



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
*ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΦΟΡΤΙΟΥ (CARGO LIQUEFACTION) ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ
ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΛΟΙΟΥ*



ΙΩΑΝΝΑ ΚΟΡΟΜΗΛΑ
Αρ. Μητρώου: 08107051

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΚΩΝ/ΝΟΣ ΣΠΥΡΟΥ

“Το ζήτημα είναι από πού βλέπει κανείς τον ουρανό.
Εγώ τον έχω δει από καταμεσής της θάλασσας.”
Οδυσσέας Ελύτης

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο “Πειραματική Διερεύνηση Ρευστοποίησης Φορτίου (Cargo Liquefaction) και Επιπτώσεις στην Ευστάθεια Πλοίου”, εκπονείται στα πλαίσια του Προπτυχιακού Προγράμματος σπουδών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εργασία αυτή αποτέλεσε μία δημιουργική διαδικασία μέσα από την οποία αποκόμισα σημαντικά εφόδια τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο.

Για την τόσο σημαντική αυτή εμπειρία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Σπύρου. Η άριστη συνεργασία που είχαμε, η συνεχής καθοδήγηση και πάνω από όλα η εμπιστοσύνη απέναντι στο πρόσωπο μου κατά τη διάρκεια της έρευνας υπήρξαν καταλυτικοί παράγοντες που με βοήθησαν να ανταπεξέλθω στις αυξημένες απαιτήσεις.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Χρήστο Σπανδωνίδα. Η ηθική και έμπρακτη υποστήριξη του καθ’ όλη τη διάρκεια του ερευνητικού μου έργου υπήρξε πολύτιμη και διασφάλισε την αρτιότητα αυτού. Δεν στάθηκε δίπλα μου ως ένας απλός συνεργάτης, αλλά και ως άνθρωπος που κατανοεί τις δυσκολίες και τις προκλήσεις που συνεπάγεται η εκπόνηση μιας διπλωματικής εργασίας.

Ένα ευχαριστώ θα ήθελα ακόμη να πω στο συμφοιτητή μου Νίκο Καλούμενο για τη σημαντική συμβολή του στην κατανόηση της λειτουργίας του μηχανήματος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Απόστολο και Μάρθα, τα αδέρφια μου, Μαρία, Σοφία και Παναγιώτη και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση καθ’ όλη τη διάρκεια της μέχρι τώρα πορείας μου. Ο καθένας ξεχωριστά μου έδωσε ώθηση να προχωρήσω και να φτάσω μέχρι εδώ.

Αθήνα, Μάιος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια αναλυτική έρευνα του φαινομένου της ρευστοποίησης φορτίου που μεταφέρεται χύδην σε πλοία ειδικού τύπου (bulk carriers), συνοδευόμενη από μία σειρά πειραμάτων. Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας των πειραμάτων και των εννοιών που εμπλέκονται σε αυτά, γίνεται μία πρώτη θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου στην οποία παρουσιάζονται η φύση και οι μορφές του φαινομένου, τα υλικά στα οποία ενδέχεται να εμφανιστεί, το κανονιστικό πλαίσιο για πρόληψη του φαινομένου καθώς και μελέτες που έχουν προηγηθεί. Μετά την εξοικείωση με τις θεωρητικές έννοιες ακολουθεί η παρουσίαση της ερευνητικής διαδικασίας μέσω της οποίας επιβεβαιώνονται τα όσα έχουν ήδη ειπωθεί θεωρητικά.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση των πειραμάτων είναι αυτή της κινούμενης τράπεζας έξι βαθμών ελευθερίας (Shaking Table) και τα υλικά που μελετώνται είναι η άμμος και ο ελαιοπυρήνας. Τα πειράματα που πραγματοποιούνται αφορούν δύο είδη κινήσεων (διατοιχισμός|roll, εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση|sway) σε ένα συγκεκριμένο και σταθερό εύρος συχνοτήτων και πλατών για την κάθε κίνηση.

Ένα από τα βασικά συμπεράσματα της έρευνας είναι ότι το φαινόμενο της ρευστοποίησης εμφανίζεται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε ένα από τα εξεταζόμενα υλικά και κατά συνέπεια προκαλεί διαφορετική συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, στην άμμο η υγρασία που περιέχεται σε αυτήν αναδύεται στην επιφάνεια σχηματίζοντας ένα στρώμα νερού το οποίο επιδρά ως ελεύθερη επιφάνεια. Αντίθετα, στην περίπτωση του ελαιοπυρήνα η υγρασία διαχέεται σε όλη την έκταση του υλικού και οδηγεί στην συνολική μετατόπιση του.

Ολοκληρώνοντας την παρούσα μελέτη και με σκοπό να ικανοποιήσουμε τον αρχικό μας σκοπό για την πλήρη κατανόηση του φαινομένου και των συνεπειών αυτού, με τη χρήση του προγράμματος AVEVA Marine πραγματοποιήσαμε μία σειρά φορτώσεων βαρέων και ελαφρών κοκκωδών υλικών σε ένα πλοίο μεταφοράς φορτίων χύδην και αναλύσαμε την ευστάθεια του πλοίου πριν και μετά τη ρευστοποίηση του εκάστοτε φορτίου. Βασικό συμπέρασμα από την ανάλυση της ευστάθειας του συγκεκριμένου πλοίου είναι ότι σε κάθε περίπτωση φόρτωσης η ομοιογενής φόρτωση των κυτών οδηγεί σε μεγάλη απώλεια ευστάθειας μετά τη ρευστοποίηση του μεταφερόμενου φορτίου και σε ορισμένες περιπτώσεις απώλεια του πλοίου, με αποτέλεσμα να είναι προτιμότερη η εναλλασσόμενη ή η ανομοιογενής φόρτωση. Με βάση τα συμπεράσματα της έρευνας δημιουργούνται επιπλέον ερωτήματα τα οποία χρήζουν μελλοντικής διερεύνησης.

ABSTRACT

The present study is a detailed investigation of the phenomenon of cargo liquefaction, based on a series of dedicated experiments. To better understand the implemented plan of experiments and the concepts behind them, a theoretical description of the phenomenon is given on the basis of a literature search. The nature of liquefaction and possible forms of its occurrence are described. Furthermore, typical materials in which it may be encountered are identified. The regulations framework for the prevention of the phenomenon is outlined.

The device used for the experiments is a shaking table with six degrees of freedom and the materials studied are sand and olive pomace. The experiments were conducted for two directions of cargo movement (roll, sway), for a specific range of frequencies and amplitudes of harmonic excitation.

One of the main conclusions of the current research is that the phenomenon of liquefaction occurs differently in each of the test materials and consequently causes different behavior. In particular, in sand some of the moisture content rises to the surface forming a layer of water which acts as a free surface. However, in olive pomace, the moisture diffuses throughout the material and results in overall movement.

To understand the consequences of the liquefaction phenomenon, the AVEVA Marine Program was used for identifying how the stability of a bulk carrier could deteriorate after liquefaction (with high and with low stowage factor). A key finding for ship stability is that, homogeneous loading of cargo leads to great loss of stability after the liquefaction of the cargo and in some cases total loss of the ship. It is preferable to have alternating or inhomogeneous loading. Based on the research findings, additional questions were generated that merit further investigation.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	8
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
Αντικειμενικός σκοπός.....	16
Περίγραμμα εργασίας.....	16
ΜΕΡΟΣ Ι: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	18
Κεφάλαιο 1_Ρευστοποίηση φορτίου.....	18
1.1 Η δομή των κοκκωδών υλικών	18
1.2 Ορισμός της ρευστοποίησης	19
1.3 Τρόπος εκδήλωσης του φαινομένου.....	20
1.4 Αλληλεπίδραση κύτους - πλοίου.....	22
Κεφάλαιο 2_Συνήθη ρευστοποιήσιμα υλικά.....	24
2.1 Μετάλλευμα Νικελίου	25
2.2 Σιδηρομετάλλευμα.....	28
2.3 Ελαιοπυρήνας.....	30
Κεφάλαιο 3_Ναυτικά ατυχήματα.....	34
Κεφάλαιο 4_Κανονιστικό Πλαίσιο	38
4.1 International Marine Solid Bulk Cargoes Code	38
4.2 International Convention for Safety of Life at Sea.....	43
4.3 Code of Practice for the Safe Loading and Unloading of Bulk Carriers	43
4.4 International Safety Management.....	43
4.5 Canadian Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes.....	44
4.6 Οδηγίες, Εγκύκλιοι και Ενημερωτικά δελτία	45
Κεφάλαιο 5_Κριτική ανασκόπηση εργασιών.....	48
5.1 Πειραματικές Μέθοδοι	48
5.2 Υπολογιστικές Μέθοδοι.....	51
5.3 Έρευνα ναυπηγικής κατεύθυνσης	53

ΜΕΡΟΣ ΙΙ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΣΩ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	56
Κεφάλαιο 6_Περιγραφή πειραμάτων	56
6.1 Πειραματική διάταξη	56
6.2 Εξεταζόμενα υλικά	58
6.2.1 Άμμος.....	59
6.2.2 Ελαιοπυρήνας	60
6.3 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας	61
6.4 Κλίμακα πραγματικού πλοίου.....	62
Κεφάλαιο 7_Αποτελέσματα πειραμάτων με χρήση άμμου.....	64
7.1 Διέγερση διατοιχισμού (Roll)	65
7.2 Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση (Sway).....	69
Κεφάλαιο 8_Αποτελέσματα πειραμάτων με χρήση ελαιοπυρήνα.....	80
8.1 Διέγερση διατοιχισμού (Roll)	80
8.2 Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση (Sway).....	82
8.3 Δοκιμές εύρεσης της γωνίας ανάπαυσης (Tilting tests)	84
Κεφάλαιο 9_Ανάλυση ευστάθειας.....	86
9.1 Μεταφορά βαρέων φορτίων.....	87
9.2 Μεταφορά ελαφρών φορτίων.....	91
Κεφάλαιο 10_Συμπεράσματα	100
10.1 Γενικά συμπεράσματα	100
10.2 Αντικείμενα για μελλοντική μελέτη	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	104
Ξένη Βιβλιογραφία.....	104
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	111
Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις.....	112
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	114
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	116
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	132

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1 Σχήματα κόκκων των κοκκωδών υλικών (Jian – Ping, 2011), (α) το υλικό έχει μικρότερη ικανότητα απορρόφησης του νερού, (β) το υλικό έχει περισσότερη ικανότητα απορρόφησης του νερού, (γ) το υλικό έχει ισχυρότερη ικανότητα απορρόφησης νερού
- Εικόνα 2 Πυκνότητα κόκκων των κοκκωδών υλικών (Terzaghi & Peck, 1948). (α) Μικρή πυκνότητα κόκκων. (β) Μεγάλη πυκνότητα κόκκων.
- Εικόνα 3 Ο μηχανισμός της ρευστοποίησης (Ahmed, 2012). Πριν την διέγερση υπάρχουν συσσωματώματα κόκκων που εμποδίζουν την εισροή υγρού εντός των μεταξύ τους κενών. Το υγρό συγκεντρώνεται στα κενά μεσοδιαστήματα. Η διέγερση της δεξαμενής έχει ως αποτέλεσμα την διάλυση των συσσωματωμάτων και την κάλυψη με υγρό των μεταξύ τους κενών διαστημάτων.
- Εικόνα 4 Εμφάνιση ελεύθερης επιφάνειας υγρού μετά την εμφάνιση του φαινομένου της ρευστοποίησης σε κύτος πλοίου. (Ahmed, 2012).
- Εικόνα 5 Ανάπτυξη εγκάρσιας κλίσης πλοίου μετά από ρευστοποίηση του φορτίου. (Russell, 2012).
- Εικόνα 6 (α) Τοποθεσία εξόρυξης μεταλλεύματος νικελίου, (β) Τοποθεσία αποθήκευσης μεταλλεύματος νικελίου, στην ύπαιθρο. (Lomas, 2012).
- Εικόνα 7 (α) Ξηρό μετάλλευμα του Νικελίου (article.wn.com), (β) Ρευστοποιημένο μετάλλευμα του Νικελίου, το πλοίο “Jag Rahul” το 2005 κατά την άφιξή του στο λιμάνι των Φιλιππίνων(Grant, 2008).
- Εικόνα 8 Σιδηρομετάλλευμα πριν και μετά την ρευστοποίηση (Jonas, 2010).
- Εικόνα 9 (α) Ξηρός ελαιοπυρήνας (www.greenfield.waw.pl), (β) Υγρός ελαιοπυρήνας (citywineryblog.com).
- Εικόνα 10 Διάγραμμα ροής των τριών διαφορετικών διαδικασιών παραγωγής ελαιόλαδου (α) Κλασική, (β) Τριών φάσεων (γ) Δύο φάσεων. (www.nea.gr/popular/docs1/tessera.pdf).
- Εικόνα 11 Χάρτης των πλοίων που ανατράπηκαν λόγω της ρευστοποίησης του φορτίου τους από το 2009 έως το 2011. (Class NK magazine 64th Edition).
- Εικόνα 12 Τυπική μέση τομή ειδικά κατασκευασμένου πλοίου που προορίζεται για τη μεταφορά μεταλλευμάτων, όπως έχει προταθεί από τον Ιαπωνικό Νηογνώμονα (NK Class). Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της μέσης τομής είναι η μικρή ελεύθερη επιφάνεια που δημιουργείται έπειτα από ρευστοποίηση του φορτίου, καθώς και η μικρή ποσότητα φορτίου που μετατοπίζεται σε περίπτωση μετατόπισης φορτίου. (Lomas, 2012).
- Εικόνα 13 Shaking Table.
- Εικόνα 14 Ενδεικτικές εικόνες, από την ανάλυση δείγματος της άμμου στο οπτικό μικροσκόπιο. (α) Γενική άποψη του υλικού. (β) Ο μεγαλύτερος κόκκος του εξεταζόμενου δείγματος. (γ) Ένα απολίθωμα οργανικής ύλης.

- Εικόνα 15 Ενδεικτικά φασματικά διαγράμματα τυχαίων κόκκων του εξεταζόμενου δείγματος άμμου.
- Εικόνα 16 Ενδεικτικό διάγραμμα από το matlab για την τιμή της γωνίας στην κίνηση roll.
- Εικόνα 17 Προετοιμασία πειραμάτων. (α) Ψήσιμο της άμμου. (β) Κοσκίνισμα. (γ) Ζύγισμα. (δ) Γέμισμα της δεξαμενής
- Εικόνα 18 Κίνηση roll για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 0%. (α) Η άμμος πριν τη διέγερση της δεξαμενής (β) Η άμμος μετά τη διέγερση της δεξαμενής
- Εικόνα 19 Κίνηση roll για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5%. (α) Η επιφάνεια της άμμου πριν τη διέγερση της δεξαμενής. Διακρίνεται εύκολα η λασπώδης μορφή της. (β) Η επιφάνεια της άμμου μετά τη διέγερση της δεξαμενής. Το νερό που έχει αποβληθεί από την άμμο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έχει συσσωρευτεί προς τα πίσω.
- Εικόνα 20 Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση roll, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% (α) $f=0.2\text{Hz}$, $A=20.2\text{deg}$. (β) $f=0.5\text{Hz}$, $A=13.2\text{deg}$. (γ) $f=2.6\text{Hz}$, $A=2.35\text{deg}$.
- Εικόνα 21 Κίνηση roll για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 30%. (α) Η επιφάνεια της άμμου πριν τη διέγερση της δεξαμενής. Διακρίνονται εύκολα η λίμνη νερού που έχει δημιουργηθεί στην επιφάνεια της άμμου. (β) Η επιφάνεια της άμμου μετά τη διέγερση της δεξαμενής. Το νερό που έχει αποβληθεί από την άμμο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έχει καλύψει ολόκληρη την επιφάνειά της.
- Εικόνα 22 Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση roll, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 30%. (α) $f=0.1\text{Hz}$, $A=22.2\text{deg}$. (β) $f=0.4\text{Hz}$, $A=15.4\text{deg}$. (γ) $f=0.7\text{Hz}$, $A=9.95\text{deg}$. (δ) $f=0.9\text{Hz}$, $A=8.10\text{deg}$. (ε) $f=1.6\text{Hz}$, $A=4.65\text{deg}$. (στ) $f=1.9\text{Hz}$, $A=3.91\text{deg}$. (ζ) $f=2.5\text{Hz}$, $A=2.37\text{deg}$. (η) $f=2.9\text{Hz}$, $A=2.15\text{deg}$.
- Εικόνα 23 Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση roll, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) $f=0.1\text{Hz}$, $A=22.2\text{deg}$. (β) $f=0.6\text{Hz}$, $A=11.5\text{deg}$. (γ) $f=0.8\text{Hz}$, $A=9.05\text{deg}$. (δ) $f=1.0\text{Hz}$, $A=23\text{deg}$. (ε) $f=1.8\text{Hz}$, $A=4.14\text{deg}$. (στ) $f=2.5\text{Hz}$, $A=2.37\text{deg}$.
- Εικόνα 24 Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση roll, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 40%. (α) $f=0.1\text{Hz}$, $A=22.2\text{deg}$. (β) $f=0.5\text{Hz}$, $A=13.2\text{deg}$. (γ) $f=0.8\text{Hz}$, $A=9.05\text{deg}$. (δ) $f=1.2\text{Hz}$, $A=6.33\text{deg}$. (ε) $f=1.9\text{Hz}$, $A=3.91\text{deg}$. (στ) $f=2.5\text{Hz}$, $A=2.37\text{deg}$.
- Εικόνα 25 Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5%. (α) Η επιφάνεια της άμμου πριν τη διέγερση της δεξαμενής. Διακρίνεται εύκολα η λασπώδης μορφή της. (β) Η επιφάνεια της άμμου μετά τη διέγερση της δεξαμενής. Το νερό που έχει αποβληθεί από την άμμο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έχει συσσωρευτεί στη δεξιά πλευρά της δεξαμενής
- Εικόνα 26 Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5%. Κατανομή της άμμου και του νερού μετά το πέρας των πειραμάτων.
- Εικόνα 27 Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% και διέγερση 5min. Η επιφάνεια της άμμου πριν (α) και μετά (β) τη διέγερσης σε συχνότητα 0.6Hz και πλάτος 0.2cm.
- Εικόνα 28 Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% και διέγερση 5min. Η επιφάνεια της άμμου πριν (α) και μετά (β) τη διέγερσης σε συχνότητα 0.6Hz και πλάτος 9.2cm.

- Εικόνα 29 Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% και διέγερση 5min. Η επιφάνεια της άμμου πριν (α) και μετά (β) τη διέγερσης σε συχνότητα 0.8Hz και πλάτος 6.5cm.
- Εικόνα 30 Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% και διέγερση 5min. Η επιφάνεια της άμμου πριν (α) και μετά (β) τη διέγερσης σε συχνότητα 1.0Hz και πλάτος 5.8cm.
- Εικόνα 31 Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% και διέγερση 5min. Η επιφάνεια της άμμου πριν (α) και μετά (β) τη διέγερσης σε συχνότητα 1.2Hz και πλάτος 4.6cm.
- Εικόνα 32 Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% και διέγερση 5min. Η επιφάνεια της άμμου πριν (α) και μετά (β) τη διέγερσης σε συχνότητα 1.4Hz και πλάτος 4.2cm.
- Εικόνα 33 Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 30% (α) Η επιφάνεια της άμμου πριν τη διέγερση της δεξαμενής. Διακρίνονται εύκολα οι λίμνες νερού που έχουν δημιουργηθεί στην επιφάνεια της άμμου. (β) Η επιφάνεια της άμμου μετά τη διέγερση της δεξαμενής. Το νερό που έχει αποβληθεί από την άμμο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έχει καλύψει ολόκληρη την επιφάνειά της.
- Εικόνα 34 Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση sway, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 30%. (α) $f=0.6\text{Hz}$, $A=10\text{cm}$. (β) $f=0.6\text{Hz}$, $A=17\text{cm}$. (γ) $f=0.8\text{Hz}$, $A=1.1\text{cm}$. (δ) $f=1.6\text{Hz}$, $A=2.8\text{cm}$. (ε) $f=2.2\text{Hz}$, $A=0.9\text{cm}$. (στ) $f=2.4\text{Hz}$, $A=3.2\text{cm}$.
- Εικόνα 35 Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) Η επιφάνεια της άμμου πριν τη διέγερση της δεξαμενής. (β) Η επιφάνεια της άμμου μετά τη διέγερση της δεξαμενής. Είναι εμφανής η αύξηση της ποσότητας του νερού.
- Εικόνα 36 Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση sway, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) $f=2.0\text{Hz}$, $A=0.6\text{cm}$. (β) $f=2.6\text{Hz}$, $A=0.8\text{cm}$. (γ) $f=1.2\text{Hz}$, $A=4.6\text{cm}$. (δ) $f=1.4\text{Hz}$, $A=2.8\text{cm}$. (ε) $f=1.4\text{Hz}$, $A=7.9\text{cm}$. (στ) $f=1.8\text{Hz}$, $A=4.6\text{cm}$. (ζ) $f=0.6\text{Hz}$, $A=13.9\text{cm}$. (η) $f=0.8\text{Hz}$, $A=14.7\text{cm}$. (θ) $f=1.0\text{Hz}$, $A=10\text{cm}$
- Εικόνα 37 Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση sway, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 40%. (α) $f=0.6\text{Hz}$, $A=16.5\text{cm}$. (β) $f=0.8\text{Hz}$, $A=14.7\text{cm}$. (γ) $f=1.0\text{Hz}$, $A=7.1\text{cm}$. (δ) $f=1.0\text{Hz}$, $A=10\text{cm}$. (ε) $f=1.2\text{Hz}$, $A=9.3\text{cm}$. (στ) $f=1.4\text{Hz}$, $A=3.5\text{cm}$. (ζ) $f=1.4\text{Hz}$, $A=4.3\text{cm}$. (η) $f=1.8\text{Hz}$, $A=6.2\text{cm}$. (θ) $f=2.4\text{Hz}$, $A=0.73\text{cm}$. (ι) $f=2.6\text{Hz}$, $A=0.84\text{cm}$. (κ) $f=3.0\text{Hz}$, $A=0.45\text{cm}$. (λ) $f=3.0\text{Hz}$, $A=1.2\text{cm}$.
- Εικόνα 38 Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 30%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=1.2\text{Hz}$, $A=3.6\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=1.2\text{Hz}$, $A=3.6\text{cm}$.
- Εικόνα 39 Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 30%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=0.8\text{Hz}$, $A=11.1\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=0.8\text{Hz}$, $A=11.1\text{cm}$.
- Εικόνα 40 Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 30%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=0.8\text{Hz}$, $A=5.6\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=0.8\text{Hz}$, $A=5.6\text{cm}$.
- Εικόνα 41 Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=0.8\text{Hz}$, $A=8.4\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές

αρχικές συνθήκες για $f=0.8\text{Hz}$, $A=8.4\text{cm}$.

- Εικόνα 42 Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=1.0\text{Hz}$, $A=4.6\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=1.0\text{Hz}$, $A=4.6\text{cm}$.
- Εικόνα 43 Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=1.2\text{Hz}$, $A=8.2\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=1.2\text{Hz}$, $A=8.2\text{cm}$.
- Εικόνα 44 Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=1.4\text{Hz}$, $A=6.9\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=1.4\text{Hz}$, $A=6.9\text{cm}$.
- Εικόνα 45 Κίνηση roll για τον ξηρό ελαιοπυρήνα. (α) Πριν τη διέγερση της δεξαμενής (β) Μετά τη διέγερση της δεξαμενής.
- Εικόνα 46 Κίνηση roll για τον Ελαιοπυρήνα με υγρασία. (α) Πριν τη διέγερση της δεξαμενής (β) Μετά τη διέγερση της δεξαμενής.
- Εικόνα 47 Διαμόρφωση των κηλίδων υγρασίας στο δείγμα του υγρού ελαιοπυρήνα, πριν (α) και μετά (β) τη διέγερση της δεξαμενής στην κίνηση roll.
- Εικόνα 48 Στιγμιότυπα από τη διέγερση στην κίνηση roll του υγρού ελαιοπυρήνα. (α) $f=0.2\text{Hz}$, $A=22.2\text{deg}$. (β) $f=1.6\text{Hz}$, $A=4.64\text{deg}$. (γ) $f=2.4\text{Hz}$, $A=2.46\text{deg}$.
- Εικόνα 49 Κίνηση sway για τον ελαιοπυρήνα με υγρασία. (α) Πριν τη διέγερση της δεξαμενής (β) Μετά τη διέγερση της δεξαμενής.
- Εικόνα 50 Κίνηση sway για τον υγρό ελαιοπυρήνα. (α) Πριν τη διέγερση της δεξαμενής (β) Μετά τη διέγερση της δεξαμενής.
- Εικόνα 51 Στιγμιότυπα από τη διέγερση στην κίνηση sway του υγρού ελαιοπυρήνα. (α) $f=0.8\text{Hz}$, $A=14.7\text{cm}$. (β) $f=1.0\text{Hz}$, $A=2.2\text{cm}$. (γ) $f=1.0\text{Hz}$, $A=10.6\text{cm}$. (δ) $f=1.0\text{Hz}$, $A=10\text{cm}$. (ε) $f=1.2\text{Hz}$, $A=9.3\text{cm}$. (στ) $f=1.4\text{Hz}$, $A=4.8\text{cm}$. (ζ) $f=1.4\text{Hz}$, $A=7.9\text{cm}$. (η) $f=1.6\text{Hz}$, $A=0.43\text{cm}$. (θ) $f=1.8\text{Hz}$, $A=5.5\text{cm}$. (ι) $f=1.8\text{Hz}$, $A=6.2\text{cm}$. (κ) $f=2.2\text{Hz}$, $A=4.3\text{cm}$. (λ) 2.4Hz , $A=2.7\text{cm}$.
- Εικόνα 52 Δοκιμή για την μέτρηση της γωνίας ανάπαυσης του υγρού ελαιοπυρήνα (α) Με μηδενικές αρχικές συνθήκες. (β) Με αρχικές συνθήκες.
- Εικόνα 53 Ομοιογενής φόρτωση κυτών.
- Εικόνα 54 Εναλλασσόμενη φόρτωση κυτών.
- Εικόνα 55 Μερική φόρτωση πλοίου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικειμενικός σκοπός

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην πορεία της εκμεταλλεύσιμης ζωής ενός πλοίου είναι η απώλεια της ευστάθειάς του. Ειδικότερα στην περίπτωση των πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίων, λόγω του μεγάλου αριθμού ατυχημάτων που οφείλονται στο φαινόμενο της ρευστοποίησης απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή τόσο κατά τη διάρκεια της φόρτωσης όσο και κατά τη μεταφορά του φορτίου. Αντικειμενικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση της δυναμικής συμπεριφοράς διάφορων ειδών χύδην φορτίου εντός διεγερόμενης δεξαμενής, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η φύση του φαινομένου. Στόχος της εργασίας είναι ο υπολογισμός κρίσιμων τιμών διαφόρων παραμέτρων (πλάτος, συχνότητα και χρόνος διέγερσης, επίπεδα υγρασίας κ.α.) που μπορεί να οδηγήσουν στη ρευστοποίηση του φορτίου, η ανάλυση του τρόπου εκδήλωσης του φαινομένου καθώς επίσης και η διερεύνηση των επιπτώσεων αυτής στη συνολική κίνηση του πλοίου.

Περίγραμμα εργασίας

Με σκοπό την όσο το δυνατό πληρέστερη θεωρητική προσέγγιση του θέματος και την εν συνεχεία αποτελεσματικότερη παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων η παρούσα διπλωματική εργασία διαιρείται σε δύο μέρη, το θεωρητικό και το πειραματικό. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη περιγραφή των κεφαλαίων που περιέχονται σε κάθε μέρος.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας (θεωρητικό) γίνεται η θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου. Η δομή του μέρους επιλέχθηκε έτσι ώστε να απαντώνται τα πέντε βασικότερα ερωτήματα γύρω από το φαινόμενο της ρευστοποίησης: Τι είναι το φαινόμενο; γιατί πρέπει να ασχοληθεί η ερευνητική κοινότητα με αυτό; ποιοί είναι οι βασικότεροι τρόποι προσέγγισης του φαινομένου; πως μπορεί να γίνει η προσέγγιση στην φύση του φαινομένου; ποιοί είναι οι βασικότεροι περιορισμοί που υπεισέρχονται κατά την ανάλυση της ρευστοποίησης; Συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στο φαινόμενο της ρευστοποίησης. Δίνεται ο ορισμός του και διευκρινίζεται το πότε, με ποιον τρόπο και υπό ποιές συνθήκες εμφανίζεται το φαινόμενο αυτό. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται η φύση και οι ιδιότητες των υλικών που μπορεί να ρευστοποιηθούν, ενώ στο τρίτο γίνεται μία επεξήγηση της σημαντικότητας του φαινομένου και αναφέρεται μία σειρά από ατυχήματα που έχουν αποδοθεί στο φαινόμενο της ρευστοποίησης. Στη συνέχεια, στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται διάφοροι διεθνείς και εθνικοί κώδικες, με τους οποίους θα πρέπει να συμμορφώνονται οι πλοίαρχοι κατά τη φόρτωση, μεταφορά και εκφόρτωση τέτοιων

φορτίων. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται μία αναφορά στις διάφορες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς, με αντικείμενο την ρευστοποίηση.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται η πειραματική ανάλυση του φαινομένου της ρευστοποίησης. Αναλυτικότερα, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στην πειραματική διάταξη και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς αναλύεται και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Στα επόμενα κεφάλαια, επτά και οκτώ, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για κάθε ένα από εξεταζόμενα υλικά, την άμμο και τον ελαιοπυρήνα αντίστοιχα. Στη συνέχεια ακολουθεί το κεφάλαιο εννέα, το οποίο αναφέρεται στην ανάλυση της ευστάθειας πλοίου που μεταφέρει φορτίο το οποίο ενδέχεται να ρευστοποιηθεί και παρατίθεται μία σειρά από συγκριτικά διαγράμματα για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις φόρτωσης. Ολοκληρώνοντας τη μελέτη μας, στο κεφάλαιο δέκα παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η έρευνα και προτείνονται αντικείμενα για μελλοντική έρευνα.

ΜΕΡΟΣ Ι: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

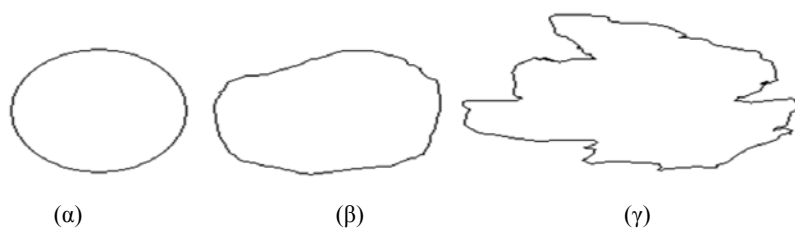
Κεφάλαιο 1

Ρευστοποίηση φορτίου

Αν και το άκουσμα της λέξης “ρευστοποίηση” δίνει την εντύπωση ότι αφορά μόνο φορτία που περιέχουν υψηλά ποσοστά υγρασίας, σύμφωνα με την Intercargo (annual review, 2011), οποιοδήποτε φορτίο το οποίο μεταφέρεται σε κοκκώδη μορφή και περιέχει κάποιο ποσοστό υγρασίας, μπορεί να ρευστοποιηθεί, οδηγώντας σε ανεξέλεγκτες καταστάσεις για το πλοίο και το ίδιο το πλήρωμα. Κοινό σημείο όλων των αναφορών ατυχημάτων (π.χ. Vinalines Queen 2011), τα οποία σχετίζονται με τη ρευστοποίηση φορτίου, είναι οι ακαριαίες συνέπειες, δηλαδή κατόπιν εμφάνισης του φαινομένου το πλοίο χάνει την ευστάθειά του και ανατρέπεται μέσα σε λίγα μόλις λεπτά. Έτσι, γίνεται φανερό ότι είναι επιτακτική η ανάγκη κατανόησης αυτού του επικίνδυνου φαινομένου και μέριμνας για τον περιορισμό των συνεπειών του. Πριν προχωρήσουμε όμως στην περιγραφή της ρευστοποίησης, κρίνουμε σκόπιμη μια σύντομη αναφορά στη δομή των κοκκωδών υλικών, έτσι ώστε να γίνουν ευκολότερα κατανοητά στη συνέχεια τα αίτια εμφάνισης του φαινομένου.

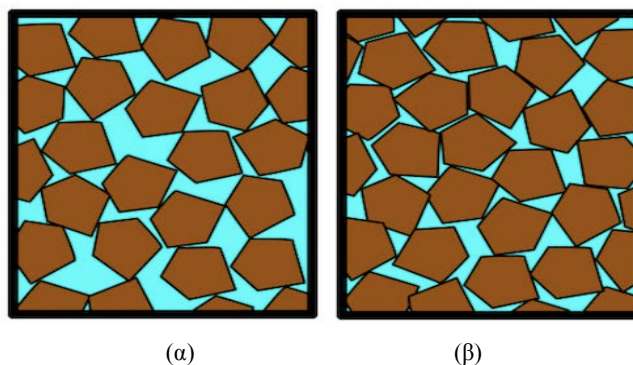
1.1 Η δομή των κοκκωδών υλικών

Αν θέλαμε να δώσουμε έναν ορισμό για το τι ακριβώς είναι κοκκώδες υλικό θα λέγαμε ότι αυτό είναι μια μεγάλη συλλογή μακροσκοπικών σωματιδίων η οποία χαρακτηρίζεται από απώλεια ενέργειας όταν τα σωματίδια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (Brown & Richards, 1970). Οι ιδιότητες ενός κοκκώδους υλικού προσδιορίζονται από το μέγεθος των κόκκων, την κατανομή των μεγεθών, την κατανομή, την επιφάνεια και την ομαλότητα της επιφάνειας των κόκκων και το βάρος ή την πυκνότητα του υλικού ανά μονάδα. Στην εικόνα 1 παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές μορφές κόκκων, ανάλογα με την ικανότητά τους σε απορρόφηση νερού.



Εικόνα 1. Σχήματα κόκκων των κοκκωδών υλικών (Jian – Ping, 2011), (α) το υλικό έχει μικρότερη ικανότητα απορρόφησης του νερού, (β) το υλικό έχει περισσότερη ικανότητα απορρόφησης του νερού, (γ) το υλικό έχει ισχυρότερη ικανότητα απορρόφησης νερού.

Η ποικιλομορφία σε μέγεθος και σχήμα των σωματιδίων κάθε κοκκώδους υλικού έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη κενών μεταξύ τους, σε αυτά οφείλεται και η ύπαρξη ενός κρίσιμου λόγου κενών - κόκκων, ο οποίος καθορίζει την συμπεριφορά του όταν αυτό διαταράσσεται. Συγκεκριμένα, όταν ο λόγος κενών - κόκκων ενός υλικού είναι μεγαλύτερος από τον κρίσιμο λόγο, τότε τα σωματίδια τείνουν να πλησιάσουν μεταξύ τους, ενώ όταν είναι μικρότερος τείνουν να απομακρυνθούν (Terzaghi & Peck, 1948). Από την αναλογία κενών - κόκκων χαρακτηρίζεται επίσης και η πυκνότητα του υλικού. Όταν διαταράσσεται ένα υλικό το οποίο έχει μικρή πυκνότητα (δηλαδή ο λόγος κενών/κόκκων είναι μεγάλος) και είναι κορεσμένο (δηλαδή τα κενά που υπάρχουν μεταξύ των σωματιδίων είναι γεμάτα με νερό), τα σωματίδια από τα οποία αποτελείται τείνουν να πλησιάσουν μεταξύ τους και να απομακρύνουν το νερό από τα κενά. Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται μία σύγκριση υλικού με μικρή και μεγάλη πυκνότητα σε κόκκους.



Εικόνα 2. Πυκνότητα κόκκων των κοκκωδών υλικών (Terzaghi & Peck, 1948). (α) Μικρή πυκνότητα κόκκων. (β) Μεγάλη πυκνότητα κόκκων.

Εάν η διαταραχή είναι μικρής έντασης ή εφαρμόζεται με αργό ρυθμό, το νερό καθώς απομακρύνεται από τα κενά προλαβαίνει να εξατμιστεί και έτσι τα σωματίδια πλησιάζουν το ένα το άλλο χωρίς την εμφάνιση ρευστοποίησης. Αντιθέτως, όταν η διαταραχή είναι ισχυρή, ταχύτερη και επανειλημμένη, το νερό δεν προλαβαίνει να εξατμιστεί και έτσι αυξάνεται η πίεση των πόρων με αποτέλεσμα την εμφάνιση της ρευστοποίησης.

1.2 Ορισμός της ρευστοποίησης

Από την έρευνα που διεξήγαμε πάνω στο θέμα της ρευστοποίησης¹ συμπεράναμε ότι είναι σχεδόν αδύνατο να βρεθεί ένας ορισμός ο οποίος να καλύπτει το φαινόμενο σε όλη του την έκταση. Η δυσκολία στην διατύπωση ενός “γενικευμένου” ορισμού έγκειται κυρίως στην

¹ Στους ναυτικούς κύκλους έχει επικρατήσει ο όρος υγροποίηση, παρόλα αυτά αν θέλαμε να δώσουμε έναν πιο δόκιμο όρο θα λέγαμε ρευστοποίηση, αφού το υλικό δεν μετατρέπεται σε υγρό αλλά συμπεριφέρεται σαν υγρό (ρευστό).

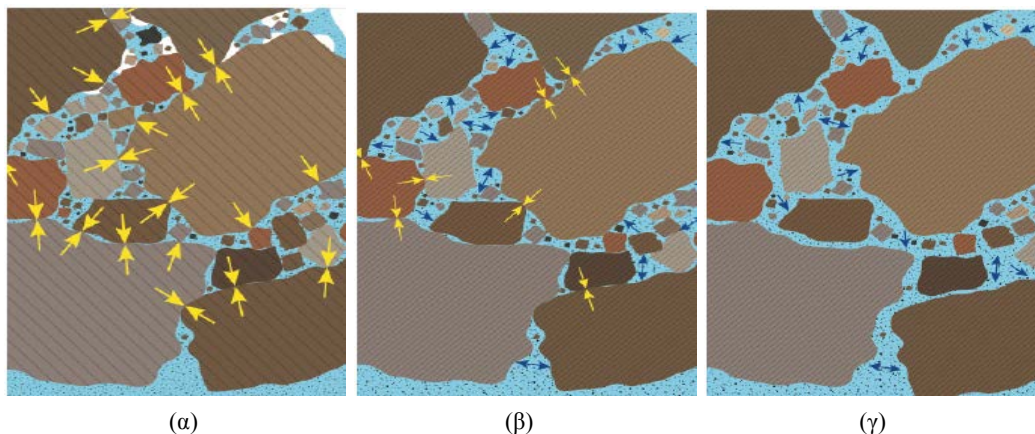
διαφορετική οπτική κάτω από την οποία εξετάζεται κάθε φορά το (ίδιο) φαινόμενο. Ο πιο κοινά αποδεκτός ορισμός είναι αυτός που δόθηκε από την Αμερικάνικη Ένωση Δοκιμών και Υλικών (American Society for Tests and Materials) το 1997, σύμφωνα με την οποία *“Ρευστοποίηση (spontaneous liquefaction) είναι η ξαφνική μείωση της διατμητικής αντοχής ενός συνεκτικού εδάφους. Προκαλείται από την κατάρρευση της δομής λόγω κρούσης ή άλλου τύπου καταπόνησης, και συνδέεται με μία ξαφνική αλλά προσωρινή αύξηση της πίεσης των κόκκων. Πρόκειται για μία προσωρινή μετατροπή του υλικού σε ρευστή μάζα”*. Παρά το γεγονός ότι, η Γεωμηχανική και η Εδαφομηχανική είναι οι επιστήμες που ασχολούνται μέχρι στιγμής σχεδόν αποκλειστικά με το φαινόμενο και ο ορισμός έχει να κάνει με τη δική τους οπτική θεώρηση, θα μπορούσε να γίνει αποδεκτός και από τη Ναυπηγική επιστήμη.

1.3 Τρόπος εκδήλωσης του φαινομένου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το φαινόμενο της ρευστοποίησης εμφανίζεται σε χύδην φορτία τα οποία εμφανίζουν ποσοστό υγρασίας. Έτσι, τη στιγμή της φόρτωσης, το φορτίο βρίσκεται σε “υγρή” κοκκώδη κατάσταση και μοιάζει με υγρή άμμο (σε περίπτωση μεγάλου ποσοστού υγρασίας μοιάζει με λάσπη). Σε αυτήν την κατάσταση, τα σωματίδια από τα οποία αποτελείται το υλικό, βρίσκονται σε άμεση επαφή μεταξύ τους δημιουργώντας έναν πυρήνα που το κρατάει στην στερεή κατάσταση λόγω της τριβής που δημιουργείται μεταξύ της επιφάνειάς τους. Τα κενά που υπάρχουν ανάμεσα στα σωματίδια καταλαμβάνονται, μερικώς, από αέρα και νερό. Όσο πιο υγρό είναι το φορτίο, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του όγκου του νερού που βρίσκεται μεταξύ των σωματιδίων, σε σχέση με τον όγκο του αέρα.

Κατά τη μεταφορά του φορτίου, αυτό εκτίθεται σε κραδασμούς και διάφορες κινήσεις, λόγω των κυμάτων ή της κίνησης του πλοίου, με αποτέλεσμα τη σταδιακή διευθέτηση και συμπίεση του. Αυτή είναι μια τάση των κόκκων να διευθετηθούν στην άριστη πυκνότητα. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει με το κουτί των δημητριακών, αυτά κατά τη μεταφορά τους διευθετούνται έτσι ώστε, όταν τα ανοίγει ο καταναλωτής να έχει μείνει μόνο το ένα τρίτο του όγκου τους στο πακέτο (Jonas, 2012). Αποτέλεσμα αυτής της διευθέτησης και σταδιακής συμπίεσης του φορτίου είναι να μειωθεί ο όγκος του και να αυξηθεί η πυκνότητά του. Έτσι, τα κενά μεταξύ των σωματιδίων γίνονται μικρότερα και μειώνεται ο διαθέσιμος όγκος για τον αέρα και το νερό. Το νερό, σε αντίθεση με τον αέρα που μπορεί να συμπιεσθεί και επομένως κατά τη συμπίεση του φορτίου να αποβληθεί από αυτό, είναι ασυμπίεστο. Για τον λόγο αυτό, εάν ο όγκος του νερού είναι μικρότερος από τον ενδιάμεσο όγκο στη μέγιστη πυκνότητα, ο αέρας θα αποβληθεί από το φορτίο και αυτό δεν θα ρευστοποιηθεί. Αυτό σημαίνει ότι η περιεκτικότητα του φορτίου σε υγρασία είναι τόσο χαμηλή, που δεν μπορεί να ρευστοποιηθεί. Αντίθετα, εάν ο όγκος του νερού είναι τέτοιος ώστε ο αέρας να αποβάλλεται από το φορτίο πριν από τη μέγιστη πυκνότητα, τότε η περαιτέρω συμπίεση του φορτίου θα

οδηγήσει σε ξαφνική, ραγδαία αύξηση της πίεσης, λόγω του ότι το νερό που υπάρχει στο φορτίο πιέζει τα διάκενα μεταξύ των σωματιδίων με αποτέλεσμα αυτά να απομακρύνονται το ένα από το άλλο. Έτσι, η εσωτερική τριβή μειώνεται όσο τα σωματίδια απομακρύνονται, και τότε είτε το φορτίο μετατρέπεται σε ένα παχύρευστο υγρό, δηλαδή ρευστοποιείται, είτε το νερό που περιέχεται σε αυτό ανέρχεται στην επιφάνεια του και δημιουργείται ελεύθερη επιφάνεια. Ωστόσο, εάν το φορτίο είναι αρκετά ξηρό, η ρευστοποίηση δε θα συμβεί ποτέ, ανεξαρτήτως του βαθμού μηχανικής καταπόνησης και της συμπίεσης κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται σχηματικά ο μηχανισμός της ρευστοποίησης.



Εικόνα 3. Ο μηχανισμός της ρευστοποίησης (Ahmed, 2012). Πριν την διέγερση υπάρχουν συσσωματώματα κόκκων που εμποδίζουν την εισροή υγρού εντός των μεταξύ τους κενών. Το υγρό συγκεντρώνεται στα κενά μεσοδιαστήματα. Η διέγερση της δεξαμενής έχει ως αποτέλεσμα την διάλυση των συσσωματωμάτων και την κάλυψη με υγρό των μεταξύ τους κενών διαστημάτων.

Πέρα όμως από τους παραπάνω αναφερθέντες τρόπους εκδήλωσης του φαινομένου έχει παρατηρηθεί μια ακόμη πιο σπάνια και συνάμα πιο επικίνδυνη μορφή ρευστοποίησης, ο σχηματισμός της υγρής βάσης (Wet Base). Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τον κώδικα IMSBC, υπάρχει η πιθανότητα κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού η υγρασία που περιέχεται στο φορτίο να μεταφερθεί προς τα κατώτερα επίπεδα του φορτίου, με αποτέλεσμα η επιφάνειά του να παραμένει ξηρή, ενώ στη βάση του φορτίου η υγρασία να έχει ξεπεράσει το σημείο ροής υγρασίας (FMP), που σημαίνει ότι το φορτίο έχει ρευστοποιηθεί. Αυτό μπορεί να συμβεί ακόμα και εάν το μεταβαλλόμενο όριο υγρασίας (TML) δεν έχει ξεπεραστεί πριν τη φόρτωση. Για να αναπτυχθεί μία υγρή βάση στον πυθμένα του φορτίου, θα πρέπει το φορτίο να έχει μεγάλη διαπερατότητα κόκκων ώστε η υγρασία να μπορεί να διέλθει στα κατώτερα επίπεδα (Cooke, 2011). Οι όροι “σημείο ροής υγρασίας” και “μεταβαλλόμενο όριο υγρασίας”, αναλύονται στη συνέχεια σύμφωνα με τα αναφερόμενα στον κώδικα IMSBC (MSC. 268(85)).

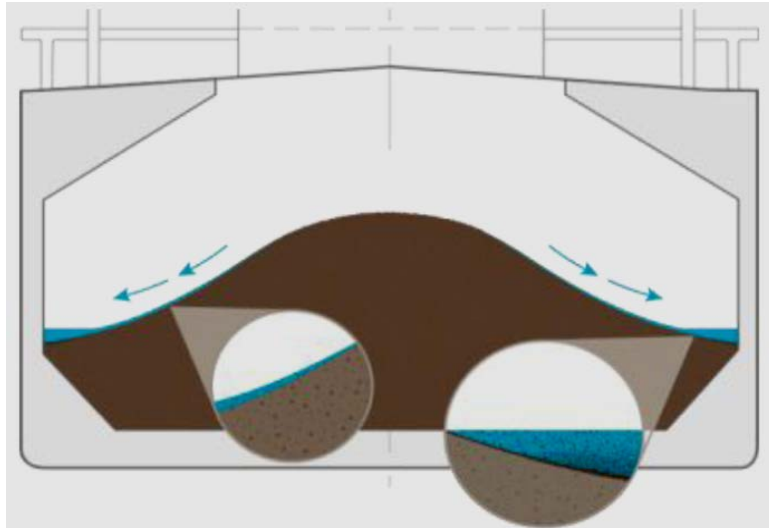
Σημείο ροής υγρασίας (Flow Moisture Point, FMP), καλείται το χαμηλότερο επίπεδο υγρασίας στο οποίο μπορεί να εμφανισθεί η ρευστοποίηση. Εάν το φορτίο φορτώνεται με ποσοστό υγρασίας πάνω από το FMP, τότε το φορτίο μπορεί να ρευστοποιηθεί οποιαδήποτε

στιγμή κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, ανάλογα με τους κραδασμούς που προκαλούνται απ' το μηχανοστάσιο, τις κινήσεις του πλοίου και την επίδραση των κυμάτων σε αυτό, και επομένως το βαθμό συμπίεσης του φορτίου. Το σημείο ροής υγρασίας εξαρτάται από τον όγκο των κενών χώρων ανάμεσα στα σωματίδια του φορτίου στη μέγιστη συμπίεση. Καθώς ο κενός όγκος εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και τη συνοχή της επιφάνειας των μεμονωμένων σωματιδίων από τα οποία αποτελείται το φορτίο, η αριθμητική τιμή του FMP διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία εξόρυξης και τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Ως εκ τούτου, το FMP δεν μπορεί να προβλεφτεί, παρά μόνο να προσδιορισθεί με εργαστηριακές δοκιμές σε κάθε περίπτωση.

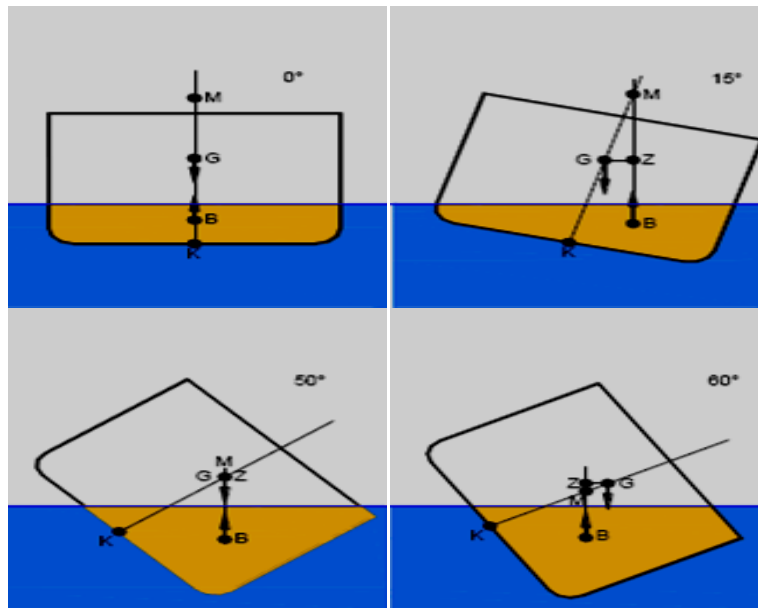
Μεταβαλλόμενο όριο υγρασίας (Transportable Moisture Limit, TML) ονομάζεται η μέγιστη περιεκτικότητα του φορτίου σε υγρασία, για την οποία το φορτίο θεωρείται ασφαλές για τη μεταφορά του. Το TML προκύπτει ως το 90% του FMP, όπως αυτό έχει ορισθεί από τις εργαστηριακές δοκιμές. Αυτή η διαφορά ανάμεσα στο μεταβαλλόμενο όριο υγρασίας και το σημείο ροής υγρασίας έγκειται στο περιθώριο ασφαλείας που απαιτείται για μία ασφαλή φόρτωση.

1.4 Αλληλεπίδραση κύτους - πλοίου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ρευστοποίηση του φορτίου εμφανίζεται είτε δημιουργώντας ελεύθερη επιφάνεια νερού, είτε δημιουργώντας υγρή βάση στον πυθμένα, είτε προκαλώντας την ολική συμπεριφορά του φορτίου ως ρευστό. Στην πρώτη περίπτωση, όταν η ποσότητα του νερού που έχει ανέλθει στην επιφάνεια είναι μικρή, το νερό έχει την τάση να συσσωρεύεται στα σημεία κοντά στις πλευρές του πλοίου, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4, ενώ όταν η ποσότητα είναι μεγάλη το νερό εξαπλώνεται σε ολόκληρη την επιφάνεια του φορτίου και το καλύπτει όλη του την έκταση. Αυτή η ελεύθερη επιφάνεια νερού που μπορεί να σχηματιστεί, μειώνει την ευστάθεια του πλοίου και μπορεί να το οδηγήσει στην ανατροπή. Στη δεύτερη περίπτωση, η υγρή βάση έχει την δυνατότητα να κινείται όπως ένα υγρό, με αποτέλεσμα να μπορεί να μετατοπίσει το φορτίο που είναι πιο στεγνό και βρίσκεται πάνω από αυτή. Αυτή η μετατόπιση του φορτίου μπορεί να προκαλέσει μεγάλες γωνίες εγκάρσιας κλίσης και να οδηγήσει στην ανατροπή του πλοίου. Στην τρίτη περίπτωση (The Swedish Club, 2012), το φορτίο συμπεριφέρεται εξολοκλήρου ως ρευστό, έτσι η κίνηση του διατοιχισμού του πλοίου (Roll) μπορεί να επηρεάσει την ευστάθειά. Πιο συγκεκριμένα, το φορτίο, μετά τη ρευστοποίησή του, έχει τη μορφή παχύρρευστου υγρού (λάσπη) και κατά την κίνηση του διατοιχισμού αυτό μετακινείται από τη μία πλευρά του πλοίου στην άλλη. Καθώς το φορτίο προσπίπτει στη μία πλευρά του πλοίου, δεν προλαβαίνει να μετακινηθεί πλήρως προς την άλλη πλευρά και επιστρέφει πάλι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πλοίο να αναπτύξει μεγάλη εγκάρσια κλίση και να ανατραπεί ξαφνικά (εικόνα 5).



Εικόνα 4. Εμφάνιση ελεύθερης επιφάνειας υγρού μετά την εμφάνιση του φαινομένου της ρευστοποίησης σε κύτος πλοίου. (Ahmed, 2012).



Εικόνα 5. Ανάπτυξη εγκάρσιας κλίσης πλοίου μετά από ρευστοποίηση φορτίου. (Russell, 2012).

Παρόλα αυτά, ένα πλοίο δεν θα έφτανε ποτέ στην ανατροπή, εάν δεν φορτωνόταν με κάποιο επικίνδυνο υλικό που μπορεί να ρευστοποιηθεί. Κάποια από τα σημαντικότερα υλικά που μπορεί να ρευστοποιηθούν παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα ορυκτών φορτίων που μπορεί να ρευστοποιηθούν κατά τη μεταφορά τους δια θαλάσσης και τα οποία διαφέρουν στην εμφάνιση και τις φυσικές τους ιδιότητες (Jonas, 2010). Κάποια από αυτά, παρουσιάζουν έναν ιδιαίτερα επικίνδυνο συνδυασμό κινδύνων που, κατά καιρούς, έχει οδηγήσει σε ατυχήματα. Σύμφωνα με τον ετήσιο απολογισμό της Intercargo για το έτος 2011 τα πιο συχνά αναφερόμενα υλικά που οδηγούν σε ανατροπή πλοίων λόγω της ρευστοποίησης είναι τα ανεπεξέργαστα μεταλλεύματα, όπως το μέταλλευμα του νικελίου (Nickel Ore) και το σιδηρομέταλλευμα (Iron Ore Fines). Σε αντίθεση με τα συμπυκνώματα μεταλλεύματος, αυτά λαμβάνονται απευθείας από το έδαφος υπαίθριων ορυχείων, το οποίο είναι πλούσιο σε μεταλλικά στοιχεία και η μορφή τους αποτελείται από ένα ετερογενές μίγμα λεπτόκοκκων, σαν άργιλος, και χονδρόκοκκων, σαν πέτρες, σωματιδίων. Επιπλέον η κατάσταση χειροτερεύει λόγω των συνθηκών αποθήκευσης των εν λόγω υλικών πριν την φόρτωση. Σύμφωνα με την οδηγία που εξέδωσε η Intercargo για την μεταφορά και διαχείριση των μεταλλευμάτων Νικελίου, μεγάλο μέρος του προβλήματος ρευστοποίησης του συγκεκριμένου υλικού οφείλεται στον τρόπο αποθήκευσής του στις χώρες προέλευσης (κυρίως Ινδονησία), όπως φαίνεται και στην εικόνα 6, όπου το μέταλλευμα τοποθετείται συνήθως σε ανοιχτούς χώρους (ακόμα και δίπλα σε υδροφόρους ορίζοντες), πράγμα που σημαίνει ότι υπόκεινται σε όλες τις καιρικές συνθήκες, με αποτέλεσμα να αποκτούν μεγάλα ποσοστά υγρασίας λόγω των συχνών και έντονων βροχοπτώσεων κατά τις περιόδους των μουσώνων, και όχι μόνο, αφού έντονες βροχοπτώσεις μπορεί να υπάρχουν και σε περιόδους ξηρασίας.



(α)



(β)

Εικόνα 6. (α) Τοποθεσία εξόρυξης μεταλλεύματος νικελίου, (β) Τοποθεσία αποθήκευσης μεταλλεύματος νικελίου, στην υπαίθρο. (Lomas, 2012).

Για την καλύτερη κατανόηση της φυσικής σύστασης των υλικών που μπορεί να ρευστοποιηθούν, ακολουθεί μια πιο λεπτομερής ανάλυση κάποιων από τα πιο επικίνδυνα υλικά.

2.1 Μετάλλευμα Νικελίου

Σύμφωνα με την Intercargo, το μετάλλευμα του νικελίου (Nickel Ore) έχει χαρακτηριστεί ως “το πιο επικίνδυνο φορτίο στον κόσμο”, όμως είναι ένα υλικό πολύ χρήσιμο για τη βιομηχανία. Παράγεται σε περιοχές της Νοτιοανατολικής Ασίας, όπως η Ινδονησία (Island of Sulawesi), η Κίνα, οι Φιλιππίνες (Rio Tuba/ Palawan, Surigao, Tubay/ Mindanao, Santa Cruz/ Luzon) και η Ινδία, της νότιας Αμερικής, όπως η Βραζιλία και η Βενεζουέλα, σε περιοχές της Αφρικής καθώς και της Αυστραλίας (New Caledonia), η ζήτησή του όμως από τις αναπτυγμένες χώρες είναι πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα η μεταφορά του δια θαλάσσης να γίνεται αρκετά συχνά.

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι του μεταλλεύματος νικελίου, ο λιμονίτης και ο σαπρολίτης, οι οποίοι διαφέρουν στη χημική, αλλά και στη φυσική, τους σύσταση, ωστόσο παρουσιάζουν παρόμοια προβλήματα όταν μεταφέρονται χύδην, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε υγρασία (The Swedish Club, 2012). Οι διαφορετικές μέθοδοι εξόρυξης, του συγκεκριμένου ορυκτού, σε συνδυασμό με τις συχνές βροχοπτώσεις καθώς και το σύννηθες υγρό περιβάλλον αποθήκευσής του, έχουν οδηγήσει σε προβλήματα ρευστοποίησης φορτίου, με αποτέλεσμα αρκετές φορές να καταλήγουμε σε ανατροπές πλοίων. Έτσι, η μελέτη της σύστασης και των ιδιοτήτων του μεταλλεύματος νικελίου καθίσταται αναγκαία.



(α)



(β)

Εικόνα 7. (α) Ξηρό μετάλλευμα του Νικελίου (article.wn.com), (β) Ρευστοποιημένο μετάλλευμα του Νικελίου, πλοίο “Jag Rahul” το 2005 κατά την άφιξή του στο λιμάνι των Φιλιππίνων (Grant, 2008).

Το νικέλιο αποτελεί το πέμπτο πιο κοινό στοιχείο στη Γη. Είναι ένα στοιχείο που συναντάται κυρίως στη δομή θειούχων οξειδίων και αλάτων ανόργανων ουσιών και είναι εξαιρετικά σημαντικό εμπορικό προϊόν, διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια βιομηχανική ανάπτυξη παραμερίζοντας σχεδόν όλα τα υπόλοιπα βιομηχανικά μέταλλα. Η μεγάλη σημασία του ως πολύτιμο μέταλλο έγκειται στο γεγονός ότι κατά τη χρήση του ως στοιχείο κραμάτωσης με άλλα στοιχεία, αυξάνει την αντοχή, τη σκληρότητα και την αντίσταση στη διάβρωση του κράματος. Άλλοι παράγοντες που το καθιστούν πολύτιμο αγαθό είναι η ελαστικότητά του, η καλή θερμική και ηλεκτρική αντίστασή του καθώς και τα μαγνητικά χαρακτηριστικά και οι καταλυτικές ιδιότητες που διαθέτει.

Η χημική του σύσταση εμφανίζει μεγάλη συγγένεια με το σίδηρο, το κοβάλτιο αλλά και το χαλκό. Μια από τις βασικές του ιδιότητες είναι η ικανότητά του να αντιδρά άμεσα με το μονοξείδιο του άνθρακα για να σχηματίζει ένα σύνθετο καρβονύλιο, το οποίο είναι ιδιαίτερα πτητικό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σε ορισμένες θερμοκρασίες είναι ανθεκτικό στη διάβρωση στον αέρα, το θαλασσίνο νερό και τα μη οξειδωτικά οξέα. Μια ακόμα ιδιότητα του νικελίου είναι η ανθεκτικότητά του στη διάβρωση από τα αλκάλια.

Το πρωτογενές νικέλιο λαμβάνεται από το λατεριτικό μετάλλευμα (Lateritic nickel ore). Το λατεριτικό μετάλλευμα, ή πιο απλά, ο λατερίτης είναι ένα προϊόν μακροχρόνιας αποσάθρωσης του πετρώματος τροπικών περιοχών μετά από πολλές εναλλαγές υγρών και ξηρών περιόδων και λαμβάνεται με διαδικασίες εξόρυξης για να μεταφερθεί στη συνέχεια με φορτηγά και πλοία στις χώρες ζήτησης. Έχει ένα σκωριώδες κόκκινο χρώμα σαν κρεμύδι, από το οποίο προήλθε και η ονομασία του. Το χρώμα αυτό είναι χαρακτηριστικό όλων των λατεριτικών εδαφών, αφού είναι πλούσια σε σίδηρο και οξείδια του σιδήρου. Η όψη του είναι ένας συνδυασμός λεπτόκοκκων, σαν πηλός, και χονδρόκοκκων, σαν πέτρες, σωματιδίων. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι, το σύνθετο ποσοστό του νικελίου που περιέχεται στο μετάλλευμα είναι μόλις 2%, ενώ περιέχονται και στοιχεία όπως είναι το κοβάλτιο, ο άργυρος και τα οξείδια του σιδήρου.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι κατάταξης των λατεριτών. Μία από τις μεθόδους αυτές είναι με βάση τα κύρια ορυκτά του Νικελίου (Ζωγραφίδης, 2010), και έχει ως εξής:

- **Τύπος Α**, πυριτικά κοιτάσματα του Νικελίου, με κύριες ορυκτολογικές φάσεις νικελιο-μαγνησιούχα πυριτικά ορυκτά, όπως είναι ο γαρνιερίτης, τα οποία κατά κύριο λόγο απαντούν σε μεγάλο βάθος στη σαπρολιθική ζώνη.
- **Τύπος Β**, πυριτικά κοιτάσματα του Νικελίου, με κύριες ορυκτολογικές φάσεις σμεκτιτικού τύπου αργιλικά ορυκτά, τα οποία κατά κύριο λόγο απαντούν στα επάνω τμήματα της σαπρολιθικής ζώνης.

- **Τύπος Γ**, οξειδωμένα κοιτάσματα με κύριες ορυκτολογικές φάσεις υδροξείδια του σιδήρου, όπως είναι ο γκαιτίτης, τα οποία σχηματίζουν ένα στρώμα στο όριο μεταξύ λειμωνιτικού και σαπρολιθικού ορίζοντα.

Τα περισσότερα λατεριτικά κοιτάσματα περιλαμβάνουν τόσο πυριτικά όσο και οξειδωμένα μεταλλεύματα σε κυμαινόμενες αναλογίες. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το περιεχόμενο Νικέλιο σε πυριτιούχες ορυκτολογικές φάσεις λατεριτικών κοιτασμάτων τύπου Α και Β ποικίλλει, με αποτέλεσμα σε μεμονωμένα ορυκτά να υπερβαίνει το 20 % στα κοιτάσματα τύπου Α. Στα λατεριτικά κοιτάσματα τύπου Β, μια τυπική σύσταση Νικελίου είναι 1-1,5 %, με το Νικέλιο να ενδομείται ανάμεσα στα δομικά επίπεδα ή εντός του οκταεδρικού επιπέδου των διαφόρων νικελιούχων ορυκτών, αντικαθιστώντας στο κρυσταλλικό πλέγμα τον τρισθενή σίδηρο.

Σύμφωνα, τώρα, με μία άλλη κατάταξη, κατά τη διαδικασία της λατεριτικής αποσάθρωσης, σχηματίζονται οι δύο ακόλουθοι τύποι λατεριτικών μεταλλευμάτων (Ζωγραφίδης, 2010):

- **Λατερίτες γαρνιεριτικού τύπου**, αυτοί σχηματίζονται στο δάπεδο του λατεριτικού κοιτάσματος και μάλιστα στη ζώνη επαφής αυτού με το υγιές πέτρωμα. Όπου εξ άλλου συμβαίνει και η εξουδετέρωση του μεταλλοφόρου όξινου διαλύματος. Αποτέλεσμα της εξουδετέρωσης αυτής είναι η εκλεκτική κατακρήμνιση του Νικελίου μαζί με ένα ποσοστό Μαγνησίου, ενώ ένα μέρος παραμένει διαλυμένο και απομακρύνεται. Τα μεταλλεύματα αυτού του τύπου είναι σχετικά πλούσια σε Νικέλιο, οξείδιο του μαγνησίου και οξείδιο του πυριτίου, ενώ είναι φτωχά σε σίδηρο. Τα κυριότερα ορυκτά του Νικελίου στους λατερίτες γαρνιεριτικού τύπου είναι ο Γαρνιερίτης, ο Πιμελίτης, ο Λιζαρδίτης, ο Νεπούιτης, ο Νικελιούχος βερμικουλίτης, ο Νικελιούχος κλινοχλωρίτης, ο Νικελιούχος μορτιμοριλλονίτης, ο Τακοβίτης και ο Νικελιούχος καολινίτης.
- **Λατερίτες λειμωνιτικού τύπου**, αυτοί σχηματίζονται στην οροφή του λατεριτικού κοιτάσματος, όπου ο Σίδηρος και το Μαγνήσιο οξειδώνονται γρήγορα και κατακρημνίζονται επί τόπου ως υδροξείδια συμπαρασύροντας ταυτόχρονα το περισσότερο Κοβάλτιο και μέρος του Νικελίου. Τα μεταλλεύματα αυτά έχουν ως κύριο συστατικό τον γκαιτίτη, είναι πλούσια σε σίδηρο, σχετικά φτωχά σε Νικέλιο και φτωχά σε οξείδια του μαγνησίου και του πυριτίου. Τα κυριότερα ορυκτολογικά συστατικά του λειμωνιτικού τύπου λατεριτών είναι τα Νικελιούχα ορυκτά (Νικελιούχος λειμωνίτης, Νικελιούχος σπινέλιος, Τρεβορίτης, Ζαμπορίτης) και τα Σιδηρούχα ορυκτά (Γκαιτίτης, Λειμωνίτης, Μαγνητίτης, Αιματίτης, Μαγκκαμίτης, Φερροζυίτης, Λεπιδοκροκίτης).

Η μεγάλη ποικιλία των τελικών προϊόντων του πρωτογενούς νικελίου προκύπτει ως αποτέλεσμα της αντίστοιχης ποικιλίας των βιομηχανικών μεθόδων κατεργασίας των νικελιούχων ορυκτών πρώτων υλών προς εξαγωγή του νικελίου. Ως εκ τούτου, τα τελικά προϊόντα διακρίνονται στις δύο ακόλουθες κατηγορίες (Ζωγραφίδης, 2010):

- **Κατηγορία I**, στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα προϊόντα με περιεκτικότητα σε νικέλιο 99% ή περισσότερο. Τέτοια προϊόντα είναι οι κάθοδοι νικελίου με περιεκτικότητα 99,96% Ni, τα Pellets νικελίου, η σκόνη νικελίου, οι μπρικέτες νικελίου και οι ροδέλες.
- **Κατηγορία II**, σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα προϊόντα με περιεκτικότητα σε Νικέλιο κάτω του 99%. Τέτοια προϊόντα είναι το σιδηρονικέλιο με περιεκτικότητα 20-29% Ni και το οξειδίο του νικελίου (sinter) με περιεκτικότητα 75-90% Ni.

Όσον αφορά τις εφαρμογές στις οποίες συναντάται το νικέλιο, η πλέον γνωστή, από πολύ παλιά, είναι αυτή στην παραγωγή νομισμάτων. Σήμερα, έχει πάνω από 300.000 χρήσεις, με κυρίαρχη αυτή στον τομέα της βιομηχανίας. Έτσι, χρησιμοποιείται για την παραγωγή επαναφορτιζόμενων μπαταριών, σωλήνες και εξαρτήματα σωλήνων, ανοξειδωτού χάλυβα και πολλών άλλων προϊόντων. Στην πραγματικότητα όμως, τα δύο τρίτα της παγκόσμιας παραγωγής νικελίου χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ανοξειδωτού χάλυβα αλλά και γενικότερα νικελιούχων χαλύβων. Άλλα διαδεδομένα πεδία εφαρμογής του είναι η χρήση του στην παραγωγή διαφόρων τύπων κραμάτων, στις επινικελιώσεις, στους συσσωρευτές, στα ηλεκτρονικά, στα χημικά και στους καταλύτες.

2.2 Σιδηρομετάλλευμα

Το Σιδηρομετάλλευμα (Iron Ore) είναι μια εξαιρετικά σημαντική πρώτη ύλη, ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψη ο ουσιαστικός της ρόλος στη βιομηχανία χάλυβα, η οποία είναι η μεγαλύτερη βιομηχανία μετάλλων παγκοσμίως. Τα τελευταία χρόνια η Κίνα εμφανίζεται ως ηγέτης στην κατανάλωση του χάλυβα. Μετά την Κίνα, στην μεγαλύτερη κατανάλωση χάλυβα ακολουθούν η Ιαπωνία και η Κορέα. Ωστόσο, η παραγωγή σιδηρομεταλλεύματος γίνεται σε ολόκληρο τον κόσμο, αλλά κυρίως σε χώρες όπως είναι η Αυστραλία, η Βραζιλία, το Μεξικό, οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, ο Καναδάς, η Ρωσία και η Νότια Αφρική. Έτσι, η μεταφορά του από τις χώρες παραγωγής στις χώρες ζήτησης γίνεται με πλοία ειδικού τύπου, και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη, αφού έχουν συμβεί αρκετά ατυχήματα κατά τη μεταφορά του.



(α)

(β)

Εικόνα 8. (α) Ξηρό σιδηρομετάλλευμα, (β) Ρευστοποιημένο σιδηρομετάλλευμα (Jonas, 2010).

Ο σίδηρος, είναι ένα μεταλλικό στοιχείο που συνθέτει το 5% περίπου του φλοιού της Γής. Όταν είναι καθαρό, έχει το χαρακτηριστικό σκούρο γκρι χρώμα του μετάλλου. Παρόλα αυτά, λόγω της δραστηριότητάς του, οξειδώνεται εύκολα με αποτέλεσμα πολλές φορές να παίρνει ένα κόκκινο, πορτοκαλί ή κίτρινο χρώμα. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν τα οξείδια του σιδήρου. Τα οξείδια του σιδήρου καλούνται μεταλλεύματα του σιδήρου, και τα βασικότερα είναι ο αιματίτης (Fe_2O_3), ο μαγνητίτης (Fe_3O_4), ο γαιτίτης ($\text{FeO}(\text{OH})$), ο λιμονίτης ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n(\text{H}_2\text{O})$) και ο σιδερίτης (FeCO_3). Ο αιματίτης, είναι γνωστός ως «φυσικό μετάλλευμα» και σε ορισμένες περιπτώσεις η περιεκτικότητά του σε σίδηρο φτάνει το 66%. Από το σιδηρομετάλλευμα παράγονται τα συμπυκνώματα του σιδήρου, ο σπογγώδης σίδηρος, ο ακατέργαστος σίδηρος και το Mill Scale.

Τα συμπυκνώματα του σιδήρου παράγονται είτε με τη ξηρή είτε με την υγρή μέθοδο. Στην πρώτη μέθοδο, το μετάλλευμα του σιδήρου ξηραίνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται αρκετά η περιεκτικότητά του σε υγρασία, αλλά να αυξάνεται η πιθανότητα ανάφλεξης του λόγω αντίδρασης του θείου με το οξυγόνο. Στην δεύτερη μέθοδο, με σκοπό να απομακρυνθούν τα σουφλίδια το μετάλλευμα βρέχεται με νερό και αυξάνεται η περιεκτικότητά του σε υγρασία με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η πιθανότητα της ρευστοποίησης.

Ο σπογγώδης σίδηρος (Sponge iron or Direct Reduced Iron, DRI) παράγεται από το μετάλλευμα του σιδήρου και χρησιμοποιείται στην παραγωγή του χάλυβα. Παράγεται από το σιδηρομετάλλευμα, το οποίο θερμαίνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες χωρίς να του επιτρέπεται να έλθει σε επαφή με τον αέρα. Αυτό το παράγωγο του σιδήρου διαχωρίζεται από τους μαγνήτες και έτσι έχει μικρή περιεκτικότητα σε υγρασία. Συνεπώς, όταν μεταφέρεται σε μεγάλες ποσότητες, εάν εισέρχεται νερό σε αυτό, είναι πιθανό να οξειδωθεί και να προκαλέσει αυθόρμητη καύση και /ή τοξικές αναθυμιάσεις.

Ο ακατέργαστος σίδηρος (Pig Iron) παράγεται από την καύση οπτάνθρακα ως καύσιμο για να θερμάνει το μέταλλευμα σιδήρου το οποίο κατόπιν εκλύει μονοξείδιο του άνθρακα. Αυτό συνδυάζεται με τα οξείδια του σιδήρου στο μέταλλευμα σιδήρου για την παραγωγή του μεταλλικού σιδήρου γνωστού ως χυτοσίδηρος. Ο Χυτοσίδηρος περιέχει μια συγκριτικά μεγαλύτερη ποσότητα άνθρακα, περίπου 3,5%, και είναι λιγότερο καθαρό από τον σπογγώδη σίδηρο.

Ένα υποπροϊόν θερμής έλασης του χάλυβα είναι το Mill Scale. Είναι ένα υλικό που μεταφέρεται χύδην και μπορεί να ρευστοποιηθεί, όπως και τα πρόστιμα σιδηρομεταλλεύματος (Iron ore fines). Αυτό το υλικό έχει καθοριστεί ως φορτίο της ομάδας Α, και ως εκ τούτου δεν μπορεί να γίνει δεκτό για φόρτωση, χωρίς ο ναυλωτής να έχει πιστοποιήσει την περιεκτικότητά του σε υγρασία και την TML. Ο σύνηθες τρόπος ρευστοποίησης του συγκεκριμένου φορτίου είναι η δημιουργία υγρής βάσης, με αποτέλεσμα η επιφάνεια του φορτίου να είναι ξηρή και να μετατοπίζεται πιο εύκολα.

Το μέταλλευμα του σιδήρου αποτελεί ένα βαρύ φορτίο, δηλαδή έχει αρκετά χαμηλό συντελεστή στοιβασίας της τάξης του 0,29 με 0,80 m³/t, ενώ η πυκνότητά του είναι 1250-3448 kg/m³. Το ποσοστό υγρασίας που περιέχεται σε αυτό είναι γύρω στο 0,16%. Ωστόσο, εάν βρίσκεται στοιβαγμένο στην ύπαιθρο, η περιεκτικότητά της υγρασίας αυξάνεται λόγω του αέρα ή κάποιας πιθανής βροχής.

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, το σύνολο σχεδόν του μεταλλεύματος σιδήρου που εξορύσσεται, χρησιμοποιείται για την παραγωγή χάλυβα. Όμως ο ακατέργαστος σίδηρος δεν είναι τόσο δυνατός και σκληρός όσο χρειάζεται, με συνέπεια να κραματώνεται με άλλα στοιχεία, όπως είναι το βολφράμιο, το μαγγάνιο, το νικέλιο και το χρώμιο, για να ενισχυθεί και να δημιουργήσει ένα χρήσιμο χάλυβα για την κατασκευή αυτοκινήτων, τρένων, φορτηγών καθώς και πολλών άλλων βιομηχανικών προϊόντων.

2.3 Ελαιοπυρήνας

Ένα από τα υλικά που απαντώνται στις θαλάσσιες μεταφορές και έχουν συσχετιστεί με φαινόμενα ρευστοποίησης είναι και ο ελαιοπυρήνας. Ειδικά τα τελευταία χρόνια οπότε και η ανάγκη για εναλλακτικές μορφές θέρμανσης έχει αυξηθεί, με αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι μεταφορές του υπόψη υλικού, έχουν αναφερθεί αρκετά ατυχήματα. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι το υλικό αυτό εξάγεται κυρίως από τις χώρες της Μεσογείου (Ισπανία, Ιταλία, Ελλάδα), αφού το 97% της παγκόσμιας παραγωγής ελαιολάδου συγκεντρώνεται στις χώρες αυτές.



(α)

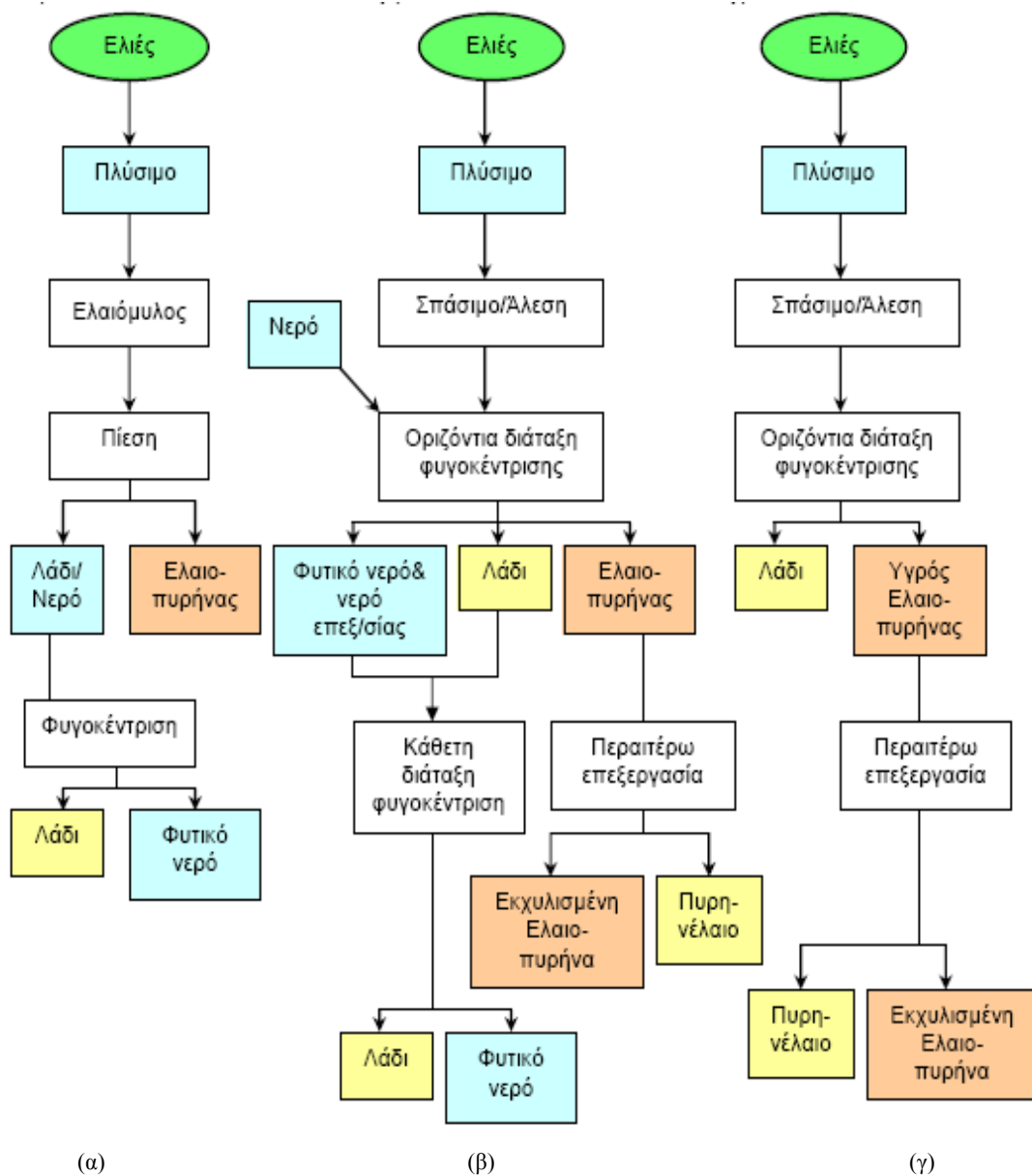
(β)

Εικόνα 9. (α) Ξηρός ελαιοπυρήνας (www.greenfield.waw.pl), (β) Υγρός ελαιοπυρήνας (citywineryblog.com).

Ο ελαιοπυρήνας παράγεται σαν υποπροϊόν στα ελαιοτριβεία κατά την επεξεργασία των ελιών για την παραλαβή του ελαιολάδου. Η παραλαβή του ελαιολάδου γίνεται σήμερα με δύο, κυρίως, τρόπους, με την κλασική μέθοδο και με φυγοκεντρικά συστήματα δύο ή τριών φάσεων (εικόνα 9). Η βασική διαφορά αυτών των δύο τύπων είναι ότι ο διαχωρισμός γίνεται, στην πρώτη περίπτωση μέσω υδραυλικής πίεσης και στη δεύτερη περίπτωση μέσω φυγοκεντρικών δυνάμεων. Οι δύο αυτές μέθοδοι, εκτός από τις διαφορές που έχουν στο τελικό προϊόν (με την κλασική μέθοδο παράγεται λάδι καλύτερης ποιότητας) διαφέρουν και όσο αφορά τη σύσταση και τον όγκο των παραγόμενων παραπροϊόντων. Πιο συγκεκριμένα ,

- Με την *κλασική μέθοδο* γίνεται διαχωρισμός της στερεής (ελαιοπυρήνας με 25% υγρασία) από την υγρή φάση (λάδι μαζί με προσμίξεις).
- Με τη *φυγοκεντρική μέθοδο τριών φάσεων* γίνεται διαχωρισμός σε τρία μέρη, τον ελαιοπυρήνα (45% - 50% υγρασία, εκ της οποίας ένα ποσοστό 8% - 12% αποτελείται από ελαιόλαδο το οποίο δεν παραλήφθηκε από τη φυγοκέντριση), τα φυτικά υγρά (κατσίγαρος) και το λάδι μαζί με προσμίξεις.
- Με τη *φυγοκεντρική μέθοδο δύο φάσεων* γίνεται διαχωρισμός σε δύο μέρη, τον υγρό ελαιοπυρήνα (55% - 75% υγρασία, εκ της οποίας ένα ποσοστό 8% - 12% αποτελείται από ελαιόλαδο το οποίο δεν παραλήφθηκε από τη φυγοκέντριση) και το λάδι μαζί με προσμίξεις.

Σε κάθε περίπτωση, το στερεό υπόλειμμα (ελαιοπυρήνας) είτε οδηγείται σε φυσική ξήρανση (εκχυλισμένη ελαιοπυρήνα ή πυρηνόξυλο) και επεξεργάζεται (κομποστοποιείται) για τη βελτίωση του εδάφους, χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε ελαιοτριβεία, φούρνους, ειδικά ημιαυτόνομα συστήματα κεντρικής θέρμανσης σπιτιών και θερμοκηπίων, είτε οδηγείται στα πυρηνελουργεία, όπου, μετά από ξήρανση στους 60°C, εξάγεται με διάλυμα εξανίου για την παραγωγή του πυρηνέλαιου.



Εικόνα 10. Διάγραμμα ροής των τριών διαφορετικών διαδικασιών παραγωγής ελαιόλαδου (α) Κλασική, (β) Τριών φάσεων (γ) Δύο φάσεων. (www.nea.gr/popular/docs1/tessera.pdf).

Συνήθως η μεταφορά και η επεξεργασία του ελαιοπυρήνα από τα φυγοκεντρικά ελαιοτριβεία γίνεται δια θαλάσσης, λόγω της μεγάλης απόστασης των ελαιοτριβείων από τα πυρηνελουργεία, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλος κίνδυνος κατά τη μεταφορά του, λόγω της υψηλής υγρασίας του.

Τα συστατικά του ελαιοπυρήνα, δεν είναι άλλα από τα συστατικά του ελαιοκαρπού. Η μέση σύσταση του ελαιοκάρπου είναι 50% Νερό, 22% λάδι, 19% υδατάνθρακες, 1.6% πρωτεΐνες, καθώς και άλλα σημαντικά συστατικά όπως πηκτίνες, οργανικά οξέα, χρωστικές, πολυφαινόλες και ανόργανα συστατικά (Κοψαχειλής, 2009).

Η ρευστοποίηση των μεταλλευμάτων που έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση του φορτίου και οδηγεί στην απώλεια της ευστάθειας του πλοίου, είναι ένας από τους κυριότερους λόγους πρόκλησης ναυτικών ατυχημάτων εδώ και αρκετές δεκαετίες. Τα πιο πρόσφατα προβλήματα, που έχουν ήδη οδηγήσει σε απώλειες πλοίων, οφείλονται στην μεταφορά ανεπεξέργαστων μεταλλευμάτων όπως είναι το σιδηρομετάλλευμα από την Ινδία και το μέταλλευμα του νικελίου από την Ινδονησία, τις Φιλιππίνες και την Νέα Καληδονία. Η βασικότερη αιτία τέτοιων ατυχημάτων είναι η μη συμμόρφωση των φορτωτών με τις δοκιμές και τα πιστοποιητικά που απαιτούνται ώστε να επιβεβαιωθεί ότι το φορτίο που πρόκειται να φορτωθεί είναι κατάλληλο για τη μεταφορά του (Jonas, 2010). Στον Πίνακα 1 φαίνονται τα στατιστικά ατυχημάτων και οι απώλειες ανθρώπινων ζωών για τη δεκαετία 2002- 2011, όπως αυτά αναφέρονται στην ετήσια έκθεση της Intercargo για το έτος 2011. Από την εξέταση του πίνακα διαπιστώνεται ότι περίπου 7 πλοία και 24 ζωές χάνονται κάθε χρόνο λόγω ανατροπής πλοίων μεταφοράς φορτίου χύδην. Τα περισσότερα από τα πλοία που χάθηκαν μετέφεραν μεταλλεύματα σιδήρου και νικελίου από την Ινδία, την Ινδονησία και τις Φιλιππίνες και η απώλεια αποδόθηκε σε εμφάνιση της ρευστοποίησης. Στη συνέχεια ακολουθεί μια αναφορά των κυριότερων ατυχημάτων, που συνέβησαν τα τελευταία εικοσιπέντε χρόνια, και απασχόλησαν, για διάφορους λόγους (είτε λόγω των πολλών απωλειών σε ανθρώπινες ζωές, είτε λόγω των έντονων φαινομένων), την επιστημονική (και όχι μόνο) κοινότητα.

Πίνακας 1. Αναφορές ατυχημάτων τα τελευταία 10 χρόνια.

Αναφορές Ατυχημάτων σε πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου		
Χρόνος	Απώλειες σε πλοία	Απώλειες σε ζωές
2011	13	38
2010	7	44
2002-2009	48	158

*INTERCARGO 2011 annual report

Από τα παλαιότερα ατυχήματα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία είναι αυτά των πλοίων “Mega Taurus” και “Sea Prosped”. Τα δύο αυτά ατυχήματα έλαβαν χώρα την ίδια χρονιά, το 1988, και μετέφεραν το ίδιο υλικό, μετάλλευμα του νικελίου, το πρώτο είχε αναχωρήσει από τις Φιλιππίνες (χάθηκαν 20 ανθρώπινες ζωές) ενώ το δεύτερο από την Ινδονησία (χάθηκαν 10 ανθρώπινες ζωές). Τα επόμενα χρόνια υπήρξαν κάποιες αναφορές ατυχημάτων που δεν οδήγησαν στην ανατροπή του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα, το 1990 το πλοίο “Oriental Angel” ανέπτυξε μεγάλη εγκάρσια κλίση κατά τη φόρτωση μεταλλεύματος νικελίου στο λιμάνι της New Caledonia και το 1999 το πλοίο “Padang Hawk” ενώ είχε αναχωρήσει από το ίδιο λιμάνι φορτωμένο με μετάλλευμα νικελίου κατά τη διάρκεια του ταξιδιού ανέπτυξε εγκάρσια κλίση 15° Port Side, αλλά κατάφερε να φτάσει στο λιμάνι Townsville, όπου και διαπιστώθηκε η ρευστοποίηση του μεταφερόμενου φορτίου στα τέσσερα από τα πέντε κύτη του πλοίου (στο κύτος No.1 είχε δημιουργηθεί ελεύθερη επιφάνεια υγρού, ενώ στα κύτη No.2,3,4 το υλικό είχε μετατραπεί σε ρευστό και ακολουθούσε την κίνηση του πλοίου).

Ένα από τα πιο πρόσφατα ατυχήματα που οφείλονται στο φαινόμενο της ρευστοποίησης είναι η ανατροπή του πλοίου “Hui Long”. Το πλοίο ταξίδευε από το Sungei Pakning της Ινδονησίας προς την Ινδία, φορτωμένο με 11.245 τόνους διαφόρων ειδών φορτίου, εκ των οποίων οι 5.185 τόνοι ήταν ορυκτός φθορίτης/ αργυραδάμαντας (fluorspar). Στις 18 Μαΐου του 2005, και ενώ το πλοίο βρισκόταν 173 ναυτικά μίλια από τη Sri Lanka (με καλό καιρό) παρουσίασε κλίση 40° Port Side και βυθίστηκε στις 20 Μαΐου του 2005, χωρίς να υπάρξουν ανθρώπινες απώλειες. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι κατά τη φόρτωση του αργυραδάμαντα στο λιμάνι του Hong Kong, αλλά και κατά τη διάρκεια φορτοεκφόρτωσης άλλων φορτίων σε επόμενα λιμάνια, είχαν αναφερθεί μικρές βροχοπτώσεις, πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ανατροπή του πλοίου οφείλεται στη ρευστοποίηση του φορτίου που μετέφερε.

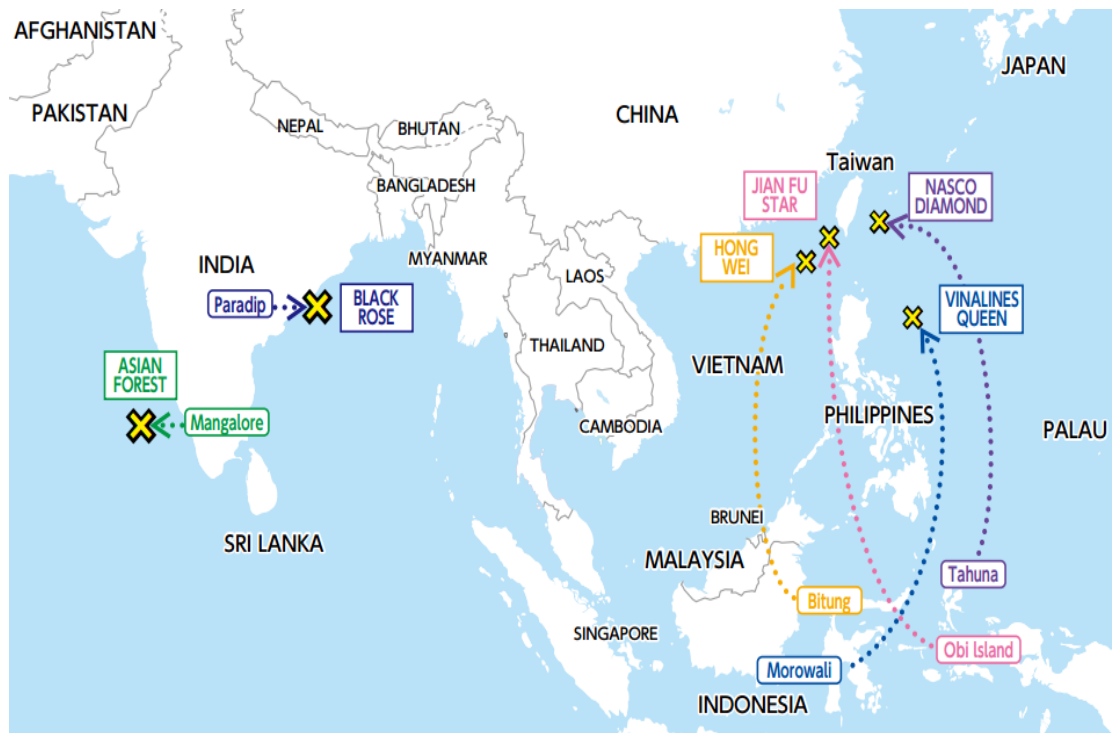
Δύο χρόνια μετά, αναφέρθηκαν δώδεκα ατυχήματα που αποδόθηκαν στο ίδιο φαινόμενο. Κάποια από αυτά είναι το “Wen Qiao” και το “Heng Tai”. Το πρώτο, ανατράπηκε στο αγκυροβόλιο Wosan της Βόρειας Κορέας στις 17 Σεπτεμβρίου, ενώ μετέφερε σιδηρομετάλλευμα με προορισμό το Tianjin. Οι έρευνες που διεξήχθησαν μετά το ατύχημα, έδειξαν ότι το πλοίο βυθίστηκε λόγω της υψηλής υγρασίας του φορτίου, αλλά και σφάλματος κατά την πλοήγηση του πλοίου. Συνέπεια του ατυχήματος δεν ήταν να χαθεί μόνο το πλοίο, αλλά και μία ανθρώπινη ζωή. Το δεύτερο, μετέφερε σιδηρομετάλλευμα από την Ινδία στο Μπαγκλαντές και ανατράπηκε στις 2 Οκτωβρίου στην ανοιχτή θάλασσα. Σε αυτό το ατύχημα έχασαν τη ζωή τους δύο ναυτικοί.

Οι χρονιές 2009 και 2010 ήταν καθοριστικές για τη συνειδητοποίηση της σοβαρότητας αλλά και της σημαντικότητας του φαινομένου, διότι μέσα σε αυτά τα δύο χρόνια χάθηκαν

πολλά πλοία και ανθρώπινες ζωές. Αναλυτικότερα, μέσα στο 2009 και σε διάρκεια μόλις λίγων μηνών ανατράπηκαν δύο πλοία, το “Black Rose” και το “Asian Forest” που μετέφεραν σιδηρομετάλλευμα από την Ινδία. Το “Asian Forest”, βυθίστηκε στις 17 Ιουλίου, αφού είχε μόλις αποπλεύσει από το λιμάνι New Mangalore, στην Ινδία. Το πλοίο θα μετέφερε 14.500 τόνους σιδηρομεταλλεύματος στην Κίνα, όταν λόγω κακών καιρικών συνθηκών ανέπτυξε κλίση 50 μοιρών και εγκαταλείφτηκε από το πλήρωμα του. Το “Black Rose”, στις 9 Σεπτεμβρίου και λίγο μετά την έξοδό του από το λιμάνι Paradip της Ινδίας ανατράπηκε ενώ μετέφερε 23.000 περίπου τόνους σιδηρομεταλλεύματος. Το 2010 έλαβαν χώρα τέσσερις ανατροπές πλοίων το “Jian Fu Star”, το “Nasco Diamond”, το “Hai Xin” και το “Hong Wei” , εκ των οποίων οι τρεις κατά την περίοδο Οκτωβρίου – Δεκεμβρίου, που στοίχισαν τη ζωή σε 44 ανθρώπους. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα τρία πλοία μετέφεραν μετάλλευμα νικελίου από την Ινδονησία. Πιο συγκεκριμένα, το “Jian Fu Star” ταξίδευε από την Ινδονησία και ήταν φορτωμένο με 43.000 τόνους νικελίου όταν βυθίστηκε κοντά στο ακρωτήριο Eluanbi στη νότια Ταιβάν στις 27 Οκτωβρίου. Τα 13 από τα 25 μέλη του πληρώματος χάθηκαν. Λίγες μέρες αργότερα, στις 9 Νοεμβρίου, το “Nasco Diamond”, που μετέφερε 55.150 τόνους μετάλλευμα του νικελίου από την Ινδονησία στην Κίνα, έπλεε νότια της Okinawa, στην Ιαπωνία, όταν ο πλοιοκτήτης έχασε κάθε επαφή με το πλοίο. Το πλοίο βρέθηκε βυθισμένο με δύο νεκρούς και 20 αγνοούμενους, ενώ μόνο τρία μέλη του πληρώματος επέζησαν. Μέσα στον ίδιο μήνα, 22 Νοεμβρίου, χάνεται και τρίτο πλοίο “Hai Xin”. Το πλοίο βυθίστηκε ανατολικά του Lianyungang της Κίνας ενώ μετέφερε 6.055 τόνους μαγνητίτη (σιδηρομετάλλευμα). Στις αρχές του επόμενου μήνα, 3 Δεκεμβρίου, βυθίστηκε το “Hong Wei” στα ανοιχτά των Φιλιππίνων ενώ μετέφερε 40.000 τόνους μετάλλευμα του νικελίου από την Ινδονησία. Σε αυτό το ατύχημα 10 ήταν οι άνθρωποι που έχασαν τη ζωή τους.

Το ατύχημα που έγινε η αφορμή για την συνειδητοποίηση της επικινδυνότητας του φαινομένου της ρευστοποίησης ήταν αυτό του πλοίου “Vinalines Queen”. Το πλοίο είχε αναχωρήσει από την Ινδονησία φορτωμένο με 54.000 τόνους μεταλλεύματος νικελίου, με προορισμό την Κίνα. Στις 25 Δεκεμβρίου του 2011, το πλοίο βρισκόταν κοντά στο λιμάνι του Βόρειου Luzon στις Φιλιππίνες όταν ο πλοίαρχος του ανέφερε γωνία κλίσης 20° Port Side και κατευθύνθηκε προς τις Φιλιππίνες πλέοντας με ισχυρούς ανέμους. Το πλοίο χάθηκε μέσα σε δύο ώρες , με αποτέλεσμα να χαθούν τα 22 από τα 23 μέλη του πληρώματος.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τα περισσότερα από τα πλοία αυτά ανατράπηκαν σε πολύ κοντινές περιοχές, όπως φαίνεται και στον αντιπροσωπευτικό χάρτη της ευρύτερης περιοχής που φαίνεται στην εικόνα 11.



Εικόνα 11. Χάρτης των πλοίων που ανατράπηκαν λόγω της ρευστοποίησης του φορτίου τους από το 2009 έως το 2011. (Class NK magazine 64th Edition).

Φτάνοντας στο 2012 (χρονιά κατά την οποία γράφτηκε το μεγαλύτερο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας), δεν θα γινόταν να μην έχουν συμβεί ατυχήματα οφειλόμενα στην ρευστοποίηση του φορτίου. Τα ατυχήματα αυτής της χρονιάς ήταν για εμάς μια ακόμη αφορμή για να ασχοληθούμε με το συγκεκριμένο θέμα αφού πέραν από ναυπηγικό είχαν και καθαρά εθνικό ενδιαφέρον και μάλιστα διπλό. Όχι μόνο πραγματοποιήθηκαν δύο ατυχήματα στον ελλαδικό χώρο που προήλθαν από την ρευστοποίηση φορτίου, αλλά και το υλικό που μετέφεραν ήταν ένα από τα κυριότερα εξαγωγικά προϊόντα της χώρας μας, ο ελαιοπυρήνας. Στις 3 Μαρτίου του 2012, το πλοίο “Άγιος Γεράσιμος” βυθίστηκε κατά τη διάρκεια της εκφόρτωσης στο λιμάνι Πλατυγιάλι στο Μεσολόγγι. Το πλοίο είχε φορτώσει ελαιοπυρήνα και λόγω ρευστοποίησής του ανετράπη, χωρίς καμία απώλεια ζωής. Τελευταίο, αλλά αρκετά ενδιαφέρον, είναι το ατύχημα του “Erol Senkaya”. Το πλοίο ήταν φορτωμένο με 2.200 τόνους ελαιοπυρήνα και ανατράπηκε νωρίς το πρωί στις 19 Μαΐου ανάμεσα στη Ζάκυνθο και την Πελοπόννησο, λόγω ρευστοποίησης του φορτίου που μετέφερε.

Τα πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην, αναπτύχθηκαν ιδιαίτερα στη δεκαετία του 1950 με σκοπό να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες μη συσκευασμένων προϊόντων, όπως είναι τα σιτηρά, ο άνθρακας και το σιδηρομετάλλευμα. Σήμερα, ο στόλος του συγκεκριμένου τύπου πλοίου ανέρχεται στις 6,000 περίπου πλοία ανά τον κόσμο με αρκετές αναφορές σε ατυχήματα. Ως εκ τούτου, πολλοί είναι αυτοί που έχουν ασχοληθεί με την ασφάλεια των πλοίων μεταφοράς φορτίου χύδην. Διάφοροι είναι οι κανονισμοί που έχουν θεσπιστεί σε παγκόσμιο αλλά και σε εθνικό επίπεδο, με σκοπό την ασφαλή φόρτωση, μεταφορά και εκφόρτωση του φορτίου έναντι εμφάνισης προβλημάτων ευστάθειας και τελικής απώλειας του πλοίου. Τέτοιοι κανονισμοί είναι η διεθνής σύμβαση για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής στη θάλασσα (International Convention for Safety of Life at Sea, SOLAS), ο διεθνής κώδικας για την ασφαλή διαχείριση (International Safety Management, ISM Code), ο κώδικας για την ασφαλή πρακτική για την φόρτωση και εκφόρτωση των πλοίων μεταφοράς φορτίου χύδην (Code of practice for the safe loading and unloading of bulk carriers, BLU Code), ο διεθνής ναυτιλιακός κώδικας για τα επικίνδυνα αγαθά (International Maritime Dangerous Goods Code, IMDG Code), οι κανονισμοί για τα επικίνδυνα υλικά που μεταφέρονται χύδην (Dangerous Bulk Material Regulations), ο καναδικός κώδικας ασφαλής πρακτικής για τα στερεά φορτία που μεταφέρονται χύδην (Canadian Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes), ο διεθνής ναυτιλιακός κώδικας για τα στερεά φορτία που μεταφέρονται χύδην (International Marine Solid Bulk Cargoes Code, IMSBC code) κ.α.. Παρακάτω αναλύονται οι κυριότεροι από τους κανονισμούς αυτούς.

4.1 International Marine Solid Bulk Cargoes Code

Το πρόβλημα της μεταφοράς φορτίων χύδην αναφέρθηκε για πρώτη φορά στη διεθνή διάσκεψη για την προστασία της ανθρώπινης ζωής στη θάλασσα (SOLAS) το 1960, και αυτή ήταν η αρχή για την πρώτη έκδοση του κώδικα για την ασφαλή πρακτική για τα στερεά φορτία χύδην (Code of Safe Practice for Solid Cargoes, BC code, 1965), η οποία εγκρίθηκε ως συμβουλευτική. Ωστόσο, ο κώδικας αυτός δεν εξασφάλιζε την ασφαλή μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων, με αποτέλεσμα το Σεπτέμβριο του 2003 να δημιουργηθεί μια υπό-επιτροπή του IMO για τα επικίνδυνα φορτία, τα στερεά φορτία και τα εμπορευματοκιβώτια, η λεγόμενη “DSC Sub-Committee”, η οποία καθιστά την εφαρμογή του κώδικα υποχρεωτική σε ολόκληρο τον κόσμο. Ο νέος υποχρεωτικός κώδικας ονομάζεται “Διεθνής Ναυτιλιακός Κώδικας για τα στερεά φορτία που μεταφέρονται χύδην - International Marine Solid Bulk Cargoes Code, IMSBC code” και είναι, στην πραγματικότητα, ο αναθεωρημένος

BC code. Το Δεκέμβριο του 2008, ο κώδικας IMSBC μαζί με τις τροποποιήσεις της SOLAS (chapter VI/part A and B, chapter VII/part A-I) εγκρίνεται ως υποχρεωτικός με το ψήφισμα MSC. 268(85), ενώ από την 1 Ιανουαρίου το 2011 έχει τεθεί σε ισχύ. Παρά το γεγονός ότι ο κώδικας είναι υποχρεωτικός, οι παράγραφοι 11 έως 13 παραμένουν απλώς συμβουλευτικές. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι απαιτήσεις για τη μεταφορά σιτηρών καλύπτονται από άλλο κώδικα, τον κώδικα για την ασφαλή μεταφορά σιτηρών (International Grain Code, 1991).

Πρωταρχικός στόχος του κώδικα είναι να διευκολύνει την ασφαλή αποθήκευση και μεταφορά των στερεών φορτίων που μεταφέρονται χύδην, να δώσει πληροφορίες για τους πιθανούς κινδύνους, καθώς και να δώσει οδηγίες για τις διαδικασίες που θα υιοθετηθούν αφού η φόρτωση έχει ολοκληρωθεί. Γενικά, δίνονται οδηγίες για προφυλάξεις κατά τη φόρτωση, τη μεταφορά και την εκφόρτωση του φορτίου. Οι ιδιαίτεροι κίνδυνοι, στους οποίους αναφέρεται ο κώδικας, είναι οι κατασκευαστικές αστοχίες που οφείλονται στη λανθασμένη κατανομή του φορτίου, η ρευστοποίηση του φορτίου που προκαλεί την απώλεια της ευστάθειας του πλοίου στην άθικτη κατάσταση κατά τη διάρκεια του ταξιδιού και η χημική αντίδραση των φορτίων.

Αναλυτικότερα, ο κώδικας αναφέρεται σε ένα μεγάλο αριθμό φορτίων, για τα οποία έχει ορίσει ένα συγκεκριμένο κωδικό, τον Bulk Cargo Shipping Name (BCSN), σύμφωνα με τον οποίο προσδιορίζετε το φορτίο κατά τη μεταφορά του δια θαλάσσης. Ο κωδικός αυτός, θα πρέπει να συμπληρώνεται με έναν αριθμό των Ηνωμένων Εθνών (UN number) εάν το φορτίο είναι επικίνδυνο και με τη λέξη «WASTE» εάν το φορτίο προορίζεται για περαιτέρω επεξεργασία. Εάν το φορτίο έχει αριθμό UN, τότε θα πρέπει να ταξινομηθεί σε κλάση.

Επιπλέον, το κάθε φορτίο ανήκει σε μία από τις ομάδες φορτίων, οι οποίες όπως αναφέρονται στον κώδικα είναι η ομάδα Α (Group A), όπου σε αυτήν ανήκουν τα φορτία που μπορεί να ρευστοποιηθούν εάν φορτωθούν στο πλοίο με περιεκτικότητα υγρασίας μεγαλύτερη από το μεταβαλλόμενο όριο υγρασίας (TML), η ομάδα Β (Group B), όπου ανήκουν τα φορτία που ενέχουν κάποιο χημικό κίνδυνο και μπορεί να προκαλέσουν επικίνδυνες καταστάσεις για το πλοίο και η ομάδα Γ (Group C), στην οποία ανήκουν τα φορτία που ούτε ρευστοποιούνται ούτε προκαλούν κάποιο χημικό κίνδυνο. Στον κώδικα, υπάρχουν ειδικές παράγραφοι για την ασφαλή φόρτωση και μεταφορά φορτίων των ομάδων Α και Β, καθώς και για τα στερεά απόβλητα που μεταφέρονται χύδην.

Για την ασφαλή μεταφορά του φορτίου, ο ναυλωτής πρέπει να ενημερώσει τον πλοίαρχο για τις ιδιότητες του φορτίου. Οι πληροφορίες για το φορτίο καταγράφονται σε μια ειδική φόρμα που περιλαμβάνει τον κωδικό BCSN του φορτίου, την ομάδα (Α και Β, Α, Β ή C), την κλάση του σύμφωνα με τον IMO, την ολική ποσότητα του φορτίου που πρόκειται να φορτωθεί, τον αριθμό UN, το συντελεστή στοιβασίας, τις διαδικασίες για τη διευθέτηση του φορτίου, την πιθανότητα ολίσθησης και την γωνία ανάπαυσης, το επίπεδο υγρασίας του

φορτίου και το μεταβαλλόμενο όριο υγρασίας (TML) εάν υπάρχει πιθανότητα να ρευστοποιηθεί το φορτίο, την πιθανότητα δημιουργίας υγρής βάσης, τα τοξικά και εύφλεκτα αέρια που μπορεί να παράξει το φορτίο, την ευφλεκτότητα, την τοξικότητα, τη διαβρωτικότητα και την τάση μείωσης του οξυγόνου που έχει το φορτίο, τις ιδιότητες αυτοθέρμανσης που έχει το φορτίο, τις ιδιότητες των εύφλεκτων αερίων όταν έλθουν σε επαφή με το νερό, τις ραδιενεργές ιδιότητες και οποιαδήποτε άλλη πληροφορία για το φορτίο που απαιτείται από τις εθνικές αρχές.

Η αξιολόγηση της αποδοχής του φορτίου για την ασφαλή μεταφορά του, γίνεται με την πραγματοποίηση ενός σωστού δειγματοληπτικού ελέγχου, κάποιων δοκιμών και της υπογραφής των κατάλληλων πιστοποιητικών δοκιμών. Ειδικά πιστοποιητικά υπάρχουν για τα επικίνδυνα φορτία και για τα φορτία που μπορεί να ρευστοποιηθούν. Πιο συγκεκριμένα τα φορτία που ανήκουν στην ομάδα Α θα πρέπει να αποδέχονται για φόρτωση μόνο όταν η περιεκτικότητά τους σε υγρασία είναι μικρότερη από το μεταβαλλόμενο όριο υγρασίας (TML), εάν αυτό δεν ισχύει τότε, ανεξάρτητα από τις πιέσεις των φορτωτών, η φόρτωση δε θα πρέπει να πραγματοποιείται. Οι δοκιμές για τον προσδιορισμό του πραγματικού ποσοστού υγρασίας, θα πρέπει να πραγματοποιούνται παίρνοντας αντιπροσωπευτικό δείγμα από το ίδιο το φορτίο λίγες ημέρες, όχι πάνω από 7, πριν τη φόρτωση και από ειδικά εκπαιδευμένο άτομο. Αν οπτικά φανεί κάτι διαφορετικό στη περιεκτικότητα σε υγρασία του φορτίου, τότε θα πρέπει να εξεταστούν και άλλα δείγματα, και είναι πιθανό κάποια τμήματα του φορτίου τελικά να απορριφθούν. Για να καθορισθεί η TML, η δοκιμή θα πρέπει να γίνει το πολύ έξι μήνες πριν από την ημέρα της φόρτωσης. Παρόλα αυτά, δεν είναι δυνατό να καθορισθεί μια και μοναδική μέθοδος δειγματοληψίας για όλα τα φορτία, τα χαρακτηριστικά του κάθε φορτίου είναι αυτά που θα καθορίσουν τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί. Τέλος, υγρά φορτία δεν θα πρέπει να στοιβάζονται στον ίδιο χώρο που θα μπει το φορτίο αυτό και γενικά θα πρέπει να εμποδίζεται η είσοδος θαλασσινού νερού στο χώρο φορτίου.

Στα παραρτήματα του κώδικα αναφέρονται επιγραμματικά όλα τα φορτία που πρέπει να εναρμονίζονται με αυτόν καθώς επίσης και οι ιδιότητές τους, τα χαρακτηριστικά, οι κίνδυνοι και οι απαιτήσεις τους για φόρτωση, στοιβασία, διαχωρισμό, μεταφορά, καθαριότητα, εξαερισμό και ειδικές προφυλάξεις. Επιπρόσθετα, αναφέρονται διάφορες εργαστηριακές δοκιμές που πρέπει να γίνονται στο φορτίο πριν τη φόρτωσή του. Τέτοιες δοκιμές είναι:

- Flow Table Test, Penetration Test και Proctor/ Fagerberg Test, είναι οι δοκιμές που γίνονται για τα φορτία που μπορεί να ρευστοποιηθούν και προσδιορίζουν τη μέγιστη περιεκτικότητα του φορτίου σε υγρασία (TML)
- Tilting Box Test, είναι η δοκιμή που πραγματοποιείται για τον προσδιορισμό της γωνίας ανάπαυσης υλικών με διάμετρο κόκκων μέχρι 10mm.

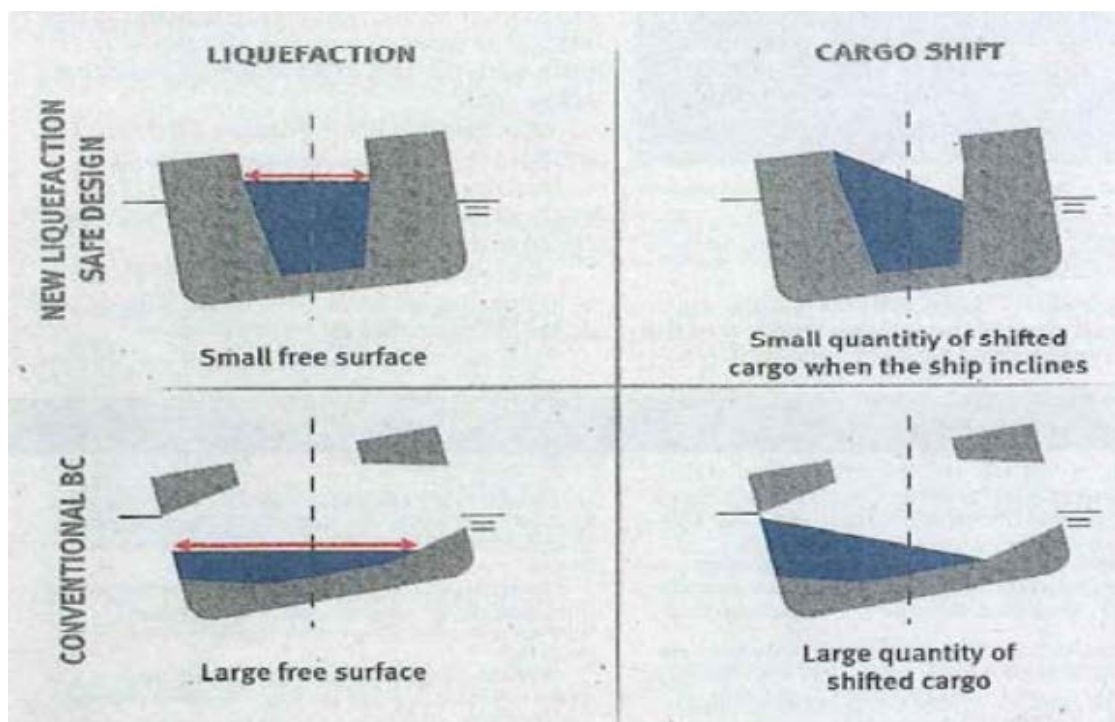
- Trough Test, με αυτή τη δοκιμή μπορεί να υπολογισθεί η τάση ορισμένων λιπασμάτων για αυτοσυντηρούμενη αποσύνθεση
- Test of Resistance to Detonation, είναι η δοκιμή η οποία πραγματοποιείται με σκοπό να βρεθεί ο βαθμός εκρηκτικότητας του υλικού
- Self-heating Test for Charcoal, είναι η δοκιμή αυτοθέρμανσης του άνθρακα

Το γεγονός ότι κάποια φορτία που ενδέχεται να ρευστοποιηθούν, όπως είναι το μέταλλο του σιδήρου και του νικελίου, δεν περιλαμβάνονται στον κώδικα προκαλεί αβεβαιότητα. Ωστόσο, ο κώδικας αναγνωρίζει ότι ορισμένα φορτία που μπορεί να ρευστοποιηθούν, μπορεί να μην αναφέρονται σε αυτόν, αλλά τονίζει ότι όλα τα φορτία που αποτελούνται μερικώς ή εξολοκλήρου από λεπτά σωματίδια και έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, μπορεί να ρευστοποιηθούν (Appendix 3.2.1, IMSBC Code). Μάλιστα, έχει γίνει πρόταση από τη Γαλλία για ένταξη του μεταλλεύματος νικελίου στην ομάδα A (Gard News 205, 2012). Έτσι, κάθε φορτίο που αποτελείται από λεπτά σωματίδια (μικρότερα από 1mm), ανεξάρτητα από το εάν αναφέρεται στον κώδικα ή όχι, και είναι υγρό θα πρέπει πριν τη φόρτωση να ελέγχεται με δοκιμές για τα χαρακτηριστικά του.

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο κώδικας θα πρέπει να αναθεωρείται κάθε δύο χρόνια. Έτσι, έχει ήδη εκδοθεί ο IMSBC Code and Supplement 2012 (MSC. 318 (89)), προς αντικατάσταση του IMSBC Code 2009, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις αρχές του 2012. Ο αναθεωρημένος κώδικας καθίσταται υποχρεωτικός από τον Ιανουάριο του 2013. Στον αναθεωρημένο κώδικα οι τροποποιήσεις αφορούν την εφαρμογή και υλοποίηση των πιστοποιητικών δοκιμών, τις διαδικασίες δειγματοληψίας και συμπληρωματικές διαδικασίες δοκιμών για τον προσδιορισμό της δυνατότητας ρευστοποίησης, καθώς και την αναθεώρηση ορισμένων υφιστάμενων προγραμμάτων για τη μεταφορά του φορτίου και την ανάπτυξη νέων προγραμμάτων για συγκεκριμένα φορτία.

Η DSC Sub- Committee (DSC 17) έχει κάνει τα πρώτα βήματα για την επόμενη αναθεώρηση του κώδικα όπου πρόκειται να εγκριθεί από τη MSC 92 το Μάιο του 2013, ώστε να τεθεί σε ισχύ τον Ιανουάριο του 2015. Αρχικά έχει προταθεί η εφαρμογή μίας νέας δοκιμής, της Vibration Table with Penetration Bit Test (VTPB test). Η δοκιμή αυτή είναι κατάλληλη για τα μεταλλεύματα του νικελίου τα οποία αποτελούνται από μεγάλα σωματίδια, μέχρι 30mm, και προέρχονται από τα ορυχεία της New Caledonia. Μία ακόμα πρόταση που αφορά, και πάλι, τις χώρες από τις οποίες εξορύσσεται το μέταλλο του νικελίου είναι οι τοπικές αρχές να αναπτύξουν ένα σύστημα για σωστή δειγματοληψία, δοκιμή και πιστοποίηση τέτοιων φορτίων καθώς και ένα κατάλληλο σύστημα ελέγχου και επιβολή της αρμόδιας αρχής. Επιπλέον, η ανάπτυξη της λειτουργικής καθοδήγησης των ναυτικών που εργάζονται σε πλοία μεταφοράς τέτοιων φορτίων. Τελευταία αλλά εξίσου σημαντική είναι η προώθηση ενός ειδικά κατασκευασμένου πλοίου (Specially Constructed Cargo Ship - SCCS)

ή η τροποποίηση των ήδη υπαρχόντων πλοίων, για την ασφαλή μεταφορά των φορτίων που μπορεί να ρευστοποιηθούν, μία τυπική μέση τομή του οποίου φαίνεται στην εικόνα 12. Πιο συγκεκριμένα, ο Ιταλικός νηογνώμονας (RINA) τον Ιούλιο του 2011 ανακοίνωσε κάποια αυστηρά πρότυπα τροποποίησης ή σχεδιασμού των πλοίων μεταφοράς φορτίου χύδην, για να μπορέσουν να μεταφέρουν με ασφάλεια οποιοδήποτε μέταλλευμα σε οποιαδήποτε υγρασία. Μάλιστα, έχει ήδη κατασκευαστεί το πρώτο αναγνωρισμένο πλοίο ειδικού τύπου μεταφοράς μεταλλεύματος του νικελίου (Jules Garnier II, 27,200 DWT), νηολογημένο από τον Ιαπωνικό Νηογνώμονα (22 Οκτωβρίου 2012). Τελειώνοντας, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το Σεπτέμβριο του 2013 θα πραγματοποιηθεί η DSC 18 για την τελειοποίηση του προγράμματος για την αναθεωρημένη έκδοση του κώδικα το 2017.



Εικόνα 12. Τυπική μέση τομή ειδικά κατασκευασμένου πλοίου που προορίζεται για τη μεταφορά μεταλλευμάτων, όπως έχει προταθεί από τον Ιαπωνικό Νηογνώμονα (NK Class). Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της μέσης τομής είναι η μικρή ελεύθερη επιφάνεια που δημιουργείται έπειτα από ρευστοποίηση του φορτίου, καθώς και η μικρή ποσότητα φορτίου που μετατοπίζεται σε περίπτωση μετατόπισης φορτίου. (Lomas, 2012).

Το κεφάλαιο VI του κανονισμού 1-2 της SOLAS παρέχει ένα γενικό πλαίσιο για τη μεταφορά όλων των φορτίων και αναφέρει ότι “η μεταφορά των στερεών φορτίων χύδην εκτός των σιτηρών είναι σε συμμόρφωση με τις σχετικές διατάξεις του Κώδικα IMSBC”. Αυτό σημαίνει ότι οι διατάξεις του Κώδικα IMSBC είναι πλέον υποχρεωτικές βάσει της σύμβασης SOLAS.

4.3 Code of Practice for the Safe Loading and Unloading of Bulk Carriers

Ο κώδικας για την ασφαλή πρακτική για την φόρτωση και εκφόρτωση των πλοίων μεταφοράς φορτίου χύδην (BLU Code), αναφέρεται στον κανονισμό 7 του Κεφαλαίου VI, Μέρος Β της SOLAS. Ασχολείται κυρίως με τις ρυθμίσεις μεταξύ του τερματικού λιμένα και του πλοίου, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής και αποτελεσματική λειτουργία του φορτίου στο λιμάνι. Η απόφαση αυτή εγκρίθηκε από τον IMO με ψήφισμα A.862 (20), ωστόσο, οι διατάξεις της είναι προς το παρόν μόνο συμβουλευτικές.

4.4 International Safety Management

Ο διεθνής κώδικας ασφαλούς διαχείρισης, που εκδίδεται από τον IMO, έχει ως στόχο να καθιερώσει ένα διεθνές πρότυπο για την ασφαλή διαχείριση και λειτουργία των πλοίων, ενώ έχει υιοθετηθεί και ενσωματωθεί στη SOLAS, και ως εκ τούτου οι διατάξεις του είναι υποχρεωτικές. Μια από τις βασικές διατάξεις του κώδικα ISM είναι ότι κάθε πλοίο θα πρέπει να έχει ένα λειτουργικό σύστημα διαχείρισης της ασφάλειας. Σε σχέση με τη μεταφορά των χύδην φορτίων (ISM, Section 8), μια σημαντική διάταξη του είναι ότι για δυνητικά επικίνδυνες καταστάσεις πρέπει να εκτιμάται ο κίνδυνος, και οι διαδικασίες που εφαρμόζονται για την αντιμετώπιση τέτοιων καταστάσεων. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει (North of England P&I, 2010):

1. Να πραγματοποιείται διεξοδική αξιολόγηση του κινδύνου πριν από τη φόρτωση του φορτίου
2. Να γίνονται οι κατάλληλοι υπολογισμοί ευστάθειας μετά τη φόρτωση του φορτίου και πριν την αναχώρηση του πλοίου από το λιμάνι
3. Ο πλοίαρχος να γνωρίζει λιμένες καταφυγής για τη προγραμματισμένη διαδρομή του πλοίου
4. Σε περίπτωση προβλήματος κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, να υπάρχει άμεση επικοινωνία με τον πλοιοκτήτη

5. Σε περίπτωση εμφάνισης της ρευστοποίησης, ο πλοίαρχος να κατευθυνθεί προς το πλησιέστερο λιμάνι

4.5 Canadian Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes

Στα πλαίσια των εθνικών κανονισμών του Καναδά, έχει αναπτυχθεί ο καναδικός κώδικας ασφαλής πρακτικής για τα στερεά φορτία που μεταφέρονται χύδην (Canadian Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes, 1984). Η αναθεωρημένη έκδοση του κώδικα έχει ως σκοπό τη δημιουργία ενός προτύπου για την ασφαλή στοιβασία και μεταφορά των στερεών φορτίων χύδην, με εξαίρεση τα σιτηρά τα οποία καλύπτονται από άλλο κώδικα. Σε αυτόν τον κώδικα ενσωματώνονται όλες οι συστάσεις που περιέχονται στην τελευταία έκδοση του κώδικα IMSBC, σε συνδυασμό με συγκεκριμένες καναδικές απαιτήσεις, ιδίως ότι αφορά τα συμπτκνώματα.

Ο εθνικός κώδικας του Καναδά συμμορφώνεται με όλους τους κανονισμούς και τις απαιτήσεις για τη φόρτωση, μεταφορά και εκφόρτωση των φορτίων που μεταφέρονται χύδην. Αναλυτικότερα, συμμορφώνεται με τους κανονισμούς των επικίνδυνων υλικών που μεταφέρονται χύδην (Dangerous Bulk Material Regulations), τους κανόνες ασφαλούς πρακτικής για τις εργασίες (Safe Working Practices Regulations), τον Διεθνή ναυτιλιακό κώδικα για τα επικίνδυνα αγαθά (International Maritime Dangerous Goods Code, IMDG Code), τον οδηγό παροχής πρώτων βοηθειών για χρήση στα ατυχήματα που συμπεριλαμβάνουν τα προϊόντα (Medical First Aid Guide for Use in Accidents Involving Goods, MFAG), τον κώδικα για την ασφαλή πρακτική για τα στερεά φορτία χύδην (Code of Safe Practice for Solid Cargoes, BC code) και τη συμβουλή προς τους ναυλωτές για την φόρτωση του coal (Notice to Shipmasters Loading Coal, TP 10944E).

Στον κώδικα γίνονται ειδικές αναφορές για την προστασία του προσωπικού και του πλοίου καθώς και για τα φορτία που μπορεί να ρευστοποιηθούν. Τα φορτία που μπορεί να ρευστοποιηθούν, σύμφωνα με τον κώδικα, είναι τα συμπτκνώματα, ορισμένοι άνθρακες και άλλα υλικά τα οποία έχουν παρόμοιες ιδιότητες με αυτά. Όμως, παρά το γεγονός ότι στο παράρτημα Α του κώδικα IMSBC αναφέρονται, ως φορτία που μπορεί να ρευστοποιηθούν, αυτά που αποτελούνται από ένα μίγμα μικρών σωματιδίων, τα φυσικά μεταλλεύματα περιλαμβάνουν ένα σημαντικό ποσοστό από μεγάλα σωματίδια, και όπως γνωρίζουμε μπορούν να ρευστοποιηθούν και αυτά, αλλά δεν συμπεριλαμβάνονται στον κώδικα. Έτσι, ο κύριος σκοπός του κώδικα, όσον αφορά τα φορτία αυτά, είναι να επιστήσει την προσοχή των πλοίαρχων στον κίνδυνο που προκαλείται από την μετατόπιση του φορτίου και να περιγράψει τις προφυλάξεις που κρίνονται αναγκαίες για την ελαχιστοποίηση αυτού του κινδύνου. Παράλληλα, για τα συμπτκνώματα και τα άλλα φορτία που μεταφέρονται χύδην και έχουν παρόμοιες ιδιότητες, υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις για τη διευθέτησή τους στα

κύτη των πλοίων που αναχωρούν από τα Καναδικά λιμάνια, ανεξάρτητα εάν το φορτίο έχει προορισμό ή έχει φορτωθεί σε κάποια άλλη περιοχή εκτός του Καναδά.

Με σκοπό να μπορούν να τεθούν σε ισχύ όλες οι αναγκαίες προφυλάξεις για την ασφαλή μεταφορά του φορτίου, ο ναυλωτής θα πρέπει να παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τη φύση του φορτίου, όπως είναι το σημείο ροής υγρασίας (FMP), ο συντελεστής στοιβασίας, η περιεκτικότητα του φορτίου σε υγρασία, η γωνία ανάπαυσης κ.α.. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ένας σωστός δειγματοληπτικός έλεγχος, κάποιες δοκιμές και υπογράφονται τα κατάλληλα πιστοποιητικά δοκιμών. Ως εκ τούτου, όταν η περιεκτικότητα του φορτίου σε υγρασία είναι υψηλότερη από το σημείο ροής υγρασίας ή έχει προηγηθεί περίοδος συνεχούς βροχής ή χιονιού, το φορτίο δε θα πρέπει να φορτώνεται. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ειδικά προσαρμοσμένα πλοία που μπορούν να μεταφέρουν συμπυκνώματα με περιεκτικότητα σε υγρασία υψηλότερη από το σημείο ροής υγρασίας, εάν έχει εκδοθεί έγκυρο πιστοποιητικό έγκρισής του. Το έγγραφο αυτό θα πρέπει να αναφέρει σαφώς «Για την μεταφορά συμπυκνώματος με περιεκτικότητα σε υγρασία υψηλότερη από το σημείο ροής υγρασίας», αλλά και να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις της ευστάθειας.

Τέλος, στο παράρτημα E του κώδικα αναφέρονται οι διαδικασίες δειγματοληψίας για τα αποθέματα των συμπυκνωμάτων, ενώ στη συνέχεια υπάρχει μία προσθήκη, η οποία αναφέρεται στις ευθύνες που έχει ο λιμενάρχης πριν και κατά τη διάρκεια της φόρτωσης του φορτίου, καθώς και ο τελικός έλεγχος της φόρτωσης, για να διαπιστώσει εάν τηρούνται όλες οι απαιτούμενες προϋποθέσεις.

4.6 Οδηγίες, Εγκύκλιοι και Ενημερωτικά δελτία

Τα τελευταία χρόνια, ο διεθνής σύλλογος προστασίας και ασφάλειας (International Group of P&I Clubs - IG P&I Clubs) έχει συνεργαστεί με άλλους φορείς, όπως είναι το διεθνές ναυτικό επιμελητήριο (ICS), η Intercargo και η BIMCO, με σκοπό να συνειδητοποιηθεί το πρόβλημα της ρευστοποίησης και να βρεθούν πρακτικές λύσεις, ώστε να μπορέσουν να τεθούν στον IMO. Έτσι έχουν εκδοθεί αρκετές εγκύκλιοι, οδηγίες και ενημερωτικά δελτία, για να βοηθηθούν τα μέλη να προσπαθήσουν να αποφύγουν τα προβλήματα και να λάβουν τις κατάλληλες προφυλάξεις. Κάποιες από τις σημαντικότερες εκδόσεις ακολουθούν.

- 26/3/2010 IG Circular: Carriage of Direct Reduced Iron (DRI) by sea – changes to the IMO code of safe practice for solid bulk cargo
- 7/12/2010 IG Circular: Carriage of Nickel Ore from Indonesia, New Caledonia and the Philippines
- 27/1/2011 IG Circular: Indonesia and the Philippines – safe carriage of Nickel Ore cargoes

- 22/2/2011 IG Bulletin: Carriage of Nickel Ore from Indonesia and Philippines, precautionary preload surveys
- 1/2/2012 Inco Guide for Safe Loading of Nickel Ore: NICKEL ORE STOP, THINK, VERIFY
- 1/6/2012 IG Circular: Dangers of carrying Nickel Ore from Indonesia and the Philippines (σε συνδυασμό με την εγκύκλιο 27/1/2011)
- 25/7/2012 BIMCO Special Circular: BIMCO Solid Bulk Cargo that can Liquefy Clause for Charter Parties
- 14/12/2012 IG Bulletin: Iron Ore fines that may contain DRI (C)

Ο όρος “spontaneous liquefaction” επινοήθηκε από τους Terzaghi & Peck το 1948, ο πρώτος μάλιστα, θεωρείται ο “πατέρας” της εδαφομηχανικής, αφού είναι ο πρώτος που ασχολήθηκε με τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του εδάφους. Έκτοτε έχει απασχολήσει αρκετά την επιστημονική κοινότητα ποικίλων κλάδων, κυρίως λόγω της υψηλής συχνότητας εμφάνισης και της εξαιρετικής επικινδυνότητας του φαινομένου, οδηγώντας στην πραγματοποίηση πολλών μελετών. Οι σημαντικότερες μελέτες αφορούν κυρίως πειραματικούς ελέγχους σε περιοχές έρευνας όπως είναι η σεισμολογία και η εδαφομηχανική. Παρόλα αυτά, η τεχνολογική ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών, έχει οδηγήσει στην παρουσίαση και αριθμητικών μεθόδων για τον προσδιορισμό της φύσης του φαινομένου της ρευστοποίησης. Στην συνέχεια του κεφαλαίου, πρόκειται να γίνει μία κριτική ανασκόπηση των κυριότερων πειραματικών και αριθμητικών εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί σε αυτόν τον ερευνητικό τομέα. Όσον αφορά τον ναυπηγικό τομέα, ο οποίος θα απασχολήσει την παρούσα εργασία, οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί είναι ελάχιστες και θα παρουσιαστούν στον τέλος του κεφαλαίου.

5.1 Πειραματικές Μέθοδοι

Οι κύριες πειραματικές μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό της ρευστοποίησης είναι η κυκλική απλή διάτμηση, κυκλική τριαξονική διάτμηση, η κυκλική στρεπτική διάτμηση και η δοκιμή φυγοκέντρισης.

Από τους πρωτοπόρους που ασχολήθηκαν με την στατική ρευστοποίηση είναι οι Bjerrum et al (1961), οι Lee & Fitton (1968) και ο Castro (1969). Ο τελευταίος, έδειξε ότι η ξαφνική περίσσεια του νερού λόγω της πίεσης των πόρων, η οποία προκαλείται από μονοτονική διάτμηση υπό μη στεγνές συνθήκες, οδηγεί στην ρευστοποίηση των στρωμάτων της άμμου. Από τότε, αρκετές είναι οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό της δυνατότητας ρευστοποίησης των κοκκωδών υλικών. Οι τρεις κύριες κατηγορίες μελέτης (Green, 2001) είναι η προσέγγιση με βάση τη δύναμη, την παραμόρφωση και την ενέργεια. Η ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την αξιολόγηση του δυναμικού της ρευστοποίησης είναι η απλοποιημένη δυναμική προσέγγιση που αναπτύχθηκε αρχικά από τους Seed & Idriss (1971) και τον Whitman (1971). Τα βασικά κριτήρια για τις περισσότερες έρευνες είναι το επίπεδο της ισοδύναμης διατμητικής τάσης και ο αριθμός των κύκλων που πραγματοποιούνται. Οι Seed et al. (1975) επέλεξαν την ισοδύναμη διατμητική τάση ως το 65% της μέγιστης διατμητικής τάσης που προκαλείται από τη Γη. Ωστόσο, οι Ishihara & Yasuda (1975) με την χρησιμοποίηση μιας σειράς δοκιμών κυκλικής τριαξονικής και

στρεπτικής διάτμησης, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ισοδύναμη τάση είναι 57% για 20 κυκλικές φορτίσεις.

Έχει παρατηρηθεί πειραματικά, ότι η απαιτούμενη ποσότητα της κυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης για την έναρξη της πίεσης των πόρων επηρεάζεται λιγότερο από την αρχική αποτελεσματική δύναμη και την σχετική πυκνότητα του εδάφους, καθώς και την περιεκτικότητα του εδάφους σε ίνες (Dobry & Ladd (1980), Kramer (1996) και Mulilis et al.(1975)). Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, οι Dobry et al. (1982) πρότειναν μια εναλλακτική προσέγγιση όπου η διατμητική παραμόρφωση ορίζεται ως το όριο για την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης και την επακόλουθη περίσσεια του νερού λόγω πίεσης των πόρων. Στη συνέχεια, το όριο της διατμητικής παραμόρφωσης συγκρίνεται με τη διατμητική παραμόρφωση που προσδίδεται από κυκλική φόρτιση. Συνεπώς, όταν η διατμητική παραμόρφωση υπερβεί το όριο της διατμητικής παραμόρφωσης, η περίσσεια του νερού λόγω της πίεσης των πόρων εμφανίζεται. Η ισχυρή σχέση μεταξύ της κυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης και της περίσσειας του νερού λόγω της πίεσης των πόρων, η οποία επιτρέπει την πρόβλεψη της περίσσειας του νερού λόγω της πίεσης των πόρων με μεγαλύτερη ακρίβεια, είναι το κύριο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης (Kramer, 1996). Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το γεγονός ότι η εκτίμηση των κυκλικών δυνάμεων είναι πιο δύσκολη από εκείνη της κυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης (Seed, 1980).

Οι παραπάνω μελέτες αφορούν την καθαρή άμμο ή την άμμο με μικρή περιεκτικότητα σε πρόσθετα υποθέτοντας ότι η συμπεριφορά του μίγματος άμμου και λάσπης είναι παρόμοια με εκείνη της καθαρής άμμου. Οι πιο πρόσφατες μελέτες γύρω από το φαινόμενο της ρευστοποίησης των υλικών που αποτελούνται από μικρά σωματίδια, έχουν δείξει ότι η ρευστοποίηση μπορεί να συμβεί και σε κορεσμένα υλικά αναμειγμένα με μη πλαστικά πρόσθετα. Πιο συγκεκριμένα, έρευνες όπως αυτές των Zlatovic & Ishihana (1995), Lade & Yamamuro (1997), Thevanayagam et al. (1997), Thevanayagam (1998), Yamamuro & Lade (1998), Baziar & Dobry (1995), Amini et al.(2000), Naeini (2001), Koster (1994), Singh (1996), Xenaki & Athanasopoulos (2003), Stamatopoulos (2010), και Vaid et al.(1990), έδειξαν ότι η άμμος αναμειγμένη με λάσπη ρευστοποιείται πιο εύκολα συγκριτικά με την καθαρή άμμο. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης και πίεσης των πόρων σε δείγματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε πρόσθετα είναι αρκετά διαφορετική από αυτά της καθαρής άμμου.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου είδους δοκιμών είναι αυτές των Xenaki & Athanasopoulos (2003). Η συγκεκριμένη έρευνα είχε ως σκοπό την αξιολόγηση της αντίστασης στην εμφάνιση ρευστοποίησης σε ένα δείγμα από λεπτόκοκκη, κορεσμένη άμμο αναμειγμένη με λάσπη, έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά της άμμου στην προσθήκη μη πλαστικών πρόσθετων. Οι δοκιμές έγιναν σε δείγματα με διαφορετική

περιεκτικότητα σε πρόστιμα, συμπεριλαμβανομένων και των δειγμάτων καθαρής άμμου και καθαρής λάσπης. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι η ρευστοποίηση συνέβη όταν η περίσσεια του νερού λόγω της πίεσης των πόρων, έγινε ίση με την αρχική τάση ενοποίησης του δείγματος. Το τελικό συμπέρασμα που εξήχθη από την έρευνα ήταν το εξής “για μία σταθερή τιμή της παγκόσμιας σταθεράς κενού και για αυξανόμενη περιεκτικότητα του μίγματος σε πρόστιμα από 0% έως 44%, η αντίσταση σε ρευστοποίηση μειώνεται σε σύγκριση με εκείνη της καθαρής άμμου. Αντιθέτως για μία σταθερή τιμή της παγκόσμιας σταθεράς κενού και για περιεκτικότητα σε πρόστιμα μεγαλύτερη του 44%, η τάση αυτή αντιστρέφεται και η αντίσταση σε ρευστοποίηση μειώνεται καθώς προστίθεται και άλλη ποσότητα προστίμων”.

Ωστόσο, μέχρι τότε κανείς δεν είχε ασχοληθεί με την επίδραση που μπορεί να έχουν οι στρώσεις άμμου και λάσπης. Καθοριστική σε αυτό ήταν η έρευνα των Naeini & Baziar (2004), η οποία πραγματευόταν τη συμπεριφορά τόσο του μίγματος άμμου και λάσπης όσο και των στρώσεων. Η εν λόγω έρευνα έδειξε ότι όσο η περιεκτικότητα σε λάσπη αυξάνεται μέχρι το 35%, και στις δύο περιπτώσεις, η διατμητική αντοχή μειώνεται, και είναι μικρότερη από αυτήν της καθαρής άμμου. Ειδικά για το δείγμα από στρώσεις άμμου και λάσπης, η αντοχή είναι ακόμα μικρότερη.

Μία πρωτοποριακή και αρκετά σημαντική έρευνα πραγματοποιήθηκε από τους Jin Liu et al. (2011). Αυτοί διερεύνησαν τη δυνατότητα ενίσχυσης ινών ως μία νέα μέθοδο για τη βελτίωση της αντίστασης σε ρευστοποίηση της άμμου. Για την πραγματοποίηση αυτής της έρευνας έγιναν κυκλικές δοκιμές διάτμησης σε κορεσμένα δείγματα με διαφορετική, κάθε φορά, περιεκτικότητα σε ίνες (ίνες πολυπροπυλενίου) και πυκνότητα άμμου (πυριτική άμμος No. 6). Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι μετά την αστοχία, τα ανεπεξέργαστα δείγματα παρουσίασαν συνεχή μείωση της διατμητικής τους αντοχής, ενώ τα ενισχυμένα με ίνες δείγματα έδειξαν διακυμάνσεις ακόμα και μετά τη διατμητική αστοχία, οι οποίες αυξάνονταν όσο αυξανόταν το ποσοστό της περιεκτικότητας σε ίνες. Παρόμοιες έρευνες ήταν στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος και παλαιότερα. Τέτοιες είναι οι έρευνες των Maher & Ho (1994), Santoni & Webster (2001), Zornberg (2002), Consoli et al. (1998, 2007, 2009), Heineck et al. (2005), Park & Ann Tan (2005), Yetimoglu et al. (2005), Diambra et al. (2007a, b, 2008a, b), Michalowski (2008), Ibraim et al. (2010), Tingle et al. (2002). Σύμφωνα με τους Tang et al. (2007), ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των τυχαία κατανεμημένων ινών, είναι η απουσία της πιθανής αδυναμίας του υλικού να αναπτύξει προσανατολισμό παράλληλα με τις ενισχύσεις.

Αντίθετα με τις προσεγγίσεις που βασίζονται στην δύναμη και την παραμόρφωση, αυτές που βασίζονται στην ενέργεια χρησιμοποιούν διάφορα μέτρα για την ενέργεια, όπως είναι οι βασικές παράμετροι για την ποσοτικοποίηση του φορτίου που μεταδίδεται στο υλικό από τη δόνηση, και την χωρητικότητα, δηλαδή το φορτίο που απαιτείται για την εμφάνιση της ρευστοποίησης. Η αξιολόγηση του δυναμικού της ρευστοποίησης χρησιμοποιώντας της ενεργειακή προσέγγιση, πραγματοποιείται είτε με τις προσεγγίσεις που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας τις ιστορικές υποθέσεις των δονήσεων, είτε χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των εργαστηριακών δοκιμών (Green, 2001).

Οι έρευνες που έχουν διεξαχθεί για την αξιολόγηση του δυναμικού της ρευστοποίησης και βασίζονται στη δυναμική ενέργεια είναι πολλές (Towhata & Ishihara (1985) και Liang et al (1995)). Τα τελευταία χρόνια, οι Green et al. (2000) ανέπτυξαν ένα μοντέλο με βάση την ενέργεια χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από ελεγχόμενες κυκλικές τριαξονικές δοκιμές σε δείγματα από άμμο, ενώ έχουν αναπτυχθεί και αρκετά μοντέλα που βασίζονται σε κυκλικές δοκιμές διάτμησης και φυγοκέντρισης, όπως είναι αυτά των Figueroa et al (1994), Liang(1995), Rokoff (1999) και Dief & Figueroa (2001). Οι περισσότερες από αυτές τις έρευνες χρησιμοποίησαν την ανάλυση μιας πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (Multiple linear regression, MLR).

Διάφορα πρότυπα με τη βοήθεια των υπολογιστών, δεδομένα ταξινόμησης και λογισμικά προγράμματα έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα με σκοπό την επίλυση προβλημάτων σε έργα του πολιτικού μηχανικού. Μέθοδοι αυτών των συστημάτων είναι οι Artificial neural networks (ANN), Support Vector machine (SVM), Relevance vector machine (RVM) και Bayesian updating. Αυτές οι μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί και για την αξιολόγηση του δυναμικού της ρευστοποίησης από τους Goh (1994, 2002), Cetin et al (2004), Pal (2006), Goh & Goh (2007), Samui (2007), Oommen et al (2008), Oommen & Baise (2010) και Oommen et al (2010) Ωστόσο, οι εφαρμογές αυτών των τεχνικών είναι αρκετά περιορισμένες.

Ο Genetic programming (GP) (Koza (1992), Banzhaf et al. (1998)) είναι μια συμβολική τεχνική βελτιστοποίησης, με μία μεγάλη ικανότητα να εξελίσσει τα προγράμματα των ηλεκτρονικών υπολογιστών με βάση τη θεωρία του Δαρβίνου. Η μελέτη των Alavi & Gandomi (2011) παρουσιάζει μία πολλά υποσχόμενη παραλλαγή του Genetic Programming (GP), τον Linear Genetic Programming (LGP) (Brameier & Banzhaf, 2007) και τον Multi Expression Programming (MEP) (Oltean & Dumitrasc, 2002) για την αξιολόγηση της αντίστασης της άμμου στην ρευστοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, οι τεχνικές LGP και MEP χρησιμοποιήθηκαν για να λάβουν γενικευμένες σχέσεις μεταξύ της ενέργειας ανά μονάδα όγκου που διαχέεται κατά τη διάρκεια της ρευστοποίησης και των αρχικών παραμέτρων. Για

τη σύγκριση των αποτελεσμάτων αναπτύχθηκαν μία παραδοσιακή ανάλυση GP, μία ανάλυση ευαισθησίας και μία παραμετρική ανάλυση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συσχετίσεις LGP και MEP έδωσαν καλές εκτιμήσεις της ενεργειακής ικανότητας της άμμου σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα από τη βιβλιογραφία.

Οι Ye et al. (2012), ανέπτυξαν ένα γενικευμένο μοντέλο με βάση το αρχικό μοντέλο που είχε προταθεί από τους Zhang et al. (2007) και εφάρμοσαν αριθμητικές προσομοιώσεις των κυκλικών τριαξονικών και μονοτονικών δοκιμών με τη μέθοδο Transformed Stress (TS Method) που προτάθηκε από τους Yao et al. (1999, 2000), με σκοπό να εξεταστεί η ικανότητα του μοντέλου να περιγράψει σωστά της συνεχή, ομαλή και ταχεία μεταβολή της ανισοτροπίας της άμμου κατά την εμφάνιση της ρευστοποίησης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι όταν η άμμος αρχίζει να ρευστοποιείται, η επιφάνεια στο δυναμικό χώρο περιστρέφεται γρήγορα, προκαλώντας συνεχείς και ραγδαίες μεταβολές στην ανισοτροπία της. Συγκρίνοντας τις αριθμητικές προσομοιώσεις με τα πειραματικά αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν από τους Yamada et al. (2010), το γενικευμένο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να παρουσιάσει τη θεμελιώδη συμπεριφορά της άμμου, όπως αυτή φαίνεται από τα πειραματικά δεδομένα.

Μόνο κάποιες ομάδες των ερευνητών, όπως είναι οι Wang et al (1997), Baziar & Jafariian (2007) και Baziar et al. (2011), έχουν λάβει υπόψη τους το σημαντικό ρόλο του περιεχομένου σε πρόστιμα, για την αξιολόγηση του δυναμικού της ρευστοποίησης. Οι Baziar et al. (2011) παρουσίασαν ένα μοντέλο πρόβλεψης για την εκτίμηση του ποσοστού της πυκνότητας της δυναμικής ενέργειας το οποίο απαιτείται για την έναρξη της ρευστοποίησης ενός μίγματος από άμμο και λάσπη. Τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης για το προτεινόμενο μοντέλο συμφωνούν με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα των προηγούμενων ερευνών. Επομένως, το ποσοστό της δυναμικής ενέργειας που απαιτείται για την έναρξη της ρευστοποίησης, αυξάνει με την αύξηση της αρχικής πίεσης, της σχετικής πυκνότητας και του μέσου μεγέθους των κόκκων. Η επίδραση των μη πλαστικών πρόσθετων στη δυναμική ενέργεια που απαιτείται για την ρευστοποίηση δείχνει μία πιο περίεργη συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, η αντίσταση στην ρευστοποίηση αυξάνεται με την αύξηση των προστίμων μέχρι 10-15%, ενώ για περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας σε πρόστιμα η αντίσταση στην ρευστοποίηση μειώνεται.

Τα τελευταία χρόνια, τα πλοία μεταφοράς φορτίων χύδην έχουν ταυτιστεί με τον υψηλό κίνδυνο της κατασκευαστικής αστοχίας, αλλά και της βύθισης τους. Τα συμπυκνώματα μεταλλευμάτων και άλλων παρόμοιων λεπτόκοκκων υλικών που μεταφέρονται δια θαλάσσης είναι αρκετά επικίνδυνα όταν μεταφέρονται χύδην, εξαιτίας της αυξημένης πιθανότητας εμφάνισης ρευστοποίησης. Ο Porek M. (2010) πραγματοποίησε μία έρευνα για την επίδραση των οργανικών πολυμερών ως πρόσθετα σε συμπυκνώματα μεταλλευμάτων, για το καθορισμό της δυνατότητας ρευστοποίησης τους. Με σκοπό, λοιπόν, να αποτραπεί η ολίσθηση και η μετατόπιση του φορτίου μέσα στο κύτος του πλοίου, βιοδιασπώμενα θερμοπλαστικά υλικά προστίθενται στα συμπυκνώματα μεταλλευμάτων. Τέτοια υλικά είναι τα πολυμερή που έχουν ως βάση τους το άμυλο, την κυτταρίνη και την πολυκαρπολακτόνη, τα οποία απορροφούν το νερό από τα σωματίδια του μεταλλεύματος και το ποσοστό της υγρασίας μεταφέρεται προς τα κάτω, με αποτέλεσμα να εμποδίζουν την αποβολή του νερού από τους πόρους του υλικού.

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν συμπυκνώματα σιδηρομεταλλεύματος, ένα λεπτόκοκκο υλικό το οποίο κρίνεται ως “υλικό του μπορεί να ρευστοποιηθεί όταν μεταφέρεται με περιεκτικότητα σε υγρασία πάνω από την TML”, ένα πολυμερές υλικό από θερμοπλαστικό άμυλο και παράγωγα κυτταρίνης, φυσικής προέλευσης, και ένα πολυμερές υλικό από άμυλο και πολυκαρπολακτόνη. Τα δείγματα των πολυμερών υλικών ήταν σε κοκκώδη μορφή. Τα πειράματα διεξήχθησαν για καθαρά δείγματα συμπυκνώματος και για μίγματα που περιέχουν 98% του συμπυκνώματος και 2% των πολυμερών υλικών. Τα δείγματα που δοκιμάστηκαν μπορούν να ρευστοποιηθούν, αφού η κατανομή του μεγέθους των κόκκων (διάμετρος κόκκου μικρότερη των 0,3mm) δεν αλλάζει σημαντικά πριν και μετά την προσθήκη των πολυμερών.

Έτσι, πραγματοποιήθηκαν τρία είδη δοκιμών, μία για την εκτίμηση της TML, μία για την διαπερατότητα των συμπυκνωμάτων και μία για τη μέτρηση της συνοχής και της εσωτερικής γωνίας τριβής. Στην πρώτη δοκιμή, αρχικά υπολογίστηκε η FMP με τη χρήση της δοκιμής Proctor/ Fagerberg Test, ενώ στη συνέχεια υπολογίστηκε θεωρητικά η TML. Όσον αφορά τη διαπερατότητα των συμπυκνωμάτων, αυτή χαρακτηρίζεται από το συντελεστή διαπερατότητας, ο οποίος είναι χαμηλός, και αναφέρεται στο ρυθμό με τον οποίο το νερό μπορεί να διαχυθεί μέσω των κενών των κόκκων. Η διαπερατότητα των συμπυκνωμάτων εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων, το σχήμα και τη διάταξη των κενών, το λόγο των κενών, το βαθμό κορεσμού και τη θερμοκρασία. Τέλος, για τη μέτρηση της συνοχής και της εσωτερικής γωνίας τριβής έγιναν δοκιμές διάτμησης με τη βοήθεια μίας συσκευής απευθείας διάτμησης.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών βασίζονται στη μέτρηση της TML και τη συνοχή και διαπερατότητα των υλικών. Η παρουσία του πολυμερούς υλικού στο δείγμα επηρεάζει τις αξίες της συνοχής και την εσωτερική γωνία τριβής. Η φύση και το μέγεθος της συμπίεσης των κοκκωδών υλικών, όπως είναι τα συμπυκνώματα σιδηρομεταλλεύματος, επηρεάζει σημαντικά την μηχανική συμπεριφορά τους. Η αύξηση των τιμών των φυσιολογικών τάσεων τείνει στη μείωση του βαθμού διαπερατότητας. Επομένως, τα πολυμερή υλικά εμποδίζουν την αποβολή του νερού από τους πόρους, την ολίσθηση και τη μετατόπιση του μεταλλικού συμπυκνώματος κατά τη αποθήκευσή του. Αυτά τα πολυμερή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως απορροφητές του νερού από μεταλλικά συμπυκνώματα, πριν από τη μεταφορά τους διά θαλάσσης. Τα υλικά αυτά είναι ιδιαίτερα ελκυστικά, επειδή βασίζονται σε φυσικούς ανανεώσιμους πόρους, τα οποία είναι φιλικά προς το περιβάλλον.

Μία ακόμα μελέτη, στον ναυπηγικό χώρο, πραγματοποιήθηκε από τον Jian - Ping (2011) με σκοπό να προσδιοριστεί κάτω από ποιες συνθήκες μπορεί ο πλοίαρχος να δεχθεί το μετάλλευμα του νικελίου για φόρτωση, καθώς και ποια αντισταθμιστικά μέτρα θα πρέπει να ληφθούν σε περίπτωση που το φορτίο αυτό έχει ρευστοποιηθεί μέσα στο χώρο φορτίου.

Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί από τον IMO (IMSBC Code) για τον προσδιορισμό της FMP έχουν ορισμένους περιορισμούς. Έτσι, ο Jian - Ping και η ομάδα του ανέπτυξαν τη συσκευή για τη δοκιμή «Vibration TML Testing». Η συσκευή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της TML των περισσότερων υλικών που μπορεί να ρευστοποιηθούν. Για την πραγματοποίηση της δοκιμής προστίθεται στο δείγμα μία ποσότητα νερού, έτσι ώστε η περιεκτικότητα σε υγρασία να φτάσει την FMP, και αρχίζει να δονείται για μία έως τρεις ώρες, ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού. Στη συνέχεια, το δείγμα χωρίζεται σε δέκα στρώσεις των 100mm, προσδιορίζεται η περιεκτικότητα σε υγρασία της κάθε στρώσης και αναπτύσσεται η καμπύλη της περιεκτικότητας σε υγρασία. Το σημείο καμπής της καμπύλης αποτελεί τη νέα FMP. Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του υλικού σε υγρασία, τόσο υψηλότερη είναι και η FMP. Όσον αφορά το σχήμα της καμπύλης, αυτή εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού (μέγεθος, κατανομή, σχήμα και επιφάνεια των κόκκων κ.α.) και την περιεκτικότητά του σε υγρασία. Υλικά τα οποία έχουν μικρή ικανότητα απορρόφησης, όπως είναι η άμμος και τα φυσικά συμπυκνώματα, σχηματίζουν ελεύθερη επιφάνεια νερού όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι μεγάλη, ενώ όταν είναι μικρή σχηματίζουν υγρή βάση. Από την άλλη πλευρά, υλικά τα οποία έχουν μεγάλη ικανότητα απορρόφησης, όπως είναι το μετάλλευμα του νικελίου και συμπυκνώματα μικρών σωματιδίων, η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι σχεδόν ίδια σε όλο το υλικό.

Κατά τη διάρκεια των ετών 2009 με 2011 πραγματοποίησαν πάνω από εκατό δοκιμές σε δείγματα μεταλλεύματος του νικελίου, τα οποία προμηθεύτηκαν από διάφορα λιμάνια της Κίνας. Από τις δοκιμές, προέκυψε ότι ως κατάσταση ροής μπορεί να αναφέρεται η αρχική, η μερική, αλλά και η ολική ρευστοποίηση του μεταλλεύματος νικελίου, και

επιπλέον ότι η ταχύτητα ροής του ρευστοποιημένου υλικού εξαρτάται από το μέγεθος και την ταχύτητα της δόνησης, την περιεκτικότητα σε υγρασία και την υπάρχουσα γωνία κλίσης. Κατά την αρχική ρευστοποίηση του φορτίου, η ταχύτητα ροής είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να χρειάζονται αρκετά λεπτά, ακόμα και ώρες, για να παραμορφωθεί σημαντικά. Έτσι, εάν το μετάλλευμα του νικελίου έχει φορτωθεί στο πλοίο σε μία τέτοια κατάσταση, το πλήρωμα έχει χρόνο για να τοποθετήσει θαλάσσιο έρμα προς εξισορρόπηση της κλίσης που θα προκληθεί από τη μετατόπιση του φορτίου.

Για τον προσδιορισμό της μέσης περιεκτικότητας του φορτίου σε υγρασία θα πρέπει να ληφθούν αντιπροσωπευτικά δείγματα του υλικού. Τα δείγματα θα πρέπει να λαμβάνονται μόνο από τρία επίπεδα της στοίβας. Το πρώτο από το επίπεδο που βρίσκεται στα 0,3 περίπου από την επιφάνεια της στοίβας, το δεύτερο στα 0,3 από τον πάτο της στοίβας και το τρίτο από το μέσο της. Έτσι, η μέση αριθμητική τιμή των τριών ομάδων δείγματος αποτελεί τη μέση περιεκτικότητα σε υγρασία.

Έτσι, προς αντιστάθμιση των απαιτήσεων του κώδικα IMSBC για περιεκτικότητα σε υγρασία μικρότερη από την TML, ο Jian – Ping πρότεινε ο πλοίαρχος να μπορεί να αποδεχθεί τη φόρτωση του μεταλλεύματος νικελίου εάν το ποσοστό του σε υγρασία δεν ξεπερνά το 25%. Όταν το ποσοστό σε υγρασία είναι μεγαλύτερο του 25%, αλλά και μικρότερο του 30%, τότε ο πλοίαρχος θα πρέπει να αγκυροβολήσει το πλοίο για τουλάχιστον τρεις ημέρες για να προετοιμαστεί σε περίπτωση που χρειαστεί θαλάσσιο έρμα για την αντιστάθμιση της εγκάρσιας κλίσης που θα παρουσιαστεί εάν υπάρξει μετατόπιση του φορτίου κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Εάν το ποσοστό σε υγρασία είναι μεγαλύτερο του 30%, αλλά και μικρότερο του 35%, θα χρειαστούν τουλάχιστον πέντε ημέρες αγκυροβόλησης. Τέλος, όταν το ποσοστό σε υγρασία ξεπεράσει το 35% το φορτίο θα πρέπει να απορρίπτεται από τον πλοίαρχο.

ΜΕΡΟΣ ΙΙ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΣΩ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Κεφάλαιο 6

Περιγραφή πειραμάτων

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μία σειρά πειραμάτων με σκοπό τον υπολογισμό κρίσιμων τιμών διαφόρων παραμέτρων (πλάτος, συχνότητα και χρόνος διέγερσης, επίπεδα υγρασίας κ.α.) που μπορεί να οδηγήσουν στη ρευστοποίηση του φορτίου, η ανάλυση του τρόπου εκδήλωσης του φαινομένου καθώς επίσης και η διερεύνηση των επιπτώσεων αυτής στη συνολική κίνηση του πλοίου.

6.1 Πειραματική διάταξη

Τα πειράματα πραγματοποιούνται στο εργαστήριο Υδροδυναμικής της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με τη βοήθεια του “Shaking Table”, μίας κινούμενης τράπεζας έξι βαθμών ελευθερίας η οποία είναι ικανή να προσομοιώσει οποιαδήποτε κίνηση του πλοίου (heave, surge, sway, roll, pitch, yaw). Είναι σκόπιμο, σε αυτό το σημείο, να αναφερθούν οι γενικές ιδιότητες της κινούμενης τράπεζας. Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει η κινούμενη τράπεζα είναι 2tons. Η μέγιστη μετατόπιση και ταχύτητα στην κατακόρυφη διεύθυνση (heave) είναι +/-30cm και 50cm/sec αντίστοιχα, στις κινήσεις surge και sway είναι +/-30cm και 30cm/sec αντίστοιχα, ενώ στις κινήσεις roll, pitch και yaw είναι +/-30deg και 0-15deg/sec αντίστοιχα. Τέλος, το εύρος των συχνοτήτων και η μέγιστη επιτάχυνση σε κάθε άξονα είναι 0-8Hz και 0,3g αντίστοιχα. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, αναλύεται η πειραματική διάταξη, η οποία φαίνεται και στην εικόνα 13.

Αναλύοντας τη διάταξη από πάνω προς τα κάτω, αποτελείται από τη δεξαμενή των δοκιμών, η οποία είναι τοποθετημένη πάνω σε μία βάση από Plexiglas που είναι βιδωμένη πάνω στην τράπεζα των πειραμάτων. Τα χαρακτηριστικά της τράπεζας πειραμάτων, όπως και της δεξαμενής των δοκιμών φαίνονται στον πίνακα 2. Στο κάτω μέρος της τράπεζας πειραμάτων βρίσκεται μια τριγωνική βάση. Σε κάθε πλευρά της βάσης είναι αρθρωμένοι δύο υδραυλικοί και ένας πνευματικός βραχίονας, κατασκευασμένοι από αλουμίνιο, που κινούν την τράπεζα. Οι υδραυλικοί βραχίονες είναι διπλής ενέργειας, έχουν δηλαδή μία θύρα σε κάθε άκρο που παρέχει υδραυλικό υγρό, τόσο για την επέκταση όσο και για την ανάκληση του εμβόλου. Πάνω σε αυτούς τους βραχίονες είναι τοποθετημένες σερβοβαλβίδες για να ελέγχουν τη ροή του λαδιού στο εσωτερικό τους. Οι πνευματικές βαλβίδες, από την άλλη μεριά, έχουν ως σκοπό να αντισταθμίζουν το μεγάλο βάρος της τράπεζας πειραμάτων

προκειμένου να διευκολύνεται το έργο των υδραυλικών βραχιόνων. Οι δύο υδραυλικοί βραχίονες, μαζί με τον έναν πνευματικό, ενώνονται στο κάτω άκρο τους με μία βάση (110,50x41,00x2,00cm) που είναι πακτωμένη στο δάπεδο του εργαστηρίου. Όσον αφορά το υδραυλικό υγρό, αυτό είναι τοποθετημένο σε μία δεξαμενή λαδιού από όπου και παρέχεται, μέσω της αντλίας λαδιού, στο σύστημά μας. Η ψύξη του λαδιού γίνεται με ένα εναλλάκτη που χρησιμοποιεί ως μέσο ψύξης το νερό. Τέλος, αφού το λάδι περάσει από κάποια φίλτρα καθαρισμού, περνάει από την διάταξη ενός υδραυλικού καταστολέα σοκ με σκοπό να μειωθεί ο υδραυλικός θόρυβος που προκαλεί η αντλία του λαδιού.



Εικόνα 13. Shaking Table.

Πίνακας 2. Διαστάσεις της πειραματικής διάταξης.

Δεξαμενή Δοκιμών	
Μήκος	34.00cm
Πλάτος	23.00cm
Ύψος	20.00cm
Πάχος	15.00mm
Υλικό κατασκευής	Plexiglas ειδικού βάρους 1,19 gr/cm ³
Τράπεζα πειραμάτων	
Μήκος	124,00cm
Πλάτος	110,20cm
Πάχος	3,88cm
Βάρος	147,45 kg
Υλικό κατασκευής	Αλουμίνιο ειδικού βάρους 2,7 gr/cm ³

Εγκατεστημένοι στην πειραματική διάταξη υπάρχουν τρεις αισθητήρες, ο μετατροπέας πίεσεως (Soil pressure transducer), ο αδρανειακός αισθητήρας (Inertial sensor) και ο ψηφιακός παλμογράφος (Digital oscilloscope), οι ιδιότητες των οποίων φαίνονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3. Ιδιότητες Αισθητήρων.

Soil pressure transducer	1,0MPa
Inertial sensor	3Dm-GX3-35
Digital oscilloscope	40-300MHz, 2 channel

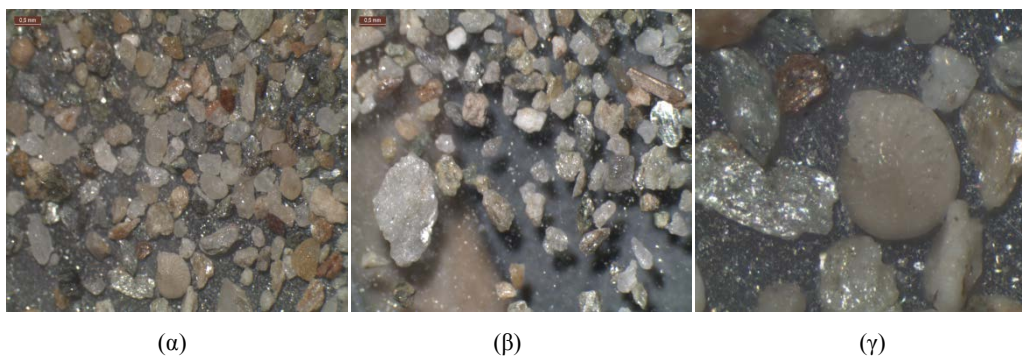
Όλες οι μετρήσεις που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων καταλήγουν σε έναν ηλεκτρολογικό πίνακα ελέγχου, πάνω στον οποίο υπάρχουν ενδείξεις για την λειτουργία των βασικών παραγόντων του συστήματος, όπως είναι η θερμοκρασία και τα φίλτρα, καθώς επίσης και ένα κουμπί έκτακτης παύσης της λειτουργίας των αντλιών.

Ολοκληρώνοντας, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο χειρισμός του μηχανήματος γίνεται μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή και τη χρήση του προγράμματος Trirame V11 της εταιρίας ANCO. Για μια πιο αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης και του λογισμικού που χρησιμοποιείται, θα μπορούσε κανείς να ανατρέξει στην διπλωματική εργασία του Ν. Καλούμενου (2013) “Πειραματική Μελέτη της Ελεύθερης Επιφάνειας Υγρού υπό Κατακόρυφη Διέγερση”.

6.2 Εξεταζόμενα υλικά

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων επιλέξαμε δύο υλικά διαφορετικής σύστασης, κοκκομετρίας και συμπεριφοράς, την άμμο και τον ελαιοπυρήνα. Η επιλογή μας για κάθε ένα από αυτά τα δύο υλικά βασίστηκε στο γεγονός ότι από τη μία πλευρά η άμμος είναι ένα υλικό που, όπως έχουν δείξει αρκετές έρευνες (π.χ. Lee & Fitton 1968, Castro 1969), μπορεί να ρευστοποιηθεί, ενώ από την άλλη πλευρά ο ελαιοπυρήνας είναι ένα υλικό που παράγεται στον ελλαδικό χώρο και έχει ήδη οδηγήσει σε ατυχήματα πλοίων (π.χ. EroI Senkaya, 2012). Στις επόμενες παραγράφους παρατίθενται μερικά από τα στοιχεία που αφορούν τόσο τη στοιχειομετρία όσο και τη χημική σύσταση των υπόψη υλικών.

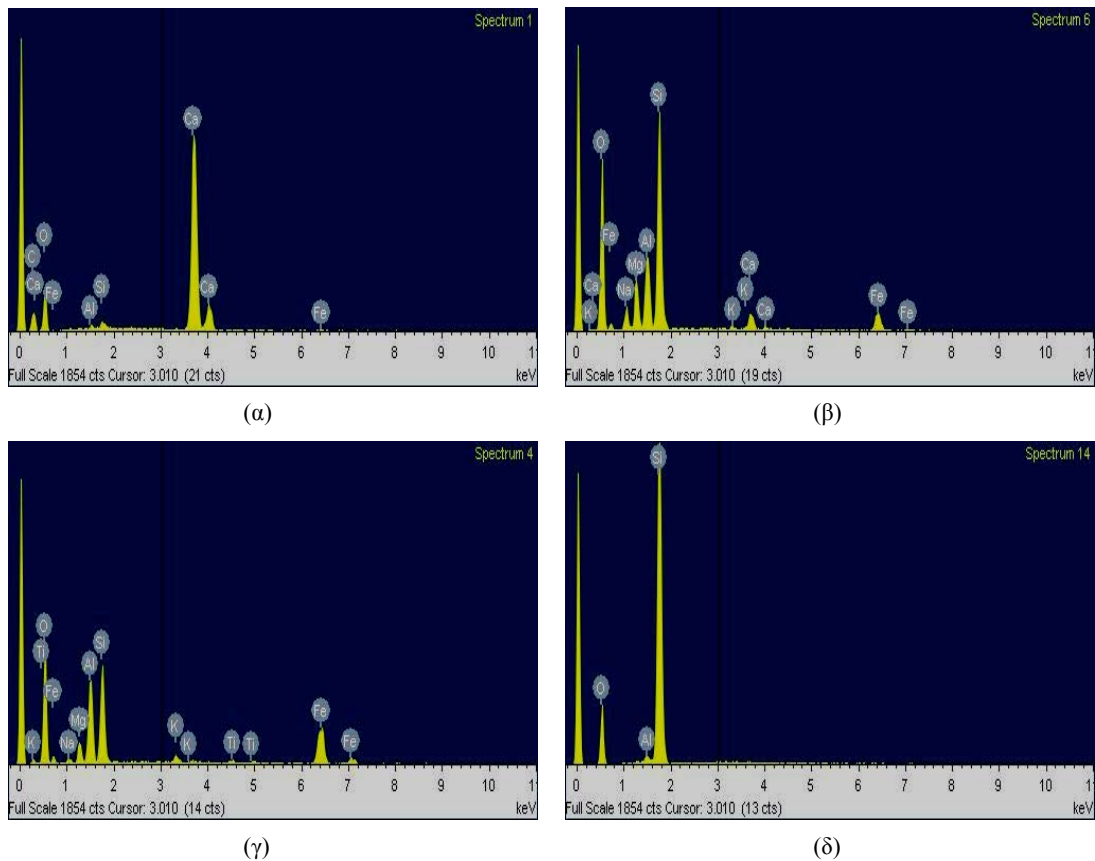
Χρησιμοποιώντας οπτικό μικροσκόπιο διερευνήσαμε τη φυσική κατάσταση του υλικού ώστε να διαπιστωθεί η ποικιλία των κόκκων τόσο σε σχήμα όσο και σε μέγεθος. Ακολουθώντας τις προβλεπόμενες διαδικασίες δειγματοσμού υλικών προς διερεύνηση, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι το υπό εξέταση υλικό εμφανίζεται να έχει μέση διάμετρο κόκκων ίση με 0.5 mm με διακύμανση που δεν ξεπερνά τα $\pm 0.1\text{mm}$ ενώ εμφανίζονται και κόκκοι η διάμετρος των οποίων μπορεί να φτάσει τα 2mm.



Εικόνα 14. Ενδεικτικές εικόνες, από την ανάλυση δείγματος της άμμου στο οπτικό μικροσκόπιο. (α) Γενική άποψη του υλικού. (β) Ο μεγαλύτερος κόκκος του εξεταζόμενου δείγματος. (γ) Ένα απολίθωμα οργανικής ύλης.

Όπως διαπιστώνεται από την εικόνα 14 (γ) στην οποία απολίθωμα οργανικής ύλης εντοπίζεται εντός του δείγματος, το υπό εξέταση υλικό παρουσιάζει ποικιλία ακόμη και ως προς την χημική του σύσταση. Για την ανάλυση της χημικής σύστασης της άμμου καταφύγαμε σε τεχνικές ανάλυσης ακτινών X με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM). Στην εικόνα 15 παρουσιάζονται 4 ενδεικτικά φασματικά διαγράμματα τυχαίων κόκκων του εξεταζόμενου δείγματος. Διαπιστώνεται ότι αν και τα βασικά συστατικά των κόκκων είναι ίδια (οξυγόνο (O), πυρίτιο (Si), σίδηρος (Fe), αλουμίνιο (Al), μαγνήσιο (Mg), ασβέστιο (Ca), κάλιο (K) και Νάτριο (Na)) η συνολική χημική τους σύσταση διαφέρει αρκετά (ποσότητα τιτανίου (Ti), θείου (S) και άνθρακα (C) σε διαφορετικούς κόκκους).

Τέλος για την μέτρηση του ειδικού βάρους της χρησιμοποιούμενης άμμου, ζυγίσαμε μία ποσότητα άμμου ίση με $\frac{1}{4}$ lit και καταλήξαμε ότι η άμμος έχει ειδικό βάρος 1376kg/m^3 .



Εικόνα 15. Ενδεικτικά φασματικά διαγράμματα τυχαίων κόκκων του εξεταζόμενου δείγματος άμμου.

6.2.2 Ελαιοπυρήνας

Γνωρίζοντας ήδη τη σύσταση ενός υλικού όπως είναι ο ελαιοπυρήνας (υποπροϊόν από την επεξεργασία των ελιών), χρησιμοποιείται οπτικό μικροσκόπιο με σκοπό να διαπιστωθεί η ποικιλία των κόκκων σε σχήμα αλλά και σε μέγεθος. Στις εικόνες 16α και 16β παρουσιάζονται ενδεικτικές εικόνες από το οπτικό μικροσκόπιο, από τις οποίες μπορεί να διαπιστωθεί η διακύμανση του μεγέθους και σχήματος του υπό εξέταση υλικού, το οποίο εμφανίζεται να έχει μέση διάμετρο κόκκων ίση με 4.5mm με διακύμανση που δεν ξεπερνά τα $\pm 0.5\text{mm}$ ενώ εμφανίζονται και κόκκοι η διάμετρος των οποίων φτάνει τα 0.6mm. Για την μέτρηση του ειδικού βάρους του συγκεκριμένου υλικού, ζυγίσαμε μία ποσότητα ίση με ¼ lit και καταλήξαμε ότι έχει ειδικό βάρος 520kg/m^3 . Το ειδικό βάρος του εξεταζόμενου ελαιοπυρήνα είναι αρκετά μικρό, πράγμα που το καθιστά ως ένα ελαφρύ υλικό.



(α)



(β)

Εικόνα 16. Ενδεικτικές εικόνες, από την ανάλυση δείγματος του ελαιοπυρήνα στο οπτικό μικροσκόπιο.

6.3 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Για κάθε ένα από τα υπό εξέταση υλικά πραγματοποιείται μία σειρά πειραμάτων για τις κινήσεις διατοχισμού (Roll) και εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης (Sway). Διάφορα ποσοστά υγρασίας ανά υλικό εξετάζονται. Στην περίπτωση της άμμου το ποσοστό υγρασίας είναι πλήρως ελεγχόμενο και έχει τιμές από 0% έως 40% του συνολικού βάρους του υλικού. Στην περίπτωση του ελαιοπυρήνα προμηθευτήκαμε τρία διαφορετικά δείγματα από ελαιουργεία της Κέρκυρας, Μυτιλήνης και Καλαμάτας, έτσι ώστε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του υλικού υπό τη σύσταση που αυτό διατίθεται, κάθε φορά, στην αγορά.

Για κάθε δείγμα με διαφορετικό ποσοστό σε υγρασία εκτελέσαμε μία σειρά πειραμάτων αλλάζοντας κάθε φορά τη συχνότητα και το πλάτος της διέγερσης. Για την κίνηση Sway, το εύρος συχνοτήτων είναι 0.6 - 3.0Hz (με βήμα 0.2) και το εύρος του πλάτους είναι 0.25 – 17cm, κατά περίπτωση, αφού για τις υψηλές συχνότητες δεν χρησιμοποιήσαμε πολύ υψηλά πλάτη (μέχρι 1.2cm). Η επιλογή να μην εξετάσουμε τα μεγάλα πλάτη στις υψηλές συχνότητες βασίζεται στο γεγονός ότι τέτοιες καταστάσεις είναι πολύ σπάνιες καταστάσεις θάλασσας και για μία αρχική προσέγγιση του φαινομένου της ρευστοποίησης δεν είναι απαραίτητο να γίνει μία τέτοια μελέτη. Για την κίνηση Roll, το εύρος συχνοτήτων είναι 0.1 - 3.0Hz (με βήμα 0.1) με πλάτος 2.09° - 22.2° , αντίστοιχα Η διάρκεια του κάθε πειράματος και στις δύο κινήσεις είναι 30 δευτερόλεπτα. Τέλος, τα πειράματα καταγράφονται με μία απλή κάμερα, με σκοπό την μετέπειτα ανάλυσή τους.

Λόγω της μη διακρίβωσης της εργαστηριακής διάταξης, καθώς αυτή αποτελεί νέα εγκατάσταση, υπάρχει κάποια απόκλιση μεταξύ των εντολών διέγερσης μέσω του λογισμικού και της πραγματικής εκτελούμενης κίνησης από την τράπεζα. Για την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων κατά τη διάρκεια της εκτελούμενης κίνησης πραγματοποιούνται μετρήσεις τόσο του πλάτους όσο και της συχνότητας διέγερσης. Η μέτρηση για κάθε πλάτος διέγερσης για την κίνηση sway πραγματοποιείται με ένα αποστασιόμετρο, ενώ για την

κίνηση roll με ένα γυροσκόπιο. Η πληροφορία που μας παρέχει το αποστασιόμετρο είναι η μέγιστη και ελάχιστη τιμή που καταγράφει κατά τη διάρκεια κίνησης της δεξαμενής, καθώς και το σημείο από το οποίο ξεκινάει την κίνησή της (zero point). Οι τιμές αυτές εμφανίζονται στην οθόνη του αποστασιόμετρου, και εμείς τις τοποθετούμε σε ένα φύλλο του excel έτσι ώστε να υπολογίσουμε το μέσο όρο της μέγιστης και ελάχιστης τιμής. Αυτός ο μέσος όρος μας δίνει την πραγματική τιμή του πλάτους διέγερσης. Η πληροφορία που μας παρέχει το γυροσκόπιο είναι οι γωνίες Euler (roll, pitch, yaw) που καταγράφονται κατά τη διάρκεια κίνησης της δεξαμενής. Οι γωνίες αυτές καταγράφονται μέσω του υπολογιστή και μπορούμε να τις επεξεργαστούμε μέσω του matlab, για να εξάγουμε την τιμή της γωνίας στην κίνηση roll.

6.4 Κλίμακα πραγματικού πλοίου

Έχοντας ολοκληρώσει την περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και πριν προχωρήσουμε στην παράθεση-ανάλυση των αποτελεσμάτων, κρίνουμε σκόπιμη μια σύντομη αναφορά στις διαστάσεις της δεξαμενής σε σχέση με αυτές που αναμένονται σε ρεαλιστικά σενάρια δεξαμενών φορτηγών πλοίων μεταφοράς φορτίου χύδην. Για να γίνει εφικτή η αντιστοίχιση, θα πρέπει να υπολογίσουμε την αδιάστατη συχνότητα $\omega \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$, η οποία πρέπει να είναι ίση για τη δεξαμενή πειραμάτων και το πραγματικό πλοίο:

$$\omega_1 \cdot \sqrt{\frac{l_1}{g}} = \omega_2 \cdot \sqrt{\frac{l_2}{g}}$$

ω_1 : κυκλική συχνότητα της δεξαμενής

ω_2 : κυκλική συχνότητα του πλοίου

l_1 : πλάτος της δεξαμενής (0.31m)

l_2 : πλάτος του πλοίου

g : επιτάχυνση της βαρύτητας ($g = 9.81\text{m/sec}^2$)

Για σύνηθες μέγεθος πλοίου όπως είναι ένα πλοίο Panamax με πλάτος 32.2m, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συχνότητα διέγερσής του που αναλογεί στην συχνότητα που διεγείρουμε τη δεξαμενή. Στη μελέτη μας, οι συχνότητες διέγερσης της υπό κλίμακα δεξαμενής φτάνουν 3.0Hz. Για ένα τέτοιο πλοίο, αυτό αντιστοιχεί σε συχνότητα 0.29Hz, δηλαδή 1.82rad/sec. Όσον αφορά την αντιστοιχία στο πλάτος της διέγερσης, αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\zeta_1}{l_1} = \frac{\zeta_2}{l_2}$$

ζ_1 : πλάτος διέγερσης της δεξαμενής

ζ_2 : πλάτος διέγερσης του πλοίου

I_1 : πλάτος της δεξαμενής (0.31cm)

I_2 : πλάτος του πλοίου

Στην κίνηση sway, το ελάχιστο και το μέγιστο πλάτος με το οποίο διεγείρουμε τη δεξαμενή είναι 0.0025cm και 0.17cm αντίστοιχα, επομένως η αντιστοιχία για το πραγματικό πλοίο είναι 0.26cm και 17.66cm. Τέλος, στην κίνηση roll, οι γωνίες διέγερσης της δεξαμενής, αντιστοιχούν στις γωνίες εγκάρσιας κλίσης ενός πραγματικού πλοίου.

Ένα από τα υπό εξέταση υλικά είναι η άμμος. Πριν από την έναρξη των πειραμάτων με χρήση της άμμου, την ξηραίνουμε, έτσι ώστε να μπορούμε να ελέγχουμε το ποσοστό υγρασίας σε αυτήν, την κοσκινίζουμε και τοποθετούμε 10kg στην δεξαμενή των πειραμάτων. Για την συγκεκριμένη γεωμετρία της χρησιμοποιούμενης δεξαμενής η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε λόγο ύψους της επιφάνειας της άμμου προς το ύψος της δεξαμενής ίσο με 0.55. Η ακολουθούμενη διαδικασία φαίνεται και στην εικόνα 17.

Στη συνέχεια διεγείρουμε τη δεξαμενή, σύμφωνα με τα προαναφερθέντα (κινήσεις Roll και Sway), για υγρασία 0%, 20%, 30%, 35% και 40%. Για την προσθήκη υγρασίας, αυτό που κάνουμε είναι να προσθέτουμε κάθε φορά την απαραίτητη ποσότητα που χρειάζεται για να καλυφθεί το απαιτούμενο ποσοστό, σύμφωνα με τη σχέση που δίνεται από τον κώδικα IMSBC.

$$MC\% = \frac{m_{water}}{m_{sand}} \times 100 \quad (\text{Appendix 2 1.1.4.4., IMSBC Code})$$

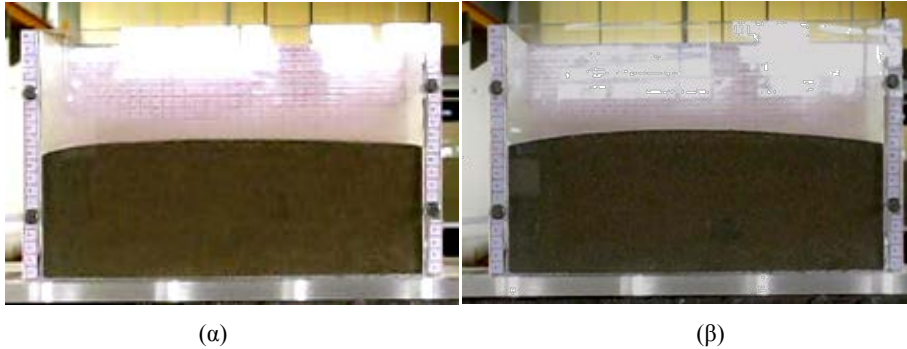
Μετά την ολοκλήρωση των προκαθορισμένων πειραμάτων για την άμμο, και αφού διαπιστώνουμε, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, ότι ανάμεσα στα ποσοστά σε υγρασία 25% και 30% υπάρχει ένα μεταβατικό στάδιο εμφάνισης της ρευστοποίησης, πραγματοποιούμε κάποια επιπλέον πειράματα για το ποσοστό σε υγρασία 27.5%.

Παρ' όλα αυτά, όλα τα πειράματα που έχουμε αναφέρει μέχρι τώρα, πραγματοποιούνται χωρίς ενδιάμεσα διαλλείματα για την αποκατάσταση της ομοιογένειας (σε υγρασία) του υλικού. Έτσι κρίνουμε σκόπιμο να εξετάσουμε ένα μικρό (ενδεικτικό) φάσμα συχνοτήτων (0.8, 1.0, 1.2 και 1.4Hz) σε κάποια πλάτη, στην κίνηση Sway με ποσοστό σε υγρασία 30% και 35% επαναφέροντας κάθε φορά το μίγμα άμμου νερού στην ίδια αρχική κατάσταση. Τέλος, πραγματοποιούνται κάποια πειράματα με την άμμο με υγρασία 27.5% για συχνότητες 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 και 1.4Hz, και πλάτη 9.2, 6.5, 5.8, 4.6 και 4.2cm αντίστοιχα, καθώς και για τη χαμηλότερη διέγερση, δηλαδή για πλάτος 0.2cm και συχνότητα 0.6Hz, με χρονική διάρκεια 5 λεπτά, για να εξετάσουμε την επίδραση του χρόνου στην εμφάνιση της ρευστοποίησης.



Εικόνα 17. Προετοιμασία πειραμάτων. (α) Ψήσιμο της άμμου. (β) Κοσκίνισμα. (γ) Ζύγισμα. (δ) Γέμισμα της δεξαμενής

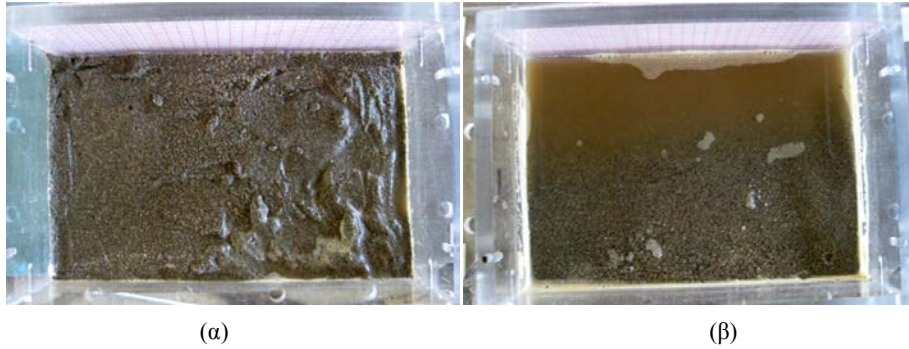
Στα πειράματα που πραγματοποιούνται με την άμμο χωρίς προσθήκη υγρασίας, η άμμος κινείται σύμφωνα με την κίνηση της δεξαμενής, με αποτέλεσμα μετά το τέλος των πειραμάτων το υλικό να συσσωρεύεται στο κέντρο της δεξαμενής, σχηματίζοντας ένα “βουνό” (εικόνα 18α,β). Μετά την προσθήκη ποσοστού υγρασίας 20% και 25% δεν υπάρχει καμία μετατόπιση της άμμου, παρά μόνο κάποιων συσσωματωμάτων στην επιφάνειά αυτής.



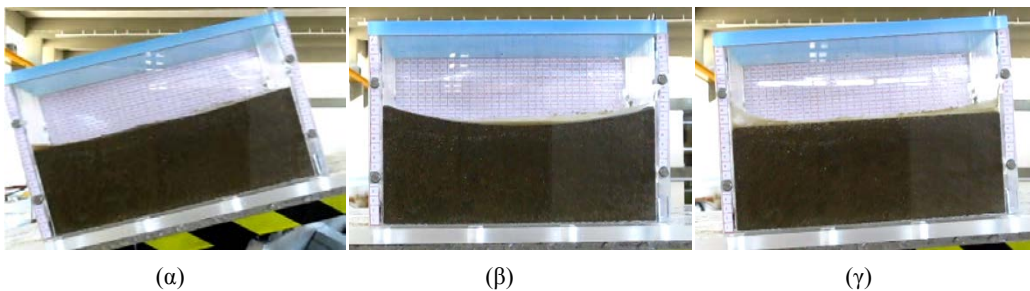
Εικόνα 18. Κίνηση roll για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 0%. (α) Η άμμος πριν τη διέγερση της δεξαμενής (β) Η άμμος μετά τη διέγερση της δεξαμενής.

Ενδιαφέρον παρουσιάζεται στο ποσοστό υγρασίας 27.5%. Πριν τη διέγερση της δεξαμενής, η άμμος μοιάζει με λάσπη, ενώ υπάρχει μία πολύ μικρή ποσότητα νερού στην επιφάνειά της (εικόνα 19α). Κατά την διέγερσή της δεξαμενής σε συχνότητες 0.1 - 0.2 Hz, ανέρχεται μία μικρή ποσότητα νερού στην επιφάνεια της άμμου δημιουργώντας ελεύθερη επιφάνεια νερού η οποία κινείται σύμφωνα με την κίνηση της δεξαμενής (καθώς η δεξαμενή κινείται ολόκληρη η ποσότητα του νερού μετατοπίζεται προς την εκάστοτε πλευρά αφήνοντας ελεύθερη την επιφάνεια της άμμου, εικόνα 20α). Καθώς η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται (για συχνότητες 0.4 - 0.8Hz), αυξάνεται και η ποσότητα του νερού στην επιφάνεια της άμμου και με την κίνησή του παρασέρνει μέρος της άμμου προς τις πλευρές της δεξαμενής, με αποτέλεσμα η επιφάνεια της άμμου να γίνεται κοίλη (εικόνα 20β), ενώ για περαιτέρω αύξηση της συχνότητας (πάνω από 0.9Hz) η επιφάνεια της άμμου γίνεται ευθεία και δεν κινείται καθόλου² (εικόνα 20). Ολοκληρώνοντας τα πειράματα για το συγκεκριμένο ποσοστό υγρασίας, παρατηρείται αρκετή ποσότητα νερού να έχει αναδυθεί στην επιφάνεια της άμμου (εικόνα 19β).

² Η ποσότητα του νερού που έχει αναδυθεί στην επιφάνεια της άμμου έχει μετακινηθεί στην πίσω πλευρά της δεξαμενής, η οποία δεν διακρίνεται από την κάμερα, οπότε προφανώς υπάρχει κάποια κίνηση του υλικού.

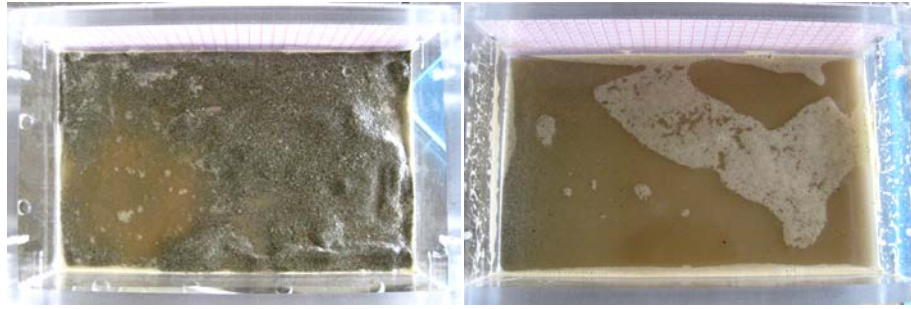


Εικόνα 19. Κίνηση roll για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5%. (α) Η επιφάνεια της άμμου πριν τη διέγερση της δεξαμενής. Διακρίνεται εύκολα η λασπώδης μορφής της. (β) Η επιφάνεια της άμμου μετά τη διέγερση της δεξαμενής. Το νερό που έχει αποβληθεί από την άμμο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έχει συσσωρευτεί προς τα πίσω.



Εικόνα 20. Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση roll, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% (α) $f=0.2\text{Hz}$, $A=20.2\text{deg}$. (β) $f=0.5\text{Hz}$, $A=13.2\text{deg}$. (γ) $f=2.6\text{Hz}$, $A=2.35\text{deg}$.

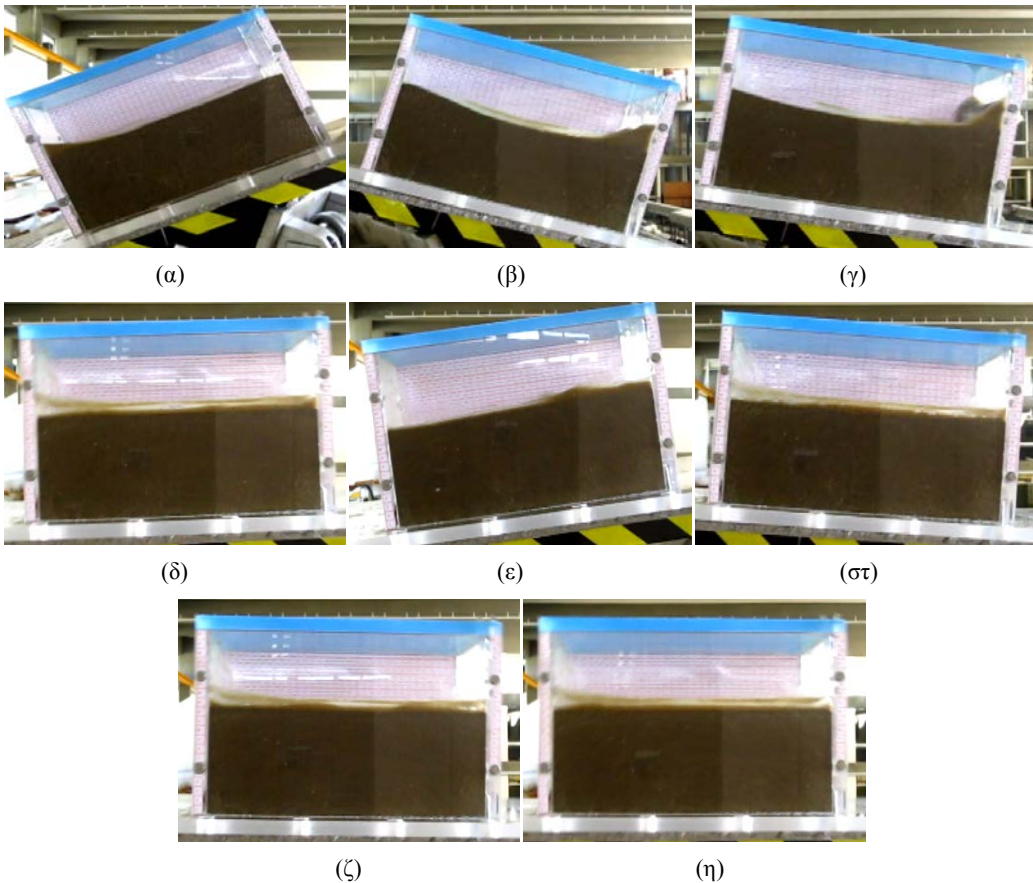
Προσθέτοντας ποσοστό σε υγρασία 30% στην προκαθορισμένη ποσότητα της άμμου, η άμμος γίνεται υπέρκορη και σχηματίζεται λίμνη νερού στην επιφάνειά της πριν ακόμα ξεκινήσουν τα πειράματα (εικόνα 21α). Κατά την διέγερσή της δεξαμενής στη συχνότητα 0.1Hz, κάποια ποσότητα νερού ανέρχεται στην επιφάνεια της άμμου δημιουργώντας ελεύθερη επιφάνεια νερού, με αποτέλεσμα το νερό να κινείται σύμφωνα με την κίνηση της δεξαμενής (καθώς η δεξαμενή κινείται ολόκληρη η ποσότητα του νερού μετατοπίζεται προς την εκάστοτε πλευρά αφήνοντας ελεύθερη την επιφάνεια της άμμου, εικόνα 22α). Για συχνότητες διέγερσης 0.2 - 0.4Hz η επιφάνεια της άμμου παρασέρνεται από το νερό και τείνει να συγκεντρωθεί προς τις πλευρές της δεξαμενής (εικόνα 22β). Καθώς η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται, αυξάνεται και η ποσότητα του νερού στην επιφάνεια της άμμου και οι κινήσεις του γίνονται πιο έντονες καθώς “χτυπάει” στις πλευρές της δεξαμενής, ενώ η επιφάνεια της άμμου έχει γίνει κοίλη για συχνότητες 0.5 - 0.7Hz και ευθεία για συχνότητες 0.8 - 1.2Hz (εικόνα 22γ,δ). Σε συχνότητες 1.6 - 2.5Hz η κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού περιορίζεται σχεδόν στο κέντρο της δεξαμενής (εικόνα 22ε), στις συχνότητες μάλιστα 1.9Hz και 2.5Hz η κίνηση είναι κυματοειδής (εικόνα 22στ,ζ). Τέλος, για συχνότητες 2.6 - 3.0Hz η κίνηση περιορίζεται στις πλευρές της δεξαμενής (εικόνα 22η).



(α)

(β)

Εικόνα 21. Κίνηση roll για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 30%. (α) Η επιφάνεια της άμμου πριν τη διέγερση της δεξαμενής. Διακρίνονται εύκολα η λίμνη νερού που έχει δημιουργηθεί στην επιφάνεια της άμμου. (β) Η επιφάνεια της άμμου μετά τη διέγερση της δεξαμενής. Το νερό που έχει αποβληθεί από την άμμο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έχει καλύψει ολόκληρη την επιφάνειά της.



(α)

(β)

(γ)

(δ)

(ε)

(στ)

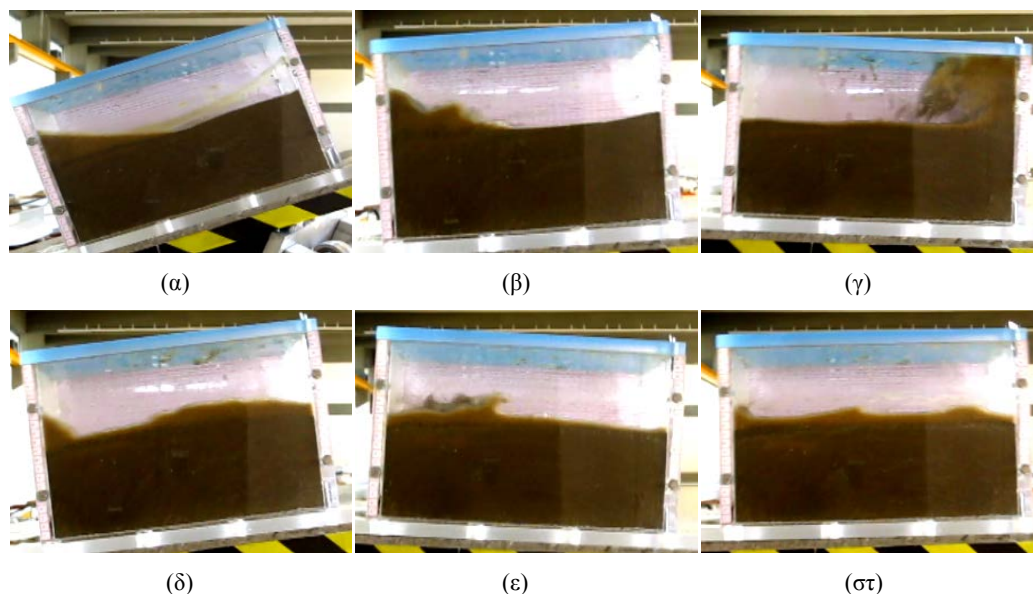
(ζ)

(η)

Εικόνα 22. Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση roll, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 30%. (α) $f=0.1\text{Hz}$, $A=22.2\text{deg}$. (β) $f=0.4\text{Hz}$, $A=15.4\text{deg}$. (γ) $f=0.7\text{Hz}$, $A=9.95\text{deg}$. (δ) $f=0.9\text{Hz}$, $A=8.10\text{deg}$. (ε) $f=1.6\text{Hz}$, $A=4.65\text{deg}$. (στ) $f=1.9\text{Hz}$, $A=3.91\text{deg}$. (ζ) $f=2.5\text{Hz}$, $A=2.37\text{deg}$. (η) $f=2.9\text{Hz}$, $A=2.15\text{deg}$.

Προσθέτοντας στην άμμο ποσοστό υγρασίας 35%, η επιφάνεια της άμμου καλύπτεται εξολοκλήρου από το νερό, το οποίο έχει ύψος 1.5cm πάνω από την επιφάνειά της (πριν αλλά και μετά την εκτέλεση των πειραμάτων). Η κίνηση του νερού αρχίζει με χαμηλή ένταση “χτυπώντας” τα τοιχώματα της (εικόνα 23α,β), σε συχνότητες μάλιστα 0.4 - 0.7Hz η επιφάνεια της άμμου είναι και πάλι κοίλη. Όσο η συχνότητα της διέγερσης αυξάνεται μεταξύ

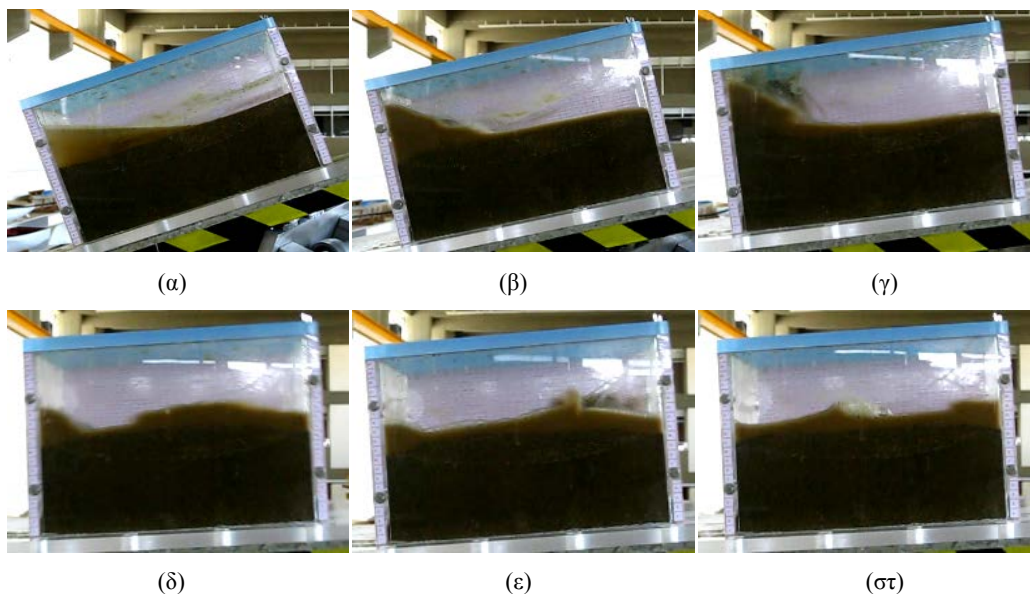
των συχνοτήτων 0.7Hz και 0.9Hz παρατηρούνται πολύ έντονες κινήσεις, αφού το νερό αναμιγνύεται με την άμμο και συμπεριφέρονται σαν ένα παχύρευστο υγρό (εικόνα 23γ). Για υψηλότερες συχνότητες η κίνηση του νερού παρουσιάζει μία συγκεκριμένη κίνηση κατά τη διάρκεια της διέγερσης, όπου για κάποιες χρονικές στιγμές μέρος της επιφάνειας της άμμου παραμένει ελεύθερο (εικόνα 23δ), ενώ έντονες είναι και οι συγκρούσεις των κυματισμών (εικόνα 23ε,στ). Σε αυτές τις συχνότητες, η άμμος φαίνεται να συγκεντρώνεται προς το κέντρο της δεξαμενής και να σχηματίζει ένα “βουνό”, ενώ το νερό συγκεντρώνεται σχεδόν στις πλευρές.



Εικόνα 23. Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση roll, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) $f=0.1\text{Hz}$, $A=22.2\text{deg}$. (β) $f=0.6\text{Hz}$, $A=11.5\text{deg}$. (γ) $f=0.8\text{Hz}$, $A=9.05\text{deg}$. (δ) $f=1.0\text{Hz}$, $A=23\text{deg}$. (ε) $f=1.8\text{Hz}$, $A=4.14\text{deg}$. (στ) $f=2.5\text{Hz}$, $A=2.37\text{deg}$.

Στα πειράματα που πραγματοποιούνται με ποσοστό σε υγρασία 40%, υπάρχει, καθ' όλη τη διάρκεια, νερό πάνω από την επιφάνεια της άμμου σε ύψος 2.0cm πάνω από την επιφάνειά της. Η κίνηση της άμμου είναι όμοια με την κίνησή της όταν αυτή περιέχει ποσοστό σε υγρασία 35%. Όλη η μάζα του νερού μετατοπίζεται προς τις πλευρές του πλοίου, με αποτέλεσμα η ελεύθερη επιφάνεια του νερού να περιορίζεται στην μία πλευρά σχεδόν στο μισό του μήκους της δεξαμενής, αφήνοντας την επιφάνεια της άμμου ελεύθερη στην άλλη πλευρά (εικόνα 24α), σε συχνότητες όμως πάνω από 0.4Hz η ελεύθερη επιφάνεια του νερού αν και συσσωρεύεται στην εκάστοτε πλευρά, εκτίνεται σε ολόκληρη την επιφάνεια της άμμου (εικόνα 24β). Όσο η συχνότητα της διέγερσης αυξάνεται μεταξύ των συχνοτήτων 0.8Hz και 1.0Hz παρατηρούνται πολύ έντονες κινήσεις, αφού το νερό αναμιγνύεται με την άμμο και συμπεριφέρονται σαν ένα παχύρευστο υγρό (εικόνα 24γ). Για υψηλότερες συχνότητες η κίνηση του νερού παρουσιάζει μία συγκεκριμένη κίνηση κατά τη διάρκεια της διέγερσης, όπου για κάποιες χρονικές στιγμές μέρος της επιφάνειας της άμμου παραμένει

ελεύθερο, όπως και στην άμμο με ποσοστό σε υγρασία 35% (εικόνα 24δ), ενώ έντονες είναι και οι συγκρούσεις των κυματισμών (εικόνα 24ε,στ). Σε αυτές τις συχνότητες, η άμμος φαίνεται να συγκεντρώνεται και πάλι προς το κέντρο της δεξαμενής και να σχηματίζει ένα “βουνό”.



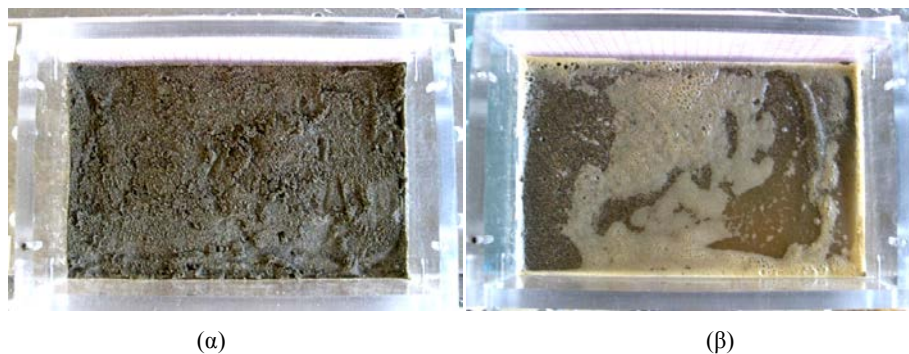
Εικόνα 24. Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση roll, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 40%. (α) $f=0.1\text{Hz}$, $A=22.2\text{deg}$. (β) $f=0.5\text{Hz}$, $A=13.2\text{deg}$. (γ) $f=0.8\text{Hz}$, $A=9.05\text{deg}$. (δ) $f=1.2\text{Hz}$, $A=6.33\text{deg}$. (ε) $f=1.9\text{Hz}$, $A=3.91\text{deg}$. (στ) $f=2.5\text{Hz}$, $A=2.37\text{deg}$.

7.2 Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση (Sway)

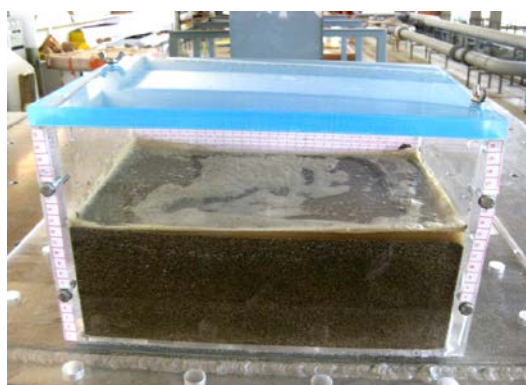
Στα πειράματα που πραγματοποιούνται με την άμμο χωρίς προσθήκη υγρασίας, αυτό που παρατηρούμε είναι μία πολύ μικρή μετατόπιση της άμμου στις αρκετά υψηλές συχνότητες και πλάτη, και κυρίως στη μέγιστη συχνότητα 3.0 Hz με πλάτη πάνω από 0.78cm. Μετά την προσθήκη ποσοστού υγρασίας 20 % και 25%, δεν παρουσιάζεται κάποια κίνηση της άμμου, παρά μόνο κάποιων συσσωματωμάτων στην επιφάνειά της.

Ενδιαφέρον παρουσιάζεται στο ποσοστό υγρασίας 27.5%. Πριν τη διέγερση της δεξαμενής, η άμμος μοιάζει με λάσπη, χωρίς να υπάρχει κάποια ποσότητα νερού στην επιφάνειά της (εικόνα 25α). Κατά την διέγερσή της στις χαμηλές συχνότητες και σε όλο το εύρος πλάτους δεν υπάρχει κάποια κίνηση της άμμου. Στη συχνότητα 1.0Hz με το μέγιστο πλάτος 10cm η άμμος αρχίζει να κινείται, ενώ στη συχνότητα 1.2 Hz με πλάτος 3.6cm έχει αρχίσει να βγαίνει το νερό στην επιφάνεια της άμμου και να την κινεί περισσότερο, ενώ στην ίδια συχνότητα με πλάτος 5.5cm είναι εμφανής η ύπαρξη του νερού στην επιφάνεια της άμμου (σαν μικρή λίμνη που κινείται πάνω στην επιφάνεια της άμμου αντίθετα με τη διέγερση της δεξαμενής). Από τη στιγμή που το νερό έχει εμφανιστεί στην επιφάνεια της άμμου, αυτό κινείται αντίθετα με την κίνηση της δεξαμενής, ενώ για κάθε συχνότητα

διέγερσης πάνω από 1.2Hz σε πλάτος 0.1cm είναι εμφανής ένας μικρός κυματισμός της ελεύθερης επιφάνειας του νερού. Για κάποιο πλάτος σε κάθε συχνότητα, το νερό παρασέρνει μαζί του την επιφάνεια της άμμου και την κινεί. Πιο συγκεκριμένα, στις συχνότητες 1.4 και 1.6Hz, το πλάτος έναρξης κίνησης της άμμου είναι το 4.8cm και 5.3cm αντίστοιχα, για τις συχνότητες 1.8 - 2.4Hz, το πλάτος είναι κοντά στα 0.3cm, ενώ για τις υψηλότερες συχνότητες η άμμος αρχίζει να κινείται όταν το πλάτος διέγερσης γίνει 1.5cm. Ολοκληρώνοντας τα πειράματα για το συγκεκριμένο ποσοστό υγρασίας, αυτό που παρατηρούμε, εκτός από τη συγκέντρωση κάποιας ποσότητας νερού στην επιφάνεια της άμμου (εικόνα 25β), είναι ότι οι λεπτοί κόκκοι της άμμου έχουν συγκεντρωθεί στα κατώτερα σημεία της δεξαμενής, ενώ οι πιο χονδροί κόκκοι έχουν συγκεντρωθεί κοντά στην επιφάνεια δημιουργώντας ένα “χαμόγελο” στο κέντρο της δεξαμενής (εικόνα 26).



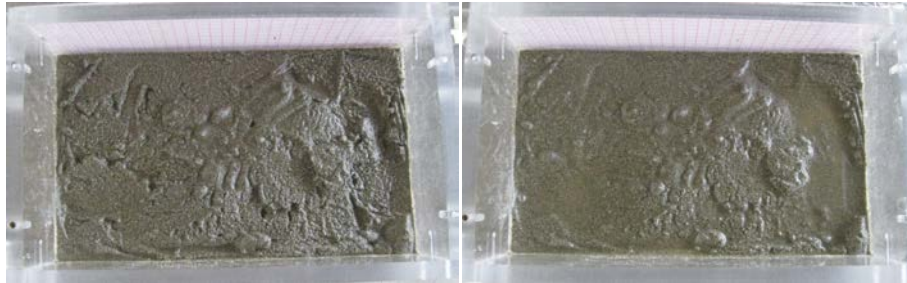
Εικόνα 25. Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5%. (α) Η επιφάνεια της άμμου πριν τη διέγερση της δεξαμενής. Διακρίνεται εύκολα η λασπώδης μορφής της. (β) Η επιφάνεια της άμμου μετά τη διέγερση της δεξαμενής. Το νερό που έχει αποβληθεί από την άμμο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έχει συσσωρευτεί στη δεξιά πλευρά της δεξαμενής.



Εικόνα 26. Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5%. Κατανομή της άμμου και του νερού μετά το πέρας των πειραμάτων.

Για το συγκεκριμένο ποσοστό σε υγρασία, πραγματοποιούνται κάποια επιπλέον πειράματα σε συχνότητες 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 και 1.4Hz, και πλάτη 9.2, 6.5, 5.8, 4.6 και 4.2cm αντίστοιχα, καθώς και για τη χαμηλότερη διέγερση, δηλαδή για πλάτος 0.2cm και συχνότητα

0.6Hz, με χρονική διάρκεια 5 λεπτά, για να εξετάσουμε την επίδραση του χρόνου στην εμφάνιση της ρευστοποίησης. Αυτό που συμπεραίνουμε από τα συγκεκριμένα πειράματα είναι ότι ο χρόνος διαδραματίζει αρκετά σημαντικό ρόλο, αφού σε κάθε επιπλέον διέγερση που εξετάζουμε αναδύεται ποσότητα νερού στην επιφάνεια της άμμου. Πιο συγκεκριμένα, στις συχνότητες 0.6 - 1.0Hz, ενώ στα πειράματα που έχουν διάρκεια 30 δευτερόλεπτα δεν υπάρχει κάποια ποσότητα νερού στην επιφάνεια της άμμου, στα πειράματα με χρονική διάρκεια 5 λεπτά είναι εμφανής μία λίμνη νερού πάνω στην επιφάνεια της άμμου (εικόνα 27α, β. 28α,β. 29α,β. 30α, β. 31α,β. 32α,β).



(α)

(β)

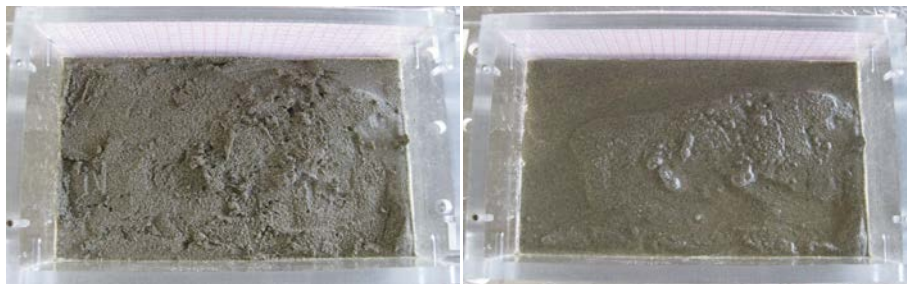
Εικόνα 27. Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% και διέγερση 5min. Η επιφάνεια της άμμου πριν (α) και μετά (β) τη διέγερσης σε συχνότητα 0.6Hz και πλάτος 0.2cm.



(α)

(β)

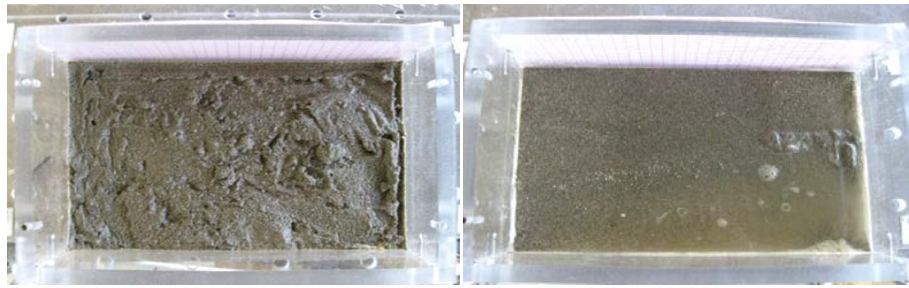
Εικόνα 28. Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% και διέγερση 5min. Η επιφάνεια της άμμου πριν (α) και μετά (β) τη διέγερσης σε συχνότητα 0.6Hz και πλάτος 9.2cm.



(α)

(β)

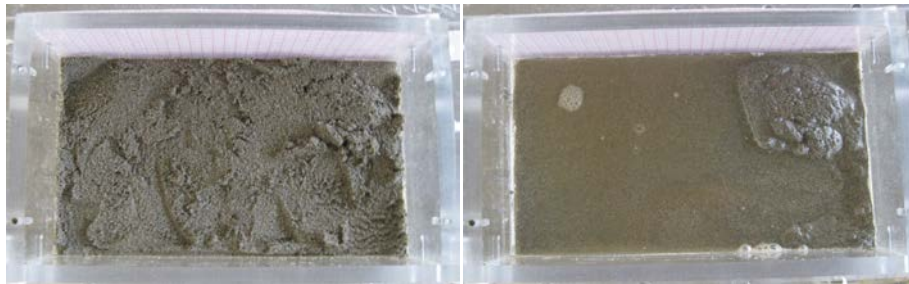
Εικόνα 29. Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% και διέγερση 5min. Η επιφάνεια της άμμου πριν (α) και μετά (β) τη διέγερσης σε συχνότητα 0.8Hz και πλάτος 6.5cm.



(α)

(β)

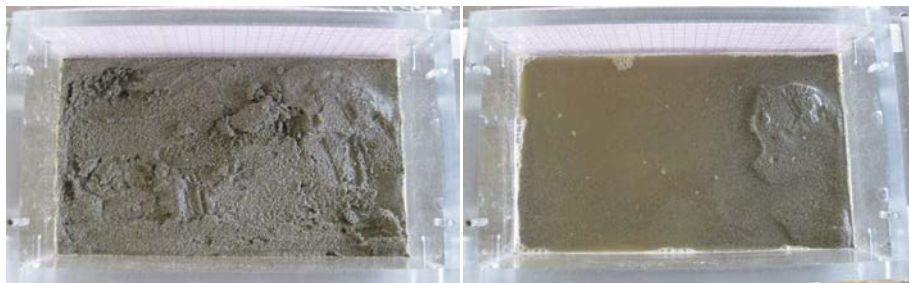
Εικόνα 30. Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% και διέγερση 5min. Η επιφάνεια της άμμου πριν (α) και μετά (β) τη διέγερσης σε συχνότητα 1.0Hz και πλάτος 5.8cm.



(α)

(β)

Εικόνα 31. Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% και διέγερση 5min. Η επιφάνεια της άμμου πριν (α) και μετά (β) τη διέγερσης σε συχνότητα 1.2Hz και πλάτος 4.6cm.



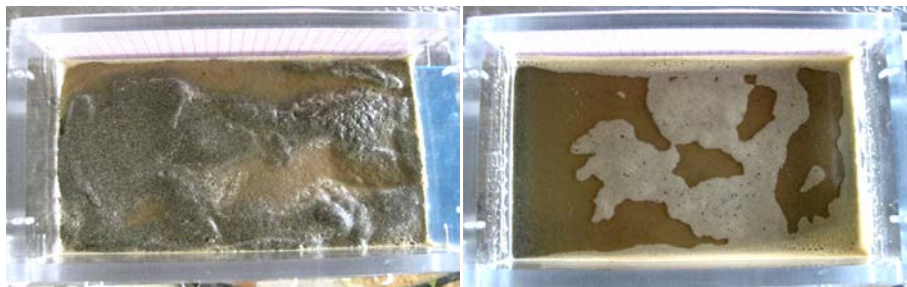
(α)

(β)

Εικόνα 32. Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% και διέγερση 5min. Η επιφάνεια της άμμου πριν (α) και μετά (β) τη διέγερσης σε συχνότητα 1.4Hz και πλάτος 4.2cm.

Προσθέτοντας υγρασία 30% στην προκαθορισμένη ποσότητα της άμμου, η άμμος γίνεται υπέρκορη και σχηματίζεται λίμνη νερού στην επιφάνειά της πριν ακόμα ξεκινήσουν τα πειράματα (εικόνα 33α). Μετά την πραγματοποίηση των συγκεκριμένων πειραμάτων, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η κίνηση της άμμου μαζί το νερό είναι διαφορετική σχεδόν σε κάθε συχνότητα διέγερσης. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διέγερση της δεξαμενής στη συχνότητα 0.6Hz με πολύ χαμηλό πλάτος, δεν παρουσιάζεται κάποια κίνηση της άμμου ή του νερού, ενώ από τη στιγμή που τη διεγείρουμε στη συχνότητα 0.6Hz με πλάτος 0.7cm, το νερό που βρίσκεται στην επιφάνεια της άμμου αρχίζει να κινείται, ώσπου σε πλάτος 9.3cm η ποσότητα του νερού φαίνεται να αυξάνεται, αφού καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια της άμμου (εικόνα 34α), ενώ σε πλάτη πάνω από 10cm η άμμος κινείται παράλληλα με το νερό και δημιουργεί κοίλη επιφάνεια άμμου. Στη συχνότητα 0.8Hz και για μικρά πλάτη το νερό να

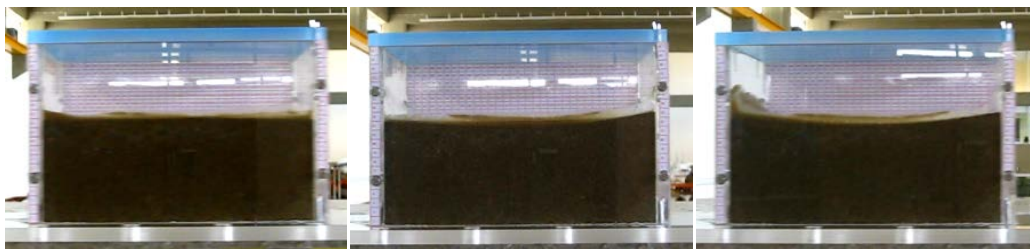
κινείται στο κέντρο της δεξαμενής (εικόνα 34β), ενώ όσο αυξάνεται το πλάτος, η κίνηση αυτή διευρύνεται σε ολόκληρη την επιφάνεια και για πολύ μεγάλα πλάτη το νερό “χτυπάει” με δύναμη στη μία πλευρά της δεξαμενής και επιστρέφει απευθείας στην άλλη πλευρά σύμφωνα με την κίνησή της (εικόνα 34γ). Για συχνότητες διέγερσης 1.0 - 1.8Hz το νερό που έχει αναδυθεί μετακινείται από τη μία πλευρά της δεξαμενής στην άλλη, χωρίς συγκεκριμένη μορφή, σαν πρόσκρουση πολλών κυματισμών (ειδικά στις πιο υψηλές συχνότητες) αυξάνοντας την ένταση της κίνησης όσο αυξάνεται το πλάτος της, εικόνα 34δ). Τέλος, στο εύρος συχνοτήτων 2.0 - 3.0Hz, ενώ στα μικρά πλάτη η κίνηση του νερού παραμένει στις πλευρές της δεξαμενής, σε πλάτη 0.1cm - 0.2cm (ανάλογα τη συχνότητα) διευρύνεται σε ολόκληρη την επιφάνεια (εικόνα 34ε), σε πλάτη 1.5 - 3.0cm κινείται όπως και στα μικρά πλάτη, ενώ στα μεγαλύτερα πλάτη, το νερό αναμιγνύεται με την άμμο και κινούνται σαν ένα ρευστό (εικόνα34στ).



(α)

(β)

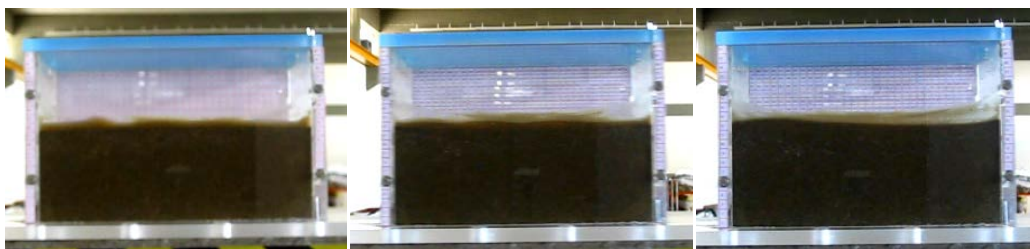
Εικόνα 33. Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 30% (α) Η επιφάνεια της άμμου πριν τη διέγερση της δεξαμενής. Διακρίνονται εύκολα οι λίμνες νερού που έχουν δημιουργηθεί στην επιφάνεια της άμμου. (β) Η επιφάνεια της άμμου μετά τη διέγερση της δεξαμενής. Το νερό που έχει αποβληθεί από την άμμο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έχει καλύψει ολόκληρη την επιφάνειά της.



(α)

(β)

(γ)



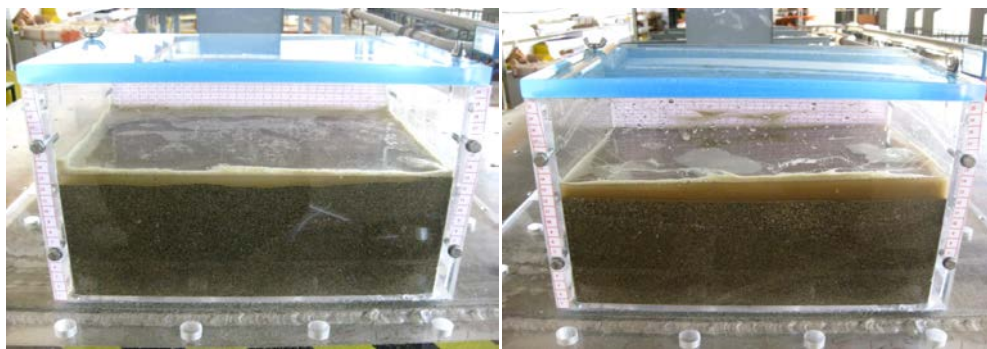
(δ)

(ε)

(στ)

Εικόνα 34. Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση sway, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 30%.. (α) $f=0.6\text{Hz}$, $A=10\text{cm}$. (β) $f=0.6\text{Hz}$, $A=17\text{cm}$. (γ) $f=0.8\text{Hz}$, $A=1.1\text{cm}$. (δ) $f=1.6\text{Hz}$, $A=2.8\text{cm}$. (ε) $f=2.2\text{Hz}$, $A=0.9\text{cm}$. (στ) $f=2.4\text{Hz}$, $A=3.2\text{cm}$.

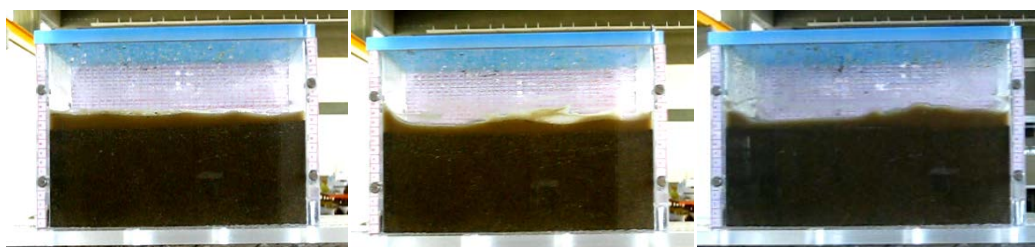
Στα πειράματα που πραγματοποιούνται με ποσοστό σε υγρασία 35%, υπάρχει καθ' όλη τη διάρκεια, νερό πάνω από την επιφάνεια της άμμου. Πριν την έναρξη των πειραμάτων το νερό βρίσκεται σε ύψος 1.0cm, ενώ μετά το πέρας των πειραμάτων το νερό έχει φτάσει περίπου τα 2.0cm (εικόνα 35α,β). Ενδιαφέρον παρουσιάζει εδώ το γεγονός ότι για όλο, σχεδόν, το εύρος των συχνοτήτων και για τα διαφορετικά πλάτη παρατηρούνται τα ίδια φαινόμενα. Αναλυτικότερα, η ελεύθερη επιφάνεια του νερού κινείται άλλοτε φτάνοντας τις ιδιοσυχνότητες του συστήματός μας (σε υψηλές συχνότητες και πολύ χαμηλά πλάτη, εικόνα 36α,β) και άλλοτε ακανόνιστα (χαμηλές συχνότητες και χαμηλά πλάτη, εικόνα 36γ,δ) και όσο αυξάνεται το πλάτος της διέγερσης η κίνησή της γίνεται πιο έντονη (εδώ έχουμε φανερή πρόσκρουση κυματισμών, εικόνα 36ε,στ) με αποτέλεσμα να “χτυπάει” βίαια στα τοιχώματα της δεξαμενής και σε μεγάλα πλάτη να αναμιγνύεται πλήρως με την άμμο (εικόνα 36ζ). Σε κάποιες περιπτώσεις (συχνότητα 0.8Hz με πλάτη 8.4 - 14.7cm και συχνότητα 1.0Hz με πλάτη 7.1 - 10cm) τείνει να συμπεριφέρεται σαν ένα παχύρευστο υγρό κάνοντας βίαιες και ανεξέλεγκτες κινήσεις (εικόνα 36η,θ).



(α)

(β)

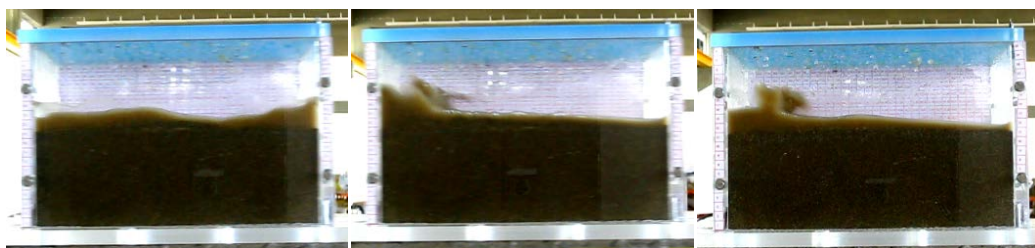
Εικόνα 35. Κίνηση sway για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) Η επιφάνεια της άμμου πριν τη διέγερση της δεξαμενής. (β) Η επιφάνεια της άμμου μετά τη διέγερση της δεξαμενής. Είναι εμφανής η αύξηση της ποσότητας του νερού.



(α)

(β)

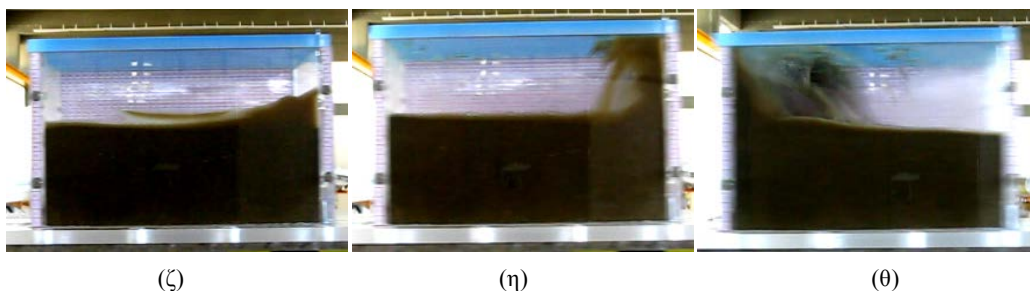
(γ)



(δ)

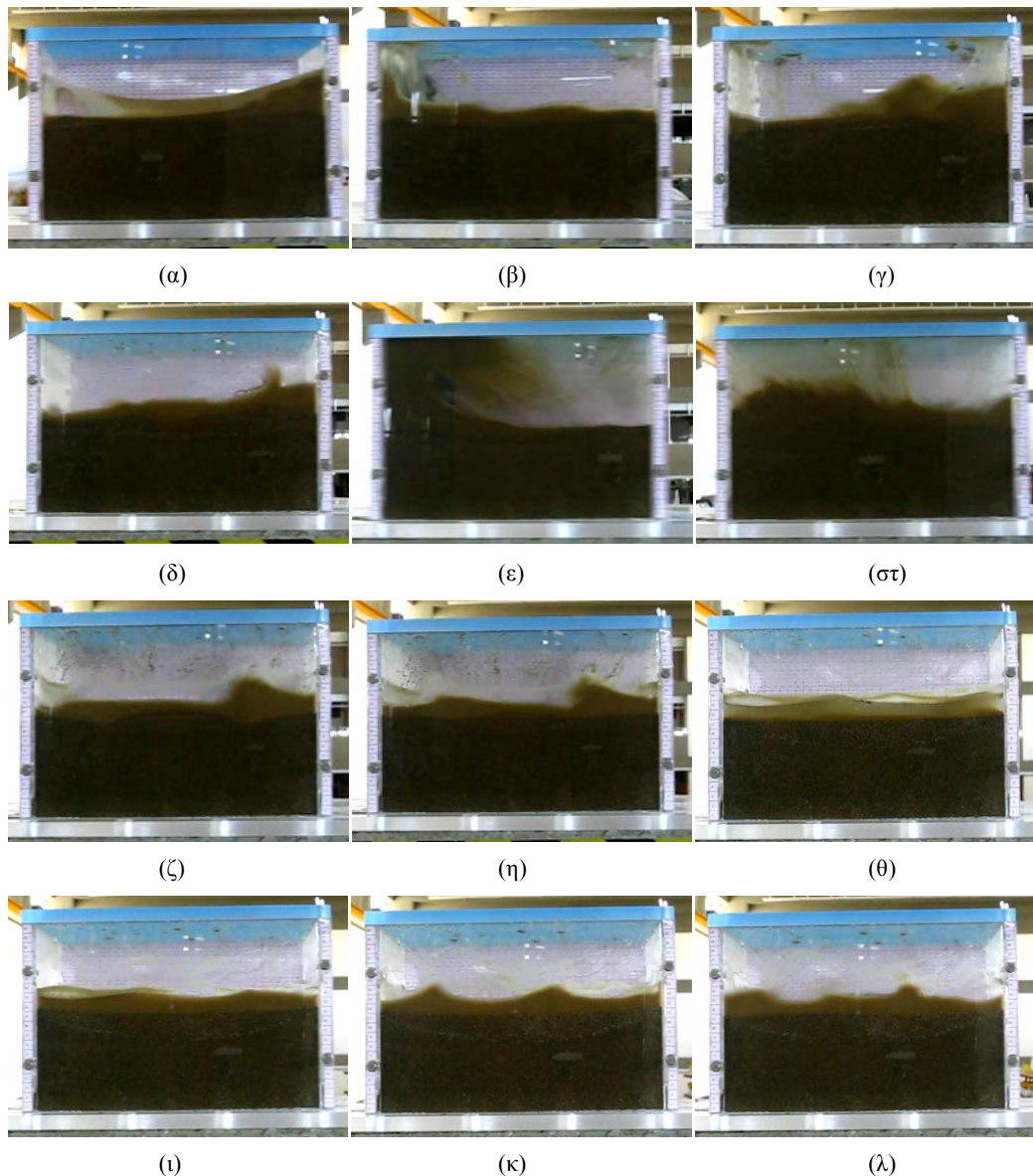
(ε)

(στ)



Εικόνα 36. Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση sway, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) $f=2.0\text{Hz}$, $A=0.6\text{cm}$. (β) $f=2.6\text{Hz}$, $A=0.8\text{cm}$. (γ) $f=1.2\text{Hz}$, $A=4.6\text{cm}$. (δ) $f=1.4\text{Hz}$, $A=2.8\text{cm}$. (ε) $f=1.4\text{Hz}$, $A=7.9\text{cm}$. (στ) $f=1.8\text{Hz}$, $A=4.6\text{cm}$. (ζ) $f=0.6\text{Hz}$, $A=13.9\text{cm}$. (η) $f=0.8\text{Hz}$, $A=14.7\text{cm}$. (θ) $f=1.0\text{Hz}$, $A=10\text{cm}$.

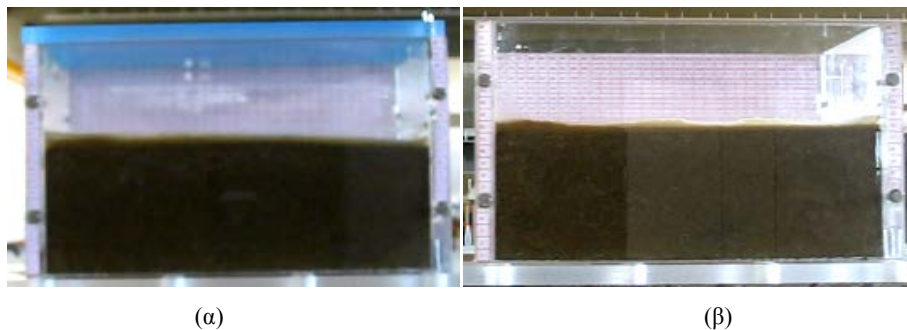
Προσθέτοντας στην άμμο ποσοστό υγρασίας 40%, η επιφάνεια της άμμου καλύπτεται εξολοκλήρου από το νερό, το οποίο έχει ύψος 2.0cm πάνω από την επιφάνειά της (πριν αλλά και μετά την εκτέλεση των πειραμάτων). Η συμπεριφορά της άμμου με ποσοστό σε υγρασία 40% έχει αρκετά κοινά με αυτή της άμμου με ποσοστό σε υγρασία 35%, αφού το χαρακτηριστικό τους είναι η κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού. Καθώς κινείται η δεξαμενή, κινείται και η ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Όταν το πλάτος της κίνησης αυξάνει, η κίνηση του νερού γίνεται πιο έντονη και παρασέρνει μαζί του κάποια ποσότητα της άμμου. Χαρακτηριστικό στη διέγερση μικρής συχνότητας και μεγάλου πλάτους, είναι ο σχηματισμός γωνίας της επιφάνειας του νερού με την επιφάνεια της άμμου (εικόνα 37α). Στα μεγάλα πλάτη και συχνότητες πάνω από 0.6Hz (συχνότητα 0.8Hz με πλάτη 12.1 - 14.7cm, συχνότητα 1.0Hz με πλάτος 4.6 - 8.6cm και συχνότητα 1.2Hz με πλάτος 3.6 - 7.4cm) μπορούμε να παρατηρήσουμε την έντονη κίνηση της επιφάνειας του νερού που προσκρούει στα τοιχώματα της δεξαμενής (εικόνα 37β,γ), ενώ για ακόμα μεγαλύτερα πλάτη η άμμος αναμιγνύεται με το νερό και συμπεριφέρεται σαν ένα παχύρευστο υγρό (συχνότητα 1.0Hz με πλάτη 8.9 - 10cm και συχνότητα 1.2Hz με πλάτη 8.2 - 9.3cm, εικόνα 37δ,ε). Με την περαιτέρω αύξηση της συχνότητας μειώνονται τα τόσο έντονα φαινόμενα. Σε πλάτη κοντά στα 3.5cm λόγω της έντονης πρόσκρουσης των κυματισμών που δημιουργούνται από τη διέγερση (εικόνα 37στ), έχουμε μετατόπιση της άμμου, όπου κάποια ποσότητα συγκεντρώνεται στο κέντρο και κάποια άλλη στις πλευρές της δεξαμενής (εικόνα 37ζ). Όσο το πλάτος αυξάνεται περισσότερο (3.2 - 5.7cm) οι συγκρούσεις των κυματισμών είναι τόσο έντονες που παρασέρνουν την άμμο ακόμα περισσότερο, με αποτέλεσμα να κινείται σύμφωνα με την κίνηση του νερού (εικόνα 37η). Για συχνότητες από 2.4Hz και πάνω, σε μικρά και ενδιάμεσα πλάτη η ελεύθερη επιφάνεια του νερού ακολουθεί την κίνηση κύματος (εικόνα 37θ,ι,κ), ενώ σε μεγάλα πλάτη (1.0 - 1.9cm) ο κυματισμός της επιφάνειας είναι σύνθετος και παρασέρνει μαζί του κάποια ποσότητα από την άμμο (εικόνα 37λ).



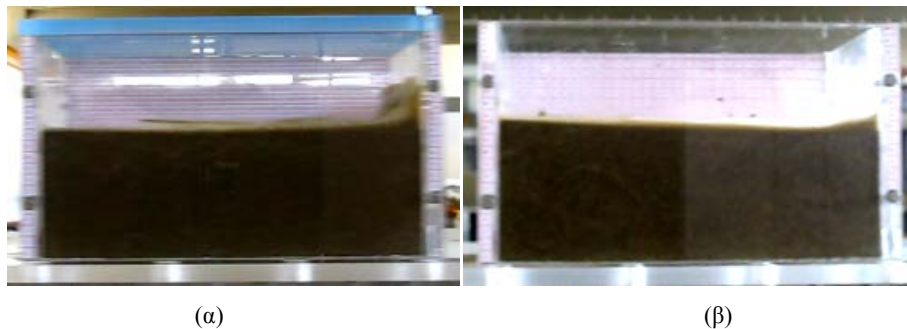
Εικόνα 37. Στιγμιότυπα από τα πειράματα με κίνηση sway, για την άμμο με ποσοστό σε υγρασία 40%. (α) $f=0.6\text{Hz}$, $A=16.5\text{cm}$. (β) $f=0.8\text{Hz}$, $A=14.7\text{cm}$. (γ) $f=1.0\text{Hz}$, $A=7.1\text{cm}$. (δ) $f=1.0\text{Hz}$, $A=10\text{cm}$. (ε) $f=1.2\text{Hz}$, $A=9.3\text{cm}$. (στ) $f=1.4\text{Hz}$, $A=3.5\text{cm}$. (ζ) $f=1.4\text{Hz}$, $A=4.3\text{cm}$. (η) $f=1.8\text{Hz}$, $A=6.2\text{cm}$. (θ) $f=2.4\text{Hz}$, $A=0.73\text{cm}$. (ι) $f=2.6\text{Hz}$, $A=0.84\text{cm}$. (κ) $f=3.0\text{Hz}$, $A=0.45\text{cm}$. (λ) $f=3.0\text{Hz}$, $A=1.2\text{cm}$.

Για τα ποσοστά σε υγρασία 30% και 35%, πραγματοποιούνται κάποια επιπλέον πειράματα, με σκοπό να προσδιορίσουμε πως συμπεριφέρεται το μίγμα της άμμου με το νερό, όταν αυτό έχει αρχικές συνθήκες (το μίγμα για το επόμενο πείραμα είναι αυτό που έχει διαμορφωθεί από την εκτέλεση του προηγούμενου πειράματος) και όταν έχει μηδενικές αρχικές συνθήκες (κάθε πείραμα είναι ανεξάρτητο από το επόμενο ή το προηγούμενο. Αυτό επιτυγχάνεται με ανάμιξη του μίγματος πριν την έναρξη κάθε πειράματος). Τα συγκεκριμένα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για συχνότητες 0.8 - 1.4Hz και για τρία διαφορετικά πλάτη διέγερσης. Για το ποσοστό σε υγρασία 30%, αυτό που παρατηρούμε είναι ότι στα πειράματα με μηδενικές αρχικές συνθήκες η ποσότητα του νερού στην επιφάνεια της άμμου είναι

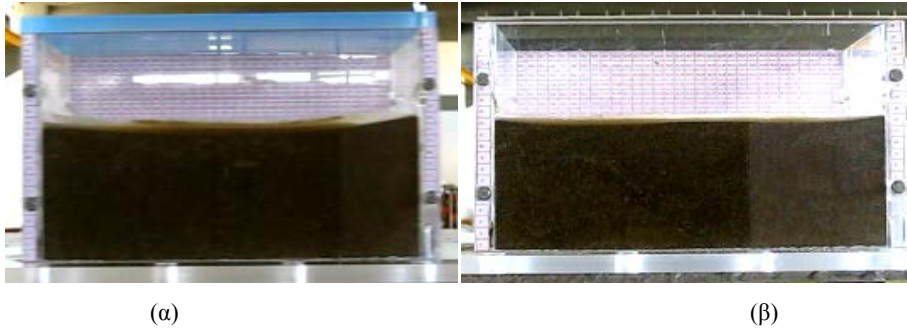
μικρότερη σε σχέση με τα πειράματα που είχαν αρχικές συνθήκες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στα χαμηλά πλάτη η κίνηση του νερού να έχει σχεδόν την ίδια μορφή και στις δύο περιπτώσεις (εικόνα 38α,β) ενώ στα μεγάλα πλάτη η κίνηση να είναι πιο “ήρεμη” στα πειράματα με μηδενικές αρχικές συνθήκες (εικόνα 39α,β). Επιπλέον στα πειράματα με μηδενικές αρχικές συνθήκες, η επιφάνεια της άμμου δεν έχει την ίδια μορφή με τα αρχικά πειράματα (εικόνα 40α,β), αφού κάθε φορά πριν την έναρξη των πειραμάτων αναδιαμορφώνεται στην αρχική της κατάσταση χωρίς να επηρεάζεται από την μορφή που είχε λάβει σε προηγούμενα πειράματα. Για το ποσοστό σε υγρασία 35%, η συμπεριφορά του μίγματος άμμου και νερού με μηδενικές αρχικές συνθήκες είναι ίδια με τη συμπεριφορά με αρχικές συνθήκες, σε όλους τους συνδυασμούς συχνοτήτων - πλατών που εξετάσαμε (εικόνα 41α,β. 42α,β. 43α,β. 44α,β). Αυτό συμβαίνει διότι η ποσότητα του νερού που βρίσκεται στην επιφάνεια της άμμου είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις.



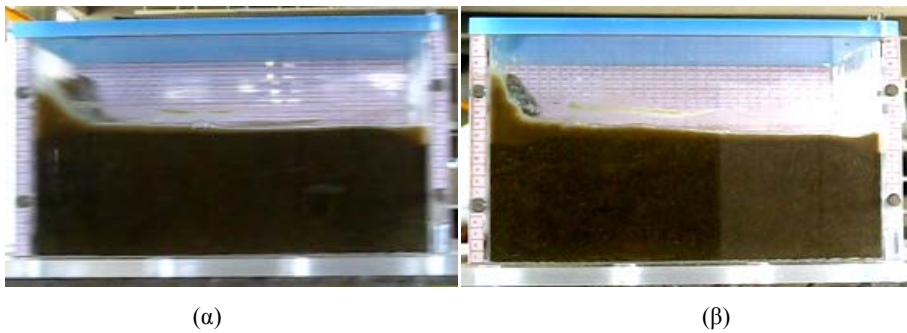
Εικόνα 38. Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 30%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=1.2\text{Hz}$, $A=3.6\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=1.2\text{Hz}$, $A=3.6\text{cm}$.



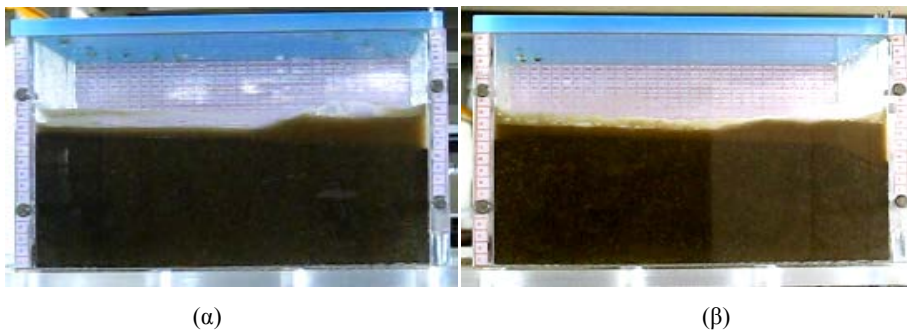
Εικόνα 39. Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 30%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=0.8\text{Hz}$, $A=11.1\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=0.8\text{Hz}$, $A=11.1\text{cm}$.



Εικόνα 40. Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 30%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=0.8\text{Hz}$, $A=5.6\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=0.8\text{Hz}$, $A=5.6\text{cm}$.



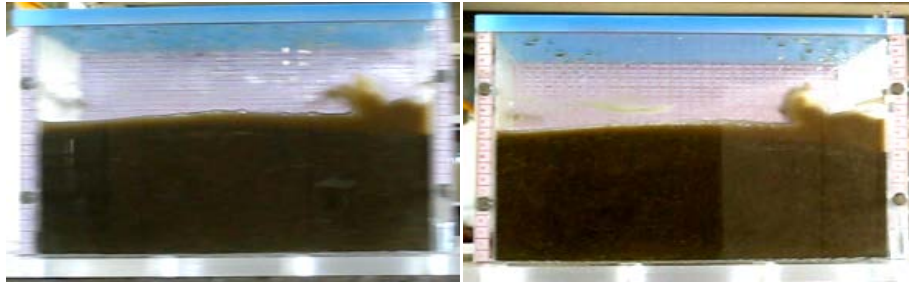
Εικόνα 41. Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=0.8\text{Hz}$, $A=8.4\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=0.8\text{Hz}$, $A=8.4\text{cm}$.



Εικόνα 42. Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=1.0\text{Hz}$, $A=4.6\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=1.0\text{Hz}$, $A=4.6\text{cm}$.



Εικόνα 43. Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=1.2\text{Hz}$, $A=8.2\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=1.2\text{Hz}$, $A=8.2\text{cm}$.



(α)

(β)

Εικόνα 44. Σύγκριση πειραμάτων με/χωρίς αρχικές συνθήκες στην κίνηση sway, με ποσοστό σε υγρασία 35%. (α) Πείραμα με αρχικές συνθήκες για $f=1.4\text{Hz}$, $A=6.9\text{cm}$. (β) Πείραμα με μηδενικές αρχικές συνθήκες για $f=1.4\text{Hz}$, $A=6.9\text{cm}$.

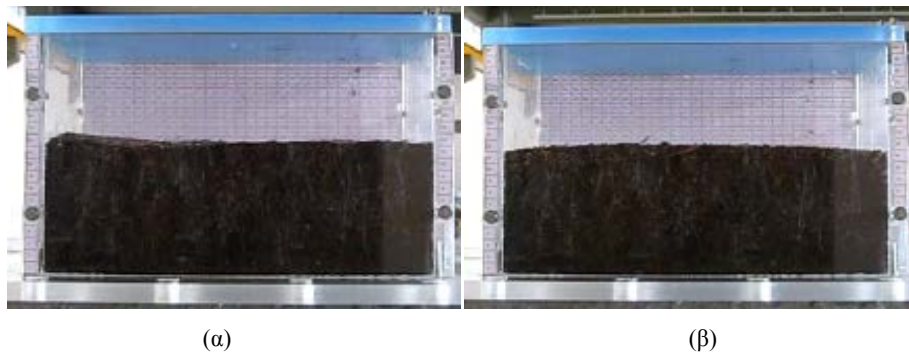
Ορμώμενοι από την ανατροπή του πλοίου “Erol Senkaya” το Μάιο του 2012 (αλλά και του “Άγιος Γεράσιμος” το Μάρτιο του ίδιου χρόνου), η οποία συνέβη κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής, και αποδόθηκε στο φαινόμενο της ρευστοποίησης, θελήσαμε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του υλικού που μετέφερε, τον ελαιοπυρήνα. Έτσι, προμηθευτήκαμε κάποια αντιπροσωπευτικά δείγματα ελαιοπυρήνα με διαφορετικό ποσοστό σε υγρασία, έτσι όπως αυτά διατίθενται από το εκάστοτε ελαιουργείο (Καλαμάτα, Κέρκυρα, Μυτιλήνη) για μεταφορά προς τα πυρηνελουργεία. Τα δείγματα που τελικά εξετάζουμε είναι τρία, ξηρός ελαιοπυρήνας, ελαιοπυρήνας με υγρασία και υγρός ελαιοπυρήνας.

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων τοποθετείται το εκάστοτε δείγμα (ξηρός ελαιοπυρήνας, ελαιοπυρήνας με υγρασία, υγρός ελαιοπυρήνας) στην δεξαμενή έτσι ώστε ο λόγος του ύψους της επιφάνειας του ελαιοπυρήνα προς το ύψος της δεξαμενής να είναι 0.55 (ίσως με τον αντίστοιχο στην περίπτωση της άμμου), και διεγείρουμε τη δεξαμενή σύμφωνα με τα προαναφερθέντα (κινήσεις Roll και Sway).

Μετά την ολοκλήρωση των προκαθορισμένων πειραμάτων για τα τρία δείγματα του ελαιοπυρήνα πραγματοποιούνται κάποιες επιπλέον δοκιμές (tilting test) για τον προσδιορισμό της γωνίας ανάπαυσης (angle of repose) του υγρού ελαιοπυρήνα.

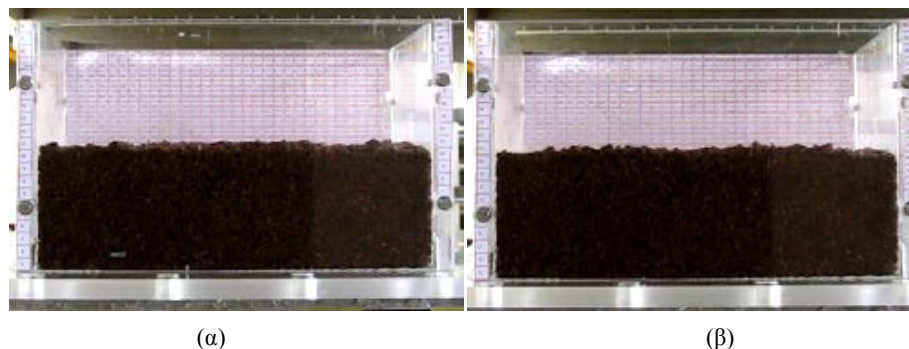
8.1 Διέγερση διατοιχισμού (Roll)

Στα πειράματα που πραγματοποιούνται με τον ξηρό ελαιοπυρήνα, όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης της δεξαμενής ο ελαιοπυρήνας συγκεντρώνεται στο κέντρο της σχηματίζοντας ένα “βουνό” (εικόνα 45α,β), ενώ στις πολύ υψηλές συχνότητες διέγερσης παρατηρείται μετατόπιση κάποιων συσσωματωμάτων στην επιφάνεια του ελαιοπυρήνα.



Εικόνα 45. Κίνηση roll για τον ξηρό ελαιοπυρήνα. (α) Πριν τη διέγερση της δεξαμενής (β) Μετά τη διέγερση της δεξαμενής.

Τοποθετώντας τον ελαιοπυρήνα με υγρασία στη δεξαμενή και διεγείροντάς τη, αυτό που μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι ότι στις υψηλές συχνότητες υπάρχει έντονη κινητικότητα των επιφανειακών συσσωματωμάτων, με αποτέλεσμα την αναδιάταξη της επιφάνειας του ελαιοπυρήνα (εικόνα 46α,β).

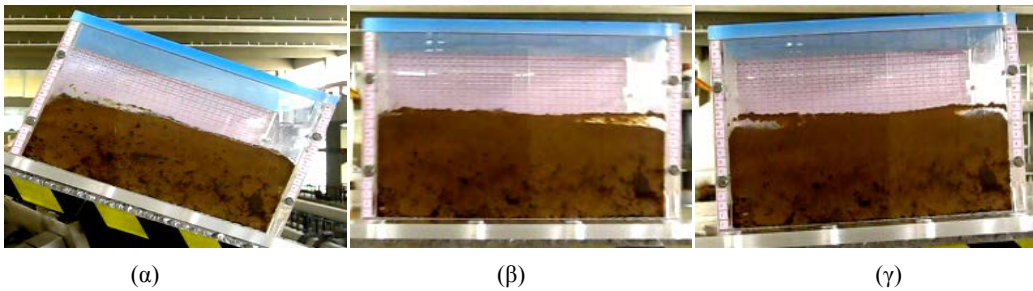


Εικόνα 46. Κίνηση roll για τον Ελαιοπυρήνα με υγρασία. (α) Πριν τη διέγερση της δεξαμενής (β) Μετά τη διέγερση της δεξαμενής.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά του υγρού ελαιοπυρήνα. Πριν τη διέγερση της δεξαμενής υπάρχουν διασκορπισμένες σε ολόκληρη την έκταση του υλικού κηλίδες από υγρασία (ποσότητα από νερό και λάδι), κάποιες από τις οποίες απορροφώνται από το υπόλοιπο υλικό κατά τη διέγερση (εικόνα 47α,β). Πιο συγκεκριμένα, ο υγρός ελαιοπυρήνας έχει τη μορφή παχύρευστου υγρού και για χαμηλές συχνότητες διέγερσης κινείται σύμφωνα με την κίνηση της δεξαμενής, παραθέτοντας αρκετή ποσότητα του υλικού στην εκάστοτε πλευρά (εικόνα 48α). Λόγω της μορφής του, το υλικό καθώς προσπίπτει στη μία πλευρά της δεξαμενής καθυστερεί να φτάσει στην άλλη πλευρά και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ποσότητα του ελαιοπυρήνα στην αριστερή πλευρά της δεξαμενής, όταν αυτή βρίσκεται στο σημείο έναρξης κίνησης να είναι μεγαλύτερη απ' ότι στην δεξιά πλευρά της (εικόνα 48β). Για συχνότητες διέγερσης 2.3 - 2.4Hz, όταν η δεξαμενή φτάνει το μέγιστο πλάτος δεν υπάρχει κάποια μετατόπιση του ελαιοπυρήνα (εικόνα 48γ), ενώ για συχνότητες πάνω από 2.4Hz μεγαλύτερη ποσότητα του ελαιοπυρήνα μετατοπίζεται προς την δεξιά πλευρά της δεξαμενής. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι δεν κινείται ολόκληρη η ποσότητα του ελαιοπυρήνα, αλλά μέρος αυτού, και συγκεκριμένα η ποσότητα που βρίσκεται πάνω από τα μεγάλα διάκενα του νερού (περίπου 3cm, από την επιφάνεια προς τα κάτω), η οποία έχει απορροφήσει όλη την υγρασία.



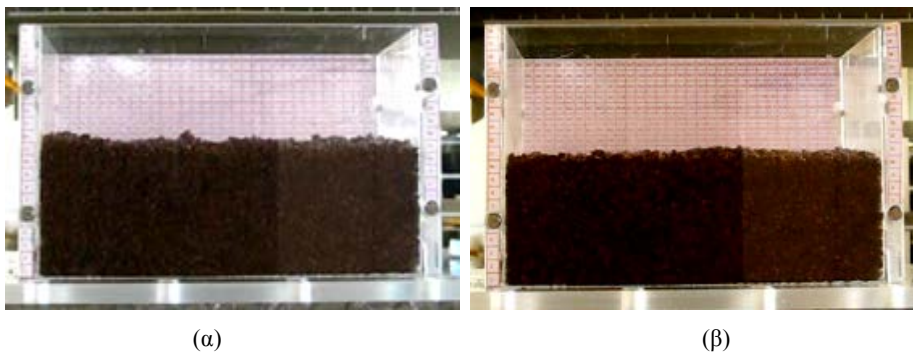
Εικόνα 47. Διαμόρφωση των κηλίδων υγρασίας στο δείγμα του υγρού ελαιοπυρήνα, πριν (α) και μετά (β) τη διέγερση της δεξαμενής στην κίνηση roll.



Εικόνα 48. Στιγμιότυπα από τη διέγερση στην κίνηση roll του υγρού ελαιοπυρήνα. (α) $f=0.2\text{Hz}$, $A=22.2\text{deg}$. (β) $f=1.6\text{Hz}$, $A=4.64\text{deg}$. (γ) $f=2.4\text{Hz}$, $A=2.46\text{deg}$.

8.2 Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση (Sway)

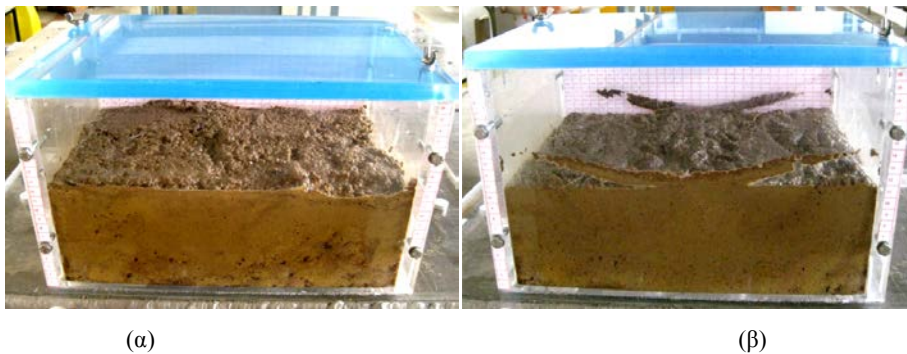
Στα πειράματα που πραγματοποιούνται για τον ξηρό ελαιοπυρήνα και τον ελαιοπυρήνα με υγρασία, παρατηρείται ότι στις υψηλές συχνότητες και μεγάλα πλάτη διέγερσης έχει την τάση να διευθετηθεί στο χώρο.



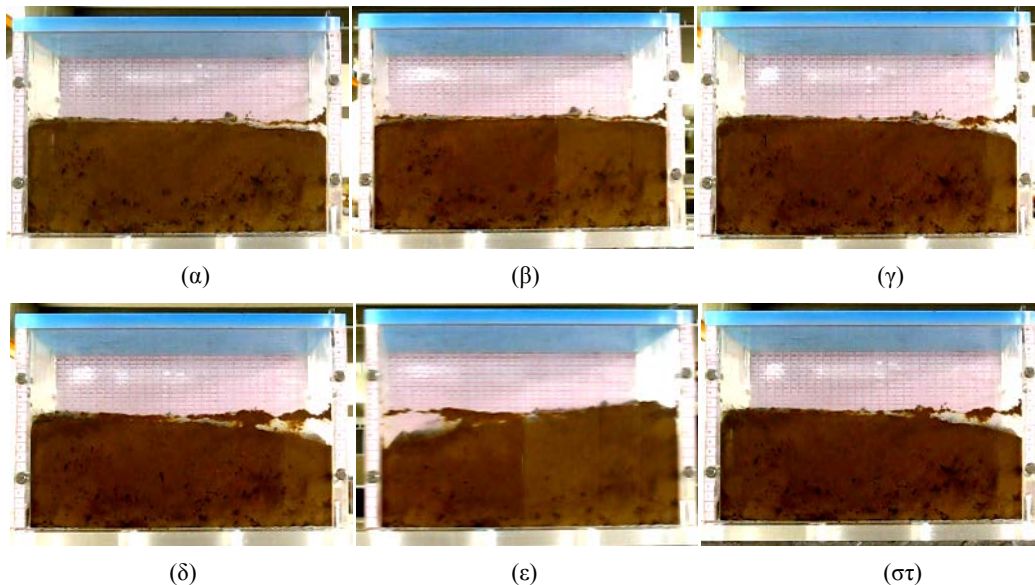
Εικόνα 49. Κίνηση sway για τον ελαιοπυρήνα με υγρασία. (α) Πριν τη διέγερση της δεξαμενής (β) Μετά τη διέγερση της δεξαμενής.

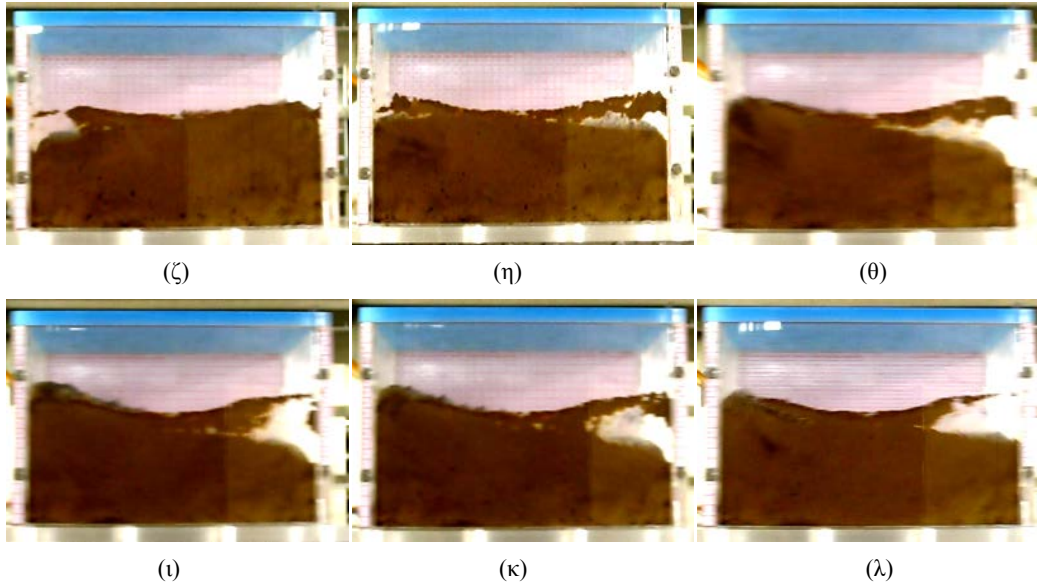
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά του υγρού ελαιοπυρήνα. Πριν τη διέγερση της δεξαμενής υπάρχουν διασκορπισμένες, κυρίως στον πυθμένα της δεξαμενής, κηλίδες από υγρασία (ποσότητα από νερό και λάδι), οι οποίες απορροφώνται από το υπόλοιπο υλικό κατά τη διάρκεια της διέγερσης (εικόνα 50α,β). Πιο συγκεκριμένα, διεγείροντας τη δεξαμενή σε χαμηλές συχνότητες και μικρά πλάτη δεν υπάρχει κάποια κίνηση του ελαιοπυρήνα, ενώ για

διέγερση σε χαμηλές συχνότητες και μεγάλα πλάτη, ο ελαιοπυρήνας κινείται σύμφωνα με την κίνηση της δεξαμενής, παραθέτοντας μεγαλύτερη ποσότητα υλικού στην αριστερή πλευρά (εικόνα 51α,γ), αφού δεν προλαβαίνει να πάει όλη η ποσότητα στην άλλη πλευρά, γεγονός που οδηγεί στην μετατόπιση του ελαιοπυρήνα προς την αριστερή πλευρά της δεξαμενής (εικόνα 51β). Για συχνότητες 1.0 - 2.4Hz, η ποσότητα του ελαιοπυρήνα που προσπίπτει στις δύο πλευρές είναι κάθε φορά σχεδόν ίδια, ενώ για συχνότητες 2.4 - 3.0Hz και μεγάλα πλάτη διέγερσης, ο ελαιοπυρήνας κινείται αντίθετα με την κίνηση της δεξαμενής, εναποθέτοντας μεγαλύτερη ποσότητα του υλικού στην δεξιά πλευρά. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι για συχνότητες διέγερσης 1.4 - 2.4Hz και μεγάλα πλάτη, κινείται σχεδόν ολόκληρο το υλικό με μεγάλη εναπόθεση υλικού στις πλευρές της δεξαμενής κατά τη διέγερσή της (όχι όταν πιάνει το μέγιστο πλάτος κάθε φορά, εικόνα 51δ,ε,ζ,η,θ,ι,κ,λ).



Εικόνα 50. Κίνηση sway για τον υγρό ελαιοπυρήνα. (α) Πριν τη διέγερση της δεξαμενής (β) Μετά τη διέγερση της δεξαμενής.

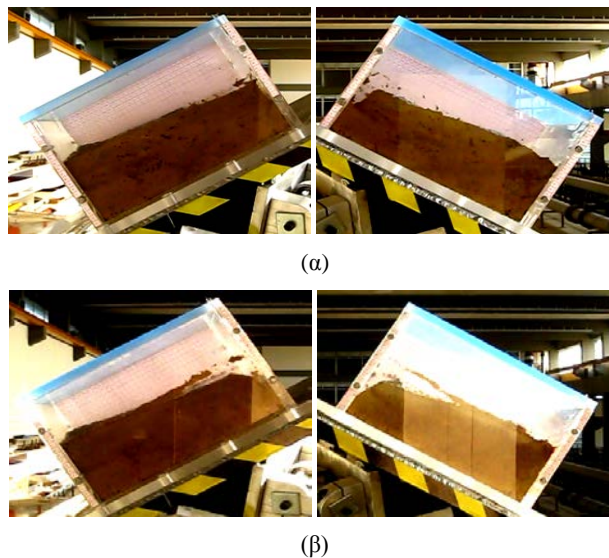




Εικόνα 51. Στιγμιότυπα από τη διέγερση στην κίνηση sway του υγρού ελαιοπυρήνα. (α) $f=0.8\text{Hz}$, $A=14.7\text{cm}$. (β) $f=1.0\text{Hz}$, $A=2.2\text{cm}$. (γ) $f=1.0\text{Hz}$, $A=10.6\text{cm}$. (δ) $f=1.0\text{Hz}$, $A=10\text{cm}$. (ε) $f=1.2\text{Hz}$, $A=9.3\text{cm}$. (στ) $f=1.4\text{Hz}$, $A=4.8\text{cm}$. (ζ) $f=1.4\text{Hz}$, $A=7.9\text{cm}$. (η) $f=1.6\text{Hz}$, $A=0.43\text{cm}$. (θ) $f=1.8\text{Hz}$, $A=5.5\text{cm}$. (ι) $f=1.8\text{Hz}$, $A=6.2\text{cm}$. (κ) $f=2.2\text{Hz}$, $A=4.3\text{cm}$. (λ) 2.4Hz , $A=2.7\text{cm}$.

8.3 Δοκιμές εύρεσης της γωνίας ανάπαυσης (Tilting tests)

Με σκοπό να μετρήσουμε την γωνία ανάπαυσης του υγρού ελαιοπυρήνα, πραγματοποιούμε δύο δοκιμές. Στην πρώτη δοκιμή, ανακατεύουμε το υλικό ώστε να έχει μία ομοιόμορφη σύσταση και μετατοπίζουμε τη δεξαμενή 30° με συχνότητα 0.0025Hz έτσι ώστε να κινείται 0.3° το δευτερόλεπτο. Στη δεύτερη περίπτωση κάνουμε ακριβώς το ίδιο με μόνη διαφορά ότι η δεξαμενή έχει διεγερθεί πριν τη δοκιμή και το υλικό έχει ήδη μετατοπιστεί.



Εικόνα 52. Δοκιμή για την μέτρηση της γωνίας ανάπαυσης του υγρού ελαιοπυρήνα (α) Με μηδενικές αρχικές συνθήκες. (β) Με αρχικές συνθήκες.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο δοκιμών, όπως αυτά παρουσιάζονται στις εικόνες 52α και 52β, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, αν και λόγω της υγρασίας δεν είναι εφικτός ο ακριβής προσδιορισμός της γωνίας ανάπαυσης (το υλικό κινείται σχεδόν με ενιαίο τρόπο σε όλο του το σώμα και όχι μόνο επιφανειακά), η γωνία στην οποία ξεκινάει το υλικό να κινείται είναι μικρότερη στη δεύτερη περίπτωση. Η διαφορά αυτή που είναι ίση με 10° μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το υγρό κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διαχέεται στο υλικό και το μετατρέπει σε κάτι που προσομοιάζει παχύρευστο υγρό (επομένως περισσότερο ρευστό σε σχέση με την αρχική του κατάσταση). Σημαντικό είναι το γεγονός ότι στη δεύτερη περίπτωση το υλικό αρχίζει να μετατοπίζεται προς την άλλη πλευρά 2° αργότερα σε σχέση με την πρώτη περίπτωση, γεγονός που συνδέεται άμεσα το φαινόμενο της ρευστοποίησης.

Με τη βοήθεια του προγράμματος AVEVA Marine, πραγματοποιείται ανάλυση της ευστάθειας πλοίου τύπου bulk carrier (καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς, κριτήριο άθικτης ευστάθειας, κριτήριο καιρού) για τη μεταφορά δύο διαφορετικών ειδών φορτίου, βαρέα και ελαφρά κοκκώδη υλικά. Το συγκεκριμένο πλοίο είναι αυτό που μελετάται στα πλαίσια του προπτυχιακού μαθήματος “Θέμα Μελέτης και Σχεδίασης Πλοίου Ι” της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και τα γενικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στον πίνακα 4.

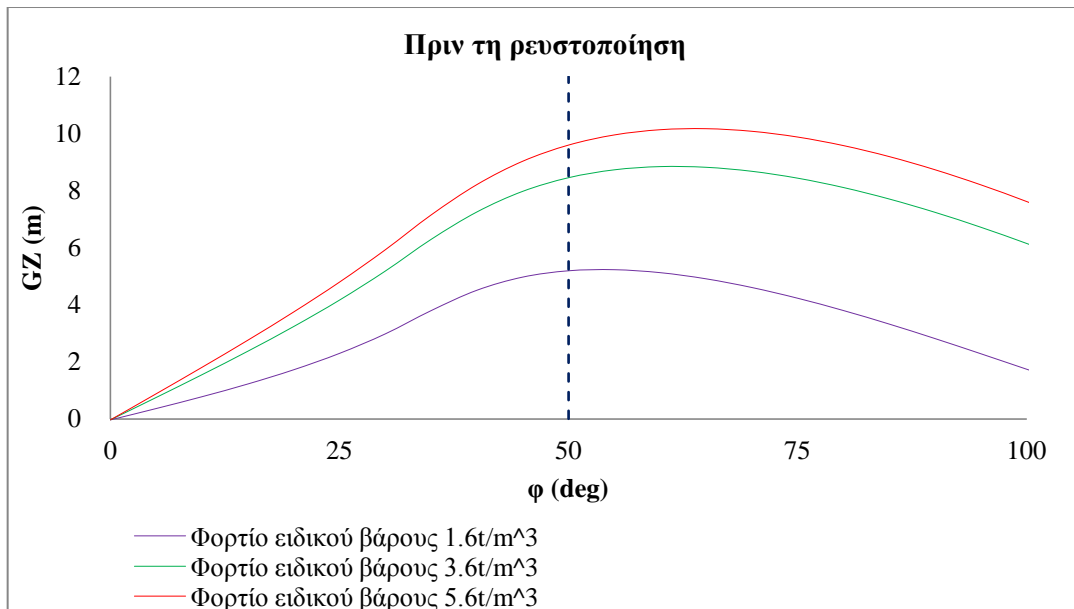
Πίνακας 4. Κύριες διαστάσεις χρησιμοποιούμενου πλοίου τύπου bulk carrier.

Κύριες Διαστάσεις πλοίου	
Length Overall (L_{OA})	290.049m
Length Between P (L_{BP})	279.000m
Breadth Mid (B)	44.600m
Depth Mid (D)	25.700m
Designed Draft (T)	18.000m
Deadweight (DWT)	172000t
Block Coefficient (Cb)	0.853
Main Engine	MAN B&W 8S70ME-C8
Propeller	Wagenigen B4.55 D =8.2 m, P/D = 0.80
Installed power BHP	24779.12 kW at 90.6 RPM
Gross Tonnage (GRT)	54658.649RT
Net Tonnage (N.T)	93076.17RT
Crew : 26 persons	Class: ABS
Service Speed (Vs)	14.5knots

Η ανάλυση ευστάθειας πλοίου που μεταφέρει βαρύ κοκκώδες υλικό, πραγματοποιείται για τρία διαφορετικά ειδικά βάρη φορτίου, $1.6t/m^3$, $3.6t/m^3$ και $5.6t/m^3$. Η ευστάθεια των συγκεκριμένων φορτίων ελέγχεται πριν και μετά τη ρευστοποίησή τους. Η ρευστοποίηση, εξαιτίας του μεγάλου ειδικού βάρους των εν λόγω φορτίων (τέτοια φορτία είναι η άμμος, το μετάλλευμα νικελίου, το σιδηρομέταλλευμα κ.α.), εμφανίζεται με το σχηματισμό ελεύθερης επιφάνειας υγρού (νερό μαζί με κάποια ποσότητα υλικού) στο ανώτερο επίπεδο του υλικού, συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε η παραπάνω πειραματική έρευνα, έχοντας ως υλικό δοκιμών την άμμο.

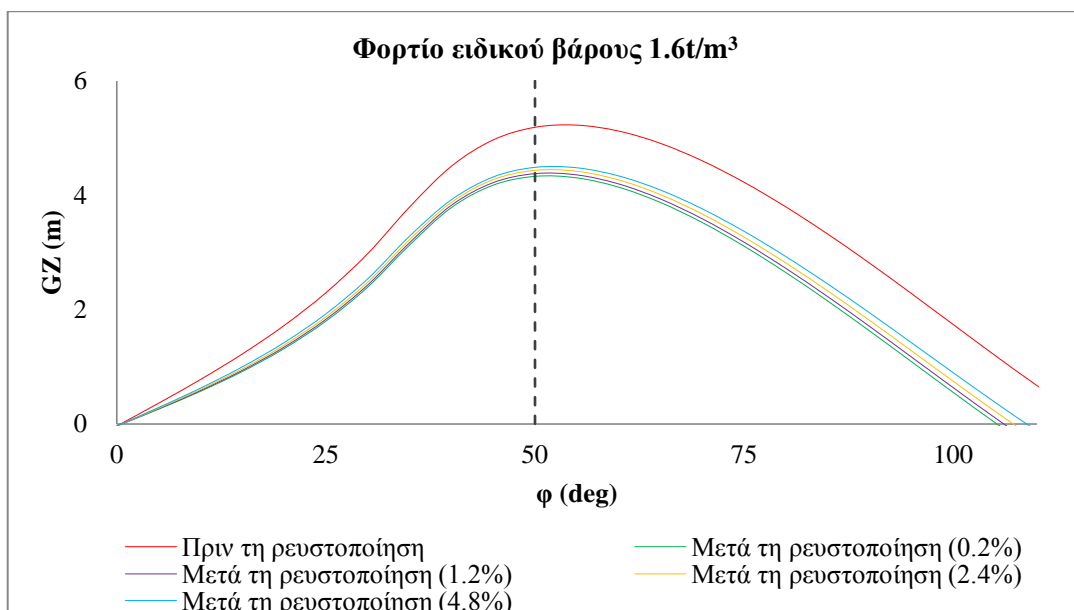
Σύμφωνα με την οδηγία του IACS “Guidance and Information on bulk Cargo Loading and Discharging to Reduce the Likelihood of Over - stressing the Hull Structure”, την οποία αναφέρουμε στο Παράρτημα Α, η μεταφορά βαρέων φορτίων, γίνεται με εναλλασσόμενη φόρτιση (για τα μεγάλα πλοία, τοποθέτηση φορτίου μόνο στα κύτη με μονό αριθμό). Για τον λόγο αυτό φορτίο τοποθετείται στα κύτη 1,3,5,7,9 και για τα τρία διαφορετικά ειδικά βάρη φορτίου εξετάζονται τέσσερις περιπτώσεις ποσότητας του υγρού που ανέρχεται στην επιφάνεια (σε κάθε περίπτωση το ειδικό βάρος του υγρού είναι $1.09t/m^3$). Η ποσότητα του υγρού που ανέρχεται στην επιφάνεια εξαρτάται από την εκάστοτε ποσότητα του φορτίου, με εξεταζόμενα τα ποσοστά 0.2%, 1.2%, 2.4% και 4.8% επί της συνολικής ποσότητας του φορτίου που φορτώνεται σε κάθε κύτος του πλοίου. Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι το φορτίο θεωρείται πως έχει ευθεία επιφάνεια, γεγονός που περιορίζει την μετατόπιση φορτίου (trimmed cargo) και πως συμπεριφέρεται ως στερεό και δεν μετατοπίζεται κατά τη διάρκεια του ταξιδιού μέχρι να επέλθει η ρευστοποίησή του.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις φόρτωσης.

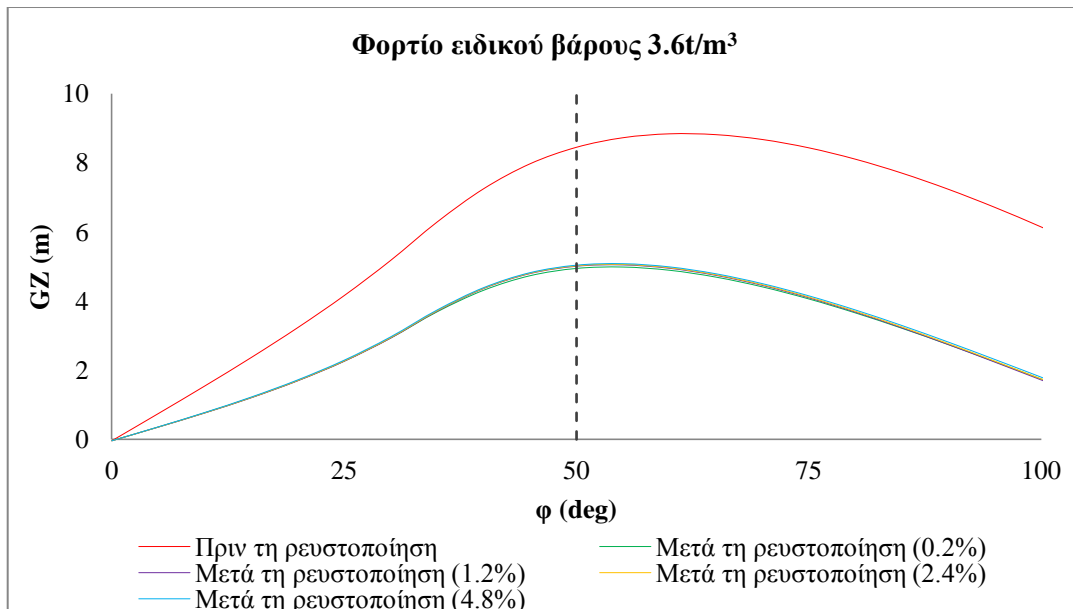


Διάγραμμα 1. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τα εξεταζόμενα ειδικά βάρη φορτίου πριν τη ρευστοποίηση (GZ - φ).

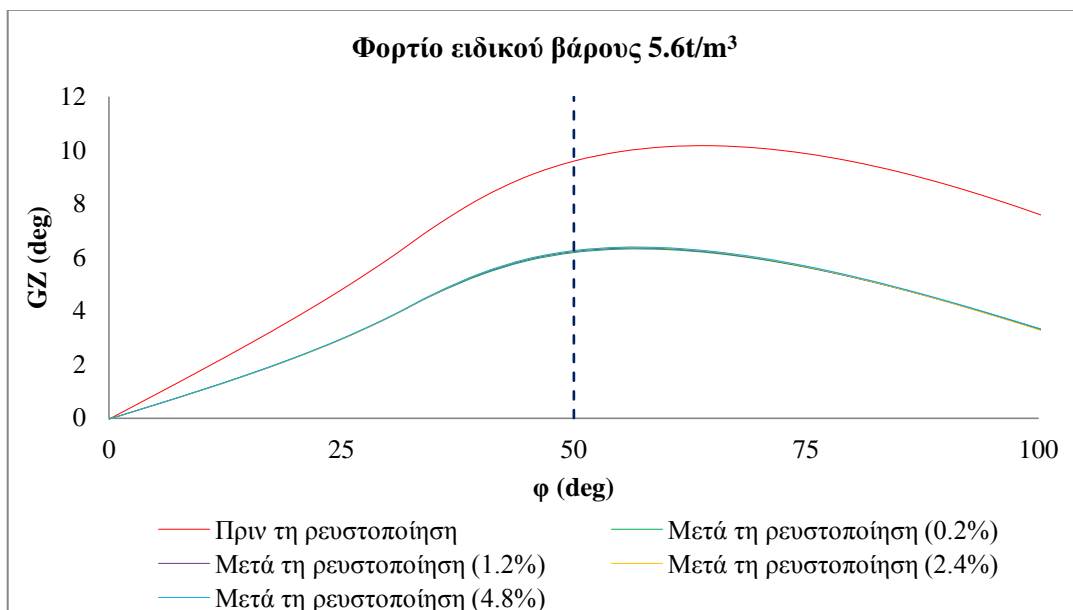
Στο διάγραμμα 1 παρουσιάζονται οι καμπύλες μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τα εξεταζόμενα ειδικά βάρη φορτίου πριν τη ρευστοποίηση. Γίνεται φανερό ότι καθώς αυξάνεται το ειδικό βάρος του μεταφερόμενου φορτίου μειώνεται το καθ' ύψος κέντρο βάρους του πλοίου με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς και το πλοίο να είναι πιο ευσταθές. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς για τη μεταφορά του φορτίου με ειδικό βάρος 5.6t/m³ είναι σχεδόν διπλάσιος από τον μοχλοβραχίονα επαναφοράς του φορτίου με ειδικό βάρος 1.6t/m³.



Διάγραμμα 2. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για μεταφερόμενο φορτίο ειδικού βάρους 1.6t/m³ (GZ - φ).



Διάγραμμα 3. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για μεταφερόμενο φορτίο ειδικού βάρους $3.6t/m^3$ (GZ - ϕ).



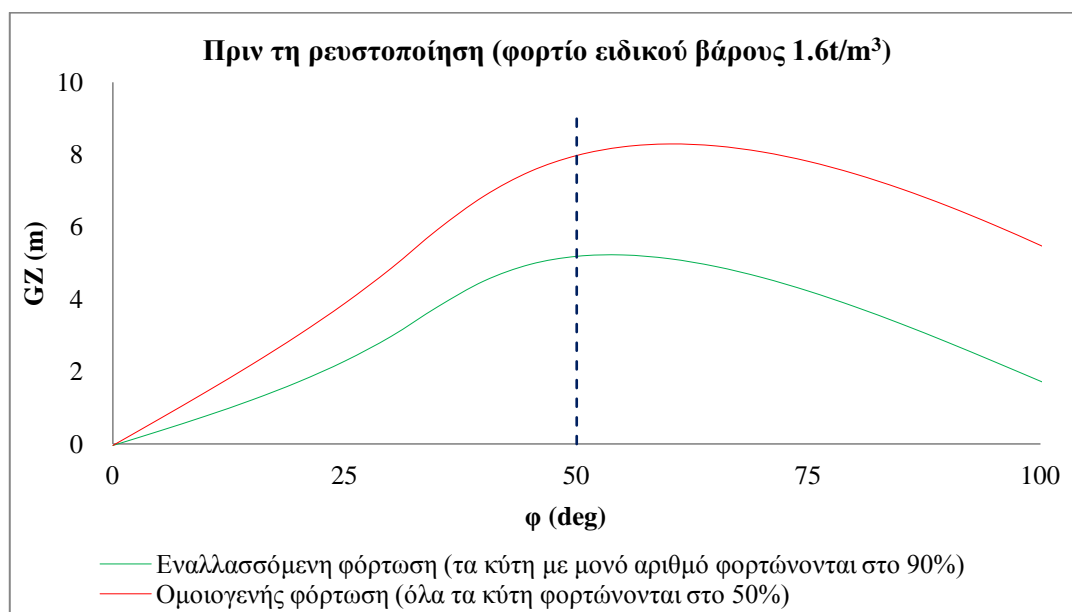
Διάγραμμα 4. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για μεταφερόμενο φορτίο ειδικού βάρους $5.6t/m^3$ (GZ - ϕ).

Στα διαγράμματα 2 έως 4 παρουσιάζονται οι καμπύλες μοχλοβραχίονα επαναφοράς για μεταφερόμενο φορτίο ειδικού βάρους $1.6t/m^3$, $3.6t/m^3$ και $5.6t/m^3$, αντίστοιχα, πριν και μετά τη ρευστοποίηση. Όπως διακρίνεται από αυτές τις καμπύλες, το πλοίο παρουσιάζει καλύτερη ευστάθεια πριν τη ρευστοποίηση του φορτίου που μεταφέρει. Μετά τη ρευστοποίηση, η καθ' ύψος θέση κέντρου βάρους του πλοίου αυξάνεται όχι μόνο λόγω της επίδρασης ελεύθερης επιφάνειας υγρού, αλλά και εξαιτίας της αύξησης του ειδικού βάρους του φορτίου που βρίσκεται κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού (το ειδικό βάρος του υλικού που ανέρχεται στην επιφάνεια είναι διαφορετικό από αυτό του υλικού που παραμένει κάτω από αυτό), με αποτέλεσμα η καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς να

μειώνεται αρκετά (ειδικά για τις υψηλές τιμές ειδικού βάρους). Παρόλα αυτά, η ευστάθεια του πλοίου δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση της ποσότητας του αναδυόμενου υγρού.

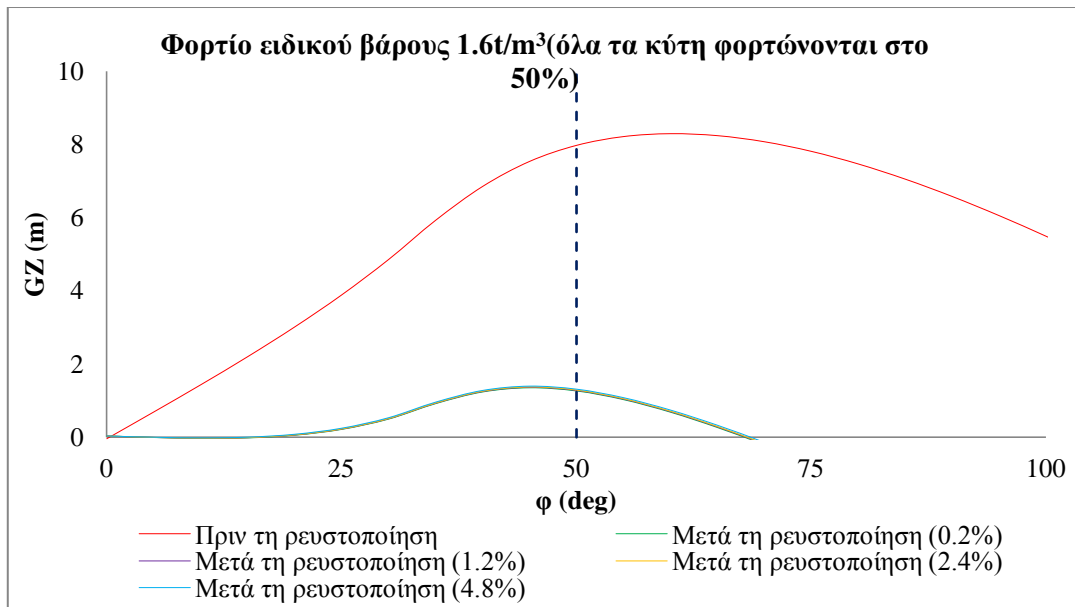
Μετά το πέρας των προκαθορισμένων φορτώσεων, πραγματοποιείται ακόμα μία φόρτωση για το φορτίο ειδικού βάρους $1.6t/m^3$, αλλά στην περίπτωση που τα κύτη του πλοίου είναι όλα φορτωμένα μέχρι το 50% του όγκου τους (κάποια από τα ατυχήματα που έχουν συμβεί μετέφεραν φορτίο σε όλα τα κύτη, όπως το Padang Hawk). Μία τέτοια φόρτωση είναι σύνηθες για τη μεταφορά του μεταλλεύματος νικελίου και σιδηρομεταλλεύματος, το ειδικό βάρος των οποίων κυμάνετε από $1.2t/m^3$ έως $3.5t/m^3$.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα 5 και 6. Το πρώτο περιλαμβάνει τις καμπύλες μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη φόρτωση του πλοίου με φορτίο ειδικού βάρους $1.6t/m^3$ εναλλάξ (τα κύτη με μονό αριθμό γεμίζονται στο 90%) και ομοιογενώς καταναμημένο στα κύτη (όλα τα κύτη γεμίζονται στο 50%), πριν τη ρευστοποίησή του. Το δεύτερο διάγραμμα περιλαμβάνει τις καμπύλες μοχλοβραχίονα επαναφοράς για την περίπτωση πριν και μετά τη ρευστοποίηση του φορτίου που φορτώνεται ομοιογενώς σε όλα τα κύτη του πλοίου (ανάλογα με τα προηγούμενα).



Διάγραμμα 5. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη φόρτωση φορτίου ειδικού βάρους $1.6t/m^3$ με εναλλασσόμενη και ομοιογενή φόρτωση (GZ - φ).

Στο διάγραμμα 5 παρουσιάζονται οι καμπύλες μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη φόρτωση φορτίου ειδικού βάρους $1.6t/m^3$ με εναλλασσόμενη και ομοιογενή φόρτωση. Γίνεται φανερό ότι η ομοιογενής φόρτωση των κυτών εμφανίζει καλύτερη ευστάθεια από την εναλλασσόμενη φόρτωση. Αναλυτικότερα, η καθ' ύψος θέση του κέντρου βάρους του πλοίου είναι μικρότερη στην ομοιογενή φόρτωση απ' ότι στην εναλλασσόμενη, έχοντας ως αποτέλεσμα την αυξημένη ευστάθεια.



Διάγραμμα 6. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη φόρτωση φορτίου ειδικού βάρους 1.6t/m³ με ομοιογενή φόρτωση (GZ - φ).

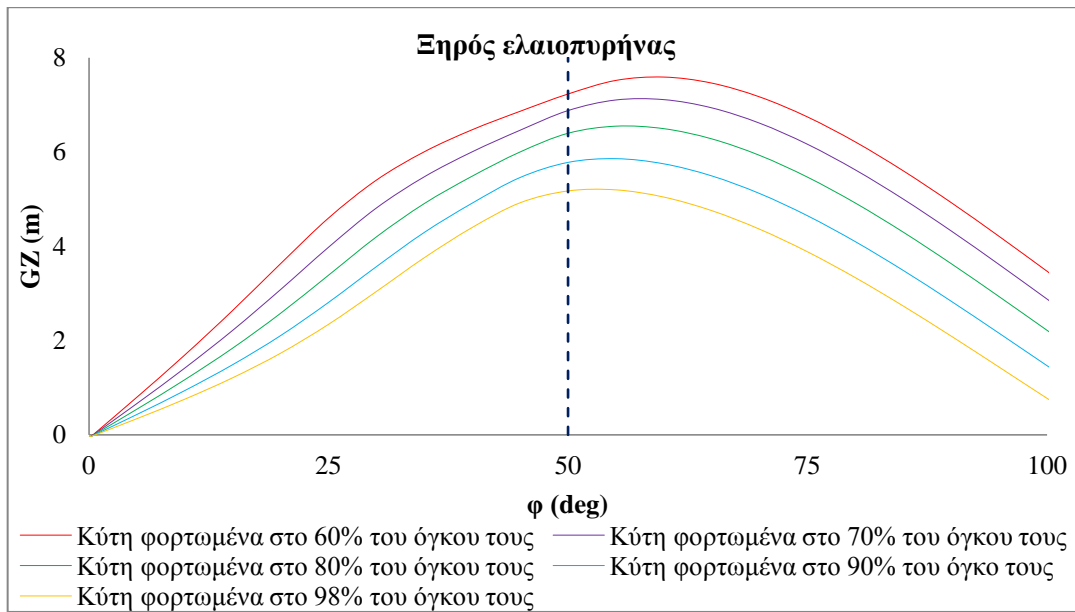
Στο διάγραμμα 6 παρουσιάζονται οι καμπύλες μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη φόρτωση φορτίου ειδικού βάρους 1.6t/m³ με ομοιογενή φόρτωση. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, το πλοίο μετά τη ρευστοποίηση του φορτίου που μεταφέρει δε διαθέτει επαρκή ευστάθεια και ανατρέπεται (δεν πληρείται το κριτήριο άθικτης ευστάθειας). Η έλλειψη επαρκούς ευστάθειας οφείλεται στην πολύ μεγάλη επίδραση ελεύθερης επιφάνειας υγρού, το οποίο στην ομοιογενή φόρτωση υπάρχει σε όλα τα κύττη του πλοίου.

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται κάποια από τα αποτελέσματα που εξάγονται από το πρόγραμμα AVEVA Marine, για τη φόρτωση βαρέων κοκκωδών υλικών.

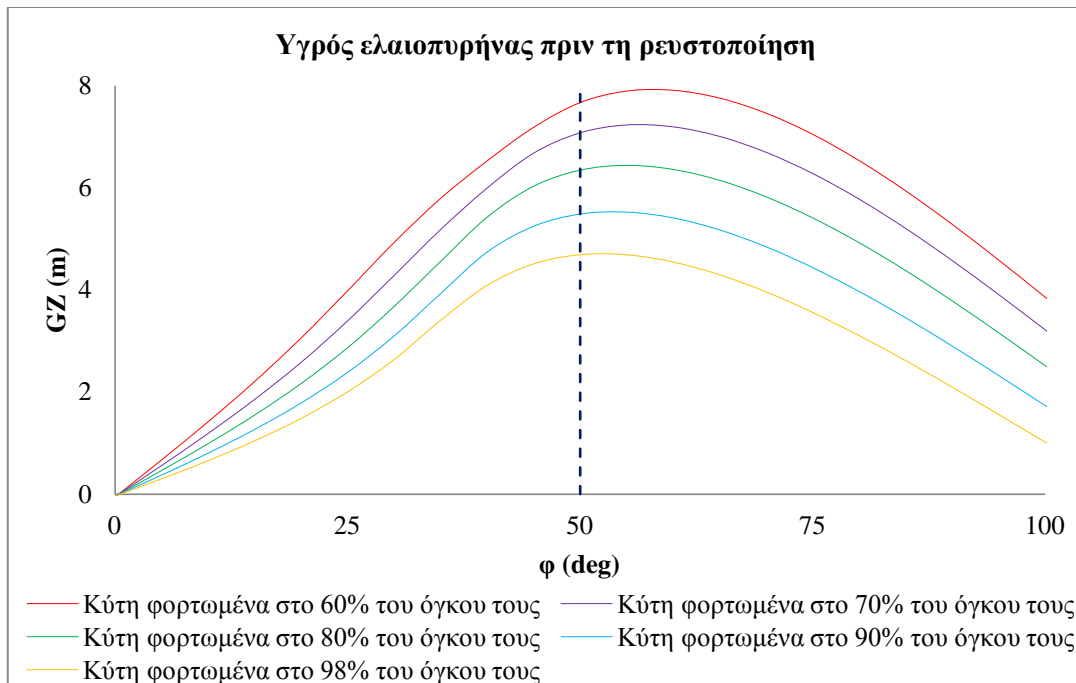
9.2 Μεταφορά ελαφρών φορτίων

Με σκοπό την ανάλυση ευστάθειας πλοίου που μεταφέρει ελαφρύ κοκκώδες υλικό, διεξάγετε μία σειρά φορτώσεων με ξηρό ελαιοπυρήνα ειδικού βάρους 0,55t/m³ με διαφορετικό συνολικό βάρος φορτίου (δοκιμάσαμε φορτώσεις με 60% έως και 98% γεμάτα τα κύττη φορτίου). Στη συνέχεια, εκτελείται η ίδια σειρά φορτώσεων με υγρό ελαιοπυρήνα ειδικού βάρους 0.77t/m³ θεωρώντας ότι περιέχει ποσοστό σε υγρασία 50% (50% ξηρός ελαιοπυρήνας, 40% νερό, 10% λάδι). Οι δοκιμές φορτώσεων που πραγματοποιούμε βασίζονται στο βασικό συμπέρασμα της έρευνας που αναλύεται στα προηγούμενα κεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα, ο υγρός ελαιοπυρήνας κατά τη διάρκεια της διέγερσης ρευστοποιείται διαχέοντας την υγρασία σε ολόκληρη τη μάζα του υλικού και συμπεριφέρεται σαν παχύρευστο υγρό, σε αντίθεση με τον ξηρό ελαιοπυρήνα ο οποίος δεν ρευστοποιείται.

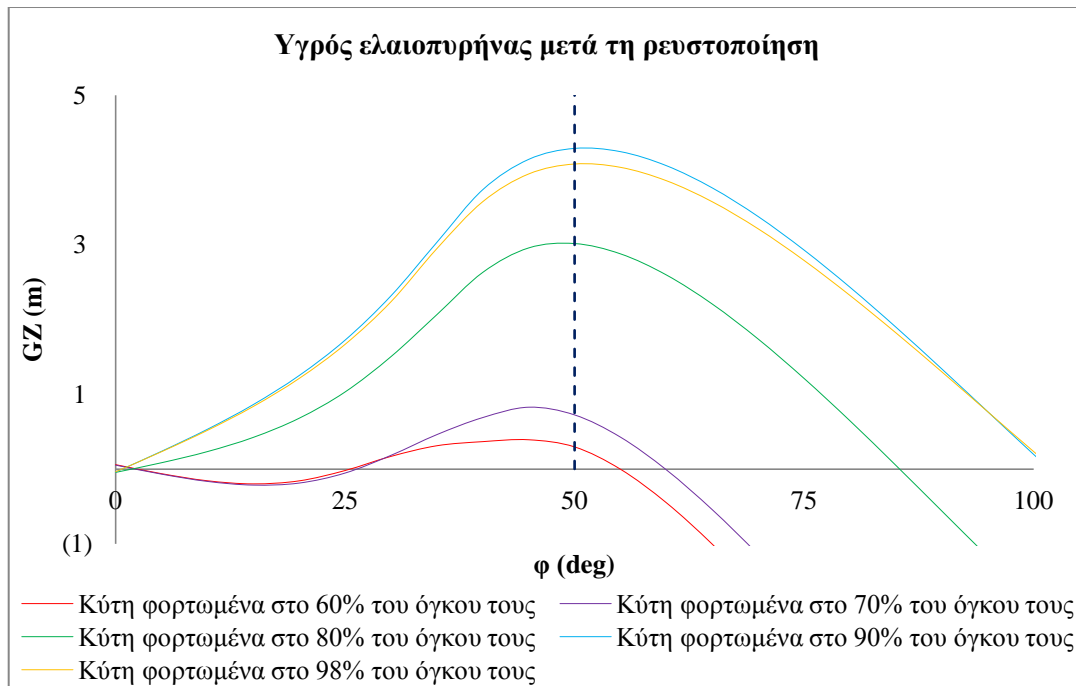
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις φόρτωσης.



Διάγραμμα 7. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τα διάφορα ποσοστά φόρτωσης του ξηρού ελαιοπυρήνα (GZ - φ).



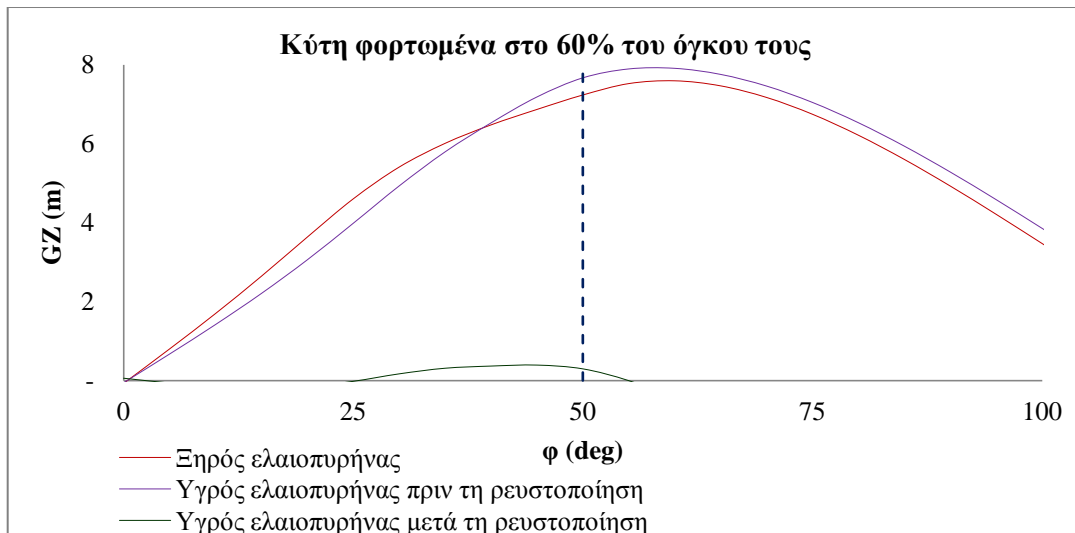
Διάγραμμα 8. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τα διάφορα ποσοστά φόρτωσης του υγρού ελαιοπυρήνα πριν τη ρευστοποίηση (GZ - φ).



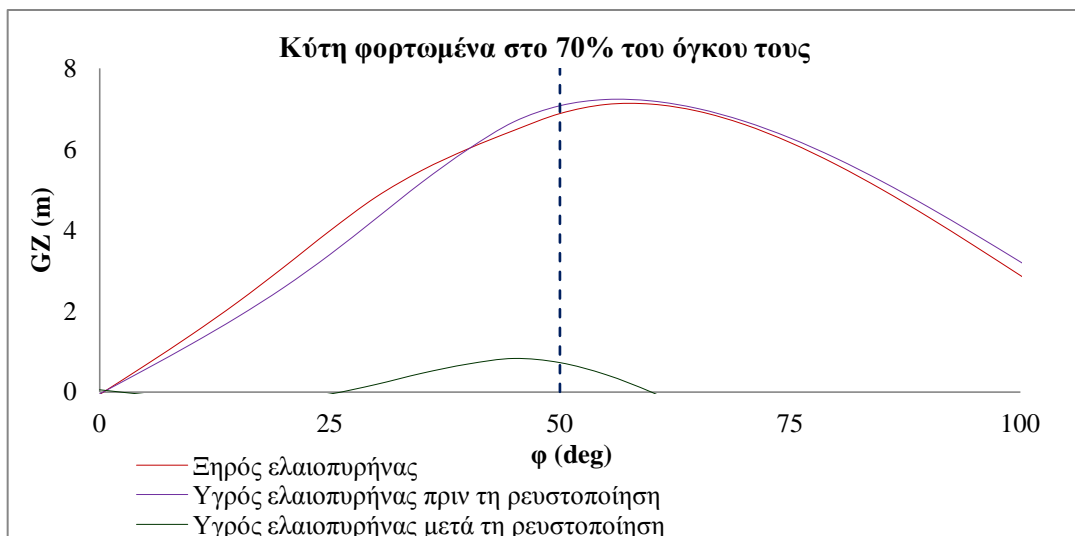
Διάγραμμα 9. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τα διάφορα ποσοστά φόρτωσης του υγρού ελαιοπυρήνα μετά τη ρευστοποίηση (GZ - φ).

Στα διαγράμματα 7 έως 9 παρουσιάζονται οι καμπύλες μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τις διάφορες περιπτώσεις φόρτωσης του ξηρού ελαιοπυρήνα, του υγρού ελαιοπυρήνα πριν τη ρευστοποίηση και του υγρού ελαιοπυρήνα μετά τη ρευστοποίηση, αντίστοιχα. Η ευστάθεια του ξηρού ελαιοπυρήνα και του υγρού ελαιοπυρήνα πριν τη ρευστοποίηση μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό του όγκου των κυτών που φορτώνεται. Αντίθετα, στην περίπτωση του υγρού ελαιοπυρήνα μετά τη ρευστοποίηση, η ευστάθεια του πλοίου αυξάνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό του όγκου των κυτών που φορτώνονται, ενώ σημαντικό είναι το γεγονός ότι στις περιπτώσεις φόρτωσης του 60% και 70% των κυτών το πλοίο δεν έχει επαρκή ευστάθεια και ανατρέπεται (δεν ικανοποιείται το κριτήριο άθικτης ευστάθειας). Αυτό συμβαίνει λόγω του αρκετά χαμηλού κέντρου βάρους που έχει το πλοίο και της μετατόπισης μεγάλου όγκου του φορτίου (το φορτίο προσομοιάζει με παχύρευστο υγρό μειώνοντας την ευστάθεια του πλοίου λόγω επίδρασης ελεύθερης επιφάνειας σε όλα τα κύτη του πλοίου).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα σύγκρισης της καμπύλης μοχλοβραχίονα επαναφοράς για την φόρτωση ξηρού ελαιοπυρήνα, υγρού ελαιοπυρήνα πριν και μετά τη ρευστοποίηση, στα διάφορα ποσοστά φόρτωσης των κυτών.

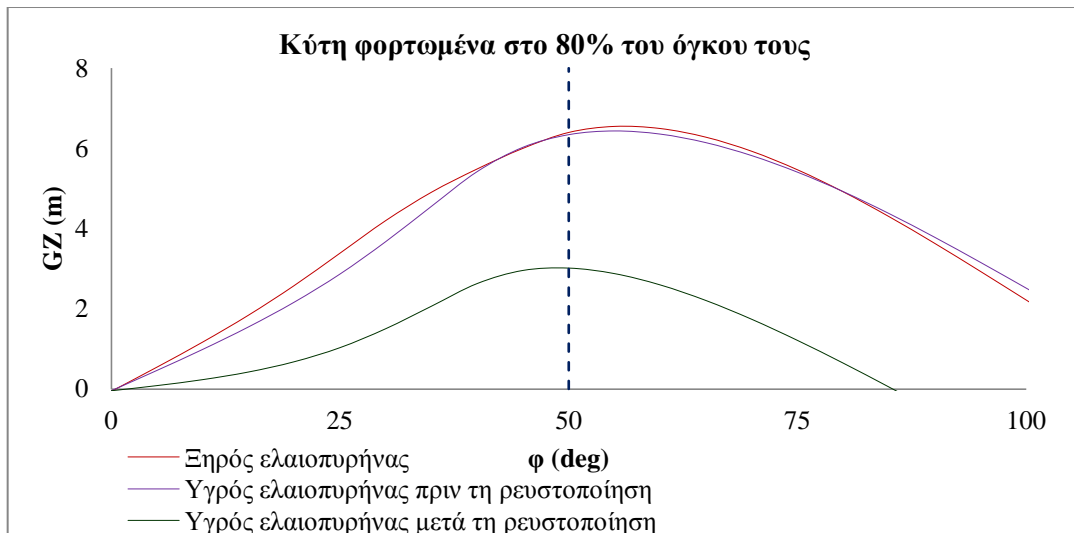


Διάγραμμα 10. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη φόρτωση του 60% των κυτών (GZ - φ).

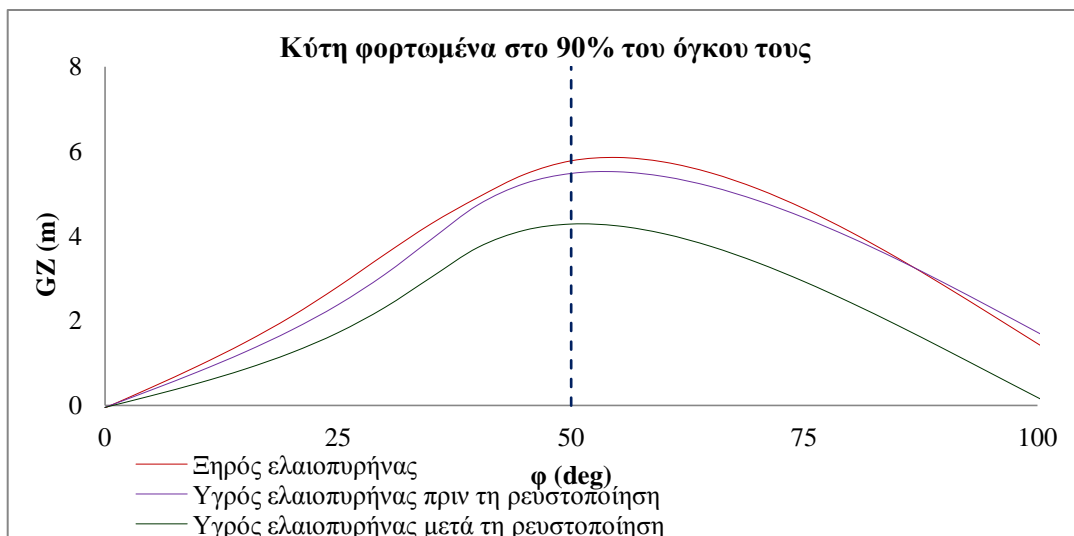


Διάγραμμα 11. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη φόρτωση του 70% των κυτών (GZ - φ).

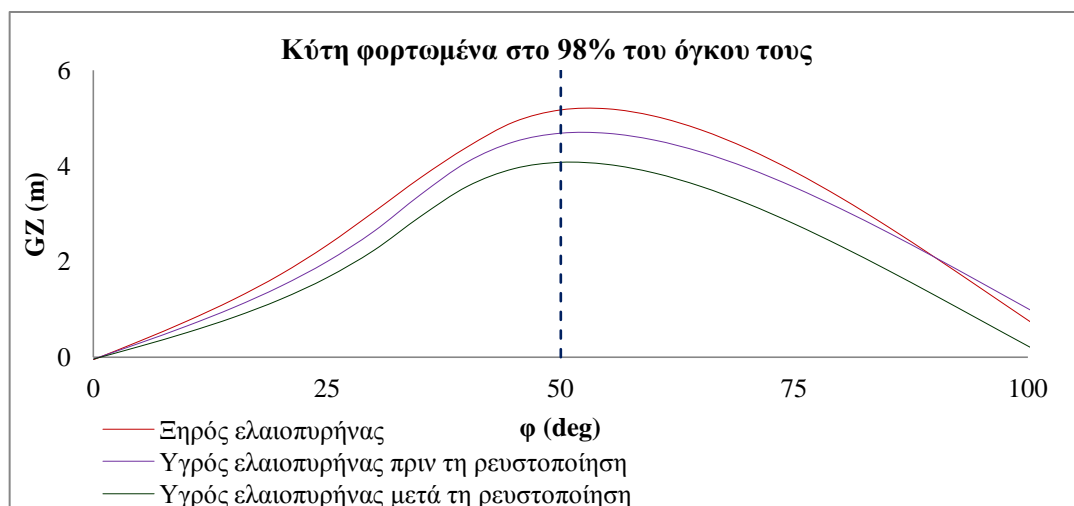
Στα διαγράμματα 10 και 11 παρουσιάζονται οι καμπύλες μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη φόρτωση ξηρού και υγρού ελαιοπυρήνα στο 60% και 70% των κυτών, αντίστοιχα. Για τα συγκεκριμένα ποσοστά φόρτωσης των κυτών, η φόρτωση του ξηρού ελαιοπυρήνα και υγρού ελαιοπυρήνα, συνεπάγεται ευστάθεια μεγάλου εύρους και υψηλού μοχλοβραχίονα επαναφοράς, με τις καμπύλες του μοχλοβραχίονα επαναφοράς να βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Μετά τη ρευστοποίηση του υγρού ελαιοπυρήνα, η ευστάθεια του πλοίου μειώνεται αρκετά, ώστε να μην πληρείται το κριτήριο άθικτης ευστάθειας και το πλοίο να ανατρέπεται.



Διάγραμμα 12. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη φόρτωση του 80% των κυτών (GZ - φ).



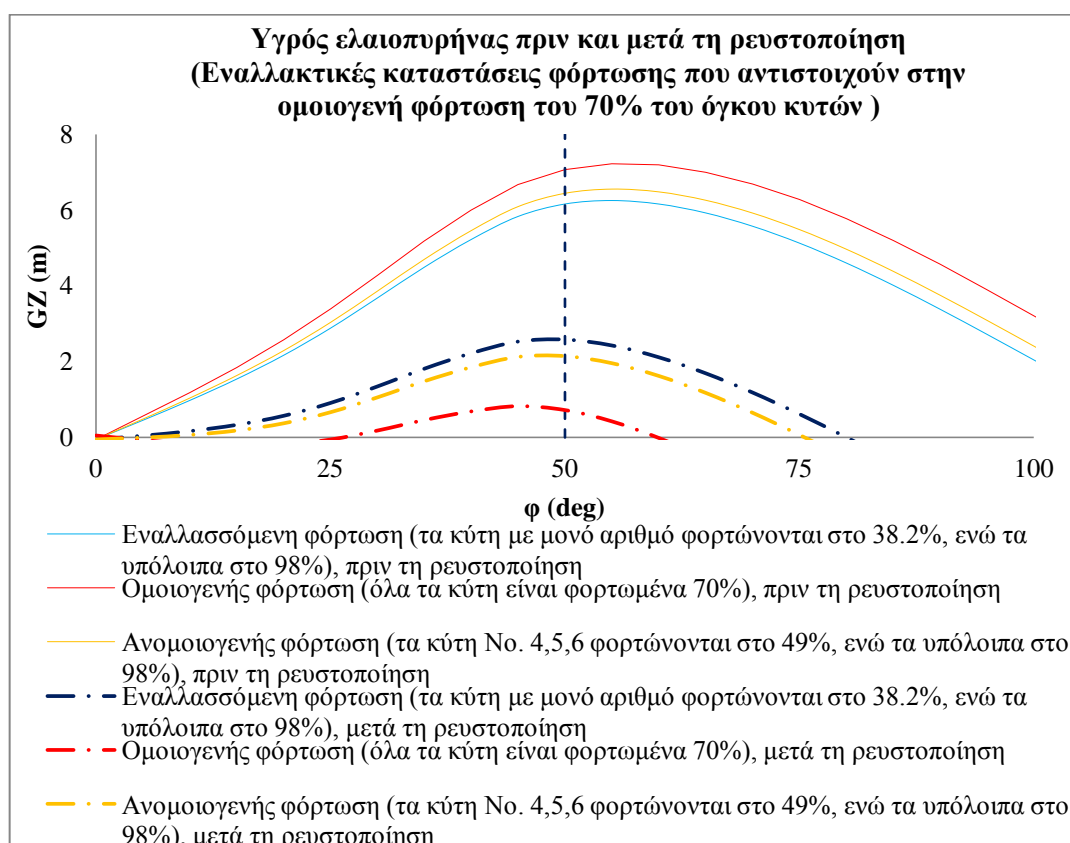
Διάγραμμα 13. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη φόρτωση του 90% των κυτών (GZ - φ).



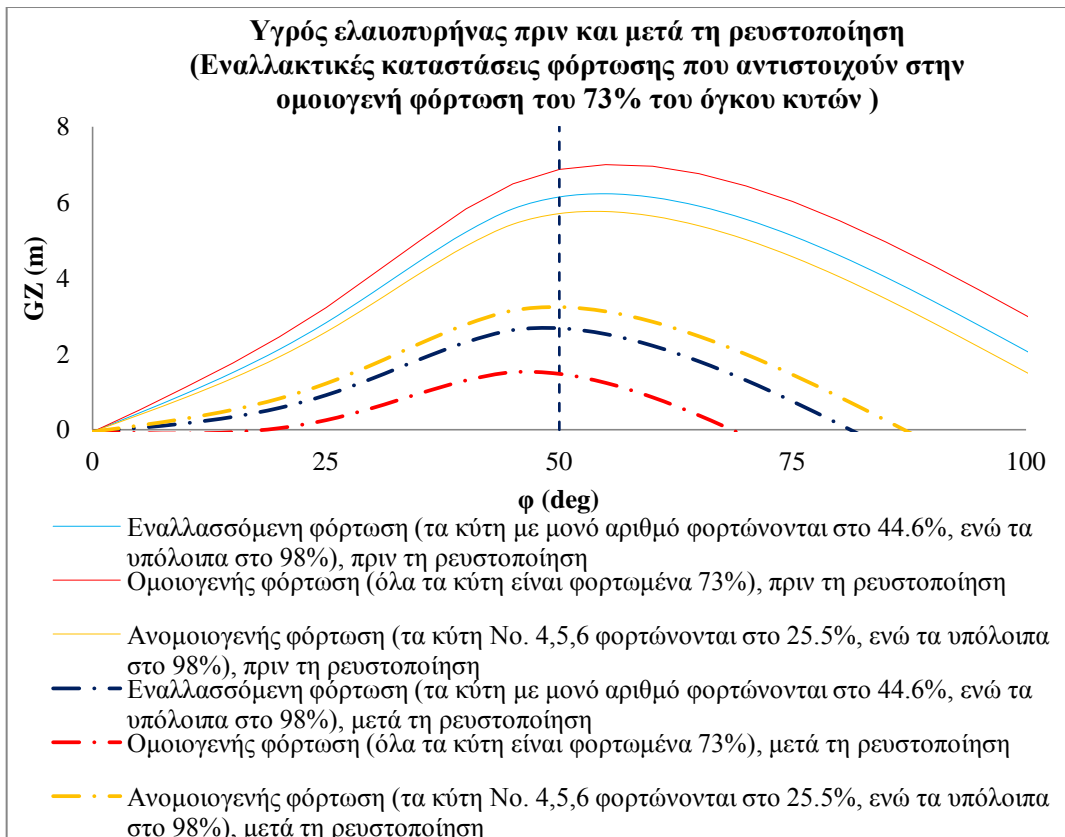
Διάγραμμα 14. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη φόρτωση του 100% των κυτών (GZ - φ).

Στα διαγράμματα 12 έως 14 παρουσιάζονται οι καμπύλες μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη φόρτωση ξηρού και υγρού ελαιοπυρήνα στο 80%, 90% και 98% των κυτών, αντίστοιχα. Για τα συγκεκριμένα ποσοστά φόρτωσης των κυτών, η φόρτωση του ξηρού, αλλά και υγρού, ελαιοπυρήνα συνεπάγεται ευστάθεια μεγάλου εύρους και ενός καλού μοχλοβραχίονα επαναφοράς, με την ευστάθεια του ξηρού ελαιοπυρήνα να είναι λίγο καλύτερη. Όταν ο υγρός ελαιοπυρήνας ρευστοποιείται, το πλοίο εμφανίζει επαρκή ευστάθεια, η οποία είναι μειωμένη σε σύγκριση με πριν τη ρευστοποίηση.

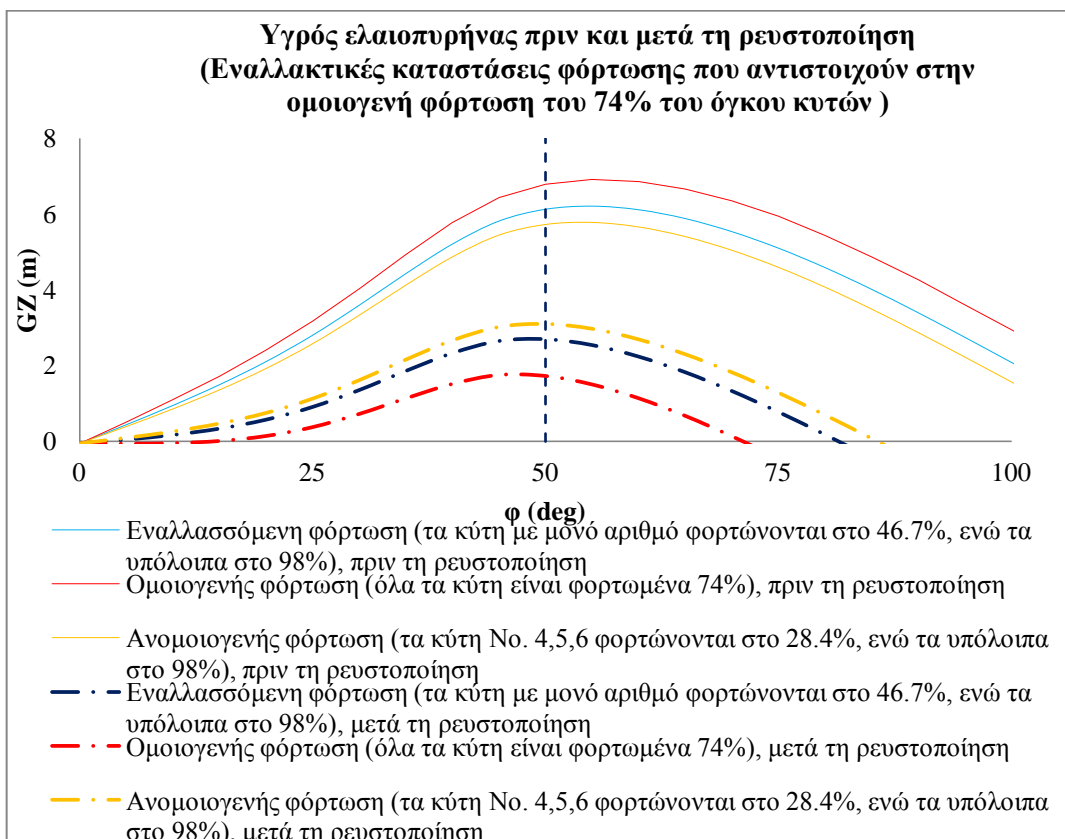
Από τις καμπύλες του μοχλοβραχίονα επαναφοράς, που προκύπτουν, στην περίπτωση του υγρού ελαιοπυρήνα το πλοίο είναι ασταθές για φόρτωση του 70% του όγκου των κυτών του και ευσταθές για φόρτωση του 80%. Έτσι, ολοκληρώνοντας τις προκαθορισμένες δοκιμές φόρτωσης, πραγματοποιούνται κάποιες επιπλέον φορτώσεις για τη φόρτωση του 73% και 74% του όγκου των κυτών με υγρό ελαιοπυρήνα (το ποσοστό 74% είναι το μεταβατικό στάδιο από την αστάθεια στην ευστάθεια), ενώ στη συνέχεια πραγματοποιούνται φορτώσεις που αντιστοιχούν σε ωφέλιμο φορτίο πλοίου ίσο με αυτό στις φορτώσεις 70%, 73%, 74% και 80% των κυτών, με διαφορετική κάθε φορά κατανομή του φορτίου (ομοιογενής, εναλλασσόμενη και ανομοιογενής φόρτωση).



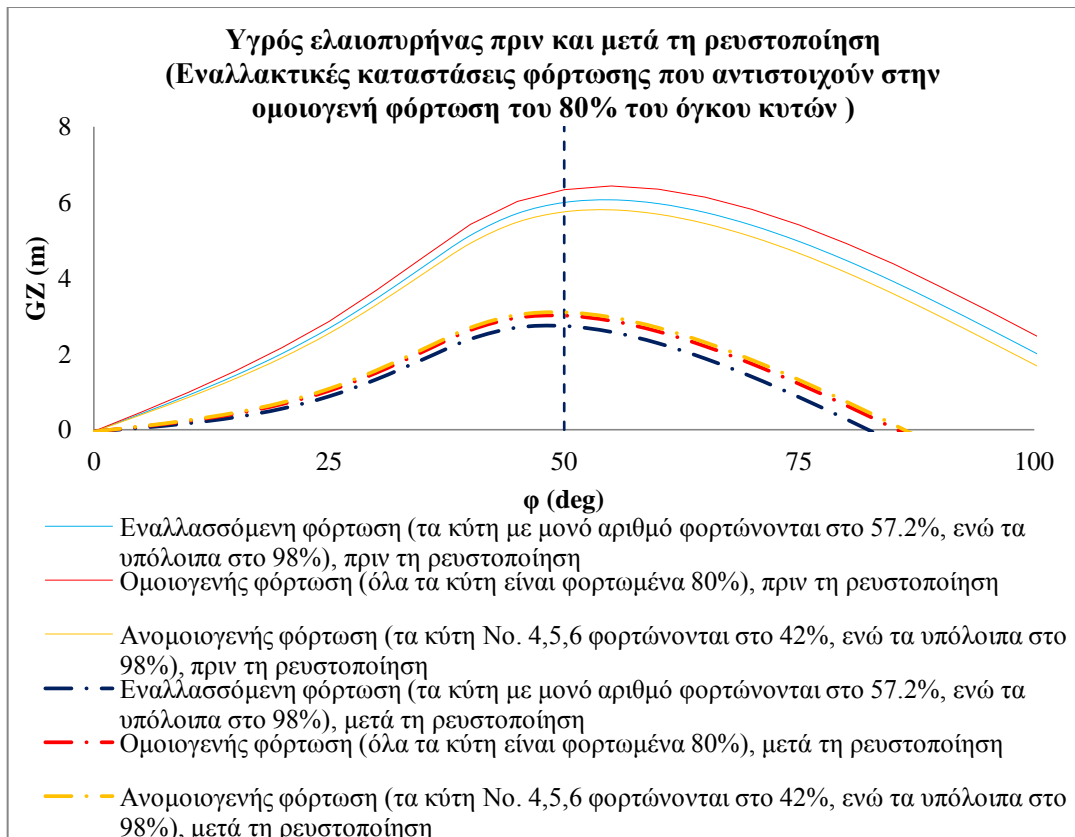
Διάγραμμα 15. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για εναλλακτικές καταστάσεις φόρτωσης που αντιστοιχούν στην ομοιογενή φόρτωση του 70% του όγκου κυτών (GZ - φ).



Διάγραμμα 16. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για εναλλακτικές καταστάσεις φόρτωσης που αντιστοιχούν στην ομοιογενή φόρτωση του 73% του όγκου κυτών (GZ - φ).



Διάγραμμα 17. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για εναλλακτικές καταστάσεις φόρτωσης που αντιστοιχούν στην ομοιογενή φόρτωση του 74% του όγκου κυτών (GZ - φ).



Διάγραμμα 18. Καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς για εναλλακτικές καταστάσεις φόρτωσης που αντιστοιχούν στην ομοιογενή φόρτωση του 80% του όγκου κυτών (GZ - φ).

Στα διαγράμματα 15 και 18 παρουσιάζονται οι καμπύλες μοχλοβραχίονα επαναφοράς για εναλλακτικές καταστάσεις φόρτωσης που αντιστοιχούν στην ομοιογενή φόρτωση του 70%, 73%, 74% και 80% του όγκου κυτών, αντίστοιχα. Από τη σύγκριση των παραπάνω διαγραμμάτων προκύπτει ότι η ομοιογενής φόρτωση του πλοίου είναι η πιο επικίνδυνη για απώλεια της ευστάθειας. Πιο συγκεκριμένα, ενώ η ευστάθεια του πλοίου πριν τη ρευστοποίηση του φορτίου είναι πολύ καλή, μετά τη ρευστοποίηση αυτού μειώνεται σημαντικά και στην περίπτωση φόρτωσης μέχρι και του 73% του όγκου των κυτών το πλοίο (μετά τη ρευστοποίηση του φορτίου που μεταφέρει) δεν ικανοποιεί το κριτήριο άθικτης ευστάθειας και ανατρέπεται. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι η μικρότερη απώλεια ευστάθειας συμβαίνει στην ανομοιογενή φόρτωση, η καμπύλη της οποίας βρίσκεται αρκετά κοντά στην καμπύλη της εναλλασσόμενης φόρτωσης.

Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα, όπως αυτά εξάγονται από το πρόγραμμα AVEVA Marine, έχοντας φορτώσει το πλοίο με ξηρό και υγρό ελαιοπυρήνα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα από την ανάλυση των προηγούμενων κεφαλαίων καθώς επίσης γίνεται αναφορά στα μελλοντικά βήματα που απαιτούνται για την πληρέστερη ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς της ρευστοποίησης.

10.1 Γενικά συμπεράσματα

Η ανάλυση που προηγείται για το φαινόμενο της ρευστοποίησης συνεπάγεται πληροφορίες για τον τρόπο εμφάνισης του φαινομένου, τον τρόπο συμπεριφοράς του ρευστοποιημένου υλικού, καθώς και την επίδραση της ευστάθειας του πλοίου όταν μεταφέρει φορτία που ενδέχεται να ρευστοποιηθούν.

Από τη σύγκριση της συμπεριφοράς των δύο υλικών, που χρησιμοποιήσαμε για την εκτέλεση των πειραμάτων, κάτω από τις ίδιες (ή παρόμοιες) συνθήκες διέγερσης οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η μεταφορά της άμμου είναι λιγότερο επικίνδυνη από αυτή του ελαιοπυρήνα στις περιπτώσεις των συνήθων ποσοστών υγρασίας. Η διαφορά αυτή έγκειται στο γεγονός ότι στην περίπτωση της άμμου:

1. Η άμμος με ποσοστό σε υγρασία 0% - 25% μπορεί να απορροφήσει όλη την ποσότητα του νερού, χωρίς να επηρεάσει τη δυναμική του συστήματος.
2. Η ρευστοποίηση της άμμου εμφανίζεται για ποσοστό σε υγρασία 27.5%.
3. Η διέγερση της δεξαμενής σε συχνότητες 0.4 - 0.7Hz, οδηγεί στη μετατόπιση της άμμου προς τις πλευρές της δεξαμενής δημιουργώντας ένα χαρακτηριστικό “χαμόγελο” στην επιφάνεια της άμμου με ποσοστό σε υγρασία 27.5 - 35%, αφήνοντας την επιφάνεια του νερού να κινείται στο κέντρο της δεξαμενής
4. Η διέγερση της δεξαμενής σε συχνότητες 0.7 - 0.9Hz, οδηγεί στη μετατόπιση της άμμου προς το κέντρο της δεξαμενής δημιουργώντας ένα χαρακτηριστικό “βουνό” στην επιφάνεια της άμμου με ποσοστό σε υγρασία 35% - 40%, αφήνοντας την επιφάνεια του νερού να κινείται κοντά στις πλευρές της δεξαμενής, πράγμα άλλωστε που έχει αναφερθεί και από τον Ahmed (2012). Στην άμμο με ποσοστό σε υγρασία 27.5% - 30%, λόγω της μικρής ποσότητας του νερού στην επιφάνεια της άμμου, η επιφάνεια της άμμου δεν προλαβαίνει να πάρει τη μορφή του “βουνού” και παραμένει ευθεία.
5. Για άμμο με ποσοστό σε υγρασία 30% - 35% παρατηρείται ο διαχωρισμός του προς εξέταση υλικού σε δύο, νερό και λάσπη. Έτσι, το νερό φαίνεται να είναι εκείνο που κινείται πάνω από ένα στρώμα λάσπης το οποίο παραμένει σχεδόν ακίνητο, δημιουργώντας ελεύθερη επιφάνεια νερού.

6. Για άμμο με ποσοστό σε υγρασία 40% παρατηρείται ο διαχωρισμός του προς εξέταση υλικού σε τρία, νερό, νερό αναμεμιγμένο με άμμο και λάσπη. Το κάθε ένα από αυτά τα μέρη διαγράφει τη δική του κίνηση και έχει τη δική του δυναμική που προκαλεί τη συνεχή αλλαγή της κατανομής της άμμου
7. Κατά τη διάρκεια της διέγερσης, η ποσότητα του νερού που ανέρχεται στην επιφάνεια της άμμου αυξάνεται σε ποσοστά υγρασίας από 27.5% έως 35%.
8. Μετά το τέλος των πειραμάτων, η άμμος διαχωρίζεται σε στρώματα. Οι λεπτοί κόκκοι παραμένουν στον πυθμένα της δεξαμενής, ενώ οι πιο χονδροί ανέρχονται προς την επιφάνεια του υλικού.

Αντίθετα, στην περίπτωση του ελαιοπυρήνα διαπιστώνεται ότι ενώ στην περίπτωση που είναι ξηρός ή έχει μικρό ποσοστό σε υγρασία δεν παρουσιάζει κάποιο πρόβλημα μετατόπισης, η διέγερση υλικού με αυξημένα ποσοστά υγρασίας οδηγεί σε διάχυση του υγρού σε όλο του το σώμα με αποτέλεσμα να εμφανίζει συνολική κινητικότητα του υλικού και όχι μόνο της επιφάνειάς του (συμπεριφορά που προσομοιάζει παχύρευστο υγρό).

Όσον αφορά την επίδραση της ευστάθειας πλοίου, το οποίο φορτώνεται με υλικά τα οποία ενδέχεται να ρευστοποιηθούν, τα εξαγόμενα συμπεράσματα παρατίθενται στη συνέχεια:

1. Η μεταφορά βαρέων φορτίων με εναλλασσόμενη φόρτωση στα κύτη του πλοίου συνεπάγεται ευσταθές πλοίο, ακόμα και μετά τη ρευστοποίησή του όπου η καμπύλη του μοχλοβραχίονα επαναφοράς έχει μειωθεί αρκετά.
2. Η μεταφορά βαρέων φορτίων με ομοιογενή φόρτωση στα κύτη του πλοίου συνεπάγεται ασταθές πλοίο, λόγω της επίδρασης πολλών μεγάλων ελευθέρων επιφανειών.
3. Η ποσότητα του υλικού που ανέρχεται στην επιφάνεια δεν επηρεάζει την ευστάθεια του πλοίου παρά ελάχιστα, ειδικότερα εάν το φορτίο είναι αρκετά βαρύ.
4. Η μεταφορά ξηρού ελαιοπυρήνα συνεπάγεται ένα ευσταθές πλοίο ανεξάρτητα από τον τρόπο φόρτωσης και την ποσότητα του υλικού που έχει φορτωθεί, διότι δεν ρευστοποιείται.
5. Η μεταφορά υγρού ελαιοπυρήνα συνεπάγεται ασταθές πλοίο στην περίπτωση φόρτωσης μικρής ποσότητας υλικού (κύτη γεμάτα στο 60% και 70% του όγκου τους) και ευσταθές πλοίο με μικρό μοχλοβραχίονα επαναφοράς στην περίπτωση φόρτωσης μεγάλης ποσότητας φορτίου (κύτη γεμάτα στο 80%, 90% και 98% του όγκου τους).
6. Η μεταφορά υγρού ελαιοπυρήνα είναι ασφαλέστερη όταν αυτός τοποθετείται με ανομοιογενή ή εναλλασσόμενη φόρτωση στα κύτη του πλοίου, αφού η

ομοιογενής φόρτωση οδηγεί σε μεγάλη απώλεια ευστάθειας μετά τη ρευστοποίηση του φορτίου.

10.2 Αντικείμενα για μελλοντική μελέτη

Για να διαπιστωθεί η ακρίβεια των ανωτέρω υπολογισμών και να συμπληρωθεί το απλοποιημένο μοντέλο, ως συνέχεια της παρούσας μελέτης θεωρούνται τα επόμενα βήματα:

1. Εξέταση της συμπεριφοράς του ελαιοπυρήνα βάση ελεγχόμενου ποσοστού υγρασίας έτσι ώστε να καταγραφούν με συστηματικό τρόπο κρίσιμες παράμετροι που οδηγούν σε αλλαγή συμπεριφοράς του υλικού (π.χ. ποσοστό υγρασίας, συχνότητα διέγερσης ανά ποσοστό κτλ)
2. Εξέταση της συμπεριφοράς τόσο του ελαιοπυρήνα όσο και της άμμου εντός δεξαμενών με διαφορετικές διαστάσεις (ίσως και γεωμετρία) ώστε να διαπιστωθεί η εξάρτηση τη συμπεριφοράς του υλικού από αυτές.
3. Διενέργεια πειραμάτων για περισσότερους του ενός λόγους ύψους υλικού προς μήκος δεξαμενής, ώστε να εντοπιστεί πιθανό κρίσιμο σημείο λόγου κατά το οποίο διαφοροποιείται η συμπεριφορά των υλικών.
4. Διενέργεια πειραμάτων με διαφορετικά υλικά, επικίνδυνα για θαλάσσιες μεταφορές, όπως το μετάλλευμα του νικελίου και το σιδηρομετάλλευμα.
5. Εξέταση της συμπεριφοράς των υλικών στην περίπτωση συζευγμένων κινήσεων της τράπεζας (π.χ. roll και sway) καθώς και στην περίπτωση μη αρμονικής διέγερσης (π.χ. ρεαλιστικά σενάρια θαλάσσιων κυματισμών).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη Βιβλιογραφία

- [1] Alavi, A.H. & Gandomi, A.H., 2011. *Energy-based numerical models for assessment of soil liquefaction*. GEOSCIENCE FRONTIERS 3 (4), pp. 541-555.
- [2] Ahmed, M., FNI, 2012. Presentation of "*The Nautical Institute Seminar on Cargo Liquefaction - Hazards and Developments*", London 3rd December 2012
- [3] Amini, F. & Qi, GZ., 2000. *Liquefaction testing of stratified silty sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 126 (3), pp. 208-217.
- [4] Australian Transport Safety Bureau, 2000. *Navigation (Marine Casualty) Regulations, Investigation into the shift of cargo on board the Singapore flag bulk carrier Padang Hawk in the Coal Sea on 26 and 27 July 1999*
- [5] Banzhaf, W., Nordin, P., Keller, R. & Francone, F., 1998. *Genetic Programming - An Introduction. On the Automatic Evolution of Computer Programs and its Application*, dpunkt/Morgan Kaufmann, Heidelberg/San Francisco.
- [6] Baziar, M. & Dobry, R., 1995. *Residual strength and large - Deformation potential of loose silty sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 121 (12), pp. 896-906.
- [7] Baziar, M. & Jafarian, Y., 2007. *Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ANN model: capacity energy*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 27, pp. 1056-1072.
- [8] Baziar, M., Jafarian, Y., Shahnazari, H., Movahed, V. & Tutunchian, M.A., 2011. *Prediction of strain energy- based liquefaction resistance of sand- silt mixures: An evolutionary approach*. Computers & Geosciences 37 (11), pp. 1883-1893.
- [9] Bjerrum, L., Kringstad, S. & Kummeneje, D., 1961. *The shear strength of a fine sand*. In: Proceedings of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Paris, vol. 1, pp.29-37
- [10] Brameier, M. & Banzhaf, W., 2007. *Linear Genetic Programming*, Springer Science + Business Media, LLC, New York.
- [11] Brown, R. & Richards, J., 1970. *Principles of Powder Mechanics*. Oxford, UK: Pergamon Press.
- [12] *Canadian Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes (TP 5761 E)*. Canada
- [13] *Cargo Liquefaction - Nickel and Iron Ores [A selection of articles previously published]*, Gard AS, 2012

- [14] Castro, G., 1969. *Liquefaction of Sands*, Ph.D. Thesis, *Harvard Soil Mechanics Series N81*. Harvard University, Cambridge MA.
- [15] Cetin, K.O., Seed, R.B., Der Kiureghian, a., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Kayen, R.E. & Moss, R.E.S., 2004. *Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130 (12), pp. 1314-1340.
- [16] Circular, IG P&I Clubs, 26 March 2010. *Carriage of Direct Reduced Iron (DRI) by Sea - Changes to the IMO Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargo*.
- [17] Class NK magazine 64th Edition. *Class NK's Initiatives for the Safe Carriage of Nickel Ore*, pp. 5-9
- [18] Consoli, N., Festugato, L. & Heineck, K., 2009. *Strain-hardening behaviour of fibre reinforced sand in view of filament geometry*. *Geosynthetics International* 16 (2), pp. 109-115.
- [19] Consoli, N., Heineck, K., Casagrande, M. & Coop, M., 2007. *Shear strength behavior of fiber-reinforced sand considering triaxial tests under distinct stress paths*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 133 (11), pp. 1466-1469.
- [20] Consoli, N., Prietto, P. & Ulbrich, L., 1998. *Influence of fiber and cement addition on behaviour of sandy soil*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 124 (12), pp. 1211-1214.
- [21] Cooke, P., 2011. *Mill Scale/ Mill Scale Fines - Worldwide*. UK P & I club, Loss prevention, 782
- [22] Detailed Bulletin, The Swedish Club, 1st June 2012. *Carriage of Nickel Ore and Iron Ore Fines*.
- [23] Diambra, A., Ibraim, E., Muir Wood, D., Russel ,A.R. & Bennani, Y, 2008a. *Effect of sample preparation on the behaviour of fibre reinforced sands*. In: *Proceedings of the 4th Int. Symposium on Deformation Characteristic of Geomaterials, IS-Atlanta 2008*. USA, vol. 2. IOS Press, pp. 629–636.
- [24] Diambra, A., Ibraim, E., Muir Wood, D. & Russell, A., 2008b. *Behaviour of reinforced sands: experiments and modeling*. In: *19th European Young Geotechnical Engineers Conference*. Hungary.
- [25] Diambra, A., Ibraim, E., Russell, A. & Muir Wood, D., 2007b. *Shear tests on fibre reinforced sands*. In: *Proceedings of 5th International Symposium on Earth Reinforcement, IS Kyushu200*. Japan, Balkema, Taylor& Francis Ed, p. 329–334.
- [26] Diambra, A., Russel, A., Ibraim, E. & Mur Wood, D., 2007a. *Determination of fibre orientation distribution in reinforced sand*. *Geotechnique* 57 (7), p. 623–628.
- [27] Dief, H.M. & Figueroa, J.L., 2001. *Liquefaction assessment by the energy method through centrifuge modeling*, CWRU, Cleveland, OH: Zeng, X.W. (Ed.), *Proceedings*

of the NSF International Workshop on Earthquake Simulation in Geotechnical Engineering.

- [28] Dorby, R. & Ladd, R.S., 1980. Discussion to "Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes" by Seed H.B. and "Liquefaction potential: Science versus practice" by Peck R.B.. Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE 106(GT6), pp. 720-724.
- [29] Dorby, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R., Powell, D., 1982. *Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method*. Building science series, Vol. 138. Washington, DC: National Bureau of Standards, US Department of Commerce, US Governmental Printing Office.
- [30] Figueroa, J., Saada, A., Liang, L. & Dahisaria, N., 1994. *Evaluation of soil liquefaction by energy principles*. Journal of Geotechnical Engineering ASCE 120 (9), pp. 1554-1569.
- [31] Goh, A.T.C., 1994. *Seismic liquefaction potential assessed by neural networks*. Journal of Geotechnical Engineering 120 (9), pp. 1467-1480.
- [32] Goh, A.T.C., 2002. *Probabilistic neural network for evaluating seismic liquefaction potential*. Canadian Geotechnical Journal 39 (1), pp. 219-232.
- [33] Goh, A.T.C. & Goh, S.H., 2007. *Support vector machines: their use in geotechnical engineering as illustrated using seismic liquefaction data*. Computers and Geotechnics 34, pp. 410-421.
- [34] Grant, K., 2008. *Shipping Nickel ore - Indonesia*, UK P & I club, Loss prevention, 602
- [35] Grant, K. & Jonas, M., 2010. *Cargo Liquefaction*. North of England P & I Association.
- [36] Gray, M., 2012. Lloyd's List.
- [37] Green, R.A., 2001. *Energy-Based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering.
- [38] Green, R., Mitchell, J. & Polito, C., 2000. *Energy-based excess pore pressure generation model for cohesionless soils*, Sydney, NSW, Australia: Proceedings of John Booker Memorial Symposium.
- [39] Harrison, I., 2012. *Cargo Liquefaction: Hazards and Developments*. Presentation of Inercargo 4th December 2012.
- [40] Heineck, C.S., Consoli, N.C. & Coop, M.R., 2005. *Effect of microreinforcement of soils from very small to large shear strains*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 131 (8), pp. 1024–1033.
- [41] Ibraim, E., Diambra, A., Muir Wood, D. & Russell, A., 2010. *Static liquefaction of fibre reinforced sand under monotonic loading*. Geotextiles and Geomembranes 28, pp. 374-385.

- [42] International Association of Classification Societies (IACS), *Bulk carriers, Guidance and Information on Bulk Cargo Loading and Discharging to Reduce the Likelihood of Over - stressing the Hull Structure*
- [43] International Association of Dry Cargo Shipowners (INTERCARGO), *Benchmarking Bulk Carriers 2011-12*
- [44] Intercargo Guide for Safe Loading of Nickel Ore, 1st February 2012. *Nickel Ore: Stop, Think, Verify!*
- [45] International Maritime Organization, *International Maritime Dangerous Goods Code - IMDG code.*
- [46] International Maritime Organization. *International Marine Solid Bulk Cargoes Code - IMSBC code.*
- [47] International Maritime Organization, *Code of Practice for the Safe Loading and Unloading of Bulk Carriers - BLU code.*
- [48] International Maritime Organization, *International Safety Management - ISM code.*
- [49] International Maritime Organization, *International Convention for Safety of Life at Sea - SOLAS.*
- [50] Ishihara, K. & Yasuda, S., 1975. *Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation.* Soils and Found 15 (1), pp. 45-59.
- [51] Jian-Ping, W., 2011. *A Study on Sfe Operation of Nickel Ore.* Opatija, International Conference IMLA 19
- [52] Jong, G., 2009. *International Marine Solid Bulk Cargoes Code - Background, Features & Applications.* Presentation of Bureau Vritas, 21st September 2009
- [53] Jonas, M., 2012. *liquefaction of mineral ores- IMSBC Code regulations and test methods.*
- [54] Jonas, M., February/ April 2010. *Liquefaction of unprocessed mineral ores - Iron ore fines and Nickel ore.* Gard News 197.
- [55] Koester, J., 1994. *The influence offines type and content on cyclic strength.* In: Prakash S., Dakoulas P. editors. Ground failures under seismic conditions. ASCE Geotechnical Special Publication vol. 44, pp. 17-33.
- [56] Koza, J., 1992. *Genetic Programming: On theProgramming of Computers by Means of Natural Selection.* MIT Press, Cambridge, MA, p. 813.
- [57] Kramer, SL, 1996. Geotechnical earthquake engineering. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [58] Lade, P. & Yamamuro, J., 1997. Effects of non-plastic fines on static liquefaction of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 6, pp. 918-928.

- [59] Lee, K. & Fitton, J., 1968. *Factors affecting the cyclic loading strength of soil*. *Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundation*, ASTM STP 450, American Society for Testing and Materials, pp. 71-95.
- [60] Liang, L., 1995. *Development of an Energy Method for Evaluating the Liquefaction Potential of a Soil Deposit*. Case Western Reserve University, Cleveland, OH, Department of Civil Engineering.
- [61] Liang, L., Figueroa, J. & Saada, A., 1995. *Liquefaction under random loading: unit energy approach*. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE* 121(11), pp. 776-781.
- [62] Liu, J., Wang, G., Kamai, T., Zhang, f., Yan, J. & Bin Sh, 2011. *Static liquefaction behavior of saturated fiber-reinforced sand in undrained ring-shear tests*. *Geotextiles and Geomembranes* 29, p. 462 – 471.
- [63] Lomas, R., 2012. *Cargo liquefaction - Regulatory developments and implications for ship design*. Presentation of Intercargo Work Programme 24th September 2012.
- [64] Loss prevention Briefing, North of England P&I Club, March 2010. *Cargo Liquefaction*.
- [65] Maher, M. & Ho, Y., 1994. *Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite*. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE* 120 (8), pp. 1381-1393.
- [66] Michalowski, R., 2008. *Limit analysis with anisotropic fibre-reinforced soil*. *Geotechnique* 58 (6), pp. 489-501.
- [67] Mulilis J.P., Chan C.K. & Seed H.B., 1975. *The Effects of Method of Sample Preparation on the Cyclic Stress–Strain Behavior of Sands*, Report EERC 75-18. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- [68] Naeini, S., 2001. *The influence of silt presence and sample preparation on liquefaction potential of silty san.*, PhD Dissertation., Tehran, Iran: Iran University of Science and Technology.
- [69] Naeini, S. & Baziar, M., 2004. *Effect of fines content on steady-state strength of mixed and layered samples of a sand*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, pp. 181-187.
- [70] *Nickel Ore: More casualties*. Risk Watch, Volume 19, Number 2, June 2012, pp. 4-5.
- [71] Oommen, T. & Baise, L., 2010. *Model development and validation for intelligent data collection for lateral spread displacements*. *Journal of Computing in Civil Engineering* 24 (6), pp. 467-477.
- [72] Oommen, T., Baise, L. & Vogel, R., 2010. *Validation and application of empirical liquefaction models*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136 (12), pp. 1618-1633.

- [73] Oommen, T., Mirsa, D., Twarakavi, N.K.C., Prakash, A., Sahoo, B. & Bandopadhyay, S., 2008. *An objective analysis of support vector machine based classification for remote sensing*. *Mathematical Geoscience* 40 (4), pp. 409-424.
- [74] Otlean, M. & Dumitrescu, D., 2002. *Multi Expression Programming*, Cluj-Napoca, Romania: Technical Report, UBB-01-2002. Babes,-Bolyai University.
- [75] Pal, M., 2006. *Support vector machines-based modelling of seismic liquefaction potential*. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 30 (10), pp. 983-996.
- [76] Park, T. & Ann Tan, S., 2005. *Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber*. *Geotextiles and Geomembranes* 23, p. 348–361.
- [77] Popek, M., 2010. *The Influence of Organic Polymer on Parameters Determining Ability to Liquefaction of Mineral Concentrates*. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 4 (4), pp. 435-440
- [78] Rokoff, M.D., 1999. *The Influence of Grain-Size Characteristics in Determining the Liquefaction Potential of a Soil Deposit by the Energy Method*, Case Western Reserve University, Cleveland, OH: M.Sc.Thesis, Department of Civil Engineering.
- [79] Russell, M., 2012. *Liquefaction of solid bulk cargoes*. Presentations of Gard 14th June 2012
- [80] Samui, P., 2007. *Seismic liquefaction potential assessment by using Relevance Vector Machine*. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 6 (4), pp. 331-336.
- [81] Santoni, R. & Webster, S., 2001. *Airfields and roads construction using fibre stabilization of sands*. *Journal of Transportation Engineering* 127 (2), p. 96–104.
- [82] Seed, H.B., 1980. *Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes*. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE* 106 (GT6), p. 724.
- [83] Seed, HB. & Idriss, IM., 1971. *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. *Journal of Soil Mech Found Division, ASCE* 97 (SM8) pp. 1249-1274.
- [84] Seed, HB., Idriss, IM., Makdisi, F. & Banerjee, N., 1975. *Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses*, U.C. Berkeley: Report No. UCB/EERC-75/29, Earthquake Engineering Research Centre.
- [85] Singh, S, 1996. *Liquefaction characteristics of silts*. *Geotechnical Geol Engineering* 14(1) pp. 1–19.
- [86] Spencer, C. & Tisley, D., February 2011. *Bulk Cargo Liquefaction (Iron ore fines and nickel ore)*. *Standard Cargo*
- [87] Stamatopoulos, C., 2010. *An experimental study of the liquefaction strength of silty sands in terms of the state parameter*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30, pp. 662 - 678.

- [88] Tang, C., Shi, B, Gao, W., Chen, F. & Cai, Y., 2007. *Strength and mechanical behaviour of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil*. Geotextiles and Geomembranes 25, pp. 194-202.
- [89] [Terzaghi, K., Peck, R. & Mesri, G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley-Interscience.
- [90] The Hong Kong Special Administrative Region, *Report of Investigation into the Sinking of M.V. Hui Long on 20 May 2005*
- [91] Thevanayagam, S., 1998. *Effect on fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 124 (6), pp. 479-491.
- [92] Thevanayagam, S., Ravishankar, K. & Mohan, S., 1997. *Effects of fines on monotonic undrained shear strength of sandy soils*. Geotechnical Test Journal 20 (4), pp. 394-406.
- [93] Tingle, J., Santoni, R. & Webster, S., 2002. *Full-scale field tests of discrete fibre-reinforced sand*. Journal of Transportation Engineering 128 (1), pp. 9–16.
- [94] Towhata, I. & Ishihara, K., 1985. *Shear work and pore water pressure in undrained shear*. Soils and Foundations 25 (3), pp. 73-84.
- [95] Vaid, Y., Chang, E. & Keurbis, R., 1990. *Stress path and steady state*. Canadian Geotechnical Journal 27(1), pp. 1-7.
- [96] Wang, G., Takemura, J. & Kuwano, J., 1997. *Evaluation of excess pore water pressures of intermediate soils due to cyclic loading by energy method*, Rotterdam, Netherlands: Proceedings of International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics.
- [97] Whitman, R., 1971. *Resistance of soil to liquefaction and settlement*. Soils Foundations, pp. 59-68.
- [98] Xenaki, V.C. & Athanasopoulos, G.A., 2003. *Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: an experimental investigation of the effect of fines*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 23, pp. 183 - 194.
- [99] Yamada, S., Takamori, T. & Sato, K., 2010. *Effects on reliquefaction resistance produced by changes in anisotropy during liquefaction*. Soils Found 50 (1), pp. 9-25.
- [100] Yamamuro, J. & Lad, P., 1998. *Steady state concepts and static liquefaction of silty sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 124 (9), pp. 868-877.
- [101] Yao, Y., Matsuoka, H. & Sun, D., 1999. *A unified elastoplastic model for clay and sand with the SMP criterion*. s.l., Vitharana N, Colman R, editors. Proceedings of the South Australia–New Zealand conference on geomechanics.

- [102] Yao, Y. & Sun, D., 2000. *Application of Lade's criterion to Cam-clay model*. Journal of Engineering Mechanics, ASCE 126 (1), pp. 179-190.
- [103] Ye, B., Ye, G. & Zhang, F., 2012. *Numerical modeling of changes in anisotropy during liquefaction using a generalized constitutive model*. Computers and Geotechnics 42, pp. 62-72.
- [104] Yetimoglu, T., Inanir, M. & Esat Inanir, O., 2005. *A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay*. Geotextiles and Geomembranes 23, pp. 174–183.
- [105] Zhang, F., Ye, B., Noda, T., Nakano, M. & Nakai, K., 2007. *Explanation of cyclic mobility of soils: approach by stress-induced anisotropy*. Soils Foundation 47 (4), pp. 635-648.
- [106] Zlatovic, S. & Ishihara, K., 1995. *On the influence of non-plastic fines on residual strength*. Tokyo: Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (14-17 November 1995).
- [107] Zornberg, J., 2002. *Discrete framework for equilibrium analysis of fibre-reinforced soil*. Geotechnique 52 (8), pp. 593–604.

Ελληνική Βιβλιογραφία

-
- [108] Ζωγραφίδης, Χ., 2010. *Επίδραση της φυσικοχημικής συμπεριφοράς νικελιούχων λατεριτών στην ενεργειακή βελτιστοποίηση της πυρομεταλλουργικής τους κατεργασία*. Διδακτορική Διτριβή.
- [109] Καλούμενος, Ν., 2013. *Πειραματική Μελέτη της Ελεύθερης Επιφάνειας Υγρού υπό Κατακόρυφη Διέγερση*. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [110] Κοψαχείλης, Α., 2009. *Αναερόβια χώνευση υγρών αποβλήτων ελαιολιτριβείου σε ένα περιοδικό αναερόβιο αντιδραστήρα (PARB) και κλασματοποίηση των εκροών*. Μεταπτυχιακή διτριβή ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [111] Νυροζίδης, Σ., 2008. *Αξιολόγηση των επιπτώσεων της επιφανειακής διάθεσης προεπεξεργασμένου κασιγάρου σε καλλιέργειες καλαμποκιού*. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.

www.bimco.com
www.cpiweb.org
www.euoparl.europa.eu
www.greenfield.waw.pl
www.skuld.com
maritimeaccident.org
www.shipbulding-industry.eu
www.larco.gr
www.nautinstlondon.com.uk
www.mii.org
www.bulkcarrierguide.com
www.amnautical.com
www.ukpandi.com
www.cargohandbook.com
www.nea.gr

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται η οδηγία του IACS “Guidance and Information on bulk Cargo Loading and Discharging to Reduce the Likelihood of Over - stressing the Hull Structure”

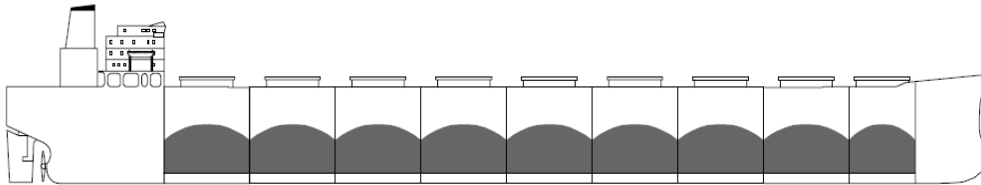
Τα πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην κατασκευάζονται με σκοπό να μεταφέρουν ποικιλία φορτίων. Η κατανομή του φορτίου κατά το μήκος του πλοίου έχει άμεση επίδραση όχι μόνο στη συνολική κάμψη και διάτμηση των δοκών της γάστρας αλλά και τη συνολική καταπόνηση της γάστρας.

Οι πιο κοινά αποδεκτές κατανομές φορτίου είναι:

- Ομοιογενής φόρτωση (Homogenous hold loading condition)
- Εναλλασσόμενη φόρτωση (Alternate hold loading condition)
- Εναλλασσόμενη φόρτωση “Block loading” (Block hold loading and Part loaded conditions)

Ομοιογενής φόρτωση κυτών

Η ομοιογενής φόρτωση αναφέρεται στη φόρτωση όλων των κυτών του πλοίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 53. Η συγκεκριμένη κατανομή φορτίου επιτρέπεται για όλα τα πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην και υιοθετείται, συνήθως, για τη μεταφορά ελαφρών φορτίων (χαμηλή πυκνότητα) όπως είναι ο άνθρακας και τα σιτηρά. Παρόλα αυτά, βαρέα φορτία (υψηλής πυκνότητας), όπως είναι το σιδηρομετάλλευμα, μπορεί να μεταφέρονται με ομοιογενή φόρτωση κυτών.

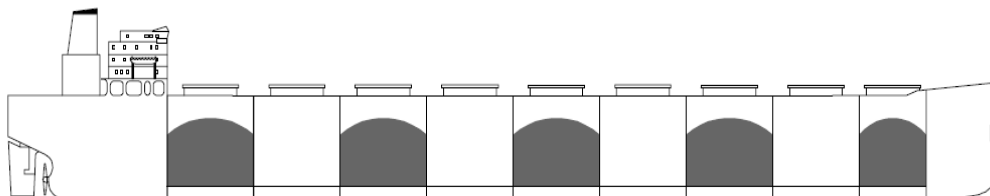


Εικόνα 53. Ομοιογενής φόρτωση κυτών.

Εναλλασσόμενη φόρτωση κυτών

Τα βαρέα φορτία, όπως είναι το σιδηρομετάλλευμα, συχνά μεταφέρονται με εναλλασσόμενη φόρτωση κυτών, όπως φαίνεται στην εικόνα 54. Σε μεγάλα πλοία, είναι σύνηθες τα βαρέα φορτία να φορτώνονται στα μονά κύτη αφήνοντας τα υπόλοιπα άδεια. Η συγκεκριμένη κατανομή φορτίου αυξάνει το κέντρο βάρους του πλοίου, το οποίο εντείνει την κίνηση διατοιχισμού. Όταν ένα βαρύ φορτίο φορτώνεται εναλλάξ στα κύτη του πλοίου, το βάρος που τοποθετείται σε κάθε κύτος είναι ίσο με το βάρος που τοποθετείται σε δύο κύτη στην ομοιογενή φόρτωση. Για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη φόρτωση, η τοπική κατασκευή θα πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένη και ενισχυμένη. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα κύτη που δεν προορίζονται για μεταφορά βαρύ φορτίου δεν είναι ενισχυμένα.

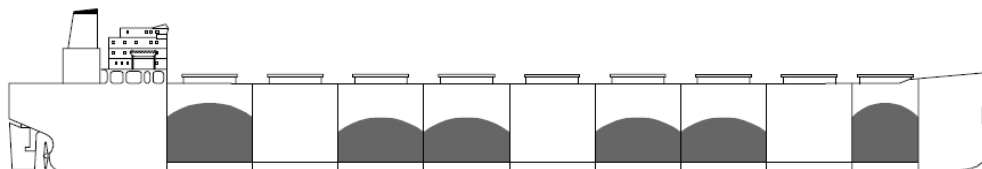
Τα πλοία που δεν έχουν εγκριθεί να μεταφέρουν βαρέα φορτία σε κύτη εναλλάξ δεν θα πρέπει να μεταφέρουν φορτίο με τη συγκεκριμένη κατανομή.



Εικόνα 54. Εναλλασσόμενη φόρτωση κυτών.

Εναλλασσόμενη φόρτωση “Block loading”

Η Εναλλασσόμενη φόρτωση “Block loading” πλοίου αναφέρεται στην στοιβασία φορτίου σε γειτονικά κύττη ανά δύο ή περισσότερα, ενώ τα παρακείμενα σε αυτά είναι άδεια, όπως φαίνεται στην εικόνα 55. Συνήθως μία τέτοια φόρτωση δεν αναφέρεται στο εγχειρίδιο του πλοίου, λόγω του ότι τα γειτονικά κύττη είναι υπερφορτωμένα δημιουργώντας προβλήματα στην τοπική αντοχή. Με σκοπό να αποφευχθούν μεγάλες καταπονήσεις της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, θα πρέπει να δίνεται προσοχή στο φορτίο που φορτώνεται στο κάθε κύτος, καθώς επίσης και στο βύθισμα πλευσης, αφού αυτό είναι μικρότερο από το βύθισμα σχεδίασης του πλοίου λόγω μεταφοράς μικρότερης ποσότητας φορτίου από όση μεταφέρει το πλοίο.

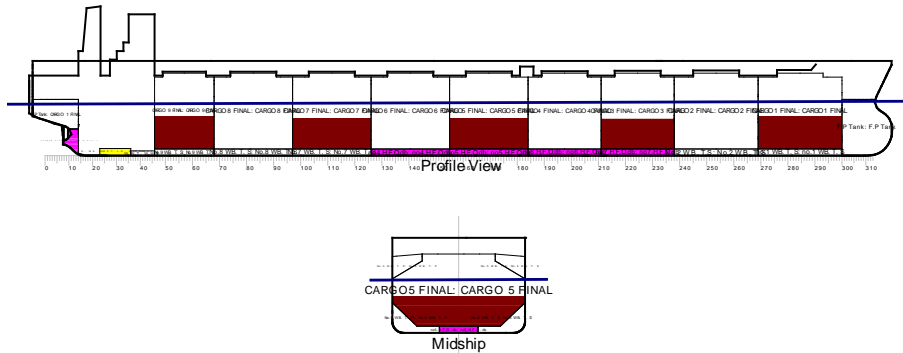


Εικόνα 55. Εναλλασσόμενη φόρτωση “Block loading”.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξάγονται το πρόγραμμα AVEVA Marine, για την ανάλυση της ευστάθειας πλοίου που μεταφέρει βαρέα κοκκώδη υλικά.

Φορτίο ειδικού βάρους 3.6t/m³ πριν τη ρευστοποίηση



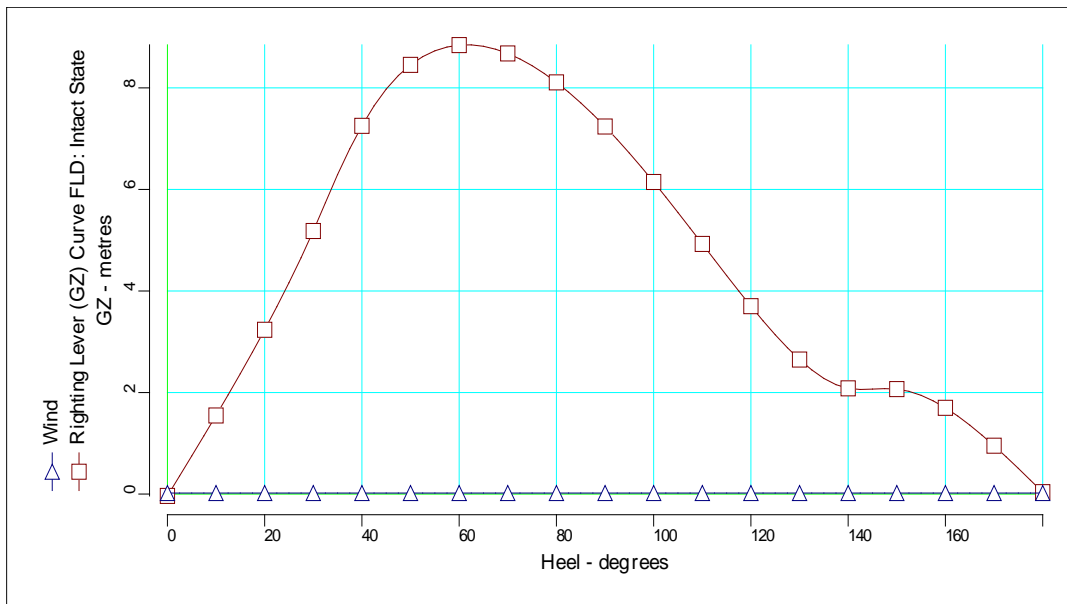
Drafts at equilibrium angle

Draft at LCF	17.882	metres
Draft aft at marks	17.420	metres
Draft fwd at marks	18.344	metres
Draft at AP	17.420	metres
Draft at FP	18.344	metres
Mean draft at midships	17.882	metres

Hydrostatics at equilibrium angle

Density of water	1.0300	tonnes/cu.m
Heel to starboard	0.24	degrees
Trim by the bow	0.924	metres
KG	9.102	metres
FSC	0.237	metres
KGf	9.339	metres
GMt	8.990	metres
BMt	9.067	metres
BMI	338.979	metres
Waterplane area	11411.17	sq.metres
LCG	147.400	metres
LCB	147.400	metres

Density of water	1.0300	tonnes/cu.m
TCB	0.037	metres
LCF	139.549	metres
TCF	0.078	metres
TPC	117.535	tonnes/cm
MTC	2371.775	tonnes-m/cm
Shell thickness	0.000	mm
Grain Heeling Moment	56963.770	tonnes-metres



Righting Lever (GZ) Curve

Heel to Stbd (deg)	GZ (m)	Slope (m/rad)	Trim (m)	WLrad (m)	Freeboard (m)	Wind (m)
0.00	-0.0371	8.9897	0.924	17.421	7.82[0]	0.0202
5.00	0.7493	9.0577	0.942	17.339	5.85[0]	0.0202
10.00	1.5476	9.2649	0.996	17.097	3.84[0]	0.0202
15.00	2.3708	9.6421	1.085	16.694	1.82[0]	0.0202
20.00	3.2356	10.2315	1.204	16.136	-0.22[0]	0.0202
25.00	4.1623	11.0999	1.347	15.426	-2.23[0]	0.0202
30.00	5.1808	12.3547	1.506	14.572	-4.22[0]	0.0202
35.00	6.2920	12.3106	1.703	13.581	-6.17[0]	0.0202
40.00	7.2536	9.7693	1.987	12.526	-8.17[0]	0.0202
45.00	7.9763	6.8848	2.311	11.416	-10.17[0]	0.0202
50.00	8.4541	4.3032	2.650	10.224	-12.11[0]	0.0202

Heel to Stbd (deg)	GZ (m)	Slope (m/rad)	Trim (m)	WLrad (m)	Freeboard (m)	Wind (m)
55.00	8.7304	2.2290	2.983	8.957	-13.97[0]	0.0202
60.00	8.8432	0.5142	3.295	7.629	-15.74[0]	0.0202
65.00	8.8190	-0.9419	3.581	6.253	-17.39[0]	0.0202
70.00	8.6784	-2.1875	3.833	4.839	-18.92[0]	0.0202
75.00	8.4373	-3.2654	4.047	3.400	-20.31[0]	0.0202
80.00	8.1092	-4.1972	4.220	1.946	-21.55[0]	0.0202
85.00	7.7065	-4.9946	4.351	0.489	-22.64[0]	0.0202
90.00	7.2390	-5.6947	4.453	-0.970	-23.55[0]	0.0202
95.00	6.7160	-6.2767	4.549	-2.437	-24.29[0]	0.0202
100.00	6.1475	-6.7183	4.641	-3.903	-24.84[0]	0.0202
105.00	5.5462	-7.0142	4.725	-5.357	-25.19[0]	0.0202
110.00	4.9270	-7.1411	4.796	-6.784	-25.35[0]	0.0202
115.00	4.3053	-7.0648	4.852	-8.174	-25.32[0]	0.0202
120.00	3.7008	-6.7387	4.892	-9.516	-25.09[0]	0.0202
125.00	3.1382	-6.0913	4.922	-10.804	-24.66[0]	0.0202
130.00	2.6501	-5.0174	4.948	-12.032	-24.04[0]	0.0202
135.00	2.2784	-3.3588	4.977	-13.195	-23.23[0]	0.0202
140.00	2.0824	-1.0488	5.044	-14.294	-22.24[0]	0.0202
145.00	2.0672	0.4097	5.286	-15.384	-21.10[0]	0.0202
150.00	2.0669	-0.4713	5.743	-16.449	-19.82[0]	0.0202
155.00	1.9450	-2.0406	6.208	-17.376	-18.44[0]	0.0202
160.00	1.6987	-3.3335	6.614	-18.149	-16.93[0]	0.0202
165.00	1.3584	-4.2745	6.940	-18.758	-15.30[0]	0.0202
170.00	0.9525	-4.9082	7.178	-19.197	-13.56[0]	0.0202
175.00	0.5050	-5.2754	7.321	-19.461	-11.73[0]	0.0202
180.00	0.0371	-5.3975	7.369	-19.549	-9.83[0]	0.0202

IMO Wind heeling

Property	Value	Units
Length WL	287.370	metres
Profile area above WL	3303.460	sq.metres
Area to leeward (Area b)	3.73601	m-radians
Area to windward (Area a)	0.00018	m-radians
GZc	0.020	metres

Property	Value	Units
Gust angle	0.365	degrees
Rollback angle	20.668	degrees
Steady state angle	0.322	degrees
Max. angle to leeward	50.000	degrees
B/d'	2.560	
X1	0.968	
Cb	0.874	
Ar	0.000	
K	1.000	
Og	-8.082	metres
r	0.452	
T	9.172	seconds

IMO 749 Intact Stability Criteria non - passenger

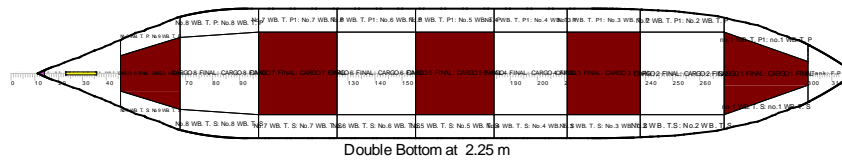
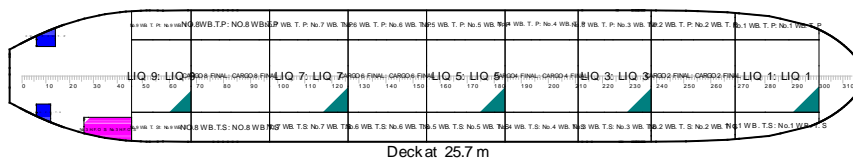
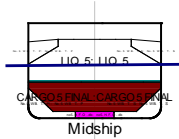
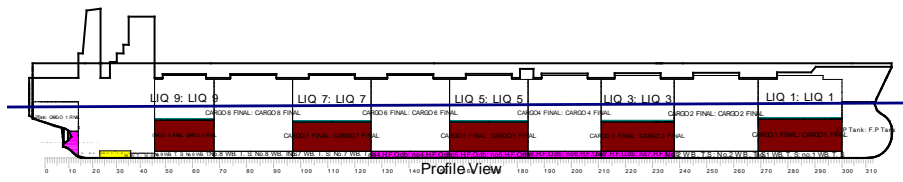
#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	1.275	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	1.093	0.030
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	2.369	0.090
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	Not Appl..	0.150
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	8.850	0.200
6	Max GZ to be at an angle > 30 degrees	61.495	30.000
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	0.322	16.000
8	IMO Weather Criterion (Areas)	Indeterm.	1.000

Condition complies with the regulations

Note

Term	Meaning
Not Appl..	The criterion cannot be applied, because some condition is not met, e.g. the criterion might only apply when the ship is upright, but in the condition, the ship has an angle of heel.
Indeterm.	The value cannot be determined, although the ship passes the test. The reason may be that the value has some very large value. Another reason may be that no profile has been defined, and thus the wind moment cannot be calculated.

Φορτίο ειδικού βάρους 3.6t/m³ μετά τη ρευστοποίηση (2.4% του υλικού ρευστοποιείται)



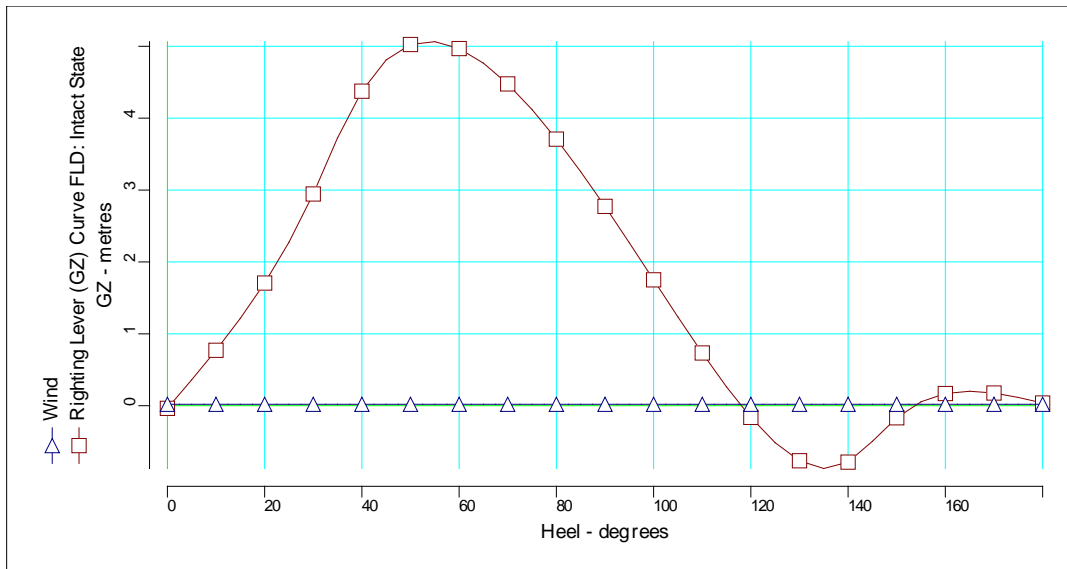
Drafts at equilibrium angle

Draft at LCF	17.902	metres
Draft aft at marks	17.276	metres
Draft fwd at marks	18.527	metres
Draft at AP	17.276	metres
Draft at FP	18.527	metres
Mean draft at midships	17.901	metres

Hydrostatics at equilibrium angle

Density of water	1.0300	tonnes/cu.m
Heel to starboard	0.47	degrees
Trim by the bow	1.251	metres
KG	9.044	metres
FSC	4.760	metres
KGf	13.804	metres
GMt	4.519	metres
BMt	9.050	metres

Density of water	1.0300	tonnes/cu.m
BMI	338.026	metres
Waterplane area	11404.68	sq.metres
LCG	147.767	metres
LCB	147.788	metres
TCB	0.074	metres
LCF	139.662	metres
TCF	0.155	metres
TPC	117.468	tonnes/cm
MTC	2367.848	tonnes-m/cm
Shell thickness	0.000	mm



Righting Lever (GZ) Curve

Heel to Stbd (deg)	GZ (m)	Slope (m/rad)	Trim (m)	WLrad (m)	Freeboard (m)	Wind (m)
0.00	-0.0371	4.5185	1.250	17.276	7.80[0]	0.0200
5.00	0.3597	4.6044	1.268	17.195	5.83[0]	0.0200
10.00	0.7714	4.8619	1.319	16.954	3.82[0]	0.0200
15.00	1.2138	5.3234	1.402	16.554	1.80[0]	0.0200
20.00	1.7067	6.0293	1.514	15.999	-0.23[0]	0.0200
25.00	2.2731	7.0461	1.647	15.292	-2.25[0]	0.0200
30.00	2.9458	8.4823	1.794	14.443	-4.23[0]	0.0200
35.00	3.7255	8.6174	1.985	13.454	-6.19[0]	0.0200
40.00	4.3756	6.3307	2.279	12.395	-8.18[0]	0.0200

Heel to Stbd (deg)	GZ (m)	Slope (m/rad)	Trim (m)	WLrad (m)	Freeboard (m)	Wind (m)
45.00	4.8099	3.7279	2.616	11.280	-10.18[0]	0.0200
50.00	5.0244	1.4413	2.969	10.081	-12.13[0]	0.0200
55.00	5.0639	-0.3206	3.316	8.809	-13.99[0]	0.0200
60.00	4.9681	-1.7056	3.640	7.477	-15.76[0]	0.0200
65.00	4.7651	-2.8149	3.934	6.096	-17.41[0]	0.0200
70.00	4.4765	-3.6997	4.191	4.681	-18.94[0]	0.0200
75.00	4.1195	-4.4059	4.407	3.242	-20.33[0]	0.0200
80.00	3.7085	-4.9574	4.578	1.790	-21.57[0]	0.0200
85.00	3.2562	-5.3709	4.705	0.336	-22.66[0]	0.0200
90.00	2.7727	-5.6852	4.802	-1.122	-23.58[0]	0.0200
95.00	2.2667	-5.8785	4.893	-2.588	-24.31[0]	0.0200
100.00	1.7504	-5.9339	4.977	-4.050	-24.86[0]	0.0200
105.00	1.2352	-5.8484	5.051	-5.499	-25.21[0]	0.0200
110.00	0.7333	-5.6042	5.111	-6.921	-25.37[0]	0.0200
115.00	0.2615	-5.1690	5.154	-8.305	-25.34[0]	0.0200
120.00	-0.1624	-4.4988	5.180	-9.641	-25.11[0]	0.0200
125.00	-0.5152	-3.5265	5.194	-10.923	-24.68[0]	0.0200
130.00	-0.7659	-2.1459	5.205	-12.143	-24.06[0]	0.0200
135.00	-0.8745	-0.2088	5.220	-13.300	-23.24[0]	0.0200
140.00	-0.7846	2.3405	5.275	-14.393	-22.26[0]	0.0200
145.00	-0.4949	4.0183	5.509	-15.479	-21.11[0]	0.0200
150.00	-0.1688	3.3873	5.962	-16.541	-19.84[0]	0.0200
155.00	0.0546	2.0110	6.425	-17.466	-18.45[0]	0.0200
160.00	0.1687	0.8695	6.829	-18.238	-16.94[0]	0.0200
165.00	0.2005	0.0465	7.153	-18.846	-15.32[0]	0.0200
170.00	0.1756	-0.5024	7.388	-19.283	-13.58[0]	0.0200
175.00	0.1151	-0.8186	7.530	-19.546	-11.75[0]	0.0200
180.00	0.0371	-0.9237	7.578	-19.634	-9.84[0]	0.0200

IMO Wind heeling

Property	Value	Units
Length WL	287.370	metres
Profile area above WL	3299.124	sq.metres
Area to leeward (Area b)	2.13815	m-radians

Property	Value	Units
Area to windward (Area a)	0.00036	m-radians
GZc	0.020	metres
Gust angle	0.724	degrees
Rollback angle	19.924	degrees
Steady state angle	0.639	degrees
Max. angle to leeward	50.000	degrees
B/d'	2.582	
X1	0.964	
Cb	0.883	
Ar	0.000	
K	1.000	
Og	-3.472	metres
r	0.609	
T	12.959	seconds

IMO 749 Intact Stability Criteria non - passenger

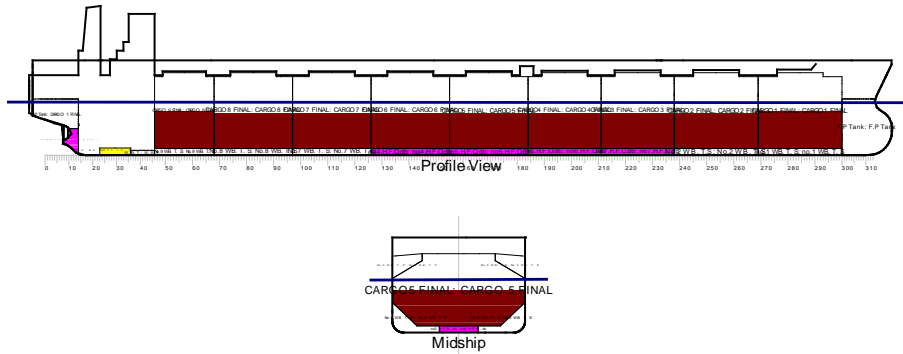
#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	0.676	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	0.646	0.030
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	1.322	0.090
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	Not Appl..	0.150
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	5.068	0.200
6	Max GZ to be at an angle > 30 degrees	53.745	30.000
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	0.639	16.000
8	IMO Weather Criterion (Areas)	Indeterm.	1.000

Condition complies with the regulations

Note

Term	Meaning
Not Appl..	The criterion cannot be applied, because some condition is not met, e.g. the criterion might only apply when the ship is upright, but in the condition, the ship has an angle of heel.
Indeterm.	The value cannot be determined, although the ship passes the test. The reason may be that the value has some very large value. Another reason may be that no profile has been defined, and thus the wind moment cannot be calculated.

Φορτίο ειδικού βάρους 1.6t/m³ (ομοιογενής φόρτωση) πριν τη ρευστοποίηση



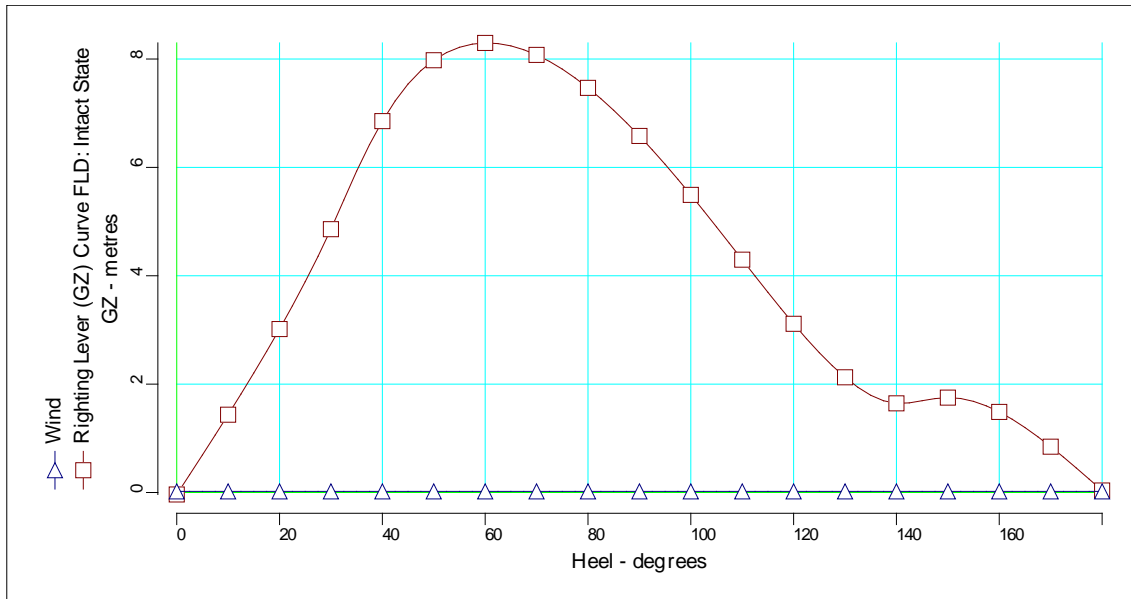
Drafts at equilibrium angle

Draft at LCF	17.807	metres
Draft aft at marks	17.905	metres
Draft fwd at marks	17.709	metres
Draft at AP	17.905	metres
Draft at FP	17.709	metres
Mean draft at midships	17.807	metres

Hydrostatics at equilibrium angle

Density of water	1.0300	tonnes/cu.m
Heel to starboard	0.26	degrees
Trim by the stern	0.196	metres
KG	9.766	metres
FSC	0.238	metres
KGf	10.005	metres
GMt	8.347	metres
BMt	9.131	metres
BMI	342.657	metres
Waterplane area	11436.11	sq.metres
LCG	146.066	metres
LCB	146.066	metres
TCB	0.041	metres
LCF	139.213	metres
TCF	0.084	metres
TPC	117.792	tonnes/cm
MTC	2386.737	tonnes-m/cm

Density of water	1.0300	tonnes/cu.m
Shell thickness	0.000	mm
Grain Heeling Moment	49212.137	tonnes-metres



Righting Lever (GZ) Curve

Heel to Stbd (deg)	GZ (m)	Slope (m/rad)	Trim (m)	WLrad (m)	Freeboard (m)	Wind (m)
0.00	-0.0373	8.3469	-0.196	17.905	7.89[0]	0.0207
5.00	0.6933	8.4187	-0.174	17.823	5.92[0]	0.0207
10.00	1.4361	8.6357	-0.107	17.575	3.92[0]	0.0207
15.00	2.2046	9.0256	0.002	17.165	1.89[0]	0.0207
20.00	3.0160	9.6341	0.150	16.595	-0.15[0]	0.0207
25.00	3.8910	10.5262	0.329	15.871	-2.17[0]	0.0207
30.00	4.8596	11.8053	0.530	15.001	-4.16[0]	0.0207
35.00	5.9297	11.8851	0.751	13.999	-6.11[0]	0.0207
40.00	6.8542	9.3221	1.010	12.955	-8.11[0]	0.0207
45.00	7.5382	6.4171	1.293	11.862	-10.10[0]	0.0207
50.00	7.9773	3.8526	1.586	10.688	-12.04[0]	0.0207
55.00	8.2171	1.8125	1.873	9.439	-13.90[0]	0.0207
60.00	8.2965	0.1394	2.144	8.129	-15.66[0]	0.0207
65.00	8.2425	-1.2674	2.392	6.768	-17.31[0]	0.0207
70.00	8.0760	-2.4641	2.615	5.365	-18.84[0]	0.0207
75.00	7.8135	-3.4882	2.809	3.934	-20.23[0]	0.0207

Heel to Stbd (deg)	GZ (m)	Slope (m/rad)	Trim (m)	WLrad (m)	Freeboard (m)	Wind (m)
80.00	7.4686	-4.3646	2.972	2.483	-21.47[0]	0.0207
85.00	7.0538	-5.1040	3.101	1.025	-22.55[0]	0.0207
90.00	6.5802	-5.7271	3.197	-0.431	-23.47[0]	0.0207
95.00	6.0563	-6.2511	3.289	-1.894	-24.20[0]	0.0207
100.00	5.4925	-6.6364	3.385	-3.359	-24.76[0]	0.0207
105.00	4.9013	-6.8775	3.479	-4.814	-25.11[0]	0.0207
110.00	4.2963	-6.9492	3.568	-6.247	-25.28[0]	0.0207
115.00	3.6938	-6.8154	3.649	-7.647	-25.25[0]	0.0207
120.00	3.1135	-6.4318	3.722	-9.003	-25.02[0]	0.0207
125.00	2.5801	-5.7255	3.792	-10.308	-24.59[0]	0.0207
130.00	2.1265	-4.5967	3.862	-11.553	-23.98[0]	0.0207
135.00	1.7943	-2.8663	3.935	-12.734	-23.17[0]	0.0207
140.00	1.6455	-0.4223	4.035	-13.849	-22.19[0]	0.0207
145.00	1.6935	1.1605	4.284	-14.946	-21.04[0]	0.0207
150.00	1.7513	0.1292	4.721	-16.003	-19.76[0]	0.0207
155.00	1.6816	-1.4671	5.154	-16.917	-18.37[0]	0.0207
160.00	1.4870	-2.7496	5.533	-17.679	-16.86[0]	0.0207
165.00	1.1989	-3.6788	5.837	-18.279	-15.23[0]	0.0207
170.00	0.8457	-4.3035	6.059	-18.712	-13.49[0]	0.0207
175.00	0.4515	-4.6639	6.194	-18.972	-11.66[0]	0.0207
180.00	0.0373	-4.7844	6.239	-19.059	-9.75[0]	0.0207

IMO Wind heeling

Property	Value	Units
Length WL	287.370	metres
Profile area above WL	3322.018	sq.metres
Area to leeward (Area b)	3.50994	m-radians
Area to windward (Area a)	0.00020	m-radians
GZc	0.021	metres
Gust angle	0.398	degrees
Rollback angle	21.007	degrees
Steady state angle	0.350	degrees
Max. angle to leeward	50.000	degrees
B/d'	2.491	

Property	Value	Units
X1	0.982	
Cb	0.847	
Ar	0.000	
K	1.000	
Og	-7.901	metres
r	0.465	
T	9.470	seconds

IMO 749 Intact Stability Criteria non - passenger

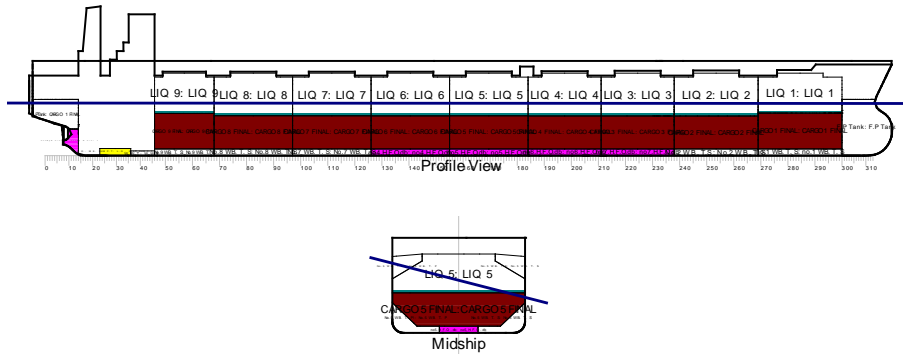
#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	1.189	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	1.030	0.030
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	2.219	0.090
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	Not Appl..	0.150
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	8.297	0.200
6	Max GZ to be at an angle > 30 degrees	60.409	30.000
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	0.350	16.000
8	IMO Weather Criterion (Areas)	Indeterm.	1.000

Condition complies with the regulations

Note

Term	Meaning
Not Appl..	The criterion cannot be applied, because some condition is not met, e.g. the criterion might only apply when the ship is upright, but in the condition, the ship has an angle of heel.
Indeterm.	The value cannot be determined, although the ship passes the test. The reason may be that the value has some very large value. Another reason may be that no profile has been defined, and thus the wind moment cannot be calculated.

Φορτίο ειδικού βάρους 1.6t/m³ (ομοιογενής φόρτωση) μετά τη ρευστοποίηση (4.8% του υλικού ρευστοποιείται)



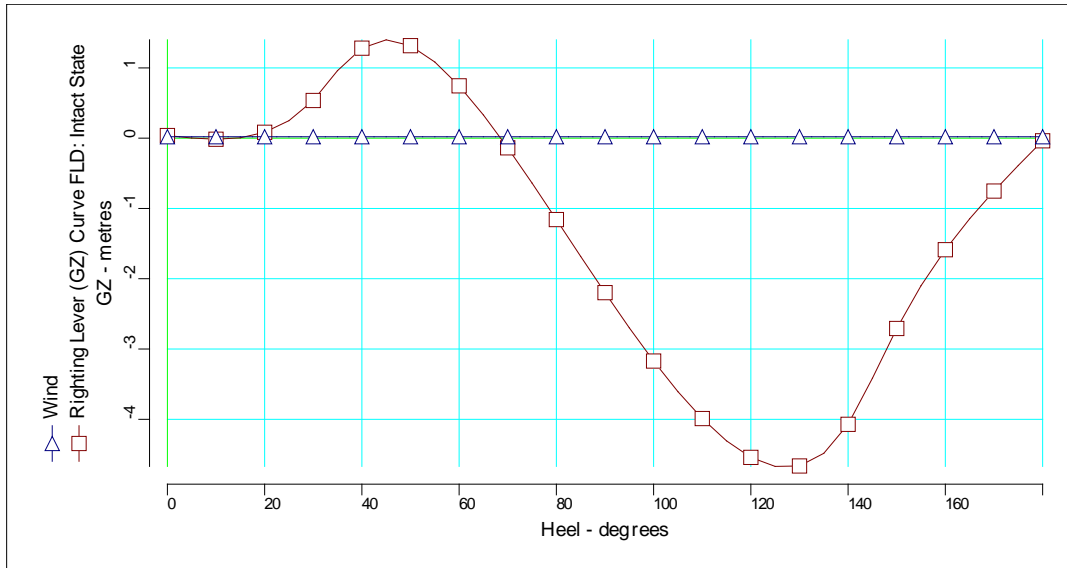
Drafts at equilibrium angle

Draft at LCF	17.699	metres
Draft aft at marks	17.764	metres
Draft fwd at marks	17.634	metres
Draft at AP	17.764	metres
Draft at FP	17.634	metres
Mean draft at midships	17.699	metres

Hydrostatics at equilibrium angle

Density of water	1.0300	tonnes/cu.m
Heel to port	14.44	degrees
Trim by the stern	0.130	metres
KG	9.679	metres
FSC	9.107	metres
KGf	18.785	metres
GMt	0.449	metres
BMt	10.056	metres
BMI	354.677	metres
Waterplane area	11787.10	sq.metres
LCG	145.955	metres
LCB	145.951	metres
TCB	-2.356	metres
LCF	139.616	metres
TCF	-4.685	metres

Density of water	1.0300	tonnes/cu.m
TPC	121.407	tonnes/cm
MTC	2459.253	tonnes-m/cm
Shell thickness	0.000	mm



Righting Lever (GZ) Curve

Heel to Port (deg)	GZ (m)	Slope (m/rad)	Trim (m)	WLrad (m)	Freeboard (m)	Wind (m)
0.00	0.0374	-0.4319	-0.320	17.892	7.97[0]	0.0209
5.00	0.0026	-0.3330	-0.296	17.809	6.00[1]	0.0209
10.00	-0.0147	-0.0215	-0.226	17.561	3.99[1]	0.0209
15.00	0.0048	0.5298	-0.111	17.149	1.96[1]	0.0209
20.00	0.0841	1.3650	0.044	16.578	-0.08[1]	0.0209
25.00	0.2495	2.5477	0.232	15.851	-2.10[1]	0.0209
30.00	0.5367	4.1790	0.443	14.979	-4.09[1]	0.0209
35.00	0.9615	4.7477	0.671	13.975	-6.05[1]	0.0209
40.00	1.2811	2.6038	0.932	12.926	-8.04[1]	0.0209
45.00	1.3986	0.1673	1.216	11.829	-10.03[1]	0.0209
50.00	1.3159	-1.8499	1.508	10.650	-11.97[1]	0.0209
55.00	1.0838	-3.2948	1.794	9.399	-13.82[1]	0.0209
60.00	0.7451	-4.3316	2.061	8.086	-15.58[1]	0.0209
65.00	0.3301	-5.0665	2.305	6.723	-17.22[1]	0.0209
70.00	-0.1374	-5.5612	2.522	5.321	-18.75[1]	0.0209
75.00	-0.6387	-5.8599	2.710	3.891	-20.13[1]	0.0209

Heel to Port (deg)	GZ (m)	Slope (m/rad)	Trim (m)	WLrad (m)	Freeboard (m)	Wind (m)
80.00	-1.1580	-5.9914	2.865	2.443	-21.37[1]	0.0209
85.00	-1.6818	-5.9732	2.986	0.988	-22.45[1]	0.0209
90.00	-2.1980	-5.8338	3.075	-0.464	-23.37[1]	0.0209
95.00	-2.6986	-5.5923	3.160	-1.924	-24.11[1]	0.0209
100.00	-3.1709	-5.2177	3.250	-3.385	-24.66[1]	0.0209
105.00	-3.6054	-4.7089	3.338	-4.835	-25.02[1]	0.0209
110.00	-3.9890	-4.0461	3.421	-6.263	-25.19[1]	0.0209
115.00	-4.3069	-3.1992	3.497	-7.657	-25.16[1]	0.0209
120.00	-4.5414	-2.1291	3.567	-9.008	-24.93[1]	0.0209
125.00	-4.6705	-0.7676	3.634	-10.308	-24.51[1]	0.0209
130.00	-4.6640	0.9806	3.702	-11.548	-23.90[1]	0.0209
135.00	-4.4837	3.2926	3.774	-12.724	-23.10[1]	0.0209
140.00	-4.0710	6.2861	3.872	-13.833	-22.12[1]	0.0209
145.00	-3.4143	8.3830	4.109	-14.922	-20.97[1]	0.0209
150.00	-2.7081	7.7368	4.527	-15.972	-19.69[1]	0.0209
155.00	-2.0986	6.4743	4.941	-16.879	-18.30[1]	0.0209
160.00	-1.5867	5.4825	5.301	-17.633	-16.79[1]	0.0209
165.00	-1.1456	4.7846	5.590	-18.228	-15.16[1]	0.0209
170.00	-0.7521	4.3290	5.801	-18.656	-13.42[1]	0.0209
175.00	-0.3879	4.0734	5.928	-18.913	-11.59[1]	0.0209
180.00	-0.0374	3.9920	5.971	-18.999	-9.68[1]	0.0209

IMO Wind heeling

Property	Value	Units
Length WL	287.370	metres
Profile area above WL	3343.015	sq.metres
Area to leeward (Area b)	0.44028	m-radians
Area to windward (Area a)	0.00584	m-radians
GZc	0.021	metres
Gust angle	16.476	degrees
Rollback angle	17.447	degrees
Steady state angle	15.854	degrees
Max. angle to leeward	50.000	degrees
B/d'	2.493	

Property	Value	Units
X1	0.981	
Cb	0.844	
Ar	0.000	
K	1.000	
Og	0.893	metres
r	0.760	
T	20.000	seconds

IMO 749 Intact Stability Criteria non - passenger

#	Criterion	Actual Value	Critical Value	
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	0.050	0.055	F
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	0.164	0.030	
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	0.215	0.090	
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	Not Appl..	0.150	F
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	1.399	0.200	
6	Max GZ to be at an angle > 30 degrees	45.320	30.000	
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	15.854	16.000	
8	IMO Weather Criterion (Areas)	75.336	1.000	

**** Condition does not comply ****

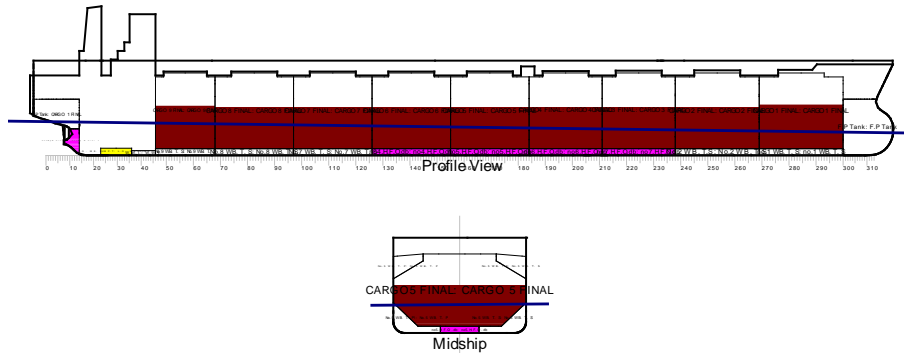
Note

Term	Meaning
F	The criterion is not satisfied.
Not Appl..	The criterion cannot be applied, because some condition is not met, e.g. the criterion might only apply when the ship is upright, but in the condition, the ship has an angle of heel.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα που εξάγονται από το πρόγραμμα AVEVA Marine, έχοντας φορτώσει το πλοίο με ξηρό και υγρό ελαιοπυρήνα.

Ξηρός ελαιοπυρήνας τοποθετείται στο 60% του κάθε κύτους του πλοίου.



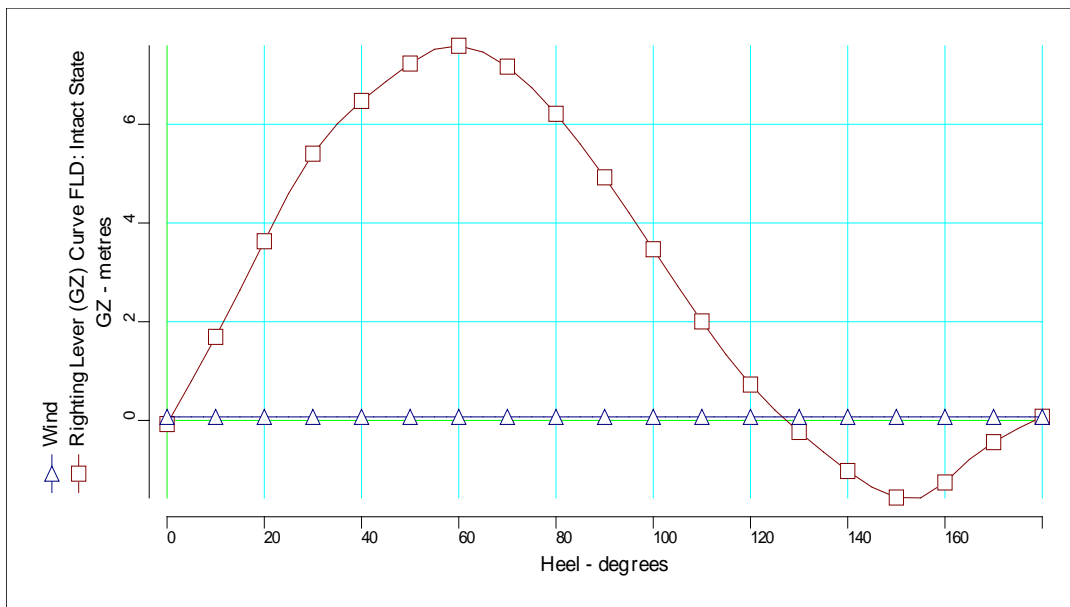
Drafts at equilibrium angle

Draft at LCF	9.445	metres
Draft aft at marks	11.376	metres
Draft fwd at marks	7.690	metres
Draft at AP	11.376	metres
Draft at FP	7.690	metres
Mean draft at midships	9.533	metres

Hydrostatics at equilibrium angle

Density of water	1.0300	tonnes/cu.m
Heel to starboard	0.43	degrees
Trim by the stern	3.685	metres
KG	11.450	metres
FSC	0.472	metres
KGf	11.923	metres
GMt	9.931	metres
BMt	16.932	metres
BMI	593.044	metres
Waterplane area	10895.51	sq.metres

Density of water	1.0300	tonnes/cu.m
LCG	141.361	metres
LCB	141.268	metres
TCB	0.126	metres
LCF	146.036	metres
TCF	0.084	metres
TPC	112.224	tonnes/cm
MTC	2085.995	tonnes-m/cm
Shell thickness	0.000	mm
Grain Heeling Moment	16985.383	tonnes-metres



Righting Lever (GZ) Curve

Heel to Stbd (deg)	GZ (m)	Slope (m/rad)	Trim (m)	WLrad (m)	Freeboard (m)	Wind (m)
0.00	-0.0738	9.9276	-3.686	11.375	16.17[0]	0.0721
5.00	0.7973	10.0786	-3.657	11.317	14.17[0]	0.0721
10.00	1.6935	10.5217	-3.571	11.143	12.08[0]	0.0721
15.00	2.6390	11.2026	-3.431	10.854	9.91[0]	0.0721
20.00	3.6312	11.4563	-3.256	10.449	7.70[0]	0.0721
25.00	4.5991	10.5171	-3.070	9.906	5.50[0]	0.0721
30.00	5.4042	7.9668	-2.895	9.176	3.38[0]	0.0721
35.00	6.0057	6.0428	-2.697	8.215	1.39[0]	0.0721
40.00	6.4733	4.8776	-2.476	7.042	-0.45[0]	0.0721

Heel to Stbd (deg)	GZ (m)	Slope (m/rad)	Trim (m)	WLrad (m)	Freeboard (m)	Wind (m)
45.00	6.8647	4.3052	-2.238	5.673	-2.15[0]	0.0721
50.00	7.2311	4.2389	-1.994	4.122	-3.69[0]	0.0721
55.00	7.5199	2.0869	-1.839	2.489	-5.10[0]	0.0721
60.00	7.5905	-0.3785	-1.743	0.849	-6.44[0]	0.0721
65.00	7.4626	-2.4739	-1.652	-0.805	-7.72[0]	0.0721
70.00	7.1691	-4.1630	-1.538	-2.472	-8.92[0]	0.0721
75.00	6.7434	-5.5116	-1.402	-4.138	-10.05[0]	0.0721
80.00	6.2122	-6.5722	-1.246	-5.787	-11.09[0]	0.0721
85.00	5.5994	-7.3856	-1.072	-7.407	-12.03[0]	0.0721
90.00	4.9253	-7.9680	-0.882	-8.982	-12.88[0]	0.0721
95.00	4.2088	-8.3441	-0.685	-10.498	-13.61[0]	0.0721
100.00	3.4694	-8.4951	-0.485	-11.939	-14.24[0]	0.0721
105.00	2.7273	-8.4019	-0.284	-13.297	-14.75[0]	0.0721
110.00	2.0052	-8.0307	-0.085	-14.559	-15.14[0]	0.0721
115.00	1.3290	-7.3516	0.109	-15.716	-15.41[0]	0.0721
120.00	0.7266	-6.3564	0.294	-16.762	-15.55[0]	0.0721
125.00	0.2113	-5.4316	0.465	-17.702	-15.54[0]	0.0721
130.00	-0.2333	-4.7687	0.617	-18.557	-15.35[0]	0.0721
135.00	-0.6384	-4.5666	0.743	-19.353	-14.96[0]	0.0721
140.00	-1.0253	-4.1932	0.836	-20.117	-14.32[0]	0.0721
145.00	-1.3534	-3.2062	0.897	-20.852	-13.44[0]	0.0721
150.00	-1.5624	-1.4337	0.928	-21.562	-12.31[0]	0.0721
155.00	-1.5708	1.4795	0.925	-22.259	-10.92[0]	0.0721
160.00	-1.2575	5.8074	0.904	-22.967	-9.26[0]	0.0721
165.00	-0.7910	4.6070	0.950	-23.642	-7.43[0]	0.0721
170.00	-0.4406	3.5071	0.989	-24.129	-5.55[0]	0.0721
175.00	-0.1652	2.8764	1.013	-24.423	-3.63[0]	0.0721
180.00	0.0738	2.6656	1.021	-24.521	-1.69[0]	0.0721

IMO Wind heeling

Property	Value	Units
Length WL	287.370	metres
Profile area above WL	5694.366	sq.metres
Area to leeward (Area b)	3.57959	m-radians

Property	Value	Units
Area to windward (Area a)	0.00107	m-radians
GZc	0.072	metres
Gust angle	0.842	degrees
Rollback angle	21.373	degrees
Steady state angle	0.703	degrees
Max. angle to leeward	50.000	degrees
B/d'	3.921	
X1	0.800	
Cb	0.673	
Ar	0.000	
K	1.000	
Og	0.548	metres
r	0.759	
T	9.614	seconds

IMO 749 Intact Stability Criteria non - passenger

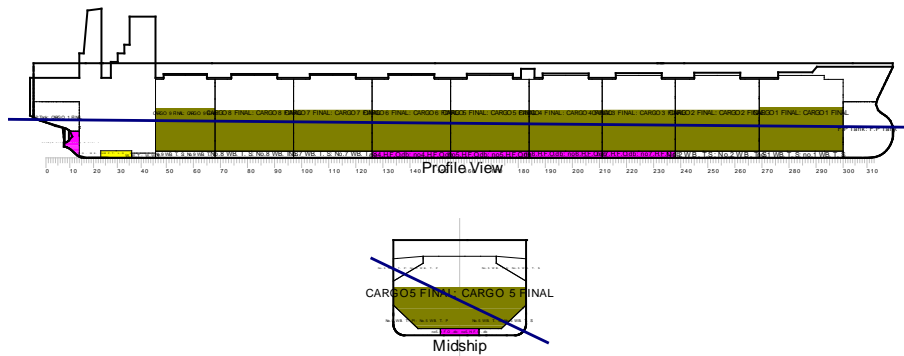
#	Criterion	Actual Value	Critical Value
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	1.400	0.055
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	1.044	0.030
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	2.444	0.090
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	Not Appl.	0.150
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	7.593	0.200
6	Max GZ to be at an angle > 30 degrees	59.157	30.000
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	0.703	16.000
8	IMO Weather Criterion (Areas)	Indeterm.	1.000

Condition complies with the regulations

Note

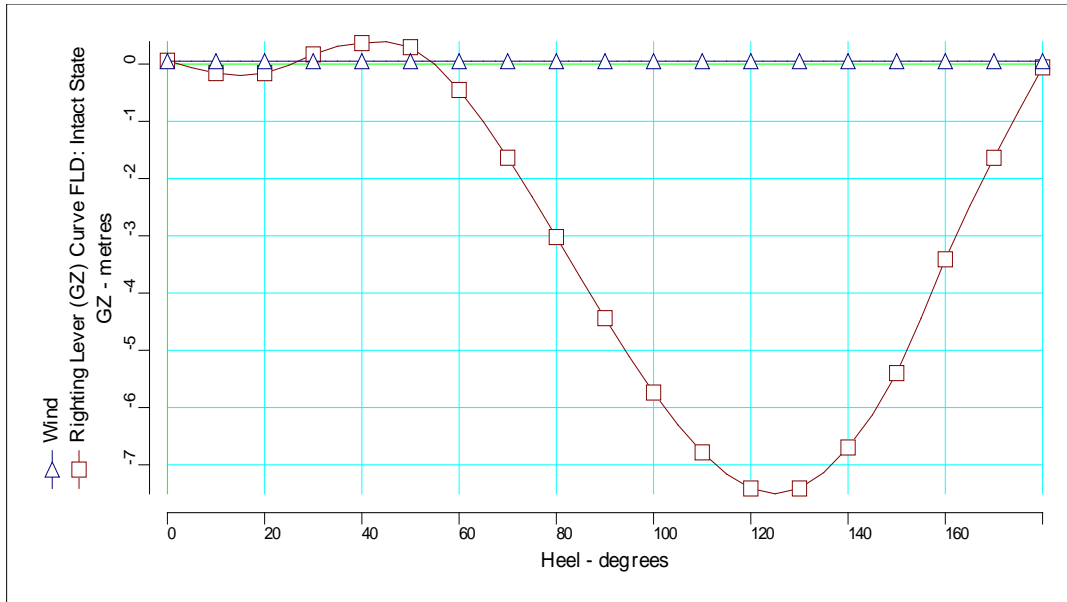
Term	Meaning
Not Appl..	The criterion cannot be applied, because some condition is not met, e.g. the criterion might only apply when the ship is upright, but in the condition, the ship has an angle of heel.
Indeterm.	The value cannot be determined, although the ship passes the test. The reason may be that the value has some very large value. Another reason may be that no profile has been defined, and thus the wind moment cannot be calculated.

Υγρός ελαιοπυρήνας τοποθετείται στο 60% του κάθε κύτους του πλοίου.



Hydrostatics at equilibrium angle

Density of water	1.0300	tonnes/cu.m
Heel to port	25.58	degrees
Trim by the stern	2.458	metres
KG	11.116	metres
FSC	10.089	metres
KGf	21.206	metres
GMt	2.105	metres
BMt	17.158	metres
BMI	532.248	metres
Waterplane area	11995.48	sq.metres
LCG	143.414	metres
LCB	143.294	metres
TCB	-6.423	metres
LCF	143.101	metres
TCF	-6.237	metres
TPC	123.553	tonnes/cm
MTC	2387.561	tonnes-m/cm
Shell thickness	0.000	mm



Righting Lever (GZ) Curve

Heel to Port (deg)	GZ (m)	Slope (m/rad)	Trim (m)	WLrad (m)	Freeboard (m)	Wind (m)
0.00	0.0579	-1.4395	-3.032	13.412	13.80[0]	0.0495
5.00	-0.0630	-1.2834	-2.999	13.344	11.81[1]	0.0495
10.00	-0.1580	-0.8266	-2.900	13.141	9.75[1]	0.0495
15.00	-0.1998	-0.0355	-2.738	12.804	7.62[1]	0.0495
20.00	-0.1592	1.1062	-2.518	12.336	5.45[1]	0.0495
25.00	-0.0211	2.0785	-2.251	11.736	3.26[1]	0.0495
30.00	0.1681	2.2297	-1.958	10.979	1.11[1]	0.0495
35.00	0.3105	1.1100	-1.662	10.023	-0.93[1]	0.0495
40.00	0.3654	0.4197	-1.364	8.839	-2.80[1]	0.0495
45.00	0.3904	0.2113	-1.080	7.444	-4.50[1]	0.0495
50.00	0.2947	-2.3426	-0.885	5.959	-6.08[1]	0.0495
55.00	-0.0040	-4.3620	-0.733	4.443	-7.60[1]	0.0495
60.00	-0.4526	-5.8014	-0.598	2.903	-9.07[1]	0.0495
65.00	-1.0070	-6.8159	-0.470	1.344	-10.46[1]	0.0495
70.00	-1.6357	-7.5232	-0.334	-0.233	-11.77[1]	0.0495
75.00	-2.3153	-7.9683	-0.178	-1.825	-12.97[1]	0.0495
80.00	-3.0225	-8.1570	-0.009	-3.419	-14.08[1]	0.0495
85.00	-3.7366	-8.1284	0.167	-4.996	-15.06[1]	0.0495
90.00	-4.4389	-7.8889	0.344	-6.543	-15.93[1]	0.0495
95.00	-5.1118	-7.4540	0.520	-8.047	-16.67[1]	0.0495

Heel to Port (deg)	GZ (m)	Slope (m/rad)	Trim (m)	WLrad (m)	Freeboard (m)	Wind (m)
100.00	-5.7383	-6.8273	0.694	-9.497	-17.27[1]	0.0495
105.00	-6.3013	-5.9994	0.865	-10.881	-17.74[1]	0.0495
110.00	-6.7826	-4.9542	1.029	-12.190	-18.07[1]	0.0495
115.00	-7.1617	-3.6475	1.187	-13.414	-18.25[1]	0.0495
120.00	-7.4136	-2.0306	1.336	-14.545	-18.29[1]	0.0495
125.00	-7.5079	-0.0260	1.475	-15.575	-18.17[1]	0.0495
130.00	-7.4139	2.1814	1.603	-16.507	-17.90[1]	0.0495
135.00	-7.1356	4.1765	1.723	-17.365	-17.44[1]	0.0495
140.00	-6.6980	5.7872	1.827	-18.184	-16.75[1]	0.0495
145.00	-6.1296	7.3375	1.906	-18.995	-15.80[1]	0.0495
150.00	-5.3985	9.5552	1.952	-19.809	-14.57[1]	0.0495
155.00	-4.4443	12.1662	1.996	-20.644	-13.07[1]	0.0495
160.00	-3.4112	11.2034	2.147	-21.472	-11.38[1]	0.0495
165.00	-2.4861	10.1186	2.278	-22.131	-9.60[1]	0.0495
170.00	-1.6372	9.4082	2.376	-22.604	-7.76[1]	0.0495
175.00	-0.8361	9.0060	2.437	-22.891	-5.87[1]	0.0495
180.00	-0.0579	8.8787	2.458	-22.986	-3.94[1]	0.0495

IMO Wind heeling

Property	Value	Units
Length WL	287.370	metres
Profile area above WL	5016.742	sq.metres
Area to leeward (Area b)	0.10203	m-radians
Area to windward (Area a)	0.07408	m-radians
GZc	0.050	metres
Gust angle	26.911	degrees
Rollback angle	17.683	degrees
Steady state angle	16.000	degrees
Max. angle to leeward	50.000	degrees
B/d'	3.325	

Property	Value	Units
X1	0.835	
Cb	0.728	
Ar	0.000	
K	1.000	
Og	7.793	metres
r	1.079	
T	20.000	seconds

IMO 749 Intact Stability Criteria non - passenger

#	Criterion	Actual Value	Critical Value	
1	Area under GZ curve up to 30 degrees > 0.055	0.006	0.055	F
2	Area under GZ curve from 30 to 40 deg. or downflood > 0.03	0.052	0.030	
3	Area under GZ curve up to 40 deg. or downflood > 0.09	0.058	0.090	F
4	Initial GM to be at least 0.15 metres	Not Appl..	0.150	F
5	GZ to be at least 0.20m at an angle > 30 degrees	0.391	0.200	
6	Max GZ to be at an angle > 30 degrees	45.387	30.000	
7	IMO Weather Criterion (Maximum Initial Angle Of Heel)	16.000	16.000	F
8	IMO Weather Criterion (Areas)	1.377	1.000	

**** Condition does not comply ****

Note

Term	Meaning
F	The criterion is not satisfied.
Not Appl..	The criterion cannot be applied, because some condition is not met, e.g. the criterion might only apply when the ship is upright, but in the condition, the ship has an angle of heel.

