρμογή της μελέτης και κατασκευή της δομής του πλοίου. Τυπικός τρόπος σχεδίασης, πια, αποτελεί η αύξηση της απόστασης μεταξύ των κύριων ενισχυτικών τα οποία στηρίζουν τα καταστρώματα με τη λογική ότι η επιπλέον αντοχή της μεμβράνης των ελασμάτων συμβάλει στην αντοχή και πρέπει να συνυπολογίζεται. Αυτά τα ενισχυτικά βασίζονται σε σχεδίαση κατά της κάμψης, λυγισμού και ανάπτυξη μεγάλου βέλους κάμψης με αποτέλεσμα να σχεδιάζονται παχύτερα ώστε να καλύψουν τη μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους αλλά και την απουσία των οριζόντιων ενισχυτικών. Η τελική δομή έχει λεπτότερα ελάσματα, παχύτερα κύρια ενισχυτικά και λιγότερες ενώσεις και εξαρτήματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μία απλούστερη και φθηνότερη κατασκευή.

4.5 Κύρια τμήματα του πλοίου και τα είδη τους

4.5.1 Σχεδίαση γάστρας

Η σχεδίαση της γάστρας στοχεύει :

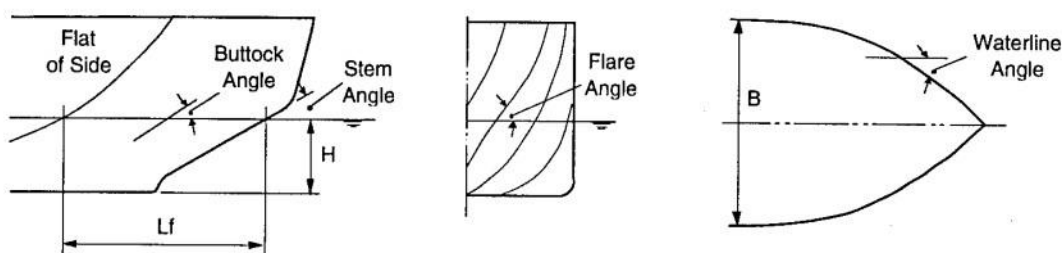
- Στην ελαχιστοποίηση της αντίστασης κατά την παγοθραυστική διαδικασία με κατάλληλη επιλογή σχήματος πλώρης, πρύμνης και μέσου τμήματος.
- Στην διασφάλιση της επαρκούς ελκτικότητας.
- Στην εξασφάλιση της πλευσης και προς τις δύο κατευθύνσεις αν αυτό απαιτείται.
- Εξασφάλιση κατάλληλης απρόσκοπτης λειτουργίας της έλικας ελαχιστοποιώντας την ποσότητα του πάγου που επηρεάζει την έλικας.

Οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την αντίσταση στον πάγο είναι το πλάτος B και η κλίση της πλώρης ϕ . Η ύπαρξη μεγάλου πλάτους έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη αντίσταση και έτσι στενότερα πλοία με μεγάλο λόγο L / B είναι αποδοτικότερα για πλευση στον πάγο. Ωστόσο, για ένα παγοθραυστικό το μικρό πλάτος δεν αποτελεί πάντα πλεονέκτημα αφού τα αμιγώς παγοθραυστικά πλοία συνοδείας θα πρέπει να έχουν αρκετά μεγάλο πλάτος ώστε το κανάλι που ανοίγουν να είναι επαρκούς μεγέθους. Γενικά τα μεγαλύτερα παγοθραυστικά έχουν πλάτος περίπου 26 μέτρα. Επίσης, η μικρότερη γωνία της πλώρης έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη δύναμη κάμψης, διατηρώντας παράλληλα την οριζόντια συνιστώσα της δύναμης περιορισμένη, για το λόγο αυτό τα παγοθραυστικά πλοία έχουν μικρές γωνίες πλώρης από 20 μέχρι 25 μοίρες. Τέλος, για να μειωθεί η αναπτυσσόμενη τάση στο άκρο της πλώρης, της δίνεται καμπύλη μορφή.

Η ελκτικότητα του πλοίου βελτιώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η εγκάρσια δύναμη η οποία το κινεί με αποτέλεσμα σε πλοία όπως τα παγοθραυστικά, όπου οι ελιγμοί είναι δύσκολο και συχνό φαινόμενο, να χρησιμοποιούνται αζιμούθιες προωστήριες εγκαταστάσεις. Από την σκοπιά της σχεδίασης της γάστρας, η πρυμναία περιοχή είναι κρίσιμη αφού συχνά τα παγοθραυστικά πλοία θα χρειαστεί να κινηθούν ανάποδα με αποτέλεσμα η περιοχή της προωστήριας εγκατάσταση να συναντήσει κομμάτια πάγου. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα, όπως η πλώρη έτσι και η πρύμνη να χρειάζεται να σχεδιαστεί με γνώμονα τόσο την προστασία της έλικας όσο και την αποδοτική παγοθραυστική διαδικασία. Η εμπειρία μέχρι σήμερα έχει δείξει ότι τα εμπορικά πλοία, στην περιοχή κυρίως της Βαλτικής θάλασσας όπου ο πάγος είναι σχετικά λεπτός, μπορούν να κινούνται με ασφάλεια είτε σε ήδη ανοιγμένα κανάλια και μάλιστα με πλώρη με βολβό όπως τα κλασικά εμπορικά πλοία ή με την συνοδεία παγοθραυστικού. Ο λόγος για την ύπαρξη βολβού σε πλοία που επιχειρούν υπό αυτές τις συνθήκες είναι ότι ο σπασμένος πάγος εκτοπίζεται γύρω από την γάστρα με τρόπο που μοιάζει με την υδροδυναμική ροή στην ανοικτή θάλασσα. Η βολβοειδής διαμόρφωση αυτή μπορεί να βελτιστοποιηθεί ώστε να μειωθεί η αντίσταση λόγω της ύπαρξης πάγου. Μόνο σε πλοία που πρόκειται να επιχειρήσουν χωρίς συνοδεία είναι αναγκαία διαφορετική σχεδίαση της πλώρης.

4.5.2 Σχήμα της πλώρης

Το σχήμα της πλώρης ενός παγοθραυστικού χαρακτηρίζεται από πέντε βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά όπως αυτά φαίνονται στο παρακάτω σχέδιο ΚΕΦ-IV.10 . Αρχικά, η καίρια τιμή της γωνίας που σχηματίζει ένας νομέας με την επιφάνεια του πάγου (flare angle) προσδίδει στο πλοίο αποδοτικότητα κατά την παγοθραυστική διαδικασία και περιορίζει την βύθιση κομματιών πάγου προς τον πυθμένα ενώ η γωνία της ισάλου (waterline angle) προσφέρει στο πλοίο την επαρκή μετατόπιση του πάγου μακριά από την γάστρα. Από την άλλη πλευρά, η γωνία Buttock καθώς και η γωνία της ακραίας επιφάνειας της πλώρης (stem angle) εξαρτώνται άμεσα τόσο από την γεωμετρία των νομέων όσο και των ισάλων και προσδίδουν στο πλοίο την δυνατότητα να σπάει και να μετατοπίζει τον πάγο μακριά από την πορεία του. Τις δύο τελευταίες δεκαετίες ο σχεδιασμός της πλώρης των παγοθραυστικών έχει στραφεί στην αύξηση των γωνιών των νομέων και στην μείωση των γωνιών των ισάλων, των buttocks και της πρωραίας επιφάνειας. Οι αλλαγές αυτές έχουν προέλθει από την χρόνια εμπειρία και μελέτη της αποδοτικότητας διάφορων σχεδιασμών.



ΚΕΦ-IV.4: Γραφικός ορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών γάστρας

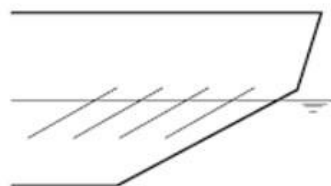
4.5.3 Πλώρη

Στα πλοία τα οποία προορίζονται για πλεύση σε νερά παρουσία πάγου, η μεγαλύτερη προσοχή κατά την μελέτη και κατασκευή τους δίνεται στην πλώρη και στο μέσο τμήμα. Αυτό είναι απόλυτα λογικό αν αναλογιστούμε ότι οι μεγαλύτερες καταπονήσεις της μεταλλικής κατασκευής λαμβάνουν χώρα πρώτον στην πλώρη και δεύτερον στο μέσο τμήμα, ενώ όσον αφορά την πρύμνη ο σχεδιασμός της γίνεται με γνώμονα την προστασία της προωστήριας εγκατάστασης (έλικας) από εισερχόμενα κομμάτια πάγου. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στα διάφορα είδη πλώρης και μέσου τμήματος που χρησιμοποιούνται για την σχεδίαση και κατασκευή παγοθραυστικών πλοίων. Στην παρακάτω παρουσίαση θα χρησιμοποιηθεί η επίσημη αγγλική ορολογία για την ονομασία των διάφορων τύπων πλώρης.

4.5.4 Είδη Πλώρης

1. Straight Stem with Parallel Buttocks

Παγοθραυστικά με ευθεία πλώρη είναι ένα σύνηθες είδος παγοθραυστικού στην Ρωσία και την Φιλανδία από το 1950. Η γωνία της πλώρης κυμαίνεται από 20° μέχρι 25° . Η χρησιμότητά τους έγκειται κυρίως στην απλότητα της κατασκευής και στην σχετικά επαρκή απόδοσή τους.



ΚΕΦ-IV.5: Straight Stem with Parallel Buttocks

2. Concave Stem

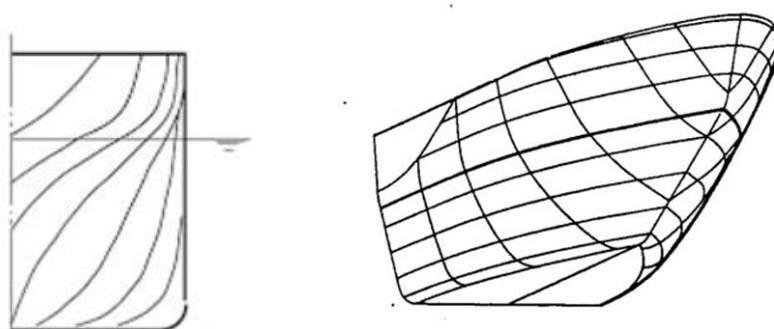
Το είδος της πλώρης αυτής χρησιμοποιούνταν σε μεγάλη γκάμα παλαιότερων παγοθραυστικών μέχρι και σήμερα και προέρχεται από τον σχεδιασμό καναδικών παγοθραυστικών. Πρόκειται για μία πολυπλοκότερη μορφή πλώρης σε σχέση με την παραπάνω τόσο κατασκευαστικά όσο και σχεδιαστικά και χρησιμοποιείται κυρίως λόγω της εξαιρετικής απόδοσής της κατά την παγοθραυστική διαδικασία και για την μείωση του ρίσκου προσαράγματος του πλοίου στο στρώμα πάγου. Λόγω του σχήματός της χαρακτηρίζεται από μεγάλες γωνίες νομέων κοντά στην πλώρη. Χρησιμοποιήθηκε εκτενώς κατά την δεκαετία του 1990.



ΚΕΦ-IV.6: Concave Stem

3. High Flare Angles

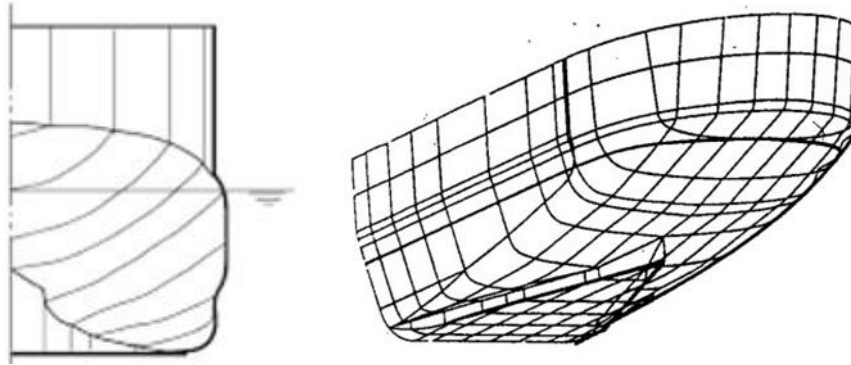
Ονομάζεται και πλώρη Melville και χαρακτηρίζεται από μεγάλες γωνίες των πρωραίων νομέων με το οριζόντιο επίπεδο. Συνδυαζόμενη με την μικρή γωνία της ακραίας επιφάνειας της πλώρης και μικρό συντελεστή C_b έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση την αντίστασης τόσο κατά την πλεύση σε πάγο όσο και σε ανοικτά νερά. Η πλώρη αυτή σχεδιάστηκε, επίσης, με γνώμονα την περαιτέρω αύξηση της αποδοτικότητας κατά την παγοθραυστική διαδικασία και την μείωση των φορτίσεων των ώμων του πλοίου με αποτέλεσμα την αντικατάσταση του παραπάνω είδους (Concave Stem). Παράδειγμα της πολύ καλής συμπεριφοράς της μορφής πλώρης αυτής αποτελεί η εισαγωγή τους στο σχεδιασμό των παγοθραυστικών εμπορικών πλοίων του Καναδά όπου η ταχύτητα κατά την πλεύση σε στρώμα πάγου ενός μέτρου αυξήθηκε έως και 400%.



ΚΕΦ-IV.7: High Flare Angles

4. Spoon Bow with Reamers

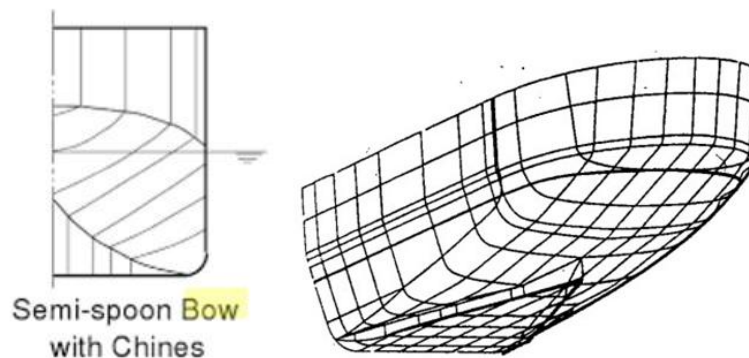
Η γεωμετρία αυτού του είδους επεκτείνει το πλάτος του πρωραίου τμήματος του πλοίου έξω από τα όρια του μέσου τμήματος. Με αυτόν τον τρόπο η τριβή του μέσου τμήματος με το στρώμα πάγου ελαχιστοποιείται και αυξάνεται η ελικτικότητα. Το μειονέκτημα της γεωμετρίας αυτής είναι η υψηλή αντίσταση που δημιουργεί στα ανοικτά νερά και συμπεριφορά σε κυματισμούς. Η μορφή αυτή είναι επαρκώς αποδοτική τόσο σχεδιαστικά όσο και κατασκευαστικά αφού οι γωνία των πρωραίων νομέων κρατείται σταθερή σε όλο το μήκος της πλώρης. Η μορφή αυτή, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, προσέδιδε αυξημένη αντίσταση και έτεινε να συγκεντρώνει μεγάλο όγκο σπασμένου πάγου στην πλώρη με αποτέλεσμα η χρήση της να περιοριστεί. Παρ' όλα αυτά, με την εισαγωγή στα παγοθραυστικά του συστήματος πλώσης, με τη βοήθεια του νερού, της πλώρης η συγκέντρωση αυτή το πάγου μειώνεται αισθητά. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η χρήση της μορφής αυτής να χρησιμοποιείται περισσότερο, κυρίως σε εμπορικά πλοία.



ΚΕΦ-IV.8: Spoon Bow with Reamers

5. Semi Spoon Bow with Chines

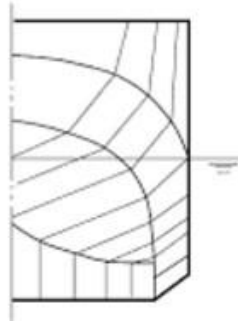
Η μορφή αυτή είναι παρόμοια με την παραπάνω με μόνη διαφορά ότι η πλάτυση της πλώρης γίνεται στο ύψος των ώμων του πλοίου (shoulders). Όπως και η παραπάνω μορφή, εμφανίζει μέτρια χαρακτηριστικά κατά την πλεύση σε ανοικτή θάλασσα αλλά φαίνεται να προσδίδει αποδοτικότερη παγοθραυστική διαδικασία και να μειώνει την συγκέντρωση του πάγου στην πλώρη.



ΚΕΦ-IV.9: Semi Spoon Bow with Chines

6. Flat Family

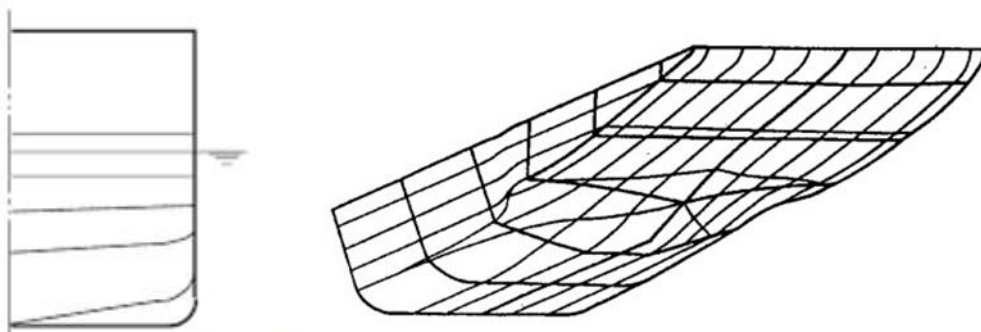
Η μορφή αυτή παρομοιάζει τις δύο προαναφερθείσες, με την διαφορά ότι έχουν χρησιμοποιηθεί επίπεδα ελάσματα αντί για καμπύλα για την μείωση του κόστους κατασκευής. Η μορφή αυτή αναπτύχθηκε ως μία μέση λύση μεταξύ κόστους και παγοθραυστικής απόδοσης και χρησιμοποιείται κυρίως στον Καναδά.



ΚΕΦ-IV.10: Επίπεδη πλώρη

7. Πλώρη Thyssen-Waas

Αυτός ο τύπος πλώρης αποτελεί μία πολύ διαφορετική μορφή σε σχέση με της προαναφερθείσες συμβατικές μορφές. Η πλώρη αυτή, αρχικά, ρωγματώνει τον πάγο λόγω διάτμησης στο μέγιστο πλάτος της και ύστερα τον σπάει, κάμπτοντάς τον με το βάρος της πλώρης. Χαρακτηρίζεται από επίπεδες ισάλους στο πρωραίο άκρο, αυξημένο πλάτος, μικρή γωνία πλώρης με κατάλληλη γεωμετρία για μετατόπιση του πάγου και μεγάλες γωνίες νομέων κάτω από την ίσαλο σχεδίασης. Η δυνατότητα καθαρισμού της πλώρης αυτής είναι τέτοια ώστε το κανάλι που ανοίγει να είναι 85% ελεύθερο πάγου. Ο συγκεκριμένος τύπος πλώρης χρησιμοποιείται από το 1980. Από τους παραπάνω 7 τύπους πλώρης οι πρώτοι τρεις μπορούν να θεωρηθούν συμβατικοί ή παραδοσιακοί επειδή διατηρούν το κλασικό σχήμα της γάστρας για πλεύση και σε ανοικτή θάλασσα, ενώ οι επόμενοι τέσσερεις τύποι θεωρούνται αντισυμβατική επειδή εμφανίζουν σημαντικές διαφορές με το κλασικό σχήμα ώστε να αποκτήσουν αποδοτικότερα χαρακτηριστικά σε παγωμένη επιφάνεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η επιλογή του τύπου πλώρης να εξαρτάται άμεσα με την περιοχή στην οποία επιχειρεί.

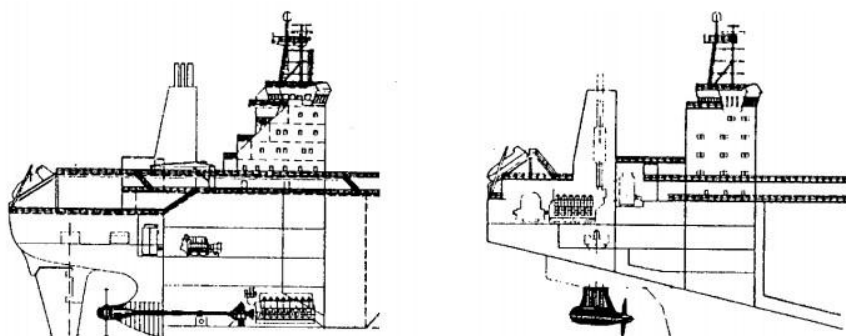


ΚΕΦ-IV.11: Πλώρη Thyssen-Waas

4.5.5 Μέσο Τμήμα

Το μέσο τμήμα ενός εμπορικού παγοθραυστικού πλοίου διαφέρει από την κλασική σχεδίαση των πλοίων ανοικτής θαλάσσης. Γενικά, το τμήμα αυτό χαρακτηρίζεται από τρεις παραμέτρους : τη γωνία νομέων (flare angle) ,τα παράλληλα τοιχώματα και την διαμήκη κωνικότητα (longitudinal taper). Ο στόχος της ύπαρξης γωνίας με το οριζόντιο επίπεδο, στους νομείς του μέσου τμήματος, είναι για να μειώνεται η αντίσταση του πλοίου όταν περνάει από κανάλι που άνοιξε το ίδιο. Για το λόγο αυτό κάποια παγοθραυστικά έχουν πρωραίους πεπλατυσμένους ώμους ώστε να ανοίγουν πλατύτερα κανάλια και να μειώνεται η αντίσταση. Παρομοίως, το παράλληλο τμήμα με διαμήκη κωνικότητα υπάρχει με σκοπό να εξαλείφει την αντίσταση του πάγου με τη σταδιακή μείωση του πλάτους όσο κινούμαστε προς την πρύμνη. Σημαντικό μειονέκτημα της διαμήκους κωνικότητας αποτελεί το υψηλό κατασκευαστικό κόστος όπως επίσης η αυξημένη πιθανότητα ακινητοποίησης του πλοίου σε στενά περάσματα. Χρησιμοποιείται κυρίως σε πλοία που επιχειρούν με συνοδεία παγοθραυστικού και όχι σε αμιγώς παγοθραυστικά πλοία.

4.5.6 Σχήμα της πρύμνης



ΚΕΦ-IV.12: Παράδειγμα σχεδίασης πρύμνης

Όλα τα παγοθραυστικά πλοία πρέπει να μπορούν να κινηθούν ανάποδα στον πάγο. Κάποια παγοθραυστικά μπορεί να είναι σε θέση να κινηθούν ανάποδα μόνο σε σπασμένο πάγο ή προηγούμενα ανοιγμένα κανάλια, παρ' όλα αυτά το μεγαλύτερο μέρος των παγοθραυστικών συνοδείας πρέπει να είναι σε θέση να πλεύσουν ανάποδα σε ενιαίο παγωμένο στρώμα. Όπως και στην πλήρη έτσι και η πρύμνη παίρνει την μορφή της από τις προδιαγραφές του παγοθραυστικού. Η κύρια ανησυχία με την πλεύση ανάποδα είναι η επαφή του πάγου με τις προπέλες. Μέχρι σήμερα και παρά τις προσπάθειες που έχουν καταβάλει οι μελετητές δεν μπορεί να αποφευχθεί η έντονη επαφή του πάγου με τις προπέλες κατά την ανάποδη πλεύση.

Βιβλιογραφία

- *Northern Sea Route Reconnaissance Study A Summary of Icebreaking Technology, Devinder S. Sodhi, 1995.*
- *International ship and offshore structures congress, 2012.*
- *Oden-Icebreaker technology for the year 2000, Bengt M. Jahansson and C Liljestrom, 2000.*
- *A Proposed Icebreaker for Shipping LNG from the Canadian Arctic, Robert A. Dick.*
- *Suggestion of a design load equation for ice-ship impacts, Yun-Hyuk Choi, Hye-Yeon Choi, Chi-Seung Lee, Myung-Hyun Kim¹ and Jae-Myung Lee , 2013.*
- *Guidance for Arctic Shipping, ABS, 2010.*
- *Ships in ice: The interaction process and principles of design, Bin Zou, 1996.*

Κεφάλαιο 5^ο : Πλαστική Σχεδίαση

5.1 Εισαγωγή

Η δομή του πλοίου αποτελεί έναν πολύπλοκο σχεδιασμό ελασμάτων, ενισχυτικών και υποστηρικτικών νομέων. Το έλασμα μαζί με τα ενισχυτικά δημιουργούν ένα ενισχυμένο έλασμα. Με τη σειρά του, το ενισχυμένο έλασμα μαζί με τους νομείς δημιουργεί ένα ακόμα μεγαλύτερο ενισχυμένο πάνελ. Τελικά, η δομή του πλοίου μπορεί να εκφραστεί σαν το άθροισμα των εκτεταμένων αυτών πάνελ. Γενικά, υπάρχουν δύο είδη δομών του πλοίου, η διαμήκης και η εγκάρσια, ανάλογα με την κατεύθυνση των νομέων.

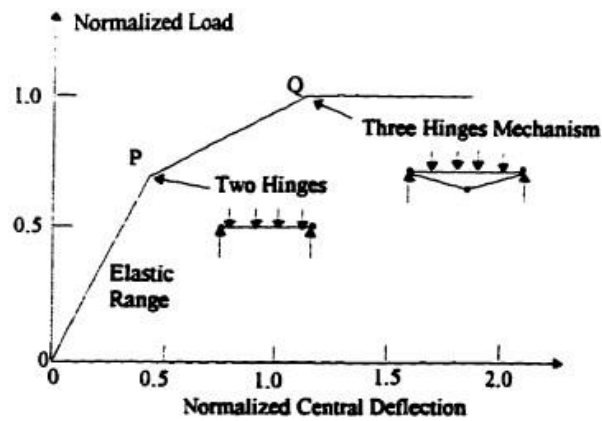
Υπάρχουν τρία επίπεδα φόρτισης τα οποία αναφέρονται στην ανάλυση της δομής του πλοίου. Πρώτον, υπάρχουν τα ελάσματα τα οποία απορροφούν κομμάτι της ενέργειας κατά την φόρτισή τους ενώ μεταφέρουν την υπόλοιπη ενέργεια στις ενισχύσεις. Δεύτερον, ακολουθεί τα ενισχυτικά τα οποία δρουν σαν δοκοί και μεταφέρουν το φορτίο στα άκρα τους τα οποία στηρίζονται στα κύρια διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά. Τέλος, έχουμε το άθροισμα των παραπάνω μαζί με τα άλλα υποστηρικτικά ενισχυτικά, τα οποία δέχονται το φορτίο και δρουν σαν ένα ενιαίο πάνελ.

Η αντοχή του παραπάνω πάνελ χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες. Την πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα. Η πρωτεύουσα η αλλιώς ολική αντοχή ασχολείται κυρίως με την αντοχή των κύριων διαμήκων ενισχυτικών της γάστρας τα οποία εκτείνονται στο μεγαλύτερο μήκος του κύριου καταστρώματος και του πυθμένα. Τα φορτία τα οποία επηρεάζουν την περιοχή αυτή είναι συνήθως ολικά φορτία, όπως για παράδειγμα, η μέγιστη φόρτιση της πλώρης κατά την παγοθραυστική διαδικασία. Η δευτερεύουσα ή ημι-ολική αντοχή ασχολείται με την αντοχή των πάνελ που αναφέρθηκαν παραπάνω ή γενικότερα, με τις φορτίσεις μεταξύ δύο ενισχυτικών η κύριων ενισχυτικών. Τέλος, η τριτεύουσα ή τοπική αντοχή, ασχολείται με την φόρτιση περιορισμένων περιοχών, των λεγόμενων ζωνών υψηλής πίεσης, οι οποίες αναφέρθηκαν σε παραπάνω κεφάλαιο. Οι περιοχές αυτές είναι υψίστης σημασίας για την σχεδίαση και μελέτη του πλοίου.

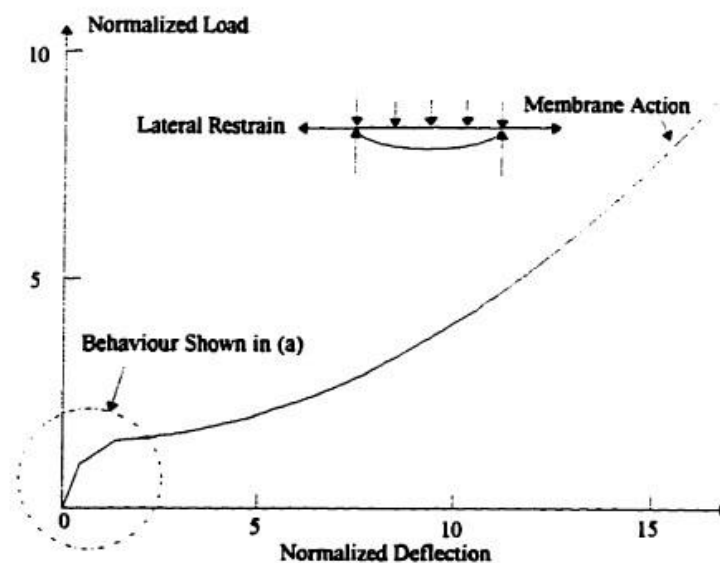
Παρακάτω θα αναφερθούμε στην πλαστική αστοχία ενός ελάσματος τριών και δύο κόμβων αντίστοιχα.

5.2 Μοντέλο εκτεταμένου ελάσματος

Ορίζουμε το έλασμα αυτό σαν ένα πολύ μακρύ έλασμα το οποίο φορτίζεται από ομοιόμορφη τάση. Συνήθως, η μορφή αυτή αστοχεί σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις, την πλαστική αστοχία (plastic collapse), την παραμένουσα παραμόρφωση (permanent set) και την πλαστική ρήξη (ultimate rupture). Η πλαστική αστοχία ορίζεται ως ο σχηματισμός ενός μηχανισμού τριών κόμβων όπου, το έλασμα δεν έχει πια την δυνατότητα να φέρει αντίσταση στο ασκούμενο φορτίο. Για τα ολκιμότερα είδη χάλυβα ο μηχανισμός αυτός οδηγεί στη δημιουργία μόνιμου βέλους κάμψης. Παραμένουσα πλαστική παραμόρφωση ορίζεται η παραμόρφωση του ελάσματος από καμπτικές φορτίσεις κοντά στις στηρίξεις τους. Τα χαρακτηριστικά των ακραίων κόμβων είναι υπεύθυνα για την δημιουργία της παραμόρφωσης αυτής. Τέλος, πλαστική ρήξη ορίζεται ως η υπερφόρτιση του υλικού, ξεπερνώντας την αντοχή της μεμβράνης. Η τελευταία περίπτωση επηρεάζει άμεσα την ασφάλεια του πλοίου.



α) Δημιουργία 2 και 3 κόμβων



β) Η ενέργεια της μεμβράνης

ΚΕΦ-V.1: Διαγράμματα μηχανισμών πλαστικής αστοχίας

Γενικά, η αντοχή του υλικού ξεπερνά κατά πολύ το όριο της αστοχίας τριών κόμβων, αν υπολογιστεί η ενέργεια της μεμβράνης. Η εξάρτηση από την μεμβράνη προϋποθέτει ότι τα γειτονικά ενισχυτικά θα συγκρατήσουν επαρκώς το υπό φόρτιση έλασμα. Παρακάτω, θα αναλύσουμε την αστοχία δύο και τριών κόμβων.

5.3 Ανάλυση αστοχίας δύο και τριών κόμβων

5.3.1 Αστοχία δύο κόμβων

Όπως φαίνεται και στο σχήμα ΚΕΦ-VII.2, πρόκειται για αστοχία που συμβαίνει σε έλασμα πακτωμένο και στα δύο άκρα στο οποίο ασκείται ομοιόμορφοι πίεση. Οι ακραίοι κόμβοι σχηματίζονται καθώς οι τάσεις λόγω της καμπτικής ροπής φτάνουν στην πλαστική περιοχή :

$$M = -\frac{P2H \times s^2}{12} = -Mp$$

Όπου το P_{2H} είναι η πίεση για την μετάβαση στην πλαστική περιοχή, το t και το s είναι χαρακτηριστικά της κατασκευής και M_p η καμπτική ροπή. Η καμπτική ροπή μπορεί να εκφραστεί ως :

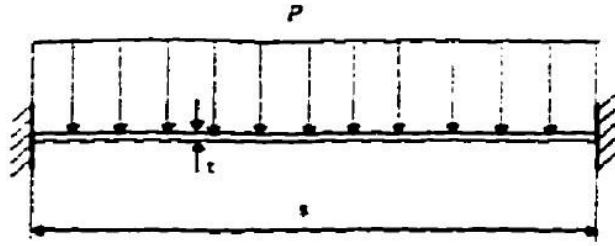
$$Mp = \frac{\sigma_y}{\sqrt{1 - \nu_p - \nu_p^2}} \times \frac{t^2}{4}$$

Όπου σ_y είναι το όριο διαρροής και ν_p ο πλαστικός λόγος Poisson. Για χάλυβες με $\nu_p=0.5$, το P_{2H} υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

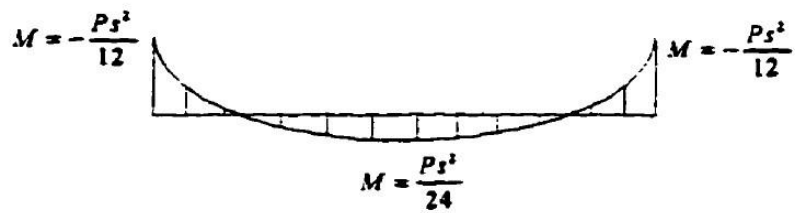
$$P2H = 3.464 \times \sigma_y \times \left(\frac{t}{s}\right)^2$$

Και το βέλος κάμψης, δ_{max} , από την εξίσωση:

$$\delta_{max} = \frac{P2H \times s^4 \times (1 - \nu^2)}{32 \times E \times t^3}$$



ΚΕΦ-V.2: Σχηματικό διάγραμμα πακτωμένου ελάσματος με ομοιόμορφη φόρτιση.



ΚΕΦ-V.3: Διανομή των καμπτικών τάσεων.

5.3.2 Αστοχία τριών κόμβων

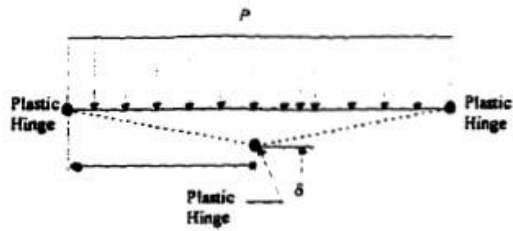
Όταν οι δύο κόμβοι στα άκρα σχηματιστούν, το έλασμα συνεχίζει να κάμπτεται μέχρι να σχηματιστεί και ο τρίτος κόμβος στη μέση του μήκους του. Θεωρώντας μία κοινή δοκό και χωρίς να λάβουμε υπόψη τις τάσεις μεμβράνης έχουμε την εξίσωση :

$$-Mp \frac{\delta}{s} - Mp \frac{\delta}{s} - Mp \frac{2\delta}{s} + \frac{2(s \times P2H \times \delta)}{2} = 0$$

Από την οποία εξάγουμε τις εξής εξισώσεις:

$$P3H = \frac{16Mp}{s^2} = \left(\frac{4\sigma y}{\sqrt{1 - \nu p + \nu^2}} \right) \times \left(\frac{t}{s} \right)$$

$$P3H = 4.62 \times \sigma y \times \left(\frac{t}{s} \right)^2$$



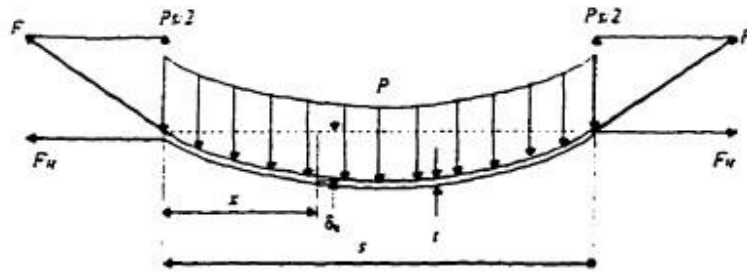
ΚΕΦ-VII.4: Σχηματικό διάγραμμα τριών κόμβων

5.4 Μεμβράνη και τελική ρήξη του ελάσματος

Όταν οι τρεις κόμβοι σχηματιστούν το έλασμα αρχίζει να καταρρέει. Παρ' όλα αυτά, η καταρρεύσει αυτή του ελάσματος περιορίζεται από την μεμβράνη λόγω της ύπαρξης πακτωμένων ορίων. Αγνοώντας την καμπτική ακαμψία του υλικού και θεωρώντας μόνο την ενέργεια της μεμβράνης, η εξίσωση ισορροπίας δίνει :

$$\frac{Ps}{2}x - \frac{Px}{2} - \delta x \times FH = 0$$

Όπου το δ_x και το F_H είναι η παραμόρφωση και η δύναμη της μεμβράνης στον οριζόντιο άξονα (βλέπε σχήμα ΚΕΦ-VII.5).



ΚΕΦ-V.5: Σχηματικό διάγραμμα της μεμβράνης.

Το μέγιστο βέλος κάμψης το βρίσκουμε με αντικατάσταση της προηγούμενης εξίσωσης του βέλους κάμψης με $x=s/2$:

$$\delta_{max} = \frac{Ps^2}{8FH}$$

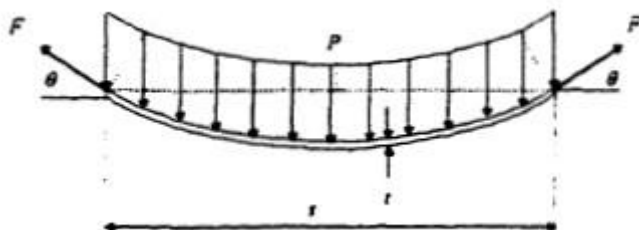
Επίσης, το φορτίο ως συνάρτηση του βέλους κάμψης για την ελαστική μεμβράνη δίνεται από την σχέση :

$$P = \left(\frac{64}{3}\right) \times \left(\frac{\delta_{max}}{s}\right)^2 \times \frac{Et}{(1 - \nu^2)\sqrt{s^2 + (4\delta_{max})^2}}$$

Όπου ν είναι ο λόγος Poisson.

Όταν το φορτίο φτάσει στο όριο διαρροής και σχηματιστεί πλήρως πλαστική μεμβράνη, η σχέση μεταξύ της πίεσης και της παραμόρφωσης προέρχεται από την σχέση :

$$P = \frac{8 \times \sigma_y \times t \times \delta_{max}}{\sqrt{(1 - \nu p + \nu p^2)}} \times \frac{1}{s\sqrt{(s^2 + (4\delta_{max})^2)}}$$



ΚΕΦ-V.6: Σχηματικό διάγραμμα του μηχανισμού αστοχίας της μεμβράνης.

Θεωρώντας πλήρως πλαστική μεμβράνη και ότι η παραμόρφωση του ελάσματος σχηματίζει κυκλικό τόξο, η εξίσωση ισορροπίας γίνεται :

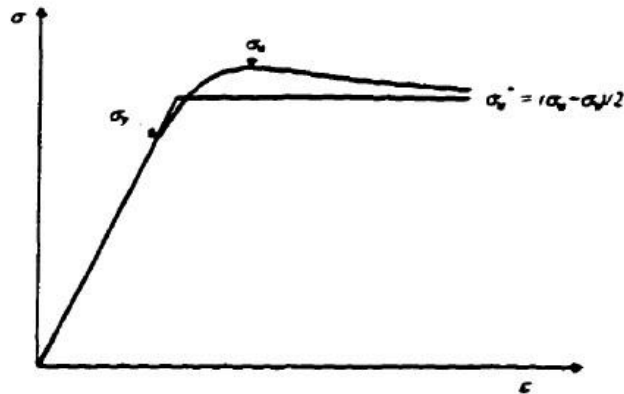
$$2F\sin\theta = Ps$$

Ενώ το σχήμα του τόξου δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{\sin\theta}{\theta} = \frac{\pi}{180(1 + \epsilon_s)}$$

Όπου ϵ_s είναι η ονομαστική επιμήκυνση της μεμβράνης του ελάσματος κατά τη ρήξη και γενικότερα προτείνεται η τιμή $\epsilon_s=0,05$. Με αντικατάσταση με $\epsilon_s=0,05$ στην παραπάνω εξίσωση δίνεται $\theta=31^\circ$. Αντικαθιστώντας την τιμή της θ στην εξίσωση ισοροπίας δίνεται:

$$Pu = \frac{2 \times Fu \times \sin(31)}{s} = \frac{1.03 \times Fu}{s}$$



ΚΕΦ-V.7: Μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Όπου $F_u = \sigma_{\gamma} \cdot t$ είναι η δύναμη της μεμβράνης η οποία αντιδρά στην τελική ρήξη και $\sigma_{\gamma}^* = (\sigma_{\gamma} + \sigma_u)/2$ αναφέρεται σε ένα ελαστο-πλαστικό υλικό. Αντικαθιστώντας την F_u δίνεται:

$$Pu = 0.515 \times (\sigma_{\gamma} + \sigma_u) \times \left(\frac{t}{s}\right)$$

Και το ανάλογο βέλος κάμψης είναι:

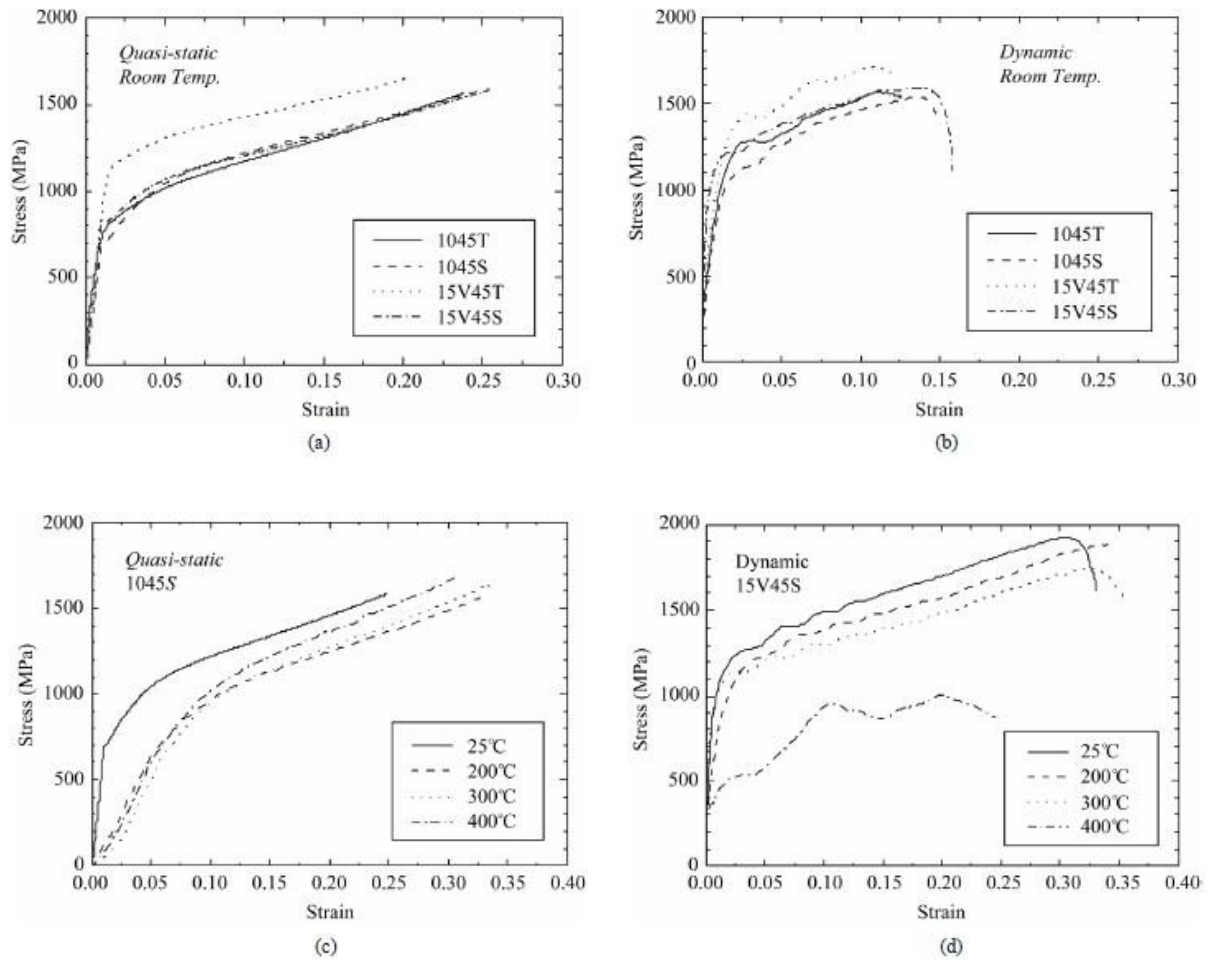
$$\delta_{max} = 0.1679 \times s$$

5.5 Στατική, ημι-στατική και δυναμική μέθοδο φόρτισης

Αρχικά, θα πρέπει να οριστεί η διαφορά μεταξύ της στατικής, της ημι-στατικής και δυναμικής μεθόδου φόρτισης. Η στατική φόρτιση (static load) εξαρτάται μόνο από τον χρόνο ενώ η δυναμική μέθοδος φόρτισης (dynamic load) εξαρτάται τόσο από τον χρόνο όσο και από την αδράνεια της κατασκευής. Από την άλλη, η ημι-στατική φόρτιση (quasi-static) εξαρτάται μόνο από τον χρόνο αφού η επιβολή της γίνεται αρκετά αργά, ώστε, τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της κατασκευής να μπορούν να αγνοηθούν. Επίσης, ο χρόνος ο οποίος πρέπει να λαμβάνει χώρα η διαδικασία στην ημι-στατική φόρτιση πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την χρονική περίοδο που χρειάζεται το σύστημα για να επανέλθει σε ισορροπία μετά την επιβολή του φορτίου. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η ημι-στατική φόρτιση μίας κατασκευής από ένα υλικό έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα χαρακτηριστικά της ίδιας κατασκευής από άλλο υλικό. Αυτό σημαίνει ότι διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετικά όρια μετάβασης από την μία κατάσταση φόρτιση στην άλλη.

Ο ορισμός του τρόπου με τον οποίο θα αναλυθούν τα φορτία κατά την παγοθραυστική διαδικασία έχει μεγάλη σημασία αφού οι μέθοδοι ανάλυσης δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα συγκρινόμενες μεταξύ τους.

5.6 Στατική και δυναμική αντοχή χάλυβα



ΚΕΦ-V.8: Στατική και δυναμική αντοχή χάλυβα

Όπως παρατηρούμε στις παραπάνω εικόνες, η μέθοδος με την οποία ασκούνται τα φορτία σε κοινούς χάλυβες επηρεάζουν άμεσα την αντοχή τους και την επιμήκυνση την οποία είναι δυνατόν να λάβουν. Γενικότερα, για ημι-στατικά φορτία τα οποία ασκούνται στον χάλυβα, η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ακολουθεί την κλασική μορφή της ενώ για δυναμικά φορτία παρατηρείται μία αύξηση στην αντοχή μέχρι την αστοχία καθώς και μείωση στην επιμήκυνση του υλικού.

5.7 Πλαστικός σχεδιασμός

Ο πλαστικός σχεδιασμός έχει γίνει, στις μέρες, ένας κοινός τρόπος σχεδιασμού για τα πλοία που επιχειρούν σε παγωμένες θάλασσες. Οι νέοι ενοποιημένοι Πολικοί κανόνες (IACS URs), ο Καναδικός νηογνώμονας (ASPPR) και ο Ρωσικός νηογνώμονας (MRS) χρησιμοποιούν σαν γνώμονα για την μελέτη της σχεδίασης του πλοίου τη μέθοδο πλαστικής σχεδίασης. Υπάρχουν πολλοί λόγοι πίσω από το σκεπτικό για τη χρήση του πλαστικού σχεδιασμού για την αλληλεπίδραση του πάγου με την δομή του πλοίου.

Αυτά περιλαμβάνουν:

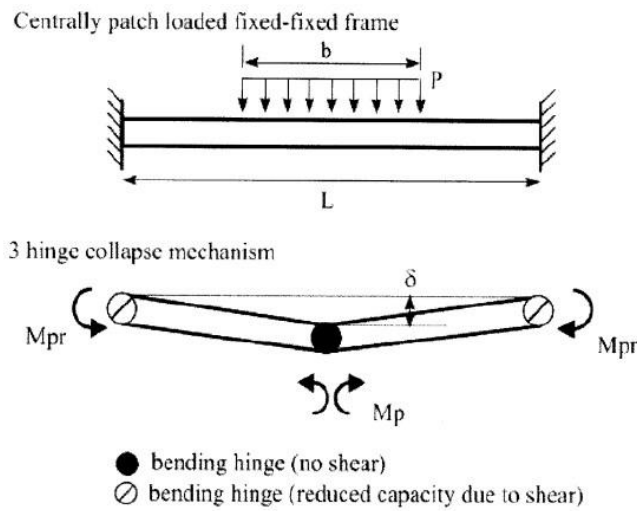
- Ο πλαστικός σχεδιασμός μπορεί να εξασφαλίσει μια καλύτερη ισορροπία στη διανομή του υλικού και στην δυνατότητά του να αντισταθεί τόσο στα ακραία φορτία (extreme loads) όσο και στα φορτία σχεδιασμού (design loads). Αυτό είναι σημαντικό διότι τα ακραία φορτία του πάγου μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερα από τις τιμές σχεδιασμού. Αυτό είναι πιο πιθανό για τα φορτία πάγου παρά για τις φορτίσεις από κύματα. Επίσης, η χρήση της πλαστικής μεθόδου εξασφαλίζει μία σημαντική απορρόφηση ενέργειας, πράγμα το οποίο δεν είναι πάντα δυνατό στην μέθοδο ελαστικής σχεδίασης.
- Ο πλαστικό σχεδιασμός μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά ελαφρύτερη κατασκευή, ιδιαίτερα όταν η περίοδος για τα φορτία σχεδιασμού είναι σχετικά μεγάλη και όταν η σωρευτική ζημία λόγω εξωγενών φορτίων (παραμόρφωση, κόπωση, κ.λπ.) δεν αποτελεί ανησυχία.
- Η μέθοδος πλαστικής σχεδίασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευκολότερα στην ανάλυση των ζημιών, το οποίο επιτρέπει στις παραδοχές, οι οποίες υπάρχουν στους κανονισμούς, να δοκιμαστούν εμπειρικά.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα ανταποκρίνονται στις ανάγκες της μελέτης και σχεδίασης ενός παγοθραυστικού πλοίου και είναι ο λόγος που η πλαστική μέθοδος σχεδίασης εισήχθη στην μελέτη και σχεδίαση των πλοίων.

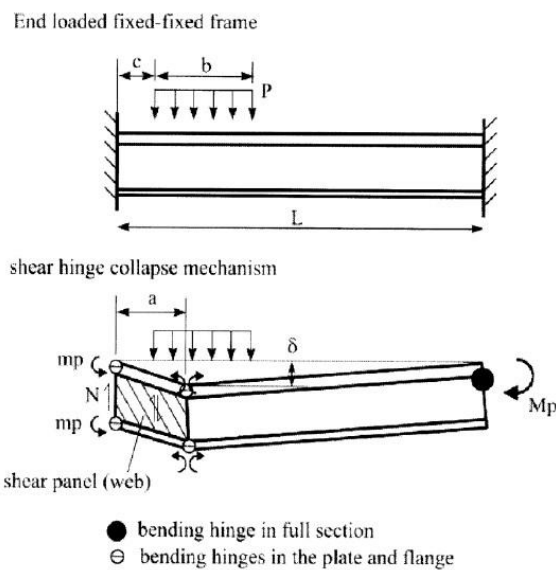
Η περιστασιακή τοπική παραμόρφωση (denting) είναι ένα αποδεκτό αποτέλεσμα κατά την πλεύση στον πάγο, με την προϋπόθεση ότι αυτό δεν υποβαθμίζει την ολική αντοχή ή την στεγανότητα του πλοίου. Παρ'όλα αυτά, η επιλογή των κατασκευαστικών κριτηρίων σχεδιασμού για τον πλαστικό σχεδιασμό είναι πιο δύσκολη από ό, τι στον ελαστικό σχεδιασμό. Στον ελαστικό σχεδιασμό, η κατάσταση κάτω από την οποία το υλικό θα φορτιστεί στο όριο διαρροής είναι κατανοητή, και έτσι τα κριτήρια για το σχεδιασμό με την μέθοδο αυτή είναι με τη σειρά τους και αυτά εύκολα κατανοητά. Στον πλαστικό σχεδιασμό, υπάρχουν πολλές πιθανές οριακές καταστάσεις που κυμαίνονται από το όριο διαρροής έως την τελική αστοχία.

Οι κανόνες IACS URs έχουν επιλέξει μια σειρά από οριακές καταστάσεις τόσο για τη γάστρα του πλοίου όσο και για την ενίσχυση του όπου επιτρέπουν τάση στην πλαστική περιοχή, αλλά εμποδίζει την ανάπτυξη μεγάλων πλαστικών επιμηκύνσεων ή την δομική

παραμόρφωση. Η διαδικασία μελέτης, για τις εν λόγω απαιτήσεις, έχει αφιερώσει σημαντική προσπάθεια για την επιλογή των κατάλληλων κριτηρίων σχεδιασμού. Αυτές οι οριακές καταστάσεις ορίζονται από αναλυτικές αναπαραστάσεις των μηχανισμών εντός του σκελετού ή της γάστρας. Οι αναλυτικές λύσεις βασίζονται σε μεθόδους που λαμβάνουν σαν μέτρο την ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί, με βάση το σύνολο των μηχανισμών που φαίνονται στο Σχήμα 3.22 και Σχήμα 3.23, για φορτία στο κέντρο και κοντά στα άκρα της διαμόρφωσης, αντίστοιχα.



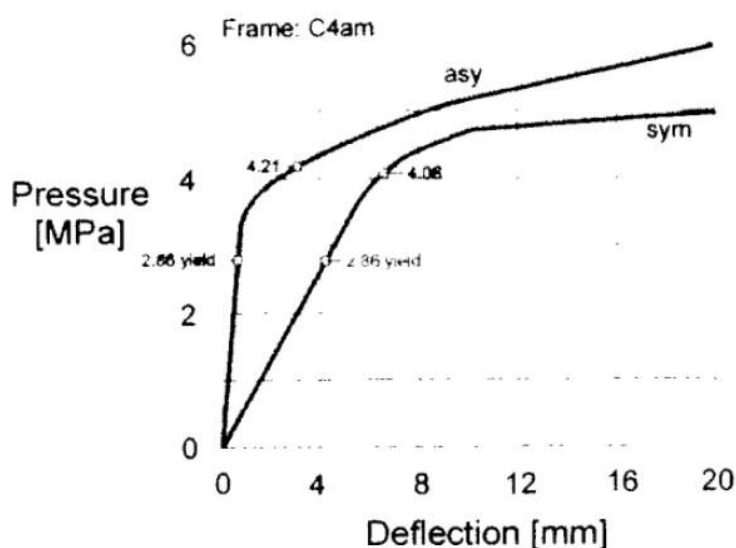
ΚΕΦ-V.9: Συμμετρική φόρτιση τριών κόμβων



ΚΕΦ-V.10: Ασύμμετρη φόρτιση τριών κόμβων

Οι μέθοδοι ανάλυσης που έχουν ως γνώμονα την ενέργεια δεν είναι σε θέση να κάνουν πρόβλεψη για την ενδεχόμενη ποσοστιαία επιμήκυνση ή παραμόρφωση, και γι' αυτό είναι απαραίτητο να βασιζόμαστε σε μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων για να αναλύσουμε αυτές τις πτυχές των κριτηρίων και των διαδικασιών σχεδιασμού.

Στο όριο σχεδιασμού του, το υλικό χάνει την ακαμψία του, αλλά εξακολουθεί να είναι σε θέση να μεταφέρει φορτία και μάλιστα μεγαλύτερα. Το σχήμα ΚΕΦ-VII.3 απεικονίζει την ανάλυση FE της συμπεριφοράς ενός τυπικού πλαισίου σύμφωνα με δύο πιθανές θέσεις επιβολής του φορτίου σχεδίασης (δηλαδή, στο κέντρο και κοντά στο ένα άκρο). Η κατώτερη από τις δύο τάσεις ορίζει την ικανότητα αυτού του πλαισίου να δέχεται παραμόρφωση, και σε αυτή την περίπτωση, η συμμετρική περίπτωση κυριαρχεί.

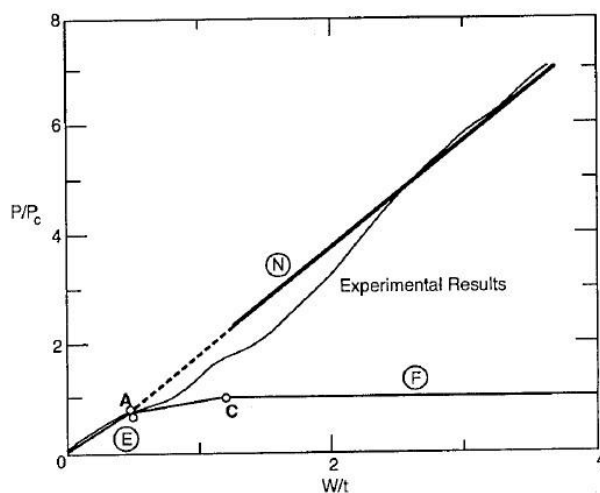


ΚΕΦ-V.11: Διάγραμμα Τάσης/Επιμήκυνσης

Το σχήμα ΚΕΦ-V.2 δείχνει ότι υπάρχουν διάφοροι τρόποι να περιγραφούν οι οριακές συνθήκες σχεδιασμού που χρησιμοποιείται στους κανόνες UR. Ουσιαστικά, οι οριακές καταστάσεις εκφράζονται μέσα από τους μηχανισμούς πλαστικής κατάρρευσης του υλικού. Ωστόσο, αν και είναι σχετικά πολύπλοκοι, εξακολουθούν να περιέχουν πολλές απλουστεύσεις. Παρ'όλα αυτά, το υλικό δεν θα καταρρεύσει εντελώς σύμφωνα με την θεωρητική πρόβλεψη αλλά ούτε κατά την επιβαλλόμενη τάση σχεδίασης. Οι δύο κύριοι λόγοι για αυτό είναι ότι, οι μηχανισμοί σύμφωνα με τους οποίους αναλύουμε την τρόπο αστοχίας του υλικού αγνοούν τόσο τις επιπτώσεις των τάσεων μεμβράνης όσο και την ενδοτράχυνση. Ως αποτέλεσμα, το υλικό θα παρέχει σημαντική εφεδρική απορρόφηση ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, οι οριακές συνθήκες σχεδιασμού στους κανονισμούς καλύπτουν την ουσιαστική μετάβαση στην περιοχή πλαστικών τάσεων όπου τα δομικά στοιχεία αρχίζουν να εμφανίζουν σημαντικές απώλειες στην ακαμψία τους, πριν όμως από την ανάπτυξη μεγάλων πλαστικών επιμηκύνσεων και παραμορφώσεων. Μόνιμες παραμορφώσεις κάτω από τα φορτία σχεδιασμού δεν πρέπει να απαιτούν επισκευή, και δεν θα πρέπει να είναι αρκετά για να προκαλέσουν βλάβη στις εσωτερικές ή εξωτερικές επενδύσεις.

Οι κανονισμοί του IACS (και άλλων οργανισμών και νηογνωμόνων) γενικά στηρίζονται στην ελαστική ανάλυση και αν και η εμπειρία μας έχει δείξει ότι η ελαστική ανάλυση είναι επαρκής περισσότερη έρευνα είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη βελτιωμένων μεθόδων ανάλυσης στο ελαστο-πλαστικό φάσμα.



ΚΕΦ-V.12: Διάγραμμα πίεσης-παραμόρφωσης

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει τις διαφορετικές περιοχές συμπεριφοράς για έντονη και ήπια παραμόρφωση. Στον κατακόρυφο άξονα έχουμε την ασκούμενη φόρτιση P η οποία γίνεται αδιάστατη με την διαίρεση της με τη P_c , η οποία πρόκειται για την φόρτιση αστοχίας (σημείο C) η οποία λαμβάνει χώρα χωρίς τον υπολογισμό τη δράση της μεμβράνης. Στον οριζόντιο άξονα έχουμε τη μέγιστη παραμόρφωση η οποία γίνεται αδιάστατη με διαίρεση του πάχους ελάσματος t . Η καμπύλη E δείχνει την ελαστική κάμψη συνυπολογίζοντας και την ελαστική μεμβράνη μέχρι το σχηματισμό του σχήματος ΚΕΦ-VI.1. Η καμπύλη F παρουσιάζει την ελαστική κάμψη του υλικού χωρίς τον συνυπολογισμό της δράσης της μεμβράνης για τον σχηματισμό του ΚΕΦ-VII.4. Τέλος, η καμπύλη N παρουσιάζει τη ιδανική μορφή της συμπεριφοράς της μεμβράνης.

Βιβλιογραφία

- *Ship in ice: The interaction process and principles of design*, Bin Zou, 1996.
- *Quasi-static and dynamic deformation behaviors of medium-carbon steels in wide temperature range*, Byoungchul Hwang, 2010.
- *Ultimate Limit State Design of Ship Hulls*, Jeom Kee Paik, Ge Wang, Bong Ju Kim and Anil Kumar Thayanballi, 2002.
- *Residual Stress Influence in Material Properties and Column Behaviour of Stainless Steel*, M. Jandera and J. Machacek, 2012.
- *Plastic Response of Ship Structure Subject of Ice Loading*, Jacob Abraham, 2008.
- *The microscopic interpretation of heat and work*, Richard Fitzpatrick, 2006.
- *Ice Class Requirements on Side Shell Structures*, Filip Bergbom Wallin and Carl-Johan Akerstrom, 2012.

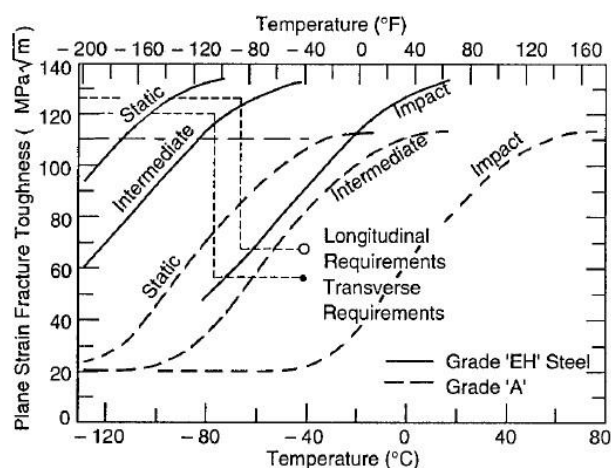
Κεφάλαιο 6^ο : Απαιτήσεις Χαρακτηριστικών Χάλυβα

6.1 Υλικά

Σημαντική προσπάθεια έχει καταβληθεί από τους νηογνώμονες και τις ρυθμιστικές αρχές για να το επιλογή συγκεκριμένων ποιοτήτων χάλυβα κατάλληλων για τη χρήση στην κατασκευή των πλοίων που εκτίθενται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Η αντοχή σε θραύση του χάλυβα εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας και από το μέγεθος της τάσης. Στο Σχήμα ΚΕΦ-V.1, αναπαρίσταται η αντοχή σε θραύση για επίπεδη επιμήκυνση δύο τύπων χάλυβα σε σχέση με τη θερμοκρασία, για τρεις διαφορετικές κατηγορίες φόρτισης. κατάγματα χάλυβα σε ένα εύθραυστο τρόπο, χωρίς καμία προειδοποίηση για την επικείμενη αποτυχία, όταν οι τάσεις είναι επαρκούς μεγέθους για να διαδοθεί μια ρωγμή από ένα ελάττωμα ή μικρή ατέλεια στο υλικό. Το κριτήριο για τον πολλαπλασιασμό των ρωγμών σε γραμμική ελαστική άγχος στην άκρη ρωγμή είναι μεγαλύτερη από την αντοχή σε θραύση του υλικού. Για μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών, οι αιτίες για ψαθυρή θραύση έχουν τώρα καθιερωθεί, και οι σχέσεις μεταξύ της αιτίας του κατάγματος, η σκληρότητα του υλικού, το μέγεθος και το σχήμα ελάττωμα, ο ρυθμός φόρτωσης της δομής, και η θερμοκρασία είναι κατανοητή. Από αυτή την κατανόηση, τα υλικά και τις τεχνικές συγκόλλησης έχουν αναπτυχθεί για να αυξήσουν την αξιοπιστία των δομών πλοίου. Είναι η συναίνεση των πολλών φορέων που ο χάλυβας που χρησιμοποιείται στην παρούσα γενιά των πολικών πλοία είναι κυρίως κατάλληλη.

Υπάρχουν επί του παρόντος δύο διαδικασίες για τον καθορισμό του τύπου του χάλυβα που θα χρησιμοποιηθεί σε διάφορα μέρη του πλοίο: "σύμφωνα με τους κανονισμούς" και "σύμφωνα με την ανάλυση". Ο σχεδιασμός σύμφωνα με τον κανονισμό απαιτεί από τον σχεδιαστή να θεωρήσει θερμοκρασία λειτουργίας και να επιλέξει ανάλογη ποιότητα χάλυβα που έχει επαρκή αντοχή. Ο σχεδιασμός σύμφωνα με την ανάλυση απαιτεί από τον σχεδιαστή να εξετάσει το μέγεθος και το ρυθμό του φορτίου που μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη διάρκεια της ζωής ενός συγκεκριμένου μέρους του πλοίου, και να σχεδιάσουν το μέρος αυτό με επαρκή αξιοπιστία ανάλογα με τη σημασία του. Η σχεδίαση με βάση την ανάλυση προσδίδει μεγάλη ευθύνη στον σχεδιαστή αλλά μπορεί να προσφέρει μια αρκετά πιο αξιόπιστη και οικονομική λύση σε σχέση με τον σχεδιασμό σύμφωνα με τους κανονισμούς.

Το μέσο τμήμα του πλοίου θα υποστεί κλυδωνισμούς οι οποίοι ξεκινούν από το πρωραίο τμήμα του. Οι τάσεις που προέρχονται από τους κλυδωνισμούς αυτούς αυξάνονται με μικρό ρυθμό σε σχέση με της κρουστικές τάσεις με αποτέλεσμα να υπάρχει μειωμένη πιθανότητα για έναρξη ρωγμής. Παρ' όλα αυτά, η αστοχία μέρους της δομής του πλοίου στο μέσο τμήμα λόγω στατικών τάσεων λόγω μικροδομήσεων είναι πιθανή και πιο καταστροφική από τις ανάλογες αστοχίες που μπορεί να εμφανιστούν στην πλώρη. Για το λόγω αυτό τα υλικά κατασκευής και οι μέθοδοι συγκόλλησης στην περιοχή αυτή επιλέγονται ώστε να αποτρέψουν τόσο την έναρξη όσο και την επέκταση της ρωγμής. Τέλος, επειδή ατέλειες και μικρορωγμές στη δομή του πλοίου είναι αναπόφευκτες πρέπει να επιλέγονται υλικά τα οποία να ευνοούν τον περιορισμό της διάδοσης της ρωγμής.



ΚΕΦ-VI.1: Διάγραμμα Αστοχίας κατά την επιμήκυνση/Θερμοκρασίας για κλάσεις χάλυβα A και EH.

6.2 Κλάσεις διαφορετικών υλικών

Τα πλοία που δραστηριοποιούνται στις πολικές περιοχές υπόκεινται σε υψηλή συγκέντρωση φορτίσεων από το στρώμα πάγου ενώ η θερμοκρασία του αέρα φτάνει έως και -50°C . Για το λόγο αυτό, το υλικό της κατασκευής του μεταλλικού μέρους του πλοίου πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή ολκιμότητα και όριο διαρροής και καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, η ανάγκη μείωσης του βάρους για την αποθήκευση υλικών και μείωση χρόνου και του κόστους παραγωγής, έχουν ως αποτέλεσμα την ανάγκη για βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών των υλικών κατασκευής. Αυτό σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις της σύγχρονης βιομηχανίας, με τη μορφή της αύξησης της ανάγκης κατασκευαστικών υλικών για να καλύψουν τις ανάγκες κατασκευής πλοίων υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) και πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, καθώς και την ανάγκη για κατασκευή ανθεκτικών στη διάβρωση υλικών έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων χαλύβων μέσω νέων διαδικασιών παραγωγής. Οι βιομηχανικές απαιτήσεις για τις κλάσεις χαλύβων είναι:

- Η αντοχή της επηρεασμένης θερμικής ζώνης
- Η σύλληψη ρωγμών
- Το ύψος της μεταφερόμενης θερμότητας κατά την συγκόλληση
- Την υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό
- Τις μικρές στρεβλώσεις
- Την υψηλή απόδοση κατασκευής
- Την αντοχή στη διάβρωση, και
- Την αντοχή στην κόπωση

6.3 Χάλυβας

Ο χάλυβας προτιμάται έναντι άλλων δομικών υλικών για την κατασκευή πλοίων που δραστηριοποιούνται στην αρκτική, λόγω της υψηλής αντοχής του, εύκολης επεξεργασίας του, τη διαθεσιμότητα και τη σχετικά χαμηλή τιμή του.

Τα χαρακτηριστικά και η απαιτούμενη ποιότητα του χάλυβα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή θα εξαρτηθούν από :

- Ελάχιστη θερμοκρασία σχεδιασμού
- Πιθανότητα έκθεσης του δομικού στοιχείου σε κρουστικά φορτία σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Ύψος προβλεπόμενων τάσεων και παραμορφώσεων
- Πάχος χάλυβα
- Μετά-συγκολλητική θερμική επεξεργασία
- Ποσοστό ψυχρής μορφοποίησης.
- Προσβασιμότητα σε δομικά συστατικά για την επιθεώρηση συγκόλλησης και περιοδικές έρευνες
- Κριτήρια αποδοχής Συγκολλήσεων

Το 1996, η Διεθνής Ένωση Νηογνωμόνων (IACS) εξέδωσε ενοποιημένες απαιτήσεις, σχετικά με τη χρήση των ποιότητες χάλυβα για διαφορετικά μέλη της γάστρας. Εκεί περιλαμβάνονται οι απαιτήσεις για τεχνικές κατασκευής δομών που εκτίθενται σε χαμηλές θερμοκρασίες αέρα. Με τους κανόνες αυτούς, η επιλογή των διαφόρων ποιοτήτων χάλυβα πρέπει να γίνεται με βάση τη θερμοκρασία του σχεδιασμού, το πάχος του υλικού και τη δομική κατηγορία.

6.4 Επιλογή ποιότητας χάλυβα βάση θερμοκρασία σχεδιασμού

Χάλυβες οι οποίοι προορίζονται για την κατασκευή πλοίων που επιχειρούν στον αρκτικό κύκλο πρέπει να διαθέτουν υψηλή ανθεκτικότητα σε ψαθυρή θραύση κάτω από κρουστικά φορτία και υψηλές τάσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σύμφωνα με την καθιερωμένη πρακτική και τις απαιτήσεις του IACS, οι κλάσεις χάλυβα A, B, D και E κανονικής αντοχής και AH, DH, EH και FH υψηλότερης αντοχής διακρίνονται με βάση τις απαιτήσεις των δοκιμών μέτρησης αντοχής που υποβάλλονται. Η μόνη διαφορά είναι στη θερμοκρασία της δοκιμής CVN και το ποσό του χάλυβα που πρόκειται να ελεγχθεί για την ανάλογη κλάση χάλυβα.

Όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάβαση από την όλκιμη στην ψαθυρή κατάσταση είναι μεταβλητοί και έχουν ουσιαστικά τυχαία φύση. Δεν υπάρχουν επιστημονικά τεκμηριωμένοι τύποι ή αποδεδειγμένες εμπειρικές σχέσεις για την επιλογή των κατάλληλων κλάσεων χάλυβα ως συνάρτηση των παραμέτρων αυτών. Μετά τις ιαπωνικές μελέτες που ξεκίνησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 (Yajima και Tada το 1981 και άλλοι) αξιοσημείωτη πρόοδος έχει σημειωθεί στον τομέα αυτό, ωστόσο, η πρόοδος αυτή δεν έχει ακόμη μεταφραστεί σε κοινά συμφωνημένα επιστημονικά κριτήρια για την επιλογή μιας κλάσης χάλυβα.

Υπάρχει ένας αριθμός ήδη υφιστάμενων κανονισμών, καθώς και πρόσφατα προσαρμοσμένοι κανόνες του IACS, για τις κατασκευές που εκτίθενται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Γενικά, Οι κανόνες για πλεύση στη Βαλτική δεν περιέχουν καμία απαίτηση για ενίσχυση, εκτός από μια εισαγωγική παρατήρηση ότι τα κατασκευαστικά υλικά του κύτους πρέπει να είναι κατάλληλα για λειτουργία σε $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η επιλογή υλικών στους κανόνες που αφορούν την πλεύση σε περιοχές εκτός της Βαλτικής βασίζονται στην λογική ότι τα μέρη του πλοίου του έρχονται σε επαφή με την παγωμένη επιφάνεια η αέρα καθώς και τα μέρη εκείνα που επηρεάζονται από τα φορτία που αναπτύσσονται κατά την παγοθραυστική διαδικασία πρέπει να είναι κατασκευασμένα από χάλυβες υψηλότερης κλάσης.

Ωστόσο, οι ειδικές απαιτήσεις κάθε ρυθμιστικού φορέα, για τα διαφορετικά υλικά κατασκευής του πλοίου, διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους τόσο ως προς την προσέγγιση με την οποία επιλέχθηκαν όσο ως προς τις λεπτομέρειές τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, παρά την περιορισμένη ποικιλία κλάσης χάλυβα, διαφορετικοί νηογνώμονες δεν απαιτούν πάντα την ίδια κλάση χάλυβα για το ίδιο κατασκευαστικό μέλος του πλοίου.

Αυτή η περιοχή αβεβαιότητας και αντιπαράθεσης, φαίνεται καλύτερα από την αντίθεση μεταξύ των δύο κανονισμών του IACS URs, S6.22 και I23, όπως φαίνεται στους πίνακες ΚΕΦ-VI.6 και ΚΕΦ-VI.7 παρακάτω. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του κανονισμού I2 επισημάνθηκε η απουσία αστοχιών λόγω ρωγμάτωσης στα υπάρχοντα παγοθραυστικά πλοία υψηλής κλάσης παρά την έλλειψη συμμόρφωσης με τα πρότυπα του S6.2. Οι προκύπτουσες απαιτήσεις των κλάσεων χάλυβα στην I2 αντιπροσωπεύουν μια συμβιβαστική λύση. Ωστόσο, αρκετοί νηογνώμονες έχουν δημοσιεύσει διάφορες οδηγίες για την ενίσχυση του πλοίου σε χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. ABS), το λεγόμενο "winterization", που επανεισαγάγει τις απαιτήσεις της S6.2 για τις κατηγορίες που δεν

καλύπτονται από I2. Το παράδοξο είναι ότι απαιτούν υψηλότερες κλάσεις χάλυβα για ορισμένα μη κρίσιμα, για την ασφάλεια του πλοίου, εξαρτήματα αντί για την ίδια την γάστρα.

Class I

Plate thickness, in mm	-20/-25 ⁰ C		-26/-35 ⁰ C		-36/-45 ⁰ C		-46/-55 ⁰ C	
	MS	HT	MS	HT	MS	HT	MS	HT
$t \leq 10$	A	AH	B	AH	D	DH	D	DH
$10 < t \leq 15$	B	AH	D	DH	D	DH	D	DH
$15 < t \leq 20$	B	AH	D	DH	D	DH	E	EH
$20 < t \leq 25$	D	DH	D	DH	D	DH	E	EH
$25 < t \leq 30$	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH
$30 < t \leq 35$	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH
$35 < t \leq 45$	D	DH	E	EH	E	EH	∅	FH
$45 < t \leq 50$	E	EH	E	EH	∅	FH	∅	FH

∅ = Not applicable

ΚΕΦ-VI.2: Πίνακας κλάσεων υλικών από τον IACS S6.2

Thickness, t [mm]	Material Class I				Material Class II				Material Class III					
	PC1-5		PC6&7		PC1-5		PC6&7		PC1-3		PC4&5		PC6&7	
	MS	HT	MS	HT	MS	HT	MS	HT	MS	HT	MS	HT	MS	HT
$t \leq 10$	B	AH	B	AH	B	AH	B	AH	E	EH	E	EH	B	AH
$10 < t \leq 15$	B	AH	B	AH	D	DH	B	AH	E	EH	E	EH	D	DH
$15 < t \leq 20$	D	DH	B	AH	D	DH	B	AH	E	EH	E	EH	D	DH
$20 < t \leq 25$	D	DH	B	AH	D	DH	B	AH	E	EH	E	EH	D	DH
$25 < t \leq 30$	D	DH	B	AH	E	EH2	D	DH	E	EH	E	EH	E	EH
$30 < t \leq 35$	D	DH	B	AH	E	EH	D	DH	E	EH	E	EH	E	EH
$35 < t \leq 40$	D	DH	D	DH	E	EH	D	DH	F	FH	E	EH	E	EH
$40 < t \leq 45$	E	EH	D	DH	E	EH	D	DH	F	FH	E	EH	E	EH
$45 < t \leq 50$	E	EH	D	DH	E	EH	D	DH	F	FH	F	FH	E	EH

Notes to Table 3.5:

- 1) Includes weather-exposed plating of hull structures and appendages, as well as their outboard framing members, situated above a level of 0.3 m below the lowest ice waterline.
- 2) Grades D, DH are allowed for a single strake of side shell plating not more than 1.8 m wide from 0.3 m below the lowest ice waterline.

ΚΕΦ-VI.3: Πίνακας κλάσεων υλικών από τον IACS I2

6.5 Διάβρωση

Η διάβρωση είναι μια καταστροφική ηλεκτρική ή ηλεκτρο-χημική αλλοίωση σε ένα υλικό σε αντίδραση με το περιβάλλον του. Το αρκτικό περιβάλλον χαρακτηρίζεται κυρίως από χαμηλές θερμοκρασίες, σχετικά καθαρό αέρα και την αυξημένη ακτινοβολία του ήλιου. Η διαβρωτική φύση του θαλασσινού νερού έχει ήδη τεκμηριωθεί ευρέως. Οι κύριοι παράγοντες που καθιστούν το θαλασσινό νερό, ένα διαβρωτικό υγρό χωρίζονται σε δύο ομάδες: (βίο) χημικές (π.χ., οξυγόνο, ανθρακικό, άλατα, οργανικές ενώσεις, βιοχημική δραστηριότητα και ρύποι) και φυσικές (δηλαδή, θερμοκρασία, ταχύτητα ροής, το δυναμικό πίεση και φως). Κατά γενικό κανόνα, ο ρυθμός διάβρωσης στο θαλάσσιο νερό αυξάνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Ο κανόνας αυτός ισχύει μόνο για την επίδραση της θερμοκρασίας στην διάβρωση θεωρώντας ότι όλες οι άλλες μεταβλητές παραμένουν σταθερές. Η διαλυτότητα του οξυγόνου μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Η βιολογική δραστηριότητα γενικά αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας, και ασβεστούχα καταθέσεων και άλλων προστατευτικών κλίμακες είναι επίσης πιο πιθανό να σχηματίσουν σε μεταλλικές επιφάνειες σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Έτσι, το περιβάλλον που πλέουν τα πλοία στην Αρκτική είναι γενικά λιγότερο διαβρωτικό από τα θερμότερα νερά, αλλά τα συστήματα προστασίας από τη διάβρωση, ειδικά τα επιχρίσματα, είναι ιδιαίτερα φορτισμένα και συχνά αλλοιώνονται από εξωτερικές επιδράσεις. Σε πλοία που επιχειρούν στην Αρκτική η κύρια ζώνη κινδύνου λόγω διάβρωσης βρίσκεται στην περιοχή όπου η παγωμένη επιφάνεια εφάπτεται με την γάστρα του πλοίου, όπου η μόνιμη τριβή με τον πάγο καταστρέφει την αντιδιαβρωτική βαφή.

Η αποπόλωση δηλαδή η μείωση του οξυγόνου που προκαλείται από την ανάπτυξη βιοφίλμ στην επιφάνεια του ανοξείδωτου χάλυβα, παρόμοια με αυτή που παρατηρήθηκε σε άλλες θάλασσες, βρέθηκε επίσης στην Ανταρκτική με θερμοκρασία θαλασσινού νερού κοντά στους 0 °C. Επίσης, σε σύγκριση με τη Μεσόγειο Θάλασσα, μπορεί να παρατηρηθούν ορισμένες διαφορές στην τελικό σχήμα της καθοδικής καμπύλης, όταν η επιφάνεια του ανοξείδωτου χάλυβα έχει καλυφθεί από βιοφίλμ.

Τα στατιστικά δείχνουν μια μείωση στην πιθανότητα εντοπισμένων πηγών έναρξης της διάβρωσης στην Αρκτική, αν και αφού ξεκινήσει ο ρυθμός πολλαπλασιασμού της τοπικής διάβρωσης στις δύο περιοχές είναι περίπου ο ίδιος.

Η αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από 30 ° C τείνει να καθυστερήσει την μείωση του οξυγόνου που προκαλείται από την ανάπτυξη βιοφίλμ στην επιφάνεια του ανοξείδωτου χάλυβα. Τέλος, η διάβρωση των κραμάτων αλουμινίου επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού.

6.6 Επιστρώσεις

Υπάρχουν πολλές απαιτήσεις για τις επιστρώσεις στις αρκτικές περιοχές:

- Να είναι ομαλή
- Να έχει καλή αντοχή στη φθορά
- Να έχουν καλή αντοχή των δεσμών με το υλικό βάσης
- Να προσδίδει καλή προστασία από τη διάβρωση για το υλικό της βάσης
- Να διατηρεί τις ιδιότητές τις κάτω από φορτίσεις
- Να αντέχει τις παραμορφώσεις του υλικού βάσης
- Να αντέχει χαμηλές θερμοκρασίες
- Να διατηρεί τις ιδιότητές του στο περιβάλλον της Αρκτικής
- Να έχουν λογικές τιμές
- Θα πρέπει να έχουν αντιρρυπαντικές ιδιότητες
- Να μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα
- Η μέθοδος εφαρμογής της πρέπει να είναι εφικτή στο ναυπηγείο
- Να μην αναστέλλει τη δυνατότητα των επισκευών μετά την εγκατάσταση.

Επίσης, η υπεριώδης ακτινοβολία παίζει σημαντικό παράγοντα στην αντοχή των επικαλύψεων, ανάλογα με το υλικό βάσης. Το φως του ήλιου απορροφάται περίπου κατά 95% και περίπου το 5% αντανακλάται από την επιφάνεια της ανοιχτής θάλασσας. Εάν η επιφάνεια είναι καλυμμένη από πάγο και χιόνι, αυτές οι δύο τιμές μπορεί να αντιστραφούν. Αυτό οδηγεί σε πολύ υψηλότερη υπεριώδη ακτινοβολία σε καλυμμένες από χιόνι περιοχές. Αυτή η ακτινοβολία είναι επιπλέον αυξημένη από την λέπτυνση του στρώματος του όζοντος πάνω από τις πολικές περιοχές. Η υπεριώδης ακτινοβολία προκαλεί ευθραυστότητα πολλών duro και θερμοπλαστικών υλικών. Ως εκ τούτου, η ανάγκη ειδικών επικαλύψεων για σταθεροποιημένα υπεριώδη σταθεροποιημένα υλικά είναι μεγαλύτερη.

Μια λύση για την επικάλυψη της περιοχής της ζώνης επαφής της γάστρας με το στρώμα πάγου της αρκτικής είναι να χρησιμοποιηθούν πλάκες από ανοξείδωτο χάλυβα επενδεδυμένο. Το πολυαιθυλένιο και η πολουρεθάνη είναι επικαλύψεις που βρέθηκαν να είναι καλύτερες, επειδή αυτές οι δύο επιστρώσεις έχουν καλύτερη πρόσφυση και αντοχή στη φθορά αφού είναι πιο ανθεκτικές στην πρόσκρουση και τις φορτίσεις του πάγου.

Από τις μέχρι τώρα έρευνες που έχουν διεξαχθεί διαφαίνεται ότι το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι επιστρώσεις είναι η συντήρηση της καλής πρόσφυσης τους με το βασικό υλικό κατά την παραμόρφωσή του.

Βιβλιογραφία

- Arctic Technology, Gearge Wang, Alexie Bereznitski, Wim C. de Boom, Claude Daley, 2012.
- *Steels: For low temperature applications*, J. W. Morris Jr, 1993.
- *Review of American Bureau of Shipping's guide for vessels operating in low temperature enviroments*, R. M. Conachey, C. Baker, G. Wang, R. Miguez and K. Lilley, 2007.
- *A Proposed Icebreaker for Shipping LNG from the Canadian Arctic*, Robert A. Dick, Michael H Bell, Andrew Prior, 1984.
- *Design of ice breaking ships*, FINLAND and University of Science and Technology, Trondheim, NORWAY, Kaj Riksa.

Κεφάλαιο 7^ο : Κανονισμοί για πλεύση στην Αρκτική

7.1 Ανάλυση των κανονισμών

Οι αναγκαίες προϋποθέσεις για την κατασκευαστική ακεραιότητα ενός ικανού για πλεύση σε πάγο πλοίου ορίζονται από τους κανονισμούς των διάφορων νηογνώμων όπως Russian Maritime Register of Shipping (RMRS), Lloyd's Register, Det Norske Veritas (DNV), American Bureau of Shipping (ABS), Germannischer Lloyd καθώς και από τις ρυθμιστικές αρχές κάθε χώρας. Οι κανονισμοί αυτοί χωρίζονται κυρίως σε υπό-Αρκτικών περιοχών, όπως η Βαλτική, για απλή ενίσχυση της μεταλλικής κατασκευής και σε Αρκτικών περιοχών όπου το πλοίο πρέπει να έχει την ικανότητα να διασχίζει εκτεταμένες παγωμένες περιοχές.

Οι περισσότεροι νηογνώμονες έχουν σχετικά παρόμοιους κανονισμούς και θέτουν περίπου τις ίδιες προϋποθέσεις για την πλεύση στον υπό-Αρκτικό κύκλο. Ο σχεδιασμός του πλοίου στην περίπτωση αυτή στηρίζεται κυρίως στο πάχος του πάγου όπου προορίζεται να πλεύσει, που στις περιοχές αυτές δεν ξεπερνά τα 1,2 μέτρα. Γενικότερα, η προϋποθέσεις για την τοπική αντοχή εξαρτάται κυρίως από την κλάση του πλοίου και το σχήμα της γάστρας.

Από την άλλη πλευρά, οι κανονισμοί που αφορούν την πλεύση στον αρκτικό κύκλο διαφέρουν αρκετά σε κάποια κομμάτια τους όπως στον ορισμό της επιφάνειας της γάστρας που θα ενισχυθεί, τα φορτία που αναπτύσσονται λόγω του πάγου καθώς και τις γενικότερες συνθήκες στις οποίες πλέει το πλοίο. Αυτό το φαινόμενο προκύπτει από το γεγονός ότι οι καιρικές και θερμοκρασιακές συνθήκες καθώς και τα χαρακτηριστικά του πάγου διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή ακόμα και αν αναφερόμαστε γενικά στον Αρκτικό κύκλο. Όπως είναι φυσικό, αυτή η απόκλιση των κανονισμών μεταξύ των δεν επιτρέπει την εύκολη ενοποίηση τους και αυτό έχει ως αποτέλεσμα σοβαρές επιπλοκές όταν ένα πλοίο που κατασκευάστηκε με τους κανονισμούς ενός νηογνώμονα θελήσει να πλεύσει σε νερά κάτω από άλλους κανονισμούς.

Παρ' όλες αυτές τις διαφορές, η γενικότερη ιδέα πίσω από την δημιουργία των κανονισμών συγκεντρώνεται γύρω από τον σαφή ορισμό του μέγιστου φορτίου σχεδίασης του πλοίου με βάση την αλληλεπίδραση σκάφους-πάγου. Τα φορτία σχεδίασης αυτά εξαρτώνται κυρίως στο εκτόπισμα, την ισχύ του πλοίου και επηρεάζουν διάφορα κατασκευαστικά στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου ανάλογα με την επιφάνεια που φορτίζουν. Τα ενισχυτικά σχεδιάζονται με ελαστο-πλαστικά κριτήρια που επιτρέπουν στις τάσεις να υπερβούν το όριο διαρροής έτσι ώστε η μόνιμη πλαστική παραμόρφωση να είναι αποδεκτή.

Classification Society	Ice Class				
Finnish-Swedish Ice Class Rules	IA Super	IA	IB	IC	Category II
Russian Maritime Register of Shipping(Rules 2007)	Arc 5	Arc 4	Ice 3	Ice 2	Ice 1
Russian Maritime Register of Shipping(Rules 1995)	UL	L1	L2	L3	L4
Russian Maritime Register of Shipping(Rules 1999)	LU5	LU4	LU3	LU2	LU1
American Bureau of Shipping	IAA A1	IA Ao	IB	IC	D0
Bureau Veritas	IA SUPER	IA	IB	IC	ID
CASPPR, 1972	A	B	C	D	E
China Classification Society	Ice Class B1*	Ice Class B1	Ice Class B2	Ice Class B3	Ice Class B
Det Norske Veritas	ICE-1A* ICE-10	ICE-1A ICE-05	ICE-1B	ICE-1C	ICE-C
Germanischer Lloyd	E4	E3	E2	E1	E
Korean Register of Shipping	ISS	IS1	IS2	IS3	IS4
Lloyd's Register of Shipping	1SS	1A	1B	1C	1D
Nippon Kaiji Kyokai	IA Super	IA	IB	IC	ID
Registro Italiano Navale	IAS	IA	IB	IC	ID

ΚΕΦ-VII.1: Αντιστοίχιση κλάσεων διάφορων νηογνυμένων

7.2 Απαιτήσεις ενίσχυσης μέσω των κανονισμών

Η απαίτηση για την ενίσχυση της γάστρας και των μηχανημάτων του πλοίου εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν την ασφάλεια, την οικονομία και την διαχείρισή του και έτσι η απαίτηση αυτή είναι ένα θέμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη από την αρχή της μελέτης. Κατά την μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου η φόρτιση του πάγου θεωρείται είτε στατιστική είτε περιοδική, ανάλογα με την περιοχή της γάστρας που εξετάζουμε. Παρ'όλα αυτά κατά τη σχεδίαση του πλοίου πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία σταθερή φόρτιση πάγου ως γνώμονας για τους υπολογισμούς. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα, καταρχάς, την αποδοχή ενός ορισμένου επιπέδου κινδύνου ως βάση για τους κανόνες για πλεύση στον πάγο, για παράδειγμα ένα πλοίο στα εκατό πλοία θα υποστεί κάποια αστοχία. Το πρώτο μέρος της παραπάνω αποδοχής δίνει το αποδεκτό επίπεδο πιθανότητας του φορτίου του πάγου, και το δεύτερο μέρος, τη σοβαρότητα της βλάβης που θα υποστούν τα στοιχεία κατασκευής σε σχέση με την αποδεχόμενη φόρτιση (για παράδειγμα το πάχος των ελασμάτων της γάστρας). Η αποδοχή της τάσης σχεδίασης αυτής λαμβάνεται με βάση την εμπειρία των βλαβών που έχουν ήδη υποστεί πλοία κατά την πλεύση τους στον πάγο. Αναλύσεις που έγιναν σε βλάβες σε πλοία από την δεκαετία του 60' μέχρι σήμερα έδειξαν ότι η εμπειρικές σχέσεις που δημιουργήθηκαν για την μελέτη και σχεδίαση πλοίων που επιχειρούν σε παγωμένα νερά αποκρίνονταν σε μεγάλο βαθμό στην πραγματικότητα με αποτέλεσμα να έχουν υποστεί μόνο μικρές διορθώσεις. Όταν το επίπεδο κινδύνου χρησιμοποιείται ως βάση για τους κανόνες στον πάγο, εισάγεται μια αλληλεπίδραση μεταξύ της θεωρητικής βλάβης που μπορεί να υποστεί το πλοίο (πιο σωστά, η απόκριση της κατασκευής του), τη συχνότητα φόρτισης και τα στοιχεία κατασκευής. Εάν η αποδεκτή βλάβη είναι ήσσονος σημασίας, όπως ένα μικρό βαθούλωμα στο εξωτερικό, η συχνότητα του φορτίου μπορεί να είναι αρκετά υψηλή, χωρίς το επίπεδο κινδύνου να είναι υπερβολικά υψηλό. Ομοίως, αν η αποδεκτή βλάβη είναι σημαντική, η συχνότητα της φόρτισης που προκάλεσε αυτή τη βλάβη πρέπει να είναι χαμηλή, ώστε να διατηρηθεί το επίπεδο επικινδυνότητας αρκετά χαμηλό. Στην ανάλυση του σχεδιασμού με βάση τον κίνδυνο, που συζητήθηκε παραπάνω, οι συνθήκες του πάγου έχουν χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος, δηλαδή οι συνθήκες αυτές (πάχος του πάγου και η ποσότητα του καλύμματος πάγου) επηρεάζουν την πιθανότητα ύπαρξης βλάβης. Το μέγεθος του πλοίου και προωστήρια δύναμη μπορεί να επηρεάσει επίσης την πιθανότητα αυτή.

7.3 Απαιτήσεις για τα ελάσματα

Η επένδυση των πλοίων συμβάλλει στο μεγαλύτερο ποσοστό του δομικού τους βάρους. Όταν συνδυάζεται με πλαίσια (frames) και ενισχύσεις (stringers), σχηματίζει ένα ενισχυμένο κέλυφος το οποίο αντιστέκεται στο φορτίο που ασκείται στο πλοίο. Όταν ένα έλασμα υποστηρίζεται από πλαίσια και στις τέσσερις πλευρές και του ασκείται φόρτιση από ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο κάθετα προς την επιφάνεια, η παραμόρφωση θα μπορούσε να υπολογιστεί με τη χρήση της θεωρίας μικρών μετατοπίσεων για την κάμψη ενός ελάσματος. Αυτή η θεωρία παραμελεί τις επιφανειακές τάσεις μεμβράνης που αναπτύσσονται στην πλάκα κατά τη διάρκεια της διαρροής και της εκτεταμένης παραμόρφωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η θεωρία αυτή να υποεκτιμά την ικανότητα του ελάσματος να παραλάβει μεγαλύτερα φορτία.

Ο Πολικός κώδικας χρησιμοποιεί έναν απλουστευμένο μηχανισμό αστοχίας που παραμελεί τις επιφανειακές τάσεις μεμβράνης και την ενδοτράχυνση με αποτέλεσμα το υλικό να έχει την ικανότητα να λαμβάνει φορτία αρκετά μεγαλύτερα από τα υπολογιζόμενα. Ο κώδικας της DNV για σκάφη που πλέουν στην Αρκτική και παγοθραυστικά, βασίζουν την ανάλυσή τους στην ελαστική μέθοδο με την δυνατότητα παραμόρφωσης στην πλαστική περιοχή.

7.4 Σύγκριση Κανονισμών Συμφώνα με τη Μέθοδο Μελέτης

7.4.1 Εισαγωγή

Όπως όλα τα εμπορικά πλοία έτσι και τα περισσότερα παγοθραυστικά κατηγοριοποιούνται από διάφορους κανόνες διαφορετικών νηογνώμωνων. Οι περισσότεροι νηογνώμονες έχουν χωρίσει τους κανόνες αυτούς σε δύο κατηγορίες, για Αρκτική πλεύση και παγοθραυστική διαδικασία και για την Βαλτική. Οι κανονισμοί που αναφέρονται στην περιοχή της Βαλτικής βασίζονται κατά ένα μεγάλο μέρος στους κανονισμούς του Φιλανδικού-Σουηδικού νηογνώμονα. Ο Ρωσικός νηογνώμονας (Russian Maritime Register of Shipping) δεν έχει συγκεκριμένους κανόνες για την περιοχή της Βαλτικής αλλά έχει το πιο ολοκληρωμένο σύνολο κανονισμών για πλεύση στην περιοχή της Αρκτικής. Ο Διεθνής Οργανισμός Νηογνώμωνων (IACS) χρησιμοποίησε τους κανονισμούς αυτούς του ρωσικού νηογνώμονα για να αναπτύξει τον δικό του Πολικό κώδικα. Τέλος, ο νορβηγικός νηογνώμονας (Det Norske Veritas) χρησιμοποίησε και τα δύο σύνολα κανονισμών (Βαλτικής και Αρκτικής από τον FSICR και τον RS αντίστοιχα) για να δημιουργήσει το δικό του σύνολο το οποίο το ονόμασε "Ships for Navigation in Ice". Στις παρακάτω σελίδες θα παρουσιασθούν οι πρακτικές διαφορές μεταξύ της μελέτης με την πλαστική θεωρία και της ελαστικής θεωρίας και πως αυτές επηρεάζουν την κατασκευή του παγοθραυστικού, μέσω της χρήσης των θεωρητικών και εμπειρικών σχέσεων των δύο νηογνώμωνων.

7.4.2 Δομικές απαιτήσεις

Ο πιο κοινός τρόπος για τους μελετητές να διευκρινίσουν τις δομικές απαιτήσεις είναι μέχρι και στις μέρες μας η ελαστική θεωρία. Τόσο ο Φιλανδικός-Σουηδικός νηογνώμονας (Finnish-Swedish Ice class rules) όσο και ο Νορβηγικός νηογνώμονας (Det Norske Veritas) έχουν βασίσει τους κανονισμούς τους σε αυτήν τη θεωρία. Από την άλλη, ο Ρωσικός νηογνώμονας (Russian Maritime Register of Shipping) έχει βασίσει τους κανονισμούς του στην πλαστική θεωρία με αποτέλεσμα και ο IACS, ο οποίος έχει χρησιμοποιήσει κομμάτι των ρωσικών κανονισμών, να στηρίζεται στην θεωρία αυτή.

Η ελαστική μέθοδος ανάλυσης και σχεδίασης είναι επαρκώς μελετημένη και εύκολη στη χρήση, χρησιμοποιώντας τους κλασικούς μηχανισμούς υπολογισμού των φορτίσεων, παραμορφώσεων και ροπών αδράνειας των ελασμάτων και ενισχυτικών. Το σύνηθες όριο σχεδίασης αντοχής θεωρείται η συνδυασμένη πολυαξονική φόρτιση και υπολογίζεται με την χρήση του κριτηρίου von Mises :

$$\sigma_j = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1}$$

Το κριτήριο για την εξαγόμενη τάση από το von Mises είναι το όριο διαρροής του χρησιμοποιούμενου υλικού. Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή της πλαστικής σχεδίασης είναι συχνά πολυπλοκότερη αφού μεταξύ του ορίου διαρροής και του ορίου θραύσης υπάρχουν αρκετά ορισμένα όρια. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν και αρκετά πλεονεκτήματα στην πλαστική θεώρηση στα οποία θα αναφερθούμε σε παρακάτω κεφάλαιο. Γενικά, όταν το σύνολο των φορτίσεων χαρακτηρίζεται από περιορισμένα εξαιρετικά υψηλά φορτία τα οποία δεν είναι περιοδικά η πλαστική θεώρηση είναι αποδεκτή.

7.4.3 Φορτίσεις Σχεδίασης στον Πολικό Κώδικα (IACS)

Ο υπολογισμός των φορτίων του πάγου της Πολικής κλάσης που αποτελεί τη βάση για την σχεδίαση της γάστρας βασίζεται στην φόρτιση στον ώμο (shoulder) της πλώρης. Η μέγιστη φόρτιση κρούσης μπορεί να βρεθεί εξισώνοντας τη συνολική κινητική ενέργεια του πλοίου με την ενέργεια που απαιτείται για να συντρίψει τον πάγο. Στους κανονισμούς της πολικής κλάσης τα φορτία του πάγου υπολογίζονται ρητά και μόνο στην πλώρη και εξαρτώνται από το σχήμα της γάστρας. Φορτία σε άλλα μέρη του κύτους είναι ανεξάρτητα από το σχήμα της πλώρης και βασίζονται σε εμπειρικούς παράγοντες της περιοχής της γάστρας (βλέπε παράρτημα Β).

7.4.4 Φορτίσεις Σχεδίασης του Νορβηγικού Νηογνώμονα

Ο υπολογισμός των φορτίων σχεδίασης στην περιοχή της Αρκτικής βασίζεται, μόνο, στην εύρεση μίας τοπικής ονομαστικής πίεσης. Οι παραδοχές των κανονισμών για την περιοχή επαφής προέρχονται από τα ελάσματα και τα ενισχυτικά και ως εκ τούτου είναι δύσκολο να δοθεί μια άμεση ερμηνεία των διαφορετικών αποτελεσμάτων που υπολογίζονται. Η ταχύτητα εμβολισμού του πλοίου στον πάγο (V_{RAM}) δίνει μια κατακόρυφη φόρτιση

σχεδίασης η οποία έχει επιπτώσεις στα κύρια διαμήκη ενισχυτικά (girder) του πυθμένα και του καταστρώματος. Η κινητική ενέργεια από την κρούση της πλώρης μετατρέπεται σε μία ανυψωτική μετατόπιση της πλώρης, όπως και σε μία κλασική δοκό. Στη συνέχεια, η σύγκρουση με τον πάγο, θα συντρίψει το στρώμα αυτό σε μια συγκεκριμένη περιοχή επαφής, και η φόρτιση λόγω κρούσης θα έχει ως αποτέλεσμα την ελαστική παραμόρφωση και τη δόνηση του κύτους.

Η σχέση του μοντέλου ελαστικής ενέργειας απλοποιείται και μπορεί να συνδυαστεί με εκείνο της ενέργειας κρούσης και της παρεχόμενης ενέργειας.

7.4.5 Πλώρη

Φορτίσεις Σχεδίασης

Για τα φορτία σχεδίασης ο κύριος στόχος είναι η τοπική φόρτιση λόγω του πάγου και η κανόνες που τα περιέχουν για τις αντίστοιχες κλάσεις. Η βασική τιμή της πίεσης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (B.1) :

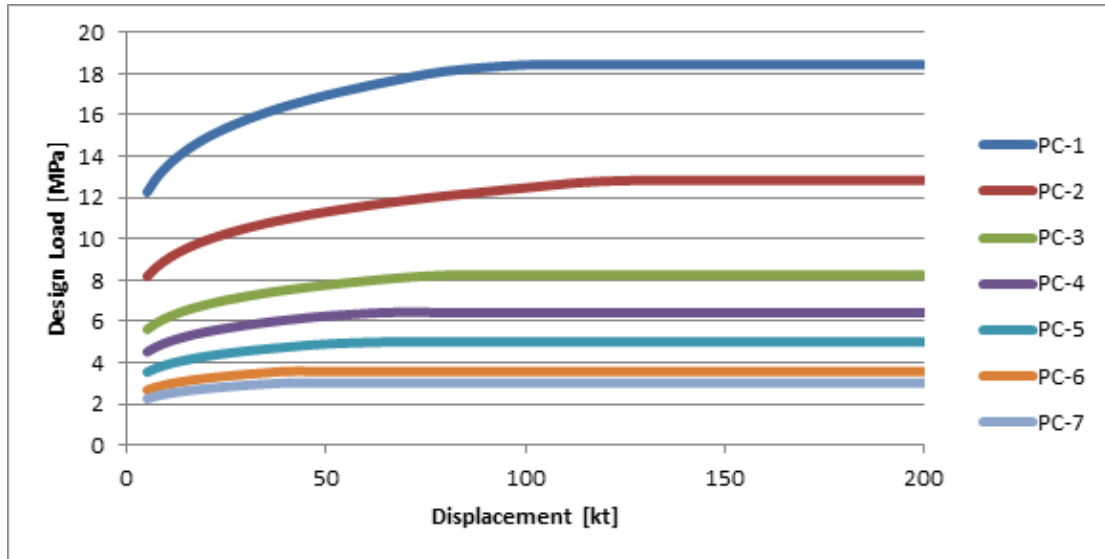
$$p = F \times 0.22 \times n \times CF2D \times AR \times 0.3 \text{ [MPa]}$$

και για την περιοχή της Αρκτικής έχουμε την :

$$p_0 = 1000 \times FA \times \sigma_{ice} \text{ (kNm}^2 \text{)}$$

Φόρτιση σχεδίασης του Πολικού κώδικα (Polar Code, IACS)

Όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις (παράρτημα Β) οι απαιτήσεις για την ενίσχυση του πλοίου εξαρτώνται από τους παράγοντες του σχήματος της γάστρας, του πάχους των ελασμάτων της αντίστοιχης κλάσεις και του εκτοπίσματος. Οι παράγοντες της κάθε κλάσης δίνονται στον πίνακα του παραρτήματος Β, ενώ οι παράγοντες που εξαρτώνται από το σχήμα της πλώρης θεωρήθηκαν ίσοι με $\beta' = 35$ και $\alpha = 30$



ΚΕΦ-VII.2: Φορτία σχεδίασης

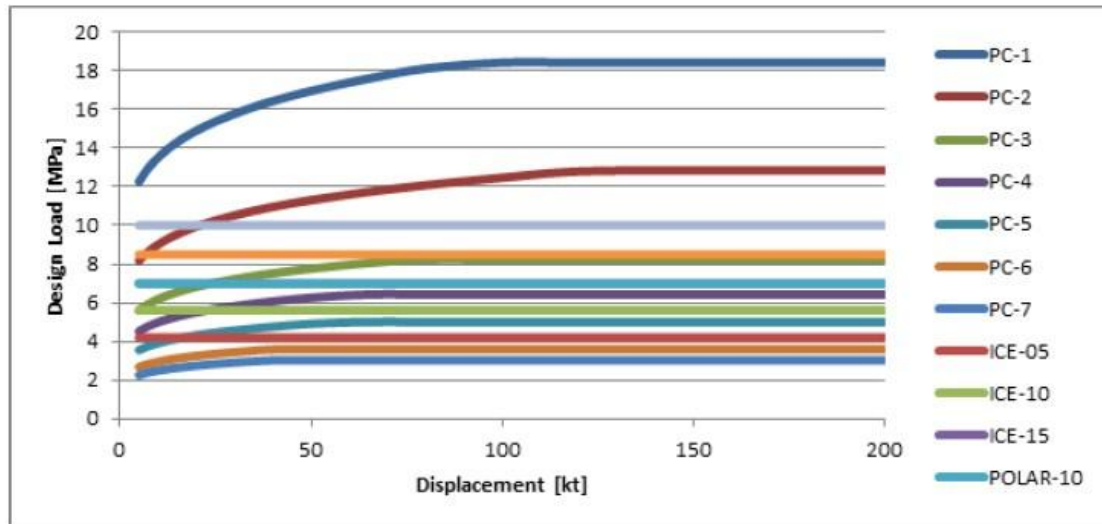
Φόρτιση σχεδίασης του Αρκτικού κώδικα (DNV)

Από το παράρτημα Β παρατηρούμε ότι η πίεση σχεδιασμού λόγω του πάγου είναι ανάλογη με την βασική τοπική πίεση p_0 .

$$p = FB \times p_0 \text{ (kN/m}^2 \text{)}$$

Με την σειρά του το p_0 είναι ανάλογο της απαραίτητης αντοχής σε σφυρόκρουση στον πάγο *since η οποία* ορίζεται από την κάθε κλάση (παράρτημα Β). Έτσι φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι και η φόρτιση σχεδίασης είναι εξαρτώμενη μόνο από την ανάλογη κλάση. Τέλος, από την εξίσωση στο παράρτημα Β παρατηρείται και η σταθερά FB η οποία εξαρτάται από την επιφάνεια επαφής που υπολογίζεται στην εξίσωση (4.25).

$$F_B = \begin{cases} \frac{0.58}{A_C^{0.5}} & \text{if } A_C \leq 1.0m^2 \\ \frac{0.58}{A_C^{0.15}} & \text{if } A_C > 1.0m^2 \end{cases}$$



ΚΕΦ-VII.3: Φορτία σχεδίασης

Η γραφική παράσταση ΚΕΦ-VII.3 συγκρίνει τα φορτία σχεδίασης της Αρκτικής κλάσης (DNV) και της Πολικής κλάσης (IACS). Παρατηρούμε ότι παρ' όλο που οι δύο κανονισμοί είναι βασισμένοι σε διαφορετικές αρχές, οι τιμές των φορτίων φαίνονται να είναι σχεδόν παρόμοιες. Όπως είναι φυσικό ο Πολικός κώδικας εμφανίζει τα μεγαλύτερα και τα μικρότερα φορτία σχεδίασης. Αυτό συμβαίνει διότι ο Πολικός κώδικας συμπεριλαμβάνει ταυτόχρονα τις υψηλότερες κλάσεις παγοθραυστικών όπως PC-1 και PC-2 αλλά και περίπτωσης για πλεύση στην Βαλτική, όπου οι συνθήκες είναι πολύ πιο ομαλές. Επίσης φαίνεται ότι τα υπολογιζόμενα φορτία της DNV για τις υψηλότερες κλάσεις ότι είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα του Πολικού κώδικα του IACS και όπως ήταν αναμενόμενο δεν εξαρτώνται από το εκτόπισμα.

Πάχος ελασμάτων

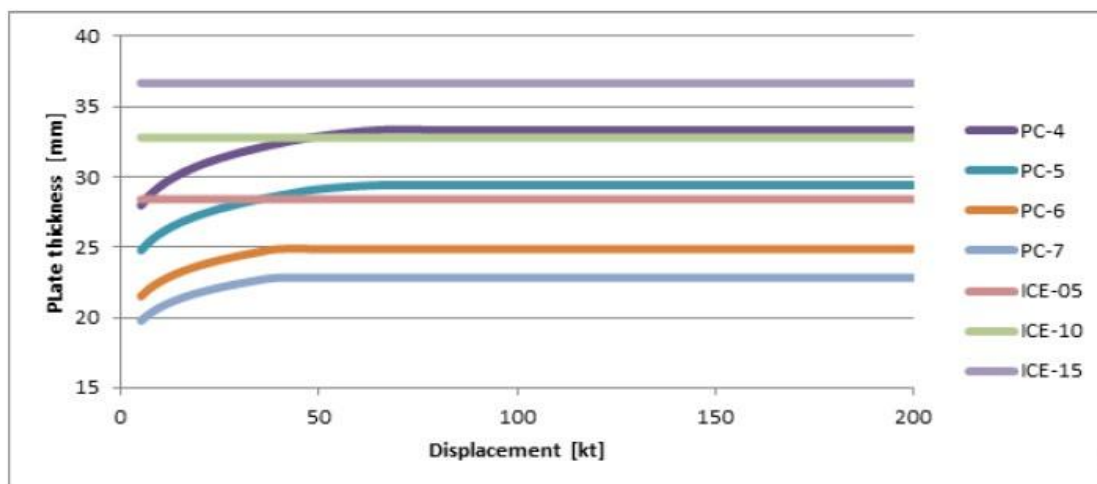
Οι απαιτήσεις για τα ελάσματα της γάστρας στο Πολικό κώδικα δίνονται από την εξίσωση (4.27)

$$t = 500s \sqrt{\frac{AF * PPF_P * P_{avg}}{\sigma_y}} \frac{1}{1 + \frac{s}{2b}} + t_s \quad [mm]$$

Και για τον Αρκτικό από την εξίσωση (4.29)

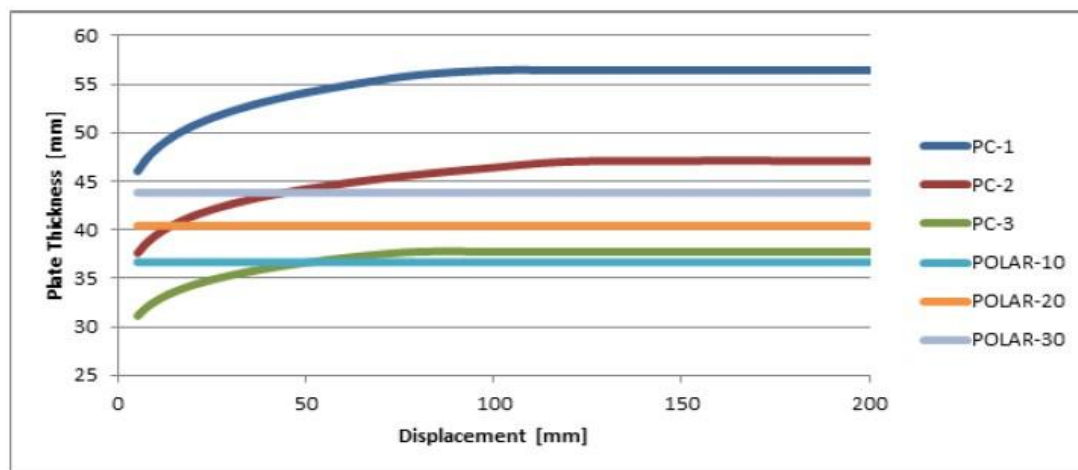
$$t = 23k_a \frac{s^{0.75}}{h_0^{0.25}} \sqrt{\frac{k_w p_0}{m_p \sigma_f}} + t_k \quad [mm]$$

Επειδή οι εξισώσεις περιέχουν ως μεταβλητές τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ελάσματος θα επιλέξουμε ελάσματα με μήκος 1300 mm και πλάτος 400 mm. Επίσης θα θεωρήσουμε ότι το όριο διαρροής του υλικού είναι ίσο με 355 MPa. Από την παρακάτω γραφική παράσταση φαίνεται ότι για τις χαμηλότερες κλάσεις οι απαιτήσεις του Πολικού κώδικα είναι περιορισμένες σε σχέση με τον Αρκτικό κώδικα της DNV. Οι κλάσεις PC-7 και PC-6 αποτελούν τις υψηλότερες κλάσεις για πλεύση στην Βαλτική και όπως φαίνεται είναι σαφώς μικρότερες από εκείνες που αντιστοιχούν στην DNV (ICE-05, ICE-10). Τέλος, παρατηρούμε ότι για μεγάλα εκτοπίσματα ο Αρκτικός κώδικας απαιτεί μεγαλύτερο πάχος ελάσματος ενώ για μικρά εκτοπίσματα απαιτεί μικρότερο πάχος από τον κώδικα της DNV.



ΚΕΦ-VII.4: Πάχος ελασμάτων σε χαμηλές κλάσεις

Για τις υψηλότερες κλάσεις της γραφικής παράστασης ΚΕΦ-VII.5 ο Πολικός κώδικας είναι πολύ πιο συντηρητικός από τον Αρκτικό για μεγάλα εκτοπίσματα. Όπως φαίνεται η υψηλότερη κλάση PC-1 είναι σαφώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του Αρκτικού κώδικα, POLAR-30. Αυτό συμβαίνει διότι χρησιμοποιήθηκε η πλαστική θεωρία για τον υπολογισμό αυτό με αποτέλεσμα το υλικό να μην έχει περίσσεια αντοχής σε περίπτωση εμφάνισης αυξημένων φορτίων. Αυτό οδηγεί τον σχεδιαστή να αύξηση το πάχος του ελάσματος για να μειώσει τον κίνδυνο αστοχίας. Τέλος, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα ΚΕΦ-III.4 και ΚΕΦ-III.5 το πάχος των ελασμάτων εξαρτάται σημαντικά από την φόρτιση σχεδίασης.



ΚΕΦ-VII.5: Πάχος ελασμάτων σε υψηλές κλάσεις

7.4.6 Μέσο Τμήμα

Φορτίο Σχεδιασμού

Το φορτίο σχεδιασμού για το μέσο τμήμα υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζεται αυτό στην περιοχή της πλώρης. Η διαφορά είναι ότι έχει πολλαπλασιαστεί με έναν παράγοντα της γάστρας. Για τον Αρκτικό κώδικα ο παράγοντας αυτός είναι ίσος με $F_{a,mid} = 0.6$, ενώ για τον πολικό κώδικα ο παράγοντας αυτός υπολογίζεται πολυπλοκότερα μέσω του παρακάτω πίνακα. Για τα συγκεκριμένα παραδείγματα το $f_a=0.36$.

Hull Area		Area	Polar Class						
			PC-1	PC-2	PC-3	PC-4	PC-5	PC-6	PC-7
Bow (B)	All	B	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Ice belt	BI_i	0.90	0.85	0.85	0.80	0.80	1.00*	1.00*
	Lower	BI_l	0.70	0.65	0.65	0.60	0.55	0.55	0.50
Bow Intermediate (BI)	Bottom	BI_b	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Ice belt	M_i	0.70	0.65	0.55	0.55	0.50	0.45	0.45
	Lower	M_l	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.25
Midbody (M)	Bottom	M_b	0.30	0.30	0.25	**	**	**	**
	Ice belt	S_i	0.75	0.70	0.65	0.60	0.50	0.40	0.35
	Lower	S_l	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.25	0.25
Stem (S)	Bottom	S_b	0.35	0.30	0.30	0.25	0.15	**	**

ΚΕΦ-VII.6: Παράγοντες επιφάνειας γάστρας

Όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα, υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ του Αρκτικού και του Πολικού κώδικα, πράγμα το οποίο προέρχεται κυρίως από το γεγονός ότι ο Πολικός κώδικας δεν περιλαμβάνει τον παράγοντα επιφάνειας της γάστρας (hull area factor). Για να υπολογίσουμε το φορτίο σχεδίασης του Πολικού κώδικα :

$$P_{avg} = \frac{F}{bw}$$

όπου

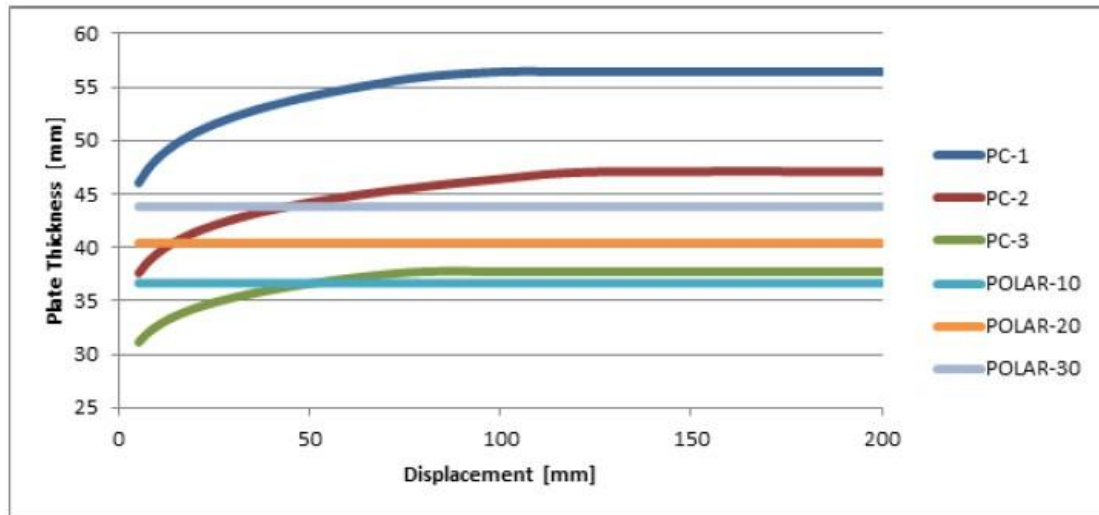
$$w_{NonBow} = \frac{F_{NonBow}}{Q_{NonBow}}$$

και

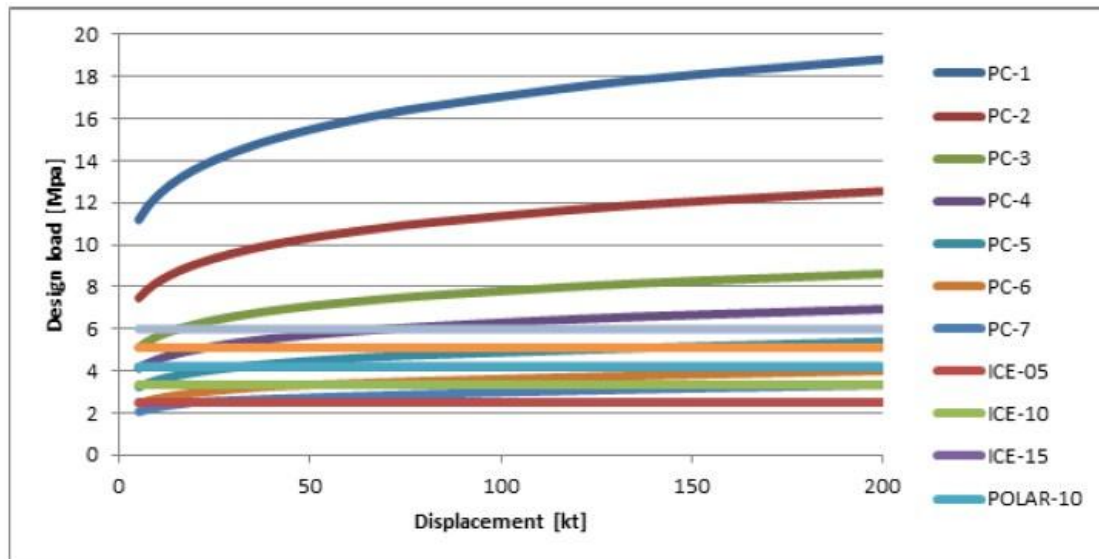
$$b_{NonBow} = \frac{w_{NonBow}}{3.6}$$

Πάχος ελάσματος

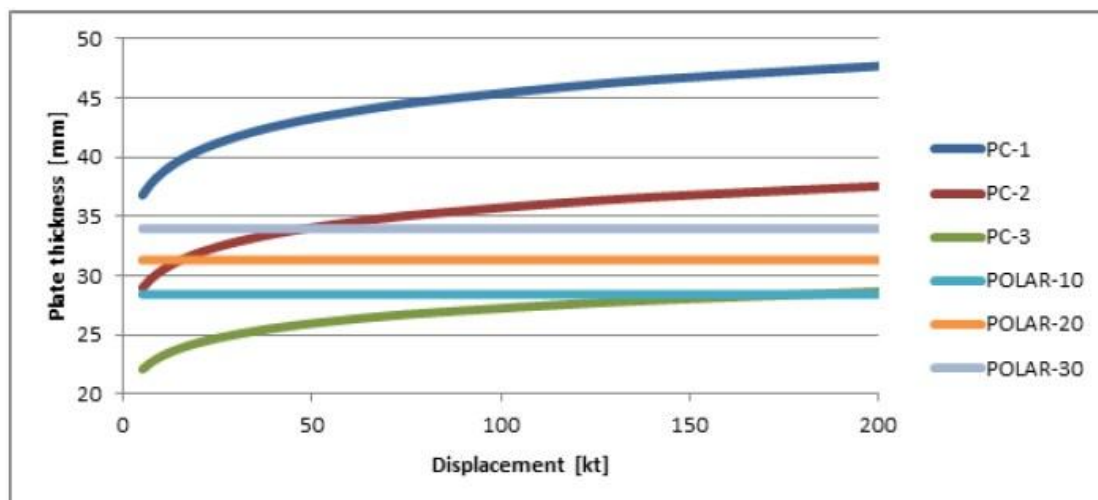
Για το πάχος του ελάσματος, εξάγουμε τα ίδια αποτελέσματα με την περιοχή της πλήρης εκτός από μία μικρή μείωση. Ο Πολικός κώδικας όπως φαίνεται παρακάτω είναι πιο συντηρητικός όσον αφορά το πάχος του ελάσματος από τον Αρκτικό κώδικα για μεγάλα εκτοπίσματα, ενώ για μικρά εκτοπίσματα ο Αρκτικός κώδικας είναι αυστηρότερος.



ΚΕΦ-VII.7: Πάχος ελασμάτων για υψηλότερες κλάσεις



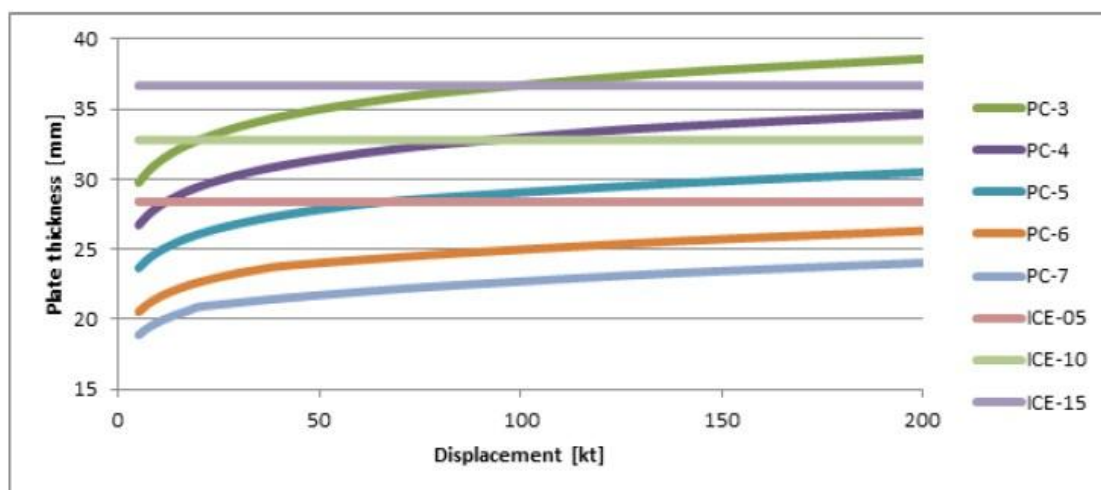
ΚΕΦ-VII.8: Φορτία σχεδιασμού, μέσο τμήμα



ΚΕΦ-VII.9: Πάχος ελασμάτων για χαμηλότερες κλάσεις

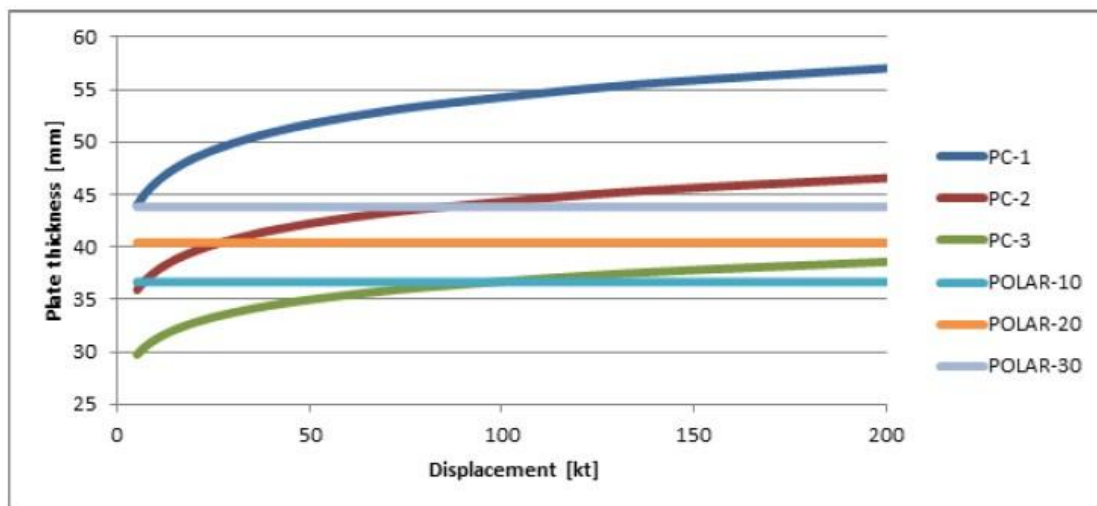
7.4.7 Πρυμναία περιοχή

Για την περιοχή της πρύμνης, έχουμε διαφορετικούς παράγοντες επιφανείας από το μέσο τμήμα άρα και διαφορετικό πάχος ελάσματος. Στον Αρκτικό κώδικα για την πρύμνη έχουμε το $FA = 0.6$. Για σκάφη που προορίζονται για πλεύση ανάποδα ο παράγοντας για τον Πολικό κώδικα είναι $Fa = 1.0$ και για τον Αρκτικό είναι $Fa = 0.8$. Για τον Πολικό κώδικα πρέπει να ανατρέξουμε στον πίνακα ΚΕΦ-III.6. Στην περιοχή της ζώνης πάγου, οι υψηλότερες κλάσεις έχουν μεγαλύτερο παράγοντα επιφάνειας γάστρας ενώ οι χαμηλότερες κλάσεις έχουν χαμηλότερο. Όταν το πλοίο θα πρέπει να πλεύσει ανάποδα ο Πολικός κώδικας ορίζει τον παράγοντα $AF=1.0$ για όλες τις κλάσεις. Για πλοία τα οποία προορίζονται για πλεύση ανάποδα, τόσο ο Πολικός όσο και ο Αρκτικός κώδικας θα έχει μία αύξηση στο πάχος των ελασμάτων σε σχέση με το μέσο τμήμα (βλέπε διαγράμματα ΚΕΦ-VII.8 και ΚΕΦ-VII.9). Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και σε αυτήν, για μεγαλύτερα εκτοπίσματα ο Πολικός κώδικας είναι πιο συντηρητικός ενώ για μικρά εκτοπίσματα ο Αρκτικός κώδικας είναι αυστηρότερος.

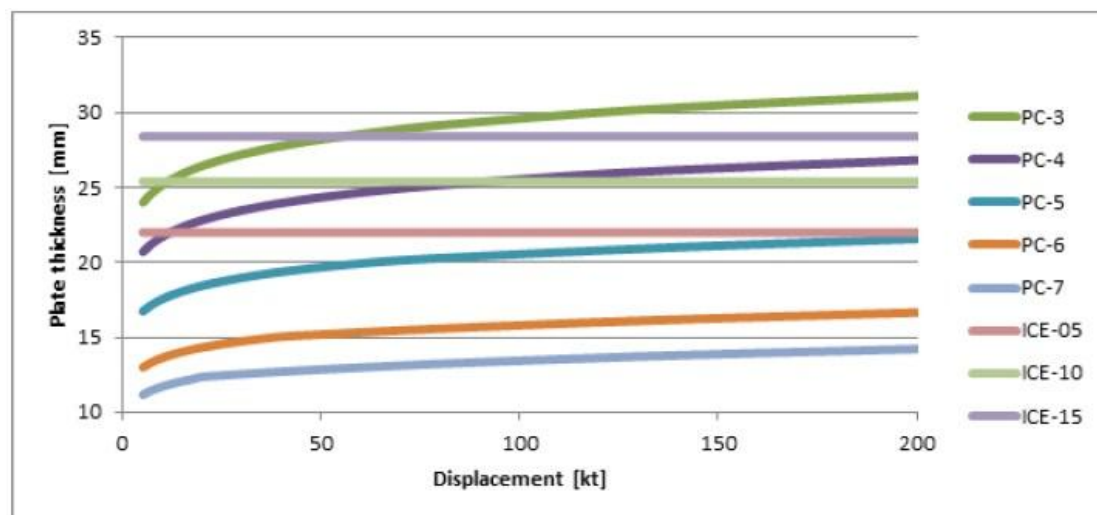


ΚΕΦ-VII.10: Πάχος ελάσματος για πλεύση ανάποδα

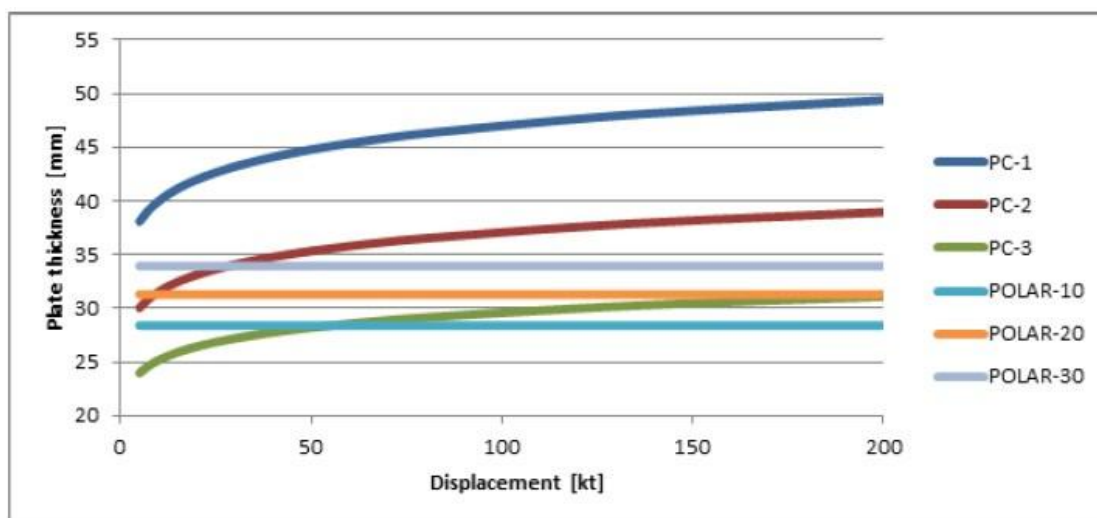
Για πλοία χωρίς την απαίτηση της πλεύσης ανάποδα υπάρχει διαφορά με το μέσο τμήμα για τον Πολικό κώδικα ενώ δεν παρατηρείται διαφορά στο Αρκτικό κώδικα. Βλέπε διαγράμματα ΚΕΦ-VII.10 και ΚΕΦ-VII.11 :



ΚΕΦ-VII.11: Πάχος ελάσματος για πλεύση ανάποδα



ΚΕΦ-VII.12: Πάχος ελάσματος χωρίς πλεύση ανάποδα



ΚΕΦ-VII.13: Πάχος ελάσματος χωρίς πλεύση ανάποδα

7.5 Αποτελέσματα της Ανάλυσης

Στο παραπάνω κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι πρακτικές διαφορές που εμφανίζονται κατά την σχεδίαση ενός παγοθραυστικού πλοίου ανάλογα με την μέθοδο την οποία ακολουθείται. Τα αριθμητικά αυτά αποτελέσματα είναι ιδιαίτερος χρήσιμα για την κατανόηση των βασικών διαφορών μεταξύ της πλαστικής και ελαστικής θεώρησης, όταν αυτές προορίζονται για χρήση σε πραγματικές συνθήκες πλεύσης, ενώ παράλληλα αποτελούν το πρώτο βήμα για την εισαγωγή στην βασική θεωρία των μεθόδων αυτών.

Συνεχίζοντας την ανάλυση των αποτελεσμάτων, προκύπτει ότι για το μεγαλύτερο φάσμα του εκτόπισματος ο Πολικός κώδικας είναι πιο συντηρητικός ενώ για σχετικά μικρά εκτόπισμα, ο Αρκτικός κώδικας παίζει τον ρόλο αυτό. Αυτή η διαφορά προέρχεται, εκτός από την διαφορετική μέθοδο σχεδίασης, από το γεγονός ότι ο Πολικός κώδικας αναφέρεται κυρίως στην πλεύση στην περιοχή της αρκτικής ενώ ο Αρκτικός κώδικας αναφέρεται κυρίως σε πλεύση στην περιοχή της Βαλτικής.

Συνοψίζοντας, η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ των δύο κανονισμών φαίνεται να είναι η εξάρτησή τους από το εκτόπισμα. Ο Πολικός κώδικας εξαρτάται σημαντικά από το εκτόπισμα, κάνοντάς τον πιο συντηρητικό για πλοία μεγάλου εκτόπισματος. Από την άλλη πλευρά ο Αρκτικός κώδικας έχει μικρή εξάρτηση από το εκτόπισμα με αποτέλεσμα να εμφανίζεται πιο συντηρητικός σε χαμηλότερα εκτόπισματα.

Βιβλιογραφία

- *Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, IACS, 2014*
- *Ice certificate principles for double-acting ships, Dr. S.I. Boyanov, 2015*
- *Ships for Navigation in Ice, DNV, 2011*
- *Ice Class Regulations, F.S.I.C.R., 2010*
- *Vessels Intended for Navigation in Polar Waters, ABS, 2008.*
- *Polar Ship Design Standards – State of the Art, and Way Forward, Andrew M. Kendrick.*
- *Ice Class Requirements on Side Shell Structures, Filip Bergbom Wallin and Carl-Johan Akerstrom, 2012.*

Κεφάλαιο 8^ο : Μεταλλική κατασκευή του πλοίου

8.1 Εισαγωγή

Στο παρακάτω κεφάλαιο θα αναφερθούμε στην σύγκριση μεταξύ των μεταλλικών κατασκευών πλοίων ανοικτής θάλασσας και παγοθραυστικών. Τα δύο είδη πλοίων τα οποία έχει σημασία να συγκρίνουμε είναι τα πλοία μεταφοράς πετρελαιοειδών (Tankers) και τα πλοία μεταφοράς φυσικού αερίου (LNG Carriers). Ο λόγος ο οποίος μας οδηγεί στην σύγκριση των δύο συγκεκριμένων ειδών είναι ότι καλύπτουν τη συντριπτική πλειονότητα των εμπορικών πλοίων στον αρκτικό κύκλο λόγω των φυσικών κοιτασμάτων στο υπέδαφος του αρκτικού κύκλου που χρειάζονται μεταφορά. Τόσο η χρήση πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων όσο και πλοίων μεταφοράς φορτίου χύδην, στην περιοχή της Αρκτικής, είναι περιορισμένη.

Αρχικά, θα αναφερθούν οι βασικές μέθοδοι φόρτισης που υποβάλλονται τα πλοία στην ανοικτή θάλασσα, ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα την λογική πίσω από την ενίσχυση των πλοίων ανοικτής θάλασσας ενώ στη συνέχεια, θα αναφερθούν περιληπτικά (αφού αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια) οι μέθοδοι φόρτισης στα παγοθραυστικά πλοία.

Τέλος θα γίνει σύγκριση τόσο του μεγέθους των φορτίσεων που ασκούνται στη μεταλλική κατασκευή όσο και της μεθόδου κατασκευής της.

8.2 Φορτίσεις στην ανοικτή θάλασσα

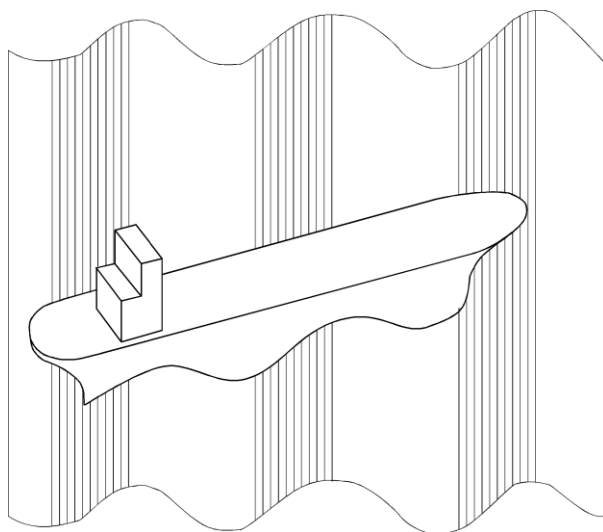
Όταν ένα πλοίο πλέει στη θάλασσα, υποβάλλεται σε διάφορες μορφές φορτίσεων διάφορων εντάσεων που προκαλούν παραμόρφωση της δομής του, καθώς και καταπονήσεις. Ο σχεδιαστής πρέπει να γνωρίζει όσο το δυνατόν ακριβέστερα τα χαρακτηριστικά φόρτισης της δομής του σκάφους: κατεύθυνση του φορτίου, συχνότητα εμφάνισης, μοτίβο διανομής στη δομή της γάστρας και συμπεριφορά ανάλογα την χρονική περίοδο κ.λπ. Το πρώτο βήμα σχεδιασμού, είναι να υποθέσουμε ακριβείς φορτίσεις που δρουν στη σχετική δομή του πλοίου, προκειμένου να εκτιμηθεί η δομική αντοχή του με λογικό τρόπο και, στη συνέχεια αναπτυχθεί ένα σχέδιο.

Όταν εξετάζουμε τα χαρακτηριστικά φορτίου όπου το φορτίο μεταδίδεται βαθμιαία και συνεχώς από ένα τοπικό κατασκευαστικό μέλος σε ένα γειτονικό μεγαλύτερο μέλος στήριξης, ο καλύτερος τρόπος να κατηγοριοποιηθούν τα φορτία στη δομή του κύτους είναι ο εξής:

- Διαμήκη φορτία αντοχής
- Τα φορτία εγκάρσιας αντοχής
- Τοπικά φορτία δύναμης

8.2.1 Διάμηκες φορτίο

Τα διαμήκη φορτία είναι φορτία τα οποία επηρεάζουν την ολική αντοχή της μεταλλικής κατασκευής, κατά την οποία το πλοίο συμπεριφέρεται σαν δοκός λόγω της επιμήκους μορφής του. Εάν τα παραπάνω φορτία διαμήκους αντοχής υπερβαίνουν το ανώτατο όριο της διαμήκους αντοχής για το κύτος, το κύτος θα κάμπτεται ή θα περιστρέφεται. Επομένως, το φορτίο διαμήκους αντοχής είναι ένα από τα σημαντικότερα φορτία κατά τον υπολογισμό της συνολικής αντοχής μιας δομής κύτους φορτία αυτά εμφανίζονται ως καμπτική ροπή, διατμητική τάση ή στρεπτική ροπή. Τα διαμήκη φορτία μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: δυναμικά και στατικά.



ΚΕΦ-VIII.1: Πλοίο σε πλάγιο κυματισμό

Τα στατικά διαμήκη φορτία προέρχονται από τις τοπικές ανομοιομορφίες του βάρους και της άνωσης σε κατάσταση ήρεμης θάλασσας. Για παράδειγμα, διαφορά μεταξύ της φόρτισης του βάρους του πλοίου και της άνωσης δημιουργεί στατική ροπή κάμψης και διάτμηση ενώ ασύμμετρα τοποθετημένο φορτίο δημιουργεί στατική στρεπτική ροπή.

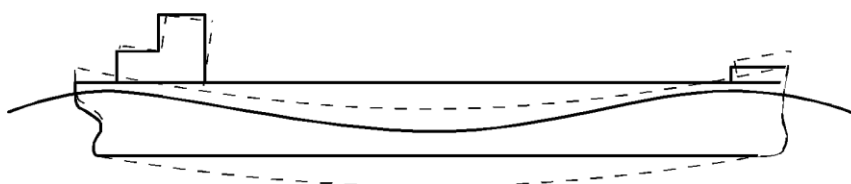
Τα δυναμικά διαμήκη φορτία προέρχονται από τα κύματα. Όταν το πλοίο βρίσκεται στην κορυφή του κύματος τότε προκαλείται σε αυτό η λεγόμενη “hogging” καμπτική ροπή και διατμητική δύναμη. Από την άλλη, όταν το πλοίο βρίσκεται στην κοιλάδα του κύματος προκαλείται σε αυτό η λεγόμενη “sagging” καμπτική ροπή και διατμητική δύναμη. Και οι δύο κατάσταση ασκούνται στο πλοίο περιοδικά με την κίνηση του κύματος ενώ, σε περίπτωση που η κατάσταση της θάλασσας είναι πολυπλοκότερη το πλοίο δέχεται και στρεπτικές ροπές. Παρακάτω παρατίθενται οι διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η ένταση των διαμήκων δυναμικών φορτίων που εισάγεται στους υπολογισμούς των καμπτικών και διατμητικών τάσεων έχουν ομογενοποιηθεί από το 1989 από τον IACS (International Association of Classification Societies).

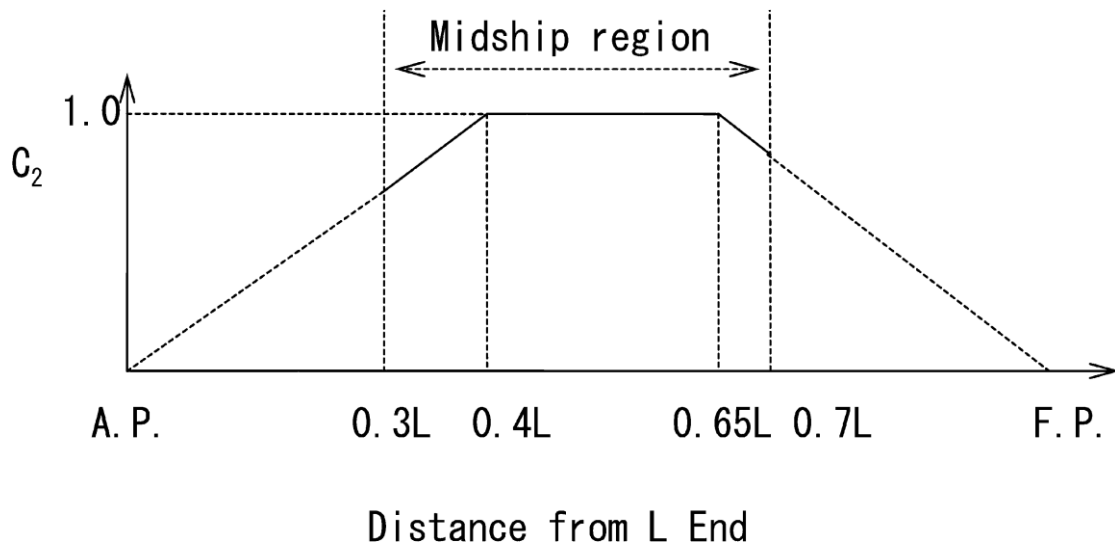
Hogging



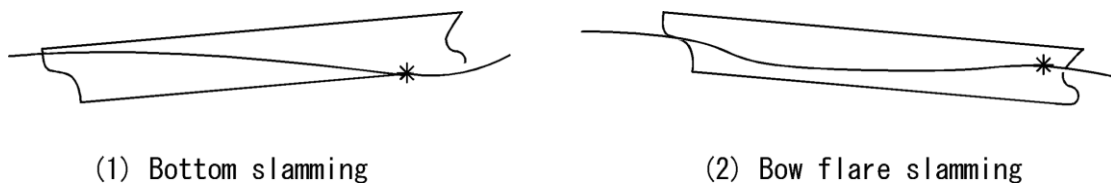
Sagging



ΚΕΦ-VIII.2: Πλοίο σε κατάσταση Hogging και Sagging



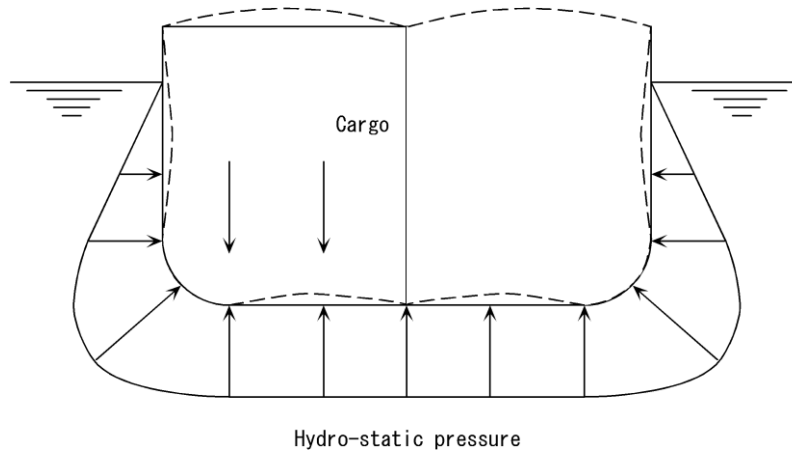
ΚΕΦ-VIII.3: Παράγοντας των κανονισμών που επηρεάζει την καμπτική ροπή



ΚΕΦ-VIII.4: Κρουστικές φορτίσεις στην πλώρη

8.2.2 Εγκάρσιο φορτίο

Τα εγκάρσια φορτία ορίζονται ως τα φορτία τα οποία ασκούνται στα εγκάρσια μέρη της δομής του πλοίου και προκαλούν παραμορφώσεις στην τομή εγκάρσια τομή της μεταλλικής κατασκευής. Οι εγκάρσιες φορτίσεις περιλαμβάνουν την υδροστατική πίεση στο εξωτερικό τμήμα της γάστρας, το βάρος του φορτίου στον πυθμένα, την πίεση του έρματος που προκαλεί παραμορφώσεις στις δεξαμενές κλπ. Για παράδειγμα, αν αναλυθούν τα φορτία μίας τομής κατά την πλευση του πλοίου σε ήρεμη θάλασσα θα παρατηρηθούν οι φορτίσεις του παρακάτω σχήματος. Στην παρακάτω τομή ασκούνται: (α) υδροστατική πίεση λόγω του νερού που περιβάλλει το πλοίο, (β) το εσωτερικό φορτίο του πλοίου λόγω του βάρους του και του βάρους του φορτίου του. Αυτά τα φορτία δεν είναι πάντα ίσα σε κάθε σημείο, με αποτέλεσμα τα φορτία να δημιουργούν εγκάρσιες παραμορφώσεις σε διάφορα δομικά μέρη της γάστρας όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Όταν αναλύουμε τα αποτελέσματα λόγω διαμήκων και εγκάρσιων φορτίων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι από την πλευρά της αντοχής της κατασκευής τα διαμήκη φορτία δεν είναι σε θέση να παραμορφώσουν τα εγκάρσια ενισχυτικά.



ΚΕΦ-VIII.5: Παράδειγμα παραμόρφωσης λόγω των εγκάρσιων φορτίων

Τα φορτία αυτά είναι :

- Βάρος μεταλλικής κατασκευής, βάρος έρματος, και βάρος φορτίου
- Υδροστατικά και υδροδυναμικά φορτία
- Αδρανειακές φορτίσεις του φορτίου ή του έρματος του πλοίου
- Κρουστικά φορτία

(1) *Βάρος μεταλλικής κατασκευής, βάρος έρματος, και βάρος φορτίου:* Αυτά τα φορτία παραμένουν σταθερά και δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο. Δημιουργούνται από την βαρύτητα στο κέντρο βάρους των μερών που τα απαρτίζουν.

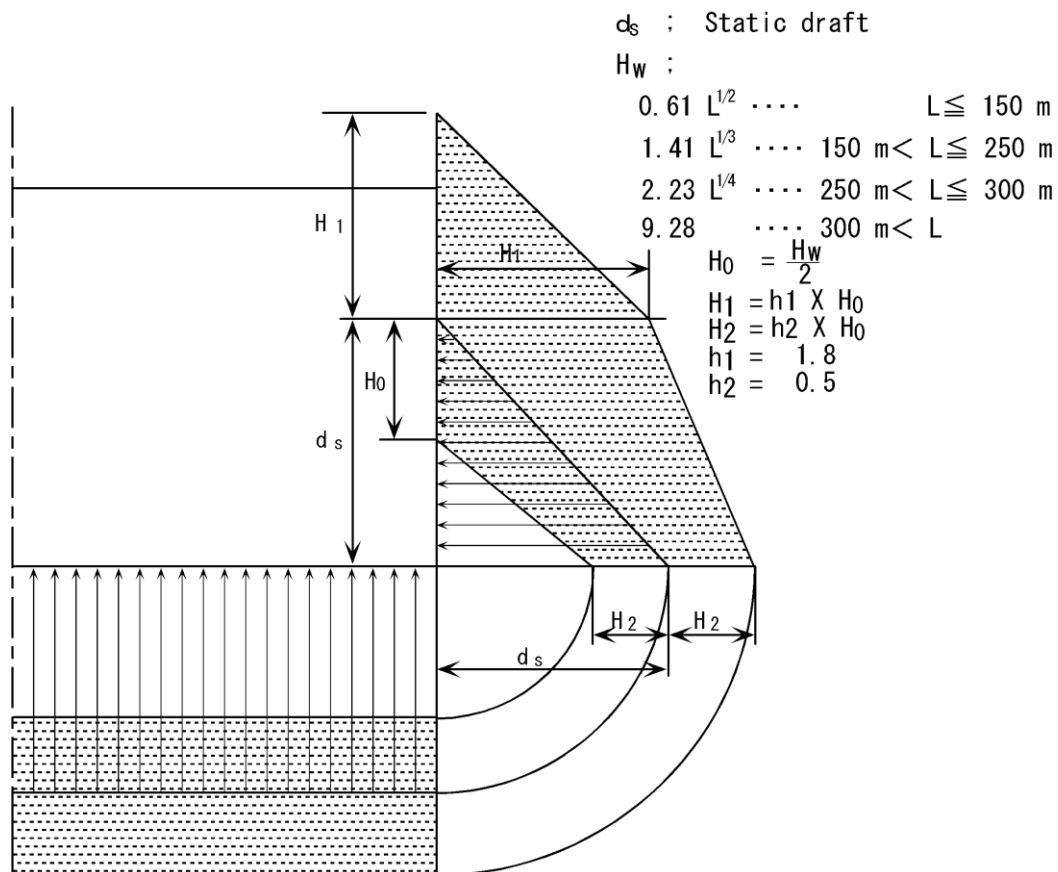
(2) *Υδροστατικά και υδροδυναμικά φορτία:* Τα υδροστατικά φορτία προέρχονται από την στατική πίεση του νερού που περιβάλλει την εγκάρσια τομή και ασκούνται στη γάστρα σαν εξωτερικά φορτία. Άλλο εξωτερικό φορτίο είναι τα υδροδυναμικά φορτία που προέρχονται από την αλληλεπίδραση του πλοίου και των κυμάτων και ασκούν στην γάστρα μία κυμαινόμενη πίεση. Αθροίζοντας τα υδροστατικά και υδροδυναμικά φορτία υπολογίζουμε την ολική πίεση του νερού.

(3) *Αδρανειακές φορτίσεις του φορτίου ή του έρματος του πλοίου:* Η αδρανειακή φόρτιση προκαλείται από την δράση του ίδιου βάρους του πλοίου, του φορτίου και του έρματος λόγω της επιτάχυνσης του πλοίου. Για παράδειγμα, μία πλήρως γεμάτη δεξαμενή, λόγω των κυματισμών, μπορεί να ασκήσει μεταβαλλόμενα φορτία στα τοιχώματά της λόγω της απότομης αλλαγής κατεύθυνσης κατά την εγκάρσια κατεύθυνση. Ένα παρόμοιο φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί όταν οι δεξαμενές είναι μερικώς γεμάτες.

(4) *Κρουστικά φορτία:* Υπάρχουν δύο είδη κρουστικών φορτίων τα οποία σχετίζονται με την εγκάρσια αντοχή: "slamming" και "sloshing". Το "slamming" μπορεί να κατηγοριοποιηθεί τόσο σαν εγκάρσιο όσο και ως διάμηκες φορτίο. Αυτό σημαίνει ότι η κρουστική φόρτιση είναι αρκετά έντονη ώστε να επηρεάσει τόσο την τοπική όσο και την

ολική δομή του πλοίου με αποτέλεσμα να μία επηρεάζει την κατασκευή μόνο κατά το διάμηκες αλλά και κατά το εγκάρσιο ταυτόχρονα. Πολλά πλοία έχουν υποστεί διάφορες ζημιές λόγω της φόρτισης αυτής, κυρίως στο πρωραίο τμήμα του πυθμένα. Αν προσθέσουμε στην ανάλυσή μας και την συμβολή των κυματισμών τότε η θεωρητική προσέγγιση του της έντασης της κρουστικής δύναμης είναι πολύ δύσκολη, με αποτέλεσμα να βασιζόμαστε σε πειραματικά δεδομένα για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με ικανοποιητική ακρίβεια. Η παρακάτω εικόνα περιέχει την ανάλυση αυτών των φορτίων σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά.

Το "sloshing" είναι το φαινόμενο κατά το οποίο το φορτίο που ταλαντώνεται στην δεξαμενή έρχεται σε συγχρονισμό με την κίνηση του πλοίου με αποτέλεσμα να δημιουργεί μεγάλα κρουστικά φορτία μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας και της δομής της δεξαμενής. Γενικά, το φαινόμενο αυτό προέρχεται από την κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας, οπότε μία δεξαμενή η οποία είναι πλήρως γεμάτη δεν δίνει την δυνατότητα στο υγρό να κινηθεί με αποτέλεσμα το φαινόμενο αυτό να μην υφίσταται. Τέλος, όταν το ύψος του υγρού φτάσει σε ένα συγκεκριμένο σημείο της δεξαμενής, αρχίζει να συγχρονίζεται με την κίνηση του πλοίου.

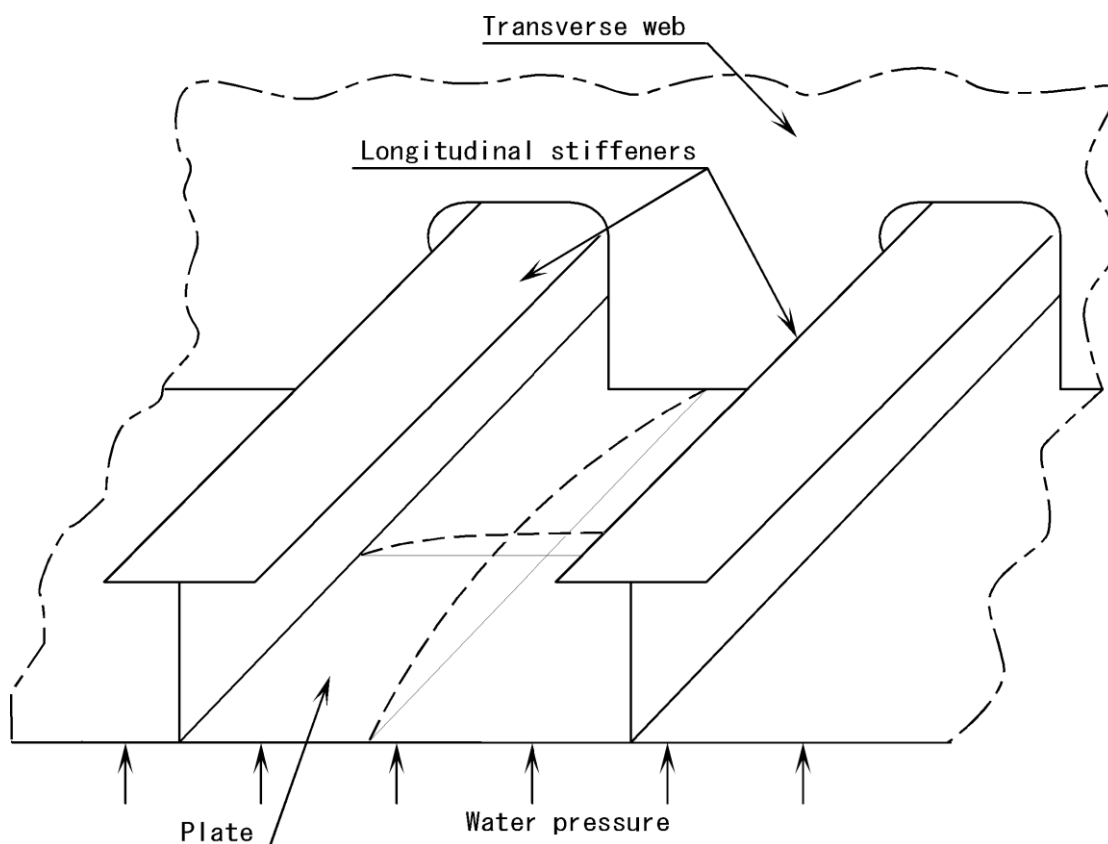


ΚΕΦ-VIII.6: Τρόπος υπολογισμού εγκάρσιας φόρτισης

8.2.3 Τοπικό φορτίο

Τα τοπικά φορτία περιλαμβάνουν τα φορτία που επηρεάζουν τοπικά την δομή της μεταλλικής κατασκευής όπως τα τοιχώματα, τα ενισχυτικά και οι συνδέσεις μεταξύ των ενισχυτικών. Η παραπάνω κατηγορία φορτίων χρησιμοποιείται ευρέως στον πρακτικό σχεδιασμό του πλοίου. Ένα φορτίο το οποίο ασκείται στην κατασκευή μπορεί να αναλυθεί ανεξάρτητα, θεωρώντας ότι η φόρτιση μεταφέρεται από τα τοπικά ενισχυτικά σε μεγαλύτερα. Για παράδειγμα, όταν αρχίζει ο σχεδιασμός του πυθμένα, ο σχεδιαστής λαμβάνει υπόψη την μεταφορά των τάσεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αρχικά, η αντοχή του πυθμένα πρέπει να συσχετιστεί με την αντοχή των ελασμάτων που τον απαρτίζουν ενώ στη συνέχεια πρέπει να ελεγχθεί η αντοχή των διαμήκων ενισχυτικών που στηρίζουν τα έλασμα. Τρίτον, πρέπει να ληφθεί υπόψη η αντοχή των κύριων εγκάρσιων ενισχυτικών που συγκρατούν τα διαμήκη ενισχυτικά και τελικά να ελεγχθεί η ολική αντοχή της κατασκευής. Προφανώς, μπορεί να γίνει και ξεχωριστή ανάλυση για το κάθε ένα ενισχυτικό, λαμβάνοντας σαν δεδομένο την ένταση των τάσεων που μεταφέρονται σε αυτά.

Ο τρόπος ανάλυσης αυτός είναι πολύ πρακτικός αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση των φορτίων με την χρονική μεταβολή παραλείπεται από τους υπολογισμούς. Οπότε, πρέπει να δίνεται προσοχή, κυρίως κατά την ανάλυση των φορτίων όταν αυτά ασκούνται ταυτόχρονα, διότι με την χρονική μεταβολή μεταβάλλεται και η επιρροή που έχουν αθροιζόμενα στην κατασκευή.



ΚΕΦ-VIII.7: Τοπική δομή ενίσχυσης

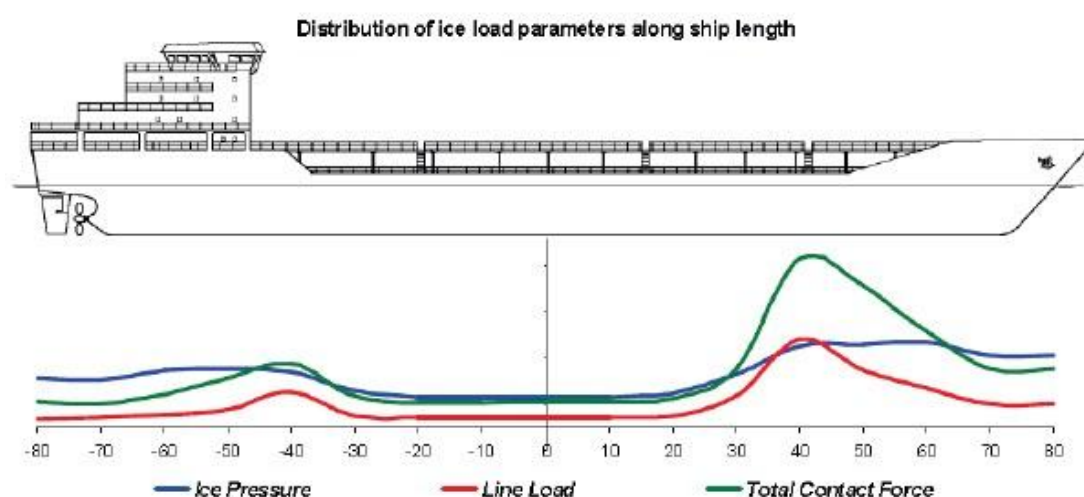
8.3 Ασκούμενα φορτία στην Αρκτική

Αν θεωρήσουμε ότι η ύπαρξη του πάγου είναι δεδομένη, οι φορτίσεις που δέχεται η μεταλλική κατασκευή του πλοίου εξαρτώνται πρώτον, από τα χαρακτηριστικά του στρώματος του πάγου και δεύτερον, από την πυκνότητα του πάγου στην επιφάνεια της θάλασσας. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του πάγου και πως σχετίζονται με τις φορτίσεις, αναφερθήκαμε εκτενώς στο 3^ο κεφάλαιο.

Ενώ τα παραπάνω χαρακτηριστικά επηρεάζουν τις τοπικές φορτίσεις στη μεταλλική κατασκευή, η πυκνότητα του στρώματος πάγου επηρεάζει κυρίως την διαμήκη και εγκάρσια φόρτιση του πλοίου. Σε περίπτωση που η πυκνότητα του πάγου είναι μικρή, τα καμπτικά φορτία από τα φαινόμενα *hogging* και *sagging* καθώς και από την σφυρόκρουση της πλώρης είναι οι κύριες πηγές φορτίσεων της μεταλλικής κατασκευής ενώ η ύπαρξη του πάγου επηρεάζει μόνον την τοπική αντοχή. Από την άλλη πλευρά, αν η πυκνότητα του πάγου στην επιφάνεια της θάλασσας είναι μεγάλη, τα καμπτικά φορτία λόγω της κρούσης της πλώρης στο στρώμα του πάγου είναι εκείνα που ασκούν την εντονότερη καμπτική φόρτιση στο πλοίο.

Όσον αφορά τις εγκάρσιες φορτίσεις που ασκούνται στο πλοίο, η λογική είναι παρόμοια αφού όσο αυξάνεται η πυκνότητα του πάγου στην επιφάνεια της θάλασσας τόσο αυξάνονται τα εγκάρσια φορτία που ασκούνται στη δομή του πλοίου. Όπως και παραπάνω, για μεγάλες τιμές πυκνότητας τα κύρια εγκάρσια φορτία ασκούνται από τον πάγο.

Τέλος, αφού η πυκνότητα του πάγου στην επιφάνεια της θάλασσας είναι ανάλογη με το πάχος του, τα τοπικά φορτία που αναπτύσσονται θα είναι προφανώς μεγαλύτερα όσο αυξάνεται η πυκνότητα. Εξαιρεση αποτελούν περιπτώσεις απομονωμένων παχύτερων κομματιών πάγου τα οποία μπορεί να αποκολληθούν από το στρώμα τους και να παρασυρθούν στην πορεία του πλοίου.

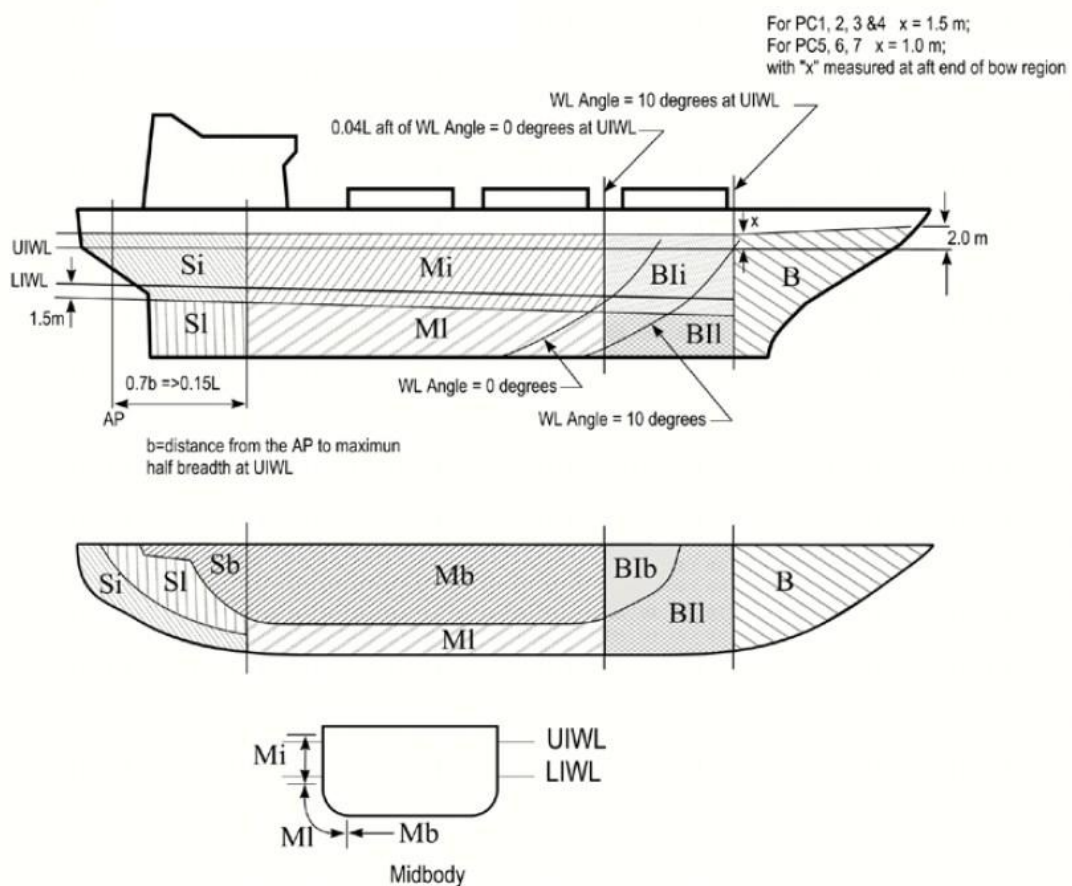


ΚΕΦ-VIII.8: Διανομή του φορτίου του πάγου κατά μήκος του πλοίου

8.4 Εισαγωγή στην ενίσχυση του πλοίου

Είναι προφανές ότι η μεταλλική κατασκευή του πλοίου, τόσο της ανοικτής θάλασσας όσο και των παγοθραυστικών, εξαρτάται από το σύνολο των κανονισμών κατασκευής της κατηγορίας στην οποία υπάγονται.

Όσον αφορά τα παγοθραυστικά πλοία, η μεταλλική τους κατασκευή χωρίζεται σε περιοχές ανάλογα με τις φορτίσεις οι οποίες ασκούνται στις περιοχές αυτές. Ανάλογα την περιοχή, τα χαρακτηριστικά τόσο των ενισχυτικών όσο και των ελασμάτων, όπως το πάχος και το υλικό κατασκευής, αλλάζουν. Παρακάτω ακολουθεί παράδειγμα της λεγόμενης ζώνης πάγου που ενισχύεται επιπλέον:



ΚΕΦ-VIII.9: Ζώνη ενίσχυσης κατά IACS UR.

Η παραπάνω εικόνα αναφέρεται στην ζώνη ενίσχυσης από τον IACS. Όπως και ο IACS έτσι και οι άλλοι νηογνώμονες έχουν παρόμοιες ζώνες, οι οποίες αλλάζουν ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν.

Όπως φαίνεται, η γάστρα χωρίζεται σε πολλές διαφορετικές περιοχές οι οποίες ορίζονται ανάλογα με την θέση τους σε σχέση με το στρώμα πάγου και τον πιθανό κίνδυνο αστοχίας.

Ο κύριος λόγος για τον οποίο έχουμε την παραπάνω διαφοροποίηση είναι η ύπαρξη διαφορετικών παραγόντων ανάλογα με την περιοχή, οι οποίοι αλλάζουν τα χαρακτηριστικά ενίσχυσης της μεταλλικής κατασκευής. Για παράδειγμα, ο παρακάτω πίνακας δείχνει πως χωρίζονται οι διάφορες κατηγορίες παραγόντων ανάλογα την περιοχή σύμφωνα με τον IACS UR:

Hull area		Area	Polar Class						
			PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Bow (B)	All	B	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Bow Intermediate (BI)	Icebelt	BI _i	0.90	0.85	0.85	0.80	0.80	1.00*	1.00*
	Lower	BI _l	0.70	0.65	0.65	0.60	0.55	0.55	0.50
	Bottom	BI _b	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
Midbody (M)	Icebelt	M _i	0.70	0.65	0.55	0.55	0.50	0.45	0.45
	Lower	M _l	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.25
	Bottom	M _b	0.30	0.30	0.25	**	**	**	**
Stern (S)	Icebelt	S _i	0.75	0.70	0.65	0.60	0.50	0.40	0.35
	Lower	S _l	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.25	0.25
	Bottom	S _b	0.35	0.30	0.30	0.25	0.15	**	**

ΚΕΦ-VIII.10: Παράδειγμα πίνακας παραγόντων γάστρας

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε πως οι συντελεστές τις γάστρας αυξάνονται για παγοθραυστικά με υψηλότερες απαιτήσεις.

Γενικότερα, οι κανονισμοί που διέπουν τα παγοθραυστικά πλοία και επηρεάζουν έμμεσα τον τρόπο ενίσχυσής τους είναι αρκετά ελαστικοί με τις επιλογές που δίνουν στον σχεδιαστή (σε σχέση με την επικινδυνότητα της Αρκτικής περιοχής). Αναφερόμενοι, πάντα, σε κοινούς τύπους παγοθραυστικών πλοίων, οι κανονισμοί επηρεάζουν τον τρόπο ενίσχυσης της μεταλλικής κατασκευής, όπως την απόσταση μεταξύ ενισχυτικών ή την γεωμετρία των ενισχυτικών, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις αποφάσεις του σχεδιαστή ως δεδομένα.

Παρακάτω θα αναφερθούν οι βασικοί τρόποι σχεδίασης της μεταλλικής κατασκευής για τα είδη παγοθραυστικών διπλού τύπου των πλοίων μεταφοράς πετρελαιοειδών και φυσικού αερίου.

8.5 Γενικά χαρακτηριστικά ενίσχυσης παγοθραυστικών

8.5.1 Δομική σχεδίαση της γάστρας

Οι κανόνες για την σχεδίαση μίας ενισχυμένης γάστρας έχουν ως βασική τους προτεραιότητα την τοπική αντοχή της. Τα μέρη της ενίσχυσης που διέπουν την τοπική ενίσχυση της γάστρας είναι τα ελάσματα, τα αντίστοιχα κατακόρυφα και διαμήκη ενισχυτικά και τα κύρια εγκάρσια ενισχυτικά.

Για παγοθραυστικά πλοία μικρής κλάσης που κινούνται στην Βαλτική θάλασσα και σε ανάλογες περιοχές, σημασία δίνεται στην ενίσχυση της πρύμνης ενώ η ζώνη ενίσχυσης του μέσου τμήματος είναι περιορισμένη. Γενικότερα οι τάσεις που ασκούνται από τον πάγο στο μέσο τμήμα είναι μικρές και δεν αποτελούν κίνδυνο αστοχίας, όπως αναφέρεται και στους κανονισμούς. Επίσης, η χρήση υποστηρικτικών, αμιγώς παγοθραυστικών, πλοίων για το άνοιγμα των παγωμένων καναλιών, δίνει την δυνατότητα για περαιτέρω μείωση της ενίσχυσης σε όλες τις περιοχές. Η μόνη περίπτωση στην οποία η ενίσχυση στο μέσο τμήμα είναι έντονη είναι στις μεγαλύτερες κλάσεις για παγοθραυστικά που πλέουν στην Βαλτική οι οποίες είναι οι Ice Class IA και Ice Class IA Super του FSICR. Τέλος, αν και το μέσο τμήμα των μικρών κλάσεων των πλοίων δεν μελετάται σε βάθος, παραμορφώσεις που έχουν παρατηρηθεί σε τέτοιου είδους πλοία έχουν οδηγήσει τους νηογνώμονες να αναθεωρήσουν την έλλειψη αυτή.

Από την άλλη πλευρά, πλοία υψηλής κλάσης είναι έντονα ενισχυμένα σε ευρύτερη περιοχή, με μεγαλύτερη πυκνότητα ενισχυτικών μεγαλύτερου πάχους.

8.5.2 Δομική ενίσχυση

Τα ενισχυτικά μέρη των Αρκτικών πλοίων πρέπει να είναι σχεδιασμένα να αντέξουν τα αναμενόμενα φορτία κάθε κλάσεις.

Με τον όρο ενισχυτικό μέρος ορίζονται τα τοπικά εγκάρσια και διαμήκη ενισχυτικά καθώς και τα κύρια ενισχυτικά στα οποία ασκούνται οι φορτίσεις.

Επίσης, σημαντική παράμετρος που επηρεάζει άμεσα την αντοχή των ενισχυτικών της γάστρας είναι ο τρόπος στήριξης των ενισχυτικών μεταξύ τους. Ο τρόπος στήριξης των ενισχυτικών εξαρτάται από την σύνδεση των ενισχυτικών μεταξύ τους και κατά πόσο είναι συνεχής ή διακόπτεται από άλλα ενισχυτικά μέρη. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κάθε σύνδεσης, μπορούμε να θεωρήσουμε είτε απλή έδραση ή, αν η σύνδεση των ενισχυτικών γίνεται με τέτοιον τρόπο ώστε να παρατηρείται υψηλή αντίσταση στην περιστροφή στο σημείο της σύνδεσης, θεωρούμε πάκτωση. Τέλος, οποιοσδήποτε και αν είναι ο τρόπος στήριξης, πρέπει να είναι καλά ορισμένος στην περιοχή της ενισχυμένης ζώνης ώστε να διευκολύνεται και να βελτιστοποιείται η ανάλυση της κατασκευής.

Το ενεργό μήκος των ενισχυτικών μερών ορίζεται με βάση του ολικού του μήκους (moulded length). Αν τα μπρακέτα θεωρούνται πακτωμένα, το ενεργό μήκος μπορεί να μειωθεί ανάλογα με τον αντίστοιχο κανονισμό. Επίσης τα μπρακέτα πρέπει να διαμορφώνονται ώστε να εξασφαλίσουν την σταθερότητα στη ελαστική και μετά του ορίου διαρροής περιοχή.

Όταν υπολογίζεται η συντελεστής τομής και διατμητική επιφάνεια ενός ενισχυτικού μέρους, το πάχος του κύριου ενισχυτικού, της φλάντζας καθώς και των ελασμάτων πρέπει

να χρησιμοποιηθούν. Η διατμητική επιφάνεια του ενισχυτικού μπορεί να εμπεριέχει και τις επιφάνειες ενός παραπλήσιου μέρους της ενίσχυσης όπως την φλάντζα εφόσον είναι πακτωμένη. Εξαιρούνται τα ελάσματα.

8.5.3 Τοπική αντοχή

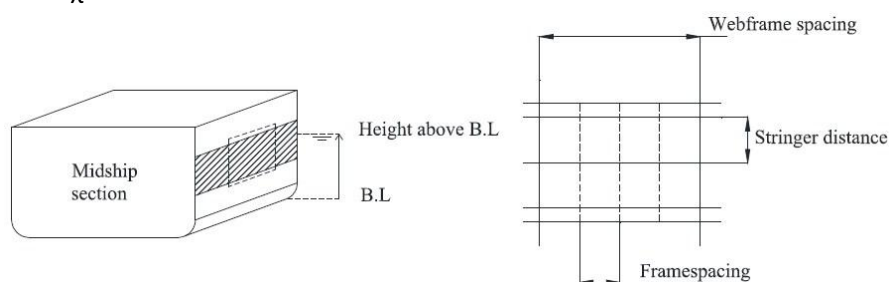
Οι κανονισμοί που διέπουν τις απαιτήσεις της τοπικής αντοχής εφαρμόζονται στα δομικά μέρη της μεταλλικής κατασκευής τα οποία επηρεάζονται έμμεσα ή άμεσα από την πίεση που ασκείται από τον πάγο. Γενικότερα, όλοι οι κανονισμοί προτείνουν παρόμοιες περιοχές ενισχύσεις αλλά με διαφορετικές εξισώσεις και ορισμένες συνοριακές συνθήκες μεταξύ τους. Μία κοινή μέθοδος για το ορισμό και υπολογισμό της τοπικής αντοχής των κανονισμών είναι να υπολογίσει την φόρτιση του πάγου, η οποία θα ασκηθεί. Το φορτίο το οποίο ασκείται ορίζεται από τις εξισώσεις των κανονισμών και εξαρτάται κυρίως από το πάχος του πάγου και της τοπικής δομής της κατασκευής. Όταν υπολογιστεί το φορτίο σχεδίασης, μπορεί να αρχίσει ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών των ελασμάτων, η επιφάνεια διάτμησης και η ροπή αντίστασης, ανάλογα με την μορφή της ενίσχυσης. Τέλος, ανάλογα με τους κανονισμούς που διέπουν την μεταλλική κατασκευή, εισάγονται επιπλέον απαιτήσεις σε διάφορα μέρη της δομής της.

8.6 Τοπικά χαρακτηριστικά της μεταλλικής κατασκευής

Για να πληρούν τις προϋποθέσεις των απαιτήσεων των νηογνυμένων για πλεύση σε παγωμένες θάλασσες, τα πλοία πρέπει να έχουν την ανάλογη ενίσχυση. Το πάχος που απαιτείται εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των προστιθέμενων ενισχυτικών όπως η απόσταση μεταξύ τους και η κατεύθυνση των ενισχυτικών. Αλλάζοντας τις παραπάνω παραμέτρους μπορεί να αλλάξει και το αναγκαίο πάχος της ενίσχυσης.

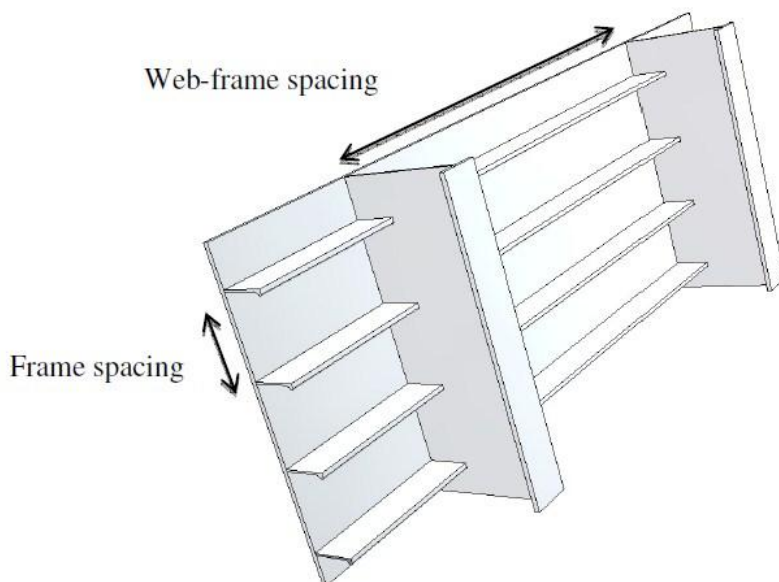
Η κατεύθυνση των ενισχυτικών εξαρτάται, κυρίως, από τις απαιτήσεις της περιοχής που πλέει το σκάφος και το μέγεθός του. Για πλοία σχετικά μεγάλου μήκους συνηθίζεται να χρησιμοποιείται διαμήκης ενίσχυση ενώ για πλοία μικρού μήκους χρησιμοποιείται εγκάρσια ενίσχυση.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μέση τομή με εγκάρσια ενίσχυση στην περιοχή της ζώνης του πάγου, όπως επίσης, φαίνεται η απόσταση μεταξύ ενισχυτικών, κύριων ενισχυτικών και διαμήκων ενισχυτικών.



ΚΕΦ-VIII.11: Δομή πλάγιου τοιχώματος του εγκάρσια ενισχυμένου μέσου τμήματος

Επίσης, στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το εσωτερικό του πλαγίου τοιχώματος όπου παρατηρούνται η κύρια εγκάρσια ενίσχυση και η διαμήκης ενίσχυση με βολβοειδή ενισχυτικά.



ΚΕΦ-VIII.12: Δομή πλάγιου τοιχώματος του διαμήκους ενισχυμένου μέσου τμήματος

Οι περιοχές μεταξύ των κυρίων ενισχυτικών ενισχύονται με την εισαγωγή “περίπλοκων” τομών ενισχυτικών. Γενικά, η απόσταση μεταξύ των ενισχυτικών μειώνεται όσο αυξάνεται η κλάση του παγοθραυστικού με βάση τους κανονισμούς. Αυτή η μείωση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, αφού μπορεί να ανακύψουν προβλήματα τόσο στην κατασκευή όσο και στην επιθεώρηση και συντήρηση της δομής. Η μορφή ενισχυτικών που χρησιμοποιείται είναι συνήθως η βολβοειδής.

Τα χαρακτηριστικά της βολβοειδούς τομής των διαμήκων ενισχυτικών είναι παρόμοια με αυτά της απλής με τη διαφορά ότι δίνει στην δομή της κατασκευής μεγαλύτερη σταθερότητα. Οι κανονισμοί καλύπτουν την σταθερότητα της κατασκευής με συγκεκριμένες απαιτήσεις οι οποίες προέρχονται από σχέσεις, παράδειγμα των οποίων παρατίθεται παρακάτω. Για τις παρακάτω σχέσεις δίνεται ο λόγος του ύψους των κύριων ενισχυτικών h_w προς το αντίστοιχο πάχος t_{wn} ενός οποιουδήποτε κλασικού επίπεδου ενισχυτικού :

$$h_w / t_{wn} \leq 282 / (\sigma_F)^{0,5}$$

Ενώ για βολβοειδή, σχήματος T και γωνιακά ενισχυτικά δίνεται :

$$h_w / t_{wn} \leq 805 / (\sigma_F)^{0,5}$$

Είναι ξεκάθαρο ότι η δεύτερη σχέση παρέχει πολύ μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή τόσο της μορφής της τομής όσο και στο πάχος της τομής, αφού φαίνεται ότι η απλή επίπεδη μορφή θα αστοχήσει νωρίτερα.

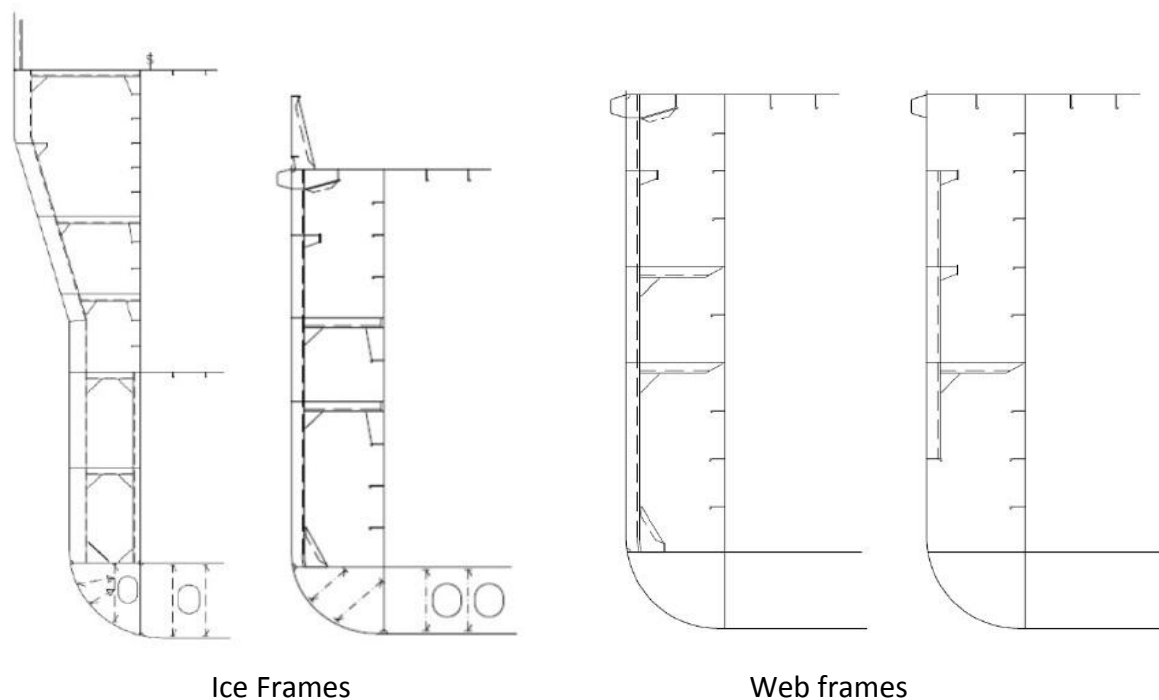
8.7 Συνδέσεις ενισχυτικών

Οι συνδέσεις των ενισχυτικών πρέπει να είναι σε θέση να μεταφέρουν το φορτίο που ασκείται από τα δευτερεύοντα ενισχυτικά, στα πρωτεύοντα δομικά ενισχυτικά. Για παράδειγμα, τα φορτία από τα διαμήκη ενισχυτικά μεταφέρονται στα κύρια εγκάρσια ενισχυτικά με μέγιστη δύναμη:

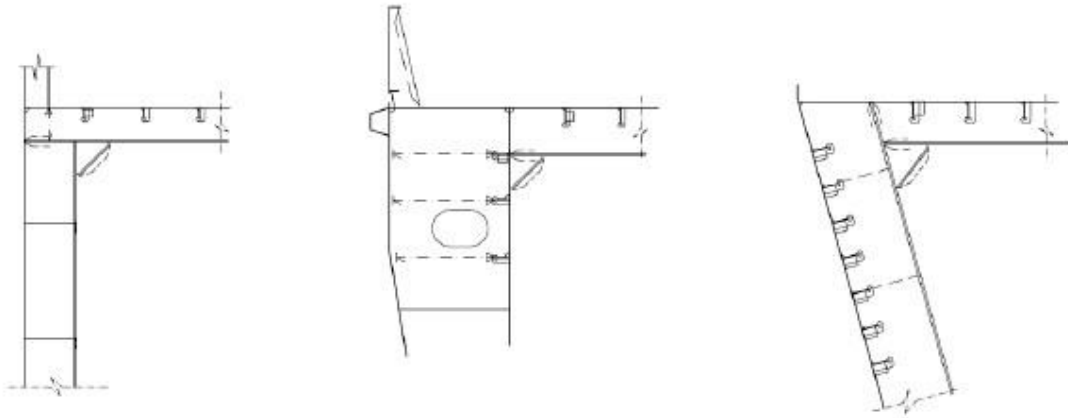
$$F = 1.8 p \cdot h \cdot l$$

Όπου p είναι η πίεση του πάγου, h είναι το ύψος της φόρτισης και l η απόσταση μεταξύ κύριων ενισχυτικών.

Στην παραπάνω εξίσωση υπολογίζεται και ένας συντελεστής ασφαλείας της τάξης του 1,8. Η δύναμη αυτή πρόκειται για την φόρτιση σχεδίασης στην περιοχή των διαμήκων ενισχυτικών τα οποία πρέπει να είναι σε θέση να μεταφέρουν την φόρτιση αυτή. Η σύνδεση των ενισχυτικών μεταξύ τους πρέπει να είναι σε θέση να μεταφέρει τουλάχιστον την φόρτιση αυτή χωρίς να υποστεί πλαστική παραμόρφωση ή λυγισμό. Επίσης η σύνδεση των ενισχυτικών πρέπει να διέπεται από την ίδια προσοχή με την οποία ενισχύεται η κατασκευή, ιδιαίτερα στην περίπτωση που έχουμε μεγάλο ενεργό μήκος διαμήκων ενισχυτικών. Παραδείγματα τέτοιων συνδέσεων παρατίθενται παρακάτω. Όσον αφορά την σύνδεση των δευτερευόντων ενισχυτικών με τα κύρια εγκάρσια ενισχυτικά, το κατάστρωμα κλπ. χρησιμοποιούμε κατάλληλη γεωμετρία που φαίνεται στην εικόνα ΚΕΦ-VIII.14. Η απόσταση της σύνδεσης αυτής από τον σκελετό του πλοίου πρέπει να είναι κοντά στο μηδέν για πλοία υψηλότερης κλάσης πάγου. Αυτό σημαίνει ότι σε πλοία υψηλής κλάσης, τα συνδετικά εξαρτήματα αυτά εφάπτονται τόσο με το κύριο ενισχυτικό όσο και με το ενισχυτικό του ελάσματος.



ΚΕΦ-VIII.13: Παράδειγμα συνδέσεων κύριων και ενδιάμεσων ενισχυτικών



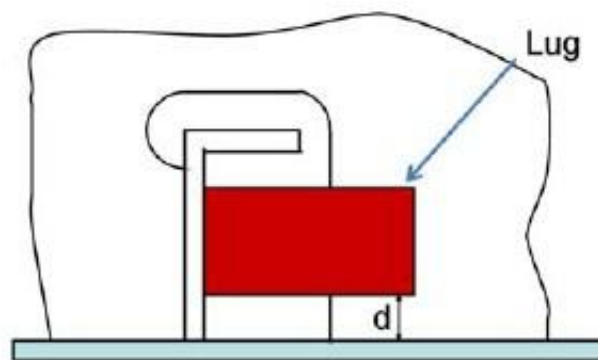
Web frame

Web frame

longitudinal frame



STR



Lug

ΚΕΦ-VIII.14: Παράδειγμα σύνδεσης των ενισχυτικών

8.8 Ανάλυση ενισχυτικών

8.8.1 Απόσταση μεταξύ ενισχυτικών

Συνήθως πλοία με μήκος μεγαλύτερο από 120 μέτρα θεωρούνται μακριά πλοία και είναι σύνηθες να επιλέγουμε την διαμήκη μέθοδο ενίσχυσής του. Ο λόγος της επιλογής αυτής είναι η αύξηση της αντοχής στις έντονες τάσεις λόγω της κάμψης, οι οποίες είναι και οι υψηλότερες τάσεις που απασχολούν την ολική αντοχή του πλοίου. Από την άλλη πλευρά, τα παγοθραυστικά διαφέρουν από τα κοινά πλοία ανοικτής θάλασσας λόγω των υψηλών τάσεων πάγου και για το λόγο αυτό έχουν μικτή μέθοδο ενίσχυσης, αφού βοηθά στην ομοιόμορφη δομική προστασία της κατασκευής στις ευπαθείς ζώνες. Επίσης, η εγκάρσια ενίσχυση χρησιμοποιείται τόσο στα τοιχώματα όσο και στον πυθμένα του πλοίου ενώ τα δευτερεύοντα ενισχυτικά που χρησιμοποιούνται πρέπει να έχουν τουλάχιστον τομή σχήματος T ή γωνίας. Γενικότερα, τα ενισχυτικά σχεδιάζονται έτσι ώστε να τοποθετούνται περιμετρικά της περιοχής της φόρτισης. Αν η περιοχή ενίσχυσης καταπονείται έντονα είναι καλό να επιλέγεται ακόμα υψηλότερα κλάση χάλυβα.

Η απόσταση μεταξύ των εγκάρσιων ενισχυτικών του πλοίου είναι της τάξης των 600 mm με ένα ανά τρία ενισχυτικά να επιλέγεται ενισχυμένο (Web Frame) δίνοντας απόσταση κύριων ενισχυτικών της τάξης των 1800 mm. Αυτή η σχετικά μικρή απόσταση μεταξύ ενισχυτικών χρησιμοποιείται λόγω των υψηλών τάσεων που ασκούνται από παγωμένες επιφάνειες. Η αρχική απόσταση που ορίζουμε για τα διαμήκη ενισχυτικά είναι της τάξης των 600 mm και τα κύρια διαμήκη ενισχυτικά σχεδιάζονται ανά 6 διαμήκη ενισχυτικά που δίνει απόσταση μεταξύ των κύριων διαμήκων ενισχυτικών της τάξης των 3600 mm.

8.8.2 Κύρια ενισχυτικά

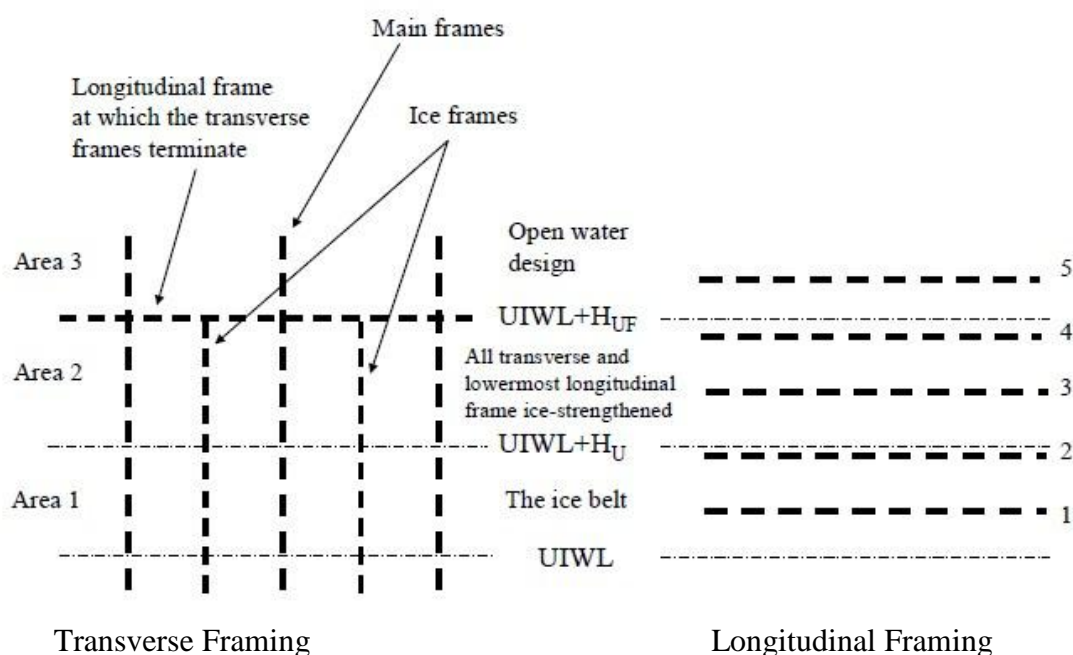
Οι εξισώσεις που διέπουν την σχεδίαση των ενισχυτικών βασίζονται στην κλασική θεωρία της δοκού και για αυτό τον λόγο ακολουθούν κατά βάση την ελαστική θεωρία. Οι απαιτήσεις των ενισχυτικών του Φιλανδικού-Νορβηγικού νηογνώμονα χωρίζονται σε εκείνες για εγκάρσια και διαμήκη ενισχυτικά. Τα ενισχυτικά αυτά μοιράζονται παρόμοιες εξισώσεις σχεδίασης τόσο για την ροπή αντίστασης (Z) όσο και για την επιφάνεια διάτμησης (A), αν και όσον αφορά τα διαμήκη ενισχυτικά, περιλαμβάνονται παράγοντες που βασίζονται στο ύψος της φόρτισης και στην απόσταση μεταξύ των ενισχυτικών. Άλλος παράγοντας ο οποίος είναι κοινός και για τα δύο είδη ενισχυτικών είναι η μεταβλητή m που χαρακτηρίζει τις οριακές συνθήκες στήριξης. Τα επιπλέον διαμήκη ενισχυτικά πάγου (Ice stringers) χωρίζονται ανάμεσα σε ενισχυτικά εντός και εκτός της ζώνης πάγου. Τα επιπλέον αυτά ενισχυτικά διέπονται από τις ίδιες εξισώσεις που περιγράφουν τα κλασικά διαμήκη ενισχυτικά, αν και έχουν διαφορετικούς παράγοντες για διάφορες κατανομές βάρους. Όσον αφορά τα κύρια ενισχυτικά τόσο η ροπή αντίστασης όσο και η διατμητική επιφάνεια υπολογίζονται από τα φορτία τα οποία μεταφέρονται από τα παραπλήσια μέρη της μεταλλικής κατασκευής στα συγκεκριμένα ενισχυτικά.

Από την άλλη, κατά την ανάπτυξη των εξισώσεων σχεδίασης των ενισχυτικών για τις Ενοποιημένες Απαιτήσεις (UR) επιλέγεται η πλαστική θεωρία. Η θεωρία αυτή χρησιμοποιείται και από των ρωσικό και καναδικό νηογνώμονα. Η χρήση της πλαστικής θεωρίας εξασφαλίζει καλύτερη κατανομή του υλικού, μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής και μπορεί να εφαρμοστεί κατά την ανάλυση ατυχήματος. Οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται από τις Ενοποιημένες Απαιτήσεις (UR) προέρχεται από

αναλυτικές μεθόδους που βασίζονται στην ενεργειακή-πλαστική θεωρία. Αυτός ο τύπος ανάλυσης θεωρεί μικρές μετατοπίσεις ενώ αγνοεί τα φαινόμενα ενδοτράχυνσης. Από σχεδιαστικής απόψεως, τα ενισχυτικά που σχεδιάζονται σύμφωνα με τις Ενοποιημένες Απαιτήσεις (UR) χωρίζονται μεταξύ εγκάρσιων, διαμήκων, κύριων ενισχυτικών και διαμήκων ενισχυτικών που φέρουν φορτίο λόγω παγωμένης επιφάνειας. Τόσο τα εγκάρσια όσο και τα διαμήκη ενισχυτικά διαστασιολογούνται με στόχο η συνδυαζόμενη διατμητική και καμπτική φόρτιση να μην υπερβαίνει το πλαστικό όριο αντοχής του δομικού μέρους. Οι διαφορές των επιμέρους δομικών μερών βασίζονται στους διαφορετικούς παράγοντες που επηρεάζουν την επιφάνεια για κάθε περίπτωση φόρτισης. Επίσης, παρατηρούνται διαφορές στον συνδυασμό των δομικών μερών κατά το σχεδιασμό, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Τα κύρια ενισχυτικά και τα διαμήκη ενισχυτικά που φέρουν φόρτιση λόγω πάγου διαστασιολογούνται για να φέρουν ταυτόχρονα διατμητικές και καμπτικές φορτίσεις ενώ τα κλασικά εγκάρσια και διαμήκη ενισχυτικά σχεδιάζονται το καθένα ξεχωριστά. Τέλος, για κάθε δομικό στοιχείο προβλέπεται ένας συγκεκριμένος λόγος ύψους-πάχους για την αποφυγή, κυρίως, φαινομένων λυγισμού, ενώ όταν αυτό δεν είναι δυνατό χρησιμοποιούνται υλικά αυξημένης αντοχής.

8.8.3 Εγκάρσια επέκταση των ενισχυτικών

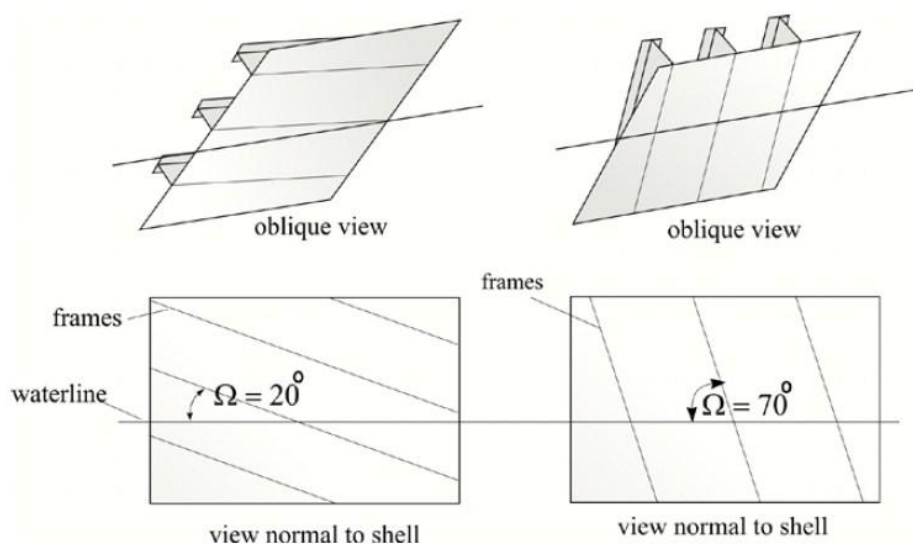
Κατά την ενίσχυση της γάστρας θεωρούμε ότι μόνο η ζώνη πάγου (Ice belt) του πλοίου έρχεται σε επαφή με τον πάγο αφού στην περιοχή αυτή να ασκούνται άμεσα οι υψηλές τάσεις από την επαφή με τον πάγο. Για τον λόγο αυτό, η εγκάρσια επέκταση των διαμήκων ενισχυτικών πρέπει να φτάνει έως και το επόμενο διάμηκες ενισχυτικό από το ανώτατο ύψος της ζώνης πάγου. Επίσης, η απόσταση μεταξύ των διαμήκων ενισχυτικών πάνω και κάτω από την ζώνη ενίσχυσης πρέπει να είναι ίδια με εκείνη μέσα στην περιοχή της ζώνης. Αν, όμως, το πρώτο ενισχυτικό πάνω από την ζώνη πάγου είναι πιο κοντά από το μισό της αποστάσεις των ενισχυτικών στην ζώνη, τότε σχεδιάζουμε το επόμενο ενισχυτικό πάνω από την ζώνη με απόσταση από την άκρη της ζώνης μίας απόστασης ενισχυτικών.



ΚΕΦ-VIII.15: Τοποθέτηση των ενισχύσεων σύμφωνα με τους κανονισμούς

8.8.4 Μη συμμετρική ή διαγώνια ενίσχυση

Υπάρχει η περίπτωση για ανάγκη σχεδίασης υποστηρικτικών ενισχυτικών, τα οποία δεν θα διέπονται από τον κοινό τρόπο κατασκευής αλλά θα έχουν ασύμμετρη ή επικλινή κατεύθυνση. Για λόγους σχεδίασης, η κλίση των ενισχυτικών καθώς και ο συνδυασμός τόσο της κλίσης όσο και της ασυμμετρίας των ενισχυτικών ως προς τον κύριο άξονα του πλαισίου που στηρίζει την γάστρα πρέπει να εξετάζονται ξεχωριστά. Επίσης, αν είτε η κλίση του ενισχυτικού ή ο κύριος άξονας ενίσχυσης (χωρίς το έλασμα) παρεκκλίνει πάνω από 15° από τον άξονα του ελάσματος, πρέπει να ενισχύεται κατά της αστοχίας της εσωτερικής επιφάνειας του πλοίου. Προφανώς, σε περίπτωση άλλων ορίων από τους κανονισμούς ακολουθούνται οι γενικές οδηγίες των νηογνωμών.



ΚΕΦ-VIII.16: Διαγώνια ενίσχυση

8.8.5 Σχεδιασμός των δευτερευόντων ενισχυτικών

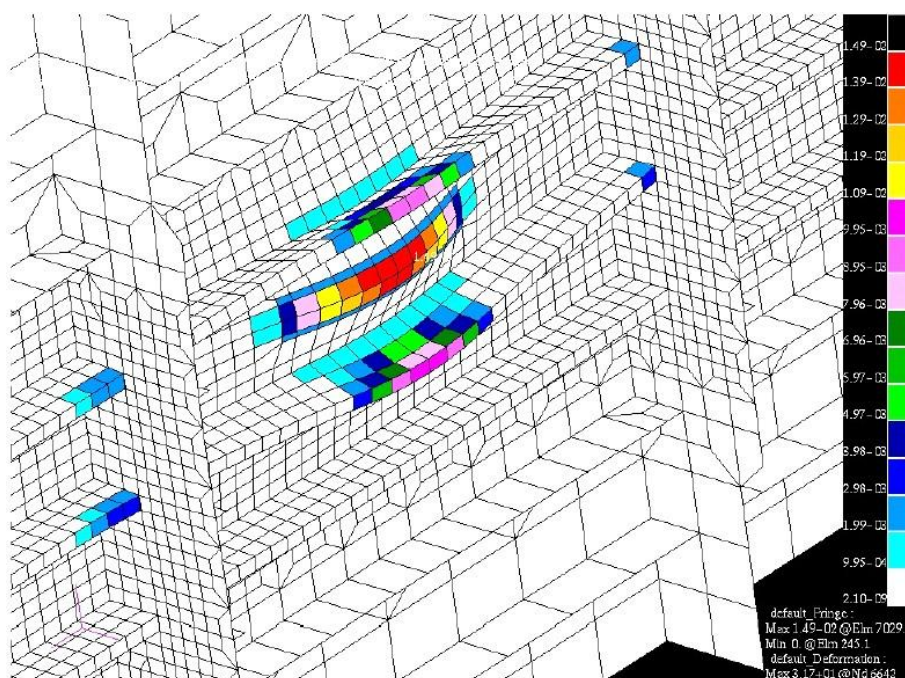
Τα υποστηρικτικά ενισχυτικά μέρη της μεταλλικής κατασκευής στα διπλά τοιχώματα και τις πλάγιες δεξαμενές, τα οποία στηρίζουν τα ελάσματα και τα κύρια διαμήκη ενισχυτικά, μεταφέρουν τα φορτία στα κύρια ενισχυτικά μέρη. Τα ενισχυτικά μέρη αυτά δεν πρέπει να υποβάλλονται σε λυγισμό σε περίπτωση εμφάνισης έντονων τοπικών φορτίσεων, πράγμα το οποίο, αν και προφανές, δεν αναφέρεται ξεκάθαρα στους κανονισμούς των νηογνωμών.

Οι κανονισμοί αναφέρονται σε κάποιο βαθμό στα χαρακτηριστικά των ενισχυτικών αυτών, χωρίς όμως εκτεταμένη ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρεται και στους κανονισμούς του FSICR : “ το πάχος του κορμού των εγκάρσιων και διαμήκων ενισχυτικών δεν χρειάζεται να ξεπερνά το μισό πάχος των ελασμάτων, για απόσταση ενισχυτικών ίση με 0,45 m, θεωρώντας τάση διαρροής για το έλασμα ίδια με του ενισχυτικού.”

Γενικότερα, κατά την ανάλυση της αντοχής των υποστηρικτικών ενισχυτικών, η κανονισμοί δεν αναφέρονται στο φαινόμενο του λυγισμού καθώς και στο επαρκές πάχος με το οποίο πρέπει να σχεδιάζεται για να αποφεύγεται η αστοχία τόσο στα διαμήκη όσο και στα εγκάρσια δευτερεύοντα ενισχυτικά. Για παράδειγμα, στους κανονισμούς του FSICR

αναφέρεται ότι το απαιτούμενο πάχος των δευτερευόντων ενισχυτικών πρέπει να είναι μικρότερο ακόμα και από τα τυπικά, μη ενισχυμένα πλοία πράγμα το οποίο φανερώνει την έλλειψη επαρκών απαιτήσεων. Άρα, είναι αναγκαίο οι κανονισμοί πάνω στο κομμάτι αυτό να αναθεωρηθούν αφού πρώτα μελετηθούν εμπειρικά τα αποτελέσματα του λυγισμού στα Αρκτικά πλοία.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι να υπολογιστεί η αντοχή των δευτερευόντων ενισχυτικών κάτω από φορτία πάγου. Όπως συνηθίζεται, η αντοχή των δευτερευόντων ενισχυτικών μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μεθόδους ανάλυσης τόσο της αντοχής σε λυγισμό όσο και της αντοχής σε διαρροή, σύμφωνα με τους μοντέρνους τρόπους σχεδίασης της μεταλλικής κατασκευής. Ειδικότερα, οι προαναφερόμενοι μέθοδοι ανάλυσης βασίζονται σε οριακές συνθήκες απλής έδρασης, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να αγνοείται η αλληλεπίδραση των δευτερευόντων ενισχυτικών με τα άλλα μέρη της μεταλλικής κατασκευής (όπως τα πλάγια τοιχώματα και τα κύρια ενισχυτικά). Μία αποδοτικότερη εναλλακτική μέθοδος είναι η εισαγωγή ενός μεγαλύτερου μέρους των ενισχυτικών στην ανάλυση βάση των πεπερασμένων στοιχείων (όπως χρησιμοποιείται από τον ABS). Με την μέθοδο αυτή αναλύεται πιο ρεαλιστικά η δομική αντίδραση της μεταλλικής κατασκευής στα φορτία του πάγου, ενώ υπολογίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια η αντοχή τόσο στον λυγισμό όσο και στην διαρροή. Τέλος, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι η καταλληλότερη για την εύρεση της ελαστικής αντοχής λυγισμού και της οριακής αντοχής, αφού λαμβάνει υπόψη της την μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού και της γεωμετρίας του.



ΚΕΦ-VIII.17: Διάταξη πλάγιων διαμήκων ενισχυτικών και οι ασκούμενες τάσεις όπως απεικονίζεται με βάση την FEM.

Βιβλιογραφία

- *Recent Advances in Structural Design of Ice-Strengthened Vessels*, GR Wang, Shewen Liu, Kaj Riksa, 2006.
- *Guideline for the Construction of Fixed Offshore Installations in Ice Infested Waters*, Germanischer Lloyd, 2005.
- *Arctic Technology, International Ship and Offshore Structures Congress*, 2012.
- *Ice-Induced Loads on Ship Hulls*, Herman Holm, 2012.
- *Ice Load Prediction Formulas for Icebreaking Cargo Vessels*, Kyungsik Choi, Seong-Yeob Jeong and Jong-Ho Nam.
- *Using Nonlinear Finite Element Method to Design Ship Structures for Ice Loads*, Ge Wang, Christopher J. Wiernicki, 2004.
- *DESIGN OF ICE BREAKING SHIPS*, Kaj Riksa.
- *Rationalizing the Design of Ice Strengthened Side Structures*, G. Wang, R. Basu, D. Chavda and S. Liu, 2005.
- *GUIDELINES FOR THE APPLICATION OF THE FINNISH-SWEDISH ICE CLASS RULES*, Swedish Transport Agency.
- *MEASUREMENT OF ICE LOAD EXERTED ON THE HULL OF ICEBREAKER*, Takimoto, T. Uto, S. Oka. S. Murakami, C. Izumiyama, 2006.

Κεφάλαιο 9ο: Παραδείγματα μεταλλικής κατασκευής αρκτικών πλοίων

9.1 Μεταλλική κατασκευή των αρκτικών πετρελαιοειδών πλοίων

Παρακάτω θα περιγράψουμε την μέθοδο με την οποία σχεδιάζονται τα πλοία μεταφοράς πετρελαιοειδών (Tankers) γύρω από την ζώνη ενίσχυσης (Ice belt), μαζί με τα αποτελέσματα των μεθόδων αυτών.

Η μέθοδος σχεδίασης της ζώνης ενίσχυσης, στα ήδη υπάρχοντα πλοία μεταφοράς πετρελαιοειδών, χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- Στην επιλογή του τύπου της ζώνης ενίσχυσης, ως “υβριδικού (hybrid)” ή “εξελιγμένου (evolved)” μοντέλου σχεδίασης της ζώνης.
- Στην διαστασιολόγηση των ενισχυτικών της ζώνης ενίσχυσης, όπου ο σχεδιαστής προσπαθεί να εφαρμόσει, όσο είναι δυνατόν, τις ελάχιστες απαιτήσεις των κανονισμών τόσο στα δευτερεύοντα όσο και στα πρωτεύοντα ενισχυτικά.

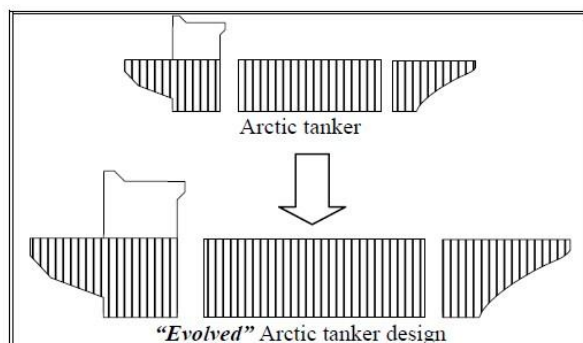
9.1.1 Σχεδίαση μέσου τμήματος

Οι δύο κατηγορίες σχεδιασμού που έχουν χρησιμοποιηθεί στο μέσο τμήμα της ζώνης ενίσχυσης είναι η “υβριδική” και η “εξελιγμένη”. Τα ονόματα τα οποία χρησιμοποιούνται παραπάνω ορίζουν την επιλογή του σχεδιαστή σχετικά με το σχεδιασμό του μέσου τμήματος και χρησιμοποιούνται έναντι των κλασικών ορισμών ‘διαμήκους’ και ‘εγκάρσιας’ σχεδίασης. Αυτό βοηθά στην επαρκέστερη ανάλυση του είδους ενίσχυσης της ζώνης πάγου.

Σχεδίαση του μέσου τμήματος του ‘εξελιγμένου’ τύπου πλοίου

Η ζώνη ενίσχυσης του “εξελιγμένου” τύπου έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Χρησιμοποιείται εγκάρσια ενίσχυση της ζώνης με ice frames και ενδιάμεσα ice frames με υποστηρικτικά διαμήκη ενισχυτικά (stringers).
- Για μεγάλου εκτοπίσματος Αρκτικά πλοία η δομική τους διαμόρφωση στηρίζεται στην σχεδίαση μικρότερων πλοίων.



ΚΕΦ-ΙΧ.1: Μέθοδος σχεδίασης “εξελιγμένου” τύπου

Το κύριο πλεονέκτημα του “εξελιγμένου” τύπου είναι η σχεδίαση με βάση την εγκάρσια ενίσχυση της ζώνης (με ice frames), κυρίως στο μέρος του φορτίου. Τα εμπειρικά δεδομένα

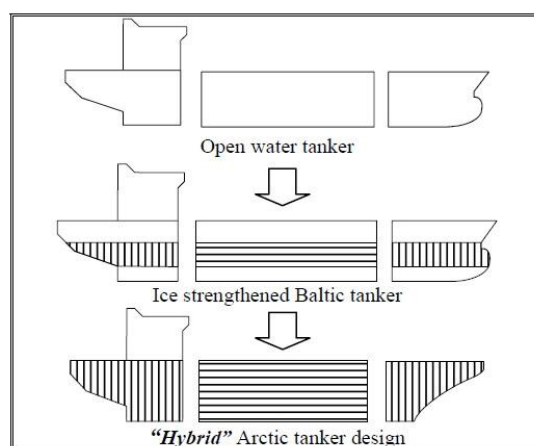
έχουν δείξει ότι ο τρόπος αυτός σχεδίασης παρέχει επαρκή αντοχή στην μεταλλική κατασκευή.

Από την άλλη, το κύριο μειονέκτημα του τύπου σχεδίασης αυτού είναι το σαφώς μεγαλύτερο κόστος κατασκευής της ζώνης ενίσχυσης, ειδικά για μεγάλα Αρκτικά πετρελαιοφόρα.

Σχεδίαση του μέσου τμήματος του 'υβριδικού' τύπου πλοίου

Η ζώνη ενίσχυσης του "υβριδικού" τύπου έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Διαμήκης μέθοδος ενίσχυσης στην περιοχή της ζώνης πάγου με ενδιάμεσα κύρια εγκάρσια ενισχυτικά (web frames).
- Σχεδίαση των ενισχυμένων περιοχών της πλώρης και της πρύμνης ανάλογα με τις απαιτήσεις.
- Η δομική σχεδίαση του μέσου τμήματος βασίζεται στα πλοία ανοικτής θάλασσας ίδιου εκτοπίσματος και γεωμετρικών χαρακτηριστικών με ενίσχυση έναντι των φορτίων πάγου.



ΚΕΦ-ΙΧ.2: Μέθοδος σχεδίασης "υβριδικού" τύπου

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου σχεδίασης αυτής είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής, ειδικά για μεγαλύτερα πλοία.

Από την άλλη, η αποτελεσματικότητα της σχεδίασης αυτής από την πλευρά της αντοχής αμφισβητείται, αφού δεν έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε παγοθραυστικά με αποτέλεσμα να λείπουν εμπειρικά δεδομένα.

9.1.2 Σύγκριση σχεδίασης των ζωνών ενίσχυσης του μέσου τμήματος

Παρακάτω παρατίθεται μία σύγκριση της δομής της μεταλλικής κατασκευής, στην περιοχή της ζώνης ενίσχυσης, των δύο διαφορετικών τύπων πετρελαιοφόρων, τα οποία έχουν κατασκευαστεί πρόσφατα και έχουν παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Επίσης, παρακάτω δίνεται και η μέση τομή ενός πετρελαιοφόρου ανοικτής θάλασσας ως σύγκριση με τους δύο τύπους Αρκτικών πετρελαιοφόρων.

Παρακάτω αναγράφονται τα κύρια χαρακτηριστικά των δύο τύπων πλοίου:

- **“Υβριδικός”** τύπος ζώνης πάγου– έχει παρόμοια μορφή με τη σχεδίαση των πλοίων ανοικτής θάλασσας με τη διαφορά ότι εισάγονται ενδιάμεσα εγκάρσια ενισχυτικά τα οποία μειώνουν το ενεργό μήκος των διαμήκων ενισχυτικών των τοιχωμάτων της ζώνης.
- **“Εξελιγμένος”** τύπος ζώνης πάγου – παρατηρείται μία αύξηση του πλάτους της ζώνης ενίσχυσης, κυρίως σε μικρότερα παγοθραυστικά, με την εισαγωγή επιπλέον διαμήκων ενισχυτικών στο κατάστρωμα και κύριων διαμήκων ενισχυτικών τα οποία μειώνουν το ενεργό μήκος των κύριων και ενδιάμεσων εγκάρσιων ενισχυτικών.

Τόσο η “εξελιγμένη” όσο και η “υβριδική” μέθοδος σχεδίασης για τα δύο πετρελαιοφόρα του παραδείγματος έχουν διαστασιοποιηθεί με βάση τις ελάχιστες απαιτήσεις ενίσχυσης σύμφωνα με τον Ρωσικό νηογνώμονα κατηγορίας Arc6.

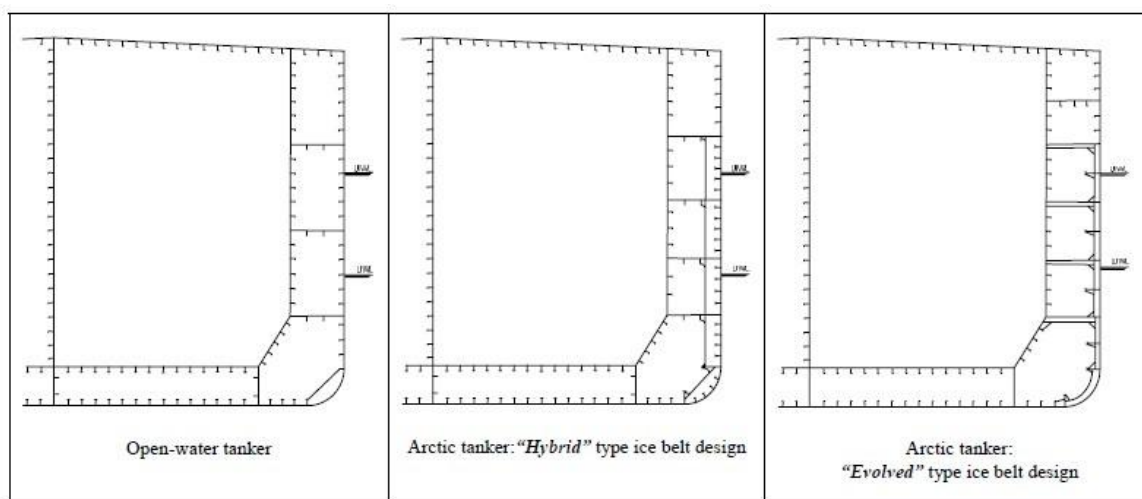
Ice belt type		Evolved	Hybrid
General Particulars			
Principal Particulars	L bp, m	235.7	234.7
	B moulded, m	34.0	34.0
	D moulded, m	20.8	21.0
	T scantling, m	13.8	14.0
Deadweight, tonnes		~70,000	~70,000
Cargo volume (98%), m ³		~82,600	~85,300
Date of build		2010	2008
Power (<i>Azipods</i>)		17.0MW	20.0MW
Bow form		Icebreaking	Icebreaking
RS Ice Category		Arc6 (formerly LU6)	Arc6 (formerly LU6)
Propulsion		Twin Azipod	Twin Azipod
Ice Belt Scantlings and Arrangements			
Framing system		Transverse	Longitudinal
Frame spacing		800mm	600mm
Frame type		Bulb angle	T-section
Intermediate frame		Frame	Web
Intermediate frame spacing		400mm	2000mm
Intermediate frame type		Bulb angle	T-section
Web spacing		3200mm	4000mm
Double side width		3100mm	2600mm
Number of stringer decks		5	4
Number of ice stringers		5	0

ΚΕΦ-ΙΧ.3: Πίνακας χαρακτηριστικών των δύο τύπων Αρκτικών πετρελαιοφόρων

9.1.3 Σύγκριση βάρους της μεταλλικής κατασκευής των δύο τύπων της ζώνης σχεδίασης

Η σύγκριση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής, στην περιοχή της ζώνης πάγου, των δύο μεθόδων σχεδίασης (τοιχώματα και κύρια ενισχυτικά, διαμήκη ενισχυτικά, ενδιάμεσα ενισχυτικά) για το μέσο τμήμα του πλοίου φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Η σύγκριση αυτή γίνεται ώστε να αντιληφθούμε αν η διαφορά στο βάρος της μεταλλικής κατασκευής συμβαδίζει με τα χαρακτηριστικά μίας από τις δύο μεθόδους.

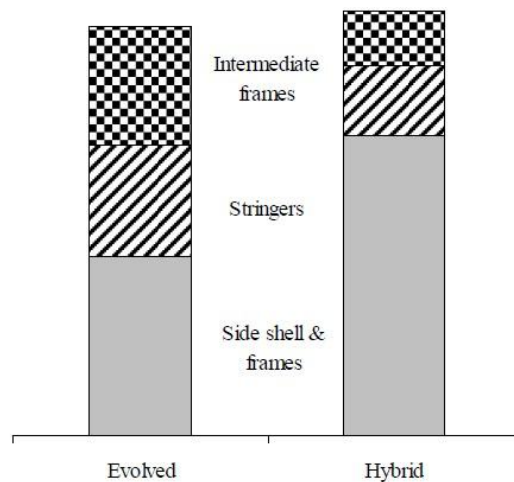
Το βάρος των διαμήκων φρακτών, του κύριου καταστρώματος και του διπυθμένου δεν λήφθηκαν υπόψη στην σύγκριση αυτή, αφού η διαστασιολόγηση των μερών αυτών δεν εξαρτάται άμεσα από τους κανονισμούς που διέπουν την ζώνη πάγου. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής έδειξαν, μεταξύ των άλλων, ότι το βάρος της διαμήκου ενισχυμένης μεταλλικής κατασκευής του "υβριδικού" τύπου είναι συγκρίσιμο με εκείνο της εγκάρσιας ενίσχυσης του "εξελιγμένου" τύπου.



ΚΕΦ-ΙΧ.4: Μέσες τομές πετρελαιοφόρων ανάλογα με τον τύπο τους

Η παρακάτω εικόνα δείχνει το ποσοστιαίο βάρος του καθενός από τα παρακάτω τρία δομικά μέρη για τον "υβριδικό" και "εξελιγμένο" τύπο:

- Πλευρικά τοιχώματα και κύρια ενισχυτικά
- Διαμήκη ενισχυτικά (Stringers)
- Ενδιάμεσα ενισχυτικά (Ice frames)



ΚΕΦ-ΙΧ.5: Κατανομή του βάρους της μεταλλικής κατασκευής στα δομικά της μέρη

Επίσης, περαιτέρω ανάλυση δείχνει ότι υπάρχουν διαφορές στην διανομή του βάρους της μεταλλικής κατασκευής, οι οποίες έχουν να κάνουν με την εισαγωγή ενός πεπλατυσμένου διπλού τοιχώματος με μειωμένη απόσταση κύριων ενισχυτικών για τον “εξελιγμένο” τύπο πετρελαιοφόρου.

Τέλος, δεχόμενοι τις διαφορές στην διανομή του βάρους και στη μορφή της ενίσχυσης, είναι δυνατόν να επιτύχουμε παρόμοιο βάρος μεταλλικής κατασκευής. Από την άλλη, είναι αδύνατον να διαχειριστούμε τη δομική σχεδίαση τόσο του “εξελιγμένου” όσο και του “υβριδικού” τύπου πλοίου ώστε να εξισώσουμε τα κόστη κατασκευής τους.

9.1.4 Διαστασιολόγηση των ενισχυτικών της ζώνης πάγου

Τα αρκτικά πετρελαιοφόρα, στην ζώνη ενίσχυσης, διαστασιολογούνται όπως παρακάτω:

- **Τοπικά ή δευτερεύοντα μέρη της κατασκευής** σύμφωνα με τις ελάχιστες απαιτήσεις των κανονισμών
- **Πρωτεύοντα ενισχυτικά** είτε σύμφωνα με τις ελάχιστες απαιτήσεις ή, αν δεν περιλαμβάνονται στους κανονισμούς, με επί τόπου υπολογισμό.

Για τοπικά και δευτερεύοντα δομικά μέρη της περιοχής ενίσχυσης χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι σχεδιασμού που αναφέρονται παρακάτω.

Διαστασιολόγηση του εξωτερικού τοιχώματος και των ενισχυτικών της ζώνης

Σε αυτήν την περίπτωση, η αρχική διαστασιολόγηση των τοπικών ενισχυτικών των τοιχωμάτων για τα Αρκτικά πετρελαιοφόρα ορίζεται με βάση τις ελάχιστες απαιτήσεις του αντίστοιχου κανονισμού και τις αντίστοιχες κατηγορίες στην οποία ανήκει το πλοίο. Το δεύτερο βήμα του σχεδιασμού είναι η σύγκριση της σχεδίασης των ενισχυτικών με τις ανάλογες απαιτήσεις των κανονισμών για πλοία ανοικτής θάλασσας.

Ο τρόπος αυτός σχεδίασης έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως σε πετρελαιοφόρα πλοία “εξελιγμένου” τύπου.

Υπολογισμός του εξωτερικού τοιχώματος και των ενισχυτικών της ζώνης

Σε αυτήν την περίπτωση, η αρχική διαστασιολόγηση των τοπικών ενισχυτικών των τοιχωμάτων για τα Αρκτικά πετρελαιοφόρα ορίζεται με βάση τις ελάχιστες απαιτήσεις των κανονισμών για πετρελαιοφόρα ανοικτής θάλασσας. Στη συνέχεια, η τοπική ενίσχυση αυτή συγκρίνεται με τις απαιτήσεις των κανονισμών για πλεύση σε παγωμένες θάλασσες και όπου χρειάζεται εισάγονται οι ελάχιστες απαιτήσεις ενίσχυσης ώστε η σχεδίαση να συμμορφώνεται με τους αντίστοιχους κανονισμούς.

Ο τρόπος αυτός σχεδίασης έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως σε πετρελαιοφόρα πλοία “υβριδικού” τύπου.

9.2 Μεταλλική κατασκευή πλοίων υγροποιημένου φυσικού αερίου

9.2.1 Συστήματα μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου

Το υγρό φυσικό αέριο (LNG) έχει διάφορα χαρακτηριστικά που καθιστούν την μεταφορά και αποθήκευσή του απαιτητική, χρησιμοποιώντας ειδικές δεξαμενές για την διαχείρισή του. Κύρια προβλήματα αποτελούν, η θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει μέχρι τους -160 °C και το μικρό ειδικό βάρος του που κυμαίνεται από 0,45-0,50 σε ατμοσφαιρική πίεση.

Στις μέρες μας, η χρήση των ανεξάρτητων σφαιρικών δεξαμενών (Moss system) και δεξαμενών μεμβράνης είναι οι πιο διαδεδομένοι μέθοδοι μεταφοράς LNG λόγω της οικονομικής απόδοσης και της αξιοπιστίας τους. Τα πλοία μεταφοράς LNG είναι εγγενώς διαφορετικά από τα άλλα εμπορικά πλοία, διότι η κάθε δεξαμενή τους αποτελεί ένα ξεχωριστό σύστημα που δρα απολύτως ξεχωριστά από τα άλλα χωρίς καμία αλληλεπίδραση.

9.2.2 Χαρακτηριστικά και διαφορές σφαιρικών δεξαμενών και δεξαμενών μεμβράνης

Τα χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου αποθήκευσης και μεταφοράς αναλύονται παρακάτω.

9.2.2.1 Σύστημα ανεξάρτητης σφαιρικής δεξαμενής (Moss system)

Το σύστημα ανεξάρτητης σφαιρικής δεξαμενής σχεδιάζεται με τέτοιον τρόπο, ώστε το σφαιρικό κομμάτι της δεξαμενής να στηρίζεται στην γάστρα μόνο από ένα μία κυλινδρική υποστηρικτική κατασκευή το λεγόμενο skirt. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο εισάγεται στη σφαιρική κατασκευή αυτή.

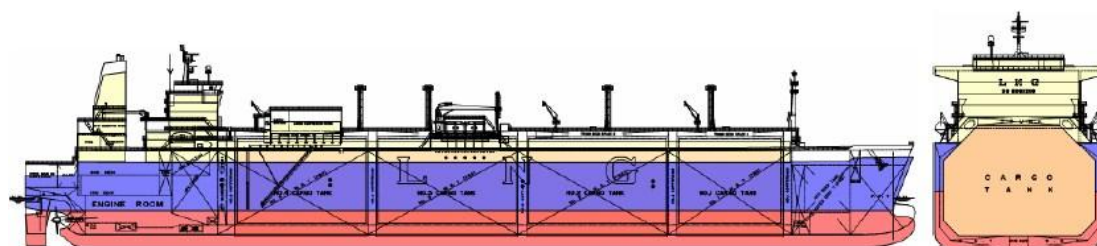
9.2.2.2 Σύστημα δεξαμενής με μεμβράνη

Το σύστημα μεμβράνης σχεδιάζεται, τοποθετώντας ένα θερμομονωτικό υλικό στην γάστρα του πλοίου και καλύπτοντας το με μία μεταλλική μεμβράνη. Ο σκοπός της μεμβράνης είναι να συγκρατεί συμπιεσμένο το υγροποιημένο φυσικό αέριο και να αποτρέπει διαρροές. Το φορτίο του συμπιεσμένου υγρού ασκείται άμεσα από την θερμομονωτική επίστρωση στην γάστρα του πλοίου. Εισάγοντας στη σχεδίαση το σύστημα μεμβράνης δημιουργείται επίπεδο κατάστρωμα με αρκετά μικρότερο μέγεθος καταστρώματος συγκρινόμενο με το σύστημα ανεξάρτητων δεξαμενών.

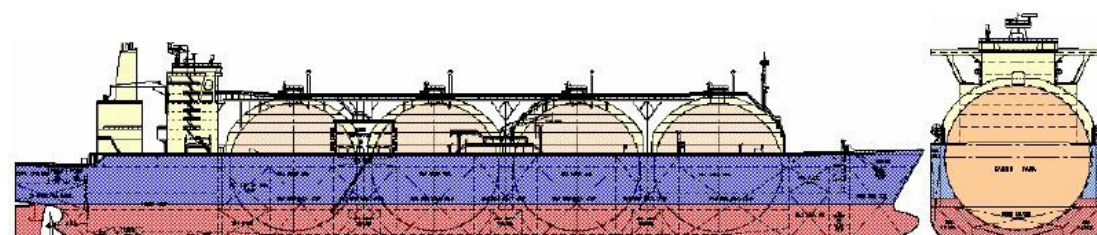
9.2.3 Σχεδιασμός πλοίων μεταφοράς LNG στην Αρκτική

9.2.3.1 Γενική διάταξη και μέση τομή

Η γενική διάταξη των δύο διαφορετικών τύπων πλοίων φαίνονται στο παρακάτω σχέδιο. Ο όγκος του τύπου μεμβράνης είναι 150,000 κυβικά μέτρα και του σφαιρικού τύπου είναι 140,000 κυβικά μέτρα, με συνολικά 4 δεξαμενές. Επίσης, η ζώνη ενίσχυσης (ή αλλιώς η ζώνη πάγου) σχεδιάζεται με βάση τις απαιτήσεις των κανονισμών PC 7 και Ice 1A. Γενικά, τόσο η φόρτιση λόγω πάγου όσο και οι φορτίσεις του έρματος και του φορτίου λόγω των αδρανειακών δυνάμεων είναι σαφώς αυξημένες.



ΚΕΦ-ΙΧ.6: Τύπου μεμβράνης



ΚΕΦ-ΙΧ.7: Σφαιρικού τύπου

Πίνακας βασικών διαστάσεων των πλοίων LNG που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση:

Item	Ship type	Membrane type (MarkIII)	Spherical type
Cargo Volume		150,000 CBM	140,000 CBM
Length O.A.		288.0 m	288.7 m
Length B.P.		275.0 m	274.0 m
Breadth		44.2 m	48.0 m
Depth		26.0 m	26.5 m
Draught (design) (scant.)		11.35 m (12.35 m)	11.15 m (12.30 m)

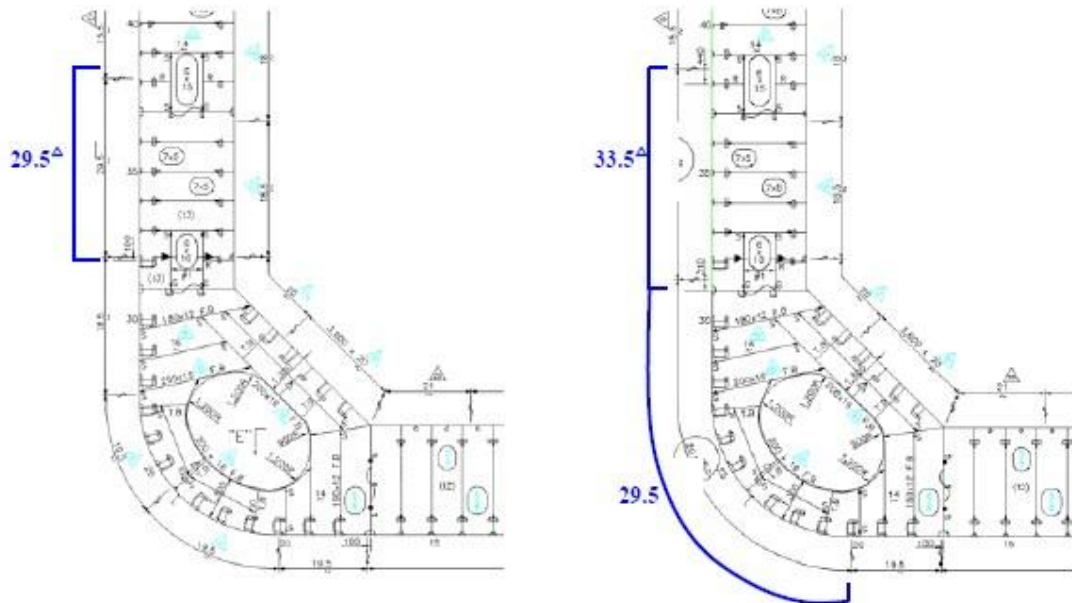
9.2.4 Σύγκριση των ενισχύσεων μεταξύ των κανονισμών PC7 και Ice 1A

Οι υπολογισμοί για τα πλοία LNG υπολογίστηκαν για απαιτήσεις κανονισμών Ice 1A και PC7 αντίστοιχα. Οι διαφορές των ενισχύσεων της γάστρας για πλοία τύπου μεμβράνης και σφαιρικού τύπου και των προαναφερόμενων κανονισμών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι ενισχύσεις οι οποίες βασίζονται στην κλάση IACS PC7 είναι υψηλότερες εκτός από εκείνες του πυθμένα της πλώρης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η ενισχυμένη περιοχή των ελασμάτων της γάστρας και των διαμήκων ενισχυτικών με βάση την κλάση PC7 περιλαμβάνει όλο το κομμάτι της ζώνης ενίσχυσης της πλώρης και το μέσο και κατώτερο κομμάτι του μέσου τμήματος όπως επίσης το κατώτερο κομμάτι της πλώρης. Συνοψίζοντας, το ολικό βάρος της μεταλλικής κατασκευής η οποία ενισχύεται με βάση την κλάση PC7 είναι 4-6% μεγαλύτερο από εκείνο της κλάσης Ice 1A. Τέλος, επειδή οι τρέχοντες κανονισμοί χρησιμοποιούν παρόμοιους παράγοντες για την ενίσχυση διάφορων περιοχών της γάστρας, είναι σίγουρο ότι θα υπάρξουν σημεία υπερβολικής ενίσχυσης.

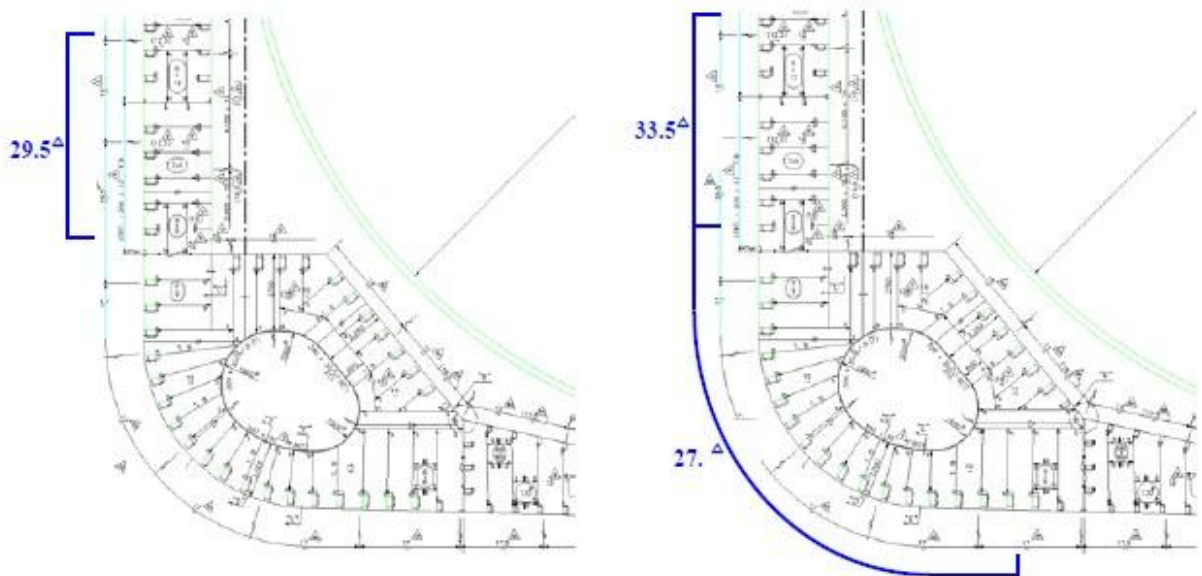
Πίνακας των ενισχυτικών μερών πλοίων τύπου μεμβράνης και σφαιρικού τύπου για απαιτήσεις των κανονισμών Baltic Ice 1A και Polar PC7 :

LNG type and region		Grade	Scantling	
			ICE 1A (Baltic)	PC7 (Polar)
Membrane tank type	Forward region (No.1 hold, Sp.=660mm)	Shell plate	39.0 ^{HT32}	36.5 ^{HT32}
		Longitudinals	425x20 ^{HT32} +125x18 ^{HT32} F.B(T)	500x35 ^{HT32} F.B
	Midbody region (No.3 hold)	Shell plate	29.5 ^{HT32}	33.5 ^{HT32}
		Longitudinals	425x12+125x18 F.B(T)	450x20 + 125x18 F.B(T)
	Aft region	Shell plate	26.0 ^{HT32}	30.0 ^{HT32}
		Longitudinals	350x100x12/17 I.A	400x18 + 125x16 F.B(T)
	Bow bottom (Sp.=660mm)	Shell plate	-	36.5 ^{HT32}
		Longitudinals	-	500x35 HT32 F.B
	Bow intermediate lower	Shell plate	-	41.0
		Longitudinals	-	500x20 + 125x17 F.B(T)
	Bow intermediate bottom	Shell plate	-	30.0
	Midbody lower	Shell plate	-	29.5
Stem lower	Shell plate	-	29.5	
Spherical tank type	Forward region	Shell plate	36.5 ^{HT32}	34.5 ^{HT32}
		Longitudinals	425x17 ^{HT32} + 125x14 ^{HT32} F.B(T)	625x20 ^{HT32} + 100x12 ^{HT32} F.B(T)
	Midbody region	Shell plate	29.5 ^{HT32}	33.5 ^{HT32}
		Longitudinals	425x13 + 150x18 F.B(T)	700x20 + 125x20 F.B(T)
	Aft region	Shell plate	26.0 ^{HT32}	30.5 ^{HT32}
		Longitudinals	350x100x12/17 I.A	400x18 + 125x14 F.B(T)
	Bow bottom	Shell plate	-	34.5 ^{HT32}
		Longitudinals	-	625x20 ^{HT32} + 100x12 ^{HT32} F.B(T)
	Bow intermediate lower	Shell plate	-	35.5 ^{HT32}
		Longitudinals	-	400x16 ^{HT32} + 100x13 ^{HT32} F.B(T)
	Bow intermediate bottom	Shell plate	-	25.5 ^{HT32}
	Midbody lower	Shell plate	-	27.0 ^{HT32}
Stem lower	Shell plate	-	29.5	

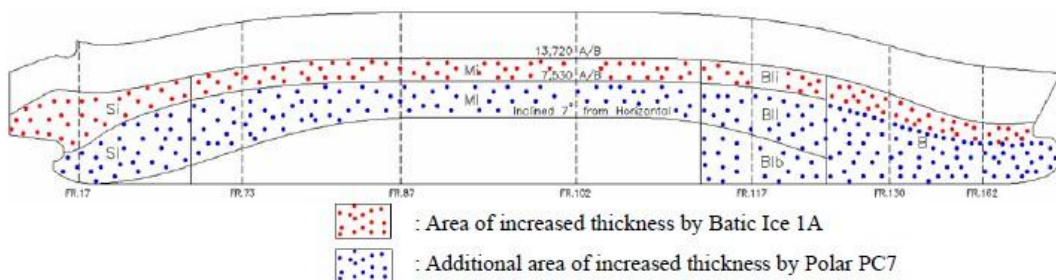
Παρακάτω φαίνεται η διαφορά της ενίσχυσης μεταξύ των κλάσεων Ice 1A και PC7 για τον τύπο μεμβράνης και τον σφαιρικό τύπο.



ΚΕΦ-ΙΧ.8: 1A Ice class / Τύπος μεμβράνης και PC 7 Ice class / Τύπος μεμβράνης



ΚΕΦ-ΙΧ.9: 1A Ice class / Σφαιρικού τύπου και PC 7 Ice class / Σφαιρικού τύπου

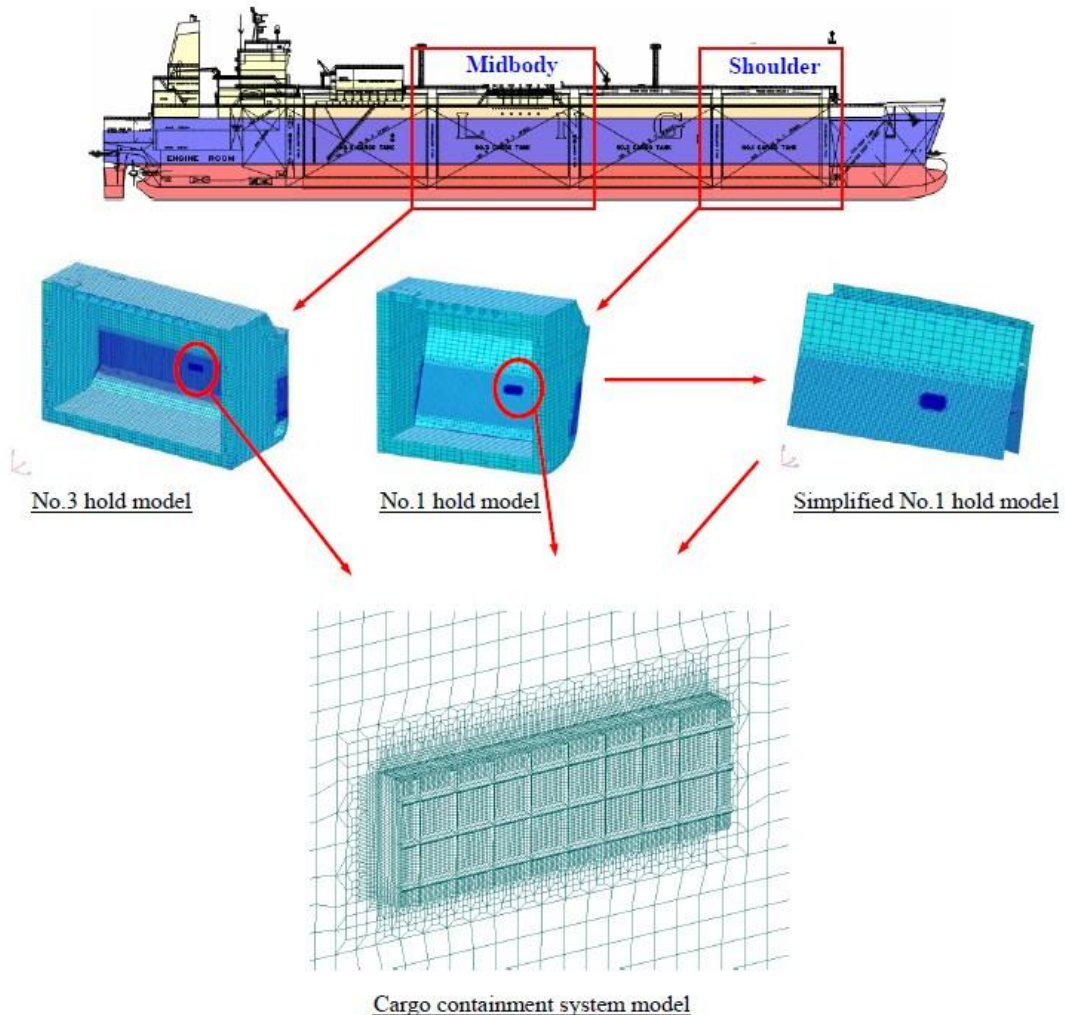


ΚΕΦ-ΙΧ.10: Ζώνες ενίσχυσης με βάση την κλάση Ice 1A και την κλάση PC7

9.2.4 Σχεδιασμός αρκτικών πλοίων μεταφοράς LNG

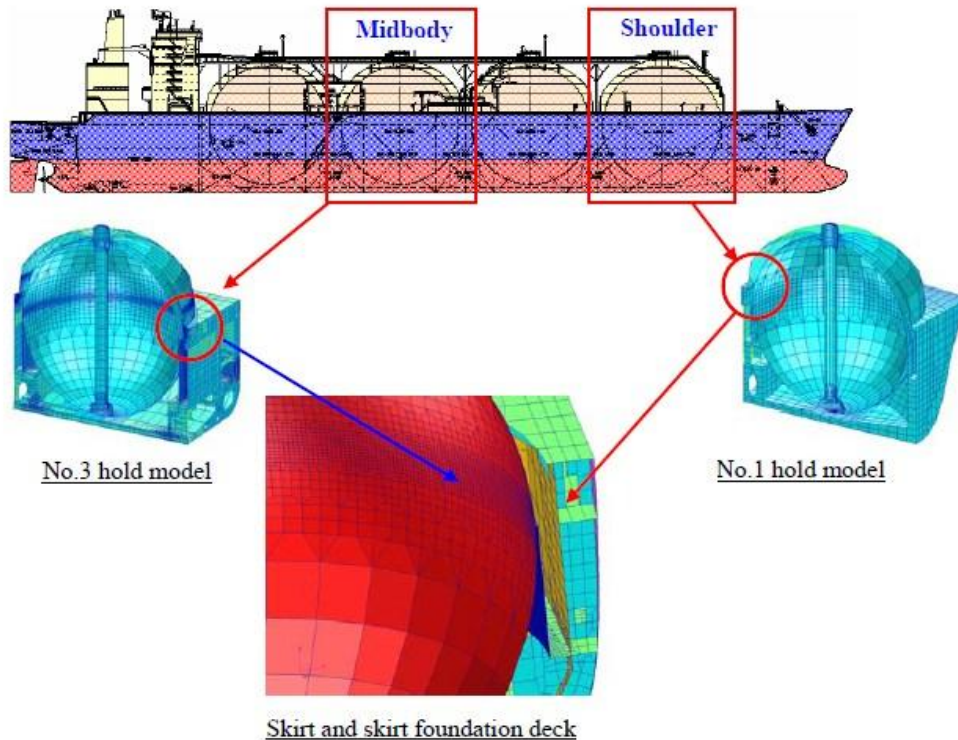
Στα αρκτικά πλοία μεταφοράς υγροποιημένου αερίου, η μελέτη αντοχής είναι πολυπλοκότερη από ότι στα πετρελαιοφόρα, αφού πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι φορτίσεις λόγω του φορτίου του. Ιδιαίτερα στα πλοία σφαιρικού τύπου η σχεδίαση της εγκάρσιας τομής της γάστρας αλλάζει λόγω της ιδιόμορφης σφαιρικής γεωμετρίας του χώρου του φορτίου. Το πρώτο βήμα στην κατασκευή της γάστρας είναι, όπως και σε κάθε άλλη περίπτωση αρκτικού πλοίου, η αύξηση του πάχους του κορμού όπως επίσης και της φλάντζας των τόσο των εγκάρσιων όσο και των διαμήκων ενισχυτικών. Για την εύρεση των φορτίσεων που ασκούνται στο μέσο τμήμα του πλοίου αλλά και στους ώμους, περιοχές που δέχονται αυξημένη φόρτιση, χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για φορτίσεις σε συγκεκριμένη επιφάνεια.

Παρακάτω παρουσιάζονται σε εικόνες, τόσο για τα πλοία τύπου μεμβράνης όσο και για του σφαιρικού τύπου, οι περιοχές της γάστρας που μας ενδιαφέρουν όπως επίσης και η κλασική θέση επιβολής του φορτίου (**ΚΕΦ-ΙΧ.11, ΚΕΦ-ΙΧ.12**).



ΚΕΦ-ΙΧ.11: FE model for membrane tank type LNG carrier

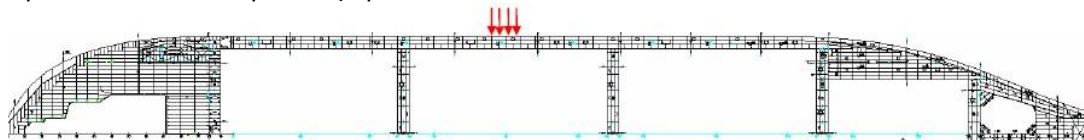
Δεδομένου ότι η γάστρα είναι κατασκευασμένη από χάλυβα θεωρούμε ότι συμπεριφέρεται ελαστικά-τέλεια πλαστικά για τα πλοία σφαιρικού τύπου ενώ για τα πλοία τύπου μεμβράνης θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και τα υλικά της μεμβράνης τα οποία συμπεριφέρεται με ιστροπική ελαστικότητα ή ορθοτροπική ελαστικότητα.



ΚΕΦ-ΙΧ.12: FE model for spherical tank LNG carrier

Παρακάτω παρατίθενται τα σημεία της γάστρας στα οποία ασκείται η φόρτιση λόγω πάγου. Για κάθε από τις δύο περιπτώσεις, πλοίου τύπου μεμβράνης και σφαιρικού τύπου, δίνονται οι αντίστοιχες κατόψεις για το μέσο τμήμα και τους ώμους της γάστρας όπως επίσης και οι όψεις των εγκάρσιων τομών για τις ίδιες περιοχές.

Τέλος, δίνονται τρία παραδείγματα των περιπτώσεων φόρτισης της μεταλλικής κατασκευής τα οποία προέρχονται από την υδροστατική πίεση, την φόρτιση λόγω του πάγου και του πεπιεσμένου φορτίου.

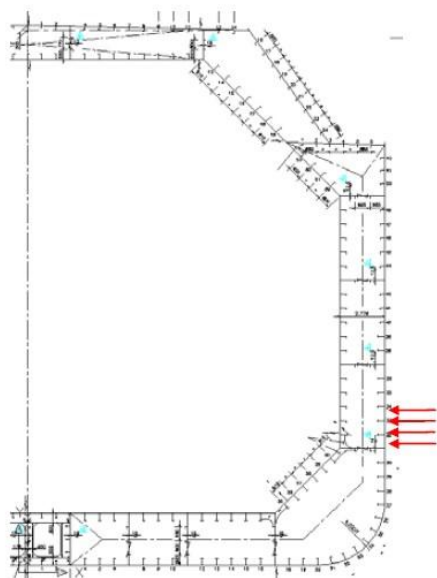


(a) Τύπου μεμβράνης

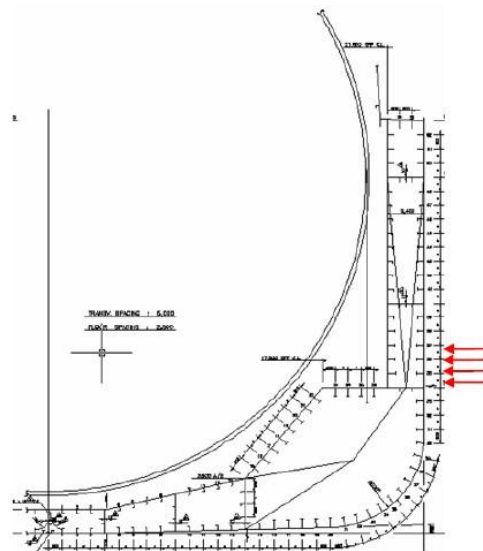


(b) Σφαιρικού τύπου

ΚΕΦ-ΙΧ.13: Κλασική θέση φόρτισης λόγω πάγου στο μέσο τμήμα κατά το διάμηκες



(a) Τύπου μεμβράνης

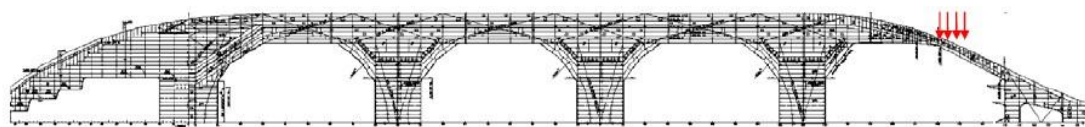


(b) Σφαιρικού τύπου

ΚΕΦ-ΙΧ.14: Κλασική θέση φόρτισης λόγω πάγου στο μέσο τμήμα κατά το εγκάρσιο

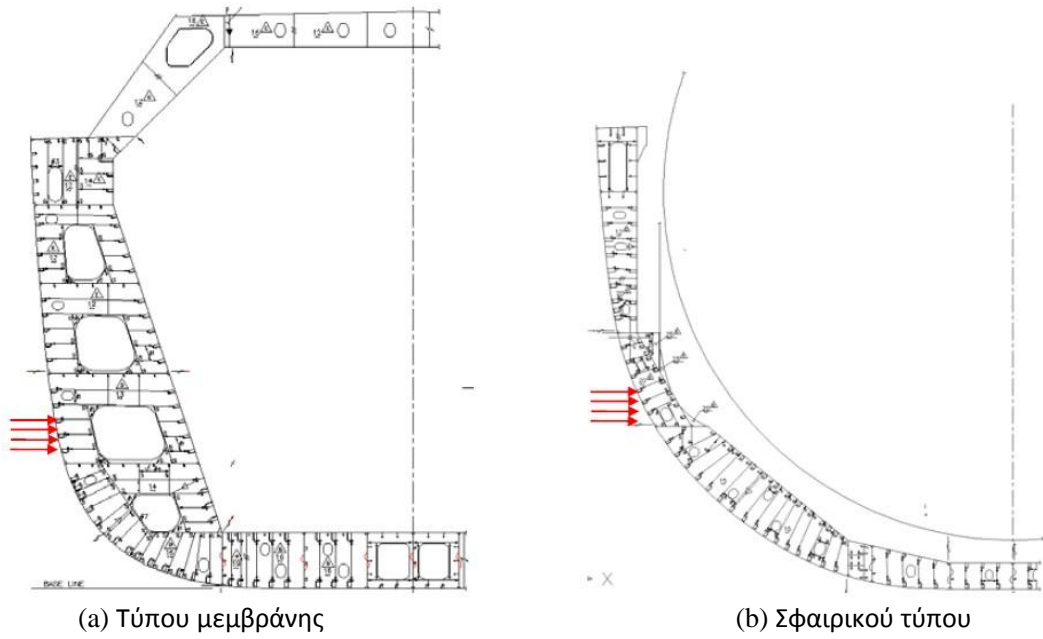


(a) Τύπου μεμβράνης



(b) Σφαιρικού τύπου

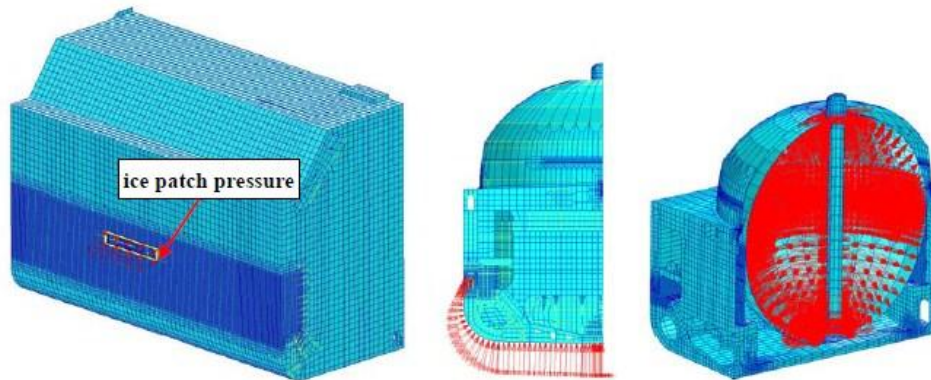
ΚΕΦ-ΙΧ.15: Κλασική θέση φόρτισης λόγω πάγου στους ώμους



(a) Τύπου μεμβράνης

(b) Σφαιρικού τύπου

ΚΕΦ-ΙΧ.16: Κλασική θέση φόρτισης λόγω πάγου κατά το εγκάρσιο

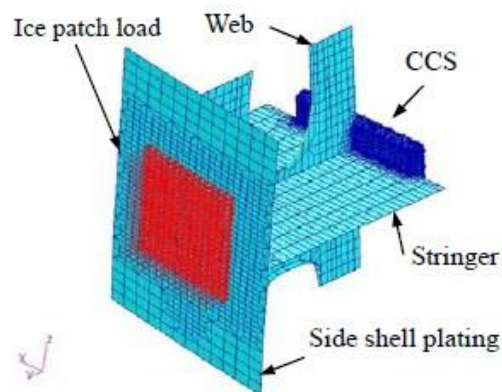


(a) Φόρτιση λόγω πάγου

(b) Πίεση του θαλ. νερού

(c) Πίεση του φορτίου

ΚΕΦ-ΙΧ.17: Κύριες φορτίσεις στο πλοίο



ΚΕΦ-ΙΧ.18: Φορτίο στον σκελετό της μεταλλική κατασκευής

Βιβλιογραφία

- *TECHNICAL CHALLENGES ASSOCIATED WITH ARCTIC LNG DEVELOPMENTS: A CLASS SOCIETY APPROACH*, Philippe Cambos, Alexey Dudal, Diane Ruf.
- *Structural Integrity Assessment of Cargo Containment Systems in Arctic LNG Carriers under Ice Loads*, Forth Annual Arctic Shipping, 2008
- *DESIGN OF THE EVOLUTIONARY LNG CARRIER “SAYAENDO”*, Koichi Sato, Henry Chung.
- *Features of the Latest LNG Carriers Sailing into Low-Temperature Environments*, Sai Hiramatsu, Koichi Sato, Masaru Oka, Kenji Tsumura, 2007.
- *Features of the Latest LNG Carriers Sailing into Low- Temperature Environments*,
- *Arctic tankers: current and future structural design practice*, Robert Tustin, Mikko Nimmi, Erkki Ranki.
- *Structural Design Criteria for Ice Capable Tankers*, Shashank Karve, Costas P. Manoudakis, 1984.

Επίλογος/Συμπεράσματα

Αν και η κατασκευή των παγοθραυστικών πλοίων έχει εξελιχθεί εντόνως τα τελευταία 20 χρόνια, αναπτύσσοντας νέες σχεδιάσεις και μεθόδους κατασκευής η χρήση των πλοίων αυτών είναι ακόμα περιορισμένη αφού ακόμα υπάρχει δυσπιστία γύρω από το εγχείρημα της Αρκτικής.

Πέραν της δυσπιστίας αυτής, παρατηρούνται και σημαντικές διαφορές στην εφαρμογή των κανονισμών οι οποίες εξαρτώνται, κυρίως, στο είδος της θεωρία στην οποία στηρίζεται η ανάλυση της μεταλλικής δομής. Το γεγονός ότι ένα παγοθραυστικό μπορεί να μελετηθεί και σχεδιαστεί τόσο με την ελαστική όσο και με την πλαστική θεωρία δημιουργεί ασυμβατότητες, που μόνον ο κώδικας Ενοποιημένων Απαιτήσεων (UR) προσπαθεί να διορθώσει. Αυτή η διαφοροποίηση των κανονισμών ενεργεί αρνητικά στην εξέλιξη και βελτιστοποίηση της μελέτης και σχεδίασης, αφού οι προσπάθειες των νηογνωμόνων δεν συγκεντρώνονται προς έναν κοινό τρόπο σχεδίασης, γεγονός το οποίο θα ευνοούσε την εξέλιξη των παγοθραυστικών πλοίων, υβριδικών και μη.

Παρ' όλα τα παραπάνω, το ενδιαφέρον για την Αρκτική συνεχίζει να αυξάνεται με την κατασκευή νέων πλοίων, κυρίως μεταφοράς πετρελαιοειδών και υγροποιημένου φυσικού αερίου ενώ πλοία όπως μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και μεταφοράς φορτίων χύδην δεν βρίσκουν μεγάλη χρησιμότητα στην περιοχή της Αρκτικής λόγω απουσίας εμπορικών σταθμών.

Τέλος, από όσα παρουσιάστηκαν στην παραπάνω διπλωματική φαίνεται ότι το επίπεδο της σχεδίαση των παγοθραυστικών δεν έχει φτάσει ακόμα σε εκείνο των κλασικών πλοίων ανοικτής θάλασσας και περιορίζεται κατά κύριο λόγο στην αύξηση της πυκνότητας του πάχους και της ποιότητας των δομικών μερών, πράγμα το οποίο περιορίζει ακόμα και σήμερα τις δυνατότητές τους.

Παράρτημα Α : Βασικά χαρακτηριστικά παγοθραυστικών

Όνομα	LOA (m)	LBP (m)	Bmax (m)	Depth (m)	GROSS (t)	DISPL (t)	DWT (t)	PWR (KW)
Akademic Fedorov	141,2	128,6	23,5	13,3	13000	10000	7600	16500
Akademic Nalivkin	81,85	73,5	14,83	7,5	2833		1313	3090
Akademic Sergei Vavilov	117,1	110,5	18,2	10	6231	6600	2275	2570
Aleksandr Dovzhenko	100,54	91,08	14,36	6,8	2718	5469	3370	2130
Aleksandr Kaverznev	129,65	126,76	19,04	8,75	5712		8661	4260
Alexandr Fadeev	129,4	118,19	19,24	10,43	6478	11640	6283	4490
Alexey Kosygin	262,85	232,81	32,2	18,31	37464	62038	40880	27200
Almaz	58,55	51,62	12,68	6,02	1074		440	1900
Almirante Irizar	119,3		25			14900		14350
Anatoliy Kolesnichenko	173,5	164,9	24,54	15,2	18574	31200	19550	15400
Anna Akhmatova	88	78	17,2	7,4	4575			3200
Anna Karenina	145,19	131,27	25,51	13,29	14213		2830	19124
Aranda		59	13,8	6,7	1734	1800		3000
Arctic	220,85	206,2	22,9	15,2	20117	38466	28400	10800
Arctic Tuktu		48,67	11,58	4,57	719			2350
Arktika	148	136	30	17,2	18172	23460	4096	55100
Atle	104,6	96	23,8	12,1	6844	9500		18380
Aurora Austrelis	94,9	88,4	20,3	13,25	6574		3500	10000
Balkhash	72,15	65,4	11,32	5	1124	2257	1367	735
Baltic Press	135,85	128,35	16,79	10,9	1366		4450	2647
Belomorsk Les	123,88	115	16,7	8,45	4519	9220	5726	4010
Canmar Explorer		109,19	30,48	8,71	6041	12445	6419	22016
Canmar Kigiriak	91	78,9	19,31	10,04	3642	8550	2066	12800
Discoverer 534	162,69	148,14	24,49	9,75	12011	20562	7286	16047
Discovery		74,93	12,8	5,79	2038			
Dmitriy Ovtsyn	66,83	60	11,92	6,02	1134		639	1618
Dmitry Donskoi	162,1	154,88	22,92	13,5	13567	27340	19885	8240
Drogobych (Ocean A/B)	116,08	106	16,3	7,83	4198		5780	2574
Dunker		30	10	5,3				2680
Emsstern	1244	110	17,7	10,6	6262		10650	3600
Fastov	121,82	113,44	17,61	9,91	5583		7810	3972
Fennica	116		26	12,5			4800	21000
Finnfellow	137,37	126,4	24,69	17,35	8304		4995	10300
Finnfighter	159,16	151,62	21,42	12,63				7280
Finnmerchant	155	146,01	25,15	16,92				13200
Frontier Spirit	111,5	98	17,25	11,9	6752			4860
Geraki	72,5	65	13,64	7,19	1655			

Όνομα	LOA (m)	LBP (m)	Bmax (m)	Depth (m)	GROSS (t)	DISPL (t)	DWT (t)	PWR (KW)
Henry Larsen	100,03	87,95	19,82		6166	8290	2478	17760
Highland Sentinel		60,39	12,8	5,8	929			5176
IgarkaLes	102,3	93,28	14	7,04	2730	5542	3629	2130
Igor Grabar	97,32	90,08	16,24	7,7	3184	6535	4054	2830
Igor Ilyinski	132,7	122	19,86	8,8	7120	11754	8256	5100
Ikaluk	78,95	70	17,22	9,71	3256	5107	1900	11000
Ilyich	128,02	115,8	22	13,52	12281			13240
Ivan Papanin	167	147,2	22,6	13,5	14184	21000	10500	29400
Jaguar	92,79	80,4	15,63	7,7	2781			
James Clark Ross	99,04	90	18,89	9,8	5732	7400	2917	6650
Kapitan Belousov	83,17	77,12	19,41	9,5	3710	5350		8827
Kapitan Chechkin		76,5	16,6			2240	3300	
Kapitan Gavrillov	203,06	192,73	25,46	15,9	21584	25050	16030	15660
Kapitan Goncharov	131,6	122	19,3	8,8	6395	11170	7000	4690
Kapitan Gotskii	133	118,4	18,8	11,6	7684	13840	8723	5300
Kapitan Lus	98,2	89,4	17,6	7,8			4670	3360
Kapitan M. Izmailov	56,5	52,2	16	6		2050		3940
Kapitan Panfilov	146,1	134,4	20,59	12,89	10145	20165	14632	4930
Kapitan Sakharov	130	119	17,3	8,5	4827	17150	570	4930
Kapitan Sorokin	141,4	130,2	30,5	12,3	10609	17270		18100
Kapitan Yevdikimov	76,5	71,2	16,6	4,6		2150		4809
Komandor	88,3	82,2	13,6	6,6	2800			56704
Kosmonavt Pavel Beliayev	123,15	113	16,74	10,8	5473		2460	3825
KotlasLes	102,1	93	14	6,85	2924	5335	3480	2130
Krymsk	104,5	94,5	14,36	7,1	3019	6000	3860	2130
Krystall	152,7	142	22	13,6	12380	16600	9400	7600
LadogaLes	102,34	93,02	14,03	6,89	2866	5356	3796	2133
Lena	130,2	117,3	19,25	10,62	5753	12600	7986	6200
Lenin	134	124	27,6	16,1		19240		32360
Libby G		117	18,8	10,2	5267	11565	7766	4530
Louis S. St. Laurent	112	101,86	24,38	13,1	10906	13300	4714	17900
Lunni	164,5	154	22,26	12	11290		16000	11500
Marinor	112,2	104,66	18	9,5	4950		7500	4050
Mariya Yermolova	100	90	16,24	7	3941		1465	38821
Mary Christina	87,9	84,9	12,3	7,7	2561	4536		1850
Mekhanik Yartsev	85,2	79,4	14,5	6	2489		2636	2074
Mikhail Kalinin	122,15	109,99	16,03	7,62	5243		1358	6106
Mikhail Somov	133,13		18,85		7696		8220	
Mikhail Strelalovski	162,1	154,88	22,92	13,5	13950	27340	19252	8240
Mirnyy	102,27	93,02	14,03	6,89	2920		3930	2133
Moskva	122,1	112,4	24,5	14	9427	15400	6147	19120
Mudyug	88,6	78,5	21,2	10,5	5342	7250	1909	9560

Όνομα	LOA (m)	LBP (m)	Bmax (m)	Depth (m)	GROSS (t)	DISPL (t)	DWT (t)	PWR (KW)
Nathaniel B. Palmer	94,05	85,27	18,29	9,45	6174		2500	9900
Nikolay Novikov	150,08	139,86	20,98	11,6	10185	19730	13955	7060
Nikopol	83,42	74	12,02	5,31	1630	2920	1660	1470
Norilsk	174	164	24,5	15,2	16500	31200	20000	15400
Norse Mersey	178,7	166,47	24,54	17,35	20914		14800	8200
Novaya Ladoga	121,95	112,01	16,74	8,31	4676		6460	3825
Novy Donbass	100,6	90	13,9	8,1	2354	5125	2990	1840
Oden	107,8	93,2	31,08	12	9438	13	4906	18000
Otso	99	90	24,2	11,3	6000	13000	2000	21840
Otto Schmidt	112	73	19,8	8,31	2828	370	1095	3975
Pandora II	55,76	53,32	13,75	5,03	1378			3824
Partizansk	97,35	90,1	14,23	6,5	2968	4855	2833	2870
Pavlin Vinogradov	131,6	122	19,3	8,8	6395	11249	7850	4690
Petrozavodsk	121,95	112,78	16,74	8,31	4562		6540	3825
Pire Radisson	96,2	88	19,5	10,8	5910	8315	2865	13010
Pioner	105,69	96	15,63	8	3601	7240	4668	2390
Pioner Moskvyy	129,95	119,03	17,33	8,54	4814	10010	6780	4490
Polar Circle	91	82,5	17,9	9,3	5129		2200	6000
Polar Duke	66,8	58,2	13,1	9,5	1649	1400		3300
Polar Star	121,6	107,3	15,5	13,2		13190	44700	13235
Polarstern	118	102,2	25	13,6	10878	15000	4374	14700
Posiet	103	93,4	17	9,65	4295	7121	3657	7502
Povenets	105,85	96	14,6	8	3725	6681	4150	2390
Professor Goryunov	110,1	101	20,4	9,1	9096		5400	7156
Rheinstern	161,36	153	23	11,7			17000	6800
Samotlor	160	148	23,04	12,9	13204	24570	17200	8538
Seapower		60,39	12,8	5,9	919			5176
Sergei Kirov	156,6	142	23,8	16,9	6789	21260	12010	8700
Sestretsk	130,3	119	17,35	8,5	4786	9826	6010	4046
SevMorPut	260,3	228,8	32,2	18,3	38226	61880	33960	29410
Shiraze	134	127	28	14,5		18600		
Shuhle Geteborg	87,5	82,5	13	5			2050	2370
SibirLes	104,4	94,5	14,37	7,12	3179	6000	4140	2130
Sosnovets	80,19	71,2	11,94	5,6	1531	2835	1635	1100
Sovetskaya Yakutiya	123,5	117	15,04	6,5	3590	6142	4000	1472
Sovetskii Voin	82	74,21	12,53	6,02	1684		2485	1839
Spartak	77,81	69,74	11,5	5,6	1505	2550	1469	1100
Stakhanovets Kotov	139,5	121	20,25	12,6	4026	11149	5710	4810
Striotiviyi	69,75	60,84	18,01	9,02	2635		1300	5590
SuhonaLes	100,84	93,91	14,43	7,14	3036		3340	1471
Svetlomor-1	61,02	51,8	14	6	1695		1000	
Taimyr	150	140,6	29,2	15,2	20791	19600	3581	36800
Tebo Olimpia	140,8	132,8	21,23	10,7	8825		11474	5560

Όνομα	LOA (m)	LBP (m)	Bmax (m)	Depth (m)	GROSS (t)	DISPL (t)	DWT (t)	PWR (KW)
Temriuk	83,55	74	12,04	5,34	1611		1660	1471
Terry Fox	88	75	17,94	10	4233	6910	2113	17060
Thuleland	185,9	177	26,5	15,05	22157		31400	11200
Trans Dania	113,6	106,4	17,75	11	5167		5353	3000
Uglegorsk	97,8	90,22	17,3	7	3936		4168	3360
Uikku	164,47	151,54	22,26	12,02	11290		16500	12000
Valentin Shasin	149,4	136,8	24	12,6	11285	16810	7245	12800
Vanino	113,01	105,24	18,53	8,51	5154	8596	6237	3960
Vasilii Pronchushev	67,7	62,2	18,1	8,3		3100		3960
Ventspils	113	105,33	18,32	8,5	5154	9400	6297	4350
Viiralaid	80,2	70,8	12,89	8,32	964	2726	1455	1553
Vitalii Diakonov	124,24	116,96	16,4	7,5	4643	8140	5031	2200
Vitus Bering	159,8	142,4	22,4	12	13514	20350	10650	11460
Vohilad	49,7		12,8	4,8	820			1420
VolgoLes	123,9	115	16,7	8,45	4638	9220	5895	3310
Weserstern	110	104,6	17,7	10,6	5480		9025	3600
World Discoverer		72,7	15,2	6,25	3153	3080	720	3529
Yasnyi	81,16	71,46	16,3	7,22	2737		1329	
Yermak	135	130	26	16,7	12231	20240	7560	30420

Παράρτημα Β : Κανονισμοί DNV και IACS

Οι τρεις κατηγορίες είναι:

1. Ice Strengthening for the Northern Baltic Pt.5 Ch.1 Sec. 3
2. Vessels for Arctic and Ice Breaking Service Pt.5 Ch.1 Sec. 4
3. Polar Class Pt.5 Ch.1 Sec. 8

DNV Ice class notation	Equivalent Finnish-Swedish Ice Class
ICE-1A*	1A Super
ICE-1A	1A
ICE-1B	1B
ICE-1C	1C

Πίνακας Β.1: Σχέση μεταξύ κλάσεων DNV και Finnish-Swedish.

Τα πλοία υψηλής ταχύτητας τα οποία ικανοποιούν την κλάση ICE-1A* μπορούν να λάβουν την κλάση ICE-1A*F με την κάλυψη έξτρα προαπαιτήσεων.

DNV Ice class notation	Ice Conditions	Ice Thickness h_0	Ice Thickness h
ICE-1A*	Extreme	1	0.35
ICE-1A	Severe	0.8	0.30
ICE-1B	Medium	0.6	0.25
ICE-1C	Light	0.4	0.22

Πίνακας Β.2: Ενίσχυση πλοίου για πάγο στη βόρεια Βαλτική

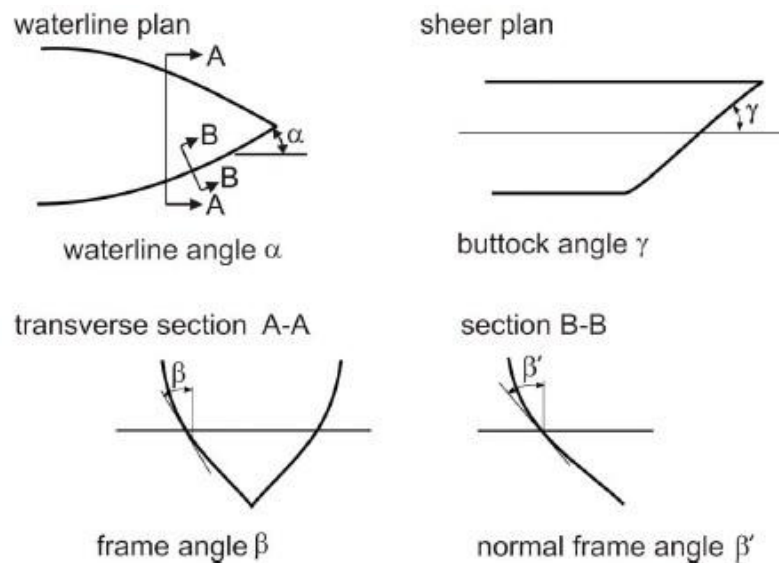
Class notation	Type of ice encountered	Normal ice strength $\sigma_{ice}(N/mm^2)$	Nominal Ice Thickness $h_{ice}(m)$	Limiting impact conditions
ICE-05 ICE-10 ICE-15	Extreme Winter ice with pressure ridges	4.2 5.6 7.0	0.5 1.0 1.5	No ramming anticipated
POLAR-10 POLAR-20 POLAR-30	Winter ice with pressure ridges and multi-year ice-floes and glacial ice inclusions	7.0 8.5 10.0	1.0 2.0 3.0	Occasional ramming
Icebreaker	As above	As above	As above	Repeated Ramming

Πίνακας Β.3: Για πλοία στην Αρκτική και για παγοθραυστική διαδικασία

Polar Class	Ice Description
PC 1	Year-round operation in Polar waters
PC 2	Year-round operation in moderate multi-year ice conditions
PC 3	Year-round operation in second-year ice which may include multi-year ice inclusions
PC 4	Year-round operation in thick first-year ice which may include old ice inclusions
PC 5	Year-round operation in medium first-year ice which may include old ice inclusions
PC 6	Summer/autumn operation in medium first-year ice which may include old ice inclusions
PC 7	Summer/autumn operation in thin first-year ice which may include old ice inclusions

Πίνακας Β.4: Περιγραφή πολικής κλάσης

Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα το β είναι η κανονική γωνία νομέα στην ανώτατη ίσαλο του πάγου, το α είναι η γωνία της ανώτερης ισάλου πάγου και το γ είναι η γωνία buttock στην ανώτατη ίσαλο πάγου, όλες σε μοίρες.



Σχήμα Β.1: Ορισμός μεταβλητών της γάστρας

Polar Class	Crushing Failure Class Factor CF_C	Flexural Failure Class Factor (CF_F)	Load Patch Dimensions Class Factors (CF_D)	Displacement Class Factors (CF_{DIS})	Longitudinal Class Factors (CF_L)
PC1	17.69	68.60	2.01	250	7.46
PC2	9.89	46.80	1.75	210	5.46
PC3	6.06	21.17	1.53	180	4.17
PC4	4.50	13.48	1.42	130	3.15
PC5	3.10	9.00	1.31	70	2.50
PC6	2.40	5.49	1.17	40	2.37
PC7	1.80	4.06	1.11	22	1.81

Πίνακας Β.5: Σταθερές πολικής κλάσης

Τα χαρακτηριστικά των φορτίων της περιοχής της πλώρης επηρεάζονται από την σταθερά f_a . Αυτή η σταθερά σχήματος του πλοίου εξάγεται από :

$$f_a = \text{minimum}(f_{a_{i,1}}; f_{a_{i,2}}; f_{a_{i,3}})$$

Όπου

$$f_{a_{i,1}} = (0.097 - 0.068(\frac{x}{L_{wl}} - 0.15)^2) \cdot \frac{\alpha_i}{(\beta'_i)^{0.5}}$$

$$f_{a_{i,2}} = 1.2 \cdot \frac{CF_F}{(\sin \beta'_i \cdot CF_C \cdot \Delta_{tk}^{0.64})}$$

$$f_{a_{i,3}} = 0.60$$

Όπου

i = το τμήμα που εξετάζεται

L_{wl} = μήκος του πλοίου μετρούμενο στην ανώτερη ίσαλο πάγου

x = απόσταση της προωραίου νομέα από το νομέα επιλογής

α = γωνία ισάλου

β' = κανονική γωνία νομέα

Δ_{tk} = εκτόπισμα πλοίου

CF_C = ανάλογη κλάση υλικού από τον πίνακα Β.5

CF_F = ανάλογη κλάση υλικού από τον πίνακα Β.5

Όταν υπολογιστούν οι σταθερές της ανάλογης κλάσης, υπολογίζουμε την ολική φόρτιση στην πλώρη :

$$F_n = f_{a,i} \cdot CF_C \Delta_{tk}^{0.64} \quad [MN]$$

Για τις άλλες περιοχές η φόρτιση υπολογίζεται από :

$$F_{NonBow} = f_{a,i} \cdot CF_C \cdot DF$$

Όπου το DF είναι το εκτόπισμα του πλοίου:

$$DF = \begin{cases} \Delta_{tk}^{0.64} & \text{if } \Delta_{tk} \leq CF_{DIS} \\ CF_{DIS} + 0.10(\Delta_{tk} - CF_{DIS}) & \text{if } \Delta_{tk} > CF_{DIS} \end{cases}$$

Αφού βρήκαμε την ολική φόρτιση πρέπει να βρούμε το load patch aspect ratio. Για την πλώρη αυτό υπολογίζεται από :

$$AR_i = 7.46 \cdot \sin(\beta'_i) \geq 1.3$$

Η γραμμή φόρτισης δίνεται ως :

$$Q_i = F_i^{0.61} \cdot \frac{CF_D}{AR_i^{0.35}} \quad [MN]$$

$$Q_{NonBow} = 0.639 F_{NonBow}^{0.61} CF_D \quad [MN]$$

Και η πίεση δίνεται από :

$$p = F_n^{0.22} \cdot CF_D^2 \cdot AR^{0.3} \quad [MPa]$$

Φορτία σχεδίασης για Αρκτική πλεύση και παγοθραυστική διαδικασία σύμφωνα με την DNV

Κατακόρυφη δύναμη σχεδίασης

Η κατακόρυφη φόρτιση σχεδίασης για την πλώρη κατά την κρούση :

$$P_{ZR} = P_{RFEL} [kN]$$

$$P_R = 28 \left(\frac{C_R E_{IMP}}{\tan \gamma} \right)^{0.6} (\sigma_{ice} \tan \alpha)^{0.4}$$

Για κοίλη πλώρη:

$$\tan \alpha = 1.2 \frac{B^{0.1}}{\sqrt{\cos \gamma}}$$

Για να συνυπολογίσουμε την γεωμετρία της πλώρης με stem , η ενέργεια σύγκρουσης δίνεται από :

$$E_{IMP} = E_k \frac{\tan^2 \gamma}{\tan^2 \gamma + 2.5}$$

$$F_{EL} = \sqrt{\frac{E_{IMP}}{E_{IMP} + C_L P_R^2}}$$

$$C_L = \frac{L^3}{3 \times 10^4 I_V}$$

E_{KE} είναι η κινητική ενέργεια πριν την κρούση :

$$E_{KE} = \frac{1}{2} \Delta V_{ram}^2 \quad (kNm)$$

I_V είναι η ροπή αδράνειας εκφραζόμενο σε m^4 στη μέση τομή του πλοίου.

Ολική φόρτιση σχεδίασης στο κέλυφος

Η ολική φόρτιση σχεδίασης στο κέλυφος στην πλήρη λόγω κρούσης της πλήρης με πάγο βασίζεται στον λόγο μεταξύ των πλευρικών 'φορτίσεων και της κατακόρυφης φόρτισης P_{ZR} :

$$P_{OI} = \frac{P_{ZR} F_{SIDE}}{\cos \gamma} \quad [kN]$$

$$F_{side} = \frac{1.9}{(\tan \alpha)^{0.4}} \left(\frac{\sigma_{ice}}{E_{KE}} \right)^{0.05}$$

Φορτία του πάγου στο μέσο του πλοίου

Όταν το πλοίο είναι παγιδευμένο ανάμεσα σε κινούμενο πάγο, πρέπει να είναι σε θέση να αντιστέκεται σε φορτία στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας στα οριζόντια ελάσματα των πλευρών της γάστρας :

$$q = \frac{165}{\sin \beta_f} (h_{ice})^{1.5} \quad \left(\frac{kN}{m} \right)$$

$$= 950 (h_{ice})^{1.5} \quad \left(\frac{kN}{m} \right) \quad \text{για τα κατακόρυφα τοιχώματα } (\beta_f < 10^\circ)$$

h_{ice} = Μέσο πάχος πάγου, β_f = γωνία νομένων με την κατακόρυφη στο ύψος της θάλασσας

Τοπική πίεση λόγω του πάγου

Η τοπική φόρτιση λόγω της πίεσης από την επαφή με τον πάγο χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της τοπικής αντοχής των εξαρτημάτων όπως στα ελάσματα, τα ενισχυτικά και τα κύρια ενισχυτικά. Η πίεση αυτή είναι ανάλογη της αντοχής του πάγου και πολλαπλασιάζεται με την σταθερά βάρους F_A για διαφορετικά κομμάτια της γάστρας.

$$p_0 = 1000 F_A \sigma_{ice} \quad \left(\frac{kN}{m^2} \right)$$

$F_A = 1$ για την περιοχή της πλήρης γενικά και το σ_{ice} δίνεται από τον πίνακα 4.3

Οι άλλες περιοχές ορίζονται από τον κώδικα αρκτικής σχεδίασης (Arctic design code) Στις περιοχές αυτές η σταθερά F_B υπολογίζεται ως εξής :

$$F_B = \begin{cases} \frac{0.58}{A_C^{0.5}} & \text{if } A_C \leq 1.0m^2 \\ \frac{0.58}{A_C^{0.15}} & \text{if } A_C > 1.0m^2 \end{cases}$$

Η τελική σχέση που εκφράζει την πίεση σχεδίασης δίνεται ως εξής :

$$p = F_B p_0 \quad \left(\frac{kN}{m^2} \right)$$

Πάχος ελασμάτων Πολικής κλάσης

Το προβλεπόμενο πάχος του ελάσματος σε σχεδίαση εγκάρσιας ενίσχυσης δίνεται από :

$$t = 500s \sqrt{\frac{AF * PPF_P * P_{avg}}{\sigma_y} \frac{1}{1 + \frac{s}{2b}}} + t_s \quad (mm)$$

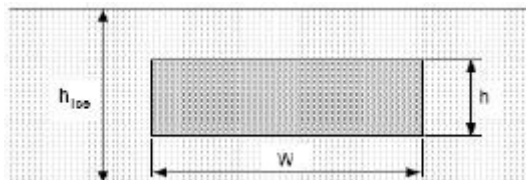
Όπου AF και PPF_P προέρχονται από πίνακες, σ_y είναι το όριο διαρροής του υλικού, t_k είναι το επιπλέον πάχος λόγω οξείδωσης, s είναι το frame spacing (m), b είναι το ύψος της φόρτισης σχεδίασης (m) και το P_{avg} εκφράζεται ως :

$$P_{avg} = \frac{F}{b \cdot w}$$

Απαιτήσεις ελασμάτων για Αρκτική πλέυση και παγοθραυστική διαδικασία

Το πάχος του ελάσματος το οποίο επιβάλλεται σε φορτίσεις είναι :

$$t = 23k_a \frac{s^{0.75}}{h_0^{0.25}} \sqrt{\frac{k_w p_0}{m_p \sigma_f}} + t_k \quad [mm]$$



Σχήμα Β.2: Επιφάνεια επιβολής φορτίου

όπου

k_a = παράγοντας αναλογίας διαστάσεων

k_w = παράγοντας διανομής πίεσης

p_0 = βασική ασκούμενη πίεση πάγου

m_p = παράγοντας καμπτικής ροπής

$b = s$ γενικά (εγκάρσιοι νομείς)

$b = h_0$ για διαμήκως ενισχυμένα ελάσματα

s = απόσταση ενισχυτικών

l = ενεργό μήκος ενισχυτικού

Για την επιφάνεια το h_0 περιορίζεται ως το s ως μέγιστη πλευρά.

Το k_a εκφράζεται ως :

$$k_a = 1.1 - 0.25 \frac{s}{l} \quad k_a \in [0.85 - 1.0]$$

Η σταθερά διανομής της πίεσης k_w εκφράζεται ως εξής :

$$k_w = 1.3 - \frac{4.2}{(a/s + 1.8)^2} \quad k_w \in [0.85 - 1.0]$$

Όπου

$a = s$ γενικά

$a = h_0$ για πλοία με διαμήκη ενίσχυση

Παράρτημα Γ_α: Γενική Διάταξη Υβριδικού Παγοθραυστικού

GENERAL PARTICULARS

Name: *Aker Arctic*

LOA: 169.1 m

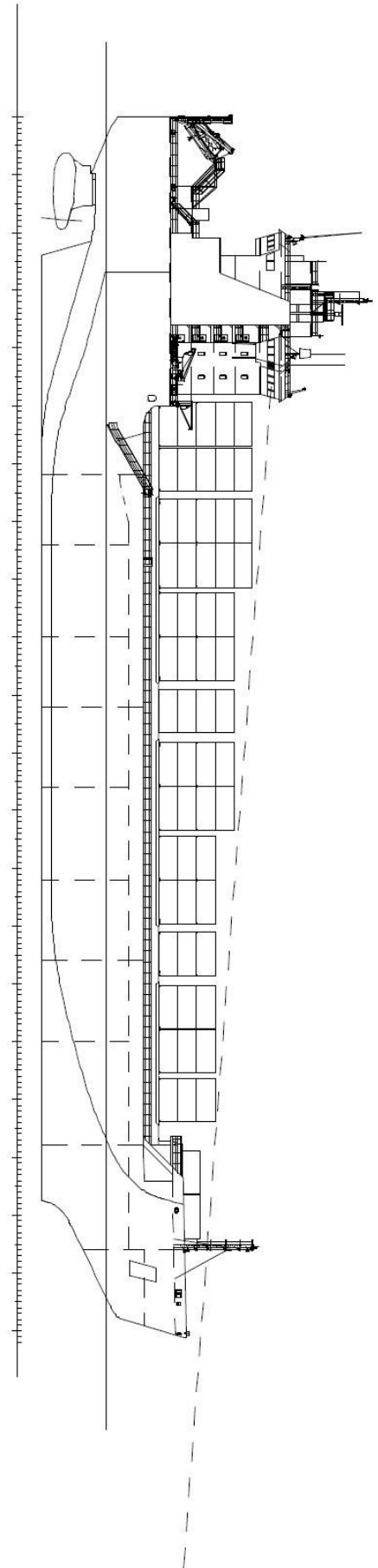
LBP: 161.3 m

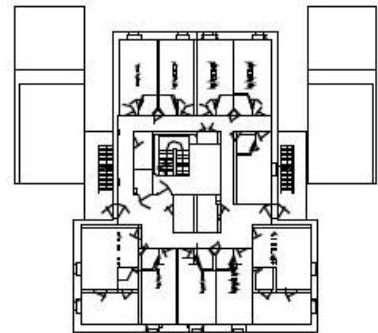
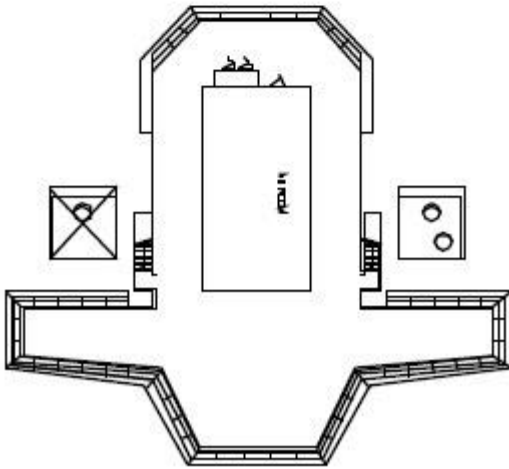
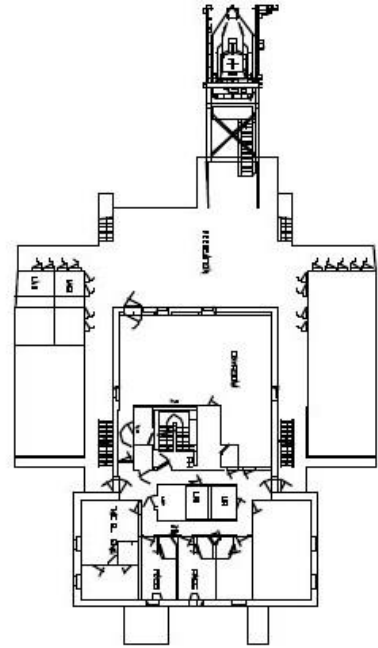
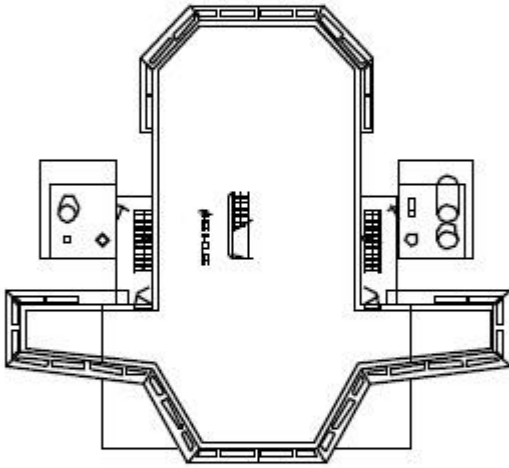
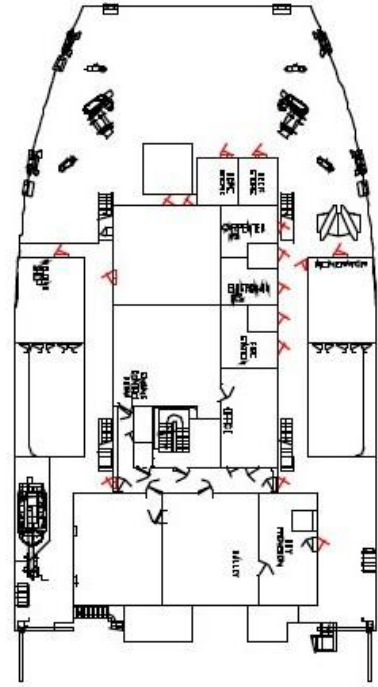
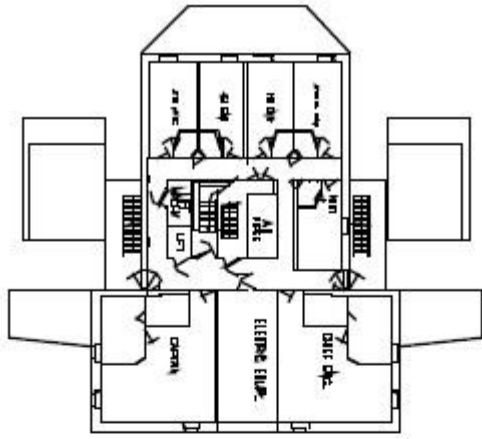
BEAM: 23.1 m

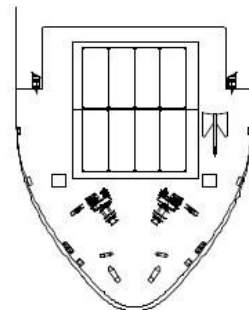
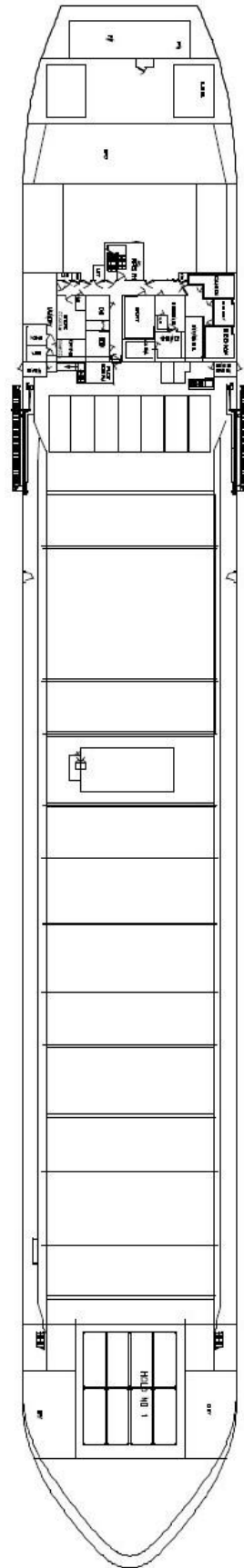
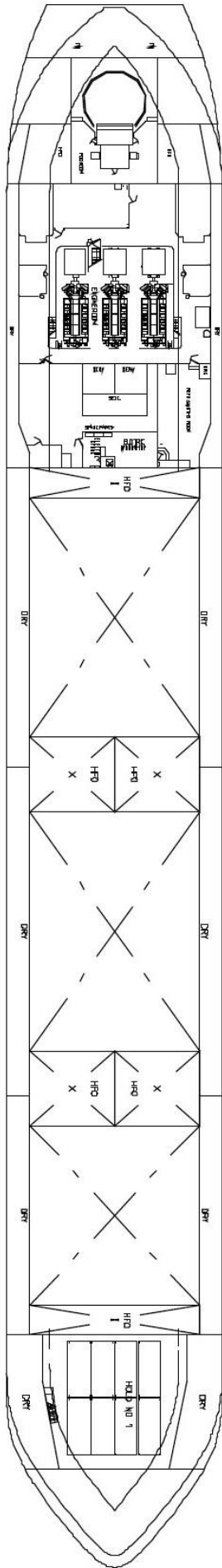
DEPTH: 14.1 m

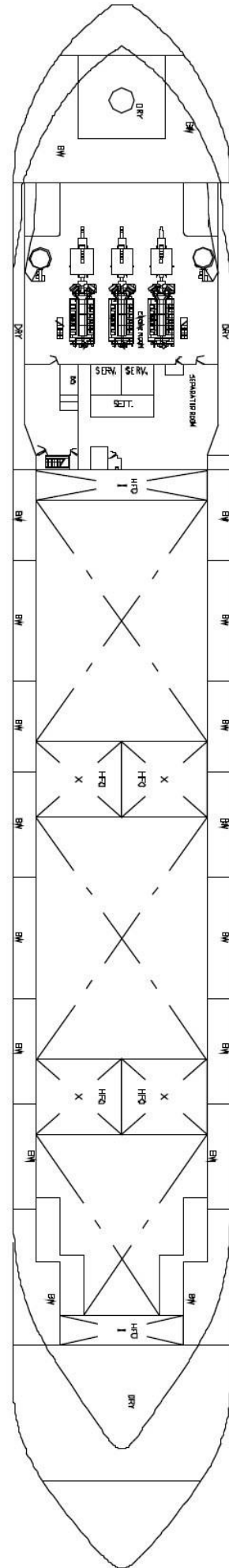
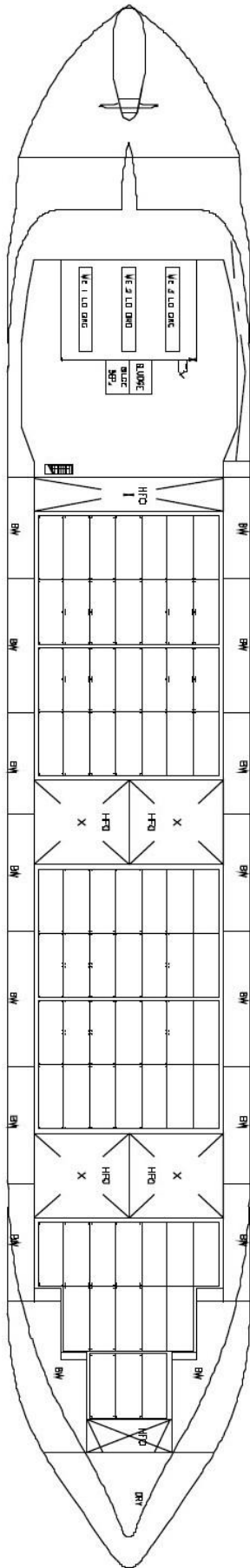
DRAUGHT: 9.1 m

CAPACITY: 815 TEU









Παράρτημα Γβ : Γραμμές σχεδίασης υβριδικού παγοθραυστικού

