



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΧΜΑΣΗΣ
ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ
ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ

ΠΕΤΡΟΣ Σ. ΛΟΧΑΪΤΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής

ΚΩΣΤΑΣ Ι. ΣΠΥΡΟΥ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

*Αυτή η εργασία αφιερώνεται,
στους γονείς μου, Ζωή και Σωτήρη*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα παράγραφο οφείλω να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και ιδιαίτερα :

Τον επιβλέποντα καθηγητή Κ. Σπύρου για την πολύτιμη υποστήριξη του και τις παραγωγικές υποδείξεις του. Η συμβολή του στην παροχή βιβλιογραφίας και στην κατανόηση των θεμάτων που αφορούσαν την περιοχή της μαθηματικής μοντελοποίησης ήταν πολύ σημαντική και καθοριστική.

Τον επίκουρο καθηγητή Ν. Θεμελή για τις παρατηρήσεις του και την πρόθυμη βοήθειά του στην κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου.

Τους υποψήφιους διδάκτορες του Τομέα Μελέτης Πλοίου για τις ανταλλαγές απόψεων και τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσαν παρέχοντάς μου την απαραίτητη βοήθεια στη μοντελοποίηση του προβλήματος μέσω του λογισμικού Mathematica.

Ακόμη θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου, που βρέθηκαν δίπλα μου όλο αυτό το διάστημα, για τη συνεχή τους υποστήριξη και παρότρυνση.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για όλες τις αρχές που μου μετέφερε, καθώς και για τις ευκαιρίες και την πολύτιμη υποστήριξη που μου προσφέρει καθημερινά σε όλους τους τομείς.

Πέτρος Λοχαΐτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του θέματος της στοιβασίας και πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα του πλοίου, καθώς και το πώς αυτό επηρεάζεται από την κίνηση διατοιχισμού του πλοίου.

Αρχικά γίνεται σύντομη αναφορά στο φαινόμενο απώλειας εμπορευματοκιβωτίων λόγω της κίνησης διατοιχισμού και στη συνέχεια παρουσιάζονται βασικές έννοιες θεωρίας που σχετίζονται με τη μελέτη (γενικές αρχές στοιβασίας εμπορευματοκιβωτίων επί του πλοίου).

Έπεται μία ανασκόπηση της υπό μελέτης περιοχής από τη σκοπιά των κανονισμών, αλλά και από την πλευρά άλλων συναφών μελετών.

Ακολουθεί η διαδικασία σύνθεσης του υπολογιστικού μέρους. Στόχος του μαθηματικού μοντέλου είναι η περιγραφή της συμπεριφοράς μιας στοιβάς ενός ή περισσοτέρων εμπορευματοκιβωτίων μαζί με το σύστημα έχμασής της κατά τη διάρκεια διατοιχισμού του πλοίου. Το μοντέλο ενισχύεται με παραδοχές και περιορισμούς κυρίως στο θέμα της σχετικής κίνησης των εμπορευματοκιβωτίων της στοιβάς ως προς το κατάστρωμα, αλλά και της μοντελοποίησης των διατάξεων έχμασης. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται χρήση του λογισμικού προγράμματος *Mathematica*.

Γραφικές παραστάσεις των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κίνησης και διαγράμματα που παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις φορτίσεις (μέγιστες) που δέχονται οι διατάξεις έχμασης αποτελούν τα κύρια αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου. Οι μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα, γίνονται για διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης, αλλά και για άλλες διάφορες παραμέτρους που σχετίζονται με τη διέγερση που υφίσταται το πλοίο λόγω κυματισμού.

Σημαντικό συμπέρασμα της εργασίας αποτελεί η ανάδειξη της σπουδαιότητας του ρόλου που διαδραματίζουν οι εγκάρσιες δυνάμεις στην κίνηση διατοιχισμού σε αντίθεση με τις κατακόρυφες. Επίσης, άξιο αναφοράς είναι ότι οι φορτίσεις που δέχονται τα συρματόσχοινα πρόσδεσης επηρεάζονται τόσο με τη μεταβολή των παραμέτρων της διέγερσης του πλοίου, όσο και με τη μεταβολή του αριθμού και της μάζας των εμπορευματοκιβωτίων που στοιβάζονται.

Λέξεις κλειδιά:

Πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων · Σύστημα έχμασης εμπορευματοκιβωτίων · Στοιβασία και ασφάλιση εμπορευματοκιβωτίων · Φορτίσεις εχμάτων · Κίνηση διατοιχισμού

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to study the subject of stowage and securing of containers on ship's deck and additionally, how this can be affected by ship's rolling motion.

Initially, a brief reference to the phenomenon of container loss is made, due to excessive rolling motion and then basic concepts of study-related theory are presented. Furthermore, a literature review takes place both by the scope of regulations and other relevant studies.

The goal of the developed mathematical model is to describe the behavior of a container stack in collaboration with its lashing arrangement during roll motion. The model is reinforced with assumptions and constraints, which are mainly associated, firstly, with the relative movements between containers and ship's deck and secondly, with the lashing system. All the results have been exported by *Mathematica*, a technical computing system.

Graphs which represent the forces that developed during ship's motion and diagrams which provide information about loads that lashings are expected to take, constitute the main results of mathematical model's implementation.

A great amount of measurements takes place with different loading scenarios and an important variety of several parameters related to the excitation incited by waves encountering the ship from the side.

The most essential consequence derived from results assessment is the crucial role that transverse forces play, in contrast with vertical ones. Moreover, it is worth mentioning that loads taken by lashings, affected both by parameters variation related to ship's excitation and also by the distribution of container masses in the stack.

Keywords:

Containership · Lashing system · Stowage and securing of containers · Lashing loads · Ship roll motion

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	v
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	ix
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	xiii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΤΟΙΒΑΣΙΑ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ	
ΕΠΙ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	18
3.1 Στοιβάσια και ασφάλιση φορτίου – CSS Code	18
3.2 Μέθοδοι υπολογισμού φορτίσεων βάσει CSS Code	
3.2.1 Απλοποιημένη μέθοδος (Rule of Thumb)	19
3.2.2 Μέθοδος Ισορροπίας Δυνάμεων – Ανεπτυγμένη Μέθοδος	22
3.2.3 Μέθοδος Ισορροπίας Δυνάμεων – Εναλλακτική Μέθοδος	26
3.3 Διάφορες μελέτες για τον υπολογισμό φορτίσεων	
3.3.1 Μέθοδος κατά Charles R. Cushing	29
3.3.2 Μέθοδος “SR234” (Shipbuilding Research Association of Japan –	
T. Nakamura)	32
3.3.3 Lashings of trailers on-board ro/ro ships under intensive rolling	
(N. Themelis, K. J. Spyrou)	35
3.3.4 Dynamics of lashed trailers on board ships under the combined effect	
of roll and pitch motions (P. Poulis, N. Themelis, K. J. Spyrou)	38
3.3.5 Μελέτη του συστήματος έχμασης εμπορευματοκιβωτίων	
στο κατάστρωμα πλοίου υπό την επίδραση της κίνησης διατοιχισμού	
(Διπλωματική Εργασία – Στέφανος Χ. Αντωνιάδης)	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΩΝ

ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

ΕΧΜΑΣΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ 44

5.1 Μοντελοποίηση ενός εμπορευματοκιβωτίου

5.1.1 Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου 45

5.1.2 Δυνάμεις λόγω lashings 46

5.1.3 Εξισώσεις κίνησης του εμπορευματοκιβωτίου 49

5.2 Μοντελοποίηση δύο εμπορευματοκιβωτίων

5.2.1 Μοντελοποίηση δύο εμπορευματοκιβωτίων ως δύο μάζες 50

5.2.1.1 Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου 50

5.2.1.2 Δυνάμεις λόγω lashings 53

5.2.1.3 Εξισώσεις κίνησης των δύο εμπορευματοκιβωτίων
ως δύο μάζες 56

5.2.2 Μοντελοποίηση δύο εμπορευματοκιβωτίων ως μία μάζα 58

5.2.2.1 Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου 58

5.2.2.2 Δυνάμεις λόγω lashings 58

5.2.2.3 Εξισώσεις κίνησης των δύο εμπορευματοκιβωτίων
ως μία μάζα 59

5.3 Μοντελοποίηση τριών εμπορευματοκιβωτίων

5.3.1 Μοντελοποίηση τριών εμπορευματοκιβωτίων ως δύο μάζες 61

5.3.1.1 Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου 61

5.3.1.2 Δυνάμεις λόγω lashings 62

5.3.1.3 Εξισώσεις κίνησης των τριών εμπορευματοκιβωτίων
ως δύο μάζες 62

5.3.2 Μοντελοποίηση τριών εμπορευματοκιβωτίων ως μία μάζα 63

5.3.2.1 Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου 63

5.3.2.2 Δυνάμεις λόγω lashings 63

5.3.2.3 Εξισώσεις κίνησης των τριών εμπορευματοκιβωτίων
ως μία μάζα 64

5.4	Μοντελοποίηση πέντε εμπορευματοκιβωτίων	
5.4.1	Μοντελοποίηση πέντε εμπορευματοκιβωτίων ως δύο μάζες	65
5.4.1.1	Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου	65
5.4.1.2	Δυνάμεις λόγω lashings	66
5.4.1.3	Εξισώσεις κίνησης των πέντε εμπορευματοκιβωτίων ως δύο μάζες	66
5.4.2	Μοντελοποίηση πέντε εμπορευματοκιβωτίων ως μία μάζα	67
5.4.2.1	Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου	67
5.4.2.2	Δυνάμεις λόγω lashings	68
5.4.2.3	Εξισώσεις κίνησης των πέντε εμπορευματοκιβωτίων ως μία μάζα	68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΡΟΣΔΕΣΗΣ

	ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	69
6.1	Εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου	69
6.2	Πρόσδεση ενός εμπορευματοκιβωτίου	
6.2.1	Δεδομένα μοντέλου	73
6.2.2	Αποτελέσματα μοντέλου	74
6.3	Πρόσδεση δύο εμπορευματοκιβωτίων	
6.3.1	Δύο εμπορευματοκιβώτια ως δύο μάζες	78
6.3.1.1	Δεδομένα μοντέλου	78
6.3.1.2	Αποτελέσματα μοντέλου	78
6.3.2	Δύο εμπορευματοκιβώτια ως μία μάζα	81
6.3.2.1	Δεδομένα μοντέλου	81
6.3.2.2	Αποτελέσματα μοντέλου	81
6.4	Πρόσδεση τριών εμπορευματοκιβωτίων	
6.4.1	Τρία εμπορευματοκιβώτια ως δύο μάζες	84
6.4.1.1	Δεδομένα μοντέλου	84
6.4.1.2	Αποτελέσματα μοντέλου	84
6.4.2	Τρία εμπορευματοκιβώτια ως μία μάζα	87

6.4.2.1	Δεδομένα μοντέλου	87
6.4.2.2	Αποτελέσματα μοντέλου	87
6.5	Πρόσδεση πέντε εμπορευματοκιβωτίων	
6.5.1	Πέντε εμπορευματοκιβώτια ως δύο μάζες	90
6.5.1.1	Δεδομένα μοντέλου	90
6.5.1.2	Αποτελέσματα μοντέλου	90
6.5.2	Πέντε εμπορευματοκιβώτια ως μία μάζα	93
6.5.2.1	Δεδομένα μοντέλου	93
6.5.2.2	Αποτελέσματα μοντέλου	93
6.6	Συγκριτικά διαγράμματα δυνάμεων στα lashings	
6.6.1	Εμπορευματοκιβώτια ως δύο μάζες	96
6.6.2	Εμπορευματοκιβώτια ως μία μάζα	102
6.6.3	Εμπορευματοκιβώτια ως μία μάζα και δύο μάζες	105
6.7	Η επίδραση του ανέμου στις φορτίσεις των lashings	107
6.8	Φορτίσεις στα lashings υπό τη διέγερση αρμονικού κύματος	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΕΠΤΥΓΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ,	
	CSS CODE	115
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΠΕΡΒΟΛΙΚΩΝ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ	
	ΛΟΓΩ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ (ΕΠΙΠΕΔΟ Ι)	117
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	119
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		122
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ		123
	Παράρτημα Α – Αποτελέσματα Α΄ Σεναρίου Φόρτωσης	123
	Παράρτημα Β – Αποτελέσματα Β΄ Σεναρίου Φόρτωσης	137

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 : Εγκάρσια διάταξη εμπορευματοκιβωτίων	3
Σχήμα 2.2 : Διαμήκη διάταξη εμπορευματοκιβωτίων	3
Σχήμα 2.3 : Μικτή διάταξη εμπορευματοκιβωτίων.....	4
Σχήμα 2.4 : Σύστημα συντεταγμένων Bay, Row, Tier	5
Σχήμα 2.5 : Βασική διευθέτηση συστήματος έχμασης.....	7
Σχήμα 2.6 : Μέθοδοι ασφαλίσεως εμπορευματοκιβωτίων	7
Σχήμα 2.7 : Γέφυρα πρόσδεσης (Lashing Bridge).....	8
Σχήμα 2.8 : Διάταξη 6 x 36 με συνθετικό πυρήνα.....	13
Σχήμα 2.9 : Διάταξη 6 x 37 με χαλύβδινο πυρήνα	13
Σχήμα 2.10 : Διάταξη 6 x 37 με χαλύβδινο πυρήνα	13
Σχήμα 2.11 : Μετατόπιση εμπορευματοκιβωτίων λόγω έντονων κυματισμών	15
Σχήμα 2.12 : Κινήσεις roll, heave, pitch.....	15
Σχήμα 2.13 : Ροπή ανατροπής ή δύναμη αποκόλλησης στις γωνίες πρόσδεσης.....	16
Σχήμα 2.14 : Δύναμη παραμόρφωσης στο πλαίσιο του κατώτερου εμπορευματοκιβωτίου.....	17
Σχήμα 2.15 : Μεγάλη θλιπτική φόρτιση στους στήλους του εμπορευματοκιβωτίου που οδήγησε σε κατάρρευση	17
Σχήμα 3.1 : Βασικές επιταχύνσεις	20
Σχήμα 3.2 : Ισορροπία εγκάρσιων δυνάμεων	24
Σχήμα 3.3 : Ισορροπία εγκάρσιων ροπών.....	25
Σχήμα 3.4 : Κατακόρυφες και οριζόντιες γωνίες πρόσδεσης.....	26
Σχήμα 3.5 : Ροπή επαναφοράς πλοίου	29
Σχήμα 3.6 : Δυνάμεις που δημιουργούνται κατά την κίνηση διατοιχισμού	31
Σχήμα 3.7 : Τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο.....	33
Σχήμα 3.8 : Απλοποιημένη μορφή του μοντέλου του trailer.....	35
Σχήμα 3.9 : Δυνάμεις λόγω διατοιχισμού.....	36
Σχήμα 3.10 : Δυνάμεις λόγω προνευτασμού	39
Σχήμα 3.11 : Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου, όπου m η μάζα του εμπορευματοκιβωτίου	40
Σχήμα 5.1 : Αναπαράσταση εμπορευματοκιβωτίου και της διάταξης των lashings	44
Σχήμα 5.2 : Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου, όπου m η μάζα του εμπορευματοκιβωτίου	45
Σχήμα 5.3 : Κίνηση εμπορευματοκιβωτίου πάνω στο κατάστρωμα	47
Σχήμα 5.4 : Αναπαράσταση εμπορευματοκιβωτίου και της διάταξης των lashings	50
Σχήμα 5.5 : Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου, για δύο εμπορευματοκιβώτια.....	51
Σχήμα 5.6 : Κίνηση των δύο εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα	54

Σχήμα 5.7 : Αναπαράσταση των εμπορευματοκιβωτίων και της διάταξης των lashings ως μία μάζα	58
Σχήμα 5.8 : Κίνηση των δύο εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα	59
Σχήμα 5.9 : Αναπαράσταση των εμπορευματοκιβωτίων και της διάταξης των lashings ως δύο μάζες.....	61
Σχήμα 5.10 : Κίνηση των εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα.....	62
Σχήμα 5.11 : Αναπαράσταση των εμπορευματοκιβωτίων και της διάταξης των lashings ως μία μάζα	63
Σχήμα 5.12 : Κίνηση των εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα.....	64
Σχήμα 5.13 : Αναπαράσταση των εμπορευματοκιβωτίων και της διάταξης των lashings ως δύο μάζες.....	65
Σχήμα 5.14 : Κίνηση των εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα.....	66
Σχήμα 5.15 : Αναπαράσταση των εμπορευματοκιβωτίων και της διάταξης των lashings ως μία μάζα	67
Σχήμα 5.16 : Κίνηση των εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα.....	68
Σχήμα 6.1 : Θέσεις εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα του πλοίου	70
Σχήμα 6.2 : Α΄ και Β΄ Σενάριο φόρτωσης	71
Σχήμα 6.3 : Αναπαράσταση εμπορευματοκιβωτίου και της διάταξης των lashings	73
Σχήμα 6.4 : Εγκάρσια συνισταμένη δύναμη λόγω διατοιχισμού.....	74
Σχήμα 6.5 : Κατακόρυφη συνισταμένη δύναμη λόγω διατοιχισμού	74
Σχήμα 6.6 : Φόρτιση δεξιών lashings	75
Σχήμα 6.7 : Φόρτιση αριστερών lashings	75
Σχήμα 6.8 : Μέγιστη φόρτιση αριστερών lashings συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	76
Σχήμα 6.9 : Μέγιστη φόρτιση αριστερών lashings συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	76
Σχήμα 6.10 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	78
Σχήμα 6.11 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	79
Σχήμα 6.12 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	79
Σχήμα 6.13 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	80
Σχήμα 6.14 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	81
Σχήμα 6.15 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	82
Σχήμα 6.16 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	82
Σχήμα 6.17 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	83

Σχήμα 6.18 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	84
Σχήμα 6.19 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	85
Σχήμα 6.20 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	85
Σχήμα 6.21 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	86
Σχήμα 6.22 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	87
Σχήμα 6.23 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	88
Σχήμα 6.24 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	88
Σχήμα 6.25 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	89
Σχήμα 6.26 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	90
Σχήμα 6.27 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	91
Σχήμα 6.28 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	91
Σχήμα 6.29 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	92
Σχήμα 6.30 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	93
Σχήμα 6.31 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0	94
Σχήμα 6.32 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	94
Σχήμα 6.33 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω	95
Σχήμα 6.34 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 (A' Σενάριο).....	96
Σχήμα 6.35 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 (A' Σενάριο).....	97
Σχήμα 6.36 : Μέγιστη φόρτιση των lashings (A' Σενάριο) για containers ως δύο μάζες	97
Σχήμα 6.37 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 (A' & B' Σενάριο).....	98
Σχήμα 6.38 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 (A' & B' Σενάριο).....	99
Σχήμα 6.39 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 (A' & B' Σενάριο).....	99
Σχήμα 6.40 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 (A' & B' Σενάριο).....	100
Σχήμα 6.41 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 ως προς τη μάζα έγχυσης (A' & B' Σενάριο)	101

Σχήμα 6.42 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 ως προς τη μάζα έχμασης (Α΄ & Β΄ Σενάριο)	101
Σχήμα 6.43 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 (Α΄ Σενάριο).....	102
Σχήμα 6.44 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 (Α΄ Σενάριο)	102
Σχήμα 6.45 : Μέγιστη φόρτιση των lashings (Α΄ Σενάριο) για containers ως μία μάζα	103
Σχήμα 6.46 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 (Α΄ & Β΄ Σενάριο).....	104
Σχήμα 6.47 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 (Α΄ & Β΄ Σενάριο).....	104
Σχήμα 6.48 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 για containers ως μία και δύο μάζες	105
Σχήμα 6.49 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 για containers ως μία και δύο μάζες	105
Σχήμα 6.50 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 για containers ως δύο μάζες	107
Σχήμα 6.51 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 για containers ως δύο μάζες	108
Σχήμα 6.52 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 για containers ως μία μάζα	108
Σχήμα 6.53 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 για containers ως μία μάζα	109
Σχήμα 6.54 : Διάταξη wind lashing	110
Σχήμα 6.55 : Διάταξη συστήματος έχμασης με lashing bridge	110
Σχήμα 6.56 : Εύρος γωνίας διατοιχισμού	112
Σχήμα 6.57 : Εγκάρσια συνισταμένη δύναμη λόγω διατοιχισμού	113
Σχήμα 6.58 : Κατακόρυφη συνισταμένη δύναμη λόγω διατοιχισμού	113
Σχήμα 6.59 : Φόρτιση αριστερού lashings 1	114
Σχήμα 6.60 : Φόρτιση δεξιού lashing 2	114

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 : Σταθερός-μόνιμος εξοπλισμός εχμάσεως.....	10
Πίνακας 2.2 : Φορητός εξοπλισμός εχμάσεως.....	11
Πίνακας 3.1 : Προσδιορισμός MSL ως προς τη φόρτιση κατάρρευσης.....	19
Πίνακας 3.2 : Συντελεστές διόρθωσης για μήκος και ταχύτητα πλοίου.....	21
Πίνακας 3.3 : Συντελεστές διόρθωσης για $B/GM < 13$	22
Πίνακας 3.4 : Συντελεστές τριβής.....	22
Πίνακας 3.5 : Τιμές f συναρτήσει των α και μ	23
Πίνακας 3.6.1 : $\mu = 0.4$	27
Πίνακας 3.6.2 : $\mu = 0.3$	27
Πίνακας 3.6.3 : $\mu = 0.2$	27
Πίνακας 3.6.4 : $\mu = 0.1$	28
Πίνακας 3.6.5 : $\mu = 0.0$	28
Πίνακας 6.1 : Διαστάσεις πλοίου.....	71
Πίνακας 6.2 : Βασικές παράμετροι του Panamax containership.....	112
Πίνακας 8.1 : Βασικά στοιχεία του πλοίου.....	117
Πίνακας 8.2 : Συντεταγμένες εμπορευματοκιβωτίων.....	117

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι προφανές ότι η παγίωση των containerships στις διεθνείς θαλάσσιες μεταφορές είναι πλέον μια πραγματικότητα. Η σύγχρονη μορφή των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων εξασφαλίζει ταχύτερη, ασφαλέστερη και οικονομικότερη μεταφορά. Μπορεί τα containerships να έχουν μεγαλύτερο κόστος ναυπήγησης συγκριτικά με άλλα πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου, όμως πλεονεκτούν σε πλήρη αξιοποίηση της χωρητικότητας σε μικρό σχετικά βύθισμα, σε μείωση του χρόνου φορτοεκφορτώσεως καθώς και του χρόνου παραμονής στο λιμάνι. Αξίζει να αναφερθεί πως ο συνολικός στόλος των containerships κατέχει το 13 % της μεταφορικής χωρητικότητας του παγκόσμιου εμπορικού στόλου. [1]

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις και ανάγκες για υλικά αγαθά έχουν οδηγήσει στην αύξηση του μεγέθους των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Η αύξηση όμως του μεγέθους συνδέεται με την ανάπτυξη πολλών προβλημάτων και κινδύνων, γι' αυτό τα ζητήματα της ασφάλειας χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά τη σχεδίαση. Ένα από τα σημαντικότερα θέματα είναι αυτό της ασφαλούς πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα του πλοίου. Το ζήτημα αυτό οφείλεται λόγω του αυξημένου αριθμού εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα του πλοίου, την ανεπαρκή αντοχή συρματόσχοινων και τον κακό σχεδιασμό και εφαρμογή του συστήματος πρόσδεσης.

Όλο και περισσότερα εμπορευματοκιβώτια χάνονται ή καταστρέφονται κάθε χρόνο εν πλω. Η απώλεια εμπορευματοκιβωτίων δεν είναι ένα σπάνιο φαινόμενο ή περιστασιακό. Κατά μέσο όρο, για τα τελευταία δέκα χρόνια γίνονται αναφορές για περίπου 6 συμβάντα απώλειας εμπορευματοκιβωτίων ανά έτος, η πραγματικότητα διαφέρει όμως σημαντικά. Σύμφωνα με υπολογισμούς, ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων που χάνονται κάθε χρόνο είναι μεταξύ 2000 και 10000. [2]

Το φαινόμενο αυτό της απώλειας εμπορευματοκιβωτίων συνήθως είναι αποτέλεσμα των έντονων κινήσεων διατοιχισμού στις οποίες υπόκειται το πλοίο λόγω κακών καιρικών συνθηκών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το containership “Maersk Shanghai” το οποίο το Μάρτιο του 2018 βρέθηκε σε μεγάλη θαλασσοταραχή στη βόρεια Καρολίνα, με αποτέλεσμα 76 εμπορευματοκιβώτια να πέσουν στη θάλασσα, ορισμένα εκ των οποίων περιείχαν μεγάλες ποσότητες θειικού οξέος.

Η σημασία του φαινομένου απώλειας εμπορευματοκιβωτίων υπό την επίδραση της κίνησης διατοιχισμού, οδήγησε στην ανάπτυξη κανονισμών με απώτερο σκοπό την ασφαλή πρόσδεση και μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων. Συγχρόνως, αξιοσημείωτη ήταν η προσπάθεια από ερευνητικές ομάδες και ινστιτούτα για την μελέτη και εξήγηση της κίνησης διατοιχισμού, αλλά και της επιρροής του στην αντοχή των συστημάτων έχμασης των εμπορευματοκιβωτίων. Παρόλο που, τόσο νηογνώμονες όσο και ερευνητές επιδίωξαν να εξαλείψουν το φαινόμενο αυτό, απώλειες εμπορευματοκιβωτίων συνεχίζουν να παρατηρούνται, συνήθως λόγω της μη τήρησης των κανονισμών από τους υπεύθυνους στοιβασίας ή άλλες φορές, εξαιτίας της ανεπάρκειας των κανονισμών για την αποφυγή του φαινομένου.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, προκύπτει πως το θέμα της στοιβασίας και πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα του πλοίου είναι ιδιαίτερα σημαντικό.

Η παρούσα εργασία επομένως, συντάχθηκε με σκοπό την μελέτη και έρευνα του συγκεκριμένου θέματος, αφήνοντας στο τέλος προοπτικές για περαιτέρω εμβάθυνση του φαινομένου.

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά στα εξής :

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται οι βασικές διατάξεις στοιβασίας των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα του πλοίου, οι σημαντικότερες μέθοδοι ασφαλίσεως / εχμάσεως, αλλά και τα διάφορα μέσα των συστημάτων πρόσδεσης. Μεταξύ των άλλων, γίνεται αναφορά στα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων αλλά και στις μέγιστες φορτίσεις ασφαλείας που δέχονται τα διάφορα υλικά – τμήματα του συστήματος πρόσδεσης.

Το **Κεφάλαιο 3** αποτελείται από μία ανασκόπηση της υπό εξέταση περιοχής, τόσο από την πλευρά των κανονισμών, όσο και από την πλευρά άλλων μελετών που έχουν στοχεύσει και επικεντρωθεί σε αυτό το ζήτημα.

Στο **Κεφάλαιο 4** αναφέρονται και περιγράφονται επακριβώς και με σαφήνεια οι στόχοι της εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 5** κατασκευάζεται το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τη συμπεριφορά ενός ή περισσότερων εμπορευματοκιβωτίων μαζί με το σύστημα έχμασής τους κατά την κίνηση διατοιχισμού του πλοίου. Επίσης, σχηματίζονται οι εξισώσεις κίνησης του εμπορευματοκιβωτίου, μέσω της επίλυσης των οποίων προκύπτουν όλα τα στοιχεία – δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτό.

Το **Κεφάλαιο 6** συνίσταται από τα αποτελέσματα και τα σχετικά διαγράμματα, όπως αυτά προέκυψαν ύστερα από εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου.

Στο **Κεφάλαιο 7** εφαρμόζεται η *Ανεπτυγμένη Μέθοδος* βάσει του CSS Code και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με αυτά που εξήχθησαν από το Κεφάλαιο 6.

Στο **Κεφάλαιο 8** γίνεται έλεγχος για το κατά πόσο το φορτίο ενός containership είναι ευπαθές σε υπερβολικές εγκάρσιες επιταχύνσεις λόγω διατοιχισμού.

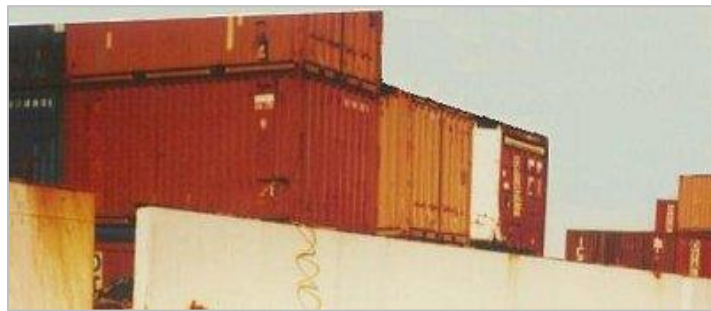
Τέλος, στο **Κεφάλαιο 9** καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν έπειτα από μελέτη και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΤΟΙΒΑΣΙΑ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΕΠΙ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

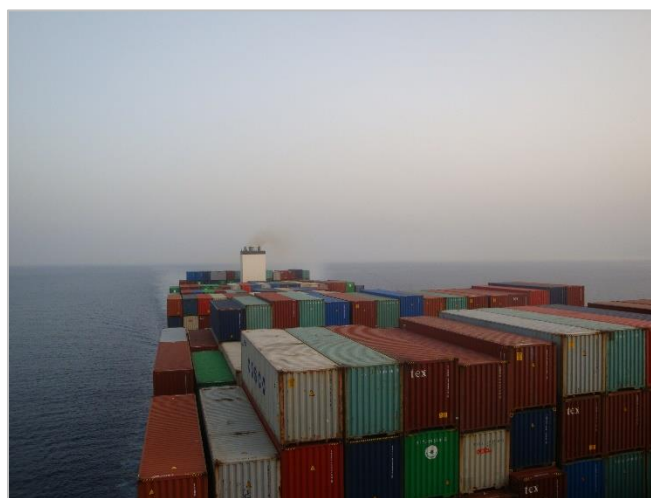
Διευθέτηση εμπορευματοκιβωτίων και θέση στοιβασίας [3], [4]

Ο τρόπος στοιβασίας των εμπορευματοκιβωτίων διαφέρει από πλοίο σε πλοίο. Υπάρχουν containerships όπου τα εμπορευματοκιβώτια στοιβάζονται εγκάρσιως, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν φορτώνονται και όταν ασφαρίζεται το φορτίο εντός αυτών.



Σχήμα 2.1 : Εγκάρσια διάταξη εμπορευματοκιβωτίων

Στα περισσότερα containerships όμως, η στοιβασία των εμπορευματοκιβωτίων είναι διαμήκης, δηλαδή κατά μήκος του πλοίου. Ο τρόπος αυτός στοιβασίας σε αντίθεση με τον προηγούμενο επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση των δυνάμεων που δημιουργούνται κατά την πλεύση σε κυματώδη θάλασσα και από το μέγιστο βάρος που μπορούν να σηκώσουν τα εμπορευματοκιβώτια.



Σχήμα 2.2 : Διαμήκη διάταξη εμπορευματοκιβωτίων

Τέλος, μια λιγότερο διαδεδομένη μέθοδος στοιβασίας είναι αυτή κατά την οποία ορισμένα εμπορευματοκιβώτια τοποθετούνται διαμήκως και άλλα εγκάρσιως επί του πλοίου. Σημειώνεται πως η μέθοδος αυτή απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή τόσο κατά την φόρτωση των εμπορευματοκιβωτίων, όσο και την κατανομή του βάρους εντός αυτών.



Σχήμα 2.3 : Μικτή διάταξη εμπορευματοκιβωτίων

Αναφορικά με τα συστήματα πρόσδεσης, οι δυνάμεις πρόσδεσης είναι ανάγκη να κατανέμονται με τον καλύτερο και πιο ομοιόμορφο τρόπο πάνω στο εμπορευματοκιβώτιο. Επιπλέον, το μήκος των αντίστοιχων συρματόσχοινων πρόσδεσης πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο μικρό.

Τα συρματόσκοινα πρόσδεσης αποδίδουν καλύτερα όταν η γωνία (κατακόρυφη) που σχηματίζουν με το κατάστρωμα είναι μεταξύ 30° και 60° . Επιπλέον συρματόσχοινα απαιτούνται όταν το παραπάνω εύρος γωνιών δεν μπορεί να επιτευχθεί.

Τέλος, η στοιβασία των εμπορευματοκιβωτίων θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρηθεί χαμηλό κέντρο βάρους. Δηλαδή, τα πιο βαριά εμπορευματοκιβώτια να είναι τοποθετημένα χαμηλά και τα πιο ελαφριά ψηλότερα. Διαφορετικά, εκτός του ότι το πλοίο δεν θα είναι ευσταθές, υπάρχει ο κίνδυνος της καταστροφής κάποιου εμπορευματοκιβωτίου που βρίσκεται σε χαμηλότερη σειρά.

Όσον αφορά τη διαμήκη τοποθέτηση των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα του πλοίου αξίζει να αναφερθεί πως, επειδή οι δυνάμεις σε κυματώδεις θάλασσες είναι μεγαλύτερες ως προς την εγκάρσια κατεύθυνση του πλοίου παρά κατά την διαμήκη, η αντοχή σχεδιάζεται να είναι μεγαλύτερη στις διαμήκεις πλευρές των εμπορευματοκιβωτίων απ' ό,τι στις εγκάρσιες.

Πιο αναλυτικά, ισχύει ότι τα εμπορευματοκιβώτια τοποθετούνται ομοιόμορφα σε στήλες (στοίβες-stacks) μέσα στα κύτη (holds) από τον πυθμένα μέχρι τα καλύμματα κυτών, γλιστρώντας στους οδηγούς ολισθήσεως κελιών (cell guides) και έξω από το κύτος, επάνω στα καλύμματα των κυτών μέχρι το επάνω μέρος της στοίβας. Ο τρόπος διευθέτησεως των εμπορευματοκιβωτίων είναι συγκεκριμένος και κάθε εμπορευματοκιβώτιο χαρακτηρίζεται από τρεις συντεταγμένες : Bay, Row, Tier.

α) “Bay” : Θέση που καταλαμβάνει το εμπορευματοκιβώτιο κατά τη διαμήκη διεύθυνση του πλοίου σύμφωνα με το αριθμημένο σχέδιο του εκάστοτε “Bay”. Τα “Bay” αριθμούνται κατά το διάμηκες του πλοίου από την πλώρη προς την πρύμνη.

β) “Row” : Θέση του εμπορευματοκιβωτίου κατά την εγκάρσια κατεύθυνση του πλοίου. Ουσιαστικά κάθε “Row” προσδιορίζει την εκάστοτε στήλη – στοίβα στο εκάστοτε Bay. Η αρίθμηση πραγματοποιείται δεξιά και αριστερά από τον διαμήκη άξονα συμμετρίας (centerline). Δεξιά της centerline είναι οι μονοί, ενώ στα αριστερά οι ζυγοί αριθμοί. Όσα εμπορευματοκιβώτια τοποθετούνται σε στοίβα επί της centerline, αυτή φέρει τον αριθμό 00.

γ) “Tier” : Κατακόρυφη θέση του εμπορευματοκιβωτίου στην εκάστοτε στήλη. Η αρίθμηση πραγματοποιείται από τον πυθμένα του κύτους προς τα πάνω.



Σχήμα 2.4 : Σύστημα συντεταγμένων Bay, Row, Tier

Στοιβασία / ασφάλιση [4]

Στη στοιβασία των εμπορευματοκιβωτίων συμπεριλαμβάνεται και η ασφάλιση / έχμαση. Τα εμπορευματοκιβώτια ασφαλιζονται βάσει των οδηγιών εχμάσεως κάθε πλοίου. Πληροφορίες, οδηγίες και σχέδια σχετικά με τη στοιβασία και την ασφάλιση των εμπορευματοκιβωτίων περιγράφονται στο εγχειρίδιο “Cargo Securing Manual». Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα μέσω λογισμικού προγράμματος (lashing computing) να επιλεγθεί η καταλληλότερη έχμαση της κάθε στοίβας και να εξαχθούν διάφορα πορίσματα ικανά να βοηθήσουν τον υπεύθυνο στοιβασίας να αποφασίσει σωστά σχετικά με την φόρτωση του πλοίου.

Εγχειρίδιο Ασφαλίσεως Φορτίου (Cargo Securing Manual – CSM) [2], [4], [5]

Εξαιτίας της δραματικής αύξησης της συχνότητας απώλειας εμπορευματοκιβωτίων τη δεκαετία του 1980, η ναυσιπλοΐα σε ανοικτές θάλασσες παρουσίαζε υψηλό κίνδυνο και σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές ανησυχίες ώθησαν, το 1998, στην τροποποίηση της SOLAS. Συμπεριελήφθησαν οδηγίες καθιερώσεως και χρήσεως του *Εγχειριδίου Ασφαλίσεως Φορτίου (Cargo Securing Manual)* και του τρόπου επικοινωνίας πλοίου – ξηράς κατά τη φόρτωση και την εκφόρτωση. Το CSM του κάθε πλοίου ως σκοπό έχει να δώσει τις σχετικές πληροφορίες στον πλοίαρχο για τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η ασφάλιση / έχμαση του φορτίου. Περιλαμβάνει μεταξύ των άλλων τις μεθόδους υπολογισμού και τους πίνακες με τους

οποίους θα υπολογισθούν οι δυνάμεις που αναμένεται να επηρεάσουν το φορτίο κατά τη μεταφορά του και δίνει πληροφορίες για τις δυνάμεις που ενεργούν σε κάθε μονάδα φορτίου.

Το CSM είναι αναγκαίο να επικυρωθεί από την Αρχή ή τον αναγνωρισμένο νηογνώμονα και από την Αρχή της σημαίας, την οποία φέρει το πλοίο. Ακόμη θα πρέπει να είναι συνεχώς στο πλοίο και να επιδεικνύεται όταν ζητηθεί από τους αρμόδιους επιθεωρητές.

Ο πλοίαρχος ακολουθώντας τις οδηγίες του CSM θα πρέπει να βεβαιωθεί ότι τα απαραίτητα μέσα ασφαλίσεως είναι σωστά συντηρημένα και επαρκή και ότι οι μονάδες φορτίου είναι σε καλή κατάσταση για μεταφορά, πριν την έναρξη της φορτώσεως, να τηρήσει τις γενικές αρχές της ασφαλούς στοιβασίας λαμβάνοντας υπόψη τις προβλεπόμενες καιρικές συνθήκες στο συγκεκριμένο ταξίδι και να ελέγχει σε όλη τη διάρκεια του ταξιδιού ότι οι μονάδες φορτίου είναι σωστά ασφαλισμένες.

Τα Εγχειρίδια Ασφαλίσεως Φορτίου χωρίζονται σε τέσσερα κεφάλαια (Chapters). Το πρώτο παρέχει γενικές πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο εφαρμογής και χρήσης του. Στο δεύτερο περιλαμβάνεται λεπτομερής λίστα όλων των σταθερών και φορητών εξαρτημάτων ασφάλισης του φορτίου, ενώ στο τρίτο και στο τέταρτο, περιλαμβάνονται πληροφορίες/οδηγίες στοιβασίας και ασφάλισης φορτίων απροκαθοριστών, ημιπροκαθορισμένων προδιαγραφών και προκαθορισμένων προδιαγραφών αντίστοιχα. Τέλος, διαθέτει και δώδεκα παραρτήματα που αφορούν φορτία που από μόνα τους έχει αποδειχθεί ότι αποτελούν πηγή ενδεχομένου κινδύνου.

Μέθοδοι ασφαλίσεως / έχμασεως [4], [6], [7]

Η τοποθέτηση των εμπορευματοκιβωτίων εντός των κυτών μπορεί να χαρακτηριστεί ως συμπαγής μιας και αυτά στοιβάζονται γλιστρώντας εντός των cell guides. Στο κατάστρωμα παρόλα αυτά είναι αναγκαία η ασφάλιση τους, μιας και αναπτύσσονται δυνάμεις, τόσο λόγω των κινήσεων του πλοίου όσο και λόγω του ανέμου.

Όταν δεν υπάρχουν μόνιμοι οδηγοί κελιών στο κατάστρωμα (προέκταση αυτών που υπάρχουν στα κύτη), οι γωνίες στηρίξεως του πρώτου εμπορευματοκιβωτίου της στήλης ασφαίζονται στις μόνιμες βάσεις-εσοχές που υπάρχουν στο κατάστρωμα. Η τυπική μορφή έχμασης πραγματοποιείται με χαλύβδινες βέργες έχμασης οι οποίες ενώνουν τους δακτύλιους του καταστρώματος με τις γωνίες στηρίξεως του εμπορευματοκιβωτίου. Τα εμπορευματοκιβώτια ασφαίζονται μεταξύ τους με περιστρεφόμενα κλειδιά (twistlocks).

Στις πλευρικές στήλες, εκεί όπου οι δυνάμεις εξαιτίας του ανέμου είναι εντονότερες χρησιμοποιείται επιπλέον έχμαση.

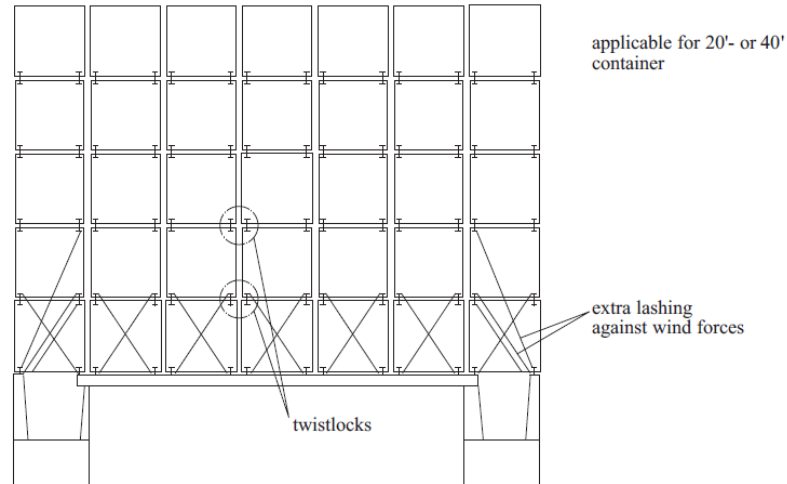
Οι τέσσερις κυριότερες μέθοδοι ασφαλίσεως είναι :

α) Η ασφάλιση των εμπορευματοκιβωτίων γίνεται ανά στήλη, δίχως να υπάρχει καμία έχμαση μεταξύ των στηλών.

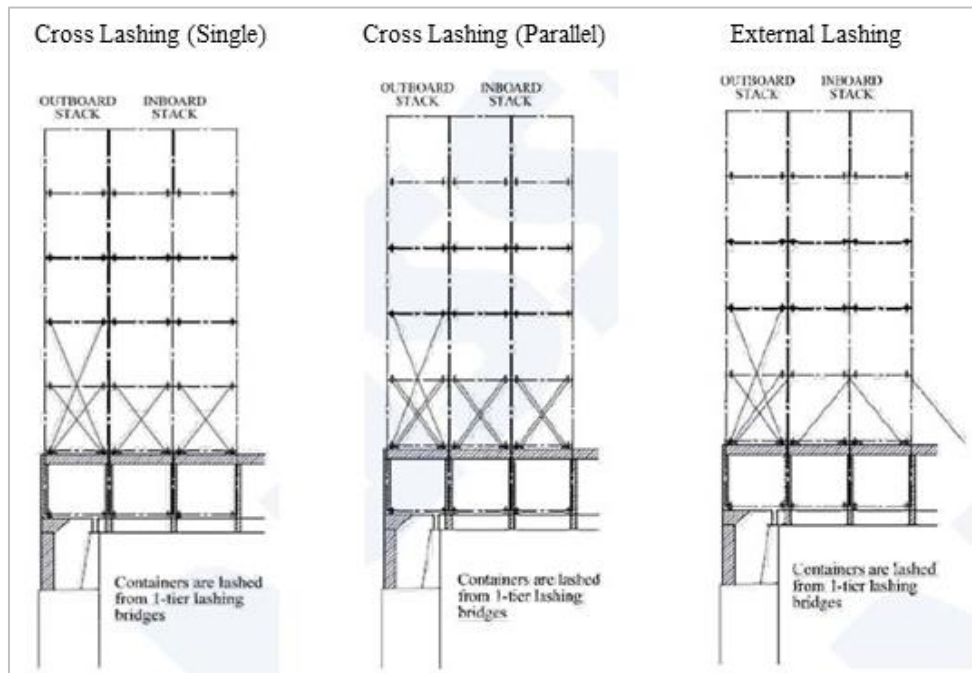
β) Η διαγώνια ασφάλιση, όπου η έχμαση πραγματοποιείται διαγώνια από εμπορευματοκιβώτια διαφορετικής στήλης.

γ) Η συμπαγής ασφάλιση σε στοίβα (block stowage securing and stabilization). Εδώ η κάθε στήλη του κάθε bay συνδέεται με τις υπόλοιπες, δημιουργώντας μια συμπαγή μάζα σε όλο το πλάτος του πλοίου.

δ) Η ασφάλιση με μόνιμους οδηγούς κελιών καθ' ύψος στο κατάστρωμα (deck cell guides) καθ' όλο το ύψος της στοιβάς. Συνήθως τέτοιες διατάξεις φέρουν στο κατάστρωμα μικρού μεγέθους containerships όπου απουσιάζουν τα καλύμματα κυτών.



Σχήμα 2.5 : Βασική διευθέτηση συστήματος έχμασης



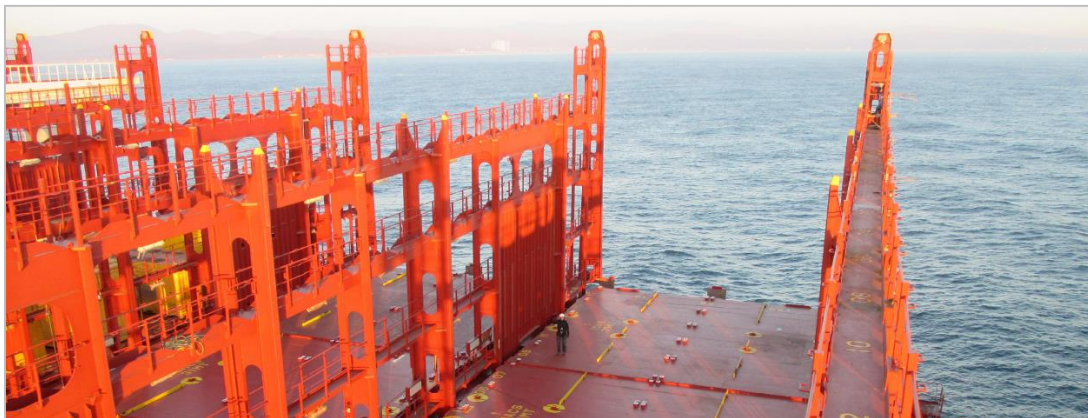
Σχήμα 2.6 : Μέθοδοι ασφαλίσεως εμπορευματοκιβωτίων

Στα μεγάλα μεγέθους containerships, όπου μεταξύ των άλλων χαρακτηριστικών, χαρακτηρίζονται και από υψηλό GM (μετακεντρικό ύψος) και η στοιβάσια 6 και πάνω σειρών από εμπορευματοκιβώτια στο κατάστρωμα είναι συνήθης, χρησιμοποιείται γέφυρα πρόσδεσης (lashing bridge).

Η γέφυρα πρόσδεσης αποτελεί μια χαλύβδινη κατασκευή που εδράζεται κατά το εγκάρσιο του καταστρώματος του πλοίου μεταξύ των Bays των 40 ποδών (ft). Αυτή η γέφυρα επιτρέπει στις δύο, τρεις ή και τέσσερις σειρές (Tiers) των εμπορευματοκιβωτίων να ασφαλιστούν σε αυτήν μέσω συρματόσχοινων πρόσδεσης και περιστρεφόμενων σφιγκτήρων (turnbuckles), ενώ η υπόλοιπη στοίβα (4^η ή 5^η σειρά και πάνω) ασφαλίζεται μέσω ειδικών περιστρεφόμενων κλειδιών (twistlocks). Έτσι οι γέφυρες εχμάσεως επιτρέπουν στα σημεία αγκιστρώσεως κάθε στοίβας να μεταφέρονται ψηλότερα από το κύριο κατάστρωμα με αποτέλεσμα η έχμαση να είναι πιο αποτελεσματική στη μείωση ροπής ανατροπής που δρα πάνω στη στοίβα όταν το πλοίο υποβάλλεται σε κίνηση διατοιγισμού.

Η χρήση των γεφυρών πρόσδεσης μεταξύ των bays των 40 ποδών (ft) έχει σαν αποτέλεσμα τη μερική αξιοποίησή τους από τα εμπορευματοκιβώτια των 20 ποδών (ft) και για αυτό είναι αναγκαία και η χρήση συμβατικού συστήματος πρόσδεσης. Στις μέρες μας όμως υπάρχει η δυνατότητα με τη χρήση προγραμμάτων σε Η/Υ (lashing computing) να υπολογιστούν τα δυναμικά φορτία που δρουν στις στοίβες και να ελεγχθεί η αντοχή τους για κάθε σενάριο καιρού. Τα εμπορευματοκιβώτια του ίδιου μεγέθους αρμόζει να τοποθετούνται μαζί έτσι ώστε να διευκολύνεται η ασφάλισή τους με τις σιδερόβεργες εχμάσεως και τα twistlocks.

Σε μικρότερα πλοία, από την άλλη μεριά, δεν απαιτείται γέφυρα πρόσδεσης και τα εμπορευματοκιβώτια της κάθε στοίβας ασφαλίζονται μέσω των περιστρεφόμενων κλειδιών (twistlocks) μεταξύ τους. Η πρόσδεσή τους γίνεται στο κατάστρωμα ή στα καλύμματα κοιτών μέσω συρματόσχοινων πρόσδεσης και περιστρεφόμενων σφιγκτήρων (turnbuckles). Ο σχεδιαστής που είναι υπεύθυνος για τη διάταξη και οργάνωση του συστήματος έχμασης καθορίζει τον αριθμό των συρματόσχοινων πρόσδεσης. Τυποποίηση ακολουθείται τόσο στα μήκη τους, όσο και στα σημεία πρόσδεσής τους στο κατάστρωμα.



Σχήμα 2.7 : Γέφυρα πρόσδεσης (Lashing Bridge)

Η ελαστική επιμήκυνση που δέχεται ένα συρματόσχοινο, ύστερα από φόρτιση μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση [8] :

$$\Delta L = \frac{P \cdot L}{A \cdot E}$$

Όπου :

ΔL , επιμήκυνση

P , φορτίο

L , μήκος συρματόσχοινου

A , μεταλλική επιφάνεια διατομής

E , μέτρο ελαστικότητας

Η ελαστική επιμήκυνση είναι κατά προσέγγιση γραμμική συνάρτηση μεταξύ 20% και 65% της αντοχής που ορίζει ο κατάλογος του κατασκευαστή. Φυσικά, μπορεί να υπάρξουν φθορές στο συρματόσχοινο με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του, αλλά και την αύξηση του μήκους του.

Μέσα ασφαλίσεως – εχμάσεως εμπορευματοκιβωτίων [4], [9]

Τα συστήματα ασφαλίσεως των εμπορευματοκιβωτίων στις στήλες διακρίνονται στον μόνιμο εξοπλισμό, που είναι συγκολλημένος με την μεταλλική κατασκευή του πλοίου (π.χ. lashing plates, βάσεις στηρίξεως – dovetail foundations κ.λπ.) και τον φορητό εξοπλισμό εχμάσεως (π.χ. σιδηρόβεργες εχμάσεως, περιστρεφόμενα κλειδιά κ.λπ.). Κάθε containership οφείλει να φέρει τα κατάλληλα μέσα ασφαλίσεως φορτίου, βάσει των αναγκών του, αλλά και του κατασκευαστή. Ορισμένα από αυτά, μαζί με κάποιες τυπικές σημειώσεις παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες :

Πίνακας 2.1 : Σταθερός-μόνιμος εξοπλισμός εχμάσεως

<i>Όνομασία</i>	<i>Λειτουργία</i>	<i>Φωτογραφία</i>
Ισόπεδη υποδοχή (flush socket)	Σημείο στήριξης των περιστρεφόμενων κλειδιών της βάσης.	
Υψωμένη υποδοχή (raised socket)	Σημείο στήριξης των περιστρεφόμενων κλειδιών της βάσης.	
Σταθερός δακτύλιος (lashing plate, pad-eye)	Μεταλλική διαμόρφωση στο κατάστρωμα ή στα καλύμματα κυτών όπου ασφαρίζεται το κάτω άκρο του εντατήρα.	
Πτυσσόμενος δακτύλιος σε μορφή δακτυλίου (D-Ring)	Εναλλακτική διαμόρφωση δακτυλίου για να ασφαρίζει το κάτω άκρο του εντατήρα.	
Βάση στηρίξεως Ε/Κ (dovetail foundation)	Βάση μέσα στην οποία γλιστρά το περιστρεφόμενο κλειδί.	
Σταθερός κώνος στοιβάσεως (fixed stacking cone)	Κωνική διαμόρφωση αποτροπής της οριζόντιας μετακίνησης Ε/Κ 20' που έχουν τοποθετηθεί σε οδηγούς κελιών των 40'.	
Οδηγός μισού Bay (mid-bay Guide)	Μεταλλικός οδηγός αποτροπής της εγκάρσιας μετακίνησης Ε/Κ 20' σε οδηγούς 40'. Τοποθετείται στο επίπεδο του πυθμένα κυτών.	
Δακτύλιος τύπου breach base (container lashing point)	Εναλλακτικό σημείο εφαρμογής του κάτω άκρου του εντατήρα.	

Πίνακας 2.2 : Φορητός εξοπλισμός εχμάσεως

Όνομασία	Λειτουργία	Φωτογραφία
Σιδερόβεργα εχμάσεως (lashing rod)	Βέργα ασφαλίσεως των στηλών των Ε/Κ στο κατάστρωμα. Χρησιμοποιείται μαζί με εντατήρα.	
Προέκταση σιδερόβεργας (extension piece)	Για επιμήκυνση σιδερόβεργας εχμάσεως όταν ασφαλίζονται Ε/Κ High cube 9'6" (2,896 mm).	
Εντατήρας (turnbuckle)	Για σύνδεση και ρύθμιση της τάνσης μεταξύ της σιδερόβεργας εχμάσεως και των σταθερών δακτυλίων.	
Κώνος στοιβάσεως (stacking cone)	Τοποθετείται μεταξύ Ε/Κ σε μία στήλη και στην υποδοχή της γωνίας στηρίξεως.	
Περιστρεφόμενο κλειδί (twistlock)	Τοποθετείται μεταξύ Ε/Κ σε μία στήλη και στην υποδοχή της γωνίας στηρίξεως.	
Ημιαυτόματο περιστρεφόμενο κλειδί (SATL)	Τοποθετείται μεταξύ Ε/Κ σε μία στήλη και στην υποδοχή της γωνίας στηρίξεως.	
Πλήρως αυτόματο περιστρεφόμενο κλειδί (Fully automatic twistlock-FAT)	Τοποθετείται μεταξύ Ε/Κ σε μία στήλη και στην υποδοχή της γωνίας στηρίξεως.	
Περιστρεφόμενο κλειδί βάσεως (κώνος δαπέδου στηρίξεως Ε/Κ) (deck mount twistlock)	Για να συνδέει τη βάση του Ε/Κ με το κατάστρωμα και τα καλύμματα κυτών.	

Είδη Σχοινιών Πρόσδεση [10]

Εκτός από τα διάφορα μέσα ασφάλισης του φορτίου που περιγράφηκαν παραπάνω, μεγάλη σημασία και προσοχή είναι απαραίτητη να αποδοθεί στα σχοινιά και τα συρματόσχοινα, τα οποία συμμετέχουν στην ολοκληρωμένη πρόσδεση – προστασία του φορτίου. Στο κομμάτι της στοιβασίας και ασφάλισης του φορτίου, γίνεται η εξής διάκριση σχοινιών :

- Συνθετικά σχοινιά (φυσικά και τεχνητά) – Fiber ropes
- Συρματόσχοινα – Wire ropes
- Σύνθετα σχοινιά – Composite or mixed ropes

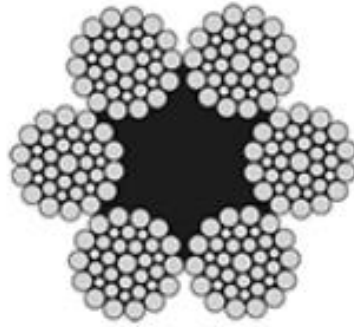
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατασκευής των σχοινιών. Διαχωρίζονται κυρίως σε δύο κατηγορίες : τα στριφτά σχοινιά (laid – twisted ropes) κατά μία διεύθυνση και τα πλεκτά σχοινιά (braided ropes), γεγονός που σε αρκετές περιπτώσεις καθορίζει και το πεδίο χρήσης τους. Τα στριφτά σχοινιά για παράδειγμα είναι εκείνα που χρησιμοποιούνται, ως επί το πλείστον, για την ασφάλιση του φορτίου κατά τη μεταφορά του.

Η χρήση των φυσικών συνθετικών σχοινιών στις μέρες μας έχει περιοριστεί αρκετά, ενώ πλέον είναι σπάνια η πρόσδεση του φορτίου με αυτά, μιας και παρουσιάζουν ευαισθησία σε οξέα, διαλυτικά και αλκάλια. Επιπλέον, η μεταβολή της θερμοκρασίας συμβάλλει καταλυτικά στη μεταβολή του μήκους τους. Όταν απορροφούν υγρασία, διαστέλλονται και όταν στεγνώνουν, συρρικνώνονται. Έτσι, μοιάζει δύσκολο να διατηρηθούν σταθερές εντάσεις στα σχοινιά αυτά, γι αυτό η χρήση τους περιορίζεται εντός κλειστών μονάδων μεταφοράς φορτίου (όπου η έκθεσή τους σε χημικά και υγρασία είναι μειωμένη).

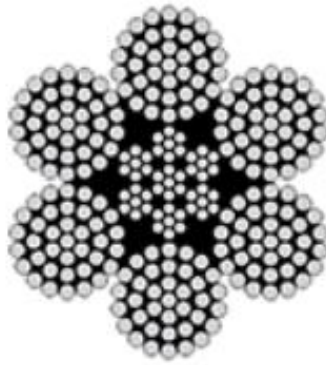
Εν αντιθέσει με τα φυσικά συνθετικά σχοινιά, τα τεχνητά έχουν καλή συμπεριφορά στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι πρώτες ύλες για τα σχοινιά αυτά είναι συνήθως το πολυέστερ, το πολυαμίδιο, το πολυπροπυλένιο και το πολυαιθυλένιο. Είναι ιδανικά για την ασφάλιση μεταφοράς ελαφριών φορτίων, όπως τροχοφόρα μέσα σε εμπορευματοκιβώτια, μικρές συστάδες κουτιών και παλλετών, αλλά έχουν σχετικά υψηλό κόστος.

Τα συρματόσχοινα αποτελούν συρμάτινα πολύκλινα σχοινιά τα οποία έχουν περιστραφεί. Ο κάθε συρμάτινος κλώνος συντίθεται από έναν αριθμό μεμονωμένων καλωδίων. Ο αριθμός των καλωδίων σε κάθε κλώνο είναι αυτός που προσδιορίζει την ανθεκτικότητα, αλλά και το κόστος του. Μια συνήθης κατασκευή συρματόσχοινου αποτελείται από έξι κλώνους των δεκαεννιά (ή τριανταεφτά) καλωδίων ο καθένας και με ένα συνθετικό πυρήνα για να γεμίσει το κενό μεταξύ των κλώνων.

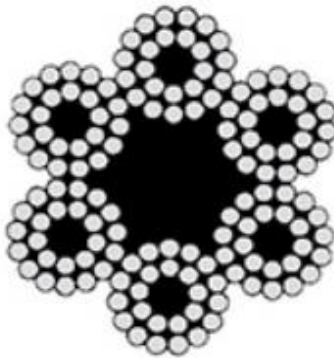
Στη συνέχεια παρουσιάζονται διατάξεις «σωμάτων» διαφόρων συρματόσχοινων [11] :



Σχήμα 2.8 : Διάταξη 6 x 36 με συνθετικό πυρήνα
Ιδανικός συνδυασμός ευκαμψίας και αντοχής σε τριβή.



Σχήμα 2.9 : Διάταξη 6 x 37 με χαλύβδινο πυρήνα
Εξαιρετικά εύκαμπτο.



Σχήμα 2.10 : Διάταξη 6 x 24 με 7 συνθετικούς πυρήνες
Εξαιρετικά εύκαμπτο αλλά με μικρότερη αντοχή.

Τέλος, ένα ακόμα είδος σκοινιών είναι τα σύνθετα σκοινιά. Πρόκειται για σκοινιά που αποτελούνται από κάποιο συνθετικό υλικό και συρματόσκοινο. Τα σκοινιά αυτά αν και έχουν την ίδια αντοχή με ένα συνθετικό σκοινί, έχουν όμως καλύτερο χειρισμό. Το σύρμα που περιέχει ενισχύει την ακαμψία του σκοινιού και επίσης δεν το αφήνει να «στρίψει».

Ειδικά προβλήματα κατά τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων [4]

Κατά τη μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων, αν δεν ακολουθηθούν οι σχετικές οδηγίες που αναφέρονται στο Εγχειρίδιο Ασφαλίσεως Φορτίου, μπορεί να προκληθούν τα εξής :

α) Υπερφόρτωση των καλυμμάτων κυτών, της στοίβας και του συστήματος έγχυσης μπορεί να προκληθεί αν το μέγιστο βάρος της στήλης υπερβεί ένα προκαθορισμένο όριο.

β) Όταν τα περιστρεφόμενα κλειδιά δεν είναι κλειδωμένα όπως αρμόζει, αλλά και όταν η κατανομή του βάρους στη στήλη δεν έχει γίνει σύμφωνα με το εγχειρίδιο, μπορεί να προκληθεί υπερφόρτωση της στοιβασίας και του εξοπλισμού εχμάσεως.

γ) Όταν τα έγχυματα δεν είναι ασφαλισμένα στα κατάλληλα σημεία, ενδέχεται να προκληθεί υπερφόρτωση στα περιστρεφόμενα κλειδιά.

Επίσης, κοινή συνέπεια των παραπάνω είναι ότι τα εμπορευματοκιβώτια μπορούν να υποστούν ζημιές ή και να έχουμε απώλεια τους, στη θάλασσα.

δ) Σε περίπτωση υπέρβασης του ορίου, που προβλέπεται στο εγχειρίδιο, του εγκάρσιου μετακεντρικού ύψους (GM_0), μπορεί να αναπτυχθούν υψηλές εγκάρσιες επιταχύνσεις, υπερφόρτωση της στοίβας και του εξοπλισμού και ακολούθως ζημιά στα εμπορευματοκιβώτια.

Στα ειδικά προβλήματα συγκαταλέγεται και το φαινόμενο του παραμετρικού διατοιχισμού (Parametric rolling). Ο παραμετρικός διατοιχισμός παρατηρείται κυρίως στα πολύ μεγάλα containerships (VLCVs). Οφείλεται στη μεταβολή της ευστάθειας ανάμεσα στη θέση του πλοίου στην κορυφή και στην κοιλάδα του κύματος. Παραμετρικός διατοιχισμός μπορεί να συμβεί στις παρακάτω περιπτώσεις :

- Η περίοδος συνάντησης είναι περίπου ίση με την ιδιοπερίοδο διατοιχισμού του πλοίου. Η ελάχιστη τιμή της ευστάθειας παρατηρείται μια φορά σε κάθε περίοδο διατοιχισμού.
- Η περίοδος συνάντησης είναι περίπου η μισή από την ιδιοπερίοδο διατοιχισμού του πλοίου (λόγος συνάντησης 1:2). Η ελάχιστη τιμή της ευστάθειας παρατηρείται δυο φορές σε κάθε περίοδο διατοιχισμού.

Συνολικά και τα δύο αυτά φαινόμενα αποτελούν περιπτώσεις συντονισμού, με βασική αιτία δημιουργίας την παρουσία ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μοχλοβραχίονα επαναφοράς. [12]

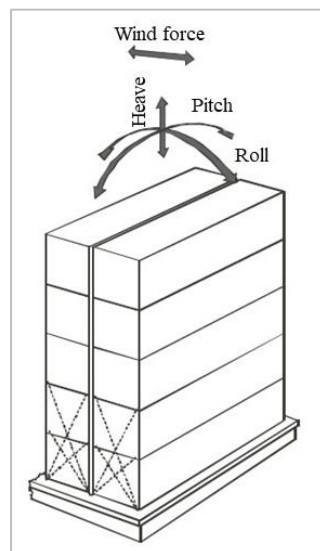
Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι μεγάλες καταπονήσεις στην κατασκευή και ειδικά στα τμήματα της πλώρης και της πρύμνης, σοβαρού επιπέδου καταπονήσεις και ζημιά στα εμπορευματοκιβώτια, αλλά και στο σύστημα έγχυσής τους.



Σχήμα 2.11 : Μετατόπιση εμπορευματοκιβωτίων λόγω έντονων κυματισμών

Είδη Αστοχίας των Συστημάτων Πρόσδεσης [7]

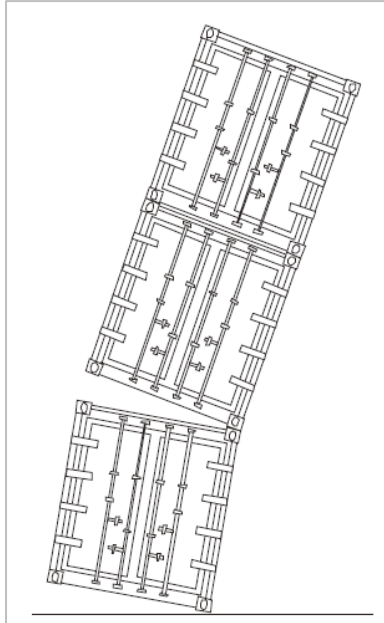
Γενικά, ένα πλοίο το οποίο βρίσκεται εν πλω υπόκειται σε τρεις βασικές κινήσεις : διατοιχισμό (roll), προνευτασμό (pitch) και κατακόρυφη ανύψωση (heave). Αυτές οι κινήσεις προκαλούν αντίστοιχες επιταχύνσεις και συνεπώς δυνάμεις, που έχουν επίδραση στα πλαίσια των εμπορευματοκιβωτίων, αλλά και στα συστήματα πρόσδεσής τους, πάνω στο κατάστρωμα. Από τις τρεις, η επικρατέστερη υπαίτια κίνηση που δημιουργεί υπερφόρτιση στα εμπορευματοκιβώτια και στα συστήματα πρόσδεσής τους, είναι ο διατοιχισμός.



Σχήμα 2.12 : Κινήσεις roll, heave, pitch

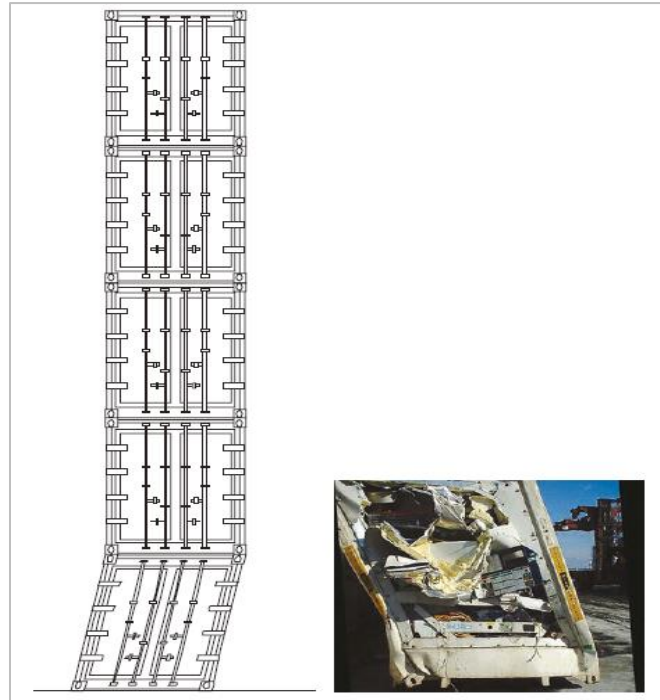
Από τις δυνάμεις που ασκούνται σε ένα εμπορευματοκιβώτιο και στα συστήματα πρόσδεσής του ως συνέπεια των παραπάνω κινήσεων, η δύναμη αποκόλλησης είναι η δύναμη ανατροπής η οποία δρα με τρόπο που προκαλεί την αποκόλληση των περιστρεφόμενων κλειδίων από τις

αντίστοιχες γωνίες πρόσδεσης (corner fittings ή twistlocks). Αν το πλοίο υποβληθεί σε μεγάλης έντασης κίνηση διατοιχισμού και εμφανισθεί μεγάλη δύναμη αποκόλλησης, τότε είναι πιθανό να αποκολληθούν τα twistlocks από τις γωνίες του εμπορευματοκιβωτίου ή να σπάσουν στο πιο αδύναμο σημείο τους. Ακόμη, οι γωνίες του εμπορευματοκιβωτίου ενδέχεται να σπάσουν και να ξεκολλήσουν από το υπόλοιπο σώμα του.



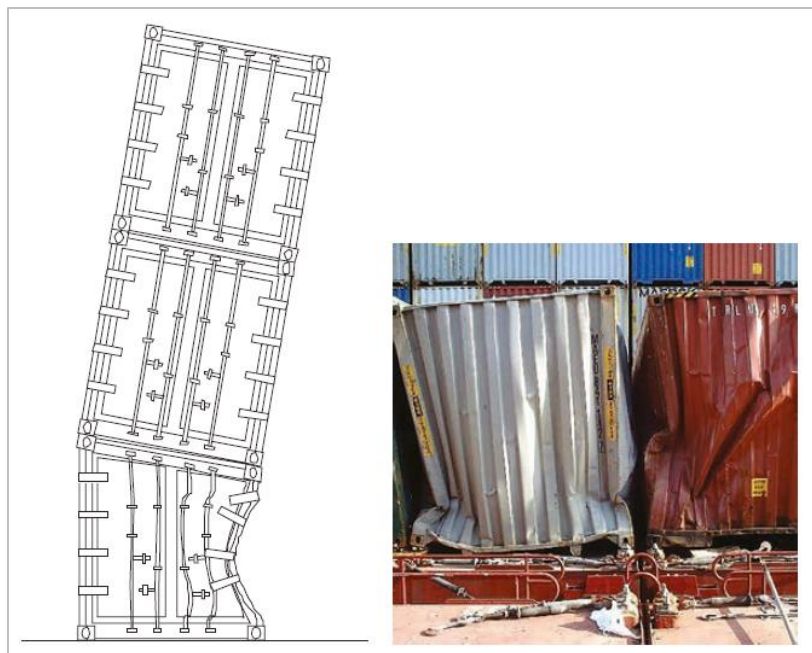
Σχήμα 2.13 : Ροπή ανατροπής ή δύναμη αποκόλλησης στις γωνίες πρόσδεσης

Επιπροσθέτως, στην κατάσταση έντονου διατοιχισμού, αν τα εμπορευματοκιβώτια τα οποία έχουν στοιβαχθεί σε ψηλές σειρές είναι βαρύτερα από αυτά που βρίσκονται χαμηλότερα, τότε δημιουργείται στα πλαίσια των χαμηλότερων μία δύναμη παραμόρφωσης, ανάλογη της έντασης της κίνησης διατοιχισμού.



Σχήμα 2.14 : Δύναμη παραμόρφωσης στο πλαίσιο του κατώτερου εμπορευματοκιβωτίου

Υψηλό μετακεντρικό ύψος GM, ιδιαίτερα αν αυτό συνοδεύεται και από κίνηση διατοιχισμού μικρής περιόδου, εντείνει τις δυναμικές φορτίσεις. Ως συμπέρασμα προκύπτει πως όλες οι φορτίσεις που προαναφέρθηκαν εντείνουν τις θλιπτικές και εντατικές δυνάμεις που δρουν στις γωνίες πρόσδεσης. Έντονες φορτίσεις ενδέχεται να οδηγήσουν σε κατασκευαστική αστοχία του ίδιου του εμπορευματοκιβωτίου.



Σχήμα 2.15 : Μεγάλη θλιπτική φόρτιση στους στήλους του εμπορευματοκιβωτίου που οδήγησε σε κατάρρευση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 ΣΤΟΙΒΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΙΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ – CSS CODE [4]

Το Κεφάλαιο VI της Διεθνούς Συμβάσεως της SOLAS 74 “Carriage of Cargoes” είχε ως σκοπό την παρουσίαση των ειδικών απαιτήσεων που σχετίζονταν με τη μεταφορά των σιτηρών και των ασφαλών πρακτικών για τη στοιβασία και ασφάλισή τους. Από το 1991 που ακολούθησαν τροποποιήσεις, η SOLAS συμπεριέλαβε όλους τους τύπους των φορτίων που μεταφέρονται σε χύδην μορφή, εκτός των υγρών και υγραερίων. Το 1994 συμπεριελήφθησαν κανονισμοί που αφορούν τα φορτία-μονάδες (εμπορευματοκιβώτια, παλέτες κ.λπ.). Τέλος, το 1998 έλαβαν χώρα οι οδηγίες καθιερώσεως και χρήσεως του Εγχειριδίου Ασφαλίσεως Φορτίου (Cargo Securing Manual – CSM). Έπειτα από οδηγίες της Επιτροπής Ναυτικής Ασφάλειας (Maritime Safety Committee – MSC), αναπτύχθηκε ο Κώδικας Ασφαλούς Πρακτικής για τη Στοιβασία και Ασφάλιση Φορτίου (Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing – CSS code).

Στο Παράρτημα (Annex) 2 του Κώδικα CSS, δίνονται οδηγίες για την προετοιμασία του CSM. Το CSM του κάθε πλοίου, όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχει ως στόχο την παροχή, στον πλοίαρχο, των κατάλληλων πληροφοριών σχετικά με την προβλεπόμενη ασφάλιση/έχμαση του φορτίου.

Όπως όλα τα σχετικά εγχειρίδια, που οι διάφοροι κανονισμοί απαιτούν να έχει στη διάθεσή του ένα πλοίο, έτσι και το CSM θα πρέπει να είναι επικυρωμένο σύμφωνα με τον κανονισμό του IMO: IMO / MSC.1 / Circ. 1353 «Revised guidelines for the preparation of the Cargo Securing Manual» (υιοθετήθηκε 30 Ιουνίου 2010), με τον CSS Code, με τις αποφάσεις του IMO A.533 (13) και A.581 (14) και με τις απαιτήσεις των Νηογυμνώνων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέθοδοι υπολογισμού φορτίσεων του συστήματος πρόσδεσης φορτίων όπως αυτοί περιγράφονται στο Παράρτημα (Annex) 13 του Κώδικα CSS. Έπειτα αναφέρεται το περιεχόμενο διαφόρων εργασιών που προέρχονται από τη σχετική βιβλιογραφία.

3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΒΑΣΕΙ CSS CODE [13]

Μέγιστη Φόρτιση Ασφαλείας (Maximum Securing Load)

Στον ακόλουθο πίνακα περιγράφονται τα όρια μέγιστης φόρτισης των διαφόρων τμημάτων του συστήματος πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων βάσει του ποσοστού του φορτίου κατάρρευσης.

Πίνακας 3.1 : Προσδιορισμός MSL ως προς τη φόρτιση κατάρρευσης

Υλικό	Μέγιστη Φόρτιση Ασφαλείας (MSL)
Κρίκοι – γάντζοι αλυσίδας, διχάλες πρόσδεσης καταστρώματος, πίροι, ράβδοι πρόσδεσης, δαχτυλίδια τύπου – D, εξαρτήματα γέφυρας πρόσδεση, σφικκτήρες μαλακού χάλυβα	50% φορτίου κατάρρευσης
Ινώδη σκοινιά	33% φορτίου κατάρρευσης
Συρματόσκοινα (μονής χρήσης)	80% φορτίου κατάρρευσης
Συρματόσκοινα (πολλαπλών χρήσεων)	30% φορτίου κατάρρευσης
Χαλύβδινη μετροταινία (μονής χρήσης)	70% φορτίου κατάρρευσης
Αλυσίδες	50% φορτίου κατάρρευσης
Ενισχυτικά – συστήματα πρόσδεσης	50% φορτίου κατάρρευσης

Συνεπώς, οι υπολογιζόμενες φορτίσεις (CS) είναι φορτίσεις που προκύπτουν από τις Μέγιστες Φορτίσεις Ασφαλείας διαιρεμένες με έναν συντελεστή ασφαλείας (safety factor).

$$CS = \frac{MSL}{safety\ factor}$$

Για τον υπολογισμό των φορτίων κατάρρευσης υπάρχουν αντίστοιχοι πίνακες υπολογισμού συναρτήσεων των γεωμετρικών στοιχείων των εξαρτημάτων.

3.2.1 ΑΠΛΟΠΟΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ (RULE OF THUMB)

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ως μια πρώτη προσέγγιση για την εκτίμηση των απαιτούμενων δυνάμεων του συστήματος πρόσδεσης των φορτίων. Βρίσκει εφαρμογή για πλοία οποιούδηποτε μεγέθους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η θέση των φορτίων, η ευστάθεια, η κατάσταση φόρτωσης κ.λπ.. Στην μέθοδο αυτή δεν συνυπολογίζονται οι εγκάρσιες επιδράσεις των υπό γωνία συρματόσχοινων πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων, ούτε η ανομοιογενή κατανομή των δυνάμεων πάνω σε αυτά.

Απαιτήσεις :

- Το σύνολο των *Μέγιστων Φορτίσεων Ασφαλείας* θα πρέπει να ισούται με το βάρος του φορτίου (οι μετρήσεις γίνονται σε *kN*).
- Οι εγκάρσιες γωνίες των συρματόσχοινων πρόσδεσης δεν πρέπει να ξεπερνούν τις 60° .
- Επιπλέον συρματόσχοινα σε γωνίες μεγαλύτερες των 60° είναι επιθυμητό να μπου αν πρόκειται να αποτρέψουν την ανατροπή, χωρίς όμως αυτά να λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς.

Οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε μια μονάδα μεταφοράς φορτίου κατά το διαμήκη, τον εγκάρσιο και κατακόρυφο άξονα δίνονται από τη σχέση :

$$F_{(x,y,z)} = m \cdot a_{(x,y,z)} + F_{w(x,y)} + F_{s(x,y)}$$

όπου,

$F_{(x,y,z)}$ = διαμήκεις, εγκάρσιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις

m = μάζα μονάδας μεταφοράς φορτίου

$a_{(x,y,z)}$ = διαμήκεις, εγκάρσιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις

$F_{w(x,y)}$ = διαμήκεις και εγκάρσιες δυνάμεις από την πίεση του αέρα

$F_{s(x,y)}$ = διαμήκεις και εγκάρσιες δυνάμεις από τις θαλάσσιες διαταραχές

(Γίνεται απλουστευμένη παραδοχή ότι οι επιδράσεις λόγω αέρα και κυμάτων ισούνται με 1 kN/m^2 η κάθε μία.)

Transverse acc. a_y in m/s^2										Longitud. acc. a_x
7.1	6.9	6.8	6.7	6.7	6.8	6.9	7.1	7.4		3.8
6.5	6.3	6.1	6.1	6.1	6.1	6.3	6.5	6.7		2.9
5.9	5.6	5.5	5.4	5.4	5.5	5.6	5.9	6.2		2.0
5.5	5.3	5.1	5.0	5.0	5.1	5.3	5.5	5.9		1.5
0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	L
7.6 6.2 5.0 4.3 4.3 5.0 6.2 7.6 9.2										
Vertical acc. a_z in m/s^2										
										in m/s^2

Σχήμα 3.1 : Βασικές επιταχύνσεις

Στις εγκάρσιες επιταχύνσεις a_y έχουν συνυπολογισθεί η βαρύτητα και οι κινήσεις διατοιχισμού και προνευτασμού.

Οι παραπάνω μετρήσεις ισχύουν για :

1. Λειτουργία πλοίου σε απεριόριστη περιοχή
2. Λειτουργία πλοίου κατά τη διάρκεια ολόκληρου έτους
3. Διάρκεια ταξιδιού 25 ημέρες
4. Μήκος πλοίου 100 m
5. Ταχύτητα υπηρεσίας $V_s = 15 \text{ knots}$
6. $B/GM \geq 13$ (B : πλάτος πλοίου, GM : μετακεντρικό ύψος)

Για πλοία με $L \neq 100 \text{ m}$ ή $V_s \neq 15 \text{ knots}$ ή $B/GM < 13$ οι επιταχύνσεις διορθώνονται κατάλληλα με συντελεστή από τον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 3.2 : Συντελεστές διόρθωσης για μήκος και ταχύτητα πλοίου

Length (m) \ Speed (knots)	Speed (knots)										
	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
9	1.20	1.09	1.00	0.92	0.85	0.79	0.70	0.63	0.57	0.53	0.49
12	1.34	1.22	1.12	1.03	0.96	0.90	0.79	0.72	0.65	0.60	0.56
15	1.49	1.36	1.24	1.15	1.07	1.00	0.89	0.80	0.73	0.68	0.63
18	1.64	1.49	1.37	1.27	1.18	1.10	0.98	0.89	0.82	0.76	0.71
21	1.78	1.62	1.49	1.38	1.29	1.21	1.08	0.98	0.90	0.83	0.78
24	1.93	1.76	1.62	1.50	1.40	1.31	1.17	1.07	0.98	0.91	0.85

Για συνδυασμούς μήκους – ταχύτητας που δεν προκύπτουν άμεσα από τον παραπάνω πίνακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω τύπος, όπου $V[knots]$ και $L[m]$:

$$Correction\ Factor = \left(\frac{0.345 \cdot V}{\sqrt{L}} \right) + \left(\frac{58.62 \cdot L - 1034.5}{L^2} \right)$$

Ο τύπος αυτός δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πλοία με μήκος μικρότερο των 50 *m* και μεγαλύτερο των 300 *m*.

Επίσης για πλοία με $B/GM < 13$, οι εγκάρσιες επιταχύνσεις διορθώνονται κατάλληλα με συντελεστή από τον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 3.3 : Συντελεστές διόρθωσης για $B/GM < 13$

<i>B/GM</i>	7	8	9	10	11	12	13 or above
On deck, high	1.56	1.40	1.27	1.19	1.11	1.05	1.00
On deck, low	1.42	1.30	1.21	1.14	1.09	1.04	1.00
Tween deck	1.26	1.19	1.14	1.09	1.06	1.03	1.00
Lower hold	1.15	1.12	1.09	1.06	1.04	1.02	1.00

3.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ – ΑΝΕΠΙΤΥΓΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Στη παρούσα μέθοδο συνυπολογίζεται και η δύναμη τριβής η οποία αποτρέπει την ολίσθηση των εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα του πλοίου. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται μερικοί συντελεστές τριβής (μ) ανάλογα με τα υλικά επαφής.

Πίνακας 3.4 : Συντελεστές τριβής

Υλικά σε επαφή	Συντελεστής τριβής, (μ)
Ξύλο με ξύλο, υγρό ή στεγνό	0.4
Χάλυβας με ξύλο ή λάστιχο	0.3
Χάλυβας με χάλυβα, στεγνός	0.1
Χάλυβας με χάλυβα, υγρός	0.0

Οι υπολογισμοί ισορροπίας δυνάμεων είναι προτιμότερο να γίνονται για :

- Εγκάρσια ολίσθηση προς την αριστερή και δεξιά πλευρά του πλοίου (port – starboard)
- Εγκάρσια ανατροπή προς την αριστερή και δεξιά πλευρά του πλοίου (port – starboard)
- Διαμήκη ολίσθηση κάτω από συνθήκες μειωμένης ολίσθησης κατά την πλώρα και πρύμα κατεύθυνση.

Εξισώσεις Ισορροπίας

1) Εγκάρσια Ολίσθηση (Transverse Sliding)

Ο υπολογισμός ισορροπίας πρέπει να ακολουθεί την παρακάτω συνθήκη :

$$F_y \leq \mu \cdot m \cdot g + CS_1 \cdot f_1 + CS_2 \cdot f_2 + \dots + CS_n \cdot f_n$$

όπου,

n , ο αριθμός των υπολογίσιμων συρματόσχοινων

F_y , η εγκάρσια δύναμη του υποτιθέμενου φορτίου (kN)

μ , ο συντελεστής τριβής

m , η μάζα της μονάδας μεταφοράς φορτίου (tons)

g , η βαρυτική επιτάχυνση = 9.81 m/s²

CS , η υπολογιζόμενη φόρτιση (calculated strength) των εγκάρσιων συστημάτων πρόσδεσης (kN)

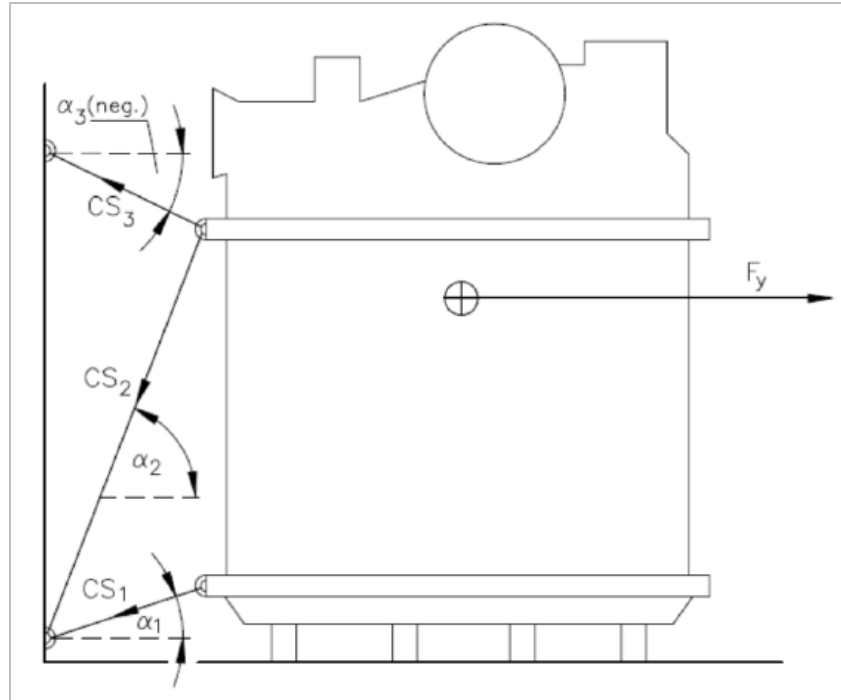
$$CS = \frac{MSL}{1.5}$$

$MSL = \text{Maximum Securing Load} = M.F.A. = \text{Μέγιστη Φόρτιση Ασφαλείας}$

$f = \mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha$: συντελεστής εξαρτώμενος από τον μ και την κατακόρυφη γωνία α

Πίνακας 3.5 : Τιμές f συναρτήσει των α και μ

$\alpha \backslash \mu$	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
0.3	0.72	0.84	0.93	1.00	1.04	1.04	1.02	0.96	0.87	0.76	0.62	0.47	0.30
0.1	0.82	0.91	0.97	1.00	1.00	0.97	0.92	0.83	0.72	0.59	0.44	0.27	0.10
0.0	0.87	0.94	0.98	1.00	0.98	0.94	0.87	0.77	0.64	0.50	0.34	0.17	0.00



Σχήμα 3.2 : Ισοροπία εγκάρσιων δυνάμεων

Σημείωση : Κατακόρυφες γωνίες α μεγαλύτερες των 60° έχουν μικρότερη επίδραση στην πρόσδεση και αποφυγή ολίσθησης της παραπάνω μονάδας μεταφοράς φορτίου. Αντίστοιχα, οι οριζόντιες γωνίες πρόσδεσης δεν πρέπει να ξεπερνούν τις 30° .

2) Εγκάρσια ανατροπή (Transverse Tipping)

Ο υπόλογισμός ισοροπίας πρέπει να ακολουθεί την παρακάτω συνθήκη :

$$F_y \cdot \alpha \leq b \cdot m \cdot g + CS_1 \cdot c_1 + CS_2 \cdot c_2 + \dots + CS_n \cdot c_n$$

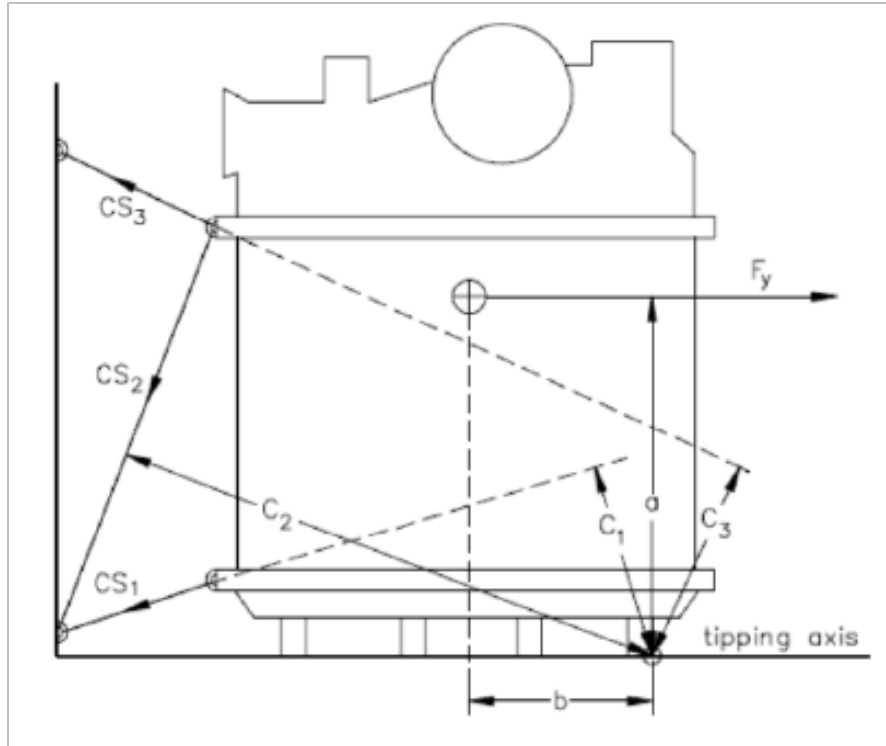
όπου,

F_y, m, g, CS, n όπως εξηγήθηκαν παραπάνω

α , ο μοχλοβραχίονας ανατροπής (m)

b , ο μοχλοβραχίονας σταθεροποίησης (m)

c , ο μοχλοβραχίονας της δύναμης πρόσδεσης (m)



Σχήμα 3.3 : Ισορροπία εγκάρσιων ροπών

3) Διαμήκης Ολίσθηση (Longitudinal Sliding)

Κάτω από φυσιολογικές συνθήκες τα εγκάρσια συστήματα ενίσχυσης επαρκούν για την αποφυγή, όχι μόνο της εγκάρσιας αλλά και της διαμήκουσ ολίσθησης των μονάδων μεταφοράς φορτίου. Παρόλο αυτά σε περίπτωση αβεβαιότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω συνθήκη :

$$F_x \leq \mu \cdot (m \cdot g - F_z) + CS_1 \cdot f_1 + CS_2 \cdot f_2 + \dots + CS_n \cdot f_n$$

όπου,

F_x , η διαμήκης δύναμη του υποτιθέμενου φορτίου (kN)

a , ο μοχλοβραχίονας ανατροπής (m)

b , ο μοχλοβραχίονας σταθεροποίησης (m)

c , ο μοχλοβραχίονας της δύναμης πρόσδεσης (m)

μ, m, g, f, n , όπως εξηγήθηκαν παραπάνω

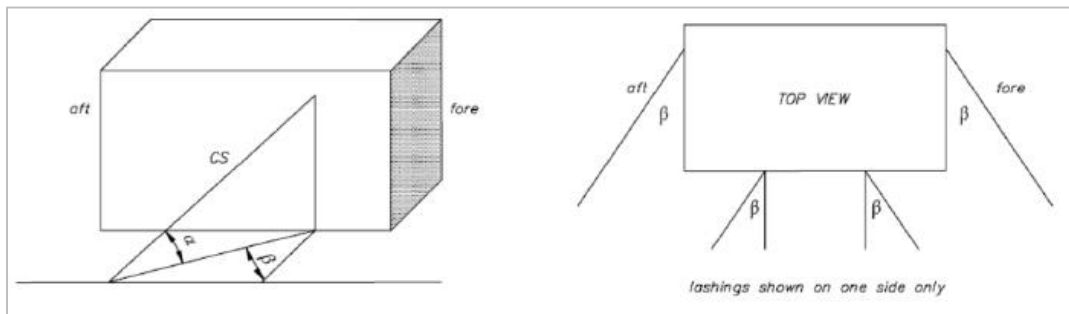
F_z , η υπολογισμένη φόρτιση Υ.Φ. (calculated strength) των διαμήκων συστημάτων πρόσδεσης (kN)

CS , η υπολογιζόμενη φόρτιση (calculated strength) των εγκάρσιων συστημάτων πρόσδεσης (kN)

3.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ – ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψη με περισσότερη ακρίβεια τις γωνίες που δημιουργούν τα συστήματα πρόσδεσης (π.χ. συρματοσχοίνα).

Συνήθως, τα συστήματα πρόσδεσης δεν έχουν καθαρή διαμήκη ή καθαρή εγκάρσια κατεύθυνση αλλά σχηματίζουν γωνίες α , β με τους αντίστοιχους άξονες.



Σχήμα 3.4 : Κατακόρυφες και οριζόντιες γωνίες πρόσδεσης

Σύστημα πρόσδεσης υπό γωνία β προκαλεί την εμφάνιση επιδράσεων τόσο στη διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση. Μπορούν να εκφραστούν πολλαπλασιάζοντας την υπολογισμένη φόρτιση CS με τις ανάλογες τιμές f_x , f_y που δίνονται από τον Πίνακα 3.6.

Συγκεκριμένα ο Πίνακας 3.6 αποτελείται από πέντε υποπίνακες – έναν για κάθε συντελεστή τριβής : $\mu = 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0.0$ – λαμβάνοντας υπόψη τις γωνίες α & β . Η τιμή του f_x υπολογίζεται μπαίνοντας στον πίνακα από δεξιά υπό γνωστή γωνία β και, αντίστοιχα, η f_y υπολογίζεται μπαίνοντας στον πίνακα από αριστερά υπό γνωστή γωνία β . Παρεμβολή δεν απαιτείται, παρόλα αυτά για τις ενδιάμεσες τιμές μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Οι ισορροπίες δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$\text{Εγκάρσια Ολίσθηση : } F_y \leq \mu \cdot m \cdot g + CS_1 \cdot f_{y1} + CS_2 \cdot f_{y2} + \dots + CS_n \cdot f_{yn}$$

$$\text{Διαμήκης Ολίσθηση : } F_x \leq \mu \cdot (m \cdot g - F_z) + CS_1 \cdot f_{x1} + CS_2 \cdot f_{x2} + \dots + CS_n \cdot f_{xn}$$

$$\text{Εγκάρσια ανατροπή : } F_y \cdot \alpha \leq b \cdot m \cdot g + 0.9 \cdot (CS_1 \cdot c_1 + CS_2 \cdot c_2 + \dots + CS_n \cdot c_n)$$

Προσοχή : Συστήματα πρόσδεσης με εγκάρσια γωνία α μικρότερη των 45° σε συνδυασμό με οριζόντια γωνία β μεγαλύτερη των 45° δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται στην παραπάνω εξίσωση ισορροπίας εγκάρσιας ανατροπής.

Πίνακας 3.6.1 : $\mu = 0.4$

β for fy	α														β for fx
	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80	90	
0	0.67	0.80	0.92	1.00	1.05	1.08	1.07	1.02	0.99	0.95	0.85	0.72	0.57	0.40	90
10	0.65	0.79	0.90	0.98	1.04	1.06	1.05	1.01	0.98	0.94	0.84	0.71	0.56	0.40	80
20	0.61	0.75	0.86	0.94	0.99	1.02	1.01	0.98	0.95	0.91	0.82	0.70	0.56	0.40	70
30	0.55	0.68	0.78	0.87	0.92	0.95	0.95	0.92	0.90	0.86	0.78	0.67	0.54	0.40	60
40	0.46	0.58	0.68	0.77	0.82	0.86	0.86	0.84	0.82	0.80	0.73	0.64	0.53	0.40	50
50	0.36	0.47	0.56	0.64	0.70	0.74	0.76	0.75	0.74	0.72	0.67	0.60	0.51	0.40	40
60	0.23	0.33	0.42	0.50	0.56	0.61	0.63	0.64	0.64	0.63	0.60	0.55	0.48	0.40	30
70	0.10	0.18	0.27	0.34	0.41	0.46	0.50	0.52	0.52	0.53	0.52	0.49	0.45	0.40	20
80	-0.05	0.03	0.10	0.17	0.24	0.30	0.35	0.39	0.41	0.42	0.43	0.44	0.42	0.40	10
90	-0.20	-0.14	-0.07	0.00	0.07	0.14	0.20	0.26	0.28	0.31	0.35	0.38	0.39	0.40	0

Πίνακας 3.6.2 : $\mu = 0.3$

β for fy	α														β for fx
	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80	90	
0	0.72	0.84	0.93	1.00	1.04	1.04	1.02	0.96	0.92	0.87	0.76	0.62	0.47	0.30	90
10	0.70	0.82	0.92	0.98	1.02	1.03	1.00	0.95	0.91	0.86	0.75	0.62	0.47	0.30	80
20	0.66	0.78	0.87	0.94	0.98	0.99	0.96	0.91	0.88	0.83	0.73	0.60	0.46	0.30	70
30	0.60	0.71	0.80	0.87	0.90	0.92	0.90	0.86	0.82	0.79	0.69	0.58	0.45	0.30	60
40	0.51	0.62	0.70	0.77	0.81	0.82	0.81	0.78	0.75	0.72	0.64	0.54	0.43	0.30	50
50	0.41	0.50	0.58	0.64	0.69	0.71	0.71	0.69	0.67	0.64	0.58	0.50	0.41	0.30	40
60	0.28	0.37	0.44	0.50	0.54	0.57	0.58	0.58	0.57	0.55	0.51	0.45	0.38	0.30	30
70	0.15	0.22	0.28	0.34	0.39	0.42	0.45	0.45	0.45	0.45	0.43	0.40	0.35	0.30	20
80	0.00	0.06	0.12	0.17	0.22	0.27	0.30	0.33	0.33	0.34	0.35	0.34	0.33	0.30	10
90	-0.15	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10	0.15	0.19	0.21	0.23	0.26	0.28	0.30	0.30	0

Πίνακας 3.6.3 : $\mu = 0.2$

β for fy	α														β for fx
	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80	90	
0	0.77	0.87	0.95	1.00	1.02	1.01	0.97	0.89	0.85	0.80	0.67	0.53	0.37	0.20	90
10	0.75	0.86	0.94	0.98	1.00	0.99	0.95	0.88	0.84	0.79	0.67	0.52	0.37	0.20	80
20	0.71	0.81	0.89	0.94	0.96	0.95	0.91	0.85	0.81	0.76	0.64	0.51	0.36	0.20	70
30	0.65	0.75	0.82	0.87	0.89	0.88	0.85	0.79	0.75	0.71	0.61	0.48	0.35	0.20	60
40	0.56	0.65	0.72	0.77	0.79	0.79	0.76	0.72	0.68	0.65	0.56	0.45	0.33	0.20	50
50	0.46	0.54	0.60	0.64	0.67	0.67	0.66	0.62	0.60	0.57	0.49	0.41	0.31	0.20	40
60	0.33	0.40	0.46	0.50	0.53	0.54	0.53	0.51	0.49	0.47	0.42	0.36	0.28	0.20	30
70	0.20	0.25	0.30	0.34	0.37	0.39	0.40	0.39	0.38	0.37	0.34	0.30	0.26	0.20	20
80	0.05	0.09	0.14	0.17	0.21	0.23	0.25	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.23	0.20	10
90	-0.10	-0.07	-0.03	0.00	0.03	0.07	0.10	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19	0.20	0.20	0

Πίνακας 3.6.4 : $\mu = 0.1$

β for fy	α														β for fx
	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80	90	
0	0.82	0.91	0.97	1.00	1.00	0.97	0.92	0.83	0.78	0.72	0.59	0.44	0.27	0.10	90
10	0.80	0.89	0.95	0.98	0.99	0.96	0.90	0.82	0.77	0.71	0.58	0.43	0.27	0.10	80
20	0.76	0.85	0.91	0.94	0.94	0.92	0.86	0.78	0.74	0.68	0.56	0.42	0.26	0.10	70
30	0.70	0.78	0.84	0.87	0.87	0.85	0.80	0.73	0.68	0.63	0.52	0.39	0.25	0.10	60
40	0.61	0.69	0.74	0.77	0.77	0.75	0.71	0.65	0.61	0.57	0.47	0.36	0.23	0.10	50
50	0.51	0.57	0.62	0.64	0.65	0.64	0.61	0.56	0.53	0.49	0.41	0.31	0.21	0.10	40
60	0.38	0.44	0.48	0.50	0.51	0.50	0.48	0.45	0.42	0.40	0.34	0.26	0.19	0.10	30
70	0.25	0.29	0.32	0.34	0.35	0.36	0.35	0.33	0.31	0.30	0.26	0.21	0.16	0.10	20
80	0.10	0.13	0.15	0.17	0.19	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19	0.17	0.15	0.13	0.10	10
90	-0.05	-0.03	-0.02	0.00	0.02	0.03	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0

Πίνακας 3.6.5 : $\mu = 0.0$

β for fy	α														β for fx
	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80	90	
0	0.87	0.94	0.98	1.00	0.98	0.94	0.87	0.77	0.71	0.64	0.50	0.34	0.17	0.00	90
10	0.85	0.93	0.97	0.98	0.97	0.93	0.85	0.75	0.70	0.63	0.49	0.34	0.17	0.00	80
20	0.81	0.88	0.93	0.94	0.93	0.88	0.81	0.72	0.66	0.60	0.47	0.32	0.16	0.00	70
30	0.75	0.81	0.85	0.87	0.85	0.81	0.75	0.66	0.61	0.56	0.43	0.30	0.15	0.00	60
40	0.66	0.72	0.75	0.77	0.75	0.72	0.66	0.59	0.54	0.49	0.38	0.26	0.13	0.00	50
50	0.56	0.60	0.63	0.64	0.63	0.60	0.56	0.49	0.45	0.41	0.32	0.22	0.11	0.00	40
60	0.43	0.47	0.49	0.50	0.49	0.47	0.43	0.38	0.35	0.32	0.25	0.17	0.09	0.00	30
70	0.30	0.32	0.34	0.34	0.34	0.32	0.30	0.26	0.24	0.22	0.17	0.12	0.06	0.00	20
80	0.15	0.16	0.17	0.17	0.17	0.16	0.15	0.13	0.12	0.11	0.09	0.06	0.03	0.00	10
90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0

Remark: $f_x = \cos \alpha \cdot \sin \beta + \mu \cdot \sin \alpha$ $f_y = \cos \alpha \cdot \cos \beta + \mu \cdot \sin \alpha$

3.3 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

3.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑ CHARLES R. CUSHING [8]

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, οι φορτίσεις που ασκούνται σε ένα σύστημα «εμπορευματοκιβώτιο – σύστημα πρόσδεσης» μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες : α) τις στατικές και β) τις δυναμικές.

Για τη δημιουργία του μοντέλου έγιναν ορισμένες υποθέσεις πάνω στη θεωρία κινήσεων του πλοίου, έτσι ώστε να μπορούν να σχηματιστούν οι εξισώσεις κίνησης. Οι υποθέσεις αυτές είναι οι εξής :

- Η μόνη υδροστατική δύναμη που ενεργεί στο πλοίο είναι η άντωση,
- Οι κατακλίσεις είναι μικρές και ισόογκες,
- Το πλοίο πλέει σε θάλασσα που ακολουθεί τη σχέση : $\alpha = \alpha_0 \cdot \sin \omega T$ (1)

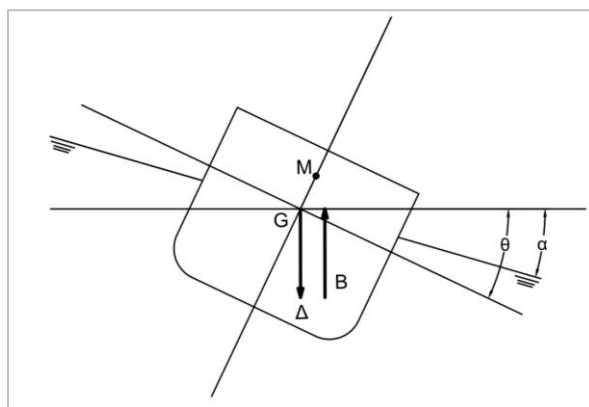
όπου :

α , κλίση κύματος

α_0 , μέγιστη κλίση κύματος

ω , κυκλική συχνότητα

T , περίοδος



Σχήμα 3.5 : Ροπή επαναφοράς πλοίου

Η ροπή επαναφοράς που δημιουργείται από το πλοίο δίνεται από τον τύπο :

$$M = -\Delta GM \cdot (\theta - \alpha) \quad (2) \quad \text{ή} \quad I \cdot \theta'' = \Delta GM \cdot (\theta - \alpha) \quad (3)$$

όπου :

θ , γωνία διατοιχισμού

I , ροπή αδράνειας

GM , μετακεντρικό ύψος

Δ , εκτόπισμα

Αντικαθιστώντας το α στην παραπάνω εξίσωση έχουμε την εξίσωση για κίνηση διατοιχισμού σε απεριόριστη θάλασσα :

$$I \cdot \theta'' + \Delta GM \cdot \theta = \Delta GM \cdot \alpha_0 \cdot \sin(\omega T) \quad (4)$$

Η φυσική συχνότητα του πλοίου είναι $(\Delta GM / I)^{1/2}$, την οποία αν θέσουμε ίση με n τότε λαμβάνεται η λύση για απεριόριστο διατοιχισμό σε κύματα (όπου $T = 2\pi / \omega$ και $Tn = 2\pi / n$) :

$$\theta = \frac{\alpha_0}{1 - \frac{Tn^2}{T^2}} \cdot \left(\sin \frac{2\pi \cdot T}{T} - \frac{Tn}{T} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot T}{Tn} \right) \quad (5)$$

Θεωρώντας περιοδική κίνηση, η δύναμη ισούται με :

$$F_{TR} = \frac{W}{g} \cdot \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r}{T^2} \cdot \theta \quad (6)$$

Και αντικαθιστώντας την (5) στην (6) έχουμε :

$$F_{TR} = \frac{W}{g} \cdot \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r}{T^2} \cdot \frac{\alpha_0}{1 - \frac{Tn^2}{T^2}} \cdot \left(\sin \frac{2\pi \cdot T}{T} - \frac{Tn}{T} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot T}{Tn} \right) \quad (7)$$

Η μέγιστη γωνία διατοιχισμού για πλοίο που δέχεται εγκάρσιους κυματισμούς, δίνεται σύμφωνα με τον Saunders, από τη σχέση :

$$\theta_{MAX} = \left(\frac{\pi \cdot \lambda \cdot \alpha_0}{2 \cdot N} \right)^{0.5} \quad (8)$$

όπου :

$\lambda = 0.73 + 0.6 \cdot (OG / d)$: συντελεστής επίδρασης κλίσης κύματος,

OG , κατακόρυφη απόσταση της DWL (Draft Water Line – γραμμή βύθισης) από το CG (Center of Gravity – κέντρο βάρους) – θετική προς τα πάνω,

d , βύθισμα

$$\alpha_0 = \frac{\pi \cdot h_w}{L_w}$$

(μέγιστη κλίση κύματος έχουμε στην επιφάνεια (h_w / L_w), όπου h_w , L_w : ύψος και μήκος κύματος αντίστοιχα)

Επίσης, για την περίοδο T της κίνησης διατοιχισμού ισχύει :

$$T = \frac{2\pi \cdot \kappa}{g \cdot GM} \quad (9)$$

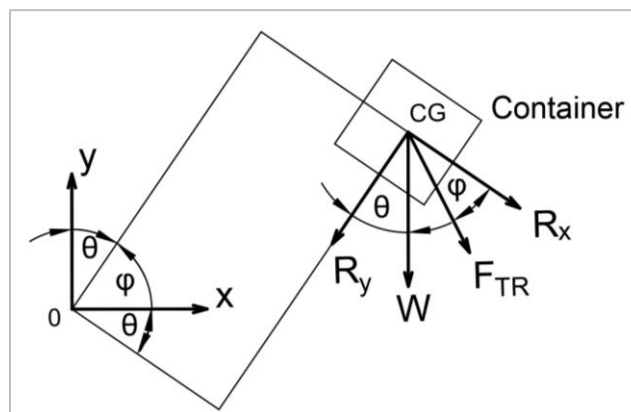
όπου :

$\kappa = 0.32 \cdot B - 0.49 \cdot B$, ακτίνα αδράνειας γύρω από τον διαμήκη άξονα που περνά από το κέντρο βαρύτητας

B , πλάτος

Υπάρχουν διάφορες εμπειρικές εξισώσεις για τον προσδιορισμό του κ , οι οποίες αποδεικνύουν ότι η πραγματική περίοδος διατοιχισμού είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Ακόμη και το κέντρο διατοιχισμού είναι δύσκολο ως προς τον προσδιορισμό του. Από κάποιους θεωρείται ότι είναι το κέντρο βάρους και από άλλους το σημείο τομής της centerline με την ίσαλο γραμμής φόρτωσης.

Μία επιπλέον δύναμη που ενεργεί στα εμπορευματοκιβώτια είναι η βαρύτητα. Η δύναμη αυτή, η οποία είναι ίση με το βάρος των εμπορευματοκιβωτίων και η δύναμη αδρανείας μπορούν να διασπαστούν σε συνιστώσες με κάθετες και εγκάρσιες κατευθύνσεις ως προς το εμπορευματοκιβώτιο. Οι δυνάμεις αυτές ενεργούν σε όλα τα εμπορευματοκιβώτια του καταστρώματος.



Σχήμα 3.6 : Δυνάμεις που δημιουργούνται κατά την κίνηση διατοιχισμού

3.3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ “SR234” (Shipbuilding Research Association of Japan –

T. Nakamura) [14]

Η μέθοδος αυτή εκτιμά τις μέγιστες δυνάμεις που αναπτύσσονται στα εμπορευματοκιβώτια και στο σύστημα έγχυσης, μέσω του υπολογισμού επιταχύνσεων. Οι αναμενόμενες μέγιστες επιμέρους επιταχύνσεις μπορούν να υπολογιστούν από μία μακροχρόνια κατανομή βασισμένη στις αντίστοιχες αποκρίσεις των συχνοτήτων κινήσεων του πλοίου.

Η μη γραμμικότητα της συμπεριφοράς των συρματόσχοινων πρόσδεσης, οδηγεί στην εφαρμογή της μεθόδου μακροχρόνιας κατανομής υπολογίζοντας μόνο τις επιμέρους επιταχύνσεις και όχι τις δυνάμεις.

Η εκτίμηση των δυνάμεων στα σημεία μέγιστων επιταχύνσεων και προς τις τρεις διευθύνσεις οδηγεί σε πολύ συντηρητικά αποτελέσματα. Μέσω, λοιπόν της έρευνας αυτής δημιουργήθηκε μια μέθοδος για τον προσδιορισμό των επιταχύνσεων, που χαρακτηρίζεται από το συγγραφέα ως «μέθοδος ελλειψοειδούς επιταχύνσεων» και είναι εμπειρική.

Γενικά στοιχεία του αριθμητικού μοντέλου και των συνθηκών υπολογισμού

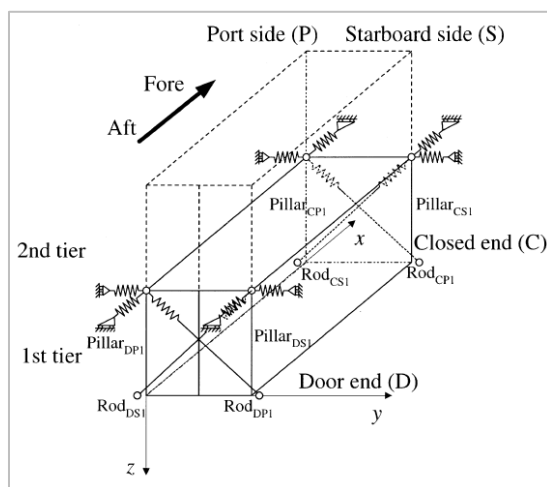
Αναπτύχθηκαν γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα για τις διατάξεις πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων. Τα μοντέλα αυτά σχεδιάστηκαν βασισμένα σε πειράματα πραγματικής κλίμακας, πάνω σε πλατφόρμα προσομοιωμένων κινήσεων του “NYK Logistic Technology Institute” και σε containerships του Βόρειου Ειρηνικού Ωκεανού.

Στο αριθμητικό μοντέλο εισάγονται οι συνιστώσες επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους του κάθε εμπορευματοκιβωτίου της στοίβας και τα χαρακτηριστικά μεγέθη των εμπορευματοκιβωτίων και των συρματόσχοινων πρόσδεσής τους (βάρος, μέγεθος, ακαμψία). Ως αποτελέσματα λαμβάνονται οι εντάσεις στα συρματόσχοινα πρόσδεσης και οι δυνάμεις που δρουν στα διάφορα μέρη του κάθε εμπορευματοκιβωτίου της στοίβας.

Οι υποθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι :

- Όποιες παραμορφώσεις υφίσταται η οροφή, το πάτωμα και οι κολώνες του εμπορευματοκιβωτίου αμελήθηκαν.
- Οι εντάσεις στα συρματόσχοινα πρόσδεσης είναι ανάλογες των επιμηκύνσεων ή των συστολών των συρματόσχοινων. Αρνητική ένταση ερμηνεύεται ως αξονική δύναμη συμπίεσης.
- Οι διαμήκεις και εγκάρσιες δυνάμεις παραμόρφωσης σε ένα εμπορευματοκιβώτιο είναι ανάλογες με τις διαμήκεις και εγκάρσιες παραμορφώσεις του, αντίστοιχα.
- Το κάθε εμπορευματοκιβώτιο ασφαλίζεται με το από κάτω του, χωρίς να υπάρχουν κενά.
- Οι δυνάμεις που δρουν στα εμπορευματοκιβώτια είναι η βαρύτητα και η δύναμη αδρανείας λόγω της κίνησης του πλοίου. Οι δυνάμεις λόγω του αέρα αμελούνται.

Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται το τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο υπολογισμού των δυνάμεων κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες επιταχύνσεων.



Σχήμα 3.7 : Τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο

Υπολογισμός των μέγιστων δυνάμεων που δρουν στα εμπορευματοκιβώτια και τα συρματόσχοινα πρόσδεσης τους.

Υπολογισμός των συνιστωσών επιτάχυνσης μέσω της μακροχρόνιας κατανομής

Οι συναρτήσεις των συχνοτήτων απόκρισης των συνιστωσών επιτάχυνσης στα διάφορα σημεία της στήλης των εμπορευματοκιβωτίων υπολογίστηκαν βασισμένες στις συναρτήσεις των συχνοτήτων απόκρισης των κινήσεων του πλοίου. Οι συναρτήσεις των συχνοτήτων απόκρισης των κινήσεων του πλοίου υπολογίστηκαν μέσω του αριθμητικού προγράμματος “New Strip Method”.

Υπολογισμός των μέγιστων τιμών των δυνάμεων μέσω της «ελλειμοειδούς επιταχύνσεων»

Δύο είναι τα είδη των δυνάμεων που ασκούνται στα εμπορευματοκιβώτια και στα συστήματα πρόσδεσής τους : οι στατικές δυνάμεις, που ενεργούν όταν το πλοίο πλέει κάθετα και ισοβύθιστα. Οι κατακόρυφες στατικές δυνάμεις λόγω της βαρυντικής επιτάχυνσης στην κάθετη διεύθυνση δρουν σε κάθε κολώνα των εμπορευματοκιβωτίων της στοίβας. Επίσης, η αρχική φόρτιση (προένταση) των συρματόσχοινων πρόσδεσης δρα σε κάθε εμπορευματοκιβώτιο της στοίβας και σε κάθε αντίστοιχο συρματόσχοινο πρόσδεσης. Αλλά και οι μεταβλητές δυνάμεις, που εξαρτώνται από τις επιταχύνσεις λόγω των κινήσεων του πλοίου.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μεταβλητές δυνάμεις που αντιστοιχούν σε διάφορα σημεία της επιφάνειας κάθε έλλειψης επιταχύνσεων και ερευνήθηκε η μέγιστη τιμή των υπολογισμένων δυνάμεων. Κάθε έλλειψη επιταχύνσεων σε κάθε σειρά της στοίβας κατασκευάζεται από έναν συνδυασμό συνιστωσών επιτάχυνσης, υπολογισμένες με τη μακροχρόνια κατανομή για κλίμακα πιθανότητας 10^{-8} .

Υπολογισμός δυνάμεων με μακροχρόνια κατανομή βασισμένη στις συναρτήσεις συχνότητας απόκρισης των δυνάμεων

Οι συναρτήσεις συχνότητας απόκρισης των δυνάμεων που δρουν στα εμπορευματοκιβώτια και στα συρματόσχοινα πρόσδεσης υπολογίζονται από τις συναρτήσεις συχνότητας απόκρισης των συνιστωσών επιτάχυνσης που δρουν σε κάθε σειρά εμπορευματοκιβωτίων της κάθε στοίβας.

Εφαρμογή της «ελλειψοειδούς επιταχύνσεων» στον υπολογισμό των διατάξεων πρόσδεσης εμπορευματοκιβωτίων

Η εφαρμογή της μεθόδου της «ελλειψοειδούς επιταχύνσεων» στον υπολογισμό των αναμενόμενων μέγιστων δυνάμεων, γίνεται αν ικανοποιούνται τα παρακάτω :

- Οι αναμενόμενες μέγιστες τιμές των δυνάμεων που υπολογίστηκαν από την «ελλειψοειδή επιταχύνσεων» δεν πρέπει να είναι μικρότερες από αυτές που υπολογίστηκαν από την μακροχρόνια κατανομή.
- Οι αναμενόμενες μέγιστες τιμές των δυνάμεων που υπολογίστηκαν από την «ελλειψοειδή επιταχύνσεων» δεν πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν από την μακροχρόνια κατανομή.

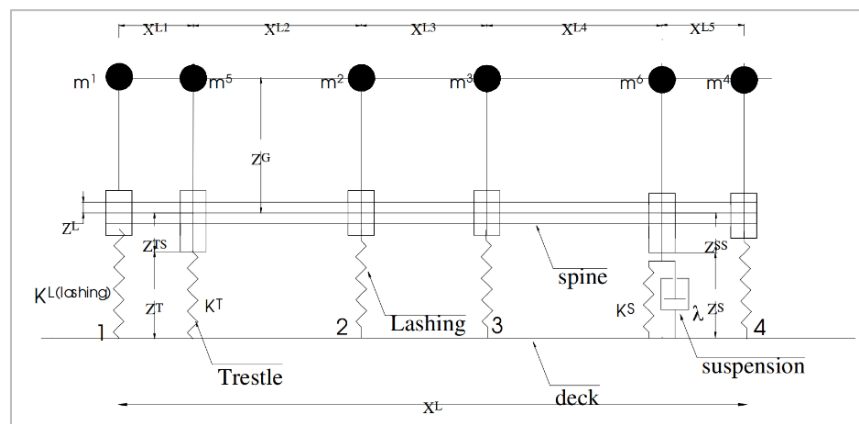
Όταν αυτές οι συνθήκες ικανοποιηθούν τότε μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η «ελλειψοειδής επιταχύνσεων» παρέχει ασφαλείς και πρακτικές συνθήκες επιτάχυνσης, π.χ. οι συνδυασμοί των συνιστωσών επιτάχυνσης λαμβανομένου υπόψη τη διαφορά φάσης της κίνησης του πλοίου.

Ως συμπέρασμα εξάγεται πως το αριθμητικό μοντέλο των διατάξεων πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων δίνει τις μέγιστες δυνάμεις με τη συνθήκη ότι η εγκάρσια συνιστώσα της επιτάχυνσης είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες. Η «ελλειψοειδής επιταχύνσεων» δίνει συντηρητικά αποτελέσματα για συνθήκη μεγάλης εγκάρσιας επιτάχυνσης. Παρόλα αυτά, καταλήγουμε στο γεγονός ότι η «ελλειψοειδής επιταχύνσεων» μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό των διατάξεων πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα.

3.3.3 LASHINGS OF TRAILERS ON-BOARD RO/RO SHIPS UNDER INTENSIVE ROLLING (N. Themelis, K. J. Spyrou) [15]

Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιείται ανάλυση του συστήματος έγχυσης ενός οχήματος (trailer) στο κατάστρωμα ενός RO-RO ferry, α) από την οπτική των κανονισμών, β) λόγω της δυναμικής κίνησης του πλοίου και του trailer και γ) βάσει της κατασκευαστικής αντοχής των lashings. Παρουσιάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο με το οποίο υπολογίζονται τα φορτία που επιδέχονται τόσο τα lashings που προσδένουν το trailer στο κατάστρωμα οχημάτων, κατά τη διάρκεια κίνησης διατοχισμού του πλοίου σε εγκάρσιους κυματισμούς, όσο και τα σημεία πρόσδεσης (lashing points).

Αρχικά γίνεται εφαρμογή της μεθόδου υπολογισμού φορτίσεων που προτείνει το Cargo Securing Manual. Στη συνέχεια, το σώμα του trailer περιεγράφηκε ως ένα σύνολο σημειακών μαζών οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους σε ένα ενιαίο ευθύγραμμο σύστημα (spine), ενώ τα lashings εκφράστηκαν ως γραμμικά ελατήρια.



Σχήμα 3.8 : Απλοποιημένη μορφή του μοντέλου του trailer

Οι μάζες διανεμήθηκαν ως εξής : μία πάνω από τη σφήνα (trestle), μία στην ανάρτηση (suspension) και άλλες τέσσερις στα σημεία όπου θεωρείται ότι τοποθετούνται τα lashings. Κάθε μάζα έχει από τρεις βαθμούς ελευθερίας (εγκάρσια, κατακόρυφη μετατόπιση και γωνία απόκρισης). Έτσι τελικά το trailer διαθέτει δεκαοκτώ βαθμούς ελευθερίας.

Το trestle μοντελοποιείται ως δύο παράλληλα γραμμικά ελατήρια. Οι κατακόρυφες δυνάμεις προκύπτουν από το νόμο του Hooke $F = k \cdot x$. Ασκούνται έτσι δύο δυνάμεις F_{TR} και F_{TL} , επομένως $F_T = F_{TL} + F_{TR}$.

Η ανάρτηση αναλύεται σε δύο ελατήρια με αντίστοιχους αποσβεστήρες. Η εξίσωση που περιγράφει τη δύναμη που ασκεί το καθένα, δίνεται από τον τύπο : $F = k \cdot x + \lambda \cdot \dot{x}$ και έχουμε τη συνολική δύναμη από την ανάρτηση $F_S = F_{SL} + F_{SR}$, όπου F_{SR} και F_{SL} η δεξιά και αριστερή συνιστώσα της δύναμης αντίστοιχα.

Τα lashings μοντελοποιούνται σε γραμμικά ελατήρια καθένα από τα οποία ασκεί δύναμη της μορφής : $F = k \cdot (L - L_0)$ στο trailer. Το συνολικό μήκος του αριστερού lashing δίνεται από τη σχέση : $L_{Li} = \sqrt{S_{Li}^2 + T_{Li}^2}$, όπου S_{Li} , T_{Li} οι επιμέρους συνιστώσες μήκους. Η συνολική δύναμη στο αριστερό lashing είναι : $F_{Li} = k_{Li} \cdot (L_{Li} - L_{0i})$ η οποία αναλύεται σε δύο κάθετες μεταξύ τους συνιστώσες : $F_{LZi} = F_{Li} \cdot (T_{Li} / L_{Li})$ και $F_{LYi} = F_{Li} \cdot (S_{Li} / L_{Li})$. Αντίστοιχα σχηματίζονται και οι εξισώσεις των δυνάμεων για το δεξί lashing.

Η κίνηση διατοιχισμού του πλοίου λήφθηκε από την εξίσωση : $(I + \delta I)\ddot{\phi} + B(\dot{\phi}) + R(\phi) = F_w(t)$.

Οι δυνάμεις λόγω του διατοιχισμού είναι οι ακόλουθες :

$$R_Y = -mg \cdot \sin \varphi - T_Y - C_Y$$

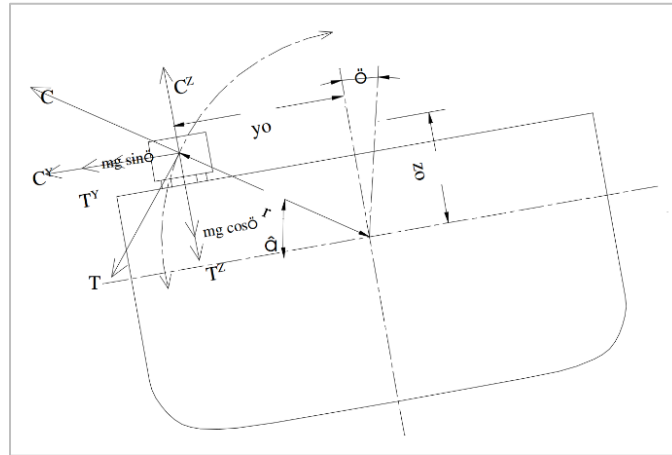
$$R_Z = mg \cdot \cos \varphi + T_Z - C_Z$$

$$T_Y = mr \cdot \sin \beta \cdot \ddot{\phi}$$

$$T_Z = mr \cdot \cos \beta \cdot \ddot{\phi}$$

$$C_Y = mr \cdot \cos \beta \cdot \dot{\phi}^2$$

$$C_Z = mr \cdot \sin \beta \cdot \dot{\phi}^2$$



Σχήμα 3.9 : Δυνάμεις λόγω διατοιχισμού

Έπειτα καταγράφηκαν οι εξισώσεις κίνησης των επιμέρους μαζών :

$$\Sigma F_Y = m \cdot \ddot{y}, \quad \Sigma F_Z = m \cdot \ddot{z} \quad \text{και} \quad \Sigma \tau = m \cdot \ddot{\theta}$$

Ακολούθως έγινε εφαρμογή του μοντέλου με δεδομένα από ένα πραγματικό πλοίο, λαμβάνοντας αποτελέσματα φορτίσεων για κάθε lashing κατά τη διάρκεια κίνησης του πλοίου και έπειτα αναλύθηκαν οι φορτίσεις που επιδέχονται τα σημεία πρόσδεσης.

Τέλος, ο συγγραφέας καταλήγει πως η περιγραφή του μοντέλου και τα αποτελέσματα που εξάγονται από αυτό διαφέρουν από αυτά που υπολογίζονται από το CSM. Επίσης, τα διάφορα φορτία που επιδέχονται τα lashings επηρεάζονται από αρκετούς παράγοντες, όπως είναι η θέση που τοποθετείται το trailer πάνω στο κατάστρωμα, η γωνία που σχηματίζουν τα lashings με το κατάστρωμα, όταν αυτά προσδένονται στο trailer, αλλά και η μη σωστή τοποθέτηση και ασφάλιση έστω και ενός από αυτά. Ενώ τονίστηκε πως και το θαλάσσιο περιβάλλον επηρεάζει τα ασκούμενα φορτία, λόγω της μεταβολής της κίνησης του πλοίου.

3.3.4 DYNAMICS OF LASHED TRAILERS ON BOARD SHIPS UNDER THE COMBINED EFFECT OF ROLL AND PITCH MOTIONS

(P. Poullos, N. Themelis, K. J. Spyrou) [16]

Αποτελεί επέκταση της εργασίας « Lashings of trailers on-board RO/RO ships under intense rolling » που αναλύθηκε παραπάνω. Το μαθηματικό μοντέλο περιγράφει τις φορτίσεις που λαμβάνουν τα lashings που προσδένουν το trailer, το οποίο τοποθετείται σε οποιοδήποτε σημείο του καταστρώματος οχημάτων ενός RO-RO πλοίου, υπό την επίδραση της κίνησης διατοιχισμού και προνευτασμού.

Αρχικά γίνεται λόγος για τη σπουδαιότητα και τη χρησιμότητα του Cargo Securing Manual. Επίσης, περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού των φορτίσεων που επιδρούν στο trailer εξαιτίας των διαμήκων, εγκάρσιων και κατακόρυφων επιταχύνσεων. Στη συνέχεια ακολουθείται παρόμοια ανάλυση δυνάμεων για όλα τα στοιχεία που συνθέτουν το σύστημα trailer – lashings – deck, όμοια με αυτή της εργασίας « Lashings of trailers on-board RO/RO ships under intense rolling ».

Για το λόγο αυτό παραλείπεται κάποια εκτενέστερη αναφορά.

Εξαιτίας όμως και της επίδρασης της κίνησης προνευτασμού, στο ολικό μήκος του lashing, που μοντελοποιείται ως γραμμικό ελατήριο, λαμβάνεται και μία τρίτη συνιστώσα μήκους C_i . Έτσι το ολικό μήκος του i συρματόσχοινου δίνεται από τη σχέση : $L_i = \sqrt{S_i^2 + T_i^2 + C_i^2}$.

Οι δυνάμεις λόγω του διατοιχισμού λήφθηκαν, όπως αναφέρονται στο «Dynamics of Marine Vehicles, 1978, Bhattacharyya. R.».

Για την κίνηση του προνευτασμού οι εξισώσεις συντάσσονται ως εξής :

$$R_{P_z} = mg \cos \varphi \cos \xi + T_{P_z} - C_{P_z}$$

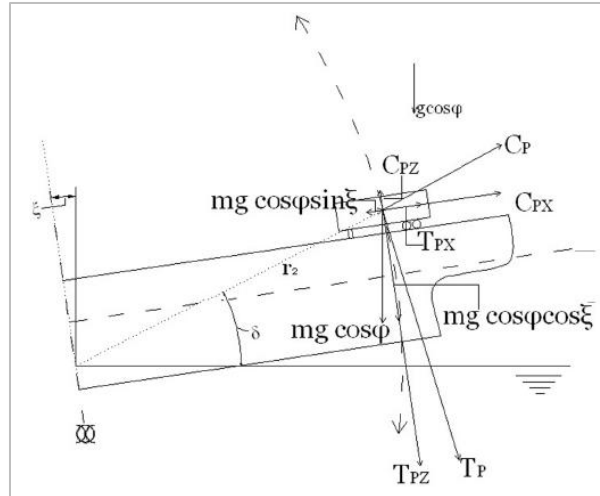
$$R_{P_x} = mg \cos \varphi \cos \xi - C_{P_x} - T_{P_x}$$

$$T_{P_z} = m r_2 \ddot{\xi} \cos \delta$$

$$T_{P_x} = m r_2 \ddot{\xi} \sin \delta$$

$$C_{P_x} = m r_2 \dot{\xi}^2 \cos \delta$$

$$C_{P_z} = m r_2 \dot{\xi}^2 \sin \delta$$



Σχήμα 3.10 : Δυνάμεις λόγω προνευτασμού

Ακολούθως καταγράφηκαν οι εξισώσεις κίνησης των επιμέρους μαζών :

$$\Sigma F_y = m \cdot \ddot{y} \ , \ \Sigma F_z = m \cdot \ddot{z} \ \text{και} \ \Sigma \tau = m \cdot \ddot{\theta}$$

Έπειτα έλαβε χώρα η εφαρμογή του μοντέλου με δεδομένα από ένα πραγματικό πλοίο.

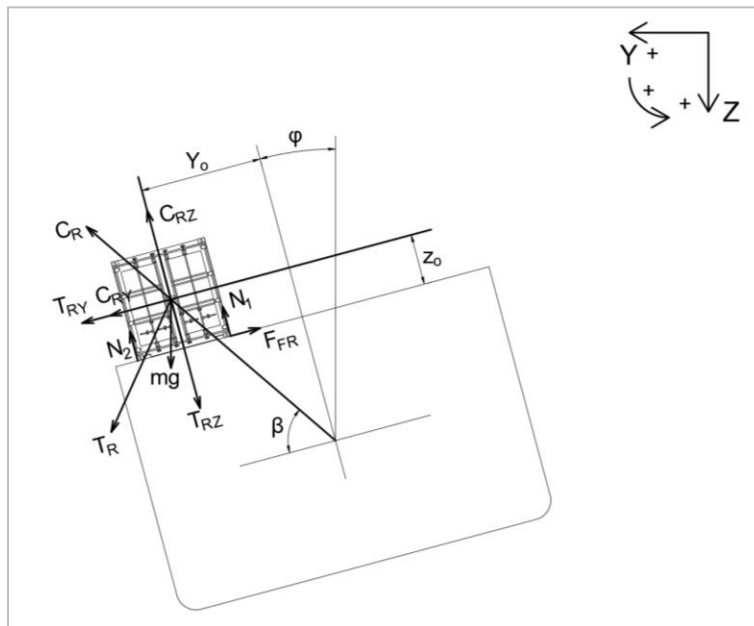
Τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι το μέγεθος των φορτίσεων που λαμβάνουν τα lashings σε συνάρτηση με το χρόνο, καθώς και πόσο αυτό επηρεάζεται έπειτα από μεταβολή της περιόδου των κυματισμών. Παράλληλα, επισημαίνεται ο κύριος ρόλος που κατέχει η κίνηση του διατοιχισμού στην εμφάνιση των υψηλών φορτίσεων, ενώ συγχρόνως τονίζεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση του trailer από το κέντρο περιστροφής τόσο εντονότερες χαρακτηρίζονται και οι φορτίσεις.

3.3.5 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΧΜΑΣΗΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΣΤΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ ΠΛΟΙΟΥ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ (Διπλωματική Εργασία – Στέφανος Χ. Αντωνιάδης) [17]

Σκοπός της μοντελοποίησης της συγκεκριμένης εργασίας είναι ο υπολογισμός των φορτίσεων των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα lashings, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο περιορισμός της κίνησης του εμπορευματοκιβωτίου επάνω στο κατάστρωμα. Γίνεται εξέταση της εγκάρσιας κίνησης του πλοίου – κίνηση διατοιχισμού – και της επίδρασης της στην πρόσδεση του εμπορευματοκιβωτίου.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση ενός εμπορευματοκιβωτίου επάνω στο κατάστρωμα. Οι δυνάμεις λόγω του διατοιχισμού λήφθηκαν, όπως αναφέρονται στο «Dynamics of Marine Vehicles, 1978, Bhattacharyya. R.».



Σχήμα 3.11 : Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου, όπου m η μάζα του εμπορευματοκιβωτίου

Τα lashings μοντελοποιούνται σε γραμμικά ελατήρια καθένα από τα οποία ασκεί δύναμη της μορφής: $F = k \cdot (L - L_0)$ στο container. Το συνολικό μήκος του αριστερού lashing δίνεται από τη σχέση: $L_{Li} = \sqrt{S_{Li}^2 + T_{Li}^2}$, όπου S_{Li} , η εγκάρσια συνιστώσα μήκους και T_{Li} , η κατακόρυφη συνιστώσα μήκους. Η συνολική δύναμη στο αριστερό lashing είναι: $F_{Li} = k_{Li} \cdot (L_{Li} - L_{0i})$ η οποία αναλύεται σε δύο κάθετες μεταξύ τους συνιστώσες: $F_{LZi} = F_{Li} \cdot (T_{Li} / L_{Li})$ και $F_{LYi} = F_{Li} \cdot (S_{Li} / L_{Li})$. Αντίστοιχα σχηματίζονται και οι εξισώσεις των δυνάμεων για το δεξί

lashing. Οι επιμέρους συνιστώσες μήκους δέχονται ορισμένους περιορισμούς μιας και δεν γίνεται το lashing να δεχτεί θλιπτικό φορτίο $L_L \geq L_0$ και $L_R \geq L_0$.

Οι επιμέρους συνιστώσες ορίστηκαν ως :

$$\text{Δεξιά εγκάρσια συνιστώσα μήκους : } S_R = \alpha / 2 + y_C + a / 2 \cdot \sin \varphi_C$$

$$\text{Δεξιά κατακόρυφη συνιστώσα μήκους : } T_R = z_C - a / 2 \cdot \sin \varphi_C$$

$$\text{Αριστερή εγκάρσια συνιστώσα μήκους : } S_L = a / 2 - y_C - a / 2 \cdot \sin \varphi_C$$

$$\text{Αριστερή κατακόρυφη συνιστώσα μήκους : } T_L = z_C + a / 2 \cdot \sin \varphi_C$$

Ενώ οι εξισώσεις κίνησης του container σχηματίστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να στοχεύουν στην εύρεση των μετατοπίσεων του εμπορευματοκιβωτίου. Στο πρόβλημα αυτό οι άγνωστοι είναι η εγκάρσια μετατόπιση του εμπορευματοκιβωτίου, y_C , η κατακόρυφη, z_C και η γωνία απόκρισής του, φ_C . Για την ισορροπία των ροπών θεωρήθηκε περιστροφή του εμπορευματοκιβωτίου ως προς το κέντρο βάρους του το οποίο συμπίπτει με το γεωμετρικό του κέντρο. Επίσης, εφαρμόστηκε το θεώρημα Steiner για τη μεταφορά του συστήματος από το εμπορευματοκιβώτιο στο κατάστρωμα και το θεώρημα στροφής των αξόνων ώστε το νέο σύστημα να είναι κάθετο στο κατάστρωμα.

Οι αντίστοιχες εξισώσεις για την επίλυση του προβλήματος είναι :

Εγκάρσια κίνηση :

$$\sum F_Y = m \cdot \ddot{y}_C \Leftrightarrow \vec{R}_{RY} + \vec{F}_{LASH(TOTAL)/Y} + \vec{F}_{FR} = m \cdot \ddot{y}_C$$

$$\Leftrightarrow R_{RY} + 2 \cdot (F_{L/Y} - F_{R/Y}) - F_{FR} = m \cdot \ddot{y}_C$$

$$\Leftrightarrow (m \cdot g \cdot \sin \varphi + T_{RY} + C_{RY}) + 2 \cdot (F_{L/Y} - F_{R/Y}) - \mu \cdot N \cdot \text{sign}(\dot{y}_C) = m \cdot \ddot{y}_C$$

$$\text{όπου } N = 2 \cdot (N_1 + N_2) = m \cdot g \cdot \cos \varphi + T_{RZ}$$

Κατακόρυφη κίνηση :

$$\sum F_Z = m \cdot \ddot{z}_C \Leftrightarrow R_{RZ} + F_{LASH(TOTAL)/Z} - 2 \cdot (N_1 + N_2) = m \cdot \ddot{z}_C$$

$$\Leftrightarrow m \cdot g \cdot \cos \varphi + T_{RZ} - C_{RZ} - 2 \cdot (F_{L/Z} + F_{R/Z}) - 2 \cdot (N_1 + N_2) = m \cdot \ddot{z}_C$$

Ισορροπία ροπών :

$$[I + m \cdot (y_C^2 + z_C^2)] \cdot \ddot{\varphi}_C = M_{LASH} + M_{FR}$$

$$\Leftrightarrow [I + m \cdot (y_C^2 + z_C^2)] \cdot \ddot{\varphi}_C = 2 \cdot [-F_{R/Y} \cdot (\alpha/2 \cdot \sin \varphi_C) + F_{R/Z} \cdot (\alpha/2 \cdot \cos \varphi_C) + F_{L/Y} \cdot (\alpha/2 \cdot \sin \varphi_C) - F_{L/Z} \cdot (\alpha/2 \cdot \cos \varphi_C)] + F_{FR} \cdot \text{sign}(\dot{y}_C) \cdot (\alpha/2)$$

$$\text{όπου } F_{FR} = 2 \cdot \mu \cdot (N_1 + N_2)$$

Αντίστοιχα με τη μοντελοποίηση του ενός εμπορευματοκιβωτίου έγινε μοντελοποίηση και για περισσότερα εμπορευματοκιβώτια.

Στη συνέχεια έλαβε χώρα η εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου που κατασκευάστηκε. Λύνοντας τις διαφορικές εξισώσεις κίνησης μέσω του λογισμικού προγράμματος *Mathematica*, βρίσκονται οι άγνωστοι y_C , z_C και φ_C .

Τα αποτελέσματα και οι γραφικές παραστάσεις που παρατίθενται στην εργασία σχετίζονται με τις επιταχύνσεις που δέχεται το εμπορευματοκιβώτιο, με τις δυνάμεις διατοιχισμού, αλλά και με τις δυνάμεις στα lashings.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου που αναπτύχθηκε σε σχέση με την *Ανεπτυγμένη Μέθοδο* κατά DNV. Παράλληλα, ερευνήθηκε η εφαρμογή του παραμετρικού διατοιχισμού στις φορτίσεις των συρματόσχοινων πρόσδεσης.

Συμπεραίνεται πως η κίνηση του διατοιχισμού είναι ο κύριος παράγοντας στην εμφάνιση των υψηλών φορτίσεων, ενώ συγχρόνως τονίζεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση του container από τον άξονα περιστροφής του πλοίου, ή όσο υψηλότερη είναι η αρχική διέγερση τόσο εντονότερες χαρακτηρίζονται και οι φορτίσεις. Τέλος, επισημαίνεται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων που στοιβάζονται και προσδέονται στο κατάστρωμα, τόσο αυξάνουν και οι δυνάμεις πρόσδεσης των αντίστοιχων συρματόσχοινων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κίνηση διατοιχισμού του πλοίου συγκαταλέγεται στις κυριότερες αιτίες φόρτισης των διατάξεων έγχυσης του φορτίου. Επομένως, κρίνεται επιβεβλημένη η μελέτη της κίνησης αυτής σε παραλληλισμό με τις φορτίσεις που επιδέχονται τα lashings. Έτσι, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στους ακόλουθους στόχους :

- Να πραγματοποιηθεί μια εισαγωγή στις βασικές αρχές στοιβασίας και ασφάλισης των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα του πλοίου. Επιπλέον, αναφέροντας τα βασικά προβλήματα κατά την μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων, γίνεται κατανοητή η ζωτικής σημασίας ύπαρξη των συστημάτων πρόσδεσης για την ασφάλεια του πλοίου.
- Να αναφερθούν οι ισχύοντες κανονισμοί των νηογνομόνων σχετικά με την ασφάλιση και μεταφορά του φορτίου, ώστε να σχηματιστεί μια ολοκληρωμένη εικόνα της πρακτικής αντιμετώπισης του θέματος από την πλευρά εφαρμογής της ναυτιλίας.
- Να δομηθεί το μαθηματικό μοντέλο, το οποίο να είναι ικανό να περιγράψει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τη συμπεριφορά ενός ή περισσότερων εμπορευματοκιβωτίων μαζί με το σύστημα έγχυσής τους στο κατάστρωμα του πλοίου.
- Να λάβει χώρα αριθμητική εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου και να αποδοθούν όσο το δυνατό καλύτερα τα σχετικά αποτελέσματα, έτσι ώστε να είναι κατανοητή τόσο η ερμηνεία τους όσο και η αξιολόγησή τους.
- Να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα, που προκύπτουν ύστερα από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, για τους βασικούς παράγοντες που καθορίζουν τη φόρτιση του συστήματος έγχυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΩΝ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΧΜΑΣΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

Η μοντελοποίηση που αναπτύσσεται στο παρόν κεφάλαιο συμβαδίζει με αυτήν που αναπτύχθηκε από τον Σ. Χ. Αντωνιάδη στη διπλωματική του εργασία [17], όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.3.5. Παρόλα αυτά, οι δύο μοντελοποιήσεις εμφανίζουν σημαντικές διαφορές. Πιο συγκεκριμένα, οι συνιστώσες μήκους των lashings έχουν περιγραφεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Επίσης, οι παραδοχές που έχουν υιοθετηθεί, είναι ενισχυμένες και κατάλληλα τεκμηριωμένες. Τέλος, στις εξισώσεις κίνησης που περιγράφουν την ισορροπία των ροπών των δυνάμεων που δρουν στο εμπορευματοκιβώτιο, έχει υποθεθεί ότι το εμπορευματοκιβώτιο περιστρέφεται ως προς τις πλευρές του, αντί για το κέντρο μάζας του.

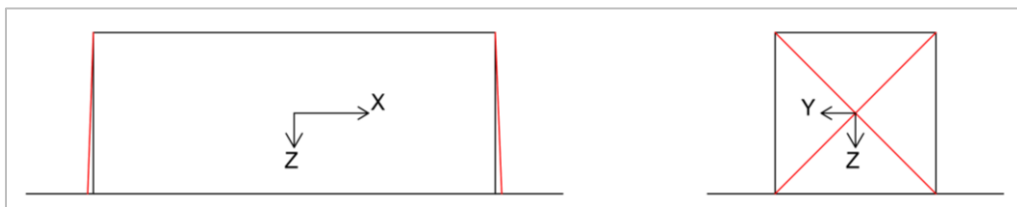
Όλα αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα την σύνθεση ενός ακριβέστερου μοντέλου το οποίο είναι σε θέση με τα δεδομένα του 6^{ου} Κεφαλαίου να παράγει αρκετά ακριβή και ρεαλιστικά αποτελέσματα.

5.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΟΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΟΥ

Μέσω αυτής πραγματοποιείται ο υπολογισμός των δυνάμεων που αναπτύσσονται στο σύστημα έχμασης (lashings), με σκοπό τον περιορισμό της κίνησης του εμπορευματοκιβωτίου στο κατάστρωμα του πλοίου. Θα ληφθεί υπόψη μόνο η εγκάρσια κίνηση του πλοίου (διατοιχισμός – roll) και θα εξεταστεί το πως αυτή επιδρά στο σύστημα έχμασης.

Λαμβάνονται ως παραδοχές ότι το εμπορευματοκιβώτιο είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο τετραγωνικής διατομής πλευράς a . Επίσης ο κορμός του εμπορευματοκιβωτίου κατά το διαμήκη άξονά του είναι ανθεκτικός σε κάμψη με αποτέλεσμα να μην υπόκειται στρέψη.

Στο μοντέλο χρησιμοποιείται εμπορευματοκιβώτιο 20-ft (20' x 8' x 8') και τα συρματόσχοινα δένονται χιαστί στις δύο του άκρες (one cross lashing). (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1 : Αναπαράσταση εμπορευματοκιβωτίου και της διάταξης των lashings

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι εξισώσεις των δυνάμεων που δρουν στο εμπορευματοκιβώτιο, οι εξισώσεις κίνησής του, καθώς και επεξηγηματικά σχήματα και παρατηρήσεις για κάθε περίπτωση.

5.1.1 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

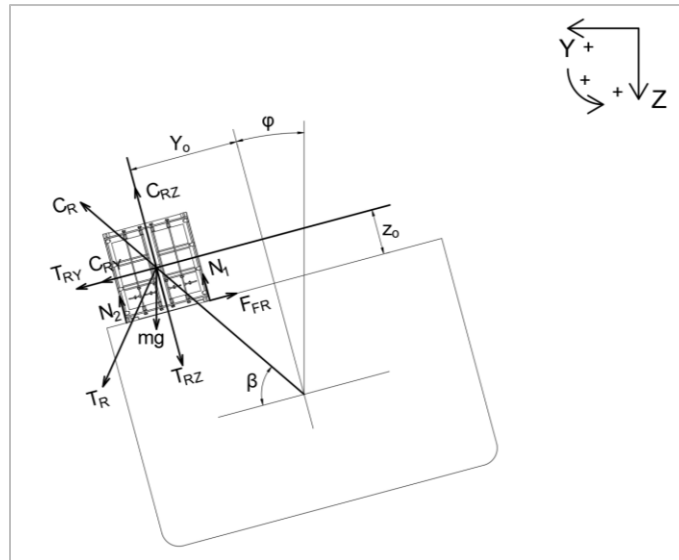
Οι δυνάμεις που δρουν πάνω στο εμπορευματοκιβώτιο λόγω της κίνησης διατοιχισμού του πλοίου αναλύονται σε δύο διευθύνσεις, y και z . Αυτές είναι : η εφαπτομενική δύναμη T_R , που ασκείται στο εμπορευματοκιβώτιο λόγω της επιταχυνόμενης κυκλικής κίνησης που εκτελεί κατά τη διάρκεια του διατοιχισμού του πλοίου και η φυγόκεντρος δύναμη C_R λόγω της κίνησης του πλοίου.

Συγχρόνως ασκούνται το βάρος mg , η δύναμη N (κάθετη αντίδραση), αλλά και η δύναμη τριβής F_{FR} στο σημείο επαφής του εμπορευματοκιβωτίου με το κατάστρωμα του πλοίου, η οποία τείνει να αντισταθεί στην εγκάρσια μετακίνηση του εμπορευματοκιβωτίου πάνω στο κατάστρωμα.

Σημειώνεται πως η δύναμη N ισούται με το άθροισμα τεσσάρων δυνάμεων N_i , που ασκούνται στις γωνίες έδρασης του εμπορευματοκιβωτίου από το κατάστρωμα.

Επίσης, τα εμπορευματοκιβώτια δεν μπορούν να σηκώσουν θλιπτικά φορτία.

Οι δυνάμεις λόγω διατοιχισμού απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα :



Σχήμα 5.2 : Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου, όπου m η μάζα του εμπορευματοκιβωτίου

Οι εξισώσεις λοιπόν, των δυνάμεων λόγω διατοιχισμού έχουν ως εξής [18] :

$$R_{RY} = m \cdot g \cdot \sin \varphi + T_{RY} + C_{RY} \quad (5.1)$$

$$R_{RZ} = m \cdot g \cdot \cos \varphi + T_{RZ} - C_{RZ} \quad , \quad T_{RZ} < 0 \quad (5.2)$$

$$T_{RY} = m \cdot r_1 \cdot \sin \beta \cdot \ddot{\varphi} \quad (5.3)$$

$$T_{RZ} = m \cdot r_1 \cdot \cos \beta \cdot \ddot{\varphi} \quad (5.4)$$

$$C_{RY} = m \cdot r_1 \cdot \cos \beta \cdot \dot{\varphi}^2 \quad (5.5)$$

$$C_{RZ} = m \cdot r_1 \cdot \sin \beta \cdot \dot{\varphi}^2 \quad (5.6)$$

$$N_1 + N_2 = \frac{N}{2} = \frac{1}{2} \cdot (m \cdot g \cdot \cos \varphi + T_{RZ}) , T_{RZ} > 0 \quad (5.7)$$

$$N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = \frac{N}{4} \quad (5.8)$$

Η κίνηση διατοιχισμού του πλοίου δύναται να προκαλέσει περιστροφή του εμπορευματοκιβωτίου ως προς τη μία πλευρά του, αλλά ακόμα και πλήρη ανασήκωσή του από το κατάστρωμα.

Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εισαγωγή ορισμένων περιορισμών στο μαθηματικό μοντέλο, όσον αφορά τις δυνάμεις N_i οι οποίες αναλαμβάνουν να παραλάβουν το βάρος του εμπορευματοκιβωτίου, $mg \cos \varphi$, και τις θετικές τιμές της κάθετης στο κατάστρωμα εφαπτομενικής συνιστώσας T_{RZ} λόγω της κίνησης του πλοίου.

Έτσι, αν φ_C είναι η γωνία απόκρισης του εμπορευματοκιβωτίου, τότε :

- για $\varphi_C > 0$, $N_1 = 0$
- για $\varphi_C < 0$, $N_2 = 0$

(Θεωρείται πως οι δυνάμεις N_3 και N_4 δρουν όμοια με τις N_1 και N_2 και γι' αυτό δεν μελετώνται χωρία.)

Αν συνυπολογιστεί και η κατακόρυφη μετακίνηση του εμπορευματοκιβωτίου z_C από το κατάστρωμα, τότε, για πλευρά εμπορευματοκιβωτίου α , οι περιορισμοί γίνονται :

- Η N_1 , για $z_C + (\alpha/2) \cdot \sin \varphi_C \neq a/2$, (5.9)
μηδενίζεται, αλλιώς έχει μη μηδενικές τιμές οι οποίες χρειάζεται να υπολογιστούν.

- Η N_2 , για $z_C - (\alpha/2) \cdot \sin \varphi_C \neq a/2$, (5.10)
μηδενίζεται, αλλιώς έχει μη μηδενικές τιμές οι οποίες χρειάζεται να υπολογιστούν.

5.1.2 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ LASHINGS

Τα lashings μοντελοποιούνται ως γραμμικά ελατήρια και και το φορτίο που δέχονται έχει την μορφή :

$$F = K \cdot (L - L_0) \quad (5.11)$$

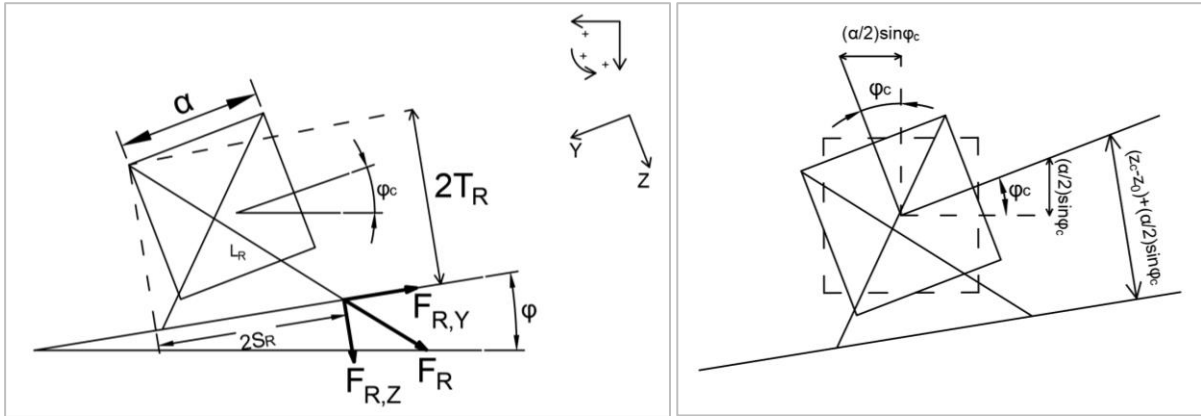
Όπου L , L_0 , K είναι αντίστοιχα το στιγμιαίο μήκος του ελατηρίου, το αρχικό μήκος του ελατηρίου και η σταθερά του ελατηρίου. Το μήκος L_i του lashing i είναι :

$$L_i = \sqrt{S_i^2 + T_i^2 + C_i^2} \quad (5.12)$$

Όπου S_i , T_i , C_i είναι η εγκάρσια, η κατακόρυφη και η διαμήκης συνιστώσα μήκους του ελατηρίου. Η διαμήκης συνιστώσα του μήκους, όμως, μηδενίζεται μιας και υπάρχει μόνο η κίνηση διατοιχισμού, $C_i = 0$. Έτσι :

$$L_i = \sqrt{S_i^2 + T_i^2} \quad (5.13)$$

Η κίνηση του εμπορευματοκιβωτίου και οι συνιστώσες μήκους των lashings S_i , T_i φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.3 : Κίνηση εμπορευματοκιβωτίου πάνω στο κατάστρωμα

Οι συνιστώσες μήκους του ελατηρίου (lashing) εκφράζονται ως εξής :

Δεξιά εγκάρσια συνιστώσα μήκους :

$$S_R = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \sin(45 + \varphi_c) + y_c - y_o & , \text{για } N \neq 0 \\ \alpha + \alpha \cdot \sin(\varphi_c) + y_c - y_o & , \text{για } N = 0 \end{cases} \quad (5.14)$$

Δεξιά κατακόρυφη συνιστώσα μήκους :

$$T_R = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \cos(45 + \varphi_c) + z_c - z_o & , \text{για } N \neq 0 \\ \alpha \cdot \cos(\varphi_c) + z_c - z_o & , \text{για } N = 0 \end{cases} \quad (5.15)$$

Αριστερή εγκάρσια συνιστώσα μήκους :

$$S_L = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \sin(45 - \varphi_c) - y_c + y_o & , \text{για } N \neq 0 \\ \alpha - \alpha \cdot \sin(\varphi_c) - y_c + y_o & , \text{για } N = 0 \end{cases} \quad (5.16)$$

Αριστερή κατακόρυφη συνιστώσα μήκους :

$$T_L = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \cos(45 - \varphi_c) + z_c - z_o & , \text{για } N \neq 0 \\ \alpha \cdot \cos(\varphi_c) + z_c - z_o & , \text{για } N = 0 \end{cases} \quad (5.17)$$

Οι δυνάμεις στο αριστερό και στο δεξί lashing είναι :

$$F_L = K_L \cdot (L_L - L_0) \quad (5.18)$$

$$F_R = K_R \cdot (L_R - L_0) \quad (5.19)$$

Σημειώνεται πως λόγω της υπόθεσης ότι τα συρματόσχοινα δεν επιδέχονται θλιπτικές τάσεις, εισάγονται οι ακόλουθοι περιορισμοί :

$$L_L \geq L_0 \quad (5.20)$$

$$L_R \geq L_0 \quad (5.21)$$

$$\text{Όπου } L_0 = \sqrt{S_0^2 + T_0^2} = \sqrt{(a)^2 + (a)^2} \Rightarrow L_0 = a\sqrt{2} \quad (5.22)$$

Το συνολικό φορτίο στα lashings έχει εγκάρσιες και κατακόρυφες συνιστώσες οι οποίες περιγράφονται ως εξής :

Δεξιά εγκάρσια συνιστώσα δύναμης :

$$F_{R/Y} = K_R \cdot (S_R - S_0) \quad (5.23)$$

Δεξιά κατακόρυφη συνιστώσα δύναμης :

$$F_{R/Z} = K_R \cdot (T_R - T_0) \quad (5.24)$$

Αριστερή εγκάρσια συνιστώσα δύναμης :

$$F_{L/Y} = K_L \cdot (S_L - S_0) \quad (5.25)$$

Αριστερή κατακόρυφη συνιστώσα δύναμης :

$$F_{L/Z} = K_L \cdot (T_L - T_0) \quad (5.26)$$

5.1.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΟΥ

Οι άγνωστοι στο πρόβλημα αυτό είναι : η εγκάρσια μετατόπιση του εμπορευματοκιβωτίου y_C , η κατακόρυφη μετατόπιση του z_C και η γωνία απόκρισής του φ_C .

Για την ισορροπία των ροπών θεωρείται περιστροφή του εμπορευματοκιβωτίου ως προς την μία πλευρά του. Επιπλέον, εφαρμόστηκε το θεώρημα Steiner για τη μεταφορά του συστήματος από το κέντρο περιστροφής του εμπορευματοκιβωτίου στο κατάστρωμα, αλλά και το θεώρημα στροφής των αξόνων ώστε το νέο σύστημα να είναι κάθετο στο κατάστρωμα. Παρακάτω παραθέτονται οι εξισώσεις κίνησης :

Εγκάρσια κίνηση :

$$\begin{aligned} \sum F_Y = m \cdot \ddot{y}_C &\Leftrightarrow \vec{R}_{RY} + \vec{F}_{LASH(TOTAL)Y} + \vec{F}_{FR} = m \cdot \ddot{y}_C \\ \Leftrightarrow R_{RY} + 2 \cdot (F_{LY} - F_{RY}) - F_{FR} &= m \cdot \ddot{y}_C \\ \Leftrightarrow (m \cdot g \cdot \sin \varphi + T_{RY} + C_{RY}) + 2 \cdot (F_{LY} - F_{RY}) - \mu \cdot N \cdot \text{sign}(\dot{y}_C) &= m \cdot \ddot{y}_C \end{aligned} \quad (5.27)$$

$$\text{όπου } N = 2 \cdot (N_1 + N_2) = m \cdot g \cdot \cos \varphi + T_{RZ}$$

Κατακόρυφη κίνηση :

$$\begin{aligned} \sum F_Z = m \cdot \ddot{z}_C &\Leftrightarrow R_{RZ} + F_{LASH(TOTAL)Z} - 2 \cdot (N_1 + N_2) = m \cdot \ddot{z}_C \\ \Leftrightarrow m \cdot g \cdot \cos \varphi + T_{RZ} - C_{RZ} - 2 \cdot (F_{LZ} + F_{RZ}) - 2 \cdot (N_1 + N_2) &= m \cdot \ddot{z}_C \end{aligned} \quad (5.28)$$

Ισορροπία ροπών :

$$\begin{aligned} [I + m \cdot (y_C^2 + z_C^2)] \cdot \ddot{\varphi}_C &= M_{LASH} + M_{C_R} + M_{T_r} + M_W \\ \Leftrightarrow [I + m \cdot (y_C^2 + z_C^2)] \cdot \ddot{\varphi}_C &= 2 \cdot [-F_{RY} \cdot (\alpha \cdot \cos \varphi_C) + F_{R/Z} \cdot (\alpha \cdot \sin \varphi_C) \\ + F_{LY} \cdot (\alpha \cdot \cos \varphi_C) - F_{L/Z} \cdot (\alpha \cdot \sin \varphi_C)] &+ C_{RY} \cdot KG_C + T_{RY} \cdot KG_C - W_Y \cdot KG_C \\ + C_{RZ} \cdot (\alpha / 2) - T_{RZ} \cdot (\alpha / 2) - W_Z \cdot (\alpha / 2) \end{aligned} \quad (5.29)$$

Μετασχηματισμός στροφής αξόνων

$$\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_C & -\sin \varphi_C \\ \sin \varphi_C & \cos \varphi_C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_C \\ z_C \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{aligned} y &= y_C \cdot \cos \varphi_C - z_C \cdot \sin \varphi_C \\ z &= y_C \cdot \sin \varphi_C + z_C \cdot \cos \varphi_C \end{aligned} \quad (5.30)$$

Όπου (y, z) το ακίνητο σύστημα του καταστρώματος.

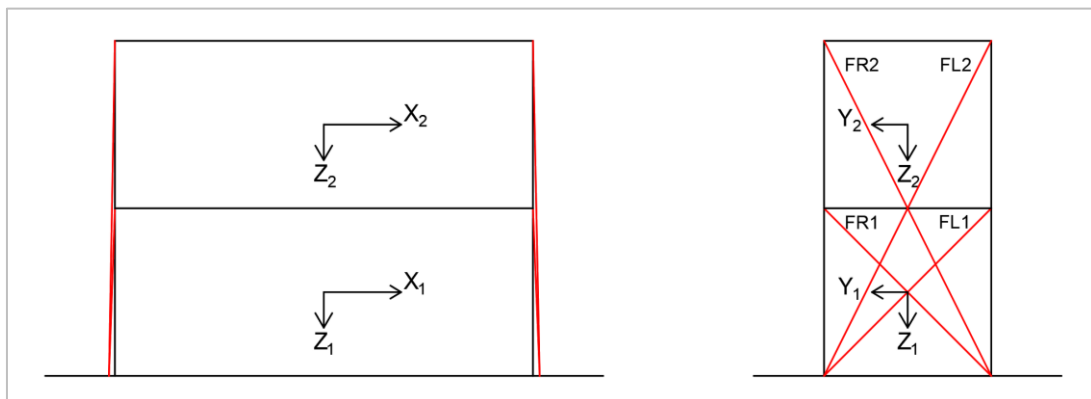
5.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΥΟ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ

Σε αυτή την παράγραφο θα μελετηθεί η συμπεριφορά κίνησης δύο εμπορευματοκιβωτίων. Αρχικά θα εξεταστεί το σύστημα εμπορευματοκιβωτίων ως δύο ξεχωριστές μάζες και ακολούθως ως μία ενιαία μάζα.

5.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΥΟ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΩΣ ΔΥΟ ΜΑΖΕΣ

Η μοντελοποίηση είναι σύμφωνη με αυτή του ενός εμπορευματοκιβωτίου. Κάθε εμπορευματοκιβώτιο προσδένεται με τέσσερα συρματόσχοινα από κάθε γωνία του στο κατάστρωμα (two cross lashing).

Θεωρείται πως τα εμπορευματοκιβώτια εδράζονται απλά το ένα πάνω στο άλλο, ενώ μεταξύ τους δεν υπάρχει κάποιος συνδετικός μηχανισμός (περιστρεφόμενο κλειδί – twistlock). Τονίζεται πως οι επιτρεπόμενες κινήσεις του 2^{ου} εμπορευματοκιβωτίου είναι ίδιες με αυτές του 1^{ου}, δηλαδή εγκάρσια ολίσθηση και ανατροπή. Επισημαίνεται πως οι μετατοπίσεις του 2^{ου} εμπορευματοκιβωτίου σε σχέση με το κάτω είναι πολύ μικρές για αυτό και η επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο, καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης είναι σχεδόν σταθερή, με ό,τι αυτό συνεπάγεται ως προς τα σημεία περιστροφής του άνω εμπορευματοκιβωτίου.

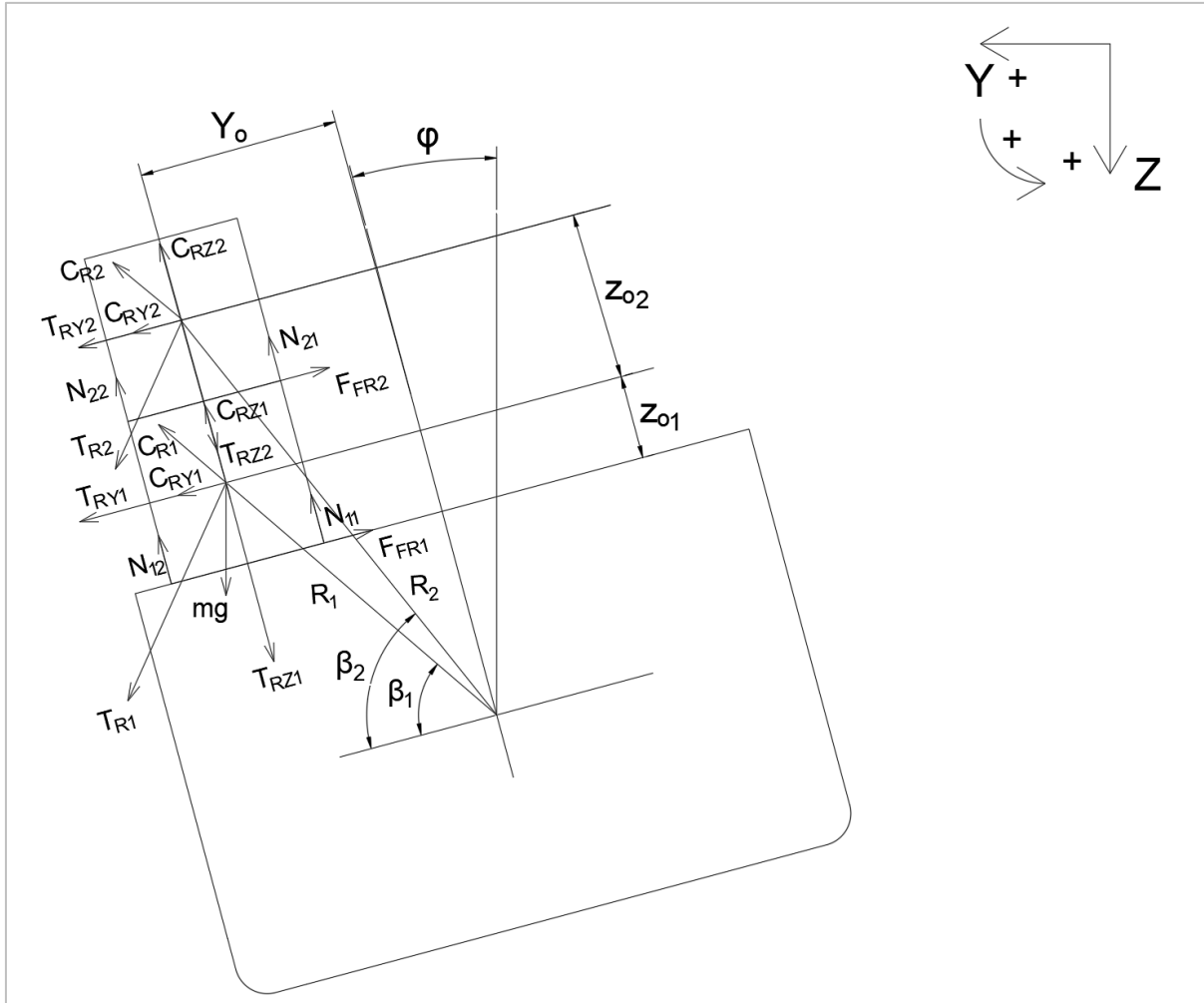


Σχήμα 5.4 : Αναπαράσταση εμπορευματοκιβωτίου και της διάταξης των lashings

5.2.1.1 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

Οι εξισώσεις που καταγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, σχετικά με τις δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σώμα λόγω διατοίχισμού του πλοίου, ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση, όπου πλέον οι μάζες είναι δύο.

Οι δυνάμεις λόγω διατοίχισμού απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα :



Σχήμα 5.5 : Δυνάμεις λόγω κίνησης διατοιχισμού του πλοίου, για δύο εμπορευματοκιβώτια

Οι εξισώσεις των δυνάμεων λόγω διατοιχισμού σε κάθε ένα εμπορευματοκιβώτιο έχουν ως εξής :

$$R_{RY1} = m_1 \cdot g \cdot \sin \varphi + T_{RY1} + C_{RY1} \quad (5.31)$$

$$R_{RY2} = m_2 \cdot g \cdot \sin \varphi + T_{RY2} + C_{RY2} \quad (5.32)$$

$$R_{RZ1} = m_1 \cdot g \cdot \cos \varphi + T_{RZ1} - C_{RZ1} \quad (5.33)$$

$$R_{RZ2} = m_2 \cdot g \cdot \cos \varphi + T_{RZ2} - C_{RZ2} \quad (5.34)$$

$$T_{RY1} = m_1 \cdot r_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \ddot{\varphi} \quad (5.35)$$

$$T_{RY2} = m_2 \cdot r_2 \cdot \sin \beta_2 \cdot \ddot{\varphi} \quad (5.36)$$

$$T_{RZ1} = m_1 \cdot r_1 \cdot \cos \beta_1 \cdot \ddot{\varphi} \quad (5.37)$$

$$T_{RZ2} = m_2 \cdot r_2 \cdot \cos \beta_2 \cdot \ddot{\varphi} \quad (5.38)$$

$$C_{RY1} = m_1 \cdot r_1 \cdot \cos \beta_1 \cdot \dot{\varphi}^2 \quad (5.39)$$

$$C_{RY2} = m_2 \cdot r_2 \cdot \cos \beta_2 \cdot \dot{\varphi}^2 \quad (5.40)$$

$$C_{RZ1} = m_1 \cdot r_1 \cdot \sin \beta_1 \cdot \dot{\varphi}^2 \quad (5.41)$$

$$C_{RZ2} = m_2 \cdot r_2 \cdot \sin \beta_2 \cdot \dot{\varphi}^2 \quad (5.42)$$

$$N_{11} + N_{12} = \frac{N_1}{2} = \frac{1}{2} \cdot (m_1 \cdot g \cdot \cos \varphi + T_{RZ1}) \quad (5.43)$$

$$N_{21} + N_{22} = \frac{N_2}{2} = \frac{1}{2} \cdot (m_2 \cdot g \cdot \cos \varphi + T_{RZ2}) \quad (5.44)$$

$$N_{11} = N_{12} = N_{13} = N_{14} = \frac{N_1}{4} \quad (5.45)$$

$$N_{21} = N_{22} = N_{23} = N_{24} = \frac{N_2}{4} \quad (5.46)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να ληφθούν επίσης κάποιοι περιορισμοί όσον αφορά τις κάθετες αντιδράσεις. Όπως και στην περίπτωση του ενός εμπορευματοκιβωτίου, έτσι και τώρα, όταν το κάτω εμπορευματοκιβώτιο δεν ακουμπά στο κατάστρωμα ή όταν το πάνω δεν εδράζεται στο κάτω, τότε τα N_{ij} γίνονται :

Αν φ_{C1} είναι η γωνία απόκρισης του 1^{ου} εμπορευματοκιβωτίου και φ_{C2} του 2^{ου}, τότε :

- για $\varphi_{C1} > 0$, $N_{11} = 0$, για $\varphi_{C2} > 0$, $N_{21} = 0$,
- για $\varphi_{C1} < 0$, $N_{12} = 0$, και για $\varphi_{C2} < 0$, $N_{22} = 0$.

(Θεωρούνται ότι οι δυνάμεις N_{i3} και N_{i4} δρουν όμοια με τις N_{i1} και N_{i2} και γι' αυτό δεν μελετώνται ξεχωριστά ($i = 1,2$).)

Επιπλέον περιορισμοί εμπλέκονται και εδώ, για την κατακόρυφη μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων z_{C1} και z_{C2} από το κατάστρωμα :

- Η N_{11} , για $z_{c1} + (\alpha / 2) \cdot \sin \varphi_{c1} \neq a / 2$ (5.47) και

- η N_{21} , για $z_{c2} + (\alpha / 2) \cdot \sin \varphi_{c2} \neq a / 2$ (5.48)

μηδενίζονται, αλλιώς χρειάζεται να υπολογιστούν.

- Η N_{12} , για $z_{c1} - (\alpha / 2) \cdot \sin \varphi_{c1} \neq a / 2$ (5.49) και

- η N_{22} , για $z_{c2} - (\alpha / 2) \cdot \sin \varphi_{c2} \neq a / 2$ (5.50)

μηδενίζονται, αλλιώς χρειάζεται να υπολογιστούν.

5.2.1.2 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ LASHINGS

Το φορτίο που φέρουν τα lashings είναι ίδιο με της πρώτης περίπτωσης :

$$1^\circ \text{ E/K} : F_1 = K \cdot (L_1 - L_{01}) \quad (5.51)$$

$$2^\circ \text{ E/K} : F_2 = K \cdot (L_2 - L_{02}) \quad (5.52)$$

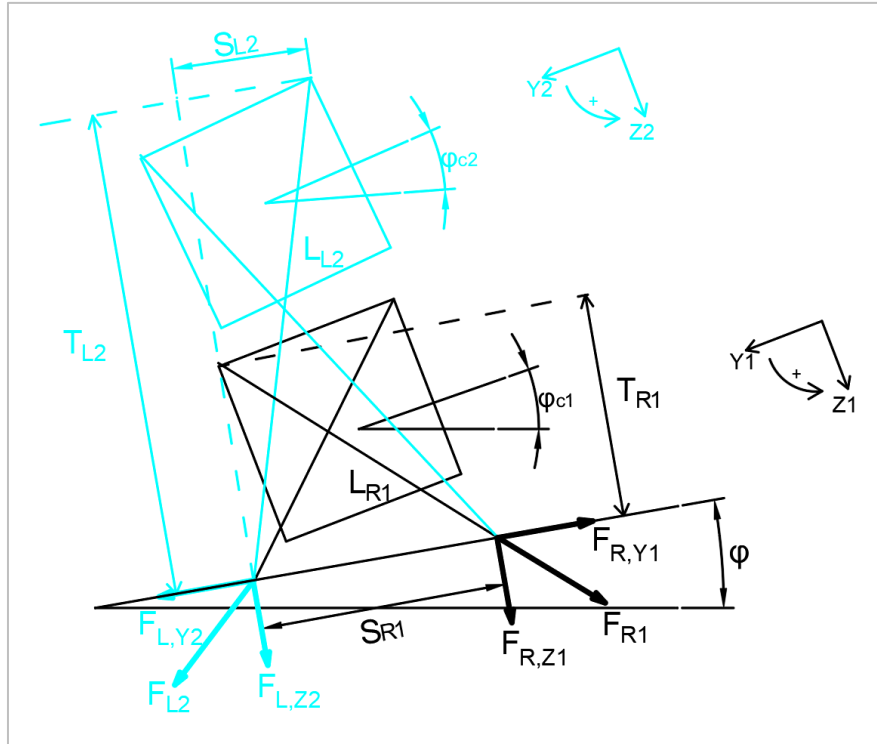
Όπου για $i = 1, 2$ τα L_i , L_{0i} , K είναι αντίστοιχα το στιγμιαίο μήκος του ελατηρίου, το αρχικό μήκος του ελατηρίου και η σταθερά του ελατηρίου. Το μήκος $L_{i(L,R)}$ του lashing i είναι :

$$L_i = \sqrt{S_{i(L,R)}^2 + T_{i(L,R)}^2 + C_{i(L,R)}^2} \quad (5.53)$$

Όπου $S_{i(L,R)}$ η εγκάρσια, $T_{i(L,R)}$ η κατακόρυφη και $C_{i(L,R)}$ η διαμήκης συνιστώσα μήκους του δεξιού ή αριστερού ελατηρίου του κάθε εμπορευματοκιβωτίου. Η διαμήκης συνιστώσα του μήκους, όμως, μηδενίζεται μιας και υπάρχει μόνο η κίνηση διατοιχισμού, $C_{i(L,R)} = 0$.

$$L_i = \sqrt{S_{i(L,R)}^2 + T_{i(L,R)}^2} \quad (5.54)$$

Οι κινήσεις τους και οι συνιστώσες μήκους $S_{i(L,R)}$, $T_{i(L,R)}$ απεικονίζονται παρακάτω :



Σχήμα 5.6 : Κίνηση των δύο εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα

Οι συνιστώσες μήκους των ελατηρίων (lashings) εκφράζονται ως εξής :

Δεξιά εγκάρσια συνιστώσα μήκους :

$$S_{R1} = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \sin(45 + \varphi_{c1}) + y_{c1} - y_o, & \text{για } N_1 \neq 0 \\ \alpha + \alpha \cdot \sin(\varphi_{c1}) + y_{c1} - y_o, & \text{για } N_1 = 0 \end{cases} \quad (5.55)$$

$$S_{R2} = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \sin(45 + \varphi_{c2}) + y_{c2} - y_o, & \text{για } N_2 \neq 0 \\ \alpha + \alpha \cdot \sin(\varphi_{c2}) + y_{c2} - y_o, & \text{για } N_2 = 0 \end{cases} \quad (5.56)$$

Δεξιά κατακόρυφη συνιστώσα μήκους :

$$T_{R1} = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \cos(45 + \varphi_{c1}) + z_{c1} - z_o, & \text{για } N_1 \neq 0 \\ \alpha \cdot \cos(\varphi_{c1}) + z_{c1} - z_o, & \text{για } N_1 = 0 \end{cases} \quad (5.57)$$

$$T_{R2} = \begin{cases} \alpha + \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \cos(45 + \varphi_{c2}) + z_{c2} - z_o, & \text{για } N_2 \neq 0 \\ \alpha + \alpha \cdot \cos(\varphi_{c2}) + z_{c2} - z_o, & \text{για } N_2 = 0 \end{cases} \quad (5.58)$$

Αριστερή εγκάρσια συνιστώσα μήκους :

$$S_{L1} = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \sin(45 - \varphi_{C1}) - y_{C1} + y_o, & \text{για } N_1 \neq 0 \\ \alpha - \alpha \cdot \sin(\varphi_{C1}) - y_{C1} + y_o, & \text{για } N_1 = 0 \end{cases} \quad (5.59)$$

$$S_{L2} = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \sin(45 - \varphi_{C2}) - y_{C2} + y_o, & \text{για } N_2 \neq 0 \\ \alpha - \alpha \cdot \sin(\varphi_{C2}) - y_{C2} + y_o, & \text{για } N_2 = 0 \end{cases} \quad (5.60)$$

Αριστερή κατακόρυφη συνιστώσα μήκους :

$$T_{L1} = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \cos(45 - \varphi_{C1}) + z_{C1} - z_o, & \text{για } N_1 \neq 0 \\ \alpha \cdot \cos(\varphi_{C1}) + z_{C1} - z_o, & \text{για } N_1 = 0 \end{cases} \quad (5.61)$$

$$T_{L2} = \begin{cases} \alpha + \sqrt{2} \cdot \alpha \cdot \cos(45 - \varphi_{C2}) + z_{C2} - z_o, & \text{για } N_2 \neq 0 \\ \alpha + \alpha \cdot \cos(\varphi_{C2}) + z_{C2} - z_o, & \text{για } N_2 = 0 \end{cases} \quad (5.62)$$

Όπως ήδη αναφέρθηκε οι δυνάμεις στα αριστερά και στα δεξιά lashings για τα δύο εμπορευματοκιβώτια ($i = 1,2$) είναι :

$$F_{Li} = K_{Li} \cdot (L_{Li} - L_{0i}) \quad (5.63)$$

$$F_{Ri} = K_{Ri} \cdot (L_{Ri} - L_{0i}) \quad (5.64)$$

Ισχύουν οι ίδιοι περιορισμοί για τα συρματόσχοινα πρόσδεσης όπως στις εξισώσεις της παραγράφου 5.1.3, ενώ για τα αρχικά μήκη L_{0i} ισχύει :

$$L_{01} = \sqrt{S_{01}^2 + T_{01}^2} = \sqrt{(\alpha)^2 + (\alpha)^2} \Rightarrow L_{01} = \alpha \cdot \sqrt{2} \quad (5.65)$$

$$L_{02} = \sqrt{S_{02}^2 + T_{02}^2} = \sqrt{\alpha^2 + (2\alpha)^2} \Rightarrow L_{02} = \alpha \cdot \sqrt{5} \quad (5.66)$$

Το συνολικό φορτίο στα lashings έχει εγκάρσιες και κατακόρυφες συνιστώσες οι οποίες εκφράζονται από τις ακόλουθες σχέσεις. Για τα δύο εμπορευματοκιβώτια λοιπόν ($i = 1,2$) ισχύει :

Δεξιά εγκάρσια συνιστώσα δύναμης :

$$F_{(R/Y)i} = K_R \cdot (S_{Ri} - S_{0i}) \quad (5.67)$$

Δεξιά κατακόρυφη συνιστώσα δύναμης :

$$F_{(R/Z)i} = K_R \cdot (T_{Ri} - T_{0i}) \quad (5.68)$$

Αριστερή εγκάρσια συνιστώσα δύναμης :

$$F_{(L/Y)i} = K_L \cdot (S_{Li} - S_{0i}) \quad (5.69)$$

Αριστερή κατακόρυφη συνιστώσα δύναμης :

$$F_{(L/Z)i} = K_L \cdot (T_{Li} - T_{0i}) \quad (5.70)$$

5.2.1.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΥΟ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΩΣ ΔΥΟ ΜΑΖΕΣ

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, οι άγνωστοι στο πρόβλημα αυτό είναι οι εγκάρσιες μετατοπίσεις των εμπορευματοκιβωτίων, y_{C1} , y_{C2} , οι κατακόρυφες μετατοπίσεις, z_{C1} , z_{C2} και οι γωνίες απόκρισης τους, φ_{C1} , φ_{C2} .

Για την ισορροπία των ροπών θεωρείται περιστροφή του κάθε εμπορευματοκιβωτίου ως προς την μία πλευρά του. Επιπλέον, εφαρμόστηκε το θεώρημα Steiner για τη μεταφορά του συστήματος από το κέντρο περιστροφής των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα, αλλά και το θεώρημα στροφής των αξόνων ώστε το νέο σύστημα να είναι κάθετο στο κατάστρωμα.

Σημειώνεται πως ο συντελεστής τριβής μ , μεταξύ καταστρώματος – 1^{ου} εμπορευματοκιβωτίου και μεταξύ 1^{ου} – 2^{ου} εμπορευματοκιβωτίου είναι ο ίδιος. Θεωρείται πως οι τριβώμενες επιφάνειες είναι από το ίδιο υλικό και έχουν της ίδια ποιότητα κατεργασίας.

Παρακάτω παραθέτονται οι εξισώσεις κίνησης :

Εγκάρσια κίνηση ($i = 1,2$) :

$$\begin{aligned} \sum F_{Yi} = m_i \cdot \ddot{y}_{Ci} &\Leftrightarrow \vec{R}_{RYi} + \vec{F}_{LASH(TOTAL)/Y,i} + \vec{F}_{FRi} = m_i \cdot \ddot{y}_{Ci} \\ \Leftrightarrow R_{RYi} + 2 \cdot (F_{LY,i} - F_{RY,i}) - F_{FRi} &= m_i \cdot \ddot{y}_{Ci} \\ \Leftrightarrow (m_i \cdot g \cdot \sin \varphi_i + T_{RYi} + C_{RYi}) + 2 \cdot (F_{LY,i} - F_{RY,i}) - \mu \cdot N_i \cdot \text{sign}(\dot{y}_{Ci}) &= m_i \cdot \ddot{y}_{Ci} \end{aligned} \quad (5.71)$$

όπου $N_i = 2 \cdot (N_{i1} + N_{i2}) = m_i \cdot g \cdot \cos \varphi_i + T_{RZi} - C_{RZi}$

Κατακόρυφη κίνηση :

$$\begin{aligned} \sum F_{Z1} = m_1 \cdot \ddot{z}_{C1} &\Leftrightarrow R_{RZ1} + F_{LASH(TOTAL)/Z,1} - 2 \cdot (N_{11} + N_{12}) + R_{RZ2} = m_1 \cdot \ddot{z}_{C1} \\ &\Leftrightarrow m_1 \cdot g \cdot \cos \varphi_1 + T_{RZ1} - C_{RZ1} - 2 \cdot (F_{L/Z,1} + F_{R/Z,1}) - 2 \cdot (N_{11} + N_{12}) + m_2 \cdot g \cdot \cos \varphi_2 \\ &+ T_{RZ2} - C_{RZ2} = m_1 \cdot \ddot{z}_{C1} \end{aligned} \quad (5.72)$$

$$\begin{aligned} \sum F_{Z2} = m_2 \cdot \ddot{z}_{C2} &\Leftrightarrow R_{RZ2} + F_{LASH(TOTAL)/Z,2} - 2 \cdot (N_{21} + N_{22}) = m_2 \cdot \ddot{z}_{C2} \\ &\Leftrightarrow m_2 \cdot g \cdot \cos \varphi_2 + T_{RZ2} - C_{RZ2} - 2 \cdot (F_{L/Z,2} + F_{R/Z,2}) - 2 \cdot (N_{21} + N_{22}) = m_2 \cdot \ddot{z}_{C2} \end{aligned} \quad (5.73)$$

Ισορροπία ροπών :

$$\begin{aligned} [I_1 + m_1 \cdot (y_{C1}^2 + z_{C1}^2)] \cdot \ddot{\varphi}_{C1} &= M_{LASH,1} + M_{C_r,1} + M_{T_r,1} + M_{W,1} \\ &\Leftrightarrow [I_1 + m_1 \cdot (y_{C1}^2 + z_{C1}^2)] \cdot \ddot{\varphi}_{C1} = 2 \cdot [-F_{R/Y,1} \cdot (\alpha \cdot \cos \varphi_{C1}) + F_{R/Z,1} \cdot (\alpha \cdot \sin \varphi_{C1}) \\ &+ F_{L/Y,1} \cdot (\alpha \cdot \cos \varphi_{C1}) - F_{L/Z,1} \cdot (\alpha \cdot \sin \varphi_{C1})] + C_{R/Y,1} \cdot KG_{C1} + T_{R/Y,1} \cdot KG_{C1} - W_{Y,1} \cdot KG_{C1} \\ &+ C_{RZ,1} \cdot (\alpha / 2) - T_{RZ,1} \cdot (\alpha / 2) - W_{Z,1} \cdot (\alpha / 2) \end{aligned} \quad (5.74)$$

$$\begin{aligned} [I_2 + m_2 \cdot (y_{C2}^2 + z_{C2}^2)] \cdot \ddot{\varphi}_{C2} &= M_{LASH,2} + M_{C_r,2} + M_{T_r,2} + M_{W,2} \\ &\Leftrightarrow [I_2 + m_2 \cdot (y_{C2}^2 + z_{C2}^2)] \cdot \ddot{\varphi}_{C2} = 2 \cdot [-F_{R/Y,2} \cdot (\alpha \cdot \cos \varphi_{C2}) + F_{R/Z,2} \cdot (\alpha \cdot \sin \varphi_{C2}) \\ &+ F_{L/Y,2} \cdot (\alpha \cdot \cos \varphi_{C2}) - F_{L/Z,2} \cdot (\alpha \cdot \sin \varphi_{C2})] + C_{R/Y,2} \cdot KG_{C2} + T_{R/Y,2} \cdot KG_{C2} - W_{Y,2} \cdot KG_{C2} \\ &+ C_{RZ,2} \cdot (\alpha / 2) - T_{RZ,2} \cdot (\alpha / 2) - W_{Z,2} \cdot (\alpha / 2) \end{aligned} \quad (5.75)$$

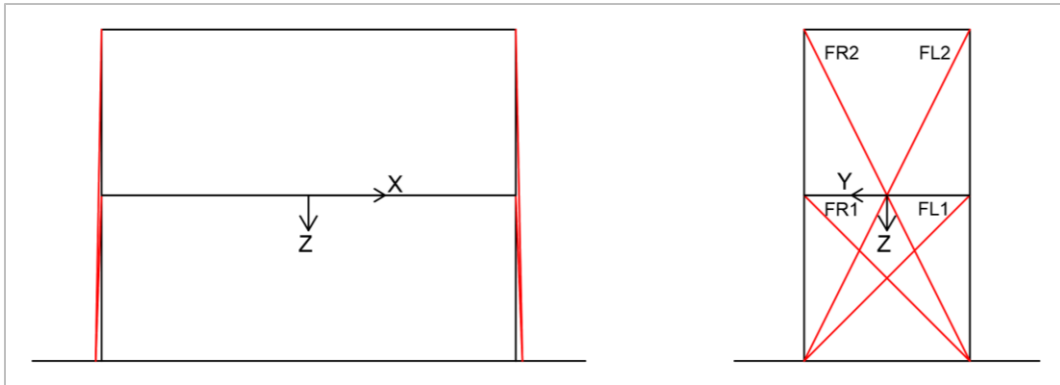
Μετασχηματισμός στροφής αξόνων

$$\begin{pmatrix} y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_{Ci} & -\sin \varphi_{Ci} \\ \sin \varphi_{Ci} & \cos \varphi_{Ci} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_{Ci} \\ z_{Ci} \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{aligned} y_i &= y_{Ci} \cdot \cos \varphi_{Ci} - z_{Ci} \cdot \sin \varphi_{Ci} \\ z_i &= y_{Ci} \cdot \sin \varphi_{Ci} + z_{Ci} \cdot \cos \varphi_{Ci} \end{aligned} \quad (5.76)$$

Όπου (y_i, z_i) το ακίνητο σύστημα του καταστρώματος.

5.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΥΟ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΩΣ ΜΙΑ ΜΑΖΑ

Στην περίπτωση αυτή μοντελοποιείται το πρόβλημα πρόσδεσης δύο εμπορευματοκιβωτίων, ως μία μάζα. Η μοντελοποίηση συμβαδίζει με αυτήν του ενός εμπορευματοκιβωτίου. Κάθε εμπορευματοκιβώτιο προσδέεται με τέσσερα συρματόσχοινα από κάθε γωνία του στο κατάστρωμα (two cross lashing), ενώ μεταξύ τους συνδέονται με περιστρεφόμενα κλειδιά (twistlocks).



Σχήμα 5.7 : Αναπαράσταση των εμπορευματοκιβωτίων και της διάταξης των lashings ως μία μάζα

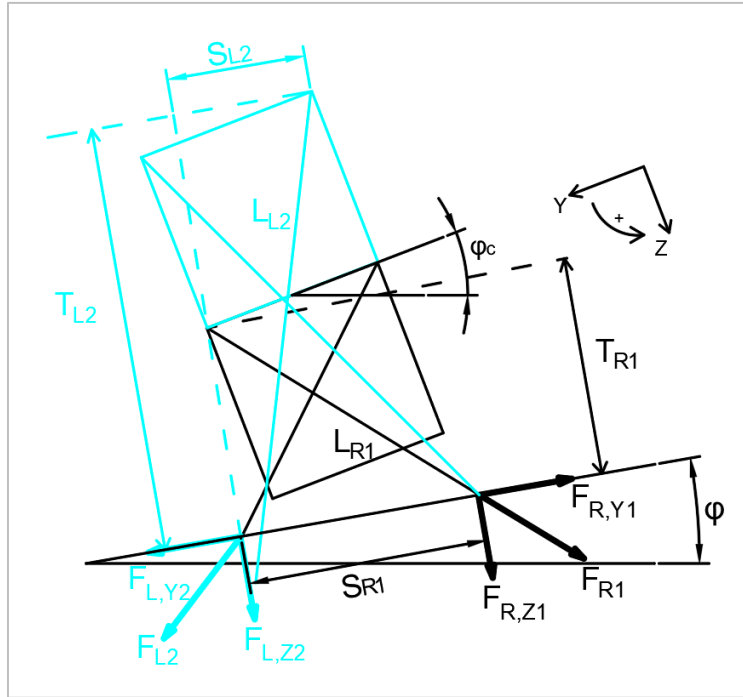
5.2.2.1 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

Οι δυνάμεις λόγω της κίνησης διατοιχισμού του πλοίου δίνονται από τις σχέσεις που έχουν αναφερθεί προηγουμένως στην παράγραφο 5.1.2. Η διαφορά είναι ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση οι υπολογισμοί γίνονται για μάζα εμπορευματοκιβωτίων m' , διαφορετική από πριν. Επίσης, το κέντρο μάζας και κέντρο εφαρμογής των δυνάμεων, υπολογίζεται από τη σχέση :

$$KG_C = \frac{\sum m_i KG_i}{m} \quad (5.77)$$

5.2.2.2 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ LASHINGS

Οι εξισώσεις για τις δυνάμεις που δέχονται τα συρματόσχοινα είναι ίδιες με αυτές της παραγράφου 5.2.1.2. Εδώ ισχύει όμως, $\varphi_{C1} = \varphi_{C2} = \varphi_C$, $y_{C1} = y_{C2} = y_C$ και $z_{C1} = z_{C2} = z_C$.



Σχήμα 5.8 : Κίνηση των δύο εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα

5.2.2.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΥΟ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΩΣ ΜΙΑ ΜΑΖΑ

Οι εξισώσεις κίνησης για το σύστημα των εμπορευματοκιβωτίων ως μία μάζα είναι :

Εγκάρσια κίνηση :

$$\begin{aligned} \sum F_Y &= m \cdot \ddot{y}_C \Leftrightarrow \vec{R}_{RY} + \vec{F}_{LASH(TOTAL)Y} + \vec{F}_{FR} = m \cdot \ddot{y}_C \\ \Leftrightarrow R_{RY} + 2 \cdot \left[(F_{L/Y,1} - F_{R/Y,1}) + (F_{L/Y,2} - F_{R/Y,2}) \right] - F_{FR} &= m \cdot \ddot{y}_C \\ \Leftrightarrow (m \cdot g \cdot \sin \varphi + T_{RY} + C_{RY}) + 2 \cdot \left[(F_{L/Y,1} - F_{R/Y,1}) + (F_{L/Y,2} - F_{R/Y,2}) \right] \\ - \mu \cdot N \cdot \text{sign}(\dot{y}_C) &= m \cdot \ddot{y}_C \end{aligned} \quad (5.78)$$

$$\text{όπου } N = 2 \cdot (N_1 + N_2) = m \cdot g \cdot \cos \varphi + T_{RZ}$$

Κατακόρυφη κίνηση :

$$\begin{aligned} \sum F_Z &= m \cdot \ddot{z}_C \Leftrightarrow R_{RZ} + F_{LASH(TOTAL)Z} - 2 \cdot (N_1 + N_2) = m \cdot \ddot{z}_C \\ \Leftrightarrow m \cdot g \cdot \cos \varphi + T_{RZ} - C_{RZ} - 2 \cdot \left[(F_{L/Z,1} + F_{R/Z,1}) + (F_{L/Z,2} + F_{R/Z,2}) \right] - 2 \cdot (N_1 + N_2) &= m \cdot \ddot{z}_C \end{aligned} \quad (5.79)$$

Ισορροπία ροπών :

$$\begin{aligned}
[I + m \cdot (y_C^2 + z_C^2)] \cdot \ddot{\varphi}_C &= M_{LASH} + M_{C_R} + M_{T_R} + M_W \\
\Leftrightarrow [I + m \cdot (y_C^2 + z_C^2)] \cdot \ddot{\varphi}_C &= 2 \cdot [-F_{R/Y,1} \cdot (\alpha \cdot \cos \varphi_{C1}) + F_{R/Z,1} \cdot (\alpha \cdot \sin \varphi_{C1}) \\
&+ F_{L/Y,1} \cdot (\alpha \cdot \cos \varphi_{C1}) - F_{L/Z,1} \cdot (\alpha \cdot \sin \varphi_{C1})] + 2 \cdot [-F_{R/Y,2} \cdot (\alpha + \alpha \cdot \cos \varphi_{C2}) \\
&+ F_{R/Z,2} \cdot (\alpha \cdot \sin \varphi_{C2}) + F_{L/Y,2} \cdot (\alpha + \alpha \cdot \cos \varphi_{C2}) - F_{L/Z,2} \cdot (\alpha \cdot \sin \varphi_{C2})] \\
&+ C_{RY} \cdot KG_C + T_{RY} \cdot KG_C - W_Y \cdot KG_C + C_{RZ} \cdot (\alpha / 2) - T_{RZ} \cdot (\alpha / 2) - W_Z \cdot (\alpha / 2)
\end{aligned} \tag{5.80}$$

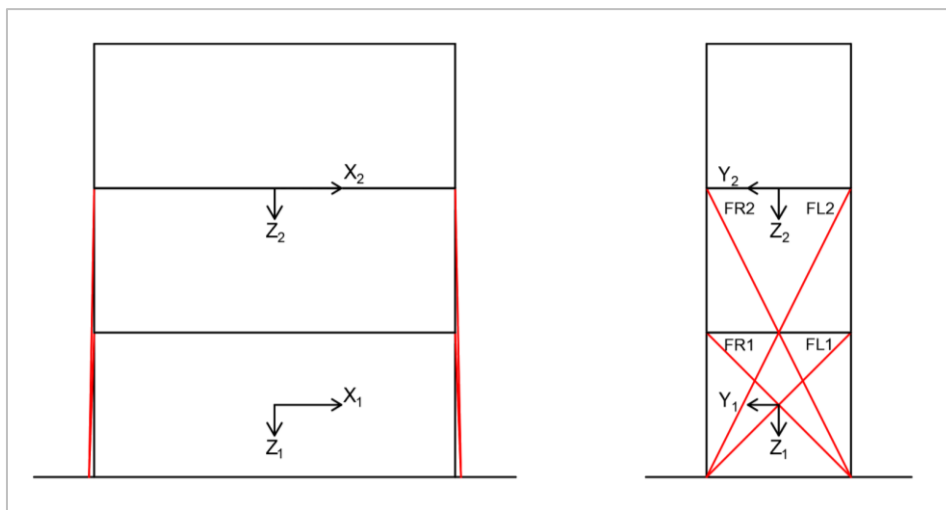
Ο μετασχηματισμός στροφής των αξόνων είναι ίδιος με αυτόν της παραγράφου 5.1.4.

5.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΡΙΩΝ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ

Σε αυτή την παράγραφο θα μελετηθεί η συμπεριφορά κίνησης τριών εμπορευματοκιβωτίων. Αρχικά θα διερευνηθεί το σύστημα εμπορευματοκιβωτίων ως δύο ξεχωριστές μάζες και ακολούθως ως μία ενιαία μάζα. Στην πρώτη περίπτωση, η μία μάζα θα θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στο εμπορευματοκιβώτιο που ακουμπά στο κατάστρωμα του πλοίου και η δεύτερη στα δύο επόμενα εμπορευματοκιβώτια.

5.3.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΡΙΩΝ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΩΣ ΔΥΟ ΜΑΖΕΣ

Η διάταξη πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων απεικονίζεται παρακάτω :



Σχήμα 5.9 : Αναπαράσταση των εμπορευματοκιβωτίων και της διάταξης των lashings ως δύο μάζες

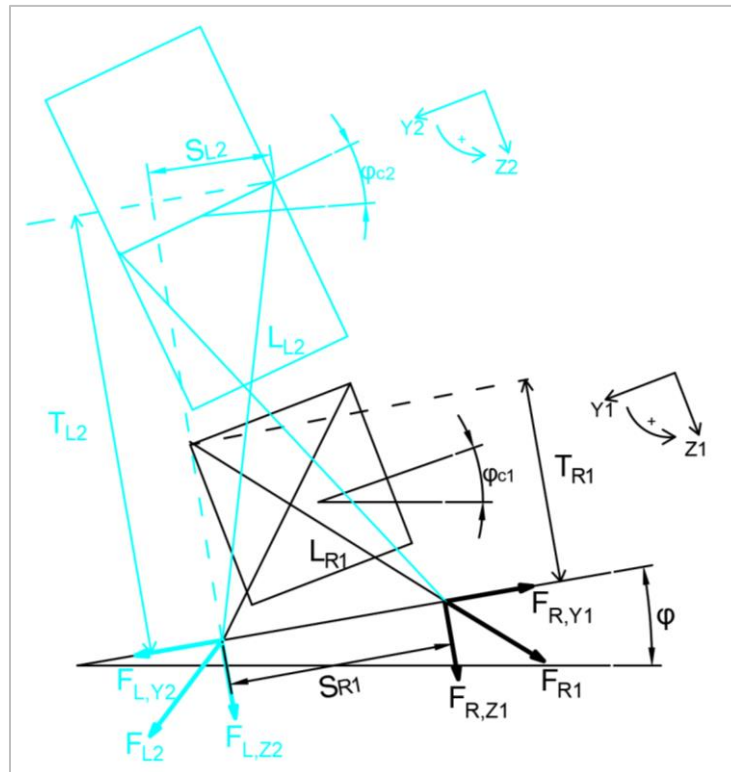
5.3.1.1 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

Οι δυνάμεις που οφείλονται στην κίνηση διατοιχισμού του πλοίου λαμβάνονται από τις εξισώσεις της παραγράφου 5.2.1.1. Η μοναδική διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι η μάζα m_1 αντιστοιχεί πλέον στο εμπορευματοκιβώτιο που ακουμπά στο κατάστρωμα του πλοίου και η δεύτερη μάζα m_2 στα δύο επόμενα εμπορευματοκιβώτια.

5.3.1.2 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ LASHINGS

Οι εξισώσεις για τις δυνάμεις που παραλαμβάνουν τα συρματόσχοινα πρόσδεσης είναι ίδιες με αυτές της παραγράφου 5.2.2.2.

Οι κινήσεις τους και οι συνιστώσες μήκους $S_{i(L,R)}$, $T_{i(L,R)}$ φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :



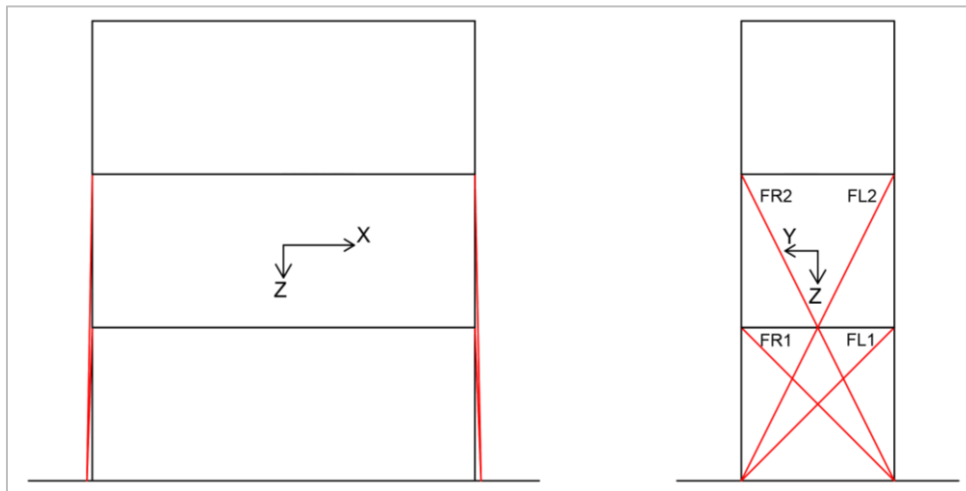
Σχήμα 5.10 : Κίνηση των εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα

5.3.1.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΩΣ ΔΥΟ ΜΑΖΕΣ

Οι εξισώσεις της εγκάρσιας κίνησης, της κατακόρυφης κίνησης και η εξίσωση των ροπών για την πρώτη μάζα (πρώτο εμπορευματοκιβώτιο), αλλά και για τη δεύτερη μάζα (δύο επόμενα εμπορευματοκιβώτια) είναι ίδιες με αυτές της παραγράφου 5.2.1.3.

5.3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΡΙΩΝ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΩΣ ΜΙΑ ΜΑΖΑ

Στην περίπτωση αυτή μοντελοποιείται το πρόβλημα πρόσδεσης τριών εμπορευματοκιβωτίων, ως μία μάζα. Η μοντελοποίηση συμβαδίζει με τη μοντελοποίηση των δύο εμπορευματοκιβωτίων ως μία μάζα. Τα πρώτα δύο εμπορευματοκιβώτια προσδέονται με τέσσερα συρματόσχοινα το κάθε ένα από κάθε γωνία τους στο κατάστρωμα, ενώ μεταξύ τους, αλλά και με το τρίτο εμπορευματοκιβώτιο συνδέονται με περιστρεφόμενα κλειδιά (twistlocks).



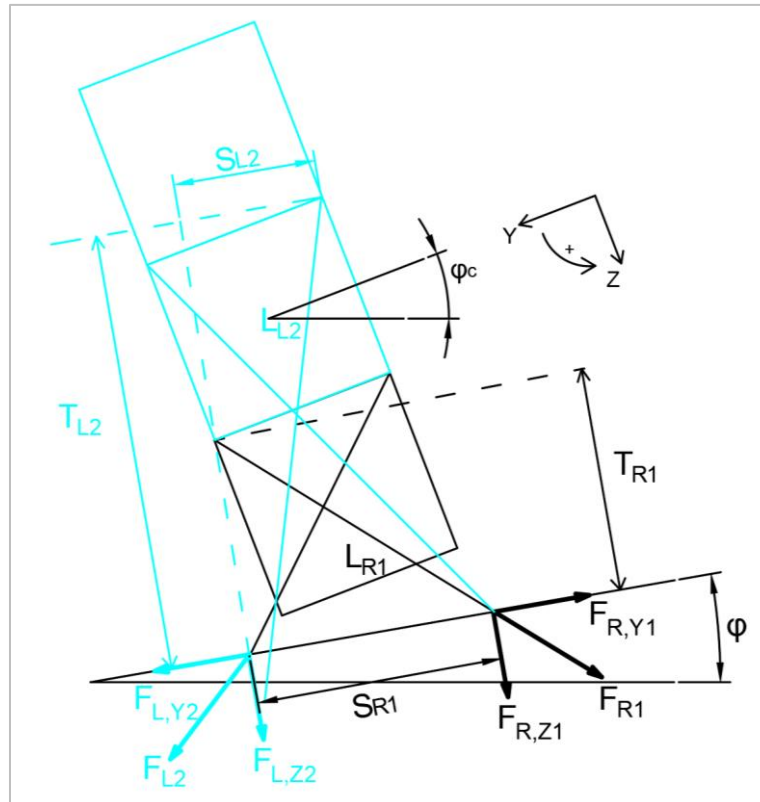
Σχήμα 5.11 : Αναπαράσταση των εμπορευματοκιβωτίων και της διάταξης των lashings ως μία μάζα

5.3.2.1 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

Οι δυνάμεις λόγω της κίνησης του πλοίου δίνονται από τους τύπους που έχουν ήδη αναφερθεί προηγουμένως στην παράγραφο 5.1.2. Η διαφορά είναι ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση οι υπολογισμοί γίνονται για μάζα εμπορευματοκιβωτίων m'' , διαφορετική από πριν. Επίσης, το κέντρο μάζας και κέντρο εφαρμογής των δυνάμεων, υπολογίζεται από τη σχέση (5.77).

5.3.2.2 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ LASHINGS

Οι εξισώσεις για τις δυνάμεις που δέχονται τα συρματόσχοινα είναι ίδιες με αυτές της παραγράφου 5.2.2.2.



Σχήμα 5.12 : Κίνηση των εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα

5.3.2.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΩΣ ΜΙΑ ΜΑΖΑ

Οι εξισώσεις της εγκάρσιας κίνησης και της κατακόρυφης κίνησης των τριών εμπορευματοκιβωτίων είναι ίδιες με αυτές της παραγράφου 5.2.2.3.

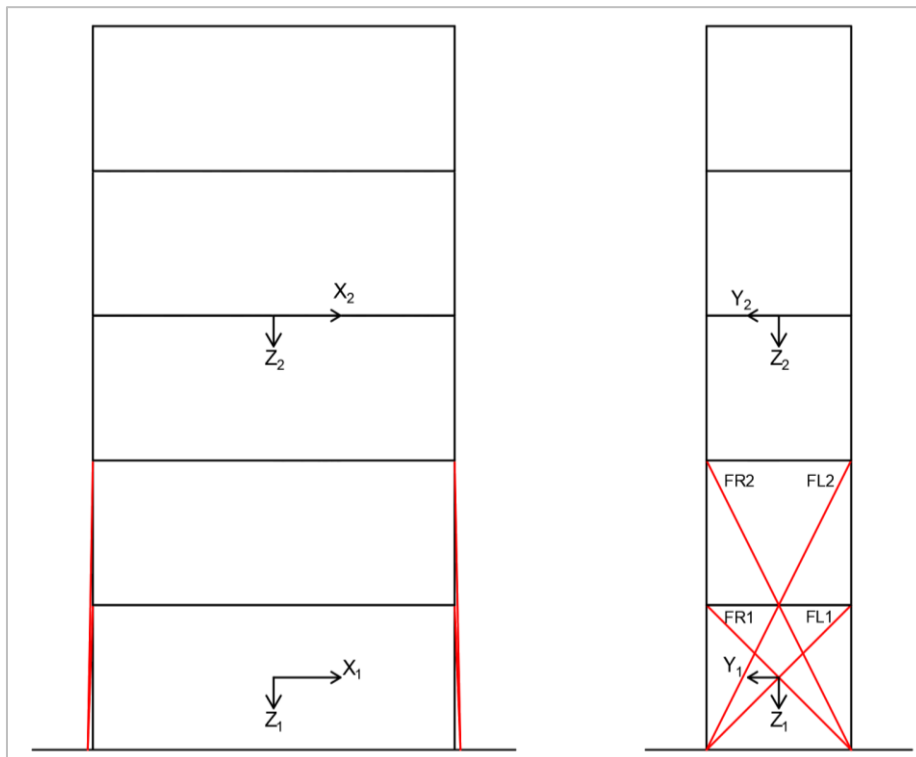
Ο μετασχηματισμός στροφής των αξόνων είναι ίδιος με αυτόν της παραγράφου 5.1.4.

5.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΝΤΕ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ

Σε αυτή την παράγραφο θα μελετηθεί η συμπεριφορά κίνησης πέντε εμπορευματοκιβωτίων. Αρχικά θα διερευνηθεί το σύστημα εμπορευματοκιβωτίων ως δύο ξεχωριστές μάζες και ακολούθως ως μία ενιαία μάζα. Στην πρώτη περίπτωση, η μία μάζα θα θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στο εμπορευματοκιβώτιο που ακουμπά στο κατάστρωμα του πλοίου και η δεύτερη στα τέσσερα επόμενα εμπορευματοκιβώτια.

5.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΝΤΕ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΩΣ ΔΥΟ ΜΑΖΕΣ

Η διάταξη πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων απεικονίζεται παρακάτω :



Σχήμα 5.13 : Αναπαράσταση των εμπορευματοκιβωτίων και της διάταξης των lashings ως δύο μάζες

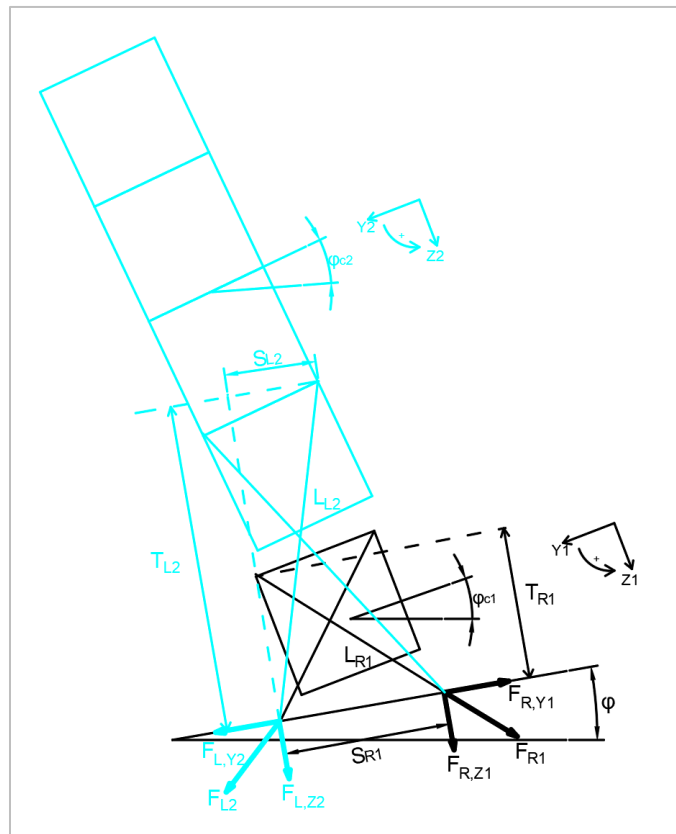
5.4.1.1 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

Οι δυνάμεις που οφείλονται στην κίνηση διατοιχισμού του πλοίου λαμβάνονται από τις εξισώσεις της παραγράφου 5.2.1.1. Η μοναδική διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι η μάζα m_1 αντιστοιχεί πλέον στο εμπορευματοκιβώτιο που ακουμπά στο κατάστρωμα του πλοίου και η δεύτερη μάζα m_2 στα τέσσερα επόμενα εμπορευματοκιβώτια.

5.4.1.2 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ LASHINGS

Οι εξισώσεις για τις δυνάμεις που παραλαμβάνουν τα συρματόσχοινα πρόσδεσης είναι ίδιες με αυτές της παραγράφου 5.2.1.2.

Οι κινήσεις τους και οι συνιστώσες μήκους $S_{i(L,R)}$, $T_{i(L,R)}$ φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



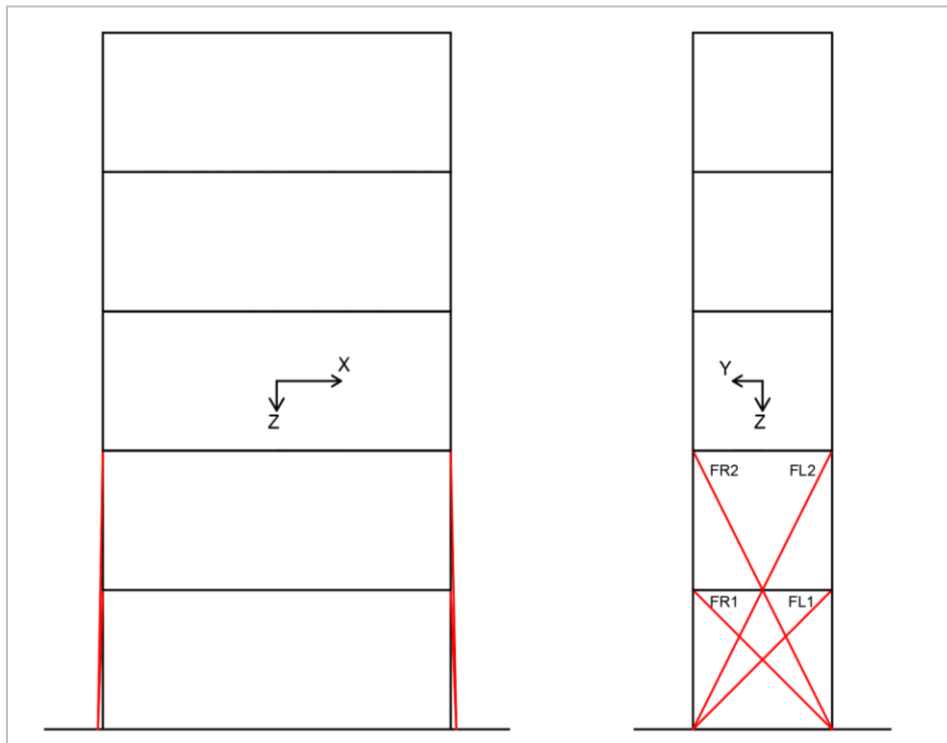
Σχήμα 5.14 : Κίνηση των εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα

5.4.1.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΝΤΕ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΩΣ ΔΥΟ ΜΑΖΕΣ

Οι εξισώσεις της εγκάρσιας κίνησης, της κατακόρυφης κίνησης και η εξίσωση των ροπών για το πρώτο εμπορευματοκιβώτιο είναι ίδιες με αυτές της παραγράφου 5.2.1.3.

5.4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΝΤΕ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΩΣ ΜΙΑ ΜΑΖΑ

Στην περίπτωση αυτή μοντελοποιείται το πρόβλημα πρόσδεσης πέντε εμπορευματοκιβωτίων, ως μία μάζα. Η μοντελοποίηση συμβαδίζει με τη μοντελοποίηση των δύο εμπορευματοκιβωτίων ως μία μάζα. Τα πρώτα δύο εμπορευματοκιβώτια προσδέονται με τέσσερα συρματόσχοινα το κάθε ένα από κάθε γωνία τους στο κατάστρωμα, ενώ όλα μαζί μεταξύ τους συνδέονται με περιστρεφόμενα κλειδιά (twistlocks).



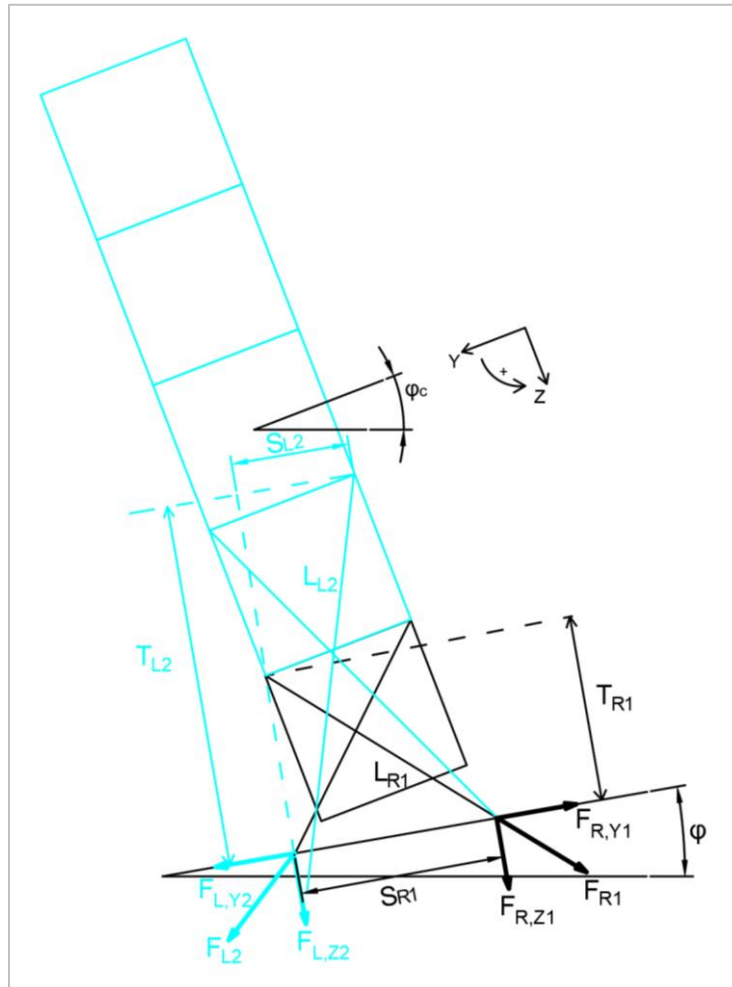
Σχήμα 5.15 : Αναπαράσταση των εμπορευματοκιβωτίων και της διάταξης των lashings ως μία μάζα

5.4.2.1 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

Οι δυνάμεις λόγω της κίνησης του πλοίου δίνονται από τους τύπους που έχουν ήδη αναφερθεί προηγουμένως στην παράγραφο 5.1.2. Η διαφορά είναι ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση οι υπολογισμοί γίνονται για μάζα εμπορευματοκιβωτίων m^m , διαφορετική από πριν. Επίσης, το κέντρο μάζας και κέντρο εφαρμογής των δυνάμεων, υπολογίζεται από τη σχέση (5.77).

5.4.2.2 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΛΟΓΩ LASHINGS

Οι εξισώσεις για τις δυνάμεις που παραλαμβάνουν τα συρματόσχοινα πρόσδεσης είναι ίδιες με αυτές της παραγράφου 5.2.2.2.



Σχήμα 5.16 : Κίνηση των εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα

5.4.2.3 ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΝΤΕ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΩΣ ΜΙΑ ΜΑΖΑ

Οι εξισώσεις της εγκάρσιας κίνησης και της κατακόρυφης κίνησης των πέντε εμπορευματοκιβωτίων είναι ίδιες με αυτές της παραγράφου 5.2.2.3.

Ο μετασχηματισμός στροφής των αξόνων είναι ίδιος με αυτόν της παραγράφου 5.1.4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΡΟΣΔΕΣΗΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα λάβει χώρα η αριθμητική εφαρμογή των μοντέλων που περιεγράφηκαν και αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Θα αναπαρασταθούν ορισμένες γραφικές παραστάσεις των δυνάμεων στα lashings και των δυνάμεων που ασκούνται στο εμπορευματοκιβώτιο λόγω διατοιχισμού. Επειδή, όμως, αυτό που παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι οι μέγιστες τιμές αυτών κατά τη διάρκεια κίνησης του πλοίου, θα παρατεθούν σχετικά ραβδογράμματα στα οποία θα φαίνονται οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων στα lashings σε κάθε περίπτωση.

6.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

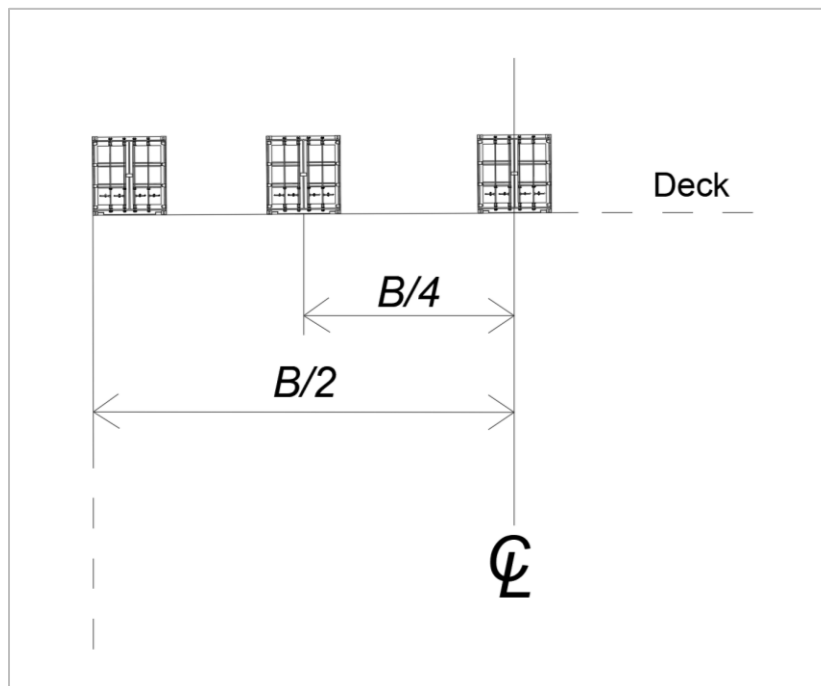
Επιλύοντας τις διαφορικές εξισώσεις κίνησης του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μέσω του λογισμικού προγράμματος *Mathematica*, υπολογίζονται οι άγνωστοι y_c, z_c, φ_c . Θεωρείται επίσης, πως το πλοίο υπόκειται σε μια ημιτονοειδή διέγερση της μορφής :

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (6.1)$$

Οι μετρήσεις γίνονται για : α) διάφορες θέσεις του εμπορευματοκιβωτίου στο κατάστρωμα του πλοίου, β) για διαφορετικές τιμές του πλάτους της διέγερσης φ_0 και γ) για διαφορετικές τιμές της γωνιακής ταχύτητας ω .

Θα ληφθούν αποτελέσματα για τις εξής θέσεις :

- Θέση 1 : Στην άκρη του καταστρώματος
- Θέση 2 : Στο μέσον του ημιπλάτους, πάνω στο κατάστρωμα (δηλαδή στο $B/4$)
- Θέση 3 : Στο κέντρο του καταστρώματος, (Center line)



Σχήμα 6.1 : Θέσεις εμπορευματοκιβωτίου στο κατάστρωμα του πλοίου

Πιο συγκεκριμένα για κάθε θέση θα μελετηθεί και η επίδραση αλλαγής του πλάτους της διέγερσης φ_0 . Το φ_0 θα λάβει τις κάτωθι τιμές :

- $\varphi_{0,1} = 8^\circ = 0.13 \text{ rad}$
- $\varphi_{0,2} = 15^\circ = 0.26 \text{ rad}$
- $\varphi_{0,3} = 30^\circ = 0.52 \text{ rad}$

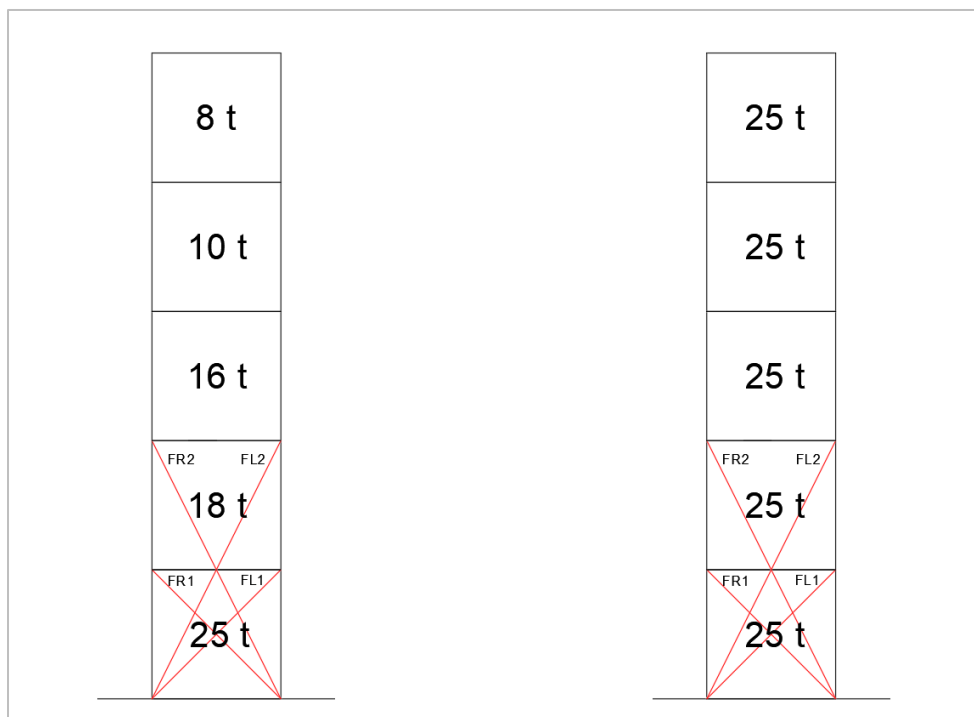
Εκτός από τη μεταβολή του πλάτους της διέγερσης, θα υπάρξει και μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας ω για τη μέγιστη τιμή του πλάτους της διέγερσης ($\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$). Δηλαδή :

- $\omega_1 = 0.35 \text{ rad/s}$, ($T = 17.95 \text{ s}$)
- $\omega_2 = 0.5 \text{ rad/s}$, ($T = 12.57 \text{ s}$)
- $\omega_3 = 0.65 \text{ rad/s}$, ($T = 9.67 \text{ s}$)

Θα εξεταστούν δύο σενάρια φόρτωσης, ενώ θα λάβει χώρα και σχετική σύγκριση μεταξύ τους.

- Το Α' Σενάριο θα αφορά μια στοίβα εμπορευματοκιβωτίων, στην οποία η μάζα των containers που στοιβάζονται θα είναι αντιστρόφως ανάλογη με το ύψος της στοίβας.
- Το Β' Σενάριο θα αφορά μια στοίβα εμπορευματοκιβωτίων στην οποία η μάζα των containers που στοιβάζονται θα είναι σταθερή σε σχέση με το ύψος της στοίβας.

Παρακάτω απεικονίζονται τα δύο σενάρια φόρτωσης :



Σχήμα 6.2 : Α' και Β' Σενάριο φόρτωσης

Το πλοίο που επιλέχθηκε για να εφαρμοστεί το μοντέλο είναι συνολικής χωρητικότητας 1100 TEU και έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

Πίνακας 6.1 : Διαστάσεις πλοίου

L_{OA} (m)	147.85
L_{BP} (m)	141.37
B (m)	23.25
D (m)	11.5
T (m)	7.3

Σε αυτό το σημείο αξίζουν να αναφερθούν τα εξής :

- Η επιλογή μελέτης του φαινομένου για το συγκεκριμένο αριθμό containers σε μια στοίβα έγινε εσκεμμένα μιας και το πλοίο που χρησιμοποιείται για την μαθηματική εφαρμογή του μοντέλου δεν είναι σε θέση να μεταφέρει σε ένα Row, containers άνω του 5^{ου} Tier (βάσει του Stowage and Securing Plan). Οι θέσεις που τοποθετούνται οι στοίβες πάνω στο

κατάστρωμα του πλοίου πρέπει να είναι σύμφωνες του Stowage and Securing Plan χωρίς να παρεμποδίζουν την ορατότητα από το ύψος της γέφυρας (Navigation Bridge Visibility), όπως αυτό προσδιορίζεται από τη SOLAS. Επειδή η παρούσα μοντελοποίηση δεν επηρεάζεται από τη διαμήκη θέση των εμπορευματοκιβωτίων πάνω στο κατάστρωμα, θεωρείται πως τα containers στοιβάζονται στο πρώτο Bay πλώραθεν του accommodation ώστε να πληρούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις.

- Το Σενάριο Α΄ αποτελεί μια ρεαλιστική κατάσταση φόρτωσης. Οι μάζες των containers ελαττώνονται καθώς αυξάνει το ύψος της στοίβας.
- Το Σενάριο Β΄ δεν πρέπει να υιοθετείται σε καμία περίπτωση (βάσει του CSM του πλοίου) για τους εξής λόγους : α) η ολική μάζα της στοίβας είναι πολύ υψηλή και β) δεν υπάρχει σταδιακή μείωση των μαζών των containers όπως ισχύει στο άλλο σενάριο. Αυτό μπορεί να επιφέρει την υπερφόρτωση των καλυμμάτων κυτών του πλοίου και των συστημάτων πρόσδεσης, την ανάπτυξη ισχυρών δυνάμεων παραμόρφωσης στα πλαίσια των εμπορευματοκιβωτίων και την εμφάνιση θλιπτικών και εντατικών δυνάμεων που δρουν στις γωνίες πρόσδεσης με αποτέλεσμα την κατασκευαστική αστοχία του εμπορευματοκιβωτίου και κατάρρευση της στοίβας.

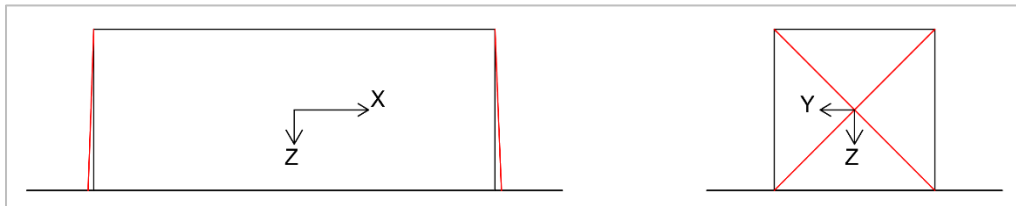
Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο σενάριο εφαρμόστηκε προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματά του, με αυτά του Α΄ Σεναρίου ώστε να αξιολογηθούν καταλλήλως.

Σημειώνεται πως όλα τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των μοντέλων, βρίσκονται στα Παραρτήματα Α και Β, στο τέλος της παρούσας εργασίας.

6.2 ΠΡΟΣΔΕΣΗ ΕΝΟΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΟΥ

6.2.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Οι υπολογισμοί θα γίνουν για ένα εμπορευματοκιβώτιο διαστάσεων (20'x8'x8'), το οποίο προσδένεται στο κατάστρωμα με τέσσερα συρματόσχοινα, από τις άκρες του, χιαστί. Τα δύο αριστερά συρματόσχοινα φορτίζονται κατά ίδιο τρόπο με τον οποίο φορτίζονται και τα δεξιά συρματόσχοινα εξαιτίας της επίδρασης μόνον της κίνησης διατοιχισμού.



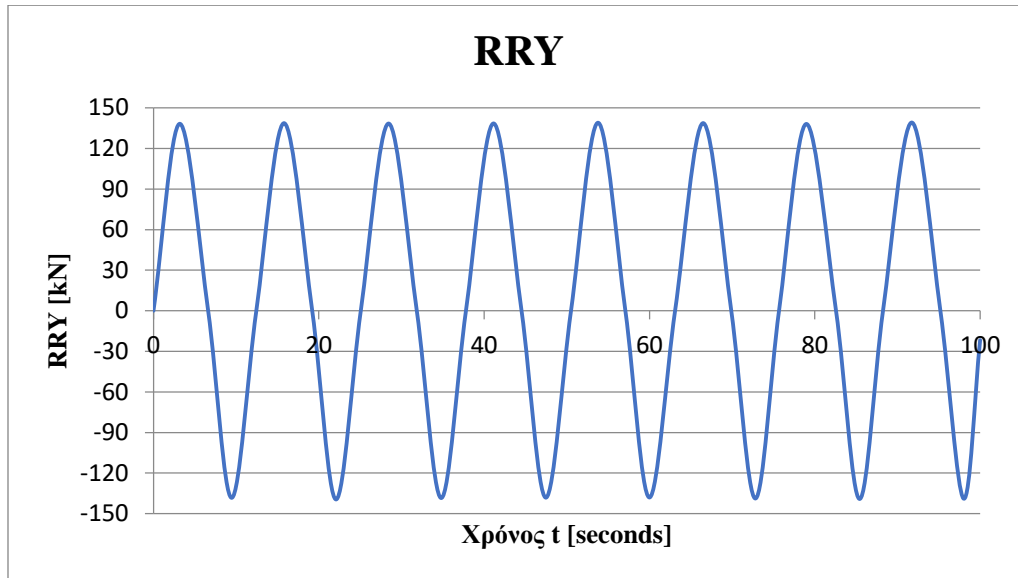
Σχήμα 6.3 : Αναπαράσταση εμπορευματοκιβωτίου και της διάταξης των lashings

Η αριθμητική εφαρμογή έγινε με τα εξής δεδομένα :

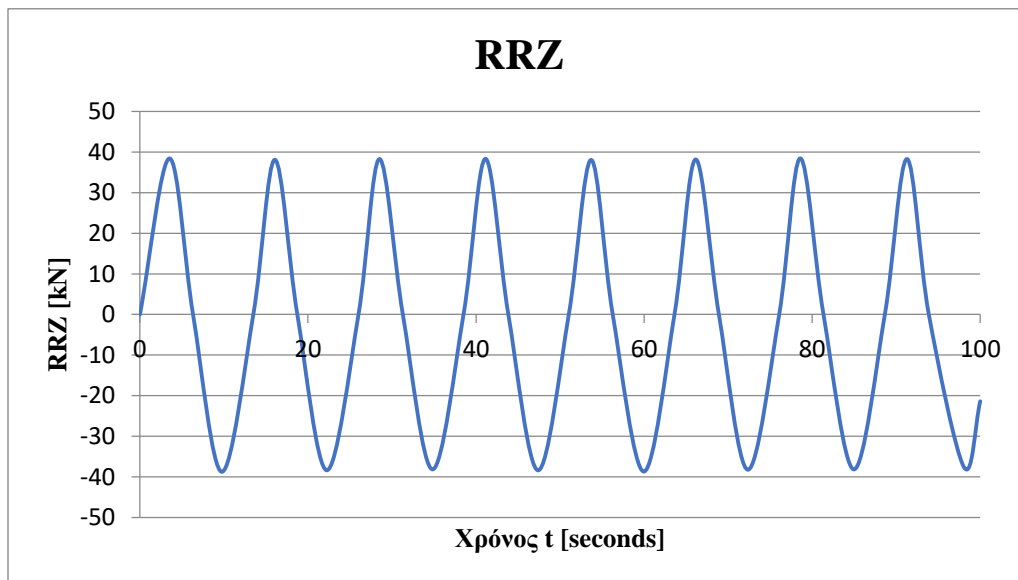
- Επιτάχυνση βαρύτητας, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- Μάζα εμπορευματοκιβωτίου, $m = 25000 \text{ kg}$
- Μήκος πλευράς εμπορευματοκιβωτίου, $a = 2.4384 \text{ m}$
- Κέντρο βάρους εμπορευματοκιβωτίου, $KG_C = a / 2 = 1.2192 \text{ m}$
- Ροπή αδράνειας εμπορευματοκιβωτίου, $I = m \cdot r^2 = 37161.2 \text{ kg m}^2$
- Αρχικό μήκος συρματόσχοινου πρόσδεσης, $L_{LO} = L_{RO} = a \cdot \sqrt{2} = 1.724 \text{ m}$
- Σταθερά ελατηρίου συρματόσχοινων, $K_L = K_R = 8 \text{ MN / m}$
- Συντελεστής τριβής εμπορευματοκιβωτίου – καταστρώματος κατά CSS Code, $\mu = 0.1$

6.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

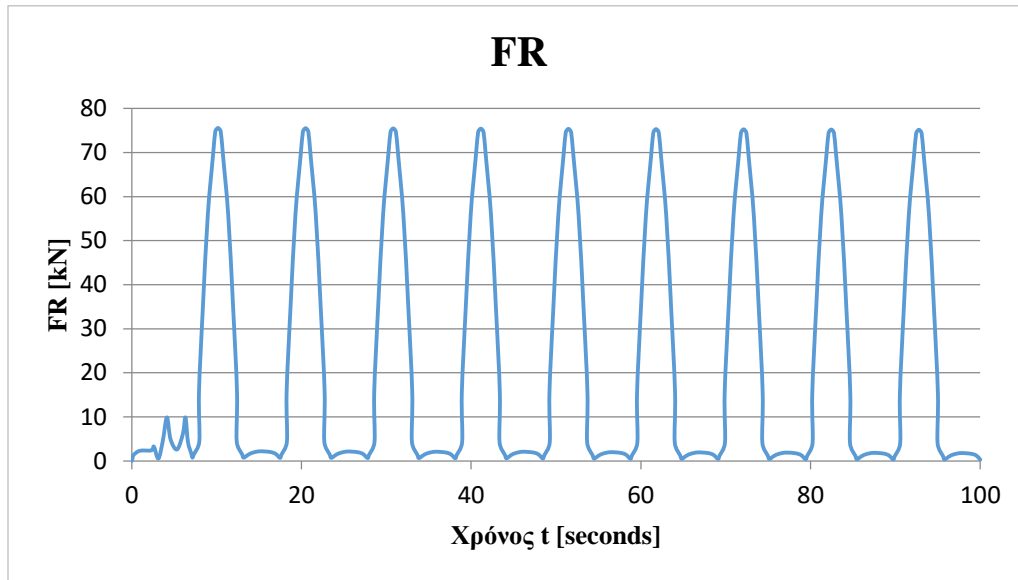
Παρατίθενται τα διαγράμματα που λήφθηκαν από το πρόγραμμα *Mathematica* για τη Θέση 1 και για διέγερση $\varphi = 0.52 \cdot \sin(0.5 \cdot t)$. Ο συνολικός χρόνος μελέτης του φαινομένου ορίστηκε στα 100 seconds.



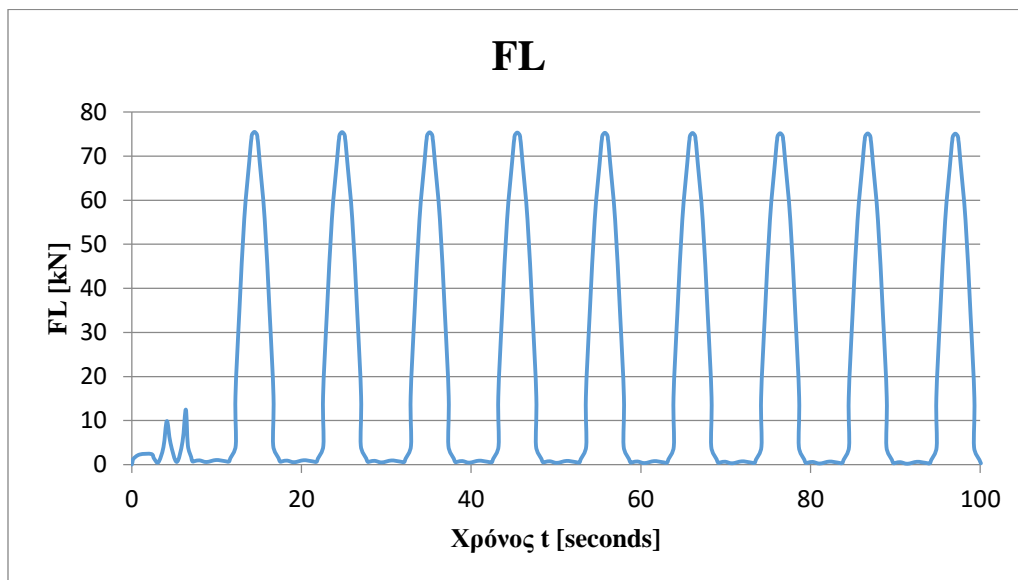
Σχήμα 6.4 : Εγκάρσια συνισταμένη δύναμη λόγω διατοιχισμού



Σχήμα 6.5 : Κατακόρυφη συνισταμένη δύναμη λόγω διατοιχισμού

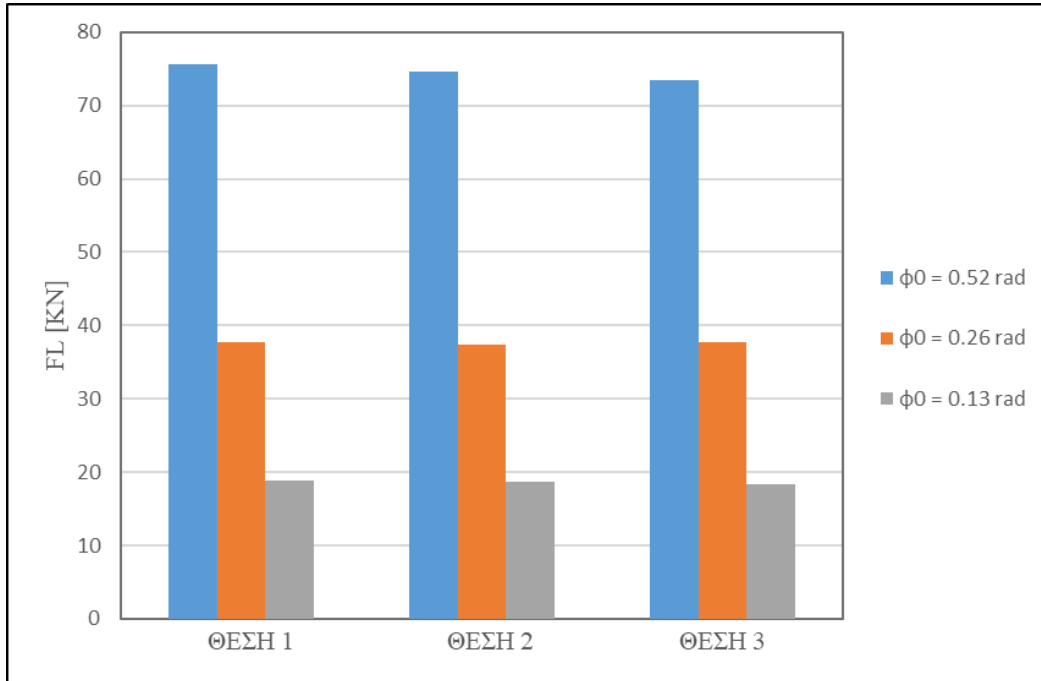


Σχήμα 6.6 : Φόρτιση δεξιών lashings

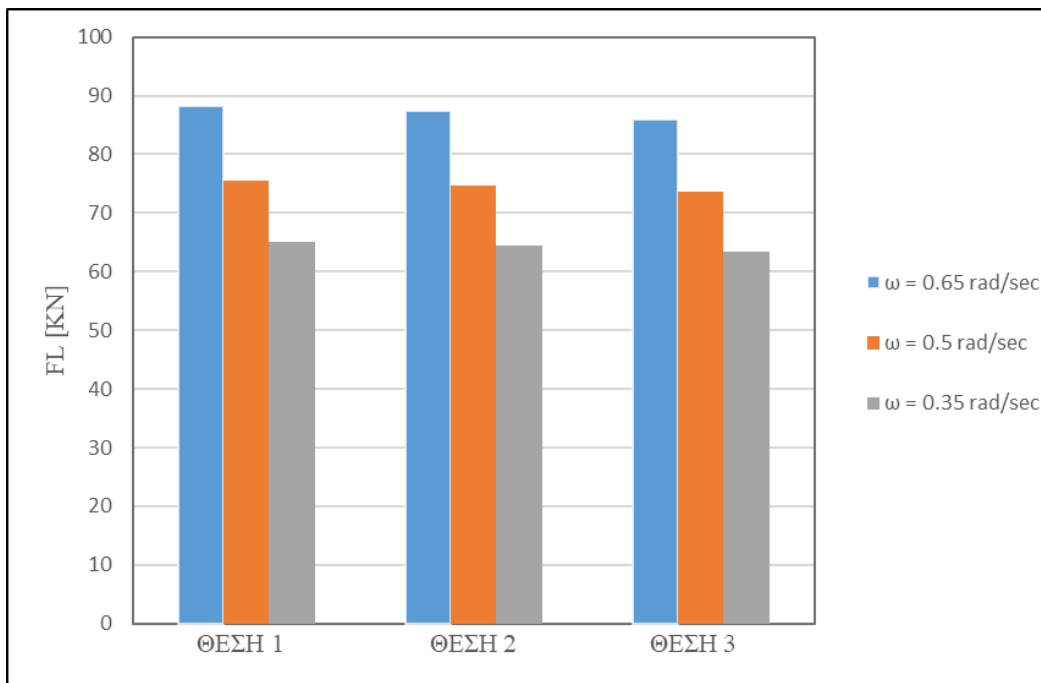


Σχήμα 6.7 : Φόρτιση αριστερών lashings

Σημειώνεται πως για το 1 εμπορευματοκιβώτιο, οι δυνάμεις στα lashings FL και FR αφορούν : οι μεν τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στα δύο αριστερά συρματόσχοινα και οι δε τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στα δύο δεξιά. Για την εύρεση της φόρτισης του κάθε lashing αρκεί να διαιρεθεί το αποτέλεσμα διά δύο.



Σχήμα 6.8 : Μέγιστη φόρτιση αριστερών lashings συναρτήσει του πλάτους διέγερσης ϕ_0



Σχήμα 6.9 : Μέγιστη φόρτιση αριστερών lashings συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω

Ισχύει ότι $FL = FR$, για αυτό το λόγο δεν γίνεται λόγος, ούτε απεικονίζονται οι δυνάμεις FR .

Παρατηρείται πως η δυσμενέστερη θέση στοιβασίας των containers είναι η Θέση 1 (στην άκρη του καταστρώματος). Αναμενόμενο μιας και αυτή απέχει την μεγαλύτερη απόσταση από το κέντρο περιστροφής του πλοίου.

Επίσης, φαίνεται πως τα μεγέθη είναι ανάλογα με τη μεταβολή του πλάτους της διέγερσης φ . Υποδιπλασιασμός του πλάτους διέγερσης οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση των δυνάμεων.

Επιπλέον η μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας ω , προκαλεί κι αυτή αντίστοιχη μεταβολή των μεγεθών.

6.3 ΠΡΟΣΔΕΣΗ ΔΥΟ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ

6.3.1 ΔΥΟ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΑ ΩΣ ΔΥΟ ΜΑΖΕΣ

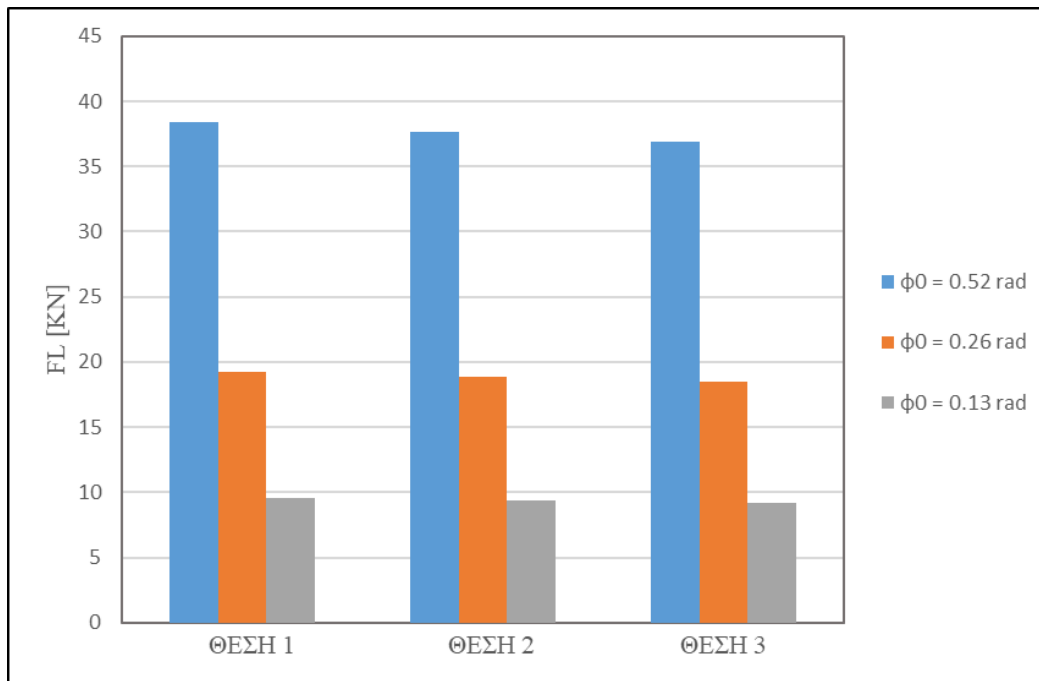
6.3.1.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Οι υπολογισμοί θα γίνουν για δύο εμπορευματοκιβώτια διαστάσεων (20' x 8' x 8'), τα οποία προσδένονται στο κατάστρωμα με τέσσερα συρματόσχοινα το καθένα, από τις τέσσερις άκρες τους, χιαστί.

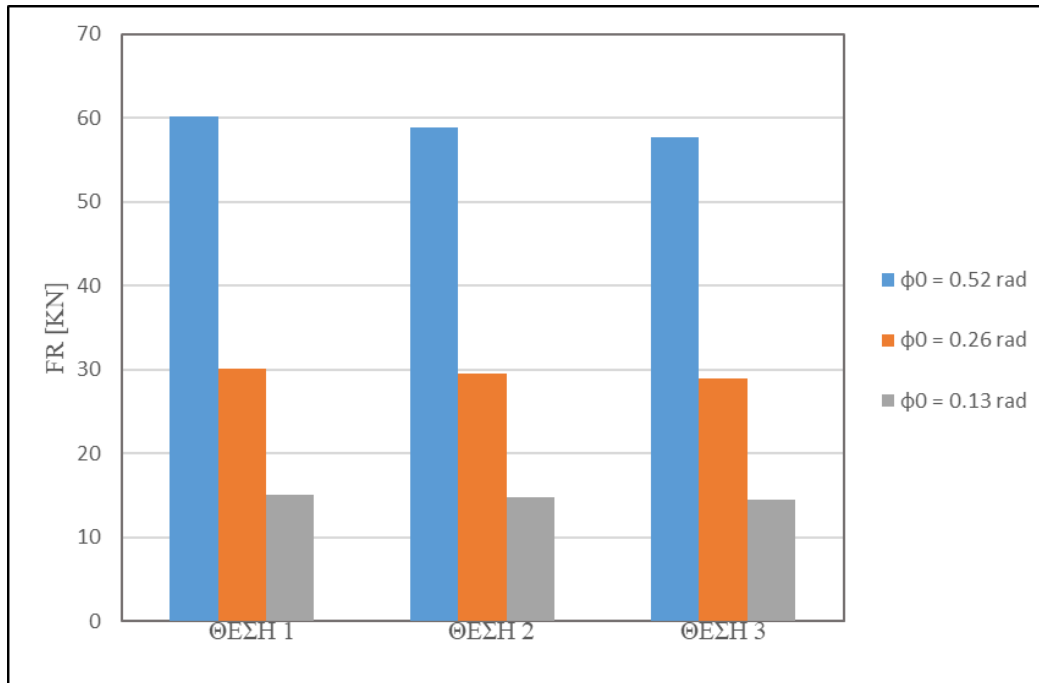
Τα δεδομένα της προηγούμενης περίπτωσης ισχύουν και εδώ με τις εξής διαφοροποιήσεις :

- Μάζες εμπορευματοκιβωτίων, $m_1 = 25000$ kg και $m_2 = 18000$ kg
- Κέντρο βάρους 1-εμπορευματοκιβωτίου, $KG_{C1} = \alpha / 2 = 1.219$ m
- Ροπή αδράνειας 1-εμπορευματοκιβωτίου, $I_1 = m_1 \cdot KG_{C1}^2 = 37161.2$ kg m²
- Κέντρο βάρους 2-εμπορευματοκιβωτίου, $KG_{C2} = \alpha + (\alpha/2) = 3.658$ m
- Ροπή αδράνειας 2-εμπορευματοκιβωτίου, $I_2 = m_2 \cdot KG_{C2}^2 = 575255.6$ kg m²
- Συντελεστής τριβής 1^{ου} – 2^{ου} εμπορευματοκιβωτίου κατά CSS Code, $\mu = 0.1$

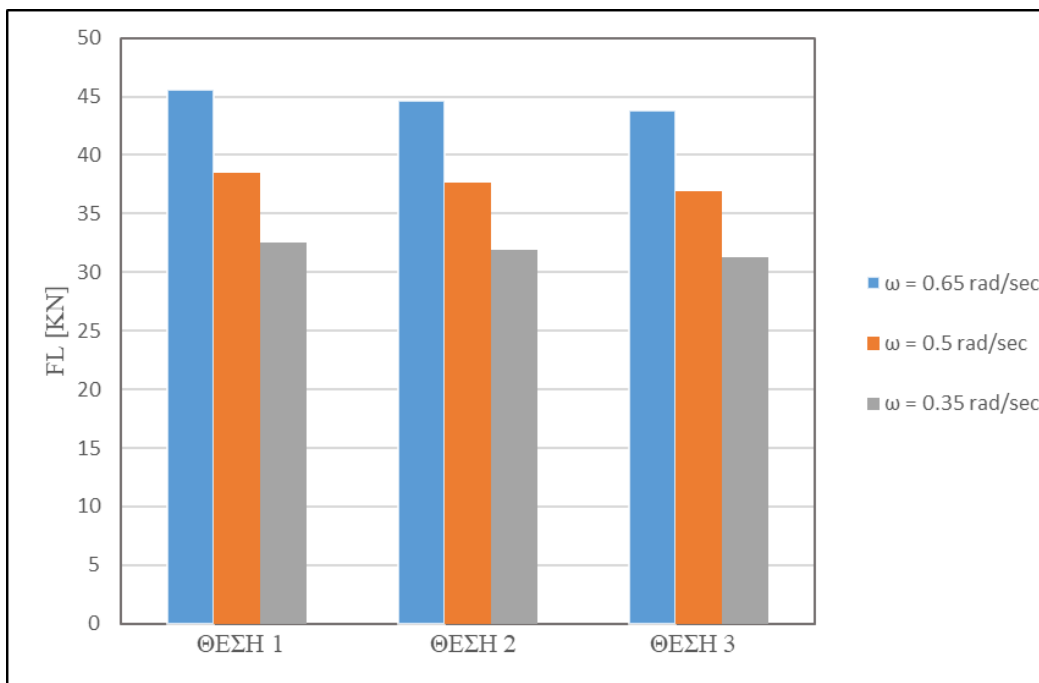
6.3.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



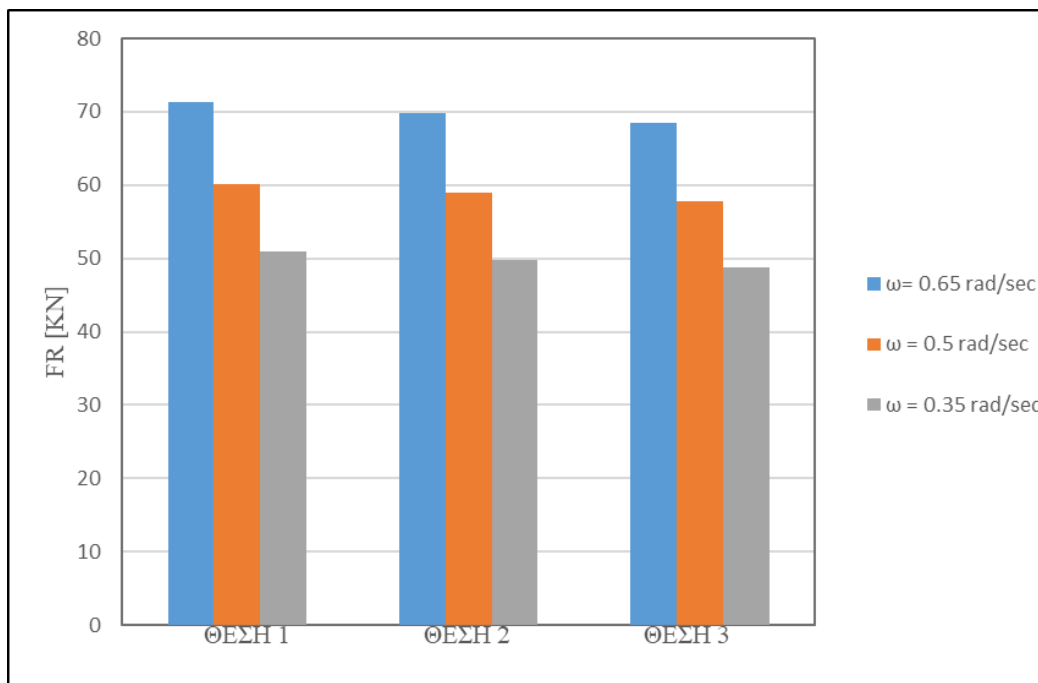
Σχήμα 6.10 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0



Σχήμα 6.11 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης ϕ_0



Σχήμα 6.12 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω



Σχήμα 6.13 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω

Σημειώνεται πως για 2, 3 και 5 εμπορευματοκιβώτια, οι δυνάμεις στα lashings FL1 και FR2 αφορούν : η πρώτη, τη δύναμη στο ένα από τα δύο (όμοια) αριστερά lashings, που δένονται στο 1^ο container και η δεύτερη στο ένα από τα δύο (όμοια) δεξιά lashings, που δένονται στο 2^ο container. Επίσης ισχύει $FL1 = FR1$ και $FL2 = FR2$, για αυτό το λόγο δεν γίνεται λόγος, ούτε απεικονίζονται οι δυνάμεις $FL2$ και $FR1$.

6.3.2 ΔΥΟ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΑ ΩΣ ΜΙΑ ΜΑΖΑ

6.3.2.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

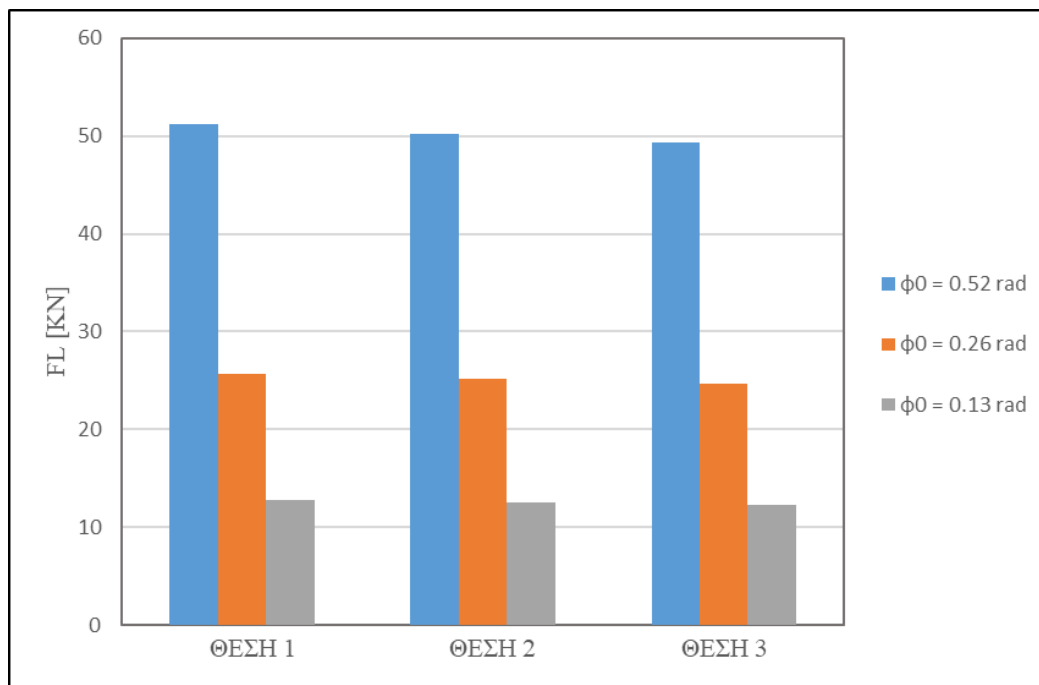
Το κέντρο βάρους-κέντρο περιστροφής της μάζας των εμπορευματοκιβωτίων υπολογίζεται βάσει της σχέσης :

$$KG_C = \frac{\sum m_i KG_i}{m} \quad (6.2)$$

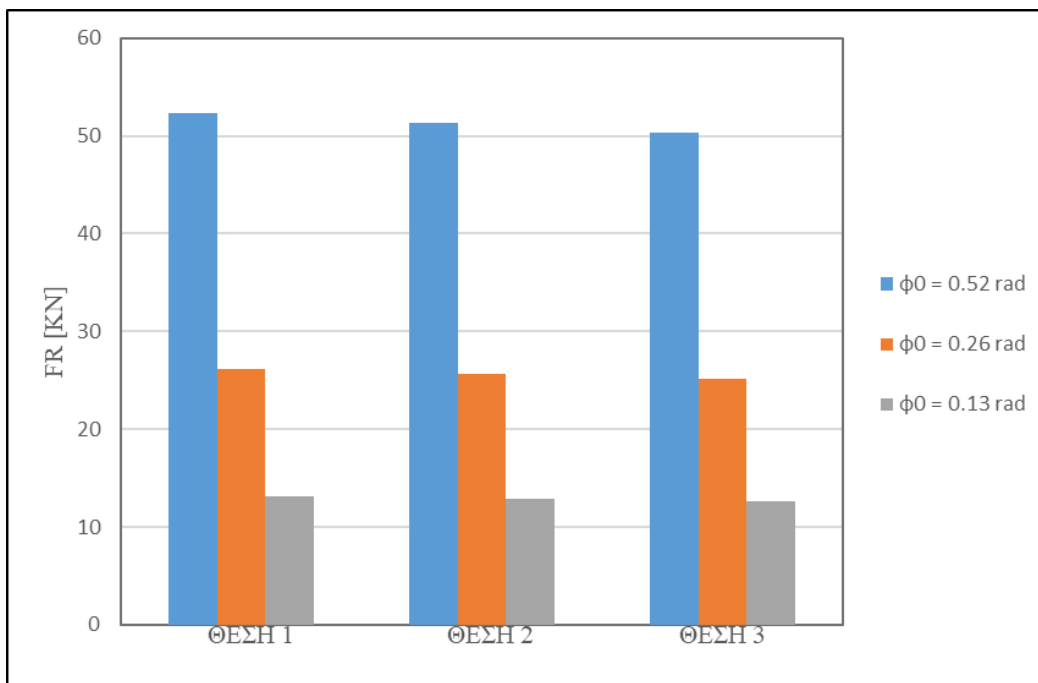
Τα δεδομένα της προηγούμενης περίπτωσης ισχύουν και εδώ με τις εξής διαφοροποιήσεις :

- Μάζες εμπορευματοκιβωτίων, $m_1 = 25000$ kg και $m_2 = 18000$ kg
- Κέντρο βάρους εμπορευματοκιβωτίων, $KG_C = 2.34$ m
- Ροπή αδράνειας εμπορευματοκιβωτίων, $I = (m_1 + m_2) \cdot (KG_C)^2 = 235450.8$ kg m²
- Αρχικό μήκος συρματόσχοινων πρόσδεσης, $L_{LO1} = L_{RO1} = a \cdot \sqrt{2} = 3.448$ m
και $L_{LO2} = L_{RO2} = a \cdot \sqrt{5} = 5.452$ m

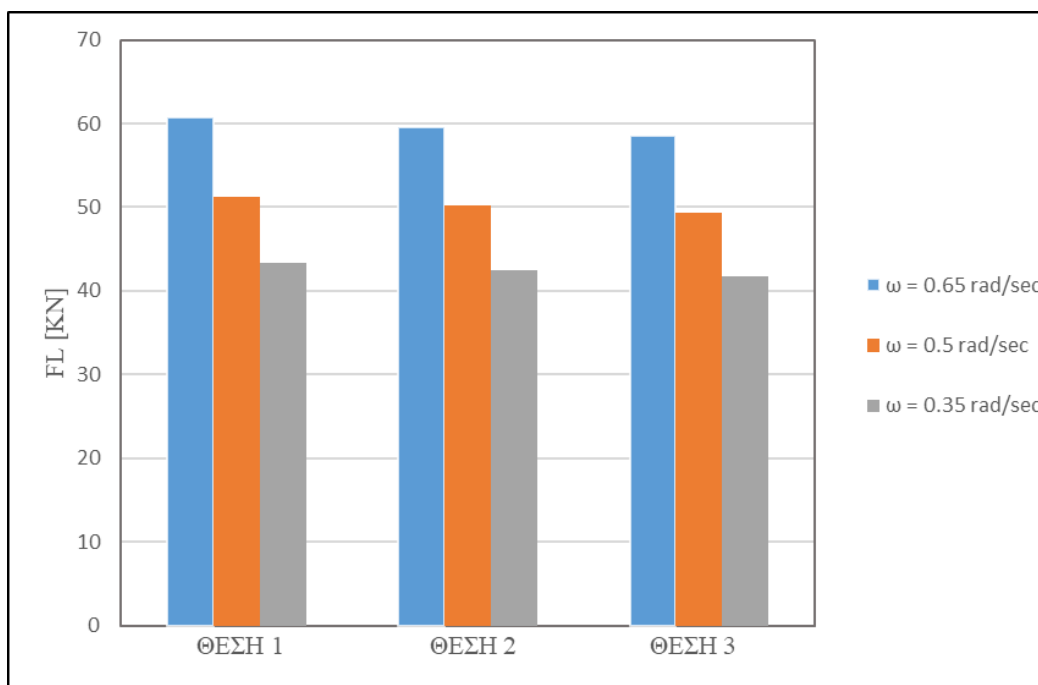
6.3.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



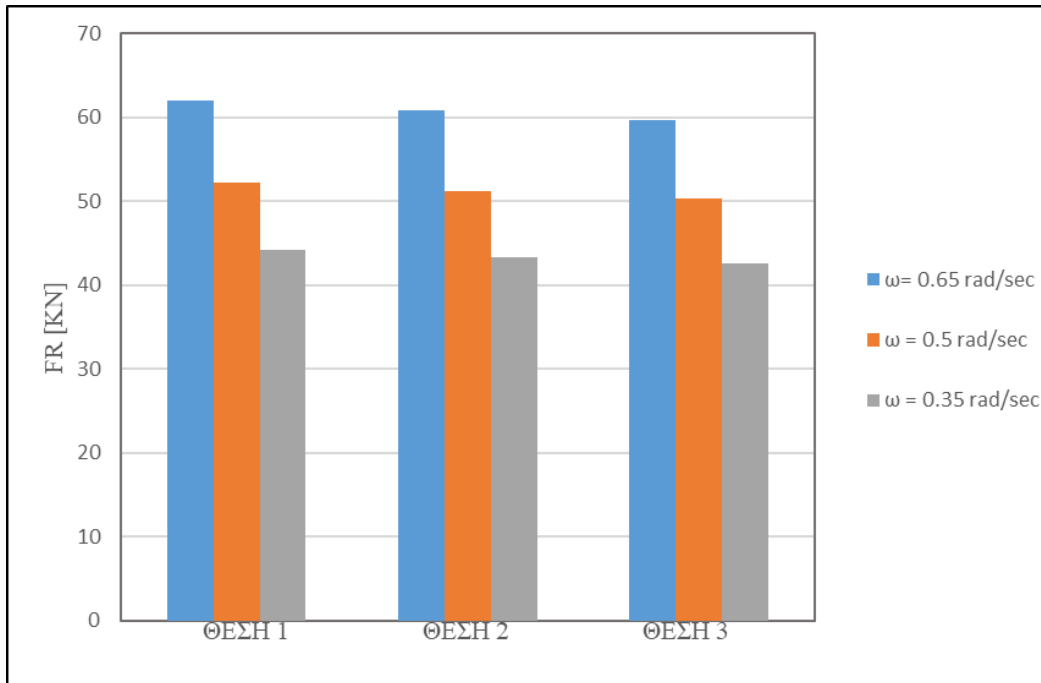
Σχήμα 6.14 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0



Σχήμα 6.15 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης ϕ_0



Σχήμα 6.16 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω



Σχήμα 6.17 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω

6.4 ΠΡΟΣΔΕΣΗ ΤΡΙΩΝ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ

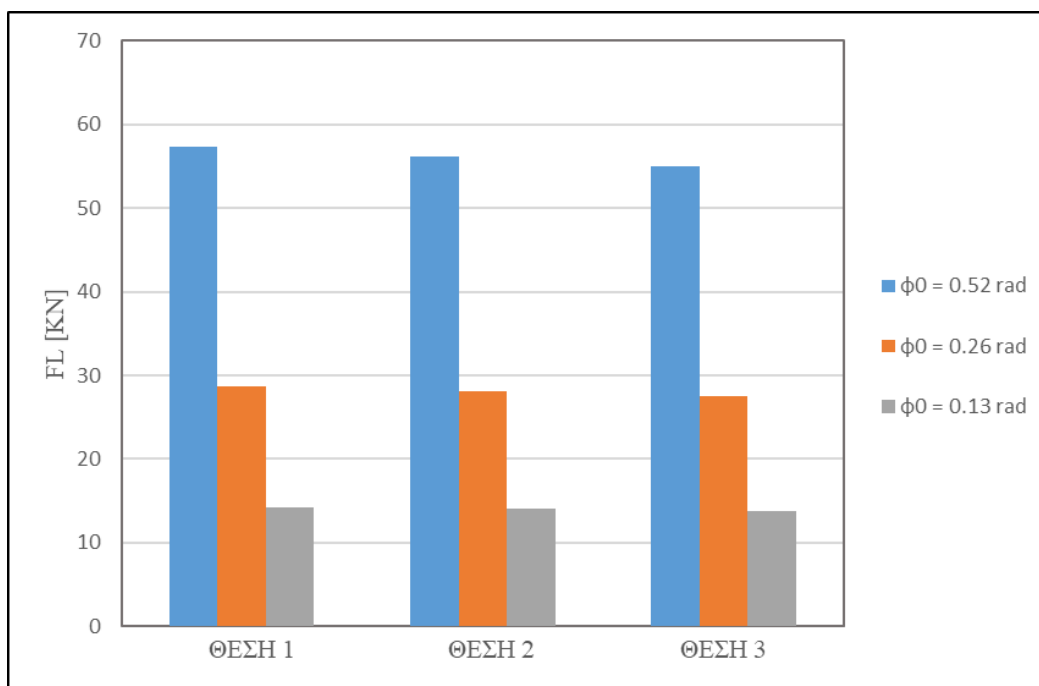
6.4.1 ΤΡΙΑ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΑ ΩΣ ΔΥΟ ΜΑΖΕΣ

6.4.1.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

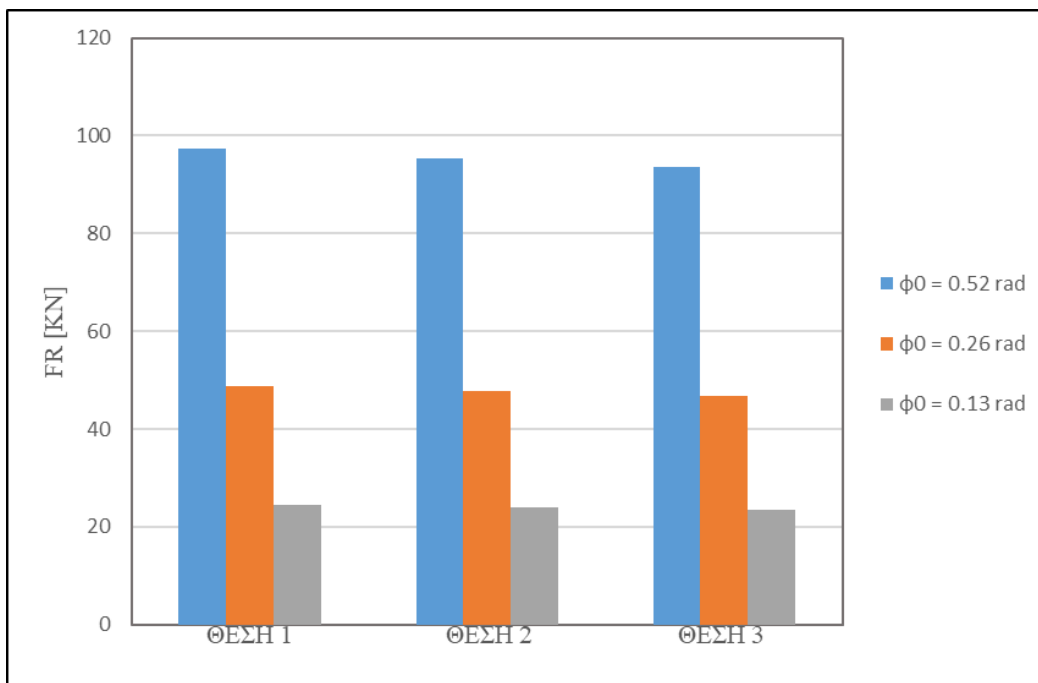
Τα δεδομένα της προηγούμενης περίπτωσης ισχύουν και εδώ με τις εξής διαφοροποιήσεις :

- Μάζες εμπορευματοκιβωτίων, $m_1 = 25000$ kg, $m_2 = 18000$ kg και $m_3 = 16000$ kg
- Κέντρο βάρους 1-εμπορευματοκιβωτίου, $KG_{C1} = a / 2 = 1.219$ m
- Ροπή αδράνειας 1-εμπορευματοκιβωτίου, $I_1 = m_1 \cdot KG_{C1}^2 = 37161.2$ kg m²
- Κέντρο βάρους 2^{ης} μάζας-εμπορευματοκιβωτίων, $KG_{C2} = 4.805$ m
- Ροπή αδράνειας 2^{ης} μάζας-εμπορευματοκιβωτίων, $I_2 = (m_2 + m_3) \cdot KG_{C2}^2 = 1362193.5$ kg m²

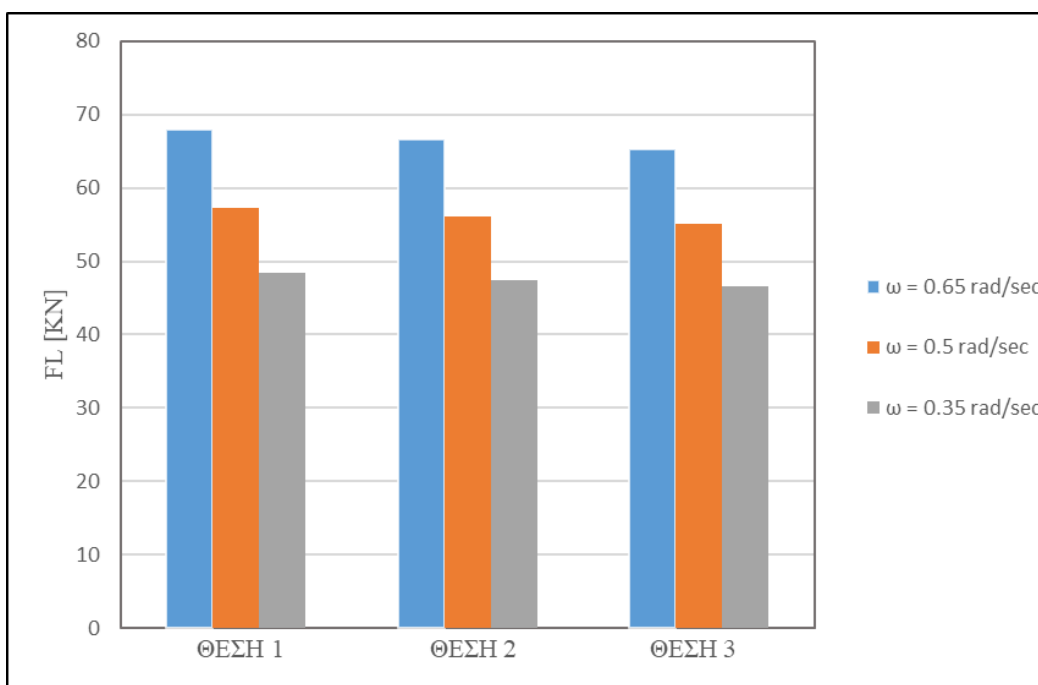
6.4.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



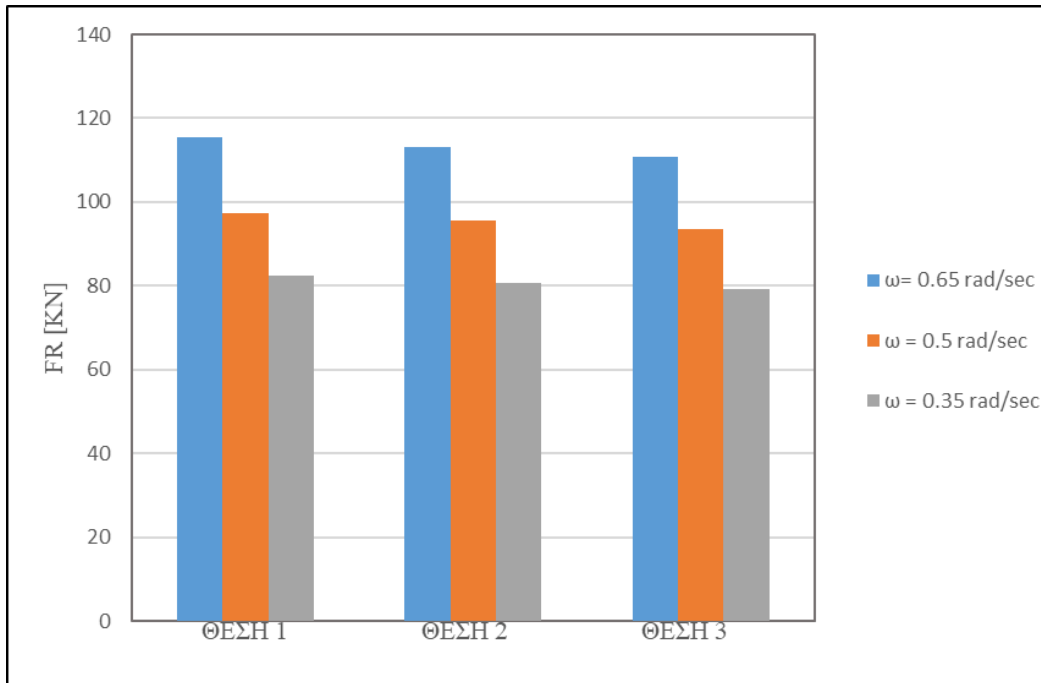
Σχήμα 6.18 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει του πλάτους διεγερσης φ_0



Σχήμα 6.19 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης ϕ_0



Σχήμα 6.20 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω



Σχήμα 6.21 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω

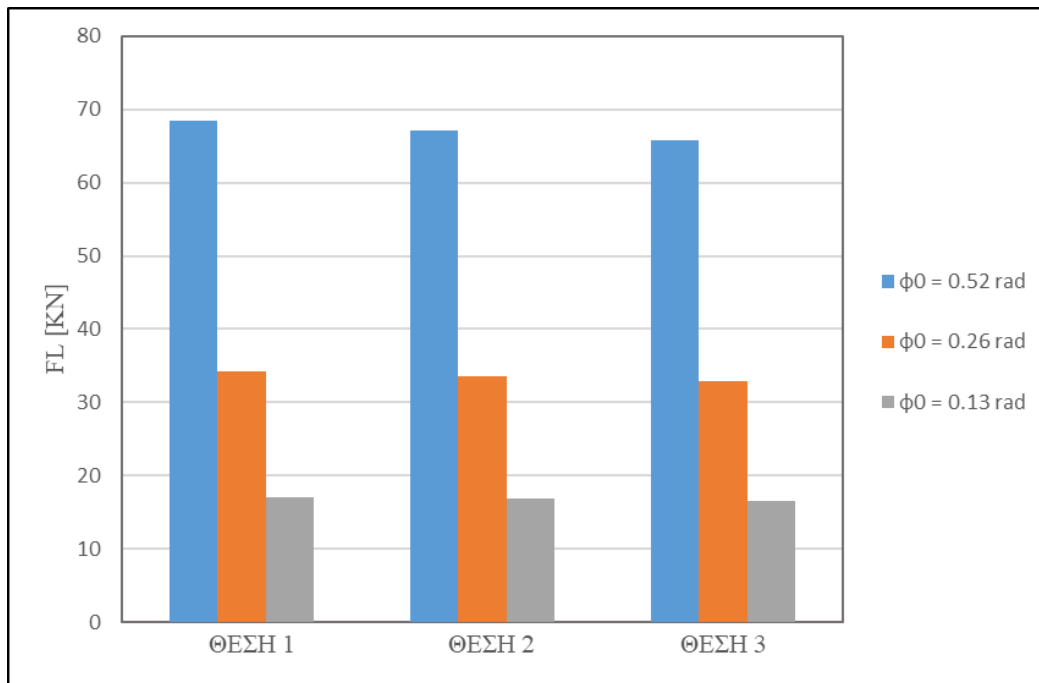
6.4.2 ΤΡΙΑ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΑ ΩΣ ΜΙΑ ΜΑΖΑ

6.4.2.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

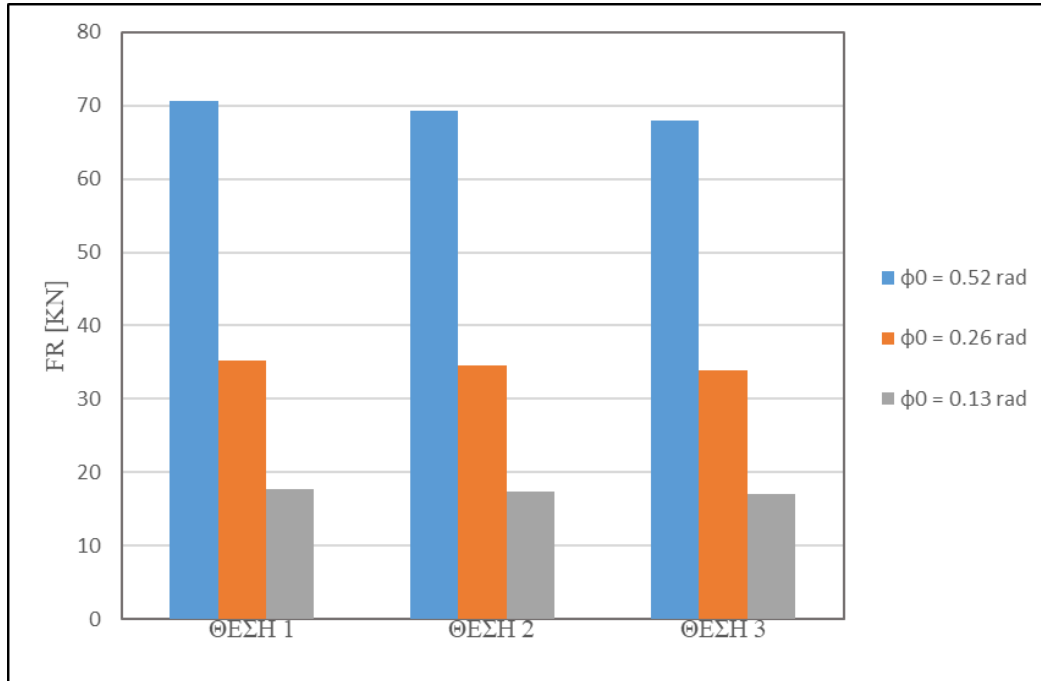
Τα δεδομένα της προηγούμενης περίπτωσης ισχύουν και εδώ με τις εξής διαφοροποιήσεις :

- Μάζες εμπορευματοκιβωτίων, $m_1 = 25000$ kg, $m_2 = 18000$ kg και $m_3 = 16000$ kg
- Κέντρο βάρους εμπορευματοκιβωτίων, $KG_C = 3.286$ m
- Ροπή αδράνειας εμπορευματοκιβωτίων, $I = (m_1 + m_2 + m_3) \cdot KG_C^2 = 636914.9$ kg m²

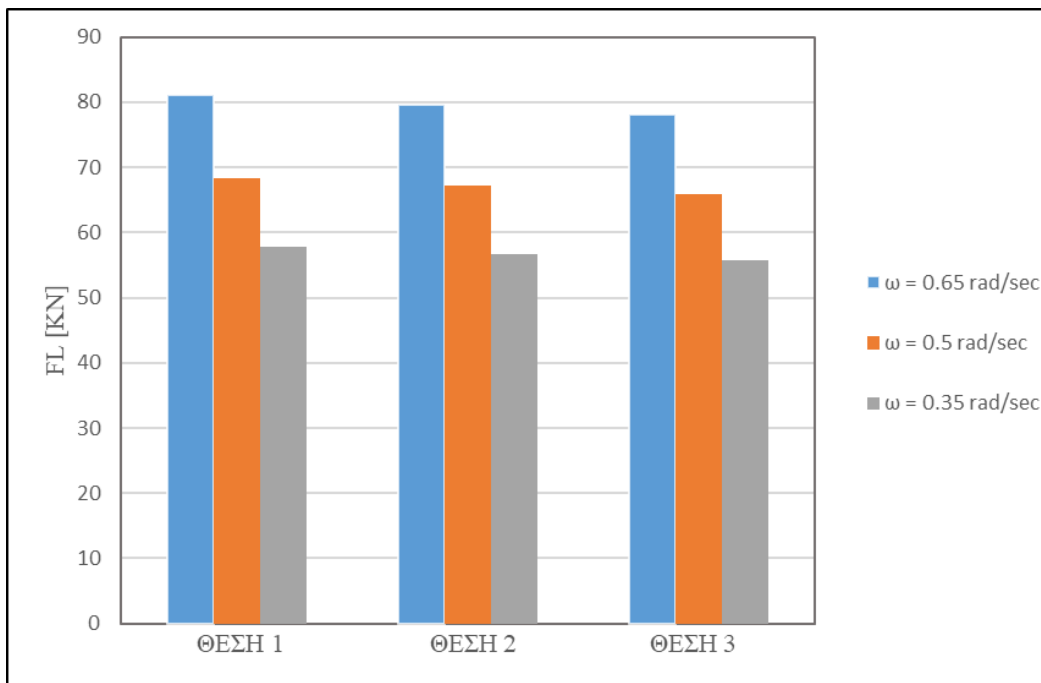
6.4.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



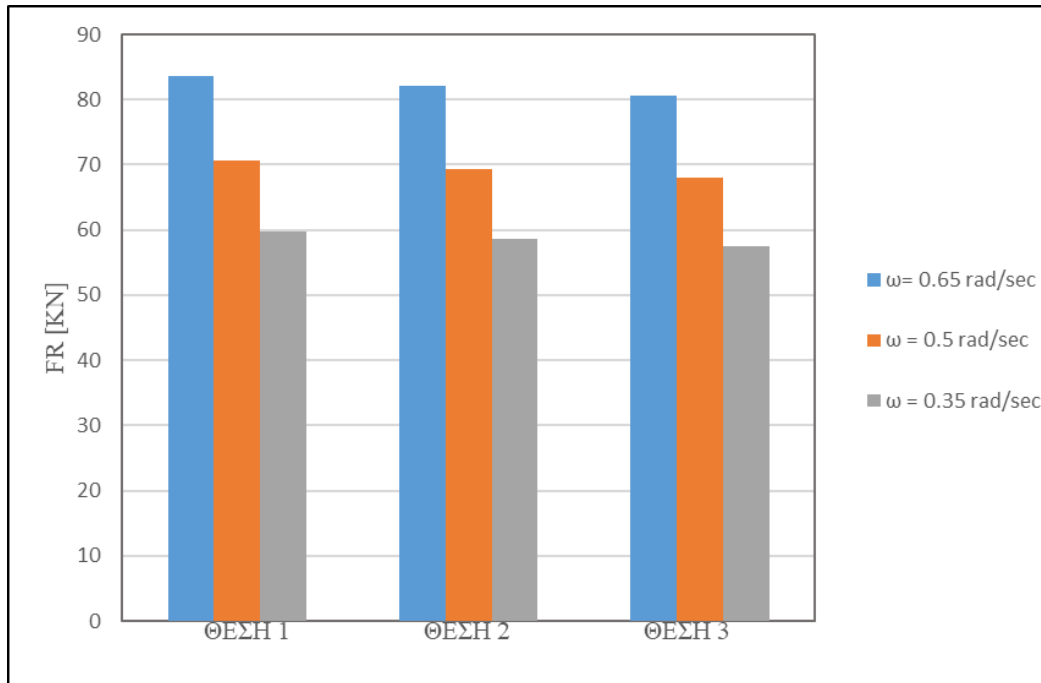
Σχήμα 6.22 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης ϕ_0



Σχήμα 6.23 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης ϕ_0



Σχήμα 6.24 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω



Σχήμα 6.25 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω

6.5 ΠΡΟΣΔΕΣΗ ΠΕΝΤΕ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ

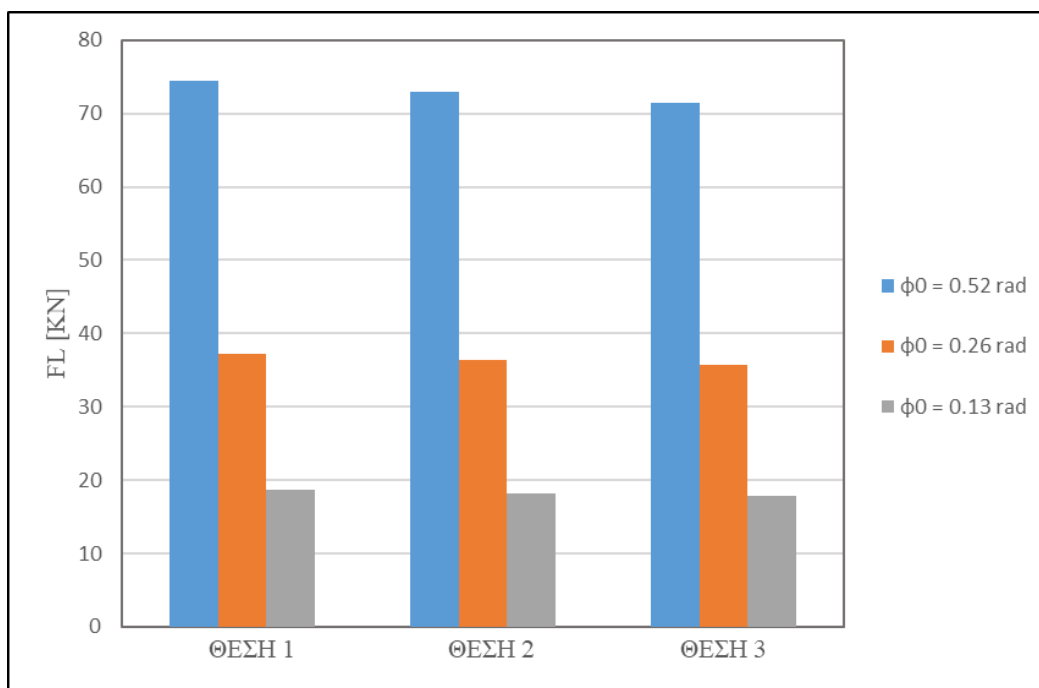
6.5.1 ΠΕΝΤΕ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΑ ΩΣ ΔΥΟ ΜΑΖΕΣ

6.5.1.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

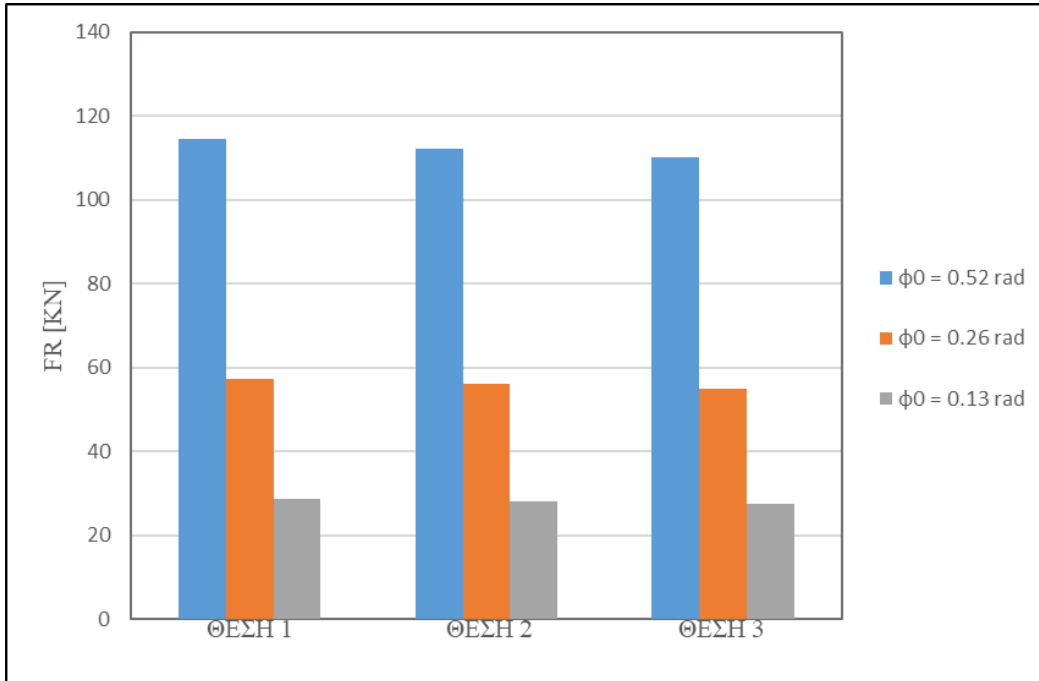
Τα δεδομένα της προηγούμενης περίπτωσης ισχύουν και εδώ με τις εξής διαφοροποιήσεις :

- Μάζες εμπορευματοκιβωτίων, $m_1 = 25000$ kg, $m_2 = 18000$ kg, $m_3 = 16000$ kg, $m_4 = 10000$ kg και $m_5 = 8000$ kg
- Κέντρο βάρους 1-εμπορευματοκιβωτίου, $KG_{C1} = \alpha / 2 = 1.219$ m
- Ροπή αδράνειας 1-εμπορευματοκιβωτίου, $I_1 = m_1 \cdot KG_{C1}^2 = 37161.2$ kg m²
- Κέντρο βάρους 2^{ης} μάζας-εμπορευματοκιβωτίων, $KG_{C2} = 6.4711$ m
- Ροπή αδράνειας 2^{ης} μάζας-εμπορευματοκιβωτίων, $I_2 = (m_2 + m_3 + m_4 + m_5) \cdot KG_{C2}^2 = 2177507$ kg m²

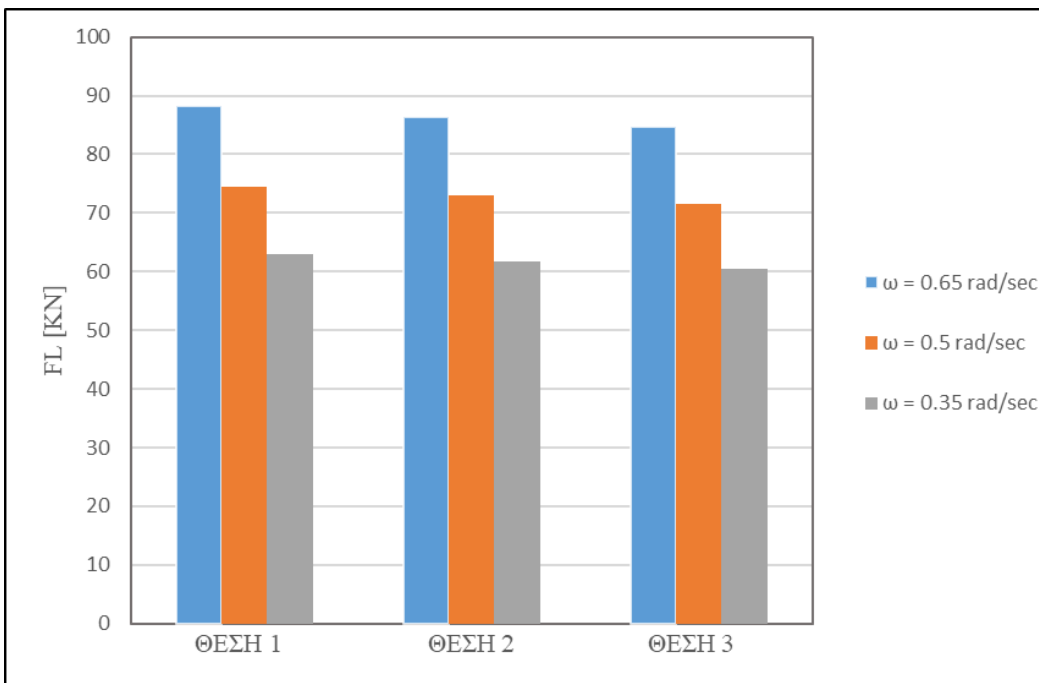
6.5.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



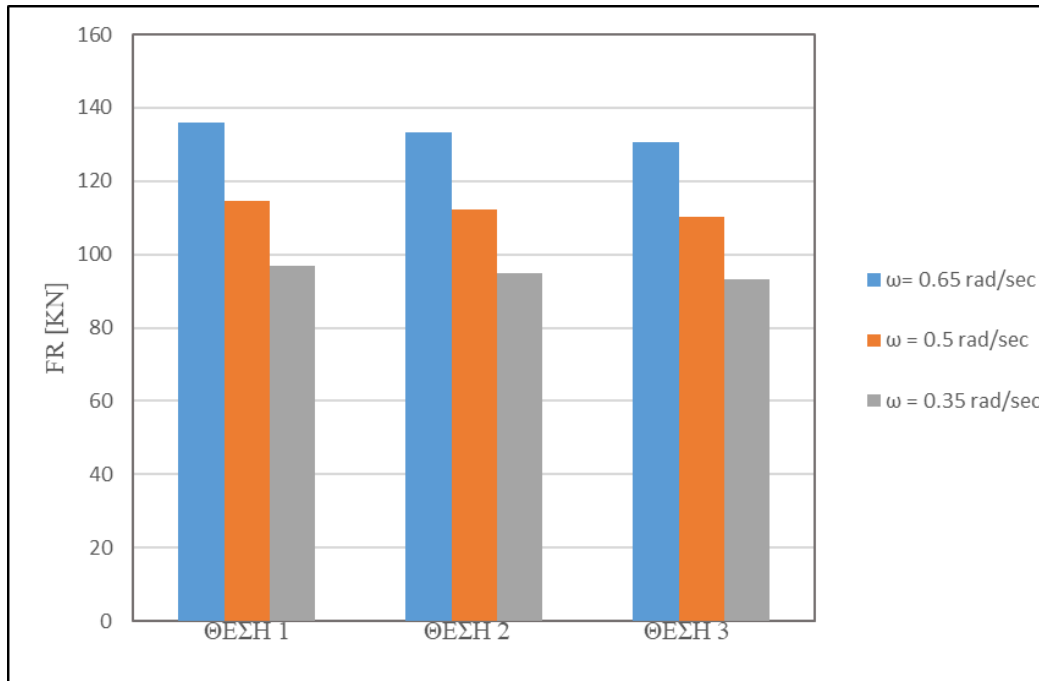
Σχήμα 6.26 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0



Σχήμα 6.27 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης ϕ_0



Σχήμα 6.28 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω



Σχήμα 6.29 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω

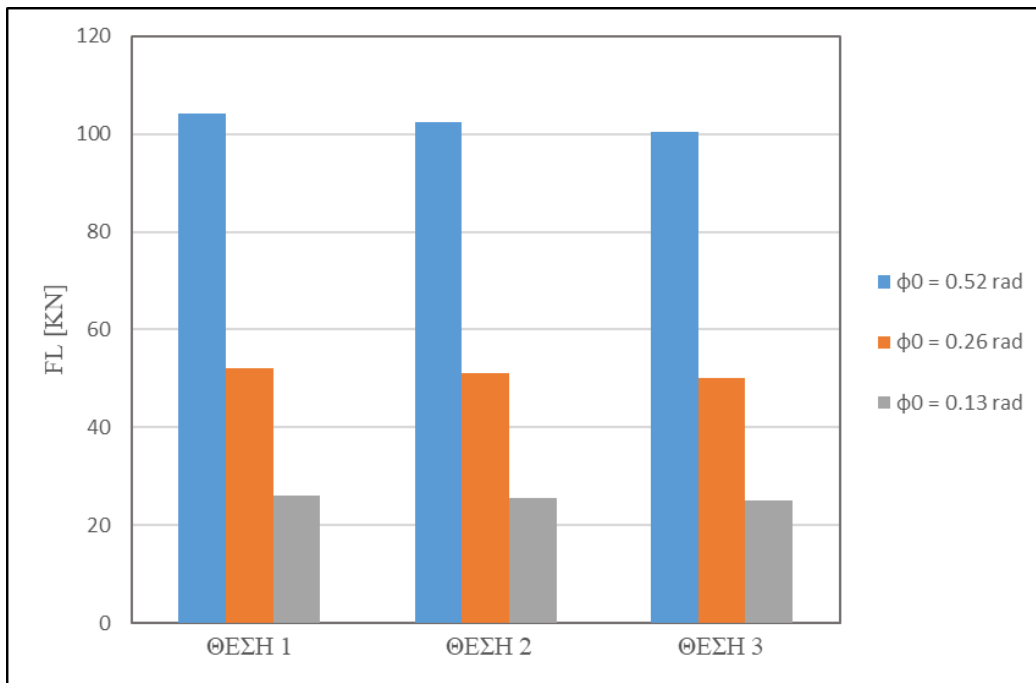
6.5.2 ΠΕΝΤΕ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΑ ΩΣ ΜΙΑ ΜΑΖΑ

6.5.2.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

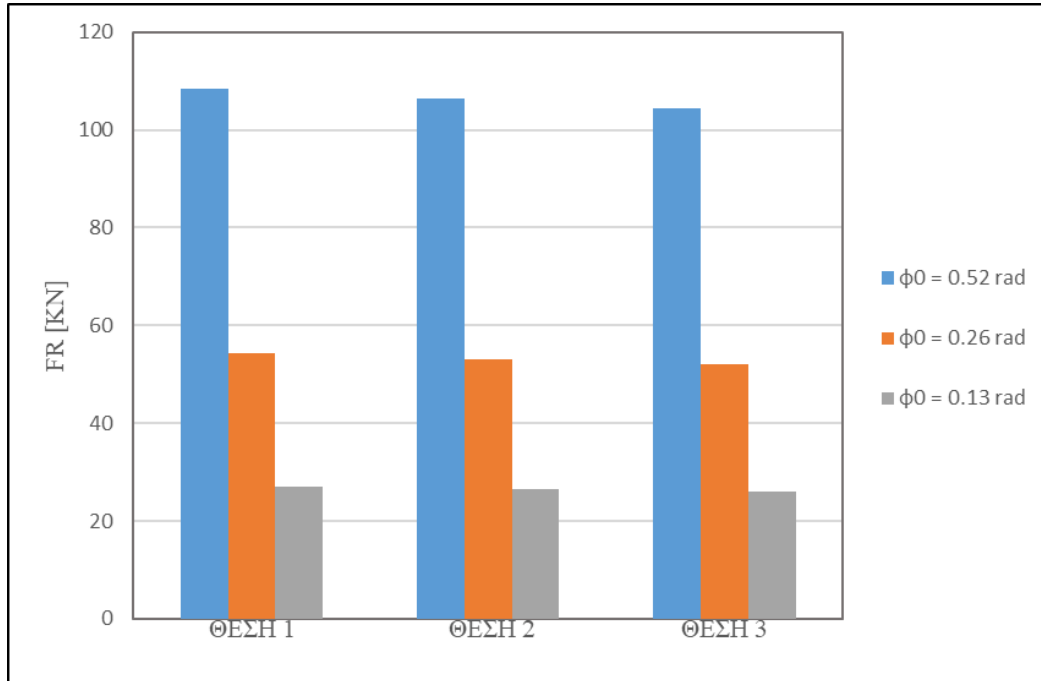
Τα δεδομένα της προηγούμενης περίπτωσης ισχύουν και εδώ με τις εξής διαφοροποιήσεις :

- Μάζες εμπορευματοκιβωτίων, $m_1 = 25000$ kg, $m_2 = 18000$ kg, $m_3 = 16000$ kg, $m_4 = 10000$ kg και $m_5 = 8000$ kg
- Κέντρο βάρους εμπορευματοκιβωτίων, $KG_C = 4.766$ m
- Ροπή αδράνειας εμπορευματοκιβωτίων, $I = (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5) \cdot KG_C^2 = 1749006.9$ kg m²

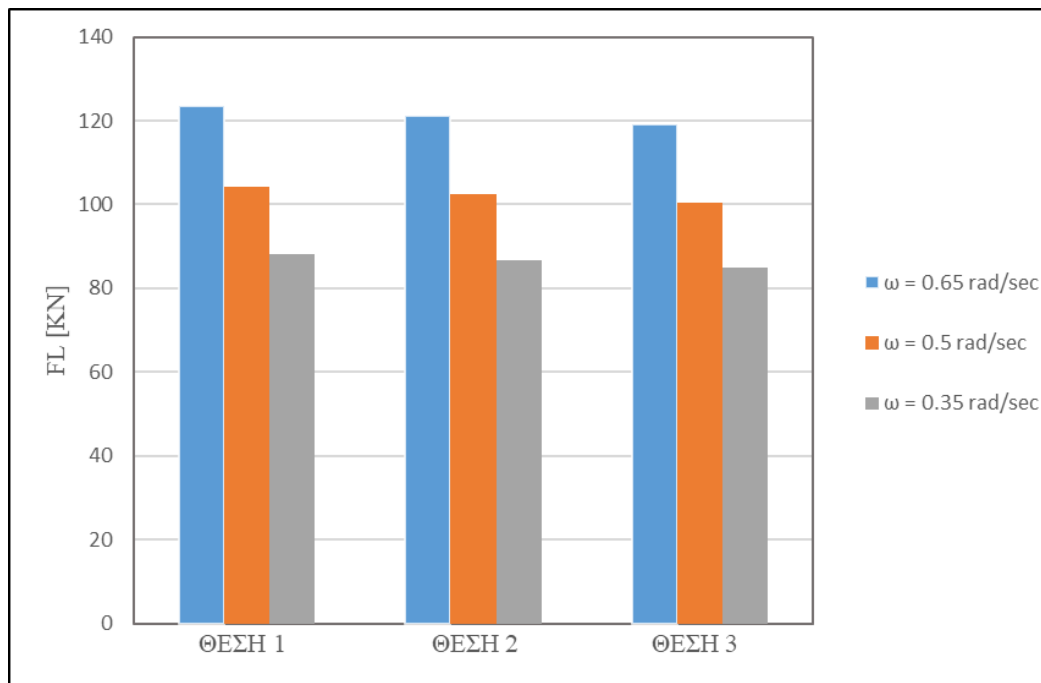
6.5.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



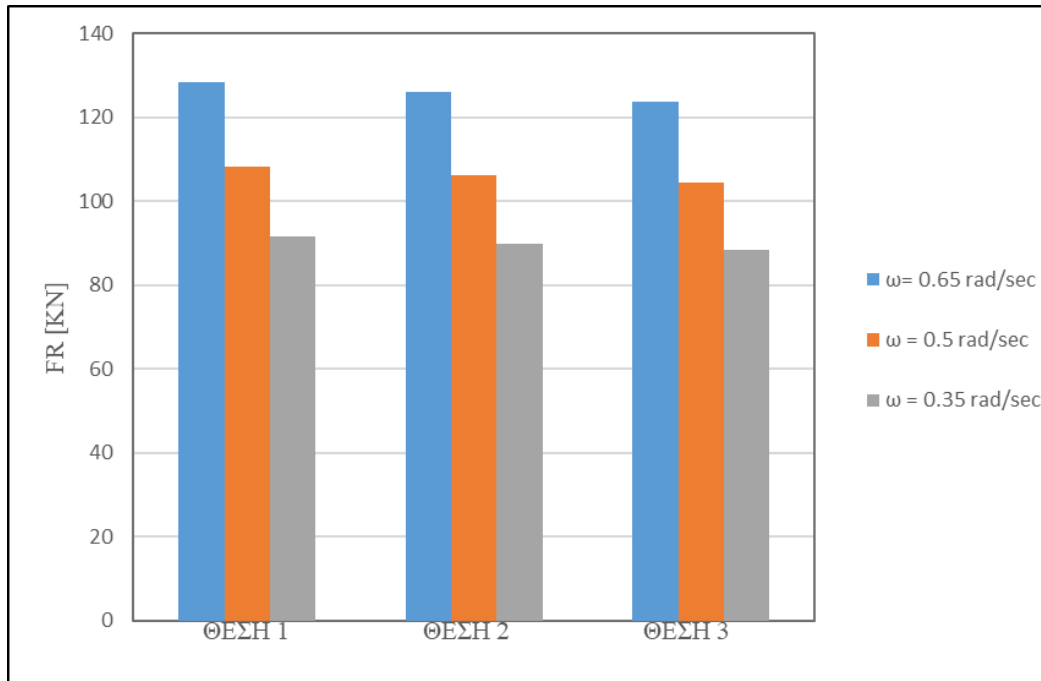
Σχήμα 6.30 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης φ_0



Σχήμα 6.31 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει του πλάτους διέγερσης ϕ_0



Σχήμα 6.32 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω



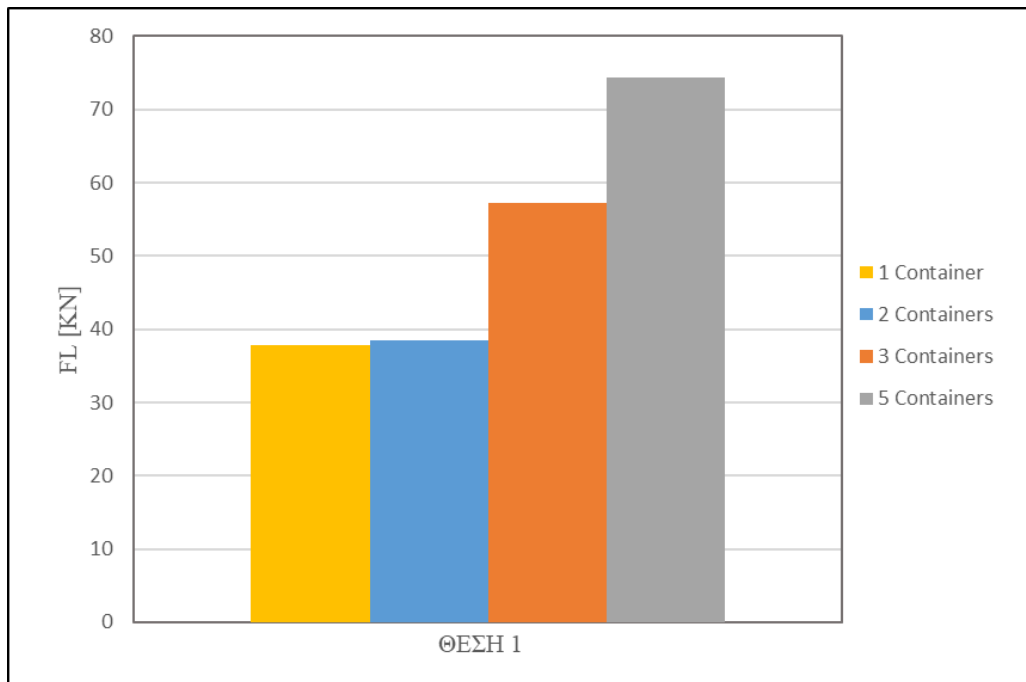
Σχήμα 6.33 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας ω

6.6 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΑ LASHINGS

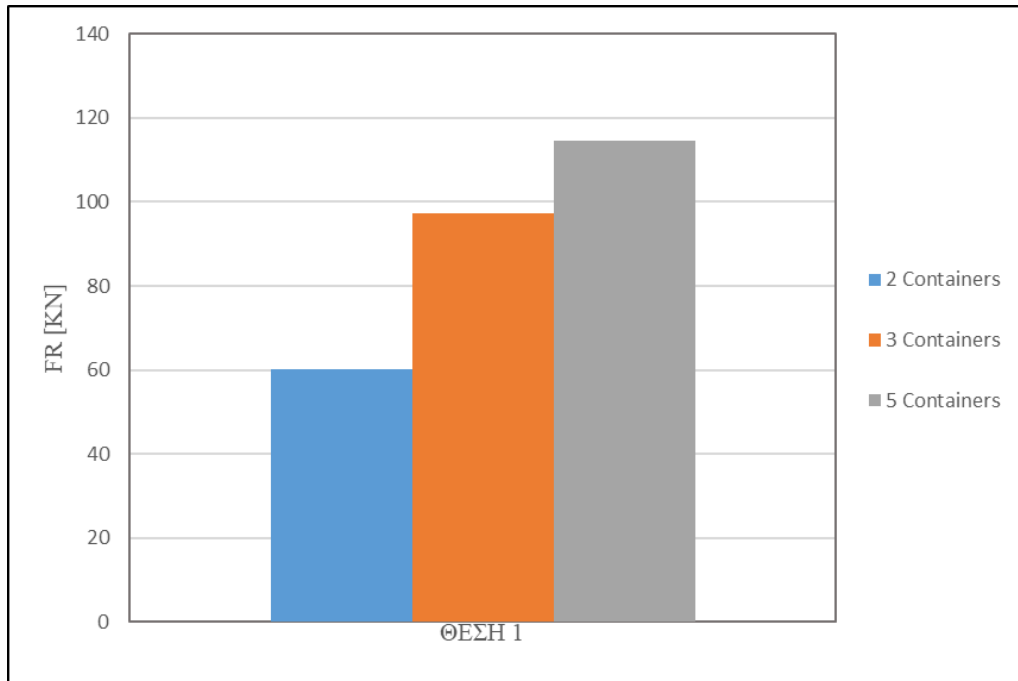
Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι η δυσμενέστερη θέση πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα του πλοίου είναι η Θέση 1 (στην άκρη του καταστρώματος). Για αυτό λοιπόν ακολουθούν στη συνέχεια συγκριτικά διαγράμματα των δυνάμεων στα lashings (F_L και F_R), για τη Θέση 1, για $\varphi_0 = 0.52$ rad και $\omega = 0.5$ rad/s, προκειμένου να διευκολυνθεί η κατανόηση της μεταβολής των δυνάμεων για κάθε περίπτωση. Τα διαγράμματα αυτά θα αφορούν το Α' Σενάριο φόρτωσης.

Επιπλέον, θα παρουσιαστούν και συγκριτικά διαγράμματα των δυνάμεων στα lashings μεταξύ των δύο σεναρίων φόρτωσης, για τις αντίστοιχες συνθήκες με πριν. Δηλαδή για τη Θέση 1, για $\varphi_0 = 0.52$ rad και $\omega = 0.5$ rad/s.

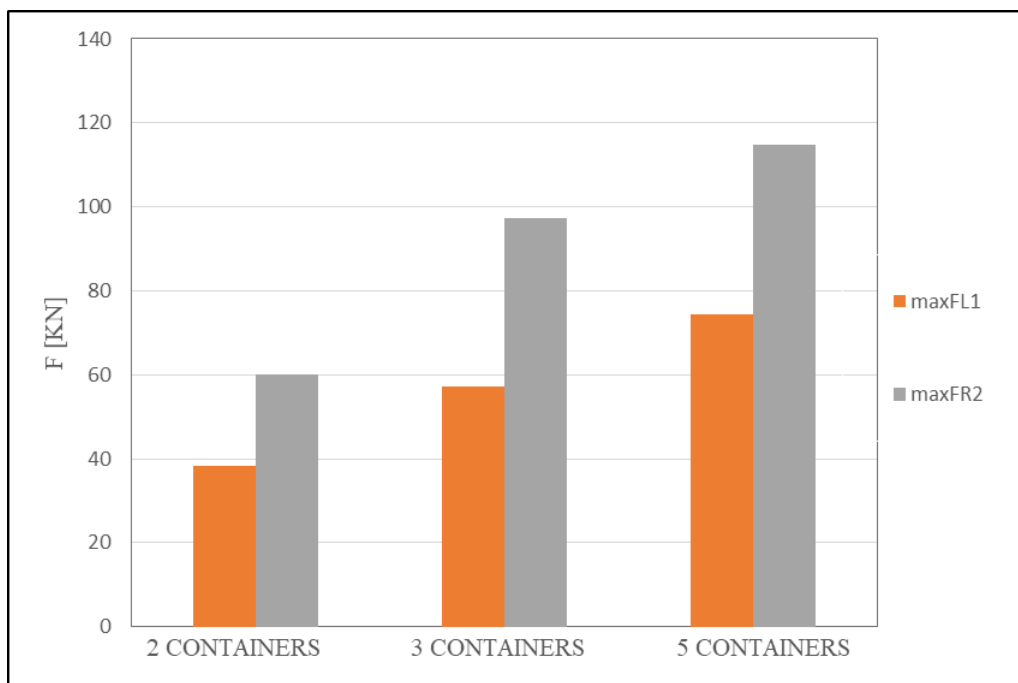
6.6.1 ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΑ ΩΣ ΔΥΟ ΜΑΖΕΣ



Σχήμα 6.34 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 (Α' Σενάριο)

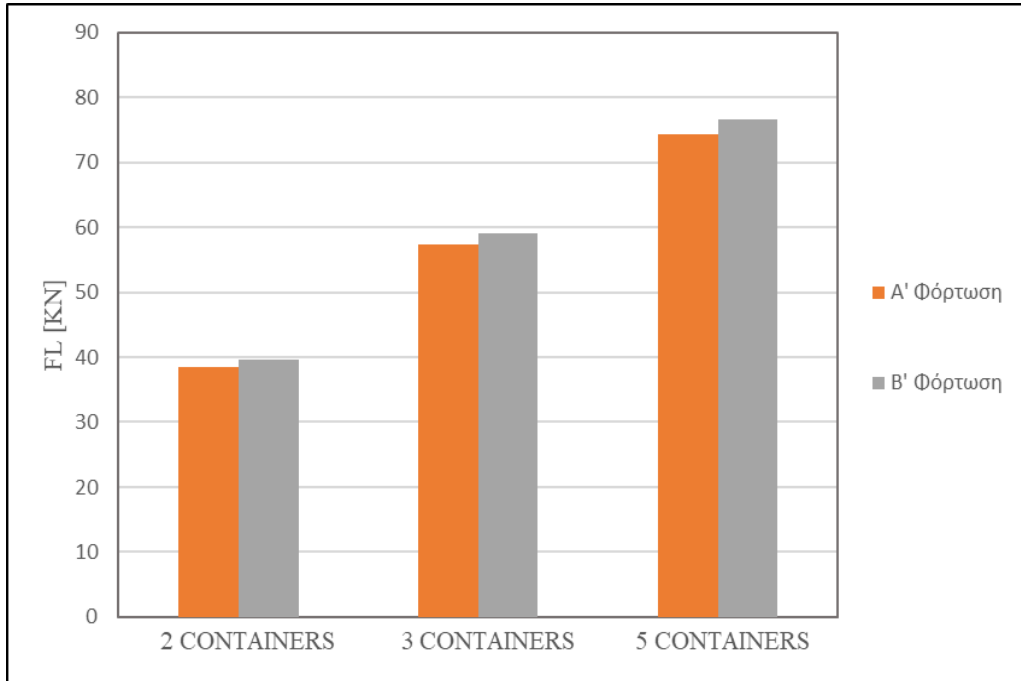


Σχήμα 6.35 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 (Α' Σενάριο)

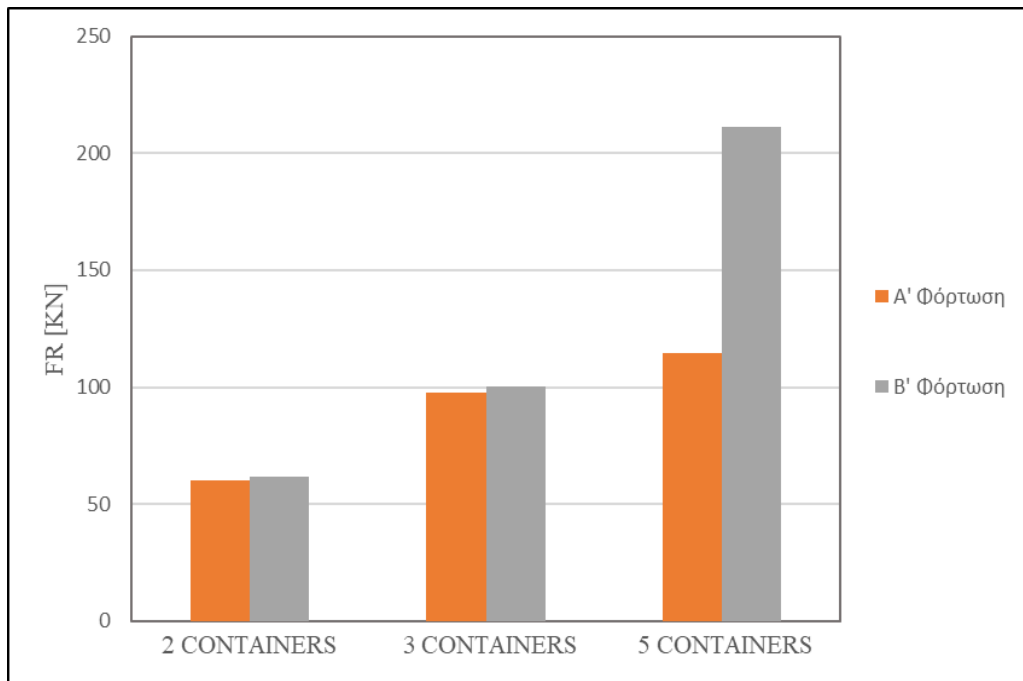


Σχήμα 6.36 : Μέγιστη φόρτιση των lashings (Α' Σενάριο) για containers ως δύο μάζες

Σε αυτή την περίπτωση όπου τα εμπορευματοκιβώτια θεωρούνται ως δύο ξεχωριστές μάζες, το μέτρο των δυνάμεων $F_{RL,2}$ είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το μέτρο των δυνάμεων $F_{RL,1}$. Επίσης, οι δυνάμεις $F_{RL,1}$ αυξάνονται με σχετικά σταθερό ρυθμό με την αύξηση του αριθμού των containers, ενώ οι δυνάμεις $F_{RL,2}$ παρουσιάζουν εντονότερη αύξηση.

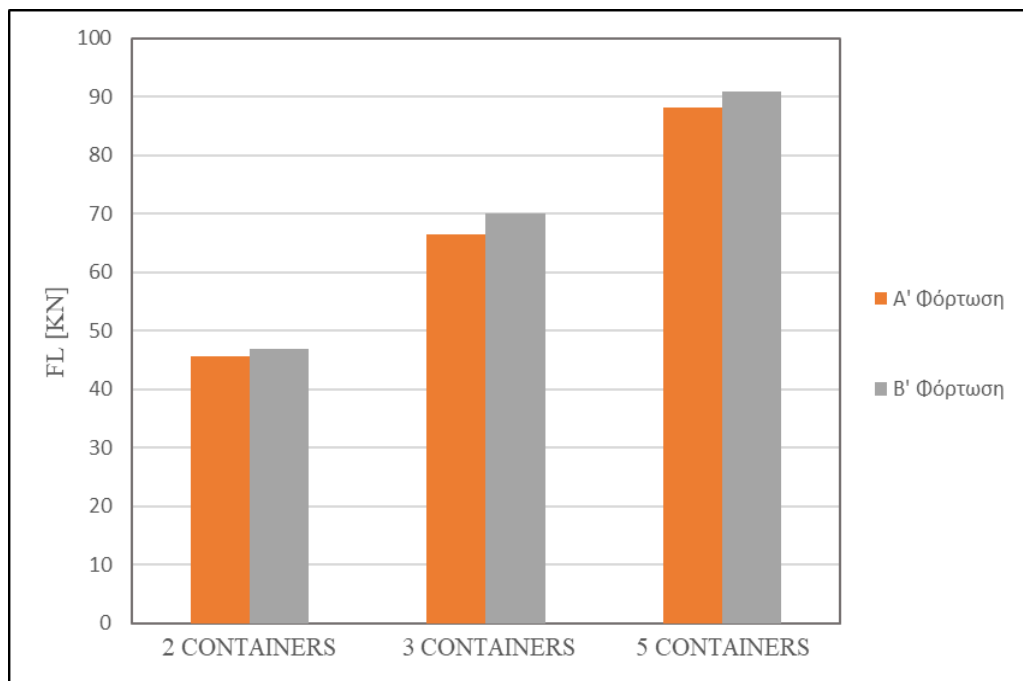


Σχήμα 6.37 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 (A' & B' Σενάριο)

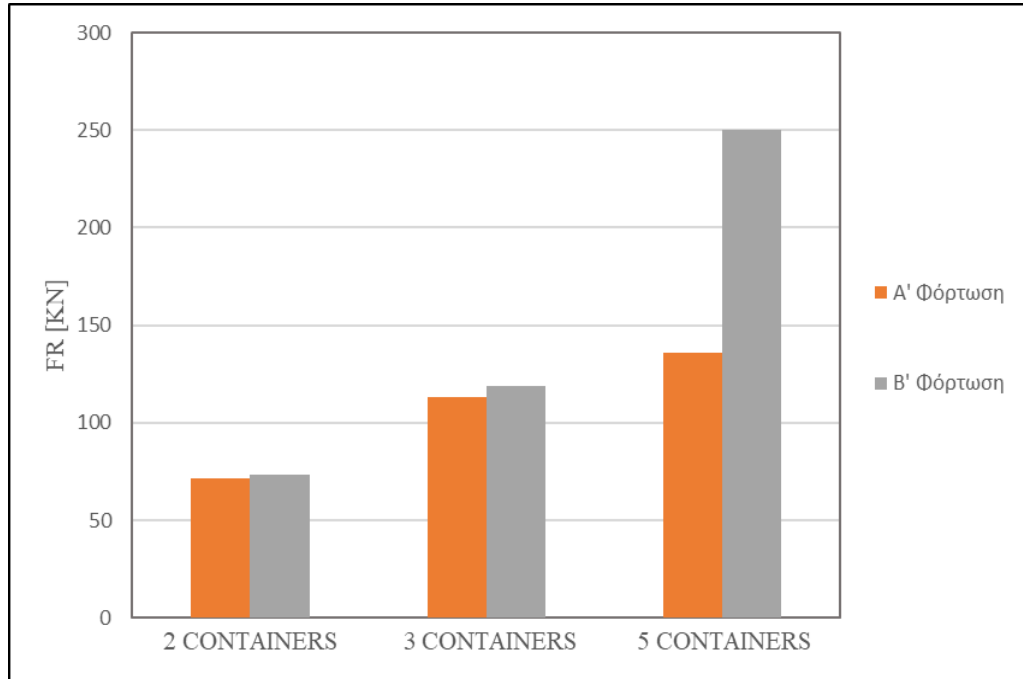


Σχήμα 6.38 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 (A' & B' Σενάριο)

Στο σημείο αυτό αξίζει να παρατεθούν δύο ακόμη διαγράμματα μέγιστων φορτίσεων στα lashings για τα δύο σενάρια φόρτωσης και τις εξής συνθήκες : Θέση 1, $\varphi_0 = 0.52$ rad και $\omega = 0.65$ rad/s.



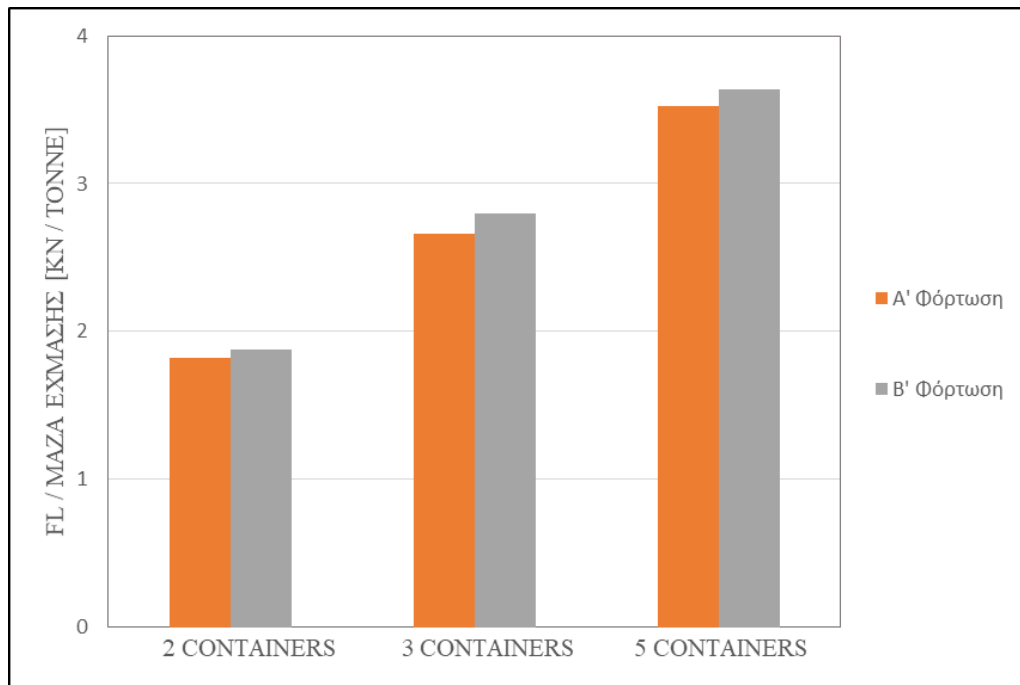
Σχήμα 6.39 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 (A' & B' Σενάριο)



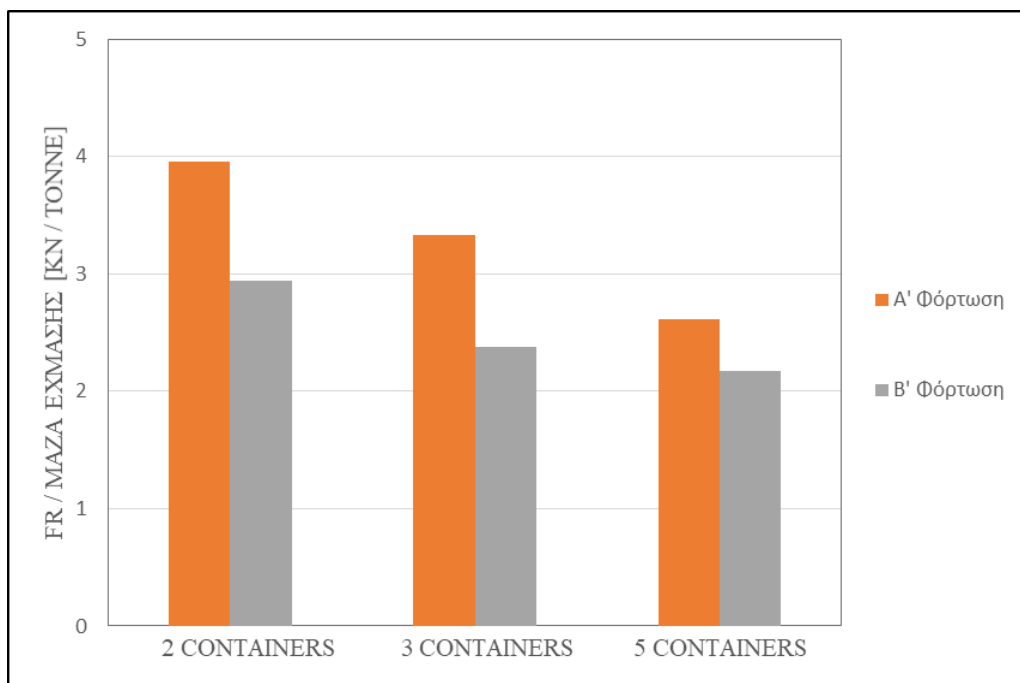
Σχήμα 6.40 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 (A' & B' Σενάριο)

Τα συγκεκριμένα διαγράμματα και ειδικά το Σχήμα 6.40 παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί η μέγιστη φόρτιση που λαμβάνει το lashing 2 στο B' Σενάριο και έχοντας κατάσταση φόρτωσης 5 containers υπολογίζεται σε $F_{R2} = 250.25 \text{ kN}$. Η τιμή αυτή ξεπερνάει το ασφαλές φορτίο υπηρεσίας των lashings το οποίο κυμαίνεται μεταξύ : $SWL = 240 - 250 \text{ kN}$ (ενδεικτικές τιμές από Cargo Securing Manuals). Επομένως με τη συγκεκριμένη φόρτωση, και τη συγκεκριμένη διάταξη των lashings ενδέχεται να προκληθεί αστοχία του συστήματος έχμασης των εμπορευματοκιβωτίων και άρα κίνδυνος καταστροφής του φορτίου, γεγονός που επηρεάζει την ασφάλεια του πλοίου.

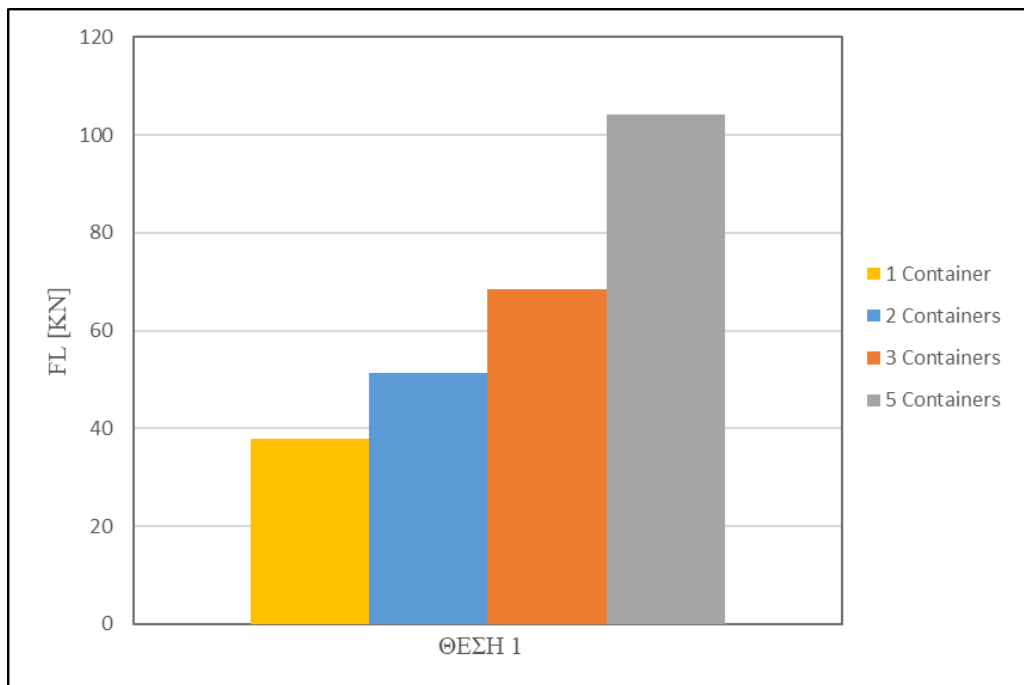
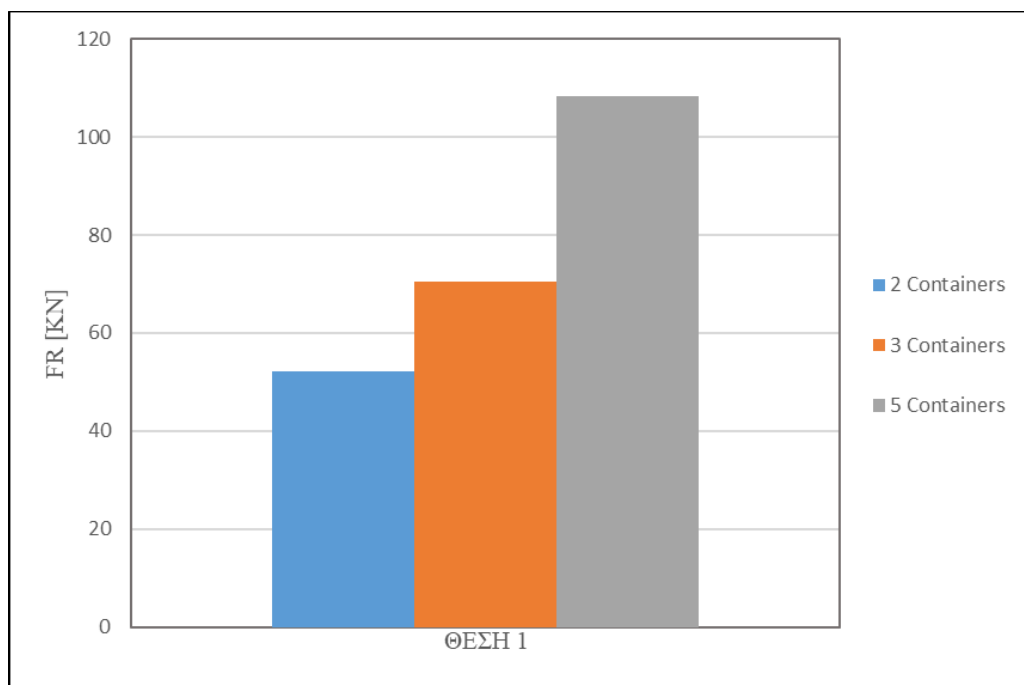
Επιπλέον, συμπληρωματικά με τα παραπάνω διαγράμματα, παραθέτονται και δύο διαγράμματα (Σχήμα 6.41 και Σχήμα 6.42), που δείχνουν τη δύναμη των lashings, ως προς τη μάζα που εγχάζεται σε κάθε περίπτωση.

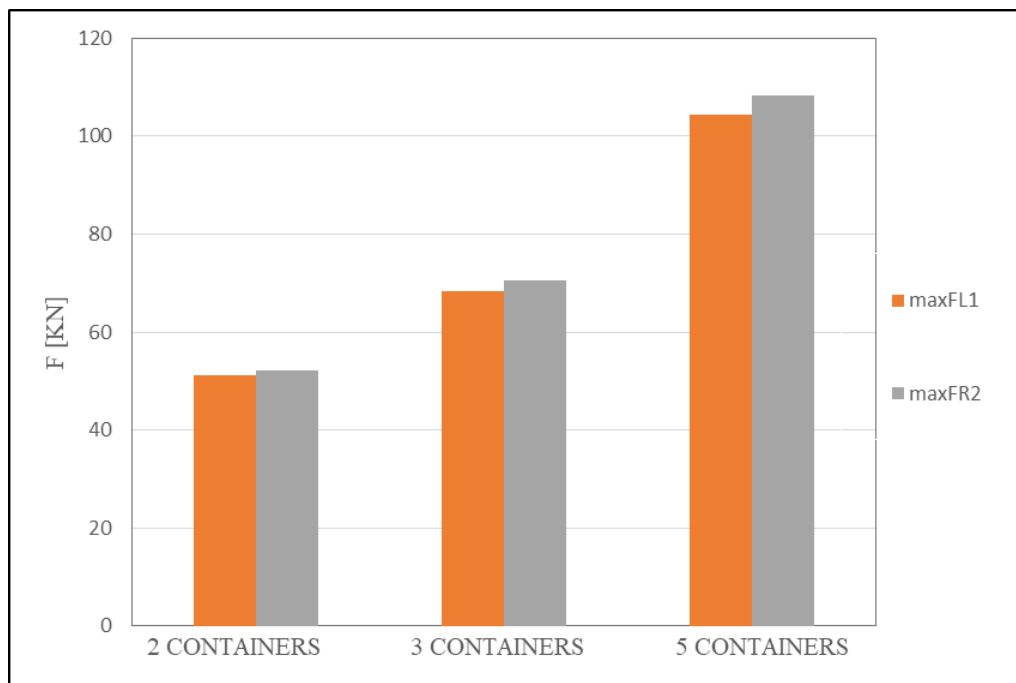


Σχήμα 6.41 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 ως προς τη μάζα έχμασης (Α' & Β' Σενάριο)



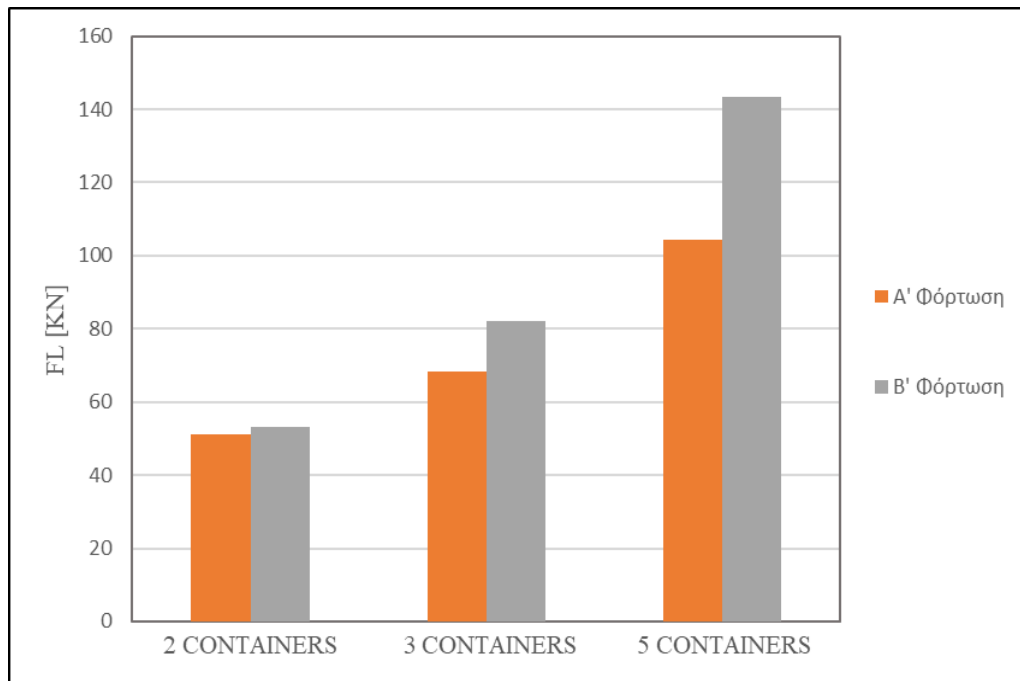
Σχήμα 6.42 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 ως προς τη μάζα έχμασης (Α' & Β' Σενάριο)

6.6.2 ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΑ ΩΣ ΜΙΑ ΜΑΖΑ**Σχήμα 6.43** : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 (Α' Σενάριο)**Σχήμα 6.44** : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 (Α' Σενάριο)

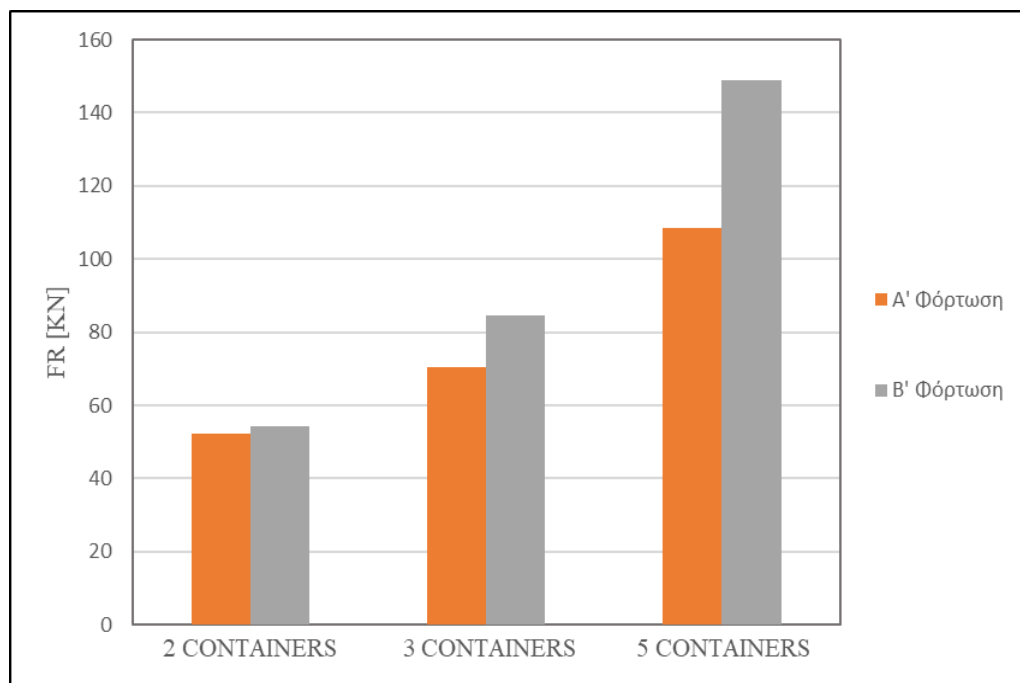


Σχήμα 6.45 : Μέγιστη φόρτιση των lashings (Α' Σενάριο) για containers ως μία μάζα

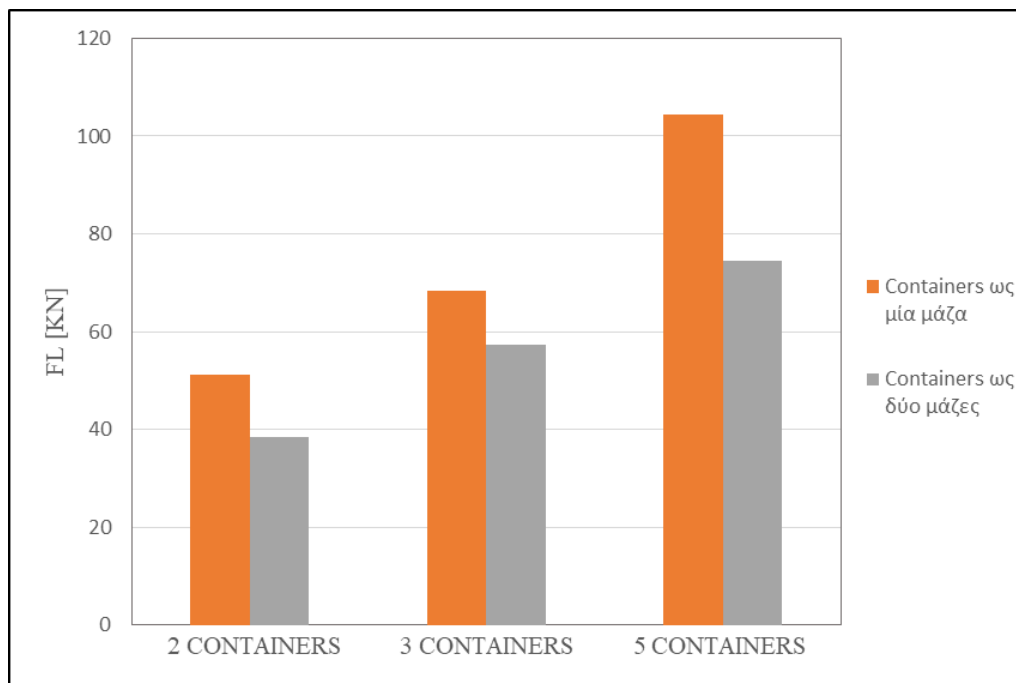
Σε αυτή την περίπτωση όπου τα εμπορευματοκιβώτια θεωρούνται ως μία μάζα, οι δυνάμεις των άνω συρματόσχοινων $F_{RL,2}$, αν και είναι μεγαλύτερες των δυνάμεων των κάτω συρματόσχοινων $F_{RL,1}$, δεν διαφέρουν πολύ από τις τελευταίες.



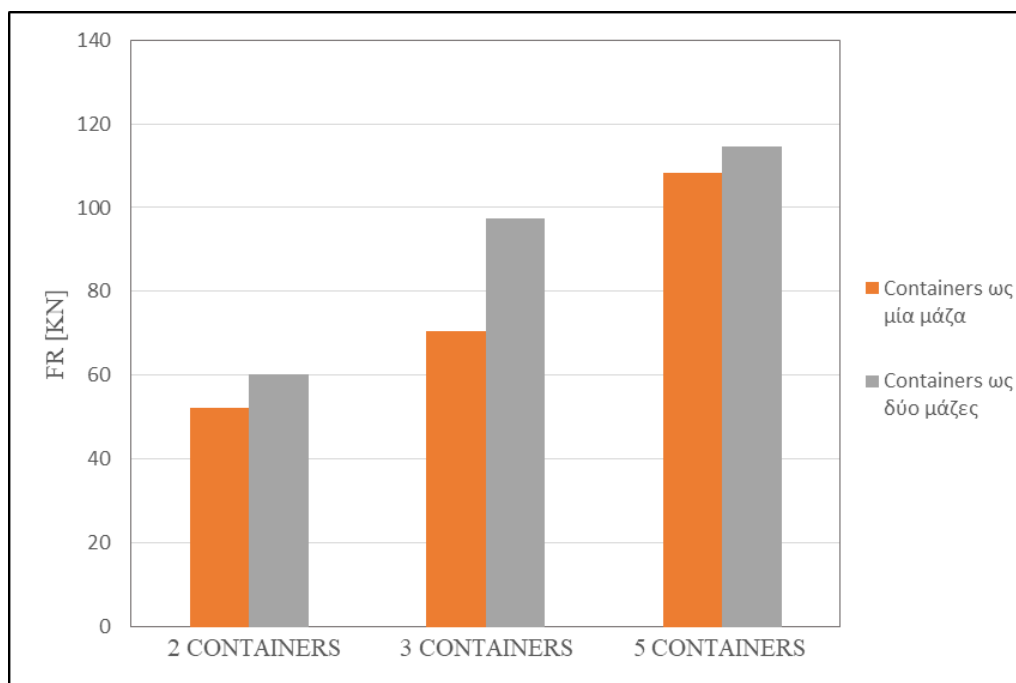
Σχήμα 6.46 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 (A' & B' Σενάριο)



Σχήμα 6.47 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 (A' & B' Σενάριο)

6.6.3 ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΑ ΩΣ ΜΙΑ ΚΑΙ ΔΥΟ ΜΑΖΕΣ

Σχήμα 6.48 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 για containers ως μία και δύο μάζες (Α' Σενάριο)



Σχήμα 6.49 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 για containers ως μία και δύο μάζες (Α' Σενάριο)

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σχολιαστεί το γεγονός ότι και στα δύο Σχήματα 6.48-6.49, οι δυνάμεις FL και FR αυξάνονται με την αύξηση του αριθμού των containers που στοιβάζονται. Στο Σχήμα 6.48, η δύναμη του 1^{ου} αριστερού lashing είναι μεγαλύτερη όταν τα containers θεωρούνται ως μία μάζα σε σχέση με όταν αυτά θεωρηθούν ως δύο μάζες. Αυτό συμβαίνει πρώτον, γιατί όταν αυξάνεται ο αριθμός των containers αυξάνεται και η μάζα της στοίβας και δεύτερον, όταν αυξάνεται το ύψος της στοίβας αυξάνεται και το KG_C , που συνεπάγεται ταυτόχρονη κλιμάκωση της εγκάρσιας επιτάχυνσης. Το lashing 1 συγκρατεί ολόκληρη τη στοίβα μαζί με το lashing 2.

Από την άλλη πλευρά, όταν τα containers θεωρηθούν ως δύο μάζες, το lashing 1 αναλαμβάνει να συγκρατήσει μία μάζα μικρότερου βάρους σε σχέση με πριν και πιο συγκεκριμένα, εχμάζει μόνο το 1^ο εμπορευματοκιβώτιο που εδράζεται στο κατάστρωμα του πλοίου.

Στο Σχήμα 6.49 φαίνεται πως η φόρτιση του δεξιού lashing 2 είναι μεγαλύτερη όταν τα containers θεωρηθούν ως δύο μάζες. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περίπτωση των δύο μαζών, το κέντρο βάρους KG_{C2} είναι μεγαλύτερο από το KG_C της μία μάζας, που συνεπάγεται υψηλότερη εγκάρσια επιτάχυνση, άρα και εντονότερη φόρτιση.

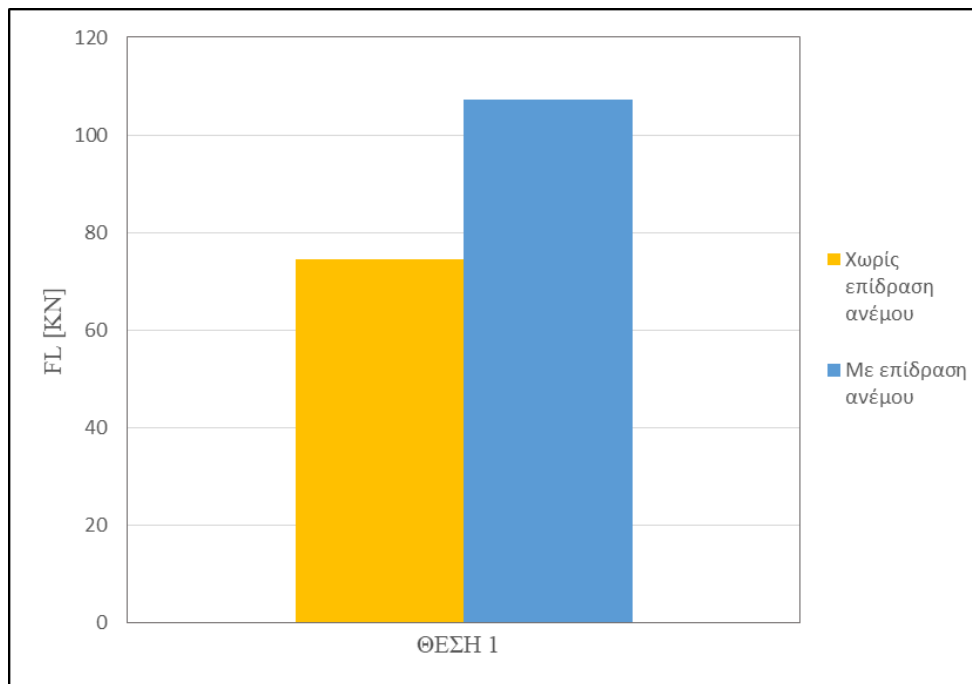
6.7 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΙΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΤΩΝ LASHINGS

Στην παράγραφο αυτή, θα εξεταστεί η επίδραση του ανέμου στις δυνάμεις που δέχονται τα lashings, για μία στοίβα πέντε εμπορευματοκιβωτίων, τοποθετημένη στην άκρη του καταστρώματος (Θέση 1), για $\varphi_0 = 0.52$ rad και $\omega = 0.5$ rad/s. Τα εμπορευματοκιβώτια θα θεωρηθούν αρχικά ως δύο ξεχωριστές μάζες και μετά ως μία ενιαία μάζα.

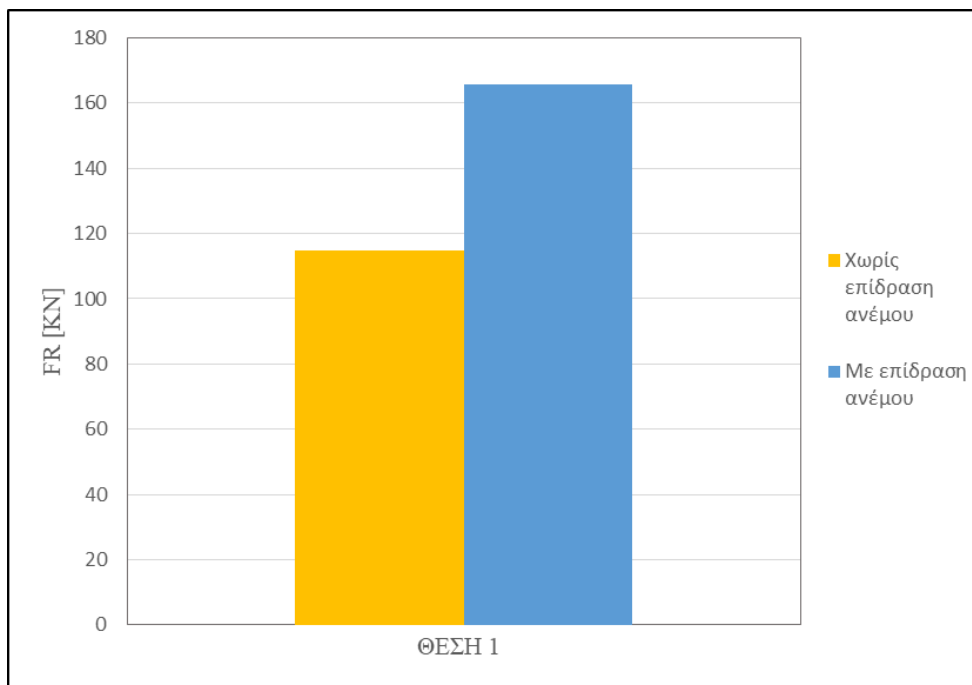
Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκήσει ο άνεμος στη στοίβα, σε ένα 20-ft container, σε οποιαδήποτε θέση κι αν βρίσκεται το πλοίο κατά τη διάρκεια της ταλαντωτικής του κίνησης, βάσει CSM, είναι :

- 1st tier : 30 kN
- 2nd tier and higher : 15 kN

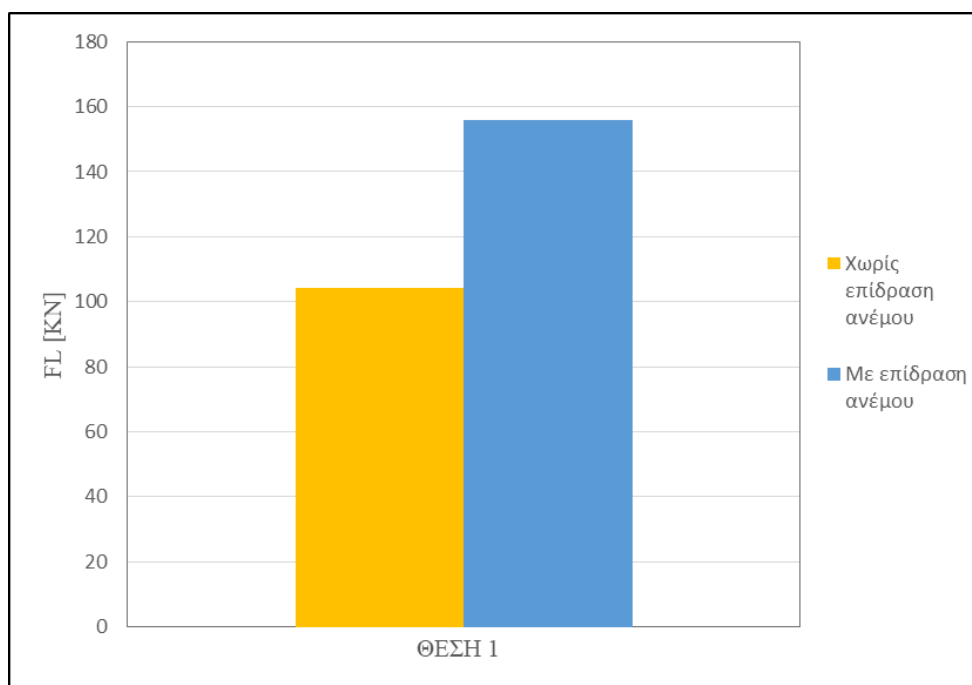
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, ύστερα από την εφαρμογή του μοντέλου, στα οποία απεικονίζεται η μεταβολή της φόρτισης του εκάστοτε lashing, όταν επιδρά στο μοντέλο ο άνεμος και όταν αυτός απουσιάζει :



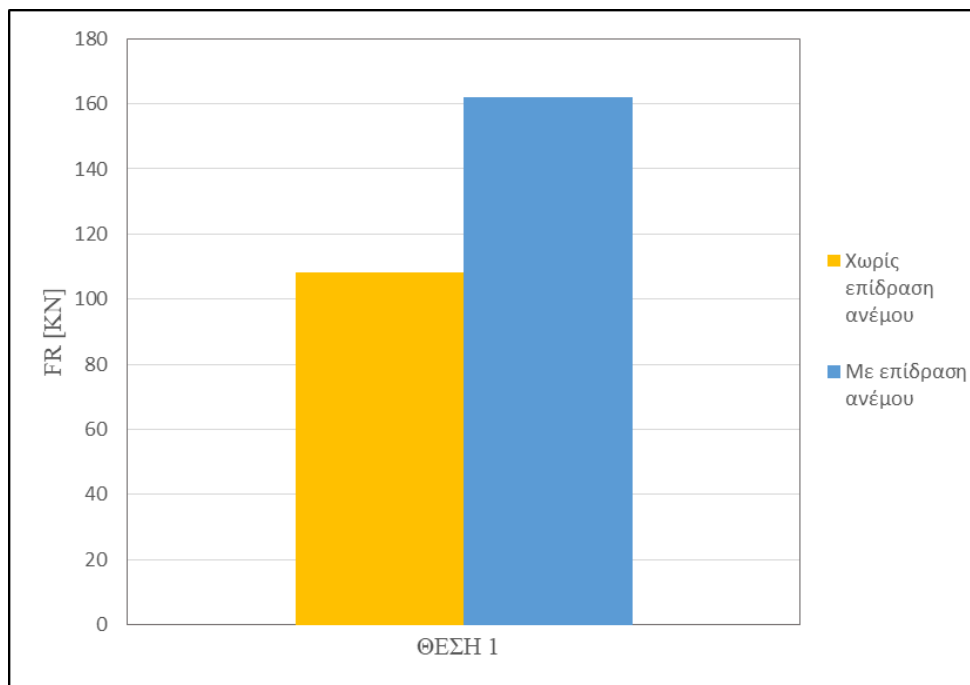
Σχήμα 6.50 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 για containers ως δύο μάζες



Σχήμα 6.51 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 για containers ως δύο μάζες



Σχήμα 6.52 : Μέγιστη φόρτιση αριστερού lashing 1 για containers ως μία μάζα

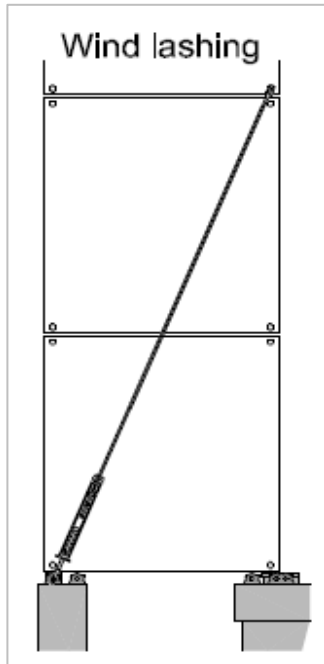


Σχήμα 6.53 : Μέγιστη φόρτιση δεξιού lashing 2 για containers ως μία μάζα

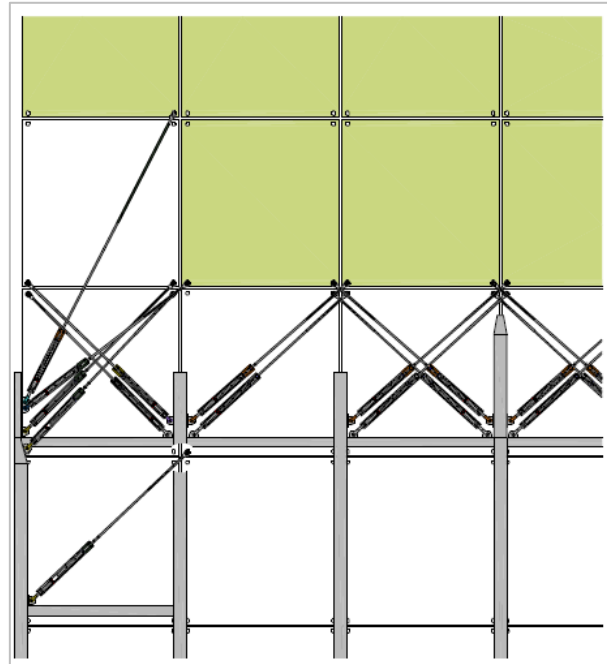
Διαπιστώνεται πως οι φορτίσεις που δέχονται τα lashings έχουν αυξηθεί σε σχέση με την περίπτωση όπου ο άνεμος δεν συμμετέχει στο μοντέλο.

Παρατηρείται ακόμη, ότι οι τιμές των φορτίσεων είναι αρκετά μικρότερες από τις τιμές SWL (Safe Working Load) των lashings και των twistlocks (≈ 250 kN). Από αυτό συμπεραίνεται ότι η συγκεκριμένη διάταξη έχμασης για την συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης και πλεύσης, αντέχει και είναι ασφαλής. Παρόλα αυτά σε ρεαλιστικές συνθήκες, οι φορτίσεις στο σύστημα έχμασης είναι μη αρμονικές και δύσκολα υπολογίσιμες. Συγχρόνως, με δεδομένο ότι το είδος της φόρτωσης ενδέχεται να είναι διαφορετικό και η διάταξη του συστήματος έχμασης μπορεί να έχει κάποια άλλη μορφή από αυτή που έχει υιοθετηθεί στο παρόν μοντέλο, εξάγεται το συμπέρασμα ότι : προκειμένου να διασφαλιστεί η αντοχή του συστήματος έχμασης και η ακεραιότητα της στοίβας είναι αναγκαία η προσθήκη ενός επιπλέον lashing.

Το συγκεκριμένο lashing τοποθετείται όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.54.



Σχήμα 6.54 : Διάταξη wind lashing



Σχήμα 6.55 : Διάταξη συστήματος έχμασης με lashing bridge

Στο Σχήμα 6.55 απεικονίζεται ένα σύστημα έχμασης στο οποίο η διάταξη των lashing διαφέρει σε σχέση με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο. Πρόκειται για μία διάταξη Parallel cross lashing, η οποία εμφανίζεται κατά βάση όταν υπάρχει γέφυρα πρόσδεσης (lashing bridge). Εδώ, το wind lashing που τοποθετείται, εγχιάζεται στο container του 3^{ου} tier πάνω από τη γέφυρα πρόσδεσης με αποτέλεσμα την αύξηση της σταθερότητας της στοίβας και τη μείωση της πιθανότητας αποκόλλησης και ανατροπής των containers.

Σημειώνεται πως το wind lashing παραλαμβάνει το 10-15 % του συνολικού φορτίου που ασκείται σε ολόκληρη τη διάταξη έχμασης.

6.8 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΣΤΑ LASHINGS ΥΠΟ ΤΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

Στη συγκεκριμένη παράγραφο, για τον υπολογισμό των φορτίσεων στα lashings δεν χρησιμοποιήθηκε ως διέγερση του πλοίου η εξίσωση (6.1), αλλά η εξίσωση (6.6). Σημειώνεται πως οι εξισώσεις κίνησης του εμπορευματοκιβωτίου παραμένουν ίδιες με αυτές που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 5. Επίσης, αυτό το νέο μοντέλο εφαρμόστηκε : α) σε ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τύπου Panamax, του οποίου οι βασικοί παράμετροι συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, β) για φόρτωση πέντε εμπορευματοκιβωτίων ως δύο μάζες, με δεδομένα ίδια με αυτά της παραγράφου 6.5.1 και για τη Θέση 1.

Ακολουθούν οι εξισώσεις και τα αποτελέσματα : α) των δυνάμεων που ασκούνται στο εμπορευματοκιβώτιο λόγω διατοιχισμού και β) των φορτίσεων που αναπτύσσονται στα lashings :

Η εξίσωση ημιτονοειδούς κύματος σε βαθύ νερό είναι :

$$\zeta = A \sin(kx - \omega t) \quad (6.3)$$

όπου A , k , ω είναι αντίστοιχα το πλάτος, ο κυματαριθμός και η συχνότητα του κύματος.

Η κλίση α του κύματος θα είναι η παράγωγος του ζ ως προς τη θέση x :

$$\alpha = \frac{\partial \zeta}{\partial x} = Ak \cos(kx - \omega t) \quad (6.4)$$

Σε συγκεκριμένη θέση x , για ευκολία επιλέγεται $x = 0$:

$$\ddot{\alpha} = -Ak\omega^2 \cos(\omega t) \quad (6.5)$$

Η εξίσωση υπολογισμού της γωνίας φ είναι [12]:

$$\begin{aligned} (I_{44} + A_{44})\ddot{\varphi} + B_1\dot{\varphi} + B_2\dot{\varphi}|\dot{\varphi}| + C_1\varphi + C_3\varphi^3 + C_5\varphi^5 + C_7\varphi^7 + C_9\varphi^9 &= -I_{44}\ddot{\alpha}(t) \\ \Leftrightarrow \ddot{\varphi} + b_1\dot{\varphi} + b_2\dot{\varphi}|\dot{\varphi}| + c_1\varphi + c_3\varphi^3 + c_5\varphi^5 + c_7\varphi^7 + c_9\varphi^9 &= -\frac{I_{44}}{I_{44} + A_{44}}\ddot{\alpha}(t) \\ \Leftrightarrow \ddot{\varphi} + b_1\dot{\varphi} + b_2\dot{\varphi}|\dot{\varphi}| + c_1\varphi + c_3\varphi^3 + c_5\varphi^5 + c_7\varphi^7 + c_9\varphi^9 &= -\mu\ddot{\alpha}(t) \end{aligned} \quad (6.6)$$

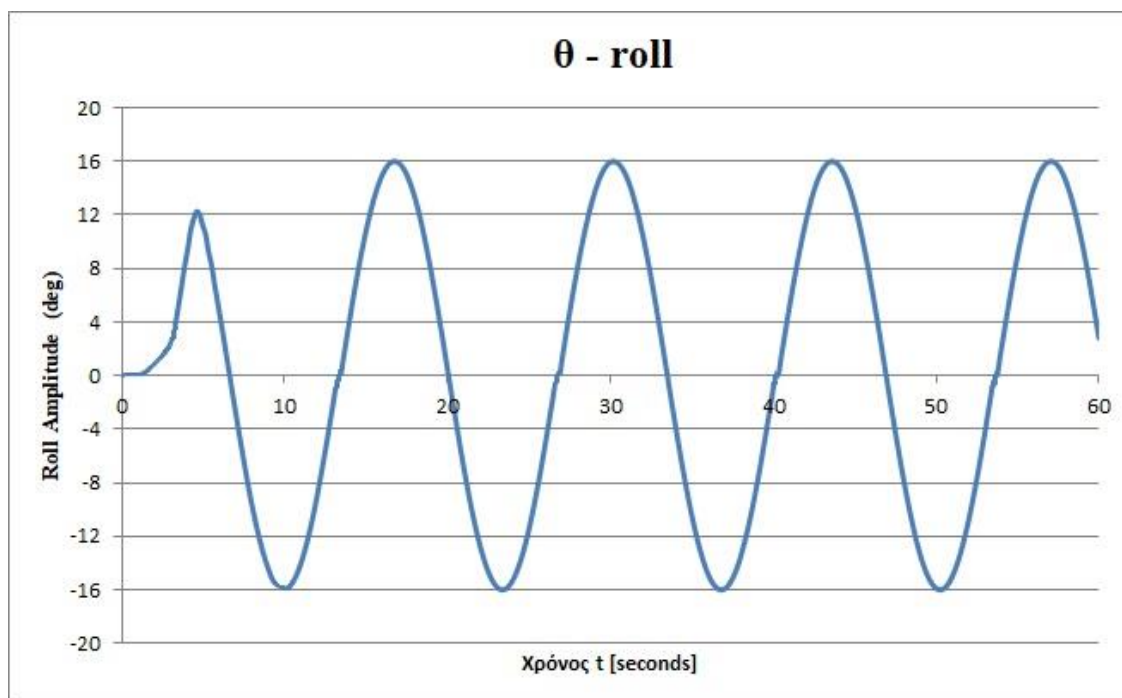
όπου :

$$b_i = \frac{B_i}{I_{44} + A_{44}} \quad \text{και} \quad c_j = \frac{C_j}{I_{44} + A_{44}} .$$

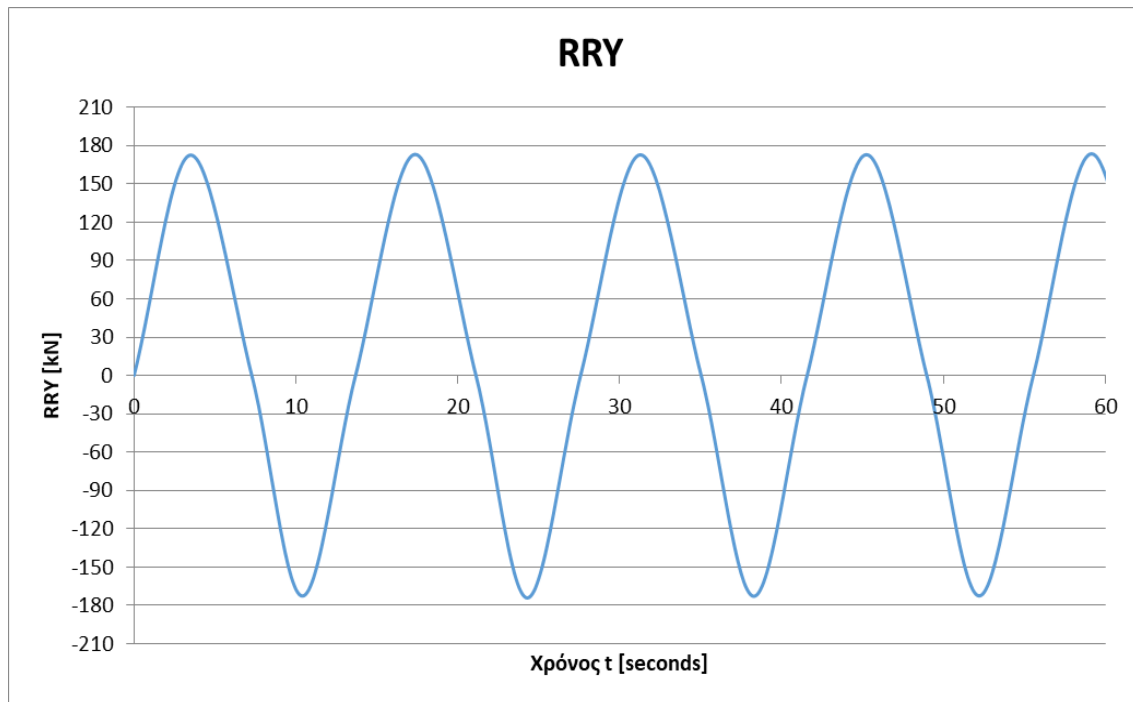
Πίνακας 6.2 : Βασικές παράμετροι του Panamax containership

Παράμετρος	Αριθμητική τιμή
$I_{44} + A_{44}$	$1.222 \times 10^{10} \text{ kg m}^2$
Δ	$6.820 \times 10^7 \text{ kg}$
b_1	0.043 s^{-1}
b_2	0.056
c_1	1.667 s^{-2}
c_3	3.161 s^{-2}
c_5	-10.634 s^{-2}
c_7	8.349 s^{-2}
c_9	-2.150 s^{-2}

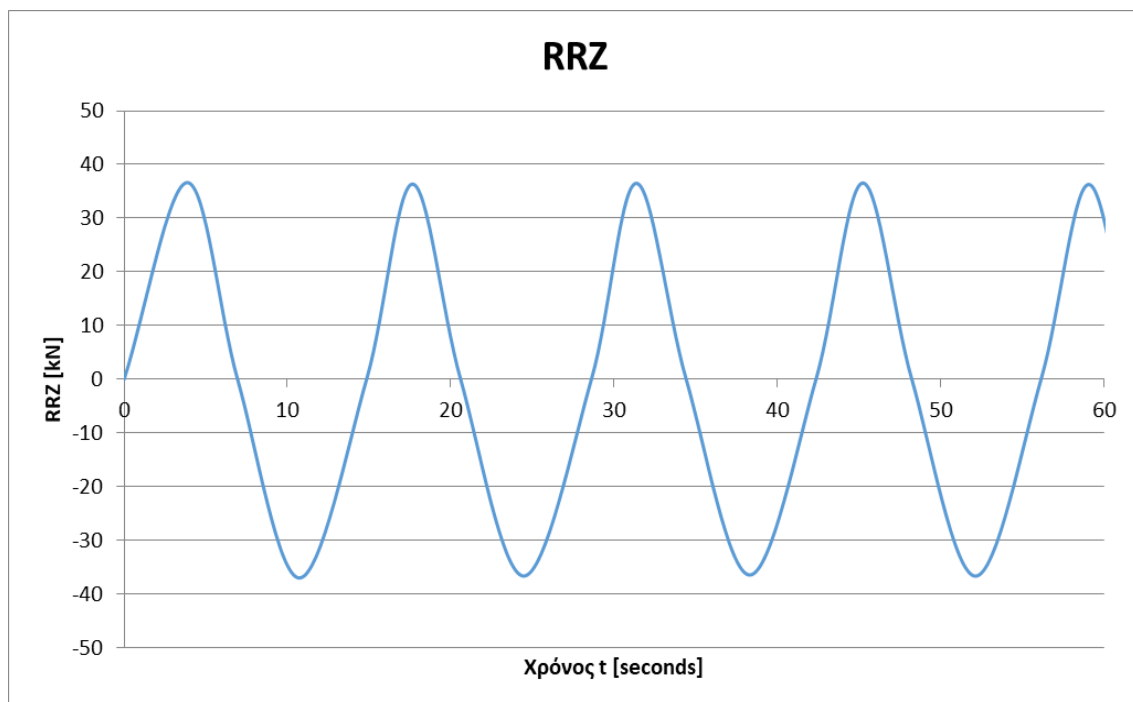
Επίσης, για το δεδομένο πλοίο λαμβάνεται η ιδιοπερίοδος $T_0 = 15.2 \text{ sec}$ και $\mu = 0.909$. Ακόμη, για το κύμα : $H = 4.725 \text{ m}$ και $k = 0.017 \text{ m}^{-1}$.



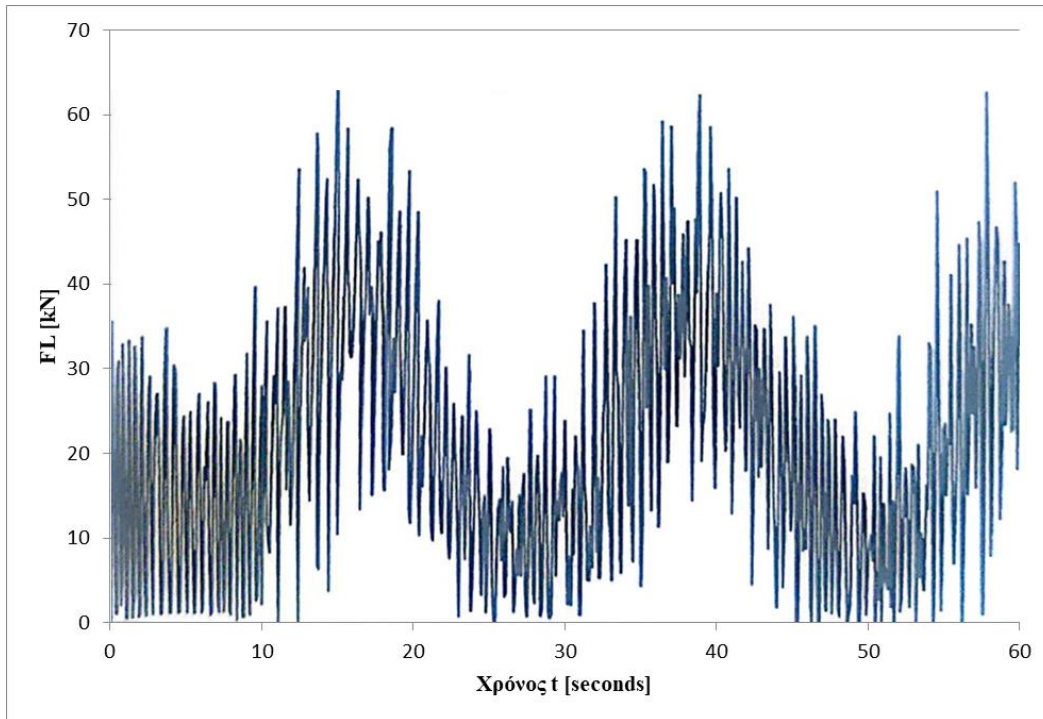
Σχήμα 6.56 : Εύρος γωνίας διατοιχισμού



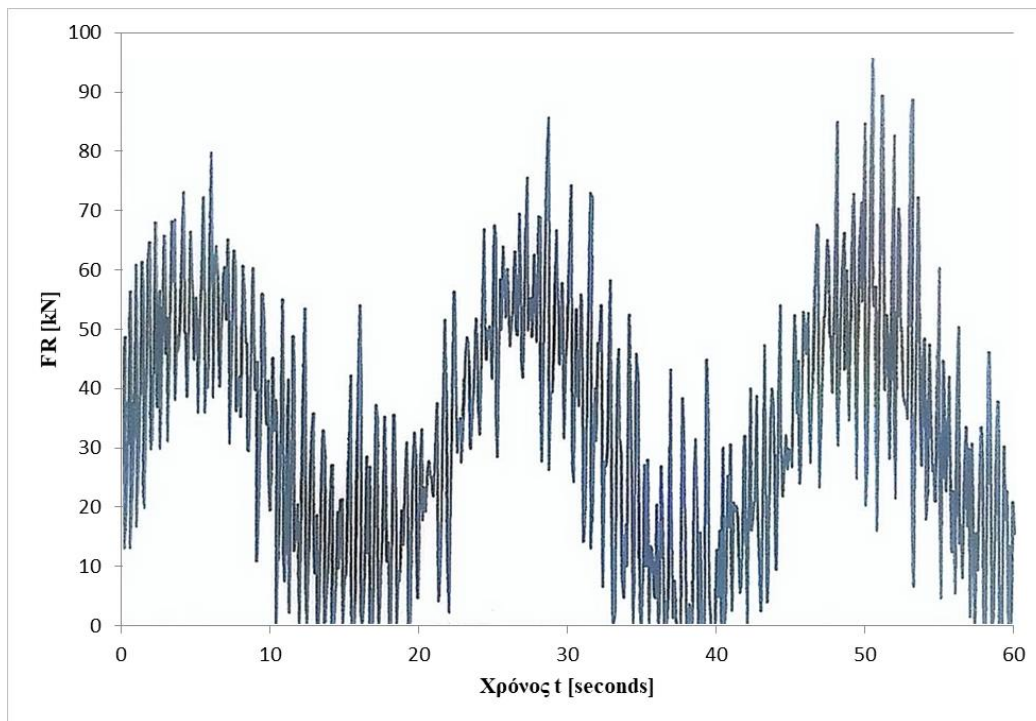
Σχήμα 6.57 : Εγκάρσια συνισταμένη δύναμη λόγω διατοιχισμού



Σχήμα 6.58 : Κατακόρυφη συνισταμένη δύναμη λόγω διατοιχισμού



Σχήμα 6.59 : Φόρτιση αριστερού lashing 1



Σχήμα 6.60 : Φόρτιση δεξιού lashing 2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΕΠΤΥΓΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ, CSS CODE

Στο παρόν κεφάλαιο θα εφαρμοστεί η μέθοδος *Ισορροπίας Δυνάμεων – Ανεπτυγμένη Μέθοδος* κατά CSS Code [13]. Η αριθμητική εφαρμογή θα γίνει για ένα εμπορευματοκιβώτιο, τοποθετημένο στην άκρη του καταστρώματος (Θέση 1, βάσει της ανάλυσης του προηγούμενου κεφαλαίου). Ο παρακάτω έλεγχος θα αφορά τις εγκάρσιες δυνάμεις που δέχεται το εμπορευματοκιβώτιο έναντι εγκάρσιας ανατροπής και ολίσθησης.

Από το Σχήμα 3.1 λαμβάνουμε πως η εγκάρσια επιτάχυνση στο διάμηκες μέσο του κύριου καταστρώματος είναι $a_y = 6.1 \text{ m/s}^2$. Το πλοίο που μελετάται επειδή έχει μήκος $L_{BP} = 141.37 \text{ m}$, η επιτάχυνση χρειάζεται να διορθωθεί βάσει των συντελεστών του Πίνακα 3.2. Επιλέγεται ταχύτητα πλευσης $V_S = 15 \text{ knots}$ και έτσι ο συντελεστής παίρνει την τιμή $\Sigma.\Delta. = 0.80$.

Για την εφαρμογή της μεθόδου, οι επιδράσεις λόγω του ανέμου και των κυματισμών αμελούνται.

Προκύπτουν τα ακόλουθα δεδομένα :

- $CS = MSL / 1.5 = 100 \text{ kN} / 1.5 = 67 \text{ kN}$ (επιλέγεται το ελάχιστο MSL – Μέγιστη Φόρτιση Ασφαλείας μεταξύ των επιμέρους MSL των συρματόσχοινων πρόσδεσης και των υπόλοιπων στοιχείων πρόσδεσης),
- $m = 25 \text{ tons}$, μάζα εμπορευματοκιβωτίου,
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, επιτάχυνση βαρύτητας,
- $\mu = 0.1$, συντελεστής τριβής κατά CSS Code,
- $a = 1.22 \text{ m}$, μοχλοβραχίονας ανατροπής,
- $b = 1.22 \text{ m}$, μοχλοβραχίονας σταθεροποίησης,
- $c = 1 \text{ m}$, μοχλοβραχίονας της δύναμης πρόσδεσης,
- $f = \mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha = 0.78$, συντελεστής από Πίνακα 3.5 για $\mu = 0.1$ και γωνία $\alpha = 45^\circ$.

$$\underline{\text{Εξωτερική Δύναμη}} : F_y = m \cdot a_y \cdot \Sigma.\Delta. = 25 \cdot 6.1 \cdot 0.8 = 122 \text{ kN}$$

$$\underline{\text{Εγκάρσια Ολίσθηση}} : 122 \leq \mu \cdot m \cdot g + n \cdot CS \cdot f = 0.1 \cdot 25 \cdot 9.81 + 2 \cdot 67 \cdot 0.77 = 128 \text{ kN}$$

$$\underline{\text{Εγκάρσια Ανατροπή}} : F_y \cdot a \leq b \cdot m \cdot g + n \cdot CS \cdot c \Leftrightarrow 122 \cdot 1.22 \leq 1.22 \cdot 25 \cdot 9.81 + 2 \cdot 67 \cdot 1 \Leftrightarrow 148.8 \leq 433.2 \text{ kNm}$$

Επομένως δεν παρατηρείται ούτε εγκάρσια ανατροπή ούτε εγκάρσια ολίσθηση.

Από τα αποτελέσματα της παραγράφου 6.2.2, ισχύουν :

$R_{RY} = 140$ kN και $F_L = F_R \approx 75.5$ kN, άρα για τις ισορροπίες των δυνάμεων ισχύει :

Εξωτερική Δύναμη : $F_y = R_{RY} = 140$ kN

Εγκάρσια Ολίσθηση : $2 \cdot F_R = 2 \cdot 75.5 = 151$ kN $> F_y = R_{RY} = 140$ kN

Εγκάρσια Ανατροπή : $F_y \cdot a = 140 \cdot 1.22 = 170.8$ kNm < 433.2 kNm

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το Κεφάλαιο 6 ικανοποιούν τις εξισώσεις της *Ανεπτυγμένης Μεθόδου*. Η παραπάνω μέθοδος όμως χρειάζεται προσοχή όταν εφαρμόζεται σε περισσότερα εμπορευματοκιβώτια. Βάσει της μεθόδου αυτής, οι δυνάμεις στα συρματόσχοινα θεωρούνται σταθερές και ίσες με κάποιο ποσοστό του ορίου θραύσης του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένα. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή θεωρώντας δεδομένες τις φορτίσεις που αναπτύσσονται στα συστήματα έγχυσης, ελέγχει την ισορροπία. Σε αντίθεση με το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, στο οποίο υπολογίζονται οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα συστήματα έγχυσης έτσι ώστε να υπάρξει ισορροπία.

Επιπροσθέτως, αξίζει να αναφερθεί ότι οι επιταχύνσεις που χρησιμοποιούνται στην *Ανεπτυγμένη Μέθοδο* οφείλονται σε όλες τις κινήσεις του πλοίου, ενώ στο μοντέλο που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5 προσομοιάζεται μονάχα η κίνηση του διατοιχισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8**ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΠΕΡΒΟΛΙΚΩΝ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΛΟΓΩ
ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ (ΕΠΙΠΕΔΟ I)**

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί έλεγχος της ευπάθειας του φορτίου ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, σε υπερβολικές εγκάρσιες επιταχύνσεις λόγω διατοιχισμού. Για την εφαρμογή των ανάλογων κριτηρίων, χρησιμοποιείται ένα πλοίο με τα εξής δεδομένα :

Πίνακας 8.1 : Βασικά στοιχεία του πλοίου

Μήκος μεταξύ καθέτων L_{BP}	316.4 m
Πλάτος B	48.2 m
Κοίλο D	27.2 m
Βύθισμα στο μέσο του πλοίου T_m	13.0 m
Διαγωγή $Trim$	-1.155 m
Μήκος στην ίσαλο πλευσης L_{WL}	315.6 m
Μετακεντρικό Ύψος GM	2.297 m
Κατακόρυφη θέση Κέντρου Βάρους KG	21.486 m
Συντελεστής Γάστρας C_B	0.6660
Συντελεστής Μέσης Τομής C_M	0.9885
Bilge Keel Area A_{BK}	61 m ²

Επίσης, για το συγκεκριμένο παράδειγμα, το σημείο που θα εξεταστεί ως προς την επιτάχυνση που δέχεται, είναι μία σειρά εμπορευματοκιβωτίων, οι συντεταγμένες των οποίων είναι οι κάτωθι :

Πίνακας 8.2 : Συντεταγμένες εμπορευματοκιβωτίων

Κατακόρυφη θέση (above keel)	40.6 m
Διαμήκη θέση (από πρυμναία κάθετο)	142.4 m

Ακολουθούν οι υπολογισμοί της μεθόδου [19] :

- Συντελεστής k_L , λαμβάνοντας υπόψη τη διαμήκη θέση του εμπορευματοκιβωτίου :

$$x = 142.4 \text{ m}$$

$$k_L = 1.0 \text{ (αφού } 0.2L \leq x \leq 0.65L \text{)}$$

- Rolling Period T_ϕ :

$$C = 0.373 + 0.023(B/T) - 0.043(L_{WL}/100) = 0.323$$

$$T_\phi = \frac{2 \cdot C \cdot B}{\sqrt{G_o M}} = 20.54 \text{ seconds}$$

- Effective wave slope coefficient r :

$$\tilde{B} = \frac{2\pi^2 B}{g T_\phi^2} = 0.230 \quad , \quad \tilde{T} = \frac{4\pi^2 C_B T}{g T_\phi^2} = 0.083 \quad , \quad \beta = \frac{\sin(\tilde{B})}{\tilde{B}} = 0.991 \quad ,$$

$$\tau = \frac{e^{-\tilde{T}}}{\tilde{T}} = 11.089 \quad , \quad K_1 = \frac{g \beta T_\phi^2 (\tau + \tau \tilde{T} - 1/\tilde{T})}{4\pi^2} = -4.015 \quad ,$$

$$K_2 = \frac{g \tau T_\phi^2 (\beta - \cos \tilde{B})}{4\pi^2} = 20.151 \quad , \quad F = \beta (\tau - 1/\tilde{T}) = -0.951 \quad , \quad OG = KG - T = 8.486$$

$$r = \frac{K_1 + K_2 + OG \cdot F}{\frac{B^2}{12 C_B T} - \frac{C_B T}{2} - OG} = 0.845$$

- Wave steepness s :

$$s = 0.041$$

- Logarithmic decrement of roll decay δ_ϕ :

$$C_M > 0.96$$

$$\delta_\phi = 0.267 + 0.668 \cdot 100 A_{BK} / (L \cdot B) = 0.535$$

- Roll amplitude φ :

$$\varphi = 4.43 \cdot r \cdot s / \delta_\phi^{0.5} = 0.209 \text{ rad}$$

- Lateral acceleration a :

$$h = 40.6 - (KG + T) / 2 = 23.357 \text{ m}$$

$$a = \varphi k_L (g + 4\pi^2 h / T_\phi^2) = 2.51 \text{ m/s}^2$$

$$R_{EAI} = 4.64 \text{ m/s}^2$$

Έτσι, ισχύει : $a < R_{EAI} \Rightarrow 2.51 < 4.64 \text{ m/s}^2$

Επομένως, αυτή η κατάσταση φόρτωσης δεν είναι ευπαθής σε υπερβολικές εγκάρσιες επιταχύνσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικειμενικός στόχος της εργασίας ήταν να παραχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο για το σύστημα πρόσδεσης με συρματόσχοινα (lashings) μιας στοιβας εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα του πλοίου, προκειμένου να υπολογιστούν οι φορτίσεις που αναπτύσσονται στα lashings λόγω της κίνησης διατοιχισμού. Αίτιο της κίνησης αυτής αποτελεί κυματισμός που προσπίπτει στο πλοίο. Ο διατοιχισμός θεωρήθηκε ως αποτέλεσμα αρχικά, μιας ημιτονειδούς διέγερσης (παράγραφος 6.1) και στη συνέχεια μέσω της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6 (παράγραφος 6.7). Από τα αποτελέσματα που παράχθηκαν (Κεφάλαιο 6) μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα :

1. Η εγκάρσια συνιστώσα της εξωτερικής δύναμης λόγω διατοιχισμού, όπως αυτή περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5, R_{RY} , δεν εξαρτάται από την εγκάρσια απόσταση των εμπορευματοκιβωτίων από το κέντρο περιστροφής του πλοίου, σε αντίθεση με την κατακόρυφη συνιστώσα R_{RZ} . Επιπλέον η R_{RY} υπολογίζεται μεγαλύτερη της δύναμης R_{RZ} , γεγονός που πιστοποιεί πως οι εγκάρσιες δυνάμεις διαδραματίζουν σπουδαιότερο ρόλο στην κίνηση διατοιχισμού από ότι οι κατακόρυφες.
2. Η δυσμενέστερη θέση στοιβασίας των εμπορευματοκιβωτίων είναι η Θέση 1, στην άκρη του καταστρώματος, επειδή είναι η πιο απομακρυσμένη θέση από το κέντρο περιστροφής του πλοίου. Εκεί παρατηρούνται οι υψηλότερες φορτίσεις των lashings.
3. Το μέγιστο πλάτος διέγερσης φ_0 σχετίζεται άμεσα με την ένταση των δυνάμεων πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων. Υποδιπλασιασμός του πλάτους διέγερσης οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση των δυνάμεων.
4. Οι δυνάμεις πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων μεταβάλλονται ανάλογα με τη μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας ω (άρα και της περιόδου διατοιχισμού). Όσο αυξάνεται η γωνιακή ταχύτητα (μείωση της περιόδου διατοιχισμού) τόσο αυξάνεται και το μέτρο των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα lashings.
5. Αύξηση του αριθμού των εμπορευματοκιβωτίων που στοιβάζονται στο κατάστρωμα του πλοίου προκαλεί αύξηση των δυνάμεων πρόσδεσης των αντίστοιχων συρματόσχοινων. Στην περίπτωση όπου τα εμπορευματοκιβώτια θεωρούνται ως μία μάζα, οι δυνάμεις των άνω συρματόσχοινων $F_{RL,2}$, αν και είναι μεγαλύτερες των δυνάμεων των κάτω συρματόσχοινων $F_{RL,1}$, δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές. Αυτό έγκειται στο ότι οι εξωτερικές δυνάμεις που δρουν στα εμπορευματοκιβώτια ως μία μάζα κατανέμονται σε όλα τα συρματόσχοινα της διάταξης. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση όπου τα εμπορευματοκιβώτια θεωρούνται ως δύο ξεχωριστές μάζες, το μέτρο των δυνάμεων $F_{RL,2}$ είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το μέτρο των δυνάμεων $F_{RL,1}$. Επίσης, οι δυνάμεις $F_{RL,1}$ αυξάνονται με σχετικά σταθερό ρυθμό με την αύξηση του αριθμού των containers, ενώ οι δυνάμεις $F_{RL,2}$ παρουσιάζουν εντονότερη αύξηση. Σε αυτό συμβάλλει και το γεγονός ότι

στις δυνάμεις $F_{RL,1}$ επιδρά θετικά το βάρος της δεύτερης μάζας εμπορευματοκιβωτίων περιορίζοντας με αυτό τον τρόπο την κίνηση του κάτω εμπορευματοκιβωτίου.

6. Αύξηση του συνολικού βάρους της στοίβας εμπορευματοκιβωτίων προκαλεί αύξηση των δυνάμεων που δέχεται η στοίβα λόγω της κίνησης διατοιχισμού, άρα και κλιμάκωση των φορτίσεων στα lashings.
7. Η δύναμη των lashings $F_{RL,1}$ που εχμάζουν το 1^ο εμπορευματοκιβώτιο της στοίβας είναι μεγαλύτερη όταν τα εμπορευματοκιβώτια θεωρούνται ως μία μάζα, μιας και αναλαμβάνουν να συγκρατήσουν ολόκληρη τη στοίβα των containers, ένα φορτίο πολύ μεγαλύτερης μάζας σε σχέση με όταν αυτά θεωρηθούν ως δύο ξεχωριστά σώματα-μάζες, όπου σε αυτή την περίπτωση συγκρατούν μόνο το 1^ο container. Η φόρτιση των lashings $F_{RL,2}$ είναι μεγαλύτερη όταν τα containers θεωρηθούν ως δύο μάζες. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περίπτωση των δύο μαζών, το κέντρο βάρους KG_{C2} είναι μεγαλύτερο από το KG_C της μία μάζας, γεγονός που συνεπάγεται υψηλότερη εγκάρσια επιτάχυνση άρα και εντονότερη φόρτιση.
8. Στην περίπτωση όπου η στοίβα βρίσκεται στην άκρη του καταστρώματος, εκτός από τις δυνάμεις διατοιχισμού, δέχεται και τη δύναμη του ανέμου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των φορτίσεων στα lashings, οδηγώντας αρκετές φορές στην τοποθέτηση ενός επιπλέον lashing (wind lashing) για να διασφαλιστεί η ακεραιότητα της στοίβας των εμπορευματοκιβωτίων.

Στο Κεφάλαιο 7 εφαρμόστηκε η *Ανεπτυγμένη Μέθοδος* βάσει CSS Code. Απλή και γρήγορη στην εφαρμογή της μέθοδος, αλλά με μία εντελώς διαφορετική θεώρηση σε σχέση με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5. Η μέθοδος αυτή δέχεται πως οι δυνάμεις στα lashings είναι σταθερές και ίσες με κάποιο ποσοστό του ορίου θραύσης του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένα. Η μέθοδος αυτή αφού θεωρήσει δεδομένες τις φορτίσεις στα lashings, ελέγχει την ισορροπία και διαπιστώνεται η επιτυχία της διάταξης εχμάσεως. Αντιθέτως, το μοντέλο του 5^{ου} Κεφαλαίου υπολογίζει τις δυνάμεις που θα παραλάβουν τα lashings έτσι ώστε να υπάρξει ισορροπία. Επιπλέον οι επιταχύνσεις που χρησιμοποιούνται στην *Ανεπτυγμένη Μέθοδο* οφείλονται σε όλες τις κινήσεις του πλοίου, ενώ στο μοντέλο που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5 προσομοιάζεται μονάχα η κίνηση του διατοιχισμού. Εξάγεται λοιπόν, πως οι δύο μέθοδοι εμφανίζουν μεταξύ τους διαφορές και τα αποτελέσματά τους δεν συμβαδίζουν αναγκαία μεταξύ τους.

Στο Κεφάλαιο 8 πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ευπάθειας του φορτίου ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων σε υπερβολικές εγκάρσιες επιταχύνσεις λόγω διατοιχισμού. Για ένα δεδομένο πλοίο και για μια συγκεκριμένη φόρτωση, εφαρμόστηκαν οι σχέσεις που περιγράφει η μέθοδος και διαπιστώθηκε ότι αυτή η κατάσταση φόρτωσης δεν είναι ευπαθής σε υπερβολικές εγκάρσιες επιταχύνσεις.

Εν κατακλείδι, από όλα τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτή η πολυπλοκότητα του μοντέλου που έχει αναπτυχθεί. Η κατασκευή του μοντέλου, παρόλο που λήφθηκαν παραδοχές και απλουστευμένες υποθέσεις ώστε να γίνει σαφές και ευκατανόητο, χαρακτηρίζεται από λεπτομέρεια και ακρίβεια. Σίγουρα όμως παρουσιάζει σημεία στα οποία διαφέρει σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες. Για αυτό το λόγο θα μπορούσε μελλοντικά να βελτιωθεί και να εμπλουτισθεί. Σε μια επικείμενη μελέτη θα μπορούσε να συμπεριληφθεί στο μοντέλο η επίδραση των κινήσεων heave και pitch, η επιρροή που θα είχαν στις δυνάμεις πρόσδεσης διαφορετικές διατάξεις έγχυσης των εμπορευματοκιβωτίων, καθώς και η επίδραση της γέφυρας πρόσδεσης (lashing bridge) στην κατανομή των φορτίσεων στα έχματα.

Τέλος, επειδή το θέμα της στοιβασίας και πρόσδεσης των εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα του πλοίου είναι ιδιαίτερα σημαντικό και η έρευνα στον τομέα αυτό περιορισμένη, ευελπιστείται η παρούσα εργασία να δώσει το έναυσμα για περαιτέρω διερεύνηση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] UNCTAD (2018), «50 years of Review of Maritime Transport 1968-2018».
- [2] Κ. Σπύρου (2017), «Μελέτη και Σχεδιασμός Πλοίου ΙΙ – Συλλογή Βοηθημάτων», ΕΜΠ – Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.
- [3] GDV (2005), «Container Handbook – Positioning and Securing of containers on board».
- [4] Ν. Α. Ζυγομαλά (2015), «Μεταφορά Φορτίων» – Β Έκδοση, Εκπαιδευτικό Κείμενο Ακαδημιών Εμπορικού Ναυτικού.
- [5] C. Bliault and North of England P&I Association (2007), «Cargo Stowage and Securing» – Second Edition.
- [6] ClassNK (2014), «Guidelines for Container Stowage and Securing Arrangements (2nd Edition)».
- [7] UK P&I CLUB (2004), «Loss Prevention – Issue 7».
- [8] Cushing R.C. (1969), «Protection and Securing of deck-stowed containers», Meeting of the New York Metropolitan Section of the Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [9] NNPC (2016), «A Master’s Guide to Container Securing».
- [10] GDV (2005), «Container Handbook – Lashing Materials Part I».
- [11] Katradis Marine Ropes Ind. S.A., «<https://www.katradis.com/wire-ropes/standard-wire-ropes>», (Προσπελάστηκε 22/05/2019).
- [12] Κ. Σπύρου (2015), «Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου» (ηλεκτρ. βιβλ.).
- [13] IMO (2018), «CSS Code – Annex 13».
- [14] Nakamura T., Susumo O., Nakajima Y. (2001), «Evaluation of expected maximum values of forces acting on containers and lashing rods on a container ship», SNAJ.
- [15] N. Themelis, K. J. Spyrou (2003), «Lashings of trailers on-board RO/RO ships under intensive rolling», 8th Intern. Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles.
- [16] P. Poulis, N. Themelis, K.J. Spyrou (2008), «Dynamics of lashed trailers on board ships under the combined effect of roll and pitch motions», Taylor & Francis Group, London.
- [17] Σ. Χ. Αντωνιάδης (2006), «Μελέτη του συστήματος έγχυσης εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα πλοίου υπό την επίδραση της κίνησης διατοιχισμού», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ.
- [18] R. Bhattacharyya (1978), «Dynamics of Marine Vehicles», Wiley, New York.
- [19] IMO (2018), «Finalization of Second Generation Intact Stability Criteria – Annex 3», Submitted by Japan.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ Α΄ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΦΟΡΤΩΣΗΣ

1 CONTAINER

<i>Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxaRRY (m/sec ²)	MaxaRRZ (m/sec ²)	MaxFL (kN)	MaxFR (kN)
0.52	139.468	34.126	5.600	1.365	75.568	75.568
0.26	72.231	17.279	2.889	0.691	37.784	37.784
0.13	36.302	8.557	1.452	0.342	18.892	18.892

<i>Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxaRRY (m/sec ²)	MaxaRRZ (m/sec ²)	MaxFL (kN)	MaxFR (kN)
0.52	139.468	19.395	5.600	0.776	74.681	74.681
0.26	72.133	9.702	2.885	0.388	37.341	37.341
0.13	36.247	4.783	1.450	0.191	18.670	18.670

<i>Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxaRRY (m/sec ²)	MaxaRRZ (m/sec ²)	MaxFL (kN)	MaxFR (kN)
0.52	139.468	9.174	5.579	0.141	73.529	73.529
0.26	71.853	1.435	2.874	0.057	36.765	36.765
0.13	36.198	0.758	1.448	0.030	18.382	18.382

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec²)	MaxARRZ (m/sec²)	MaxFL (kN)	MaxFR (kN)
0.65	151.625	57.154	6.065	2.286	88.333	88.333
0.50	139.468	34.126	5.600	1.365	75.568	75.568
0.35	130.490	16.571	5.220	0.663	65.126	65.126

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec²)	MaxARRZ (m/sec²)	MaxFL (kN)	MaxFR (kN)
0.65	151.625	31.925	6.065	1.277	87.303	87.303
0.50	139.468	19.395	5.600	0.776	74.681	74.681
0.35	130.490	9.256	5.220	0.370	64.366	64.366

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec²)	MaxARRZ (m/sec²)	MaxFL (kN)	MaxFR (kN)
0.65	151.625	15.478	6.065	0.169	85.954	85.954
0.50	139.468	9.174	5.579	0.141	73.529	73.529
0.35	130.490	4.488	5.220	0.180	63.371	63.371

* (Για το 1 εμπορευματοκιβώτιο, οι δυνάμεις στα lashings FL και FR αφορούν : οι μεν τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στα δύο αριστερά συρματόσχοινα και οι δε τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στα δύο δεξιά. Για την εύρεση της φόρτισης του κάθε lashing αρκεί να διαιρεθεί το αποτέλεσμα διά δύο.)

2 CONTAINERS (ως μία μάζα)

<i>Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec ²)	MaxARRZ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	246.157	58.169	5.725	1.353	51.247	52.272
0.26	126.723	29.084	2.947	0.676	25.624	26.136
0.13	63.823	14.542	1.484	0.338	12.812	13.068

<i>Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec ²)	MaxARRZ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	246.157	32.492	5.725	0.756	50.283	51.289
0.26	126.723	16.246	2.947	0.378	25.142	25.645
0.13	63.823	8.123	1.484	0.189	12.571	12.822

<i>Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec ²)	MaxARRZ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	246.157	19.011	5.725	0.442	49.337	50.324
0.26	126.723	4.753	2.947	0.111	24.669	25.162
0.13	63.823	1.188	1.484	0.028	12.335	12.581

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec²)	MaxARRZ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	271.382	98.305	6.311	2.286	60.748	61.963
0.50	246.157	58.169	5.725	1.353	51.247	52.272
0.35	227.512	28.503	5.291	0.663	43.349	44.216

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec²)	MaxARRZ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	271.382	54.911	6.311	1.277	59.605	60.797
0.50	246.157	32.492	5.725	0.756	50.283	51.289
0.35	227.512	15.921	5.291	0.370	42.534	43.385

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec²)	MaxARRZ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	271.382	32.127	6.311	0.747	58.484	59.654
0.50	246.157	19.011	5.725	0.442	49.337	50.324
0.35	227.512	9.315	5.291	0.217	41.734	42.569

** (Για 2, 3 και 5 εμπορευματοκιβώτια, οι δυνάμεις στα lashings FL1 και FR2 αφορούν : η πρώτη, τη δύναμη στο ένα από τα δύο (όμοια) αριστερά lashings, που δένονται στο 1^ο container και η δεύτερη στο ένα από τα δύο (όμοια) δεξιά lashings, που δένονται στο 2^ο container.)

2 CONTAINERS (ως δύο μάζες)

<i>Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY ₂ (kN)	MaxRRZ ₂ (kN)	MaxaRRY ₂ (m/sec ²)	MaxaRRZ ₂ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	106.126	24.349	5.896	1.353	38.447	60.139
0.26	54.589	12.175	3.033	0.676	19.224	30.069
0.13	27.488	6.087	1.527	0.338	9.612	15.035

<i>Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY ₂ (kN)	MaxRRZ ₂ (kN)	MaxaRRY ₂ (m/sec ²)	MaxaRRZ ₂ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	106.126	13.601	5.896	0.756	37.678	58.936
0.26	54.589	6.801	3.033	0.378	18.839	29.468
0.13	24.488	3.400	1.527	0.189	9.419	14.734

<i>Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY ₂ (kN)	MaxRRZ ₂ (kN)	MaxaRRY ₂ (m/sec ²)	MaxaRRZ ₂ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	106.126	9.561	5.896	0.531	36.924	57.757
0.26	54.589	2.390	3.033	0.133	18.462	28.878
0.13	27.489	0.598	1.527	0.033	9.231	14.439

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY₂ (kN)	MaxRRZ₂ (kN)	MaxaRRY₂ (m/sec²)	MaxaRRZ₂ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	118.813	41.151	6.601	2.286	45.575	71.289
0.50	106.126	24.349	5.896	1.353	38.447	60.139
0.35	96.749	11.931	5.375	0.663	32.522	50.871

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY₂ (kN)	MaxRRZ₂ (kN)	MaxaRRY₂ (m/sec²)	MaxaRRZ₂ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	118.813	22.986	6.601	1.277	44.664	69.863
0.50	106.126	13.601	5.896	0.756	37.678	58.936
0.35	96.749	6.665	5.375	0.370	31.871	49.853

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY₂ (kN)	MaxRRZ₂ (kN)	MaxaRRY₂ (m/sec²)	MaxaRRZ₂ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	118.813	16.158	6.601	0.898	43.770	68.465
0.50	106.126	9.561	5.896	0.531	36.924	57.757
0.35	96.749	4.685	5.375	0.261	31.234	48.856

3 CONTAINERS (ως μία μάζα)

<i>Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec ²)	MaxARRZ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	345.004	79.812	5.848	1.353	68.398	70.593
0.26	177.503	39.906	3.009	0.676	34.199	35.297
0.13	89.385	19.953	1.515	0.338	17.099	17.648

<i>Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec ²)	MaxARRZ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	345.004	44.582	5.848	0.756	67.112	69.266
0.26	177.503	22.291	3.009	0.378	33.556	34.633
0.13	89.385	11.146	1.515	0.189	16.778	17.316

<i>Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec ²)	MaxARRZ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	345.004	29.856	5.848	0.506	65.850	67.963
0.26	177.503	7.464	3.009	0.127	32.925	33.982
0.13	89.385	1.866	1.515	0.032	16.463	16.991

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec²)	MaxARRZ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	384.619	134.883	6.519	2.286	81.078	83.679
0.50	345.004	79.812	5.848	1.353	68.398	70.593
0.35	315.723	39.108	5.351	0.663	57.858	59.715

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec²)	MaxARRZ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	384.619	75.344	6.519	1.277	79.554	82.107
0.50	345.004	44.582	5.848	0.756	67.112	69.266
0.35	315.722	21.845	5.351	0.370	56.770	58.592

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec²)	MaxARRZ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	384.619	50.456	6.519	0.855	78.058	80.563
0.50	345.004	29.856	5.848	0.506	65.850	67.963
0.35	315.722	14.629	5.351	0.248	55.703	57.491

3 CONTAINERS (ως δύο μάζες)

<i>Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY ₂ (kN)	MaxRRZ ₂ (kN)	MaxaRRY ₂ (m/sec ²)	MaxaRRZ ₂ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	205.532	45.994	6.045	1.353	57.306	97.416
0.26	105.648	22.997	3.107	0.676	28.653	48.708
0.13	53.189	11.498	1.564	0.338	14.237	24.354

<i>Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY ₂ (kN)	MaxRRZ ₂ (kN)	MaxaRRY ₂ (m/sec ²)	MaxaRRZ ₂ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	205.532	25.691	6.045	0.756	56.160	95.468
0.26	105.648	12.846	3.107	0.378	28.080	47.734
0.13	53.189	6.423	1.564	0.189	14.041	23.867

<i>Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY ₂ (kN)	MaxRRZ ₂ (kN)	MaxaRRY ₂ (m/sec ²)	MaxaRRZ ₂ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	205.532	20.697	6.045	0.609	55.037	93.559
0.26	105.648	5.174	3.107	0.152	27.519	46.779
0.13	53.189	1.294	1.564	0.038	13.759	23.389

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY₂ (kN)	MaxRRZ₂ (kN)	MaxaRRY₂ (m/sec²)	MaxaRRZ₂ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	232.995	77.729	6.853	2.286	67.931	115.477
0.50	205.532	45.994	6.045	1.353	57.306	97.416
0.35	185.232	22.537	5.448	0.663	48.475	82.403

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY₂ (kN)	MaxRRZ₂ (kN)	MaxaRRY₂ (m/sec²)	MaxaRRZ₂ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	232.995	43.418	6.853	1.277	66.572	113.167
0.50	205.532	25.691	6.045	0.756	56.160	95.468
0.35	185.232	12.589	5.448	0.370	47.505	80.755

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY₂ (kN)	MaxRRZ₂ (kN)	MaxaRRY₂ (m/sec²)	MaxaRRZ₂ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	232.995	34.978	6.853	1.029	65.240	110.904
0.50	205.532	20.697	6.045	0.609	55.037	93.559
0.35	185.232	10.142	5.448	0.298	46.555	79.140

5 CONTAINERS (ως μία μάζα)

<i>Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec ²)	MaxARRZ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	465.078	104.162	6.040	1.353	104.294	108.393
0.26	239.066	52.081	3.105	0.676	52.147	54.196
0.13	120.359	26.041	1.563	0.338	26.074	27.098

<i>Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec ²)	MaxARRZ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	465.078	58.183	6.040	0.756	102.333	106.355
0.26	239.066	29.092	3.105	0.378	51.167	53.177
0.13	120.359	14.546	1.563	0.189	25.583	26.589

<i>Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec ²)	MaxARRZ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	465.078	46.670	6.040	0.606	100.409	104.355
0.26	239.066	11.667	3.105	0.152	50.205	52.178
0.13	120.359	2.917	1.563	0.038	25.102	26.089

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec²)	MaxARRZ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	527.004	176.034	6.844	2.286	123.629	128.488
0.50	465.078	104.162	6.040	1.353	104.294	108.393
0.35	419.305	51.039	5.446	0.663	88.222	91.689

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec²)	MaxARRZ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	527.005	98.330	6.844	1.277	121.305	126.072
0.50	465.078	58.183	6.040	0.756	102.333	106.355
0.35	419.305	28.510	5.446	0.370	86.563	89.965

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY (kN)	MaxRRZ (kN)	MaxARRY (m/sec²)	MaxARRZ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	527.005	78.872	6.844	1.024	119.024	123.702
0.50	465.075	46.670	6.040	0.606	100.409	104.355
0.35	419.305	22.868	5.446	0.297	84.936	88.274

5 CONTAINERS (ως δύο μάζες)

<i>Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY ₂ (kN)	MaxRRZ ₂ (kN)	MaxaRRY ₂ (m/sec ²)	MaxaRRZ ₂ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	325.605	70.344	6.262	1.353	74.394	114.648
0.26	167.210	35.172	3.216	0.676	37.197	57.324
0.13	84.163	17.586	1.619	0.338	18.599	28.662

<i>Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY ₂ (kN)	MaxRRZ ₂ (kN)	MaxaRRY ₂ (m/sec ²)	MaxaRRZ ₂ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	345.605	39.392	6.262	0.756	72.906	112.355
0.26	167.210	19.646	3.216	0.378	36.453	56.178
0.13	84.163	9.823	1.619	0.189	18.227	28.089

<i>Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$</i>						
φ_0 (rad)	MaxRRY ₂ (kN)	MaxRRZ ₂ (kN)	MaxaRRY ₂ (m/sec ²)	MaxaRRZ ₂ (m/sec ²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	325.605	37.511	6.262	0.721	71.448	110.108
0.26	167.210	9.378	3.216	0.180	35.724	55.054
0.13	84.163	2.344	1.619	0.045	17.862	27.527

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY₂ (kN)	MaxRRZ₂ (kN)	MaxaRRY₂ (m/sec²)	MaxaRRZ₂ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	375.379	118.881	7.219	2.286	88.187	135.904
0.50	325.605	70.344	6.262	1.353	74.394	114.648
0.35	288.815	34.468	5.554	0.663	62.929	96.979

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY₂ (kN)	MaxRRZ₂ (kN)	MaxaRRY₂ (m/sec²)	MaxaRRZ₂ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	375.379	66.404	7.219	1.277	86.423	133.186
0.50	325.605	39.292	6.262	0.756	72.906	112.355
0.35	288.816	19.253	5.554	0.370	61.670	95.039

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52$ rad						
ω (rad/s)	MaxRRY₂ (kN)	MaxRRZ₂ (kN)	MaxaRRY₂ (m/sec²)	MaxaRRZ₂ (m/sec²)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	375.379	63.394	7.219	1.219	84.695	130.522
0.50	325.605	37.511	6.262	0.721	71.448	110.108
0.35	288.815	18.380	5.554	0.353	60.437	93.138

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ Β' ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΦΟΡΤΩΣΗΣ

2 CONTAINERS (ως μία μάζα)

Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	53.297	54.363
0.26	26.649	27.182
0.13	13.324	13.591

Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	52.294	53.340
0.26	26.147	26.670
0.13	13.074	13.335

Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	51.310	52.336
0.26	25.655	26.168
0.13	12.828	13.084

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	63.178	64.441
0.50	53.297	54.363
0.35	45.083	45.985

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	61.989	63.229
0.50	52.294	53.340
0.35	44.234	45.119

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	60.822	62.039
0.50	51.310	52.336
0.35	43.402	44.270

2 CONTAINERS (ως δύο μάζες)

Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	39.601	61.943
0.26	19.801	30.972
0.13	9.901	15.486

Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	38.856	60.778
0.26	19.428	30.389
0.13	9.714	15.194

Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	38.125	59.635
0.26	19.063	29.817
0.13	9.531	14.909

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	46.943	73.427
0.50	39.601	61.943
0.35	33.498	52.396

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	46.059	72.045
0.50	38.856	60.778
0.35	32.868	51.411

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	45.193	70.691
0.50	38.125	59.635
0.35	32.249	50.444

3 CONTAINERS (ως μία μάζα)

Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	81.976	84.589
0.26	40.988	42.295
0.13	20.494	21.147

Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	80.435	82.999
0.26	40.218	41.501
0.13	20.109	20.750

Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	78.923	81.439
0.26	39.462	40.720
0.13	19.731	20.359

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	97.174	99.192
0.50	81.976	84.589
0.35	69.342	71.552

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	95.347	98.386
0.50	80.435	82.999
0.35	68.038	70.207

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	93.555	96.537
0.50	78.923	81.439
0.35	66.759	68.888

3 CONTAINERS (ως δύο μάζες)

Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	59.025	100.338
0.26	29.513	50.169
0.13	14.756	25.085

Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	57.915	98.452
0.26	28.958	49.226
0.13	14.479	24.613

Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	56.826	96.601
0.26	28.413	48.301
0.13	14.207	24.150

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	69.968	118.939
0.50	59.025	100.338
0.35	49.928	84.874

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	68.652	116.704
0.50	57.915	98.452
0.35	48.989	83.279

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	67.361	114.510
0.50	56.826	96.601
0.35	48.068	81.713

5 CONTAINERS (ως μία μάζα)

Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	143.359	148.970
0.26	71.680	74.485
0.13	35.839	37.243

Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	140.664	146.169
0.26	70.332	73.085
0.13	35.166	36.542

Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	138.019	143.421
0.26	69.010	71.711
0.13	34.505	35.855

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	169.936	176.588
0.50	143.359	148.970
0.35	121.265	126.011

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	166.742	173.267
0.50	140.664	146.169
0.35	118.985	123.641

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	163.606	170.010
0.50	138.019	143.421
0.35	116.748	121.317

5 CONTAINERS (ως δύο μάζες)

Θέση 1 (B/2) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	76.626	211.111
0.26	38.313	105.556
0.13	19.157	52.778

Θέση 2 (B/4) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	75.185	207.142
0.26	37.593	103.571
0.13	18.796	51.786

Θέση 3 (CL) & $\omega = 0.5 \text{ m/s}^2$		
φ_0 (rad)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.52	73.772	203.248
0.26	36.886	101.624
0.13	18.443	50.812

Θέση 1 (B/2) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	90.832	250.248
0.50	76.626	211.111
0.35	64.816	178.575

Θέση 2 (B/4) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	89.124	245.544
0.50	75.185	207.142
0.35	63.597	175.217

Θέση 3 (CL) & $\varphi_0 = 0.52 \text{ rad}$		
ω (rad/s)	MaxFL1 (kN)	MaxFR2 (kN)
0.65	87.449	240.928
0.50	73.772	203.248
0.35	62.402	171.923