



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

“ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ”

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη και Προσομοίωση Δυναμικής Συμπεριφοράς  
Κοκκωδών Υλικών σε Περιβάλλον Υγρασίας



Όνοματεπώνυμο Σπουδαστή : ΧΡΗΣΤΟΣ ΛΑΜΠΡΟΥ

Αριθμός Μητρώου : 08112823

Επιβλέπων Καθηγητής : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΟΥ

ΑΘΗΝΑ 2015



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο "Μελέτη και Προσομοίωση Δυναμικής Συμπεριφοράς Κοκκωδών Υλικών σε Περιβάλλον Υγρασίας" εκπονείται στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από τα βάθη της καρδιάς μου τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Σπύρου για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του και να ταξιδέψω μέσα σε αυτό τον όμορφο κόσμο της ναυπηγικής. Το πιο σημαντικό όμως είναι η υπομονή και η εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου διότι λόγω των επαγγελματικών μου υποχρεώσεων, εξάντλησα κάθε πίστωση χρόνου που είχα για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Χρήστο Σπανδωνίδη, που με την υποστήριξη του τον τελευταίο χρόνο και την έμπειρη συμβουλή του, κατόρθωσα να εκπληρώσω τη συγκεκριμένη εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και να αφιερώσω την εργασία μου, σε όσους φίλους και συνεργάτες μου συμπαραστάθηκαν σε όλη τη μακρά διάρκεια του μεταπτυχιακού μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Εδώ και δεκαετίες, πολλές έρευνες έχουν εστιάσει την προσοχή τους στη μελέτη της συμπεριφοράς της κοκκώδους ύλης δηλαδή πολύ μικρά σωματίδια όπως άμμος ή γυαλί, λόγω της παρουσίας της στην καθημερινότητά μας και ιδιαίτερα στο τομέα της φυσικής, της μηχανικής και της γεωλογίας, είτε σε ξηρή μορφή είτε σε υγροποιημένο υλικό όπου το ποσοστό υγρασίας είναι μεγάλο. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που εμφανίζονται στο τομέα της ναυτιλίας είναι η ανατροπή των πλοίων λόγω μετατόπισης του φέροντος φορτίου λόγω υγροποίησης (φαινόμενο liquefaction).

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, θα επιχειρηθεί η προσομοίωση σφαιρικών σωματιδίων με διάμετρο 6 χιλιοστά εντός δισδιάστατης δεξαμενής, η οποία μπορεί να κινηθεί οριζόντια και κατακόρυφα καθώς και να ταλαντωθεί κατά τον εγκάρσιο άξονα. Η εστίαση της έρευνας θα αφορά την διαφοροποίηση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος κάτω από διαφορετικά ποσοστά υγρασίας στις κινήσεις διατοιχισμού (Roll), οριζόντιας ταλάντωσης (Sway) και γωνίας ηρεμίας (Angle of Repose). Ο αλγόριθμος που θα ακολουθήσουμε βασίζεται στην ντετερμινιστική μέθοδο molecular dynamics και έχει ήδη αναπτυχθεί στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής για την περίπτωση ξηρού φορτίου (Spandonidis & Spyrou, 2013) σε γλώσσα προγραμματισμού C++.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βασιζόμενοι στην εργασία “Tilting process with humidity: DEM modeling and comparison with experiments” (Oger et al, 2013), θα εισαχθούν στο μη γραμμικό μοντέλο περιγραφής των δυνάμεων μεταξύ των κοκκωδών σωματιδίων (Hertz-type Forces), οι κατάλληλοι όροι οι οποίοι θα εκφράζουν την επίδραση της υγρασίας στη δυναμική συμπεριφορά των σφαιρικών σωματιδίων. Με τον όρο υγρασία στα σφαιρικά σωματίδια εννοούμε την υγρασία που μπορεί κάθε άνθρωπος να αισθανθεί στην ατμόσφαιρα. Τα σωματίδια θεωρούμε ότι βρίσκονται στη κατάσταση “pendular state” δηλαδή το νερό είναι παρόν μόνο στα σημεία επαφής τους και όχι μέσα στη δεξαμενή. Το ποσοστό υγρασίας που θα μελετηθεί θα είναι από 0% έως 70% διότι για μεγαλύτερες τιμές υγρασίας αλλάζει τελείως η κατάσταση μεταξύ των σωματιδίων και συγκεκριμένα γίνεται “funicular state” δηλαδή το υγρό σε ορισμένα σωματίδια είναι σε ολόκληρη την επιφάνεια γύρω τους και σε αλλά όχι, και επομένως αλλάζουν τελείως τα δεδομένα και ξεφεύγει από τα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Αποτελέσματα θα προκύψουν και για τις περιπτώσεις υγρασίας που εξετάζουμε αλλά και για τη περίπτωση της μη παρουσίας υγρασίας στη δεξαμενή. Μέσω των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν θα κατασκευαστούν αντίστοιχα διαγράμματα και απεικονίσεις προσομοιώσεων μέσω των προγραμμάτων Matlab και Paraview και τέλος θα σχολιαστούν.

## ABSTRACT

---

For decades, many studies have focused their attention on the study of the behavior of granular material, very small particles such as sand or glass, because of its presence in our daily lives, especially in the field of physics, engineering and geology, dry or in liquefied material where in the moisture content is high. One of the major problems encountered in the maritime sector is the loss of stability after the liquefaction of the cargo and in some cases total loss of the ship.

In this thesis, it will attempt to simulate spherical particles with diameter 6 mm in a tank which can be moved horizontally and vertically and to oscillate in the transverse axis. The focus of the research will involve the diversification of the dynamic response of the system under different humidity rates in the roll movement, horizontal oscillation sway and angle of repose. The algorithm will follow based on the deterministic method of molecular dynamics and has been developed as part of a doctoral thesis in the case of dry cargo (Spandonidis & Spyrou 2013)[1] in programming language C ++.

In the context of this thesis, based on work " Tilting process with humidity: DEM modeling and comparison with experiments " (Luc Oger et al,2013), will be introduced to the nonlinear model describing the forces between grains (Hertz-type Force) appropriate conditions which will reflect the effect of humidity. The particles in the present study we assume that are in " pendular state " which means that the water is present only at their contact points and not in tank. The humidity range is from 0% to 70% because higher values change the state between spherical particles and becomes " funicular state " where the liquid at certain spherical particles are around the surface and not in many others and thus, to increase the relative humidity percentage, change completely the data and exceed the scope of this thesis. Results will occur also for the case of non-presence of relative humidity in the tank. By the results obtained will construct diagrams and illustrations simulations through Matlab and Paraview programs.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
Αντικειμενικός Σκοπός.....	8
Περίγραμμα Εργασίας.....	8
ΜΕΡΟΣ Ι : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	10
Κεφάλαιο 1 : Κοκκώδη Σωματίδια.....	10
1.1 : Τι είναι τα κοκκώδη σωματίδια.....	10
1.2 : Ο παράγοντας υγρασία στα κοκκώδη σωματίδια.....	11
1.3 : Διαφορές ξηρών και υγρών Κοκκωδών Σωματιδίων.....	12
1.4 : Καταστάσεις υγρού περιεχομένου Κοκκωδών Σωματιδίων.....	13
1.5 : Ρευστοποίηση Φορτίου.....	13
1.6 : Αρχές Ρευστοποίησης Φορτίου.....	14
Κεφάλαιο 2 : Ναυτικά Ατυχήματα και Κανονισμοί.....	18
2.1 : Ναυτικά Ατυχήματα.....	18
2.2 : Κανονισμοί και Οδηγίες.....	21
2.2.1 : Κανονισμοί SOLAS/IMSBC.....	21
2.2.2 : Οδηγίες INTERCARGO.....	22
2.2.3 : Flow Table Test.....	23
2.2.4 : Can Test.....	24
2.3 : Αναθεωρήσεις Κανονισμών και Μελλοντικές Ενέργειες.....	25
Κεφάλαιο 3 : Κριτική Ανασκόπηση.....	27
Κεφάλαιο 4 : Υφιστάμενες Μέθοδοι Προσομοίωσης και Δυνάμεις Μεταξύ Κοκκωδών Σωματιδίων.....	35
4.1 : Εισαγωγή.....	35
4.2 : Υφιστάμενα Μοντέλα Προσομοίωσης.....	35
4.3 : Μοντέλα Προσομοίωσης Μοριακής Δυναμικής (MD).....	36
4.4 : Αξονικές και Εγκάρσιες Δυνάμεις Μεταξύ Κοκκωδών Σωματιδίων.....	37
4.4.1 : Εισαγωγή.....	37
4.4.2 : Αξονικές Δυνάμεις μεταξύ Κοκκωδών Σωματιδίων.....	39
4.4.3 : Εγκάρσιες Δυνάμεις μεταξύ Κοκκωδών Σωματιδίων.....	43
4.5 : Θεωρητικό Υπόβαθρο Κώδικα Προσομοίωσης Ξηρών Κοκκωδών Σωματιδίων.....	44
4.6 : Θεωρητικό Υπόβαθρο Κώδικα Προσομοίωσης Υγρών Κοκκωδών Σωματιδίων.....	46
ΜΕΡΟΣ ΙΙ: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΟΚΚΩΔΩΝ	
ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	54
Κεφάλαιο 5 : Περιγραφή Κώδικα Προσομοίωσης.....	54
5.1 : Εισαγωγή.....	54
5.2 : Κατασκευή Δεξαμενής Προσομοίωσης Κοκκωδών Σωματιδίων.....	54

5.3 :	Κλίμακα Πραγματικού Πλοίου-Δεξαμενής .....	56
5.4 :	Περιγραφή Διαδικασίας Προσομοίωσης.....	57
	Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Γωνίας Ηρεμίας.....	58
6.1:	Γωνία ηρεμίας (Angle of Repose).....	58
6.1.1 :	Εισαγωγή .....	58
6.1.2 :	Αποτελέσματα Γωνίας Ηρεμίας.....	60
	Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Γωνίας Ηρεμίας.....	68
7.1:	Διατοιχισμός (Roll).....	68
7.1.1 :	Εισαγωγή .....	68
7.1.2 :	Σημείο Περιστροφής (0.15,0).....	70
7.1.2.1 :	Γωνία Διατοιχισμού 10 <sup>0</sup> μοίρες.....	70
7.1.2.2 :	Γωνία Διατοιχισμού 20 <sup>0</sup> μοίρες.....	73
7.1.2.3 :	Γωνία Διατοιχισμού 30 <sup>0</sup> μοίρες.....	82
7.1.2.4 :	Γωνία Διατοιχισμού 40 <sup>0</sup> μοίρες.....	86
7.1.3 :	Σημείο Περιστροφής (0.15,0.11).....	89
7.1.3.1 :	Γωνία Διατοιχισμού 10 <sup>0</sup> μοίρες.....	89
7.1.3.2 :	Γωνία Διατοιχισμού 20 <sup>0</sup> μοίρες.....	90
7.1.2.3 :	Γωνία Διατοιχισμού 30 <sup>0</sup> μοίρες.....	95
7.1.2.4 :	Γωνία Διατοιχισμού 40 <sup>0</sup> μοίρες.....	97
7.1.4:	Συγκριτικά Αποτελέσματα .....	99
7.2 :	Εγκάρσια Οριζόντια Ταλάντωση (Sway).....	101
7.2.1 :	Εισαγωγή .....	101
7.2.2 :	Πλάτος Εγκάρσιας Οριζόντιας Ταλάντωσης 0.06 μέτρα .....	102
7.2.3 :	Πλάτος Εγκάρσιας Οριζόντιας Ταλάντωσης 0.10 μέτρα .....	108
7.2.4 :	Συγκριτικά Αποτελέσματα .....	110
	Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα.....	112
8.1 :	Γενικά Συμπεράσματα.....	112
8.2 :	Μελλοντική Μελέτη.....	116
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	117

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### Αντικειμενικός Σκοπός

---

Αντικειμενικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των κοκκωδών υλικών υπό την επίδραση υγρασίας. Τα τελευταία χρόνια, έχει αναφερθεί ένα μεγάλος αριθμός πλοίων χύδην φορτιού, τα οποία λόγω του φαινομένου της ρευστοποίησης ανατρέπονται, με αποτέλεσμα να χάνονται άδικα ανθρώπινες ζωές. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται τόσο στη μεταφορά του φορτιού, το οποίο μπορεί να είναι ευάλωτο στη ρευστοποίηση αλλά επίσης και κατά τη διάρκεια της φόρτωσης στο λιμάνι όπου το φορτίο είναι εκτεθειμένο στο περιβάλλον. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και διεύρυνση της επίδρασης της υγρασίας σε κοκκώδη σφαιρικά σωματίδια και κατ' επέκταση στο φορτίο του πλοίου και η εύρεση κρίσιμων τιμών διαφόρων παραμέτρων όπως το πλάτος, η συχνότητα, η υγρασία κ.α, που μπορεί να οδηγήσουν σε περεταίρω μετατόπιση του κέντρου βάρους και να προκληθούν σοβαρά προβλήματα ευστάθειας σε ένα πλοίο.

### Περίγραμμα Εργασίας

---

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από δύο μέρη και συνολικά 8 κεφάλαια. Στο πρώτο θεωρητικό μέρος της εργασίας και στο κεφάλαιο 1, γίνεται αναφορά στα κοκκώδη σωματίδια, στο πως επηρεάζονται από το παράγοντα υγρασία, τις διαφορές ξηρών και υγρών κοκκωδών σωματιδίων, τις καταστάσεις υγρού περιεχομένου μεταξύ κοκκωδών σωματιδίων καθώς και την έννοια και τις αρχές του φαινομένου της ρευστοποίησης. Το κεφάλαιο 2 αναφέρεται σε ναυτικά ατυχήματα που έχουν συμβεί κατά καιρούς λόγω του φαινομένου της ρευστοποίησης φορτιού και στους κανονισμούς, τις οδηγίες και τις μετρήσεις που ισχύουν για την ασφαλή φόρτωση των φορτίων που είναι επιρρεπή στο συγκεκριμένο φαινόμενο. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται μια λεπτομερής κριτική ανασκόπηση του φαινομένου που μελετάμε καθώς και σχετικά πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί. Στο κεφάλαιο 4, αναπτύσσονται τα μοντέλα προσομοίωσης μοριακής δυναμικής (MD) που υπάρχουν, ενώ γίνεται αναφορά στις θεωρίες που διέπουν τους υπολογισμούς των αξονικών και εγκάρσιων δυνάμεων μεταξύ κοκκωδών σωματιδίων καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο που στηρίχθηκε ο κώδικας μας. Το κεφάλαιο 5, περιλαμβάνει λεπτομερή αναφορά όσον αφορά τη κατασκευή του κώδικα και τις διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφορά. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, στο κεφάλαιο 6 αναλύεται η γωνία ηρεμίας,



ενώ στο κεφάλαιο 7 η κίνηση του διατοιχισμού και η εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση αντίστοιχα. Ολοκληρώνοντας τη μελέτη μας, στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

# ΜΕΡΟΣ Ι : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

---

## Κεφάλαιο 1

### Κοκκώδη Σωματίδια

#### 1.1 Τι είναι τα κοκκώδη σωματίδια

---

Τα κοκκώδη υλικά είναι συλλογές μακροσκοπικών σωματιδίων όπως η άμμος και οι χάντρες γυαλιού, οι οποίες είναι ορατές με γυμνό μάτι (Mitarai & Noris, 2006). Η συνεχής ενεργειακή εισαγωγή από εξωτερικές δυνάμεις όπως π.χ. η βαρύτητα και οι δονήσεις, είναι απαραίτητες προκειμένου να διατηρείτε η κίνηση τους. Τα σωματίδια μπορούν να μείνουν είτε σε στάση όπως ένα στερεό, είτε να ρέυσουν όπως ένα υγρό ή να συμπεριφερθούν όπως ένα αέριο, ανάλογα με το ποσοστό ενεργειακής εισαγωγής.

Η επιστημονική μελέτη των κοκκωδών σωματιδίων (Εικόνα 1) έχει μια μακροχρόνια ιστορία, κυρίως στον τομέα της εφαρμοσμένης μηχανικής και πολλοί φυσικοί έχουν εισχωρήσει στην κοκκώδη ερευνητική κοινότητα κατά τη διάρκεια των προηγούμενων λίγων δεκαετιών. Οι περισσότερες μελέτες για τα κοκκώδη μέσα, ειδικά στον τομέα φυσικής, έχουν εστιάσει στα ξηρά κοκκώδη υλικά, όπου τα αποτελέσματα των διάμεσων ρευστών είναι αμελητέα για τη δυναμική των μορίων. Για τα ξηρά κοκκώδη σωματίδια, οι κυρίαρχες αλληλεπιδράσεις είναι μη ελαστικές συγκρούσεις και τριβή, η οποία είναι μικρής εμβέλειας και μη συνεκτική. Ακόμη και σε αυτή την ιδεατή κατάσταση, τα ξηρά κοκκώδη σωματίδια εμφανίζουν μοναδική και εντυπωσιακή συμπεριφορά, γεγονός που έχει προσελκύσει την προσοχή πολλών επιστημόνων για αιώνες.



Εικόνα 1: Κοκκώδη Σωματίδια (Mitarai & Noris, 2006)

## 1.2 Ο παράγοντας υγρασία στα κοκκώδη σωματίδια

---

Στον πραγματικό κόσμο, βλέπουμε συχνά κοκκώδη σωματίδια σε υγρή μορφή, όπως π.χ. η βρεγμένη άμμος σε μια παραλία. Ξηρά και υγρά κοκκώδη σωματίδια έχουν πολλά κοινά μεταξύ τους, αλλά υπάρχει μια μεγάλη διαφορά: τα υγρά κοκκώδη σωματίδια είναι συνεκτικά λόγω παρουσίας επιφανειακής τάσης (Mitarai & Noris, 2006).

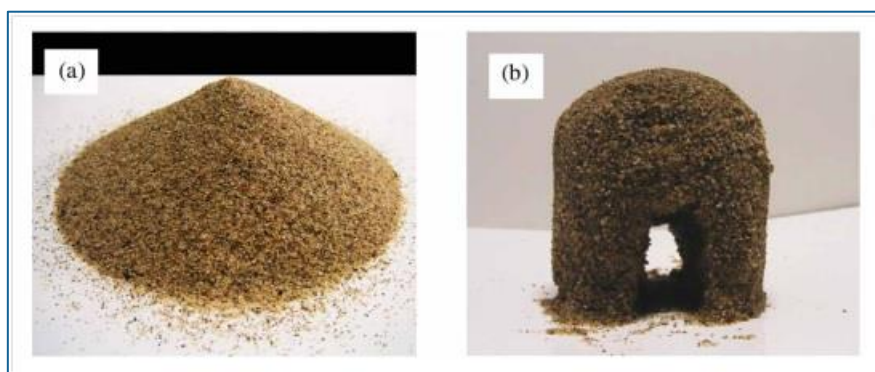
Στο παρελθόν, πολλές ερευνητικές ομάδες που έχουν μελετήσει τα κοκκώδη σωματίδια, προσπάθησαν πολύ να ελαχιστοποιήσουν το παράγοντα υγρασία και να αποφευχθούν οι μεταξύ τους δυνάμεις που αναπτύσσονται. Πράγματι, ορισμένα πειράματα διεξήχθησαν σε θαλάμους κενού. Η υγρασία και τα υγρά σε γενικές γραμμές είχαν θεωρηθεί ως μια ενόχληση που πρέπει να αποφευχθεί με κάθε κόστος.

Ωστόσο, πολλές σημαντικές πραγματικές εφαρμογές στη ζωή περιλαμβάνουν μηχανικές ιδιότητες των υγρών κοκκωδών σωματιδίων. Παραδείγματα είναι οι κατολισθήσεις λόγω βροχής, τα φαρμακευτικά προϊόντα, η μεταποίηση τροφίμων, η εξόρυξη και οι βιομηχανίες κατασκευών. Έτσι, είναι σημαντικό να μελετηθεί η μηχανική απόκριση των κοκκωδών υλικών με διαφορετικό ποσοστό υγρασίας ή υγρό περιεχόμενο.

Μελέτες των υγρών κοκκωδών σωματιδίων έχουν γίνει σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Οι μηχανικές ιδιότητες των υγρών κοκκωδών σωματιδίων είναι επίσης εξαιρετικά σημαντικές στη γεωλογία και στο τομέα των κατασκευών. Για παράδειγμα, ως εξετάσουμε ένα τεράστιο και ακριβό έργο, τη κατασκευή του Διεθνούς Αεροδρομίου Kansai, πάνω σε ένα τεχνητό νησί κοντά στην Οσάκα. Το βάρος των 180 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων από χώρους υγειονομικής ταφής και εγκαταστάσεις, συμπίεσε το βυθό της θάλασσας, που αποτελείται από πηλό και οδήγησε αναπόφευκτα το αεροδρόμιο σε βύθιση. Το αεροδρόμιο είχε βυθιστεί κατά 11,7 μέτρα κατά μέσο όρο, στο τέλος του 2000 και ο οικισμός εξακολουθεί να παρακολουθείται προσεκτικά. Αυτό μαζί με άλλα παραδείγματα από το τομέα της γεωλογία και των κατασκευών, τονίζουν την ανάγκη να κατανοήσουμε καλύτερα τις μηχανικές ιδιότητες των υγρών κοκκωδών σωματιδίων.

Η μεγαλύτερη επίδραση που προκαλεί το υγρό σε κοκκώδη σωματίδια είναι η συνοχή μεταξύ των κόκκων. Ακόμη και η υγρασία του αέρα μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία μικρής υγρής γέφυρας στο σημείο επαφής, μέσω της οποίας δημιουργείται η συνοχή. Η συνοχή εμφανίζεται σε υγρό κοκκώδη υλικό, εκτός εάν το σύστημα γίνεται *overwet*, δηλαδή το κοκκώδες σωματίδιο είναι εντελώς βυθίζεται σε ένα υγρό.

Η απλούστερη περίπτωση όπου βλέπουμε την επίδραση της συνοχής σε υγρά κοκκώδη σωματίδια είναι τα κάστρα που φτιάχνουν παιδιά στην άμμο. Στη συνέχεια φαίνεται το τι μπορεί να φτιαχτεί από άμμο απλά με τη προσθήκη κάποια ποσότητας νερού (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: (a) Ξηρή Άμμος (b) Κατασκευή Κάστρου με προσθήκη νερού σε ξηρή άμμο (Mitarai & Noris, 2006)

### 1.3 Διαφορές Ξηρών και Υγρών Κοκκωδών Σωματιδίων

Τα ξηρά κοκκώδη σωματίδια σε σχέση με τα υγρά παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά τα μεγέθη που μελετήθηκαν από τους επιστήμονες όπως η γωνία ηρεμίας (angle of repose). Οι διαφορές αυτές παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα 3 (Mitarai & Noris, 2006).

PROPERTY	DRY	WET
Cohesion	Negligible	Important
Surface angle	Finite Around 35° for sand	Finite: Larger than the dry case Can be as large as 90°, or even larger
Tensile strength	Negligible	Finite
Yield shear stress	Finite Zero at zero normal stress	Finite: Can be larger than the dry case Non-zero at zero normal stress
Hysteresis	Yes	Yes: Enhanced
Configurational phase space for packing	Finite	Finite: Can be larger than the dry case

Εικόνα 3 : Φυσικές Ιδιότητες Ξηρών και Υγρών Κοκκωδών Σωματιδίων (Mitarai & Noris, 2006)

## 1.4 Καταστάσεις Υγρού Περιεχομένου Κοκκωδών Σωματιδίων

Είναι γνωστό ότι η συνοχή μεταξύ υγρών κοκκωδών σωματιδίων εξαρτάται από τη ποσότητα του υγρού στο σύστημα. Οι ακόλουθες τέσσερις καταστάσεις υγρού περιεχομένου (Εικόνα 4) έχουν διακριθεί για τα υγρά κοκκώδη σωματίδια (Mitarai & Noris, 2006):

**-Pendular κατάσταση:**

Τα σωματίδια συγκρατούνται μεταξύ τους με γέφυρες υγρού στο σημείο επαφής τους.

**-Funicular κατάσταση:**

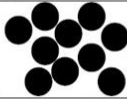
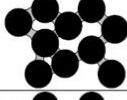
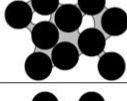
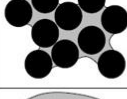

Ορισμένοι πόροι είναι πλήρως κορεσμένοι με υγρό, αλλά ακόμα παραμένουν κενά που γεμίζουν με αέρα.

**- Capillary κατάσταση:**

Όλα τα κενά μεταξύ των σωματιδίων γεμίζουν με υγρό, αλλά η επιφάνεια εξωτερικά είναι γεμάτη με αέρα.

**- Slurry κατάσταση:**

Όλα τα σωματίδια είναι πλήρως βυθισμένα σε υγρό.

Liquid content	State	Schematic diagram	Physical description
No	Dry		Cohesion between grains is negligible.
Small	Pendular		Liquid bridges are formed at the contact points of grains. Cohesive forces act through the liquid bridges.
Middle	Funicular		Liquid bridges around the contact points and liquid-filled pores coexist. Both give rise to cohesion between particles.
Almost saturated	Capillary		Almost all the pores are filled with the liquid, but the liquid surface forms menisci and the liquid pressure is lower than the air pressure. This suction results in a cohesive interaction between particles.
More	Slurry		The liquid pressure is equal to, or higher than, the air pressure. No cohesive interaction appears between particles.

Εικόνα 4 : Καταστάσεις υγρού περιεχομένου μεταξύ κοκκωδών σωματιδίων (Mitarai & Noris, 2006)

## 1.5 Ρευστοποίηση Φορτίου

Το φαινόμενο της ρευστοποίησης φορτίου (Cargo Liquefaction) υπήρξε σημαντική αιτία για την απώλεια ενός μεγάλου αριθμού ανθρώπινων ζωών στη θάλασσα για πολλές δεκαετίες,

Οποιοδήποτε φορτίο μεταφέρεται σε κοκκώδη μορφή και περιέχει κάποιο ποσοστό υγρασίας, μπορεί να ρευστοποιηθεί, με αποτέλεσμα τη μετατόπιση του και την απώλεια ευστάθειας του πλοίου. Όταν συμβεί το φαινόμενο αυτό, οι συνέπειες είναι άμεσες, δηλαδή το πλοίο χάνει την ευστάθειά του και ανατρέπεται μέσα σε λίγα μόλις λεπτά, χωρίς να έχει τη δυνατότητα ο καπετάνιος να αντιδράσει. Η απώλεια της ευστάθειας των πλοίων τα οποία έχουν βυθιστεί τα τελευταία χρόνια, οφείλεται στη μεταφορά κατά κύριο λόγο μη επεξεργασμένων φυσικών μεταλλευμάτων, σιδηρομεταλλεύματα από Ινδία και μέταλλευμα νικελίου από την Ινδονησία, Φιλιππίνες και Νέα Καληδονία.

Οι κύριες αιτίες των ατυχημάτων είναι η κακή συμμόρφωση των ναυλωτών με τον έλεγχο και τις απαιτήσεις πιστοποίησης που έχουν σχεδιαστεί ούτως ώστε να αποφεύγεται η φόρτωση του φορτίου εάν η περιεκτικότητα του σε υγρασία δεν είναι χαμηλότερη μία συγκεκριμένη τιμή καθώς και η αποθήκευσή του φορτίου στις χώρες προέλευσης, 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.

## 1.6 Αρχές Ρευστοποίησης Φορτίου

---

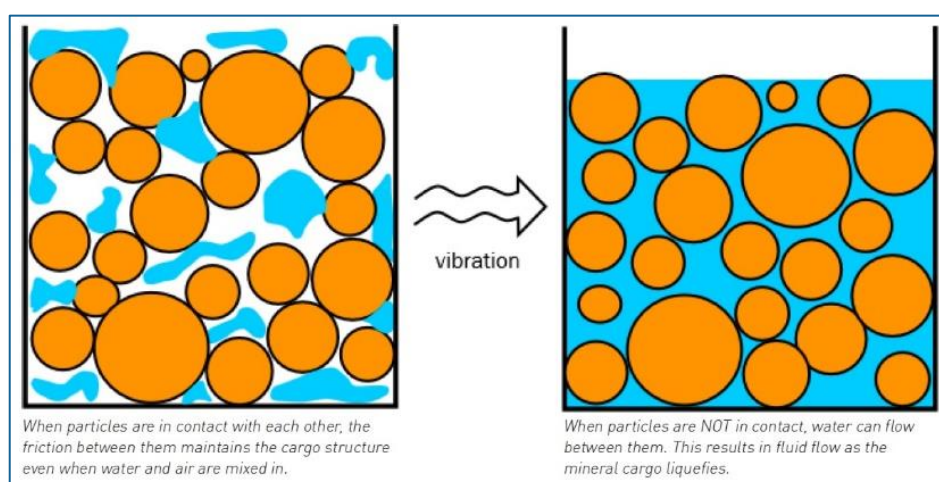
Τα χύδην φορτία τα οποία μεταφέρονται μέσω των πλοίων, έχουν χωριστεί σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι οι ακόλουθες (Skuld Pocket Guide – Bulk Mineral Cargo Liquefaction, 2013):

- Κατηγορία Α (Group A)  
Ανήκουν τα φορτία που μπορεί να ρευστοποιηθούν εάν μεταφερθούν με περιεκτικότητα υγρασίας πάνω από το μεταφερόμενο ανώτατο όριο.
- Κατηγορία Β (Group B)  
Ανήκουν τα φορτία που κατέχουν ένα χημικό κίνδυνο και θα μπορούσαν να προκαλέσουν μια επικίνδυνη κατάσταση για το πλοίο.
- Κατηγορία C (Group C)  
Ανήκουν τα φορτία που δεν είναι ούτε πιθανό να υγροποιηθούν (Κατηγορία Α), ούτε διαθέτουν χημικούς κινδύνους (Κατηγορία Β).

Τα φορτία που διατρέχουν τον κίνδυνο της υγροποίησης (όπως συνηθίζεται να λέγεται το φαινόμενο της ρευστοποίησης στους ναυτικούς κύκλους) είναι εκείνα τα οποία περιέχουν τουλάχιστον κάποια κοκκώδη σωματίδια και κάποιο ποσοστό υγρασίας, αν και δεν χρειάζεται να είναι ορατά με γυμνό μάτι. Τα πιο ευρέως γνωστά φορτία που αποτελούν κίνδυνο είναι τα μεταλλικά συμπυκνώματα όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως. Παρόλα αυτά και άλλα φορτία μπορούν εύκολα να υγροποιηθούν, όπως ο φθορίτης, ορισμένες ποιότητες του άνθρακα, του πυριτίου, σκουριά, λεπτόκοκκου / pellet, κ.λπ.

Παρόλο που συχνά το φορτίο φαίνεται στεγνό κατά τη στιγμή της φόρτωσης, τα φορτία αυτά περιέχουν υγρασία μεταξύ των σωματιδίων. Κατά τη στιγμή της φόρτωσης, τα φορτία είναι συνήθως σε στερεά κατάσταση, όπου τα σωματίδια βρίσκονται σε άμεση επαφή το ένα με το άλλο. Κατά τη διάρκεια της θαλάσσιας μεταφοράς, τα φορτία εκτίθενται σε διέγερση λόγω δόνησης της μηχανής, κινήσεις του πλοίου και θαλάσσιου κύματος, με αποτέλεσμα το φορτίο να συμπιέζεται. Αυτό οδηγεί σε μια μείωση του της απόστασης μεταξύ των κοκκωδών σωματιδίων. Αν η συμπίεση των σωματιδίων είναι τέτοια ώστε να υπάρχει περισσότερο νερό μέσα στο φορτίο από ότι αν υπήρχαν κενά μεταξύ των σωματιδίων, η πίεση του νερού στο εσωτερικό του φορτίου μπορεί να αυξηθεί απότομα και τα σωματίδια τείνουν να χωριστούν. Αυτό μειώνει ξαφνικά τη τριβή μεταξύ των σωματιδίων και επομένως τη διατμητική αντοχή του φορτίου.

Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η μετάβαση από την στερεά κατάσταση σε μια κατάσταση παχύρρευστου ρευστού (Εικόνα 5,6,7,8), στην οποία το σύνολο ή μέρος του φορτίου μπορεί να σχηματίσει μια επιφάνεια υγρού.



Εικόνα 5 : Το φαινόμενο της Ρευστοποίησης (Skuld Pocket Guide – Bulk Mineral Cargo Liquefaction,2013)





Εικόνα 6:(α) Ξηρό Μετάλλευμά του Νικελίου (β) Ρευστοποιημένο Μετάλλευμα του Νικελίου (Spencer & Tilsey,2011).



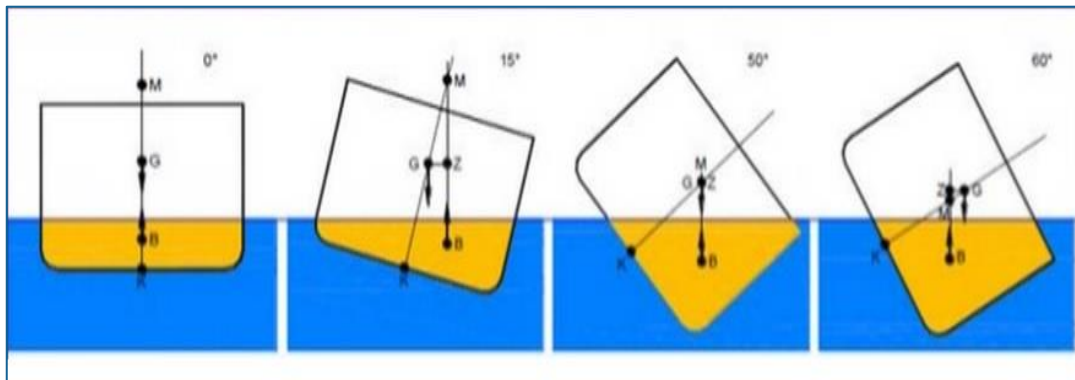
Εικόνα 7: Ρευστοποιημένο Μετάλλευμα του Νικελίου (Spencer & Tilsey,2011).



Εικόνα 8: Ρευστοποιημένο Μετάλλευμα του Νικελίου (Spencer & Tilsey,2011).

Σε αυτή την κατάσταση, το φορτίο υπόκειται σε μια προοδευτική μετατόπιση προς μια κατεύθυνση λόγω διατοιχισμού του πλοίου, μείωση του μετακεντρικού του ύψους (GM) και δεν θα επιστρέψει στο κέντρο. Με περαιτέρω διατοιχισμό το πλοίο αποκτά σταδιακά μεγαλύτερο βάρος του φορτίου προς τη μία πλευρά και αναπτύσσει κλίση (Koromila, 2013). Αυτή η επικίνδυνη κατάσταση οδηγεί σε περαιτέρω απώλεια της ευστάθειας και ενδεχομένως ανατροπή (Εικόνα 9,10).





Εικόνα 9: Ανάπτυξη εγκάρσιας κλίσης πλοίου μετά από ρευστοποίηση φορτίου (Koromila, 2013).

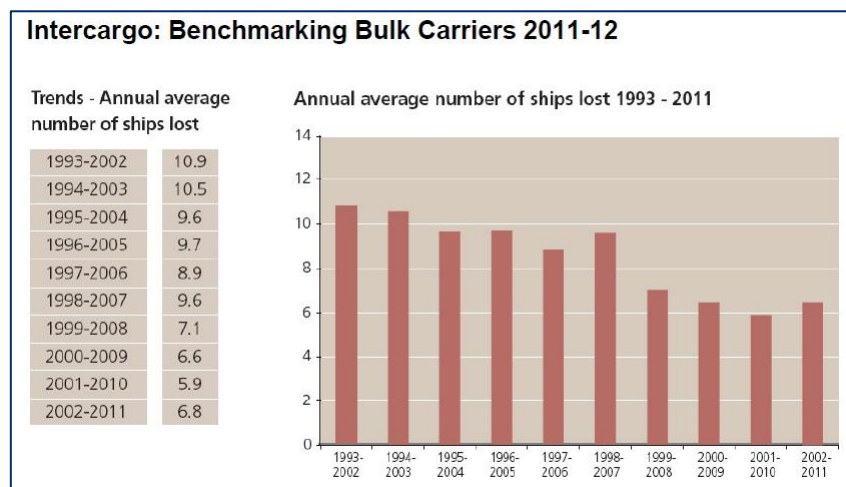


Εικόνα 10: Ανατροπή Πλοίου λόγω Ρευστοποίησης Φορτίου (Lomas R.,2012)

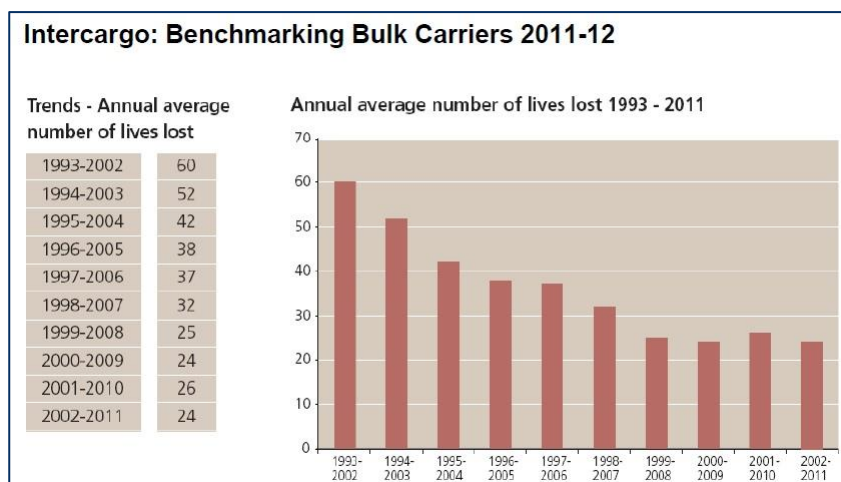
Η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία κατά την οποία η υγροποίηση μπορεί να συμβεί ονομάζεται Flow Moisture Point (κοινώς συντομογραφία FMP). Η αριθμητική τιμή του μπορεί να ποικίλει ευρέως ακόμη και για φορτία με τα ίδια χαρακτηριστικά. Δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί η FMP ενός δεδομένου φορτίου από τη περιγραφή, τη κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων ή τη χημική σύνθεση και ο FMP ως εκ τούτου, θα πρέπει να καθορίζεται από εργαστηριακές δοκιμές, χωριστά για κάθε φορτίο από κάθε αποστολέα.

Σε οποιαδήποτε φόρτωση με περιεκτικότητα σε υγρασία άνω του FMP, η υγροποίηση μπορεί να συμβεί απρόβλεπτα σε οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Μερικά φορτία είναι υγροποιημένα και προκαλούν καταστροφική μετατόπιση φορτίου σχεδόν αμέσως μετά την αναχώρηση από το λιμένα φόρτωσης, ενώ μερικά μετά από αρκετές εβδομάδες ομαλής πορείας του πλοίου. Ενώ ο κίνδυνος υγροποίησης είναι μεγαλύτερος κατά τη διάρκεια κακοκαιρίας, στην ανοικτή θάλασσα, και υπό πλήρη ισχύ, δεν υπάρχουν ασφαλείς συνθήκες πλεύσης για ένα φορτίο με ανασφαλή περιεκτικότητα σε υγρασία. Η υγροποίηση μπορεί να συμβεί απρόβλεπτα ακόμα και σε σχετικά ήρεμες συνθήκες σε ένα σκάφος σε αγκυροβόλιο ή σε χαμηλή ταχύτητα (Koromila, 2013).

Τα τελευταία είκοσι χρόνια, η ιστορία έχει καταγράψει περισσότερα από 70 ναυτικά ατυχήματα και περισσότερες από 300 χαμένες ανθρώπινες ζωές λόγω απώλειας ευστάθειας και κατά συνέπεια ανατροπής σε πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην. Πολλά από αυτά τα ατυχήματα οφείλονται στο φαινόμενο της ρευστοποίησης φορτίου που οδηγεί στην απώλεια ευστάθειας. Το μεγαλύτερο ποσοστό των ναυτικών ατυχημάτων παρατηρείται σε χώρες όπως οι Ινδίες, η Ινδονησία, οι Φιλιππίνες και η Νέα Καληδονία λόγω του ότι μεταφέρουν μεταλλεύματα του νικελίου και σιδηρομεταλλεύματα χωρίς οι φορτωτές να εφαρμόζουν τις απαραίτητες οδηγίες-κανονισμούς και χωρίς τα απαραίτητα πιστοποιητικά που να εξασφαλίζουν τη σωστή μεταφορά του φορτίου. Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζονται οι ετήσιοι μέση όροι απωλειών φορτηγών πλοίων (Εικόνα 11) και ανθρώπινων ζωών (Εικόνα 12) σύμφωνα με την Intercargo κατά τη περίοδο 1993-2011(Harison,2012).



Εικόνα 11 : Ετήσιοι Μέση Όροι Απωλειών Φορτηγών Πλοίων κατά τη περίοδο 1993-2011(Harison ,2012).



Εικόνα 12 : Ετήσιοι Μέση Όροι Απολειών Ανθρώπινων ζωών κατά τη περίοδο 1993-2011(Harison ,2012).

Μερικά από τα πιο σοβαρά ναυτικά ατυχήματα που συνέβησαν στη ναυτική ιστορία παρουσιάζονται στο ακόλουθο αναλυτικό Πίνακα 1.

Vessel	Vessel Details	Date	Loss of Life	Voyage
Mega Taurus	1988	16/12/1988	20	Hinatuan Mine(Philippines-Japan)
Oriental Angel	1990	9/6/1990	0	New Caledonia(Capsized at anchorage)
Jag Raghul	2005	7/12/2005	0	Indonesia-Ukraine
Assian Forest	2007	17/7/2009	0	Sank in the Arabian Sea & Miles Southwest of Mangalore,India
Jian Fu Star	1983	27/10/2010	12	Sank in the South China Sea 90 Miles Southwest of Cape Eluanbi,Taiwan
Nasco Diamond	2009	10/11/2010	20	Developed list to port took water and sank in the Pacific Ocean
Hong Wei	2001	3/12/2010	10	Capsized and sank in the South China Sea
Vinalines Queen	2005	25/12/2011	22	Developed 18 degree list and eventually sank in the Philippine Sea

Πίνακας 1 : Σημαντικότερα Ναυτικά Ατυχήματα Στη Θαλάσσια Ιστορία

Το 1988 το φορτηγό πλοίο “Mega Tarus” το οποίο είχε αναχωρήσει από τις Φιλιππίνες ανετράπη καθώς μετέφερε μέταλλευμα νικελίου με αποτέλεσμα να χαθούν στη θάλασσα 20 ανθρώπινες ζωές (Koromila,2013). Κάποια άλλα πλοία στάθηκαν πιο τυχερά όπως το

“Oriental Angel” το οποίο το 1990 ανέπτυξε μεγάλη εγκάρσια κλίση κατά τη φόρτωση μεταλλεύματος νικελίου στο λιμάνι της New Caledonia και το πλοίο “Padang Hawk” το 1990 ενώ είχε αναχωρήσει από το ίδιο λιμάνι φορτωμένο με μέταλλευμα νικελίου κατά τη διάρκεια του ταξιδιού ανέπτυξε εγκάρσια κλίση 15° Port Side, αλλά κατάφερε να φτάσει στο τελικό προορισμό του. Το 2005 το πλοίο “Jag Radhul” το οποίο ταξίδευε από την Ινδονησία με προορισμό την Ουκρανία ανετράπη λόγω του ίδιου φαινομένου με τα προηγούμενα χωρίς να θρηνήσουμε ευτυχώς ανθρώπινες ζωές.

Ένα από τα πιο πρόσφατα ατυχήματα που οφείλονται στο φαινόμενο της ρευστοποίησης φορτίου είναι η ανατροπή του πλοίου “Hui Long” το οποίο ταξίδευε από την Ινδονησία προς την Ινδία, φορτωμένο με 11.245 τόνους διαφόρων ειδών φορτίου, εκ των οποίων οι 5.185 τόνοι ήταν ορυκτός φθορίτης/ αργυραδάμαντας. Στις 18 Μαΐου του 2005 και ενώ το πλοίο βρισκόταν 173 ναυτικά μίλια από τη Sri Lanka, παρουσίασε κλίση 40° Port Side και βυθίστηκε στις 20 Μαΐου του 2005, χωρίς να υπάρξουν ανθρώπινες απώλειες.

Για να ληφθεί σοβαρά η επικινδυνότητα του φαινομένου της ρευστοποίησης φορτίου έπρεπε μέσα σε δύο χρόνια 2009-2010 να χαθούν πάνω από 30 πλοία και ανθρώπινες ζωές. Συγκεκριμένα το 2009 το πλοίο “Black Rose” και το “Asian Forest” (Εικόνα 13) που μετέφεραν σιδηρομέταλλευμα από την Ινδία ανατράπηκαν με αποτέλεσμα να θρηνήσουμε 1 ανθρώπινη ζωή.



Εικόνα 13 : “Black Rose” Ιούλιος 2009 και “Asian Forest” Σεπτέμβριος 2009 (Harison ,2012).

Το 2010 έλαβαν χώρα τέσσερις ανατροπές πλοίων. 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 όπου τα 13 από τα 25 μέλη του πληρώματος χάθηκαν. Το “Nasco Diamond”, που μετέφερε 55.150 τόνους μέταλλευμα 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.

Στις 3 Μαρτίου του 2012, το πλοίο “Άγιος Γεράσιμος” βυθίστηκε κατά τη διάρκεια της εκφόρτωσης στο λιμάνι Πλατυγάλι 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.

Για τους παραπάνω λόγους η SOLAS και ο IMSBC Code ενσωματώνουν διατάξεις που αποσκοπούν να εξασφαλίσουν ότι μόνο φορτία με επαρκώς χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία πρέπει να φορτώνονται για να αποφευχθεί η υγροποίηση. Η αυστηρή συμμόρφωση σε αυτές τις διατάξεις είναι ο μόνος ασφαλής τρόπος μεταφοράς αυτών των ειδών τα φορτία.

## 2.2 Κανονισμοί και Οδηγίες

### 2.2.1 Κανονισμοί SOLAS/IMSBC

---

Οι κανονισμοί του SOLAS απαιτούν οι φορτωτές χύδην φορτίων να παρέχουν στο καπετάνιο τα απαραίτητα έγγραφα εκ των προτέρων με όλες τις πληροφορίες για τις εκάστοτε ιδιότητες του φορτίου, συμπεριλαμβανομένων τη πιθανότητα μετατόπισης και για τα συμπυκνώματα ή άλλα φορτία που μπορεί να υγροποιηθούν, πρόσθετες πληροφορίες με τη μορφή ενός πιστοποιητικού για τη περιεκτικότητα σε υγρασία του φορτίου και το μεταβαλλόμενο όριο υγρασίας TML (Gard AS, 2014). Όσον αφορά τα φορτία που υπάρχει η πιθανότητα ρευστοποίησης, γίνονται δεκτά μόνο αν η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι μικρότερη από το μεταβαλλόμενο όριο υγρασίας TML.

Σε αντίθεση με την τιμή του FMP, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί στο εργαστήριο, το TML είναι μια παράμετρος που υπολογίζεται, παρά μετρείται, σαν 0,9 φορές τη τιμή FMP. Έτσι, η μέγιστη επιτρεπόμενη υγρασία που περιέχεται σε ένα φορτίο κατά τη στιγμή της φόρτωσης (το TML) είναι χαμηλότερη από ότι η περιεκτικότητα σε υγρασία κατά την οποία συμβαίνει η υγροποίηση (η FMP). Αυτή η διαφορά ανάμεσα στο μεταβαλλόμενο όριο υγρασίας και το σημείο ροής υγρασίας έγκειται στο περιθώριο ασφαλείας που απαιτείται για μία ασφαλή φόρτωση.

Όλες οι λεπτομέρειες σχετικά με τις βασικές διαδικασίες δοκιμών και δειγματοληψίας για τις υποχρεώσεις πιστοποίησης των φορτωτών βάσει της σύμβασης SOLAS, δίνονται στον κώδικα IMSBC 2009. Εν συντομία, ο κώδικας IMSBC ορίζει τα εξής:

(α) Προσδιορισμός των κινδύνων : Ο φορτωτής πρέπει να ενημερώσει αν το φορτίο μπορεί να ρευστοποιηθεί. Εάν το φορτίο είναι θετικό στη ρευστοποίηση, ο φορτωτής πρέπει να προμηθεύσει το καπετάνιο με τα απαραίτητα πιστοποιητικά υγρασίας και TML.

(β) Πιστοποιητικό Περιεκτικότητας Υγρασίας : Πριν τη φόρτωση ο καπετάνιος πρέπει να ενημερώνετε για το ποσοστό υγρασίας στο φορτίο μέσω του πιστοποιητικού. Συνέπεια αυτού είναι ότι ολόκληρο το φορτίο πρέπει να είναι ήδη διαθέσιμο στο λιμένα φόρτωσης προς δειγματοληψία πριν από την έναρξη της φόρτωσης, αντί να παραδοθεί αποσπασματικά σε όλη την παρατεταμένη διαδικασία φόρτωσης. Η δειγματοληψία πρέπει να πραγματοποιείται εφτά ημέρες πριν τη διαδικασία φόρτωσης.

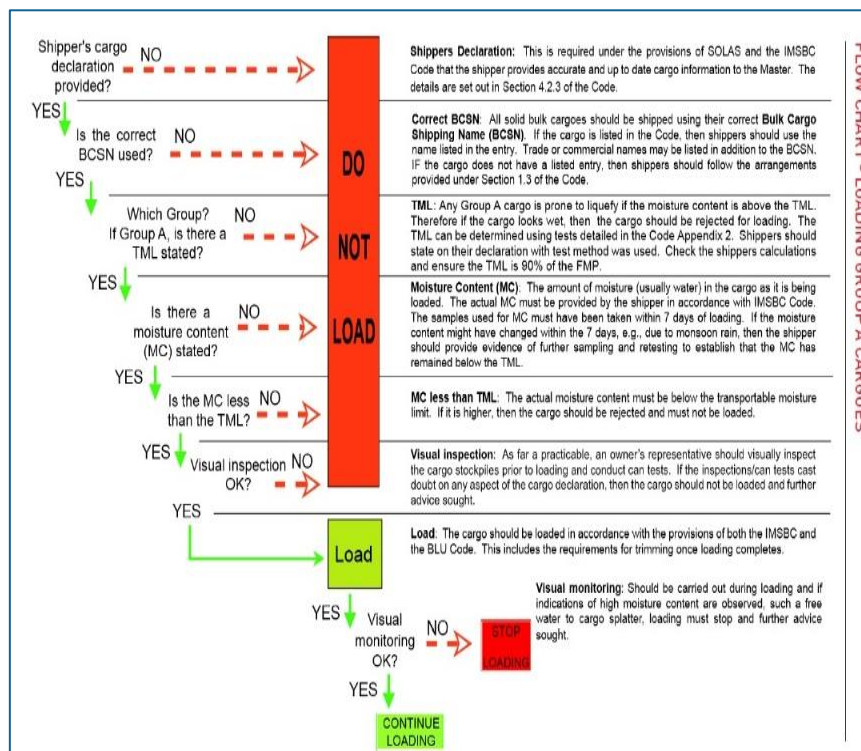
(γ) Πιστοποιητικό TML : Όπως συζητήθηκε παραπάνω, ο TML προέρχεται μαθηματικά από προσδιορισμός του FMP στο εργαστήριο. Κατ'αρχήν, υπάρχουν πολλές διαφορετικές εναλλακτικές μέθοδοι δοκιμής για τον προσδιορισμό της FMP, τρεις από αυτούς περιγράφονται λεπτομερώς στο Παράρτημα 2 του IMSBC Κώδικα και η αρμόδια αρχή εξαγωγής μπορεί να εγκρίνει επιπλέον διαδικασίες δοκιμής, όμως η πιο διαδεδομένη ναυτιλιακή πρακτική σε ευρεία χρήση είναι μέθοδος Flow Table Test και Can Test (παρουσιάζονται παρακάτω).

## 2.2.2 Οδηγίες Intercargo

---

Η Intercargo (International Association of Dry Cargo Shipowners) για να διαφυλάξει την ασφαλή φόρτωση και μεταφορά των φορτίων που ανήκουν στη Κατηγορία Α, έχει εκδώσει κάποιες συγκεκριμένες οδηγίες (Εικόνα 14) οι οποίες παρουσιάζονται με τη σειρά ως ακολούθως (Lomas R.,2012) :





Εικόνα 14: Οδηγίες για ασφαλή φόρτωση και μεταφορά των φορτίων που ανήκουν στη Κατηγορία A (Lomas R.,2012)

### 2.2.3 Flow Table Test

Το flow table test (FTT) (Εικόνα 15,16) κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί το Flow Moisture Point για ομοιογενή ορυκτά φορτία (Spencer & Tilsey, 2011). Η δοκιμή απαιτεί ένα δείγμα του φορτίου υπό τη μορφή ενός κόλπου κώνου τοποθετημένο σε ένα τραπέζι ροής το οποίο διεγείρεται κάθετα περίπου 50 φορές, με ένα συγκεκριμένο ύψος. Ο IMSBC κώδικας παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τον εντοπισμό μια κατάσταση ροής: <<Η κατάσταση ροής θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί όταν η υγρασία και η συμπύκνωση του δείγματος παράγει ένα επίπεδο κορεσμού τέτοιο ώστε να λαμβάνει χώρα η πλαστική παραμόρφωση>>.

Τα σημάδια της πλαστικής παραμόρφωσης είναι τα ακόλουθα :

- οι φορμαρισμένες πλευρές του δείγματος μπορούν να παραμορφωθούν
- ρωγμές μπορεί να αναπτυχθούν στην επιφάνεια
- το δείγμα αρχίζει να παρουσιάζει τάση να κολλάει στο κάτω μέρος του καλουπιού

- κομμάτια από την υγρασία στο τραπέζι μετά τη δοκιμή

Η δοκιμή αυτή, ωστόσο, έχει επικριθεί ως αναξιόπιστη, καθώς υποκειμενικά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα και την ακρίβεια του προσώπου τη διεξαγωγή της δοκιμής. Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα του τεστ είναι η ανεπάρκεια της σε δοκιμή χονδροειδών φορτίων. Υπάρχουν επίσης τύποι σιδηρομεταλλεύματος που απλά δεν μπορούν να ελεγχθούν ικανοποιητικά με το συγκεκριμένο τεστ.



Εικόνα 15: Flow Test Table(Spencer & Tilsey,2011).



Εικόνα 16: Δείγμα φορτίου κατά τη διάρκεια του Flow Test Table(Spencer & Tilsey,2011).

## 2.2.4 Can Test

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου τεστ (Εικόνα 17,18) πάνω στο πλοίο μπορεί να καθορίσει την παρουσία υγρασίας επί της επιφάνειας του φορτίου και πιθανή υγροποίηση. Η δοκιμή μπορεί να διεξαχθεί αποκλειστικά με επιτόπιο έλεγχο από τον πλοίαρχο ή από τους αξιωματικούς αλλά σε καμία περίπτωση δεν αντικαθιστά την διαδικασία που ακολουθείτε σε ένα εργαστήριο για τη μεταφορά ή μη του συγκεκριμένου φορτίου (Spencer & Tilsey,2011).

Η διαδικασία του συγκεκριμένου τεστ είναι η ακόλουθη:

Βήμα 1<sup>ο</sup> : Γεμίζουμε μέχρι τη μέση ένα μικρό κυλινδρικό δοχείο με δείγμα του φορτίου

Βήμα 2<sup>ο</sup> : Χτύπημα του δοχείου πάνω σε μια σκληρή επιφάνεια από ένα ύψος περίπου 20 εκατοστά

Βήμα 3<sup>ο</sup> : Επανάληψη της διαδικασίας τουλάχιστον 25 φορές, σε ένα ή δύο δευτερόλεπτα.

Βήμα 4<sup>ο</sup> : Ελέγξτε την επιφάνεια για υγρασία ή παρουσία υγρού.

Εάν η υγρασία είναι παρούσα στην επιφάνεια ή παρατηρηθεί παρουσία υγρού,πρόσθετες δοκιμές της περιεκτικότητας σε υγρασία θα πρέπει να διεξάγεται από ένα εργαστήριο πριν



από τη φόρτωση. Η δοκιμή δεν πρέπει να ληφθεί ως δοκιμή αποδοχής επιβεβαιώνοντας ότι το φορτίο είναι ασφαλές. Θα πρέπει να χρησιμεύσει για να προειδοποιήσει τον πλοίαρχο ή να επιβεβαιώσει ότι το φορτίο είναι πάνω από το σημείο υγρασίας και ότι απαιτείται περαιτέρω εργαστηριακές δοκιμές.



Εικόνα 17: Can Test (Spencer & Tilsey,2011)



Εικόνα 18: Παρουσία Υγρασίας μετά τη διεξαγωγή του Can Test(Spencer & Tilsey,2011)

## 2.4 Αναθεωρήσεις Κανονισμών και Μελλοντικές Ενέργειες

Πολλοί είναι αυτοί που έχουν ασχοληθεί με την ασφάλεια των πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου. Επίσης, πολλοί είναι οι κανονισμοί που έχουν θεσπιστεί σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο για την αντιμετώπιση προβλημάτων ευστάθειας, απώλειας ευστάθειας κατά τη φόρτωση, μεταφοράς και εκφόρτωσης του πλοίου. Τέτοιοι κανονισμοί είναι οι SOLAS (International Convention for Safety of Life at Sea), ISM Code(International Safety Management, BLU Code (Code of practice for the safe loading and unloading of bulk carriers),IMDG Code (International Maritime Dangerous Goods Code),IMSBC Code (International Marine Solid Bulk Cargoes Code). Οι ιδιαίτεροι κίνδυνοι,στους οποίους αναφέρονται οι παραπάνω κώδικες,είναι οι κατασκευαστικές αστοχίες που οφείλονται στη λάθος κατανομή του φορτίου, η ρευστοποίηση του φορτίου που προκαλεί απώλεια ευστάθειας του πλοίου στην άθικτη κατάσταση κατά τη διάρκεια του ταξιδιού και η χημική αντίδραση των φορτίων. Οι παραπάνω κώδικες πρέπει να αναθεωρούνται κάθε δύο (2) χρόνια.

Στη διεθνή διάσκεψη για την προστασία της ανθρώπινης ζωής στη θάλασσα (SOLAS) το 1960 αναφέρθηκε για πρώτη φορά το πρόβλημα της μεταφοράς φορτίων χύδην, 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). Ωστόσο, ο κώδικας αυτός δεν εξασφάλιζε την ασφαλή μεταφορά των επικίνδυνων φορτίων, με αποτέλεσμα το 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.

Όσον αφορά τώρα το φαινόμενο της ρευστοποίησης του φορτίου που μελετάμε, η DSC Sub-Committee 17 έχει κάνει τα πρώτα βήματα για την αναθεώρηση του κώδικα ώστε να τεθεί σε ισχύ τον Ιανουάριο 2015. Αρχικά, έχει προταθεί η εφαρμογή μια νέας δοκιμής της Vibration Table with Penetration Bit Test (VTPB test), η οποία είναι κατάλληλη για τα μεταλλεύματα του νικελίου τα οποία αποτελούνται από μεγάλα σωματίδια μέχρι 30mm προέλευσης από τα ορυχεία της Νέας Καλυδώνας. Ειδικά για τις χώρες από όπου φορτώνονται μεταλλεύματα νικελίου έγινε μια άλλη εξίσου σημαντική πρόταση. Οι τοπικές αρχές να αναπτύξουν ένα σύστημα για σωστή δειγματοληψία, δοκιμή και πιστοποίηση τέτοιων φορτίων καθώς και ένα κατάλληλο σύστημα ελέγχου και επιβολής της αρμόδιας αρχής. Επιπλέον, η ανάπτυξη της λειτουργικής καθοδήγησης των ναυτικών που εργάζονται σε πλοία μεταφοράς τέτοιων φορτίων. Την τελευταία δεκαετία υποστηρίζεται 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. Για να μπορέσουν τα πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην να μεταφέρουν με ασφάλεια οποιοδήποτε μετάλλευμα σε οποιαδήποτε υγρασία ο Ιταλικός νηογνώμονας (RINA) το 2011 ανακοίνωσε κάποια αυστηρά πρότυπα τροποποίησης ή σχεδιασμού. Μάλιστα, έχει ήδη κατασκευαστεί από τον Ιαπωνικό Νηογνώμονα το 2012 το πρώτο αναγνωρισμένο πλοίο ειδικού τύπου μεταφοράς μεταλλεύματος του νικελίου (Jules Garnier II, 27,200 DWT).

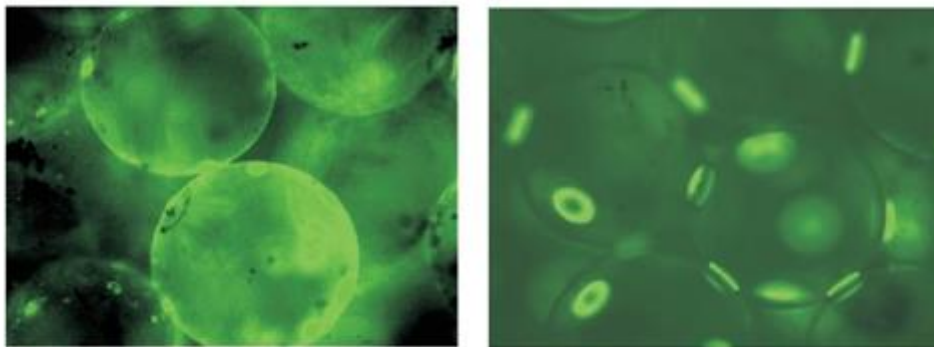
Πολλές από τις πειραματικές μελέτες των κοκκωδών σωματιδίων, ειδικά εκείνες που σχετίζονται με τον τομέα της φυσικής, είναι αφιερωμένες στα ξηρά κοκκώδη σωματίδια, δηλαδή η επίδραση των διάμεσων υγρών μπορεί να αγνοηθεί, ή τουλάχιστον να τροποποιηθεί ώστε να αποφευχθούν οι συνέπειες της παρουσίας τους. Αυτή η υπόθεση στη ουσία δεν είναι έγκυρη, ειδικά όταν οι διάμετροι των κόκκων είναι μικρές (λιγότερο από 200-300 $\mu\text{m}$ ). Αλλά μόλις πρόσφατα, μερικοί μελετητές έχουν αναπτύξει νέες τεχνικές για να αναλύσουν προσεκτικά την «συμπληρωματική» επίδραση της δύναμης που αναπτύσσεται όταν η υγρασία είναι παρούσα σε κάποιο σύστημα. Στη συνέχεια, πρόκειται να γίνει μία κριτική ανασκόπηση των κυριότερων πειραματικών και αριθμητικών μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί στο συγκεκριμένο τομέα.

Πρόσφατα, οι Herminghaus et al.(2005), έχουν παρουσιάσει μια μεγάλη μελέτη όσον αφορά τη δυναμική των υγρών κοκκωδών σωματιδίων. Επέκτειναν τις τέσσερις καταστάσεις του υγρού περιεχομένου μεταξύ των σφαιρικών σωματιδίων σε πέντε, λαμβάνοντας υπόψη τους ότι οι επιφάνειες των σφαιρών δεν είναι λείες αλλά τραχιές, διαχωρίζοντας την περίπτωση χαμηλής υγρασίας σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις ( περίπτωση I: λαμβάνει υπόψη τη ποσότητα του υγρού μόνο στα σημεία όπου η επιφάνεια είναι τραχεία, περίπτωση II: λαμβάνει υπόψη τη ποσότητα του υγρού κατά την επαφή). Οι άλλες τρεις καταστάσεις παραμένουν όπως είναι. Για πολύ μικρή ποσότητα υγρού, είναι προφανές ότι οι ρωγμές στην επιφάνεια των κοκκωδών σφαιρικών σωματιδίων πρέπει πρώτα να «γεμίσουν» πριν καν σχηματιστεί μία υγρή γέφυρα μεταξύ τους. Σε πολύ μικρή ποσότητα υγρού (περίπτωση I), γέφυρες σχηματίζονται μόνο μεταξύ εξογκωμάτων των κοκκωδών σφαιρικών σωματιδίων. Όσο η ποσότητα του υγρού περιεχομένου αυξάνεται, περνάμε στη περίπτωση II μόνο και εφόσον ισχύσει η ακόλουθη Σχέση 1.

$$V = \xi^2 * \delta \quad (1)$$

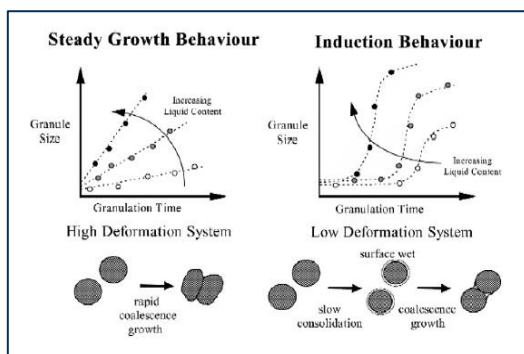
όπου V η ποσότητα του υγρού περιεχομένου,  $\delta$  ο συντελεστής τραχύτητας επιφανείας και  $\xi$  συντελεστής επιφανείας. Τέλος, όταν η τραχιά επιφάνεια καλύπτεται με υγρό παντού, έχουμε στην πραγματικότητα τελείως υγρές σφαίρες. Αυτό οδηγεί στην ιδανική κατάσταση (περίπτωση III). Κατά τη διάρκεια της μελέτης τους, διεξήγαγαν πειράματα με γυάλινες σφαίρες τοποθετημένες σε γυάλινη δεξαμενή και έπειτα από προσθήκη νερού και φλουορεσκεΐνη (υδατοδιαλυτή συνθετική οργανική ένωση που χρησιμοποιείται ως φθορίζουσα χρωστική με πολύ μεγάλη απόδοση) και κάνοντας χρήση λάμπας υπεριώδους ακτινοβολίας, μέτρησαν σε πόσα σημεία εφάπτεται η κάθε σφαίρα και έτσι υπολόγισαν τον

όγκο του νερού που υπάρχει στις “γέφυρες” μεταξύ των κοκκωδών σφαιρικών σωματιδίων (Εικόνα 19). Επίσης, σε άλλο πείραμα τους, τοποθέτησαν σφαίρες διαφορετικής διαμέτρου στην ίδια δεξαμενή και έπειτα από οριζόντια διέγερση, έφτασαν στο συμπέρασμα ότι μόνο μετά τη προσθήκη επαρκούς ποσότητας νερού τα σωματίδια συγχωνεύονται και συμπεριφέρονται σαν ενιαίο μείγμα. Τέλος, διεξήγαγαν το ίδιο πείραμα αλλά με κατακόρυφη διέγερση αυτή τη φορά. Και στις δύο περιπτώσεις διαπίστωσαν τη έντονη εξάρτηση της ρευστοποίησης από την ποσότητα του νερού μέσα στη δεξαμενή.

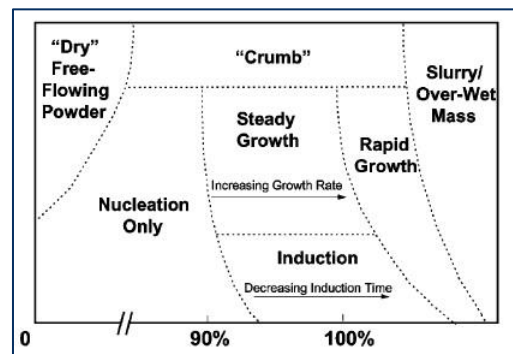


Εικόνα 19 : Υγρές Γέφυρες Μεταξύ Σφαιρικών Σωματιδίων (Herminghaus , 2005).

Οι Iveson et al (2001), μελέτησαν την εξέλιξη της κοκκοποίησης των κοκκωδών σωματιδίων με την αύξηση της περιεκτικότητας υγρού, νερού ή άλλου υγρού μείγματος. Η αντοχή του τελικού μείγματος συνδέεται άμεσα με τις ιδιότητες και το ποσό του υπάρχοντος υγρού μεταξύ των κοκκωδών σωματιδίων. Η κοκκοποίηση των σωματιδίων μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους όμως δύο είναι οι κύριοι: ο “Steady growth” που σημαίνει σταθερή ανάπτυξη και υφίσταται όταν το μέσο μέγεθος του κόκκου αυξάνει σταθερά με την ώρα και ο “Induction growth” που σημαίνει ότι μπορεί να υπάρχει μια μεγάλη χρονική περίοδο μικρής ή καθόλου ανάπτυξης και να ακολουθεί μια ξαφνική ανάπτυξη (Εικόνα 20).



Εικόνα 20 : Κοκκοποίηση Σωματιδίων “Steady-growth” και “induction growth”(Iveson,2001)

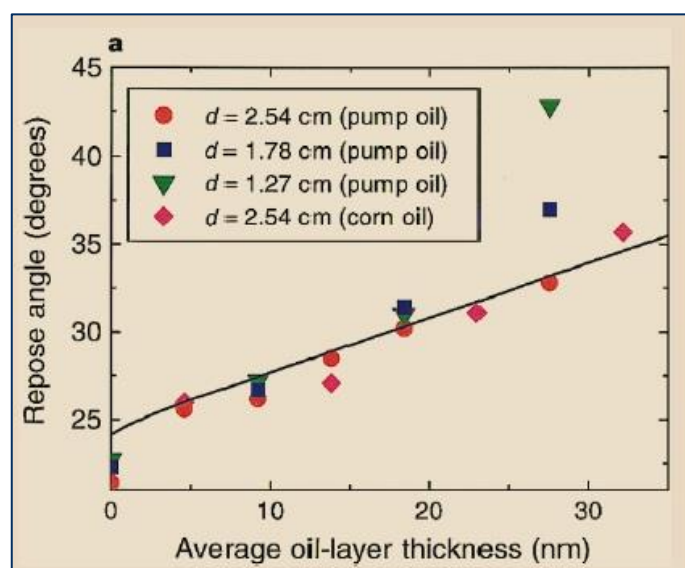


Εικόνα 21 : Χάρτης Κοκκοποίησης (Iveson,2001)

Επίσης, αξιολόγησαν τους λεγόμενους ‘‘χάρτες κοκκοποίησης’’ (Εικόνα 21), οι οποίοι συσχετίζουν το μέγεθος της κοκκοποίησης, την υγρασία και το χρόνο και απέδειξαν ότι είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη σύγκριση της συμπεριφοράς διαφόρων υλικών μόνο όμως για υγρά ίδιου ιξώδους.

Τέλος, απέδειξαν ότι η χρονική εξέλιξη της κοκκοποίησης συνδέεται άμεσα με το ποσοστό υγρασίας και αυξάνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας που υπάρχει στο σύστημα μέχρι ένα ανώτατο όριο όπου τα κοκκώδη σωματίδια διαχωρίζονται ξανά.

Οι Hornbaker et al (1997) με τη σειρά τους, μέτρησαν την εξέλιξη της γωνίας ηρεμίας (angle of repose) και τη σχέση της με το πάχος του στρώματος υγρού μεταξύ των κοκκωδών σωματιδίων. Μελέτησαν τα αποτελέσματα της προσθήκης μικρών ποσοτήτων αραβοσιτελαίου και ελαίου αντλίας κενού (οι οποίες αμφότερες έχουν χαμηλές πιέσεις ατμών) σε σφαιρικά σωματίδια από πολυεστέρα, τα οποία είναι αδιάλυτα σε αυτά τα έλαια. Μέτρησαν τη γωνία ηρεμίας κάνοντας χρήση της μεθόδου draining-crate, με ποικίλα ανοίγματα αποστραγγίσεως και υγρό περιεχόμενο. Η μέγιστη τιμή του υγρού περιεχόμενου που χρησιμοποίησαν, η οποία είναι 40 φορές μικρότερη από την ελάχιστη περιεκτικότητα σε υγρασία των προηγούμενων μελετών, αντιστοιχεί σε ένα πάχος υγρής επικάλυψης (tliq) μικρότερο από 50 nm για τις σφαίρες. Βρήκαν μια τεράστια αύξηση της γωνίας ηρεμίας ( $\theta_R$ ) σε σχέση με το πάχος υγρής επικάλυψης (tliq). Ένα εκπληκτικό χαρακτηριστικό είναι ότι η γωνία ηρεμίας ( $\theta_R$ ) φαίνεται να αυξάνει γραμμικά με το πάχος υγρής επικάλυψης (tliq) μέχρι το σημείο όπου λαμβάνει χώρα η κοκκοποίηση και τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα από τον τύπο του ελαίου και τα ανοίγματα αποστραγγίσεως (Εικόνα 22).

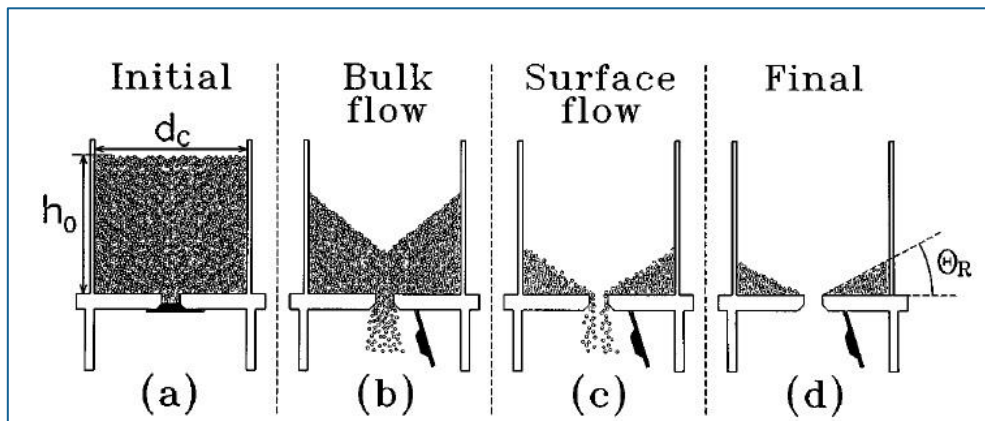


Εικόνα 22 : Γωνία Ηρεμίας συναρτήσει του πάχους του ελαίου σε σφαίρες 750 γραμμ. και διαμέτρου  $0.8 \pm 0.2$  χιλιοστών (Hornbaker , 1997)

Σε ξηρή άμμο, η γωνία ηρεμίας ( $\theta_R$ ) καθορίζεται από το σχήμα των κόκκων και από τις δυνάμεις τριβής. Στην υγρή άμμο, οι ελκτικές δυνάμεις που οφείλονται σε υγρές γέφυρες μεταξύ των κοκκωδών σωματιδίων, αυξάνουν την σταθερότητα των σωματιδίων και ως εκ τούτου τη γωνία ηρεμίας ( $\theta_R$ ). Λαμβάνοντας υπόψη την τραχύτητα της επιφάνειας των σφαιρών (~ 1 χιλιοστό), υπολόγισαν αρχικά την ελκτική δύναμη μεταξύ των σωματιδίων ως συνάρτηση του υγρού περιεχομένου και στη συνέχεια υπολόγισαν τη γωνία ηρεμίας για τις υγρές σφαίρες χρησιμοποιώντας μία μέθοδο που βασίζεται στη σταθερότητα της επιφάνειας των σωματιδίων. Αυτό το μοντέλο ταιριάζει τα δεδομένα με μια ελεύθερη παράμετρος που αντιστοιχεί στον όγκο του υγρού σε μια υγρή γέφυρα και υποδεικνύει ότι ο τυπικός όγκος μιας υγρής γέφυρας είναι  $\sim 3 \times 10^{-7} \text{ m}^3$  για μέγιστη τιμή του πάχους υγρής επικάλυψης ( $l_{liq}$ ), πράγμα που σημαίνει ότι το 99,9% του υγρού δεν συμβάλλει στην ελκτική δύναμη, πιθανώς λόγω της επιφανειακής τραχύτητας. Καθώς προσθέτετε το υγρό στις σφαίρες, σχηματίζονται συστάδες σφαιρών (κοκκοποίηση), το μέγεθος των οποίων αυξάνεται με τη προσθήκη υγρού. Η ανάπτυξη αυτών των συστάδων φαίνεται να είναι μάλλον ξαφνική, γεγονός που υποδηλώνει μια μετάβαση από μια κατάσταση όπου οι χύδην ιδιότητες σχετίζονται με τη δυναμική των μεμονωμένων κόκκων, σε μια κατάσταση όπου συσχετίσεις μακράς εμβέλειας κυριαρχούν. Η συσκευή τους απέτυχε εντελώς για πάχος υγρής επικάλυψης ( $l_{liq}$ ) μεγαλύτερο από ( $>40 \text{ nm}$ ), αφού το μέγεθος των συστάδων πλησίασε το μέγεθος του ανοίγματος. Τέλος, έφτασαν στο συμπέρασμα ότι μικρές ποσότητες υγρού μπορεί να αλλάζουν δραματικά τις ιδιότητες των κοκκωδών σωματιδίων κάτι το οποίο οδηγεί σε μια μεγάλη αύξηση στη γωνία ηρεμίας και στη δημιουργία συστάδων. Τα αποτελέσματά δείχνουν ότι η προσθήκη υγρού σε ξηρά σωματίδια μπορεί να αλλάξει κατά πολύ τις ιδιότητες τους και έτσι οδηγούμαστε σε νέες εκμεταλλεύσιμες φυσικές ιδιότητες κάτι το οποίο δε γίνεται με ξηρή ύλη.

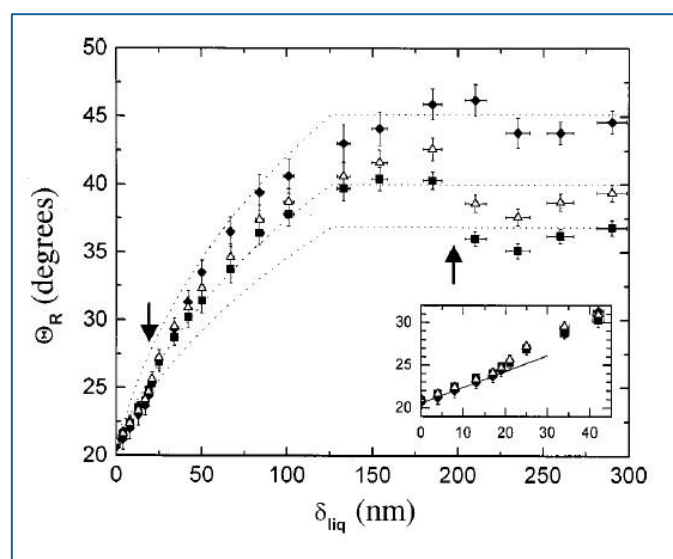
Ομοίως, οι Tegzes et al (1999), μελέτησαν την επίδραση του υγρού περιεχομένου σε κοκκώδη σωματίδια και παρατήρησαν την άμεση σύνδεση της γωνίας ηρεμίας και του πάχους επικάλυψης του ελαίου για δοχεία διαφορετικών διαμέτρων και την αύξηση της σε σχέση με το πάχος επικάλυψης του ελαίου. Διεξήγαγαν πειράματα όπου τα αποτελέσματά τους μπορούν να βασιστούν στη θεωρία που βασίζεται στην ισορροπία των σωματιδίων στην επιφάνεια και σε μια εναλλακτική θεωρία που βασίζεται στη χύδην σταθερότητα των Halsey and Levine. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ αυτών των δύο θεωριών είναι ότι η πρώτη προβλέπει τη γωνία ηρεμίας ( $\theta_R$ ) να εξαρτάται μόνο από τις τοπικές ιδιότητες της επιφάνειας, ενώ η δεύτερη προβλέπει ότι η γωνία ηρεμίας ( $\theta_R$ ) θα πρέπει να εξαρτάται από τις ιδιότητες όγκου του σωρού των κόκκων ως σύνολο. Εκτέλεσαν λεπτομερείς μετρήσεις της γωνίας ηρεμίας ( $\theta_R$ ) ως συνάρτηση του υγρού περιεχομένου για τη δοκιμή αυτών των δύο θεωριών μέσω της μεθόδου “draining crater method” (Εικόνα 23) και βρήκαν ότι η φυσική

συμπεριφορά των υγρών κοκκωδών σωματιδίων είναι πιο πλούσια από ό, τι αναμενόταν από τις δύο θεωρίες.



Εικόνα 23 : Μέθοδος Μέτρησης Γωνίας Ηρεμίας " Draining crater" (α) Αρχικό Ύψος Σωματιδίων (β) Αρχικό Στάδιο Μεθόδου (γ) Δεύτερο Στάδιο Μεθόδου (δ) Τελικό Στάδιο Μέτρησης Γωνίας Ηρεμίας (Tegzes , 1999)

Πιο συγκεκριμένα, παρατήρησαν τρεις διακριτές χαρακτηριστικές καταστάσεις κοκκοποίησης που προκύπτουν ανάλογα με τη ποσότητα του υγρού περιεχομένου. Όταν η περιεκτικότητα του υγρού είναι χαμηλή, η κατάσταση ονομάζεται " granular regime" ( $\delta_{liq} < 20 \text{ nm}$ ), η γωνία ηρεμίας ( $\theta_R$ ) είναι γραμμική σε σχέση με το πάχος επικάλυψης του υγρού και δεν εξαρτάται από το μέγεθος του δοχείου. Για μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε υγρό μεταξύ των κοκκωδών σωματιδίων, η κατάσταση ονομάζεται " correlated regime" ( $20 < \delta_{liq} < 175 \text{ nm}$ ), η καμπύλη  $\theta_R / \delta_{liq}$  έχει αρνητική κλίση και μειώνεται για μεγαλύτερα δοχεία. Όταν το πάχος επικάλυψης του υγρού πάρει τιμές πάνω από 175nm, η κατάσταση ονομάζεται " plastic regime" η καμπύλη  $\theta_R / \delta_{liq}$  αρχικά μειώνεται και στη συνέχεια αυξάνεται ελαφρώς αλλά πάλι εξαρτάται από το μέγεθος του δοχείου.



Εικόνα 24 : Γωνία Ηρεμίας σε συνάρτησι του πάχους του φιλμ λαδιού για τρεις διαφορετικές διαμέτρους. Τα δύο κάθετα βέλη χωρίζουν τις αλλαγές των τριών καταστάσεων "granular", "correlated" and "plastic" (Tegzes , 1999)



Τέλος, διαπίστωσαν ότι οι δύο προαναφερθείσες θεωρίες μπορούν να περιγράψουν ποιοτικά τη συμπεριφορά των υγρών κοκκωδών σωματιδίων, αλλά σε μόνο σε διαφορετικές καταστάσεις κοκκοποίησης.

Από την άλλη μεριά, οι Kohonen et al (2004), συσχέτισαν την αύξηση του αριθμού των υγρών γεφυρών ανά σφαιρίδιο (ή τις ενεργές επαφές) με την αύξηση του υγρού περιεχομένου. Ανέδειξαν, επίσης, τη σημασία του χρόνου που απαιτείται για να διεισδύσει το υγρό ανάμεσα στα κοκκώδη σωματίδια: αύξηση του όγκου του υγρού κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Έτσι, έφτασαν στο συμπέρασμα ότι το ποσοστό υγρασίας ελέγχει το πάχος επικάλυψης του υγρού και κατά συνέπεια τροποποιεί τη γωνία ηρεμίας μεταβάλλοντας τον αριθμό των επαφών. Η γνώση της ποσότητας των υγρών στην οποία προκύπτουν αυτές οι αλλαγές είναι μια βασική παράμετρος, όταν ο παράγοντας υγρασία είναι παρόν σε ένα σύστημα.

Το 2005, ο Forny et al (2005) μέτρησε τον ισοθερμοκρασιακό συντελεστή προσρόφησης (water sorption isotherm) όπου μας δείχνει τη σχέση της περιεκτικότητας νερού και της υγρασίας μιας ουσίας, για την περίπτωση μιας μικρής συσκευασίας από γυάλινα σφαιρίδια με μέση διάμετρο από 85  $\mu\text{m}$ . Στο έργο τους, διαπιστώθηκε ότι, πάνω από 70% ποσοστό υγρασίας υπάρχει μόνο μια αργή αύξηση στην ποσότητα του νερού που προσροφάτε στο εσωτερικό της συσκευασίας. Έτσι, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι το σύστημα παραμένει σε pendular κατάσταση (δηλαδή το νερό είναι παρόν μόνο στα σημεία επαφής) και αυτή η υπόθεση μπορεί να μας βοηθήσει ώστε να μοντελοποιήσουμε το παράγοντα υγρασία, όπου είναι υπεύθυνος για τις ελκτικές δυνάμεις που παρουσιάζονται.

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι Charlaix et al (2005), έχουν πραγματοποιήσει μια σειρά πειραμάτων επαφής κοκκωδών σωματιδίων για τη μέτρηση των δυνάμεων που αναπτύσσονται (capillary forces) και την πορεία της με τη πάροδο του χρόνου σε πολύ καλά ελεγχόμενο πειραματικό περιβάλλον. Πιο πρόσφατα οι Charlaix et al (2010), πρότειναν μια αναλυτική έκφραση για τη συμπεριφορά της ελκτικής δύναμης (adhesion force) μεταξύ δύο σφαιρών ως συνάρτηση της απόστασης των κέντρων τους. Η έκφραση αυτή τους επέτρεψε να υπολογίσουν δύο κύριες πτυχές αυτής της συμπεριφοράς: την πίεση αποσύνδεσης όπου υπολογίζεται από τη κλίση του γραμμικού τμήματος της μεταβολής της δύναμης με την απόσταση των κέντρων των σφαιρών και την εκτίμηση της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ στερεού-υγρού και αερίου (υπολογίζεται από τη μέγιστη τιμή για μηδενική απόσταση σφαιρών). Στη συγκεκριμένη έκφραση έχουν στηριχθεί πάρα πολλές μελέτες τις τελευταίες δεκαετίες.

Κάνοντας μία επισκόπηση σε παλαιότερα αριθμητικά αποτελέσματα, οι Lian et al (1998), ανέπτυξαν το πρώτο μοντέλο που ενσωματώνει ελκτικές δυνάμεις για την προσομοίωση των συστάδων υγρών κοκκωδών σωματιδίων στην pendular κατάσταση, χρησιμοποιώντας έναν



κωδικό προσέγγισης DEM (discrete element method) για μαλακά σωματίδια (soft particles). Ο κώδικας προσομοιώνει τη τροχιά κάθε σωματιδίου σύμφωνα με τους νόμους κίνησης του Newton's και της αλληλεπίδρασης των κοκκωδών σωματιδίων ως συνδυασμός της ελκτικής δύναμης λόγω συνοχής (liquid bridge force) και της δύναμης επαφής. Υπολογιστικές προσομοιώσεις για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ δύο pendular καταστάσεων υγρών συσσωματωμάτων έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της μελέτης του. Για όλες τις τιμές της ταχύτητα κρούσης που εξετάστηκαν, τα υγρά συσσωματώματα συγχωνευτήκαν.



(α)

(β)

Εικόνα 25 : (α) Απεικονίσεις υπολογιστικής προσομοίωσης pendular state για υγρά συσσωματώματα για ιξώδες 10 mPa s και ταχύτητες κρούσης (a) 0.5 m/s, (b) 2.0 m/s και (c) 5.0 m/s. (β) Απεικονίσεις υπολογιστικής προσομοίωσης pendular state για υγρά συσσωματώματα για ταχύτητες κρούσης 2.0 m/s και ιξώδες (a) 100 mPa s, (b) 1 mPa s και (c) 1 mPa s/m/s (Lian ,1998).

Η γεωμετρία των συγχωνευμένων συσσωματωμάτων χαρακτηρίζεται από την ακτίνα της σφαίρας που δημιουργείται, η οποία είναι συνάρτηση της ταχύτητας κρούσης και του ιξώδες του διάμεσου ρευστού. Αποδείχθηκε ότι για δεδομένη τιμή ιξώδες, υπάρχει μια κρίσιμη ταχύτητα κρούσης κατά την οποία η ακτίνα της σφαίρας είναι ελάχιστη. Εάν η τιμή του ιξώδες του υγρού αυξηθεί, η κρίσιμη ταχύτητα κρούσης αυξάνεται με μια ελαφρά μείωση τις ελάχιστης τιμής της σφαίρας. Στις προσομοιώσεις για μαλακά σωματίδια, η ενέργεια κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης διαχέεται λόγω τριβής, ιξώδης απόσβεσης και σπάσιμο δεσμών μεταξύ σωματιδίων. Αυτό οδηγεί σε εξασθένηση της αποθηκευμένης ελαστικής ενέργειας επιτρέποντας έτσι τη συνένωση των συσσωματωμάτων. Τα δεδομένα προσομοίωσης δείχνουν ότι η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια των συγκρούσεων οφείλεται κυρίως στην ιξώδη αντίσταση του διάμεσου υγρού και τριβής διάχυση που συνοδεύει η αναδιάταξη της μικροδομής. Η ενέργεια που διαχέεται από τη ρήξη μιας υγρής γέφυρας είναι πολύ μικρή, λιγότερο από το 5% της αρχικής κινητικής ενέργειας πριν την πρόσκρουση.

Οι Dong et al (2006), παρουσίασαν μια πειραματική και αριθμητική μελέτη όσον αφορά τη ταξινόμηση -καθίζηση σφαιρικών σωματιδίων μέσα σε υγρά. Στο μοντέλο τους, εκτός από τις δυνάμεις επαφής και van der Waals, περιλαμβάνει και τις δυνάμεις άνωσης, αντίστασης και

Magnus <<δυνάμεις άνωσης>>. Σε προηγούμενες εργασίες τους οι Dong et al (2012), πρότειναν μία εξίσωση η οποία αποδεικνύει ότι η ταξινόμηση των σφαιρικών σωματιδίων μέσα σε υγρά εξαρτάται από τις μικροσκοπικές διασωματιδιακές δυνάμεις. Η εξίσωση αυτή, είναι μια πρώτη χρήσιμη προσέγγιση για την καλύτερη κατανόησης της ταξινόμηση των σφαιριδίων μέσα σε υγρά.

Στη πραγματικότητα, μια απλή προσέγγιση για την κατανόηση της μακροσκοπική συμπεριφορά κοκκωδών σωματιδίων σε ένα μακροσκοπικό σύστημα δε θα ήταν δυνατή λόγω των πολλών βαθμών ελευθερίας του συγκεκριμένου συστήματος. Ως εκ τούτου, θα μπορούσε κανείς να μειώσει το μέγεθος του υπό εξέταση συστήματος, έτσι ώστε να είναι δυνατή μια μικροσκοπική προσομοίωση των κοκκωδών σωματιδίων.

Τις τελευταίες δεκαετίες οι αριθμητικές προσομοιώσεις οδηγούν σε σημαντικά αποτελέσματα όσον αφορά τη κοκκώδη μικροδομή και στη συσχέτιση της με τη μακροσκοπική συμπεριφορά. Μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά, η συμπεριφορά χιλιάδων κοκκωδών σωματιδίων μπορεί να προσομοιωθεί, προσφέροντας εξαιρετικές δυνατότητες για τη διερεύνηση της επίδρασης πολλών παραμέτρων που θα ήταν δύσκολο να παρατηρηθούν μέσω της διενέργειας πειραμάτων. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα υφιστάμενα μοντέλα προσομοίωσης καθώς και τα πιο δημοφιλή στα οποία θα βασιστούμε.

Τέλος, θα ερευνήσουμε τις δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ των κοκκωδών σωματιδίων όπως οριζόντιες και εγκάρσιες, καθώς και θα αναλύσουμε το θεωρητικό και υπολογιστικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται ο κώδικας προσομοίωσής τόσο για τα ξηρά όσο και για τα υγρά σωματίδια.

#### 4.2 Υφιστάμενα Μοντέλα Προσομοίωσης

Η κυρίαρχη μέθοδος προσομοίωσης των κοκκωδών σωματιδίων είναι η λεγόμενη Soft Sphere Molecular Dynamic (MD). Άλλες δημοφιλείς μέθοδοι είναι γνωστές με τα ακόλουθα ονόματα: Hard Sphere Molecular Dynamics, Direct Simulation Monte Carlo (MC), Rigid-Body Dynamics, Cellular Automata και Bottom to Top Reconstruction. Κάθε μία μέθοδος έχει πλεονεκτήματα όταν εφαρμόζεται σε συγκεκριμένη κατηγορία προβλημάτων.

Η μέθοδος Hard Sphere Molecular Dynamics (ED) έχει ως πλεονέκτημα τη χρήση της για καθαρά αλγεβρικούς υπολογισμούς και για κοκκώδη αέρια ενώ δε δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα στη προσομοίωση στερεών σωματιδίων και εξαρτάται πολύ από τις παραμέτρους του συστήματος. Σε αντίθεση, η μέθοδος Soft Sphere Molecular Dynamics μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κοκκώδη σωματίδια με περίπλοκο σχήμα τόσο για δυναμικές όσο και για στατικές συνθήκες και επίσης είναι πολύ πιο αποτελεσματική από την μέθοδο

Direct Simulation Monte Carlo με μοναδικό αλλά σημαντικό μειονέκτημα το ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μικρά συστήματα.

Από τη μεριά της, η μέθοδος Direct Simulation Monte Carlo είναι πιο αποτελεσματική από ότι η ED και είναι πιο ρεαλιστική για κοκκώδη αέρια. Επίσης είναι πιο εύκολη στη κωδικοποίηση και στον υπολογισμό των διαμοριακών δυνάμεων από ότι η MD με σημαντικό μειονέκτημα το ότι μικρά λάθη οδηγούν σε μη φυσικά αποτελέσματα και απαιτείται περαιτέρω απλούστευση των υποθέσεων της. Πιο ρεαλιστικές προσομοιώσεις για σκληρό σωματίδια με περίπλοκο σχήμα υποστηρίζει η μέθοδος Rigid-Body Dynamics όμως με υψηλό υπολογιστικό κόστος.

Τέλος, οι υπόλοιπες μέθοδοι περιορίζονται μόνο σε πολύ συγκεκριμένα υπολογιστικά προβλήματα. Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου είναι πολύ περίπλοκη και εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα που απαιτούμαστε να λύσουμε. Στη περίπτωση μας, η επιλογή της μεθόδου Soft Sphere Molecular Dynamic (MD) είναι φυσική, τόσο για την ακρίβεια της όσο και την υπολογιστική της αποδοτικότητα.

#### 4.3 Μοντέλα Προσομοίωσης Μοριακής Δυναμικής (MD)

---

Τα μοντέλα της Μοριακής Δυναμικής (Molecular Dynamics - MD) εξετάζουν τις ιδιότητες ενός συστήματος αλληλεπίδρασης κοκκωδών σωματιδίων με ανεπάλληλους υπολογισμούς των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σωματιδίων και την ενσωμάτωση των εξισώσεων της κίνησης τους. Αυτή η διαδικασία διαγράφει μια διακριτή τροχιά. Συνδυάζοντας την στατιστική μηχανική και τη κινητική θεωρία, μικροσκοπικές ιδιότητες του συστήματος μπορούν να υπολογιστούν.

Τα βασικά σενάρια χρήσης μιας μεθόδου Μοριακής Δυναμικής (Molecular Dynamics - MD) είναι τα ακόλουθα: Στο πρώτο σενάριο, οι προσομοιωμένες ιδιότητες συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα και όταν αυτά τα δύο συμφωνούν τότε είναι λογικό να ισχυριστούμε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα μπορούν να εξηγηθούν από το μοντέλο προσομοίωσης. Στο δεύτερο σενάριο, οι MD προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν πειραματικά αποτελέσματα. Κατά μία έννοια το δεύτερο σενάριο είναι το αντίστροφο του πρώτου. Στο τρίτο σενάριο, οι προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται ως διερευνητικό εργαλείο για να βοηθήσουν στην αρχική κατανόηση του προβλήματος και να δώσουν οδηγίες για τις γραμμές της έρευνας που θα ακολουθήσουν. Σε όλα αυτά τα σενάρια ισχύει η περίπτωση ότι ένα μεγαλύτερο μοντέλο προσομοίωσης είναι ένα πιο ρεαλιστικό.

Η προσομοίωση των μοντέλων Μοριακής Δυναμικής (MD) είναι σήμερα μια ολοένα και πιο κοινή προσέγγιση για υπολογισμούς των ιδιοτήτων ενός συστήματος κοκκωδών σωματιδίων.

Εδώ και τριάντα χρόνια, έχει καθιερωθεί στο χώρο της επιστήμης και αναπτύσσεται συνεχώς με τη βοήθεια των βελτιωμένων φυσικών μοντέλων, των πιο αποδοτικών αλγορίθμων και τους ταχύτερους υπολογιστές. Οι προσομοιώσεις μπορούν πάντα να επεκταθούν ώστε να καλύπτουν μεγαλύτερες χρονικές περιόδους και τα μελετούμε να συστήματα να γίνουν μεγαλύτερα από ότι είναι μέχρι σήμερα.

Οι αλληλεπιδράσεις που υπολογίζονται κάθε χρονικό βήμα είναι όλες ανεξάρτητες και όταν η συνολική αλληλεπίδραση σε κάθε σωματίδιο είναι γνωστή, η νέα θέση μπορεί να βρεθεί ανεξάρτητα από όλα τα άλλα σωματίδια. Κατ' αρχήν, αυτό σημαίνει ότι οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται για κάθε χρονικό βήμα θα μπορούσαν όλοι να γίνουν παράλληλα, αλλά η επίτευξη του στόχου, διατηρώντας παράλληλα την αποτελεσματικότητα, παραμένει μια σημαντική πρόκληση. Κατά συνέπεια, υπάρχει ένα ισχυρό κίνητρο για την ανάπτυξη πιο ακριβών και αποτελεσματικών μεθόδων για την εκτέλεση προσομοιώσεων MD.

Οι αλγόριθμοι της Μοριακής Δυναμικής (MD) μπορούν να διαιρεθούν σε δύο ευρείες κατηγορίες: εκείνες για “μαλακές” σφαίρες (soft spheres) και εκείνες για “σκληρές” σφαίρες (hard spheres). Η μοντελοποίηση των “σκληρών” σφαιρών (hard spheres / event-driven molecular dynamics) βασίζεται στην απουσία αλληλοδιείσδυση ή παραμόρφωση κατά την πρόσκρουση. Μεταξύ συγκρούσεις, τα σωματίδια κινούνται κατά μήκος των γνωστών βαλλιστικών τροχιές.

Μεταξύ των μεθόδων προσέγγισης μαλακών σφαιρών, η μέθοδος MD είναι η πιο σημαντική όπως έχουμε ήδη αναφέρει. Η μέθοδος επιτρέπει, κατ' αρχήν, προσομοίωση συστημάτων κοκκωδών σωματιδίων με πολύπλοκο σχήμα σε στατικές και σε δυναμικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των συγκρούσεων πολλών σωματιδίων ταυτόχρονα. Η μέθοδος SFMD απαιτεί να γνωρίζουμε τις ροπές και τις δυνάμεις που ασκούνται στα σωματίδια λόγω της σύγκρουσης, σαν συνάρτηση της θέσης των σωματιδίων, της ταχύτητας, του γωνιακού προσανατολισμού και της γωνιακής ταχύτητας.

## 4.4 Αξονικές και Εγκάρσιες Δυνάμεις Μεταξύ Κοκκωδών Σωματιδίων

### 4.4.1 Εισαγωγή

---

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, ο αλγόριθμος που θα ακολουθήσουμε βασίζεται στην ντετερμινιστική μέθοδο molecular dynamics (MD) που έχει ήδη αναπτυχθεί στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής για την περίπτωση ξηρού φορτίου “Microscale modeling of excited granular ship cargos: A numerical approach ( Spandonidis & Spyrou, 2013)” σε γλώσσα προγραμματισμού C++.

Επίσης, βασιζόμενοι στην εργασία “Tilting process with humidity: DEM modeling and comparison with experiments” Oger et al (2013), θα εισαχθούν στο μη γραμμικό μοντέλο περιγραφής των δυνάμεων μεταξύ των κοκκωδών σωματιδίων (Hertz-type Force), οι κατάλληλοι όροι οι οποίοι θα εκφράζουν την επίδραση της υγρασίας.

Οι κόκκοι θεωρούνται ως λεία και ξηρά σφαιρικά σωματίδια που διατηρούν το σχήμα τους ή μπορούν να περιστρέφουν. Όσον αφορά τα μοντέλα υπολογισμού της δύναμης αλληλεπίδρασης, μερικά από τα δημοφιλέστερα ακολουθούν αφού πρώτα ορίσουμε κάποιες βασικές παραμέτρους.

Στο ακόλουθο σχέδιο παρουσιάζεται μια τυχαία σύγκρουση δύο σφαιρικών σωματιδίων ακτίνας  $R_i$ , θέσης  $r_i$ , ταχύτητας  $v_i$  και γωνιακής ταχύτητας  $\omega_i$ .

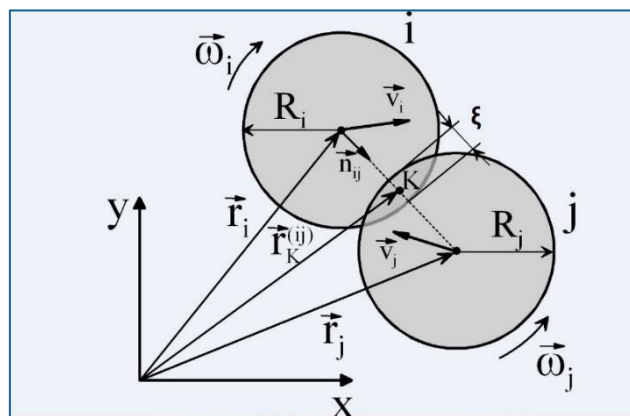
Η παραμόρφωση των κόκκων είναι παραμετροποιημένη και συμβολίζεται με  $\xi$  (‘επικάλυψη σφαιριδίων’) όπου δίνεται από την ακόλουθη σχέση 3 :

$$\xi = \max(0, R_1 + R_2 - |r_2 - r_1|) \quad (3)$$

Για την ανάλυση των δυνάμεων και των ταχυτήτων σε αξονικές και διατμητικές (Εικόνα 26), χρησιμοποιούμε τα αντίστοιχα μοναδιαία διανύσματα  $n$  το οποίο είναι παράλληλο με την ευθεία που ενώνει τα κέντρα των δύο σφαιρών και  $s$  το οποίο είναι κάθετο στην ευθεία που ενώνει τα δύο κέντρα των σφαιρών και ορίζονται ως ακολούθως από τις σχέσεις 4 και 5 :

$$n = \frac{r_2 - r_1}{|r_2 - r_1|} = (n_x, n_y) \quad (4)$$

$$s = (n_y, -n_x) \quad (5)$$



Εικόνα 26 : Αξονικές και Διατμητικές Ταχύτητες και Δυνάμεις μεταξύ δύο σφαιρικών σωματιδίων (Spandonidis , 2013)

Έτσι, η σχετική αξονική ταχύτητα  $u_n$  και σχετική διατμητική ταχύτητα  $u_s$  δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις 6 και 7:

$$u_n = (v_2 - v_1) * n \quad (6)$$

$$u_s = (v_2 - v_1) * s + \omega_1 * R_1 + \omega_2 * R_2 \quad (7)$$

Εάν η διαμητική συνιστώσα της ταχύτητας  $u_s$  είναι ίση με το μηδέν στην αρχή μιας επαφής, τότε η επαφή είναι καθαρά αξονική, αλλιώς είναι εφαπτομενική ή λοξή.

#### 4.4.2 Αξονικές Δυνάμεις μεταξύ Κοκκωδών Σωματιδίων

Σε γενικές γραμμές, όταν δύο σφαίρες συγκρούονται, υποβάλλονται σε παραμόρφωση που θα είναι κάπου μεταξύ του απολύτως ανελαστική και τελείως ελαστικής. Πιθανοί μηχανισμοί για την απαγωγή (π.χ μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε άλλες μορφές ενέργειας, που τελικά μετατρέπονται σε θερμότητα) είναι η πλαστική παραμόρφωση, η ιξωδο-ελαστικότητα του υλικού, καθώς επίσης και τα ελαστικά κύματα προερχόμενα από την πρόσκρουση. Τα τελευταία είναι πάντα παρόν και προκαλούν το θόρυβο, αλλά μεταφέρουν τόσο λίγη ενέργεια που μπορεί κανείς να τα παραμελήσει γενικά ως πηγή διάχυσης.

Φαινομενολογικά, η ελαστικότητα των συγκρούσεων περιγράφεται από το συντελεστή αξονικής ελαστικότητας  $e_n$  (σχέση 8) όπου ο συντελεστής  $i$  αναφέρεται στην αρχική κατάσταση πριν τη σύγκρουση και ο συντελεστής  $f$  μετά τη σύγκρουση.

$$e_n = -\frac{u_n^f}{u_n^i} E[0,1] \quad (8)$$

Σύμφωνα με τον Johnson (1989), η απαραίτητη κρίσιμη ταχύτητα  $u_{yield}$  που προκαλεί πλαστική παραμόρφωση δίνεται από τις σχέσεις 9,10,11:

$$u_{yield}^2 = 107 * \frac{R_{eff}^3}{m_{eff}} * \frac{Y^5}{E_{eff}^4} \quad (9)$$

$$m_{eff} = \frac{m_1 * m_2}{m_1 + m_2} \quad (10)$$

$$R_{eff} = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} \quad (11)$$

όπου  $m_{eff}$  είναι η μειωμένη μάζα,  $R_{eff}$  η ακτίνα,  $Y$  είναι η αντοχή διαρροής του μαλακότερου των σφαιρών και ο συντελεστής  $E_{eff}$  σχετίζεται με το συντελεστή Young  $E$  και με το λόγο του συντελεστή Poisson  $\nu$  των δύο σφαιρών μέσω της σχέσης 12:

$$\frac{1}{E_{eff}} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (12)$$

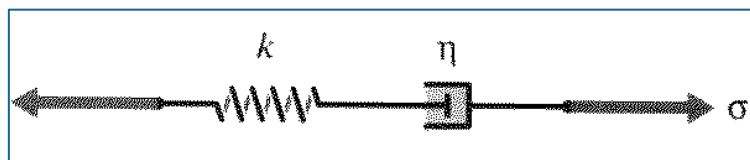
Αν  $u_n^i < u_{yield}$ , τότε δεν μπορεί να συμβεί πλαστική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της κρούσης και όλη απώλεια ενέργειας θα πρέπει να οφείλεται στη ιξωδο-ελαστικότητα. Από την άλλη μεριά, αν ισχύει  $u_n^i > u_{yield}$ , τότε η απώλεια ενέργειας λόγω πλαστικής παραμόρφωσης κυριαρχεί της απώλεια ενέργειας λόγω ιξωδο-ελαστικότητας. Τα περισσότερα υλικά έχουν κρίσιμη ταχύτητα  $u_{yield}$  η οποία είναι σχετικά μικρή (π.χ :  $u_{yield} = 0.14\text{m/s}$  για οξική κυτταρίνη και  $u_{yield} = 0.02\text{m/s}$  για το ατσάλι).

Για την περίπτωση της πλαστικής παραμόρφωσης, μια απλή θεωρία του Johnson (1989) προβλέπει τη μείωση του συντελεστή  $e_n$  κατά  $u_n^{i-1/4}$  με αύξηση της ταχύτητας κρούσης. Για την περίπτωση της απώλεια ενέργειας λόγω ιξωδο-ελαστικότητας, οι Kuwabara και Kono (1987) πρότειναν ένα συντελεστή αξονικής ελαστικότητας  $e_n$ , ο οποίος μειώνεται με την αύξηση  $u_n^i$ . Πειραματικές μελέτες των Goldsmith et al (1960), Bridges et al (1984), Kuwabara & Kono (1987) και Sondergaard et al. (1990) για μεγάλες σφαίρες που κατασκευάζονται από μια μεγάλη κατηγορία διαφορετικών υλικών, δείχνουν μια μικρή μείωση του  $e_n$  με την αύξηση  $u_n^i$ . Από την άλλη μεριά, οι μετρήσεις από τον Drake & Shreve (1986) και Foerster et al (1994) σε σφαίρες από οξική κυτταρίνη, δεν δείχνουν εξάρτηση του  $e_n$  και  $u_n^i$  για το εύρος των ταχυτήτων κρούσης που χρησιμοποιήθηκαν. Οι τιμές του συντελεστή είναι παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις.

Η μοντελοποίηση της δύναμης που οδηγεί σε ανελαστικές συγκρούσεις απαιτεί τουλάχιστον δύο όρους: άπωση και κάποιο είδος διάχυσης. Η απλούστερη δύναμη με τις επιθυμητές ιδιότητες είναι η αποσβενύμενη αρμονική δύναμη ταλάντωσης ελατηρίου η οποία υπολογίζεται από τη ακόλουθη σχέση (13):

$$F_n = -k_n * \xi - \gamma_n * \dot{\xi} \quad (13)$$

όπου  $\gamma_n$  είναι μία σταθερά απόσβεσης και  $k_n$  έχει σχέση με την ακαμψία ενός ελατηρίου του οποίου η επιμήκυνση είναι  $\xi$ , η παραμόρφωση του κόκκου.



Εικόνα 27 : Γραμμικό Μοντέλο Ελατήριο-Αποσβεστήρας

Αυτό το μοντέλο, που επίσης αναφέρεται ως γραμμικό μοντέλο ελατήριο-αποσβεστήρας (Εικόνα 27), έχει το πλεονέκτημα της αναλυτικής λύσης με αρχικές συνθήκες  $\xi(0) = 0$  και  $\dot{\xi}(0) = u_n^i$  και επιτρέπει το υπολογισμό σημαντικών ποσοτήτων. Για παράδειγμα, ο συντελεστής αξονικής ελαστικότητας  $e_n$  δίνεται από τη σχέση (14,15) :



$$e_n = \exp\left(-\frac{\gamma_n}{2m_{eff}} * t_n\right) \quad (14)$$

$$t_n = \pi\left(\frac{k_n}{m_{eff}} - \left(\frac{\gamma_n}{2m_{eff}}\right)^2\right)^{-1/2} \quad (15)$$

όπου  $t_n$  υποδηλώνει τη διάρκεια της σύγκρουσης. Η μέγιστη επικάλυψη κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης δίνεται από τη σχέση 16 :

$$\xi_{max} \leq \frac{u_n^i t_n}{\pi} \quad (16)$$

όπου η ισότητα ισχύει για ελαστικό σωματίδια ( $e_n = 1$ ). Μια ακριβής προσομοίωση (αναπαράγει την Αναλυτική έκφραση του συντελεστή  $e_n$  με σχετικά σφάλματα της τάξεως των  $10^{-4}$ ) απαιτεί ένα σταθερό χρονικό βήμα  $\Delta t = t_n / 100$ .

Κατ' αρχήν, η δύναμη (13) δεν έχει καμία ελεύθερη παράμετρος, αφού  $k_n$  και  $\gamma_n$  μπορούν να ρυθμιστούν για την προσαρμογή των συντελεστών  $e_n$  και  $t_n$  με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές που προκύπτουν από ένα δεδομένο υλικό σε ένα εύρος ταχύτητας για τις προσομοιώσεις. Λόγω των πλεονεκτημάτων της, η συγκεκριμένη δύναμη έχει χρησιμοποιηθεί σε πολυάριθμες μελέτες.

Για να διαμορφωθεί μια πιο αποτελεσματική υπολογίσιμη δύναμη από ότι η εξίσωση (13), μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τα αποτελέσματα της θεωρίας ελαστικής επαφής του Hertz (1882), η οποία προβλέπει την ακόλουθη απωστική δύναμη για την περίπτωση των σφαιρών (σχέση 17) :

$$F_n = -\widetilde{k}_n * \xi^{3/2} \quad (17)$$

Εδώ, η  $k_n$  συμβολίζει μια μη-γραμμική ακαμψία η οποία συνδέονται με τις ελαστικές ιδιότητες και με τις ακτίνες των σφαιρών μέσω της σχέσης 18 :

$$\widetilde{k}_n = \frac{4}{3} * \sqrt{R_{eff}} * E_{eff} \quad (18)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση ο χρόνος σύγκρουσης  $t_n$  δεν είναι πλέον ανεξάρτητος από τη ταχύτητα  $u_n^i$  και δίνεται από την ακόλουθη σχέση 19 :

$$t_n = 3,21 \left(\frac{m_{eff}}{k_n}\right)^{2/5} * u_n^i^{-1/5} \quad (19)$$

Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει εγγενής χρονοδιάγραμμα στις συγκρούσεις. Επίσης, παρατηρούμε ότι ο παράγοντας της απόσβεσής απουσιάζει από τη σχέση υπολογισμού της δύναμης.

Με σκοπό της δημιουργία μιας πιο αντιπροσωπευτική δύναμης τύπου Hertz (dissipative Hertz model) στη προηγούμενη σχέση προστέθηκε ο όρος της απόσβεσης και έτσι ο τύπος υπολογισμούς που προκύπτει είναι ο ακόλουθος (σχέση 20):

$$F_n = -\widetilde{k}_n * \xi^2 - \gamma_n \dot{\xi} \quad (20)$$

Ωστόσο, όπως ο Taguchi (1992) επεσήμανε, η δύναμη αυτή οδηγεί σε συγκρούσεις οι οποίες γίνονται πιο ελαστικές όταν η ταχύτητα σύγκρουσης αυξάνεται σε αντίθεση με την πειραματική απόδειξη:

$$(1 - e_n) \propto u_n^{i-1/5}$$

Για χαμηλές ταχύτητες σύγκρουσης, όπου τα αποτελέσματα Hertz για ελαστικές συγκρούσεις πρέπει να ανακτηθούν, η δύναμη που υπολογίζεται από τη σχέση 20 παράγει ένα συντελεστή ελαστικότητας που πλησιάζει τη τιμή μηδέν. Οπότε, συμπεραίνουμε ότι η παραπάνω σχέση δε δίνει και τόσο ρεαλιστικά αποτελέσματα για χαμηλές και υψηλές ταχύτητες.

Οι Kuwabara και Kono (1987) και Brillianton et al (1995), επέκτειναν την αρχική προσέγγιση Hertz υποθέτοντας ότι το υλικό είναι ιξωδο-ελαστικό αντί για ελαστικό, προτείνοντας την σχέση 21:

$$F_n = -\widetilde{k}_n * \xi^2 - \widetilde{\gamma}_n * \xi^2 * \dot{\xi} \quad (21)$$

όπου  $\widetilde{k}_n$  είναι ταυτόσημο με το  $\widetilde{k}_n$  από τη θεωρία του Hertz και το  $\widetilde{\gamma}_n$  είναι συνδεδεμένο με τις ακτίνες των σφαιρών και οι δύο συντελεστές ιξώδους του χύμα φορτίου. Αυτή η δύναμη οδηγεί σε συντελεστή ελαστικότητας  $e_n$  ο οποίος μειώνεται με την αύξηση  $u_n^i$  σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα:

$$(1 - e_n) \propto u_n^{i/5} \quad (22)$$

Η παραπάνω σχέση 21 μπορεί να δίνει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα αλλά παραμένει ακόμα μια εμπειρική σχέση.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα προσέγγιση που καθοδηγείται από την εικόνα της πλαστικής παραμόρφωσης παρουσιάστηκε από τους Walton & Braun (1986). Υποθέτουν ότι υπάρχουν διαφορετικές σταθερές του ελατηρίου,  $k_1$  και  $k_2$ , για τη φόρτιση και εκ φόρτιση και προτείνουν την σχέση 23:

$$F_n = \begin{cases} k_1 * \xi, \dot{\xi} \geq 0 \text{ (loading)} \\ k_2 * (\xi - \xi_0), \dot{\xi} \leq 0 \text{ (unloading)} \end{cases} \quad (23)$$

όπου  $\xi_0$  είναι η τιμή του  $\xi$  εκεί η καμπύλη εκφόρτωσης τέμνει την τετμημένη υπό δεδομένες περιστάσεις ή είναι η μόνιμη πλαστική παραμόρφωση. Σε αυτό το μοντέλο ο συντελεστής ελαστικότητας δίνεται από τη σχέση 24:

$$e_n = \sqrt{k_1/k_2} \quad (24)$$

Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ιδανικό όταν λαμβάνει χώρα πλαστική παραμόρφωση όπου  $\xi_0$  είναι η τιμή της μόνιμης παραμόρφωσης.

#### 4.4.3 Εγκάρσιες Δυνάμεις μεταξύ Κοκκωδών Σωματιδίων

Στη περίπτωση όπου η εγκάρσια ταχύτητα των σφαιρικών σωματιδίων  $u_n^i$  είναι μη μηδενική, τότε εμφανίζεται και μια μη μηδενική εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης ή αλλιώς διατμητική δύναμη. Σε γενικές γραμμές, η διατμητική δύναμη είναι συνδεδεμένη με την αξονική δύναμη μέσω τους νόμους τριβής του Coulomb, ως ακολούθως :

$$F_s \leq \mu_s * F_n \text{ for static friction } (u_s = 0) \quad (25)$$

$$F_s = \mu_d * F_n \text{ for dynamic friction } (u_s \neq 0) \quad (26)$$

όπου  $\mu_s$  και  $\mu_d$  είναι οι συντελεστές της στατικής και δυναμικής τριβής αντίστοιχα. Το σύμβολο  $\leq$  σημαίνει ότι στη περίπτωση της στατικής τριβής, η  $F_s$  αντισταθμίζει απόλυτα την εξωτερική δύναμη  $F_s^{ext}$  η οποία εφαρμόζεται στην επαφή οπότε  $u_s=0$ .

Εάν  $F_s^{ext} \geq \mu_s * F_n$  περνάμε στη δυναμική φάση και ισχύει η σχέση 26. Συνήθως,  $\mu_s > \mu_d$  και οι δύο συντελεστές είναι περίπου 0,5.

Η απλούστερη διατμητική δύναμη Haff (1986), σύμφωνα με το νόμο του Coulomb της δυναμικής τριβής, δίνεται από τη σχέση 27 :

$$F_s = -\mu * |F_n| * \text{sign } u_s \quad (27)$$

Προφανώς, αυτή η δύναμη δεν μπορεί να παράσχει τιμές σε περίπτωση αντιστροφής της εφαπτομενικής ταχύτητας. Μπορεί να επιβραδύνει μόνο στο μηδέν και είναι ασυνεχής σε  $u_s=0$ . Όταν  $u_s \rightarrow 0$ , η δύναμη  $F_s$  πηδάει από θετικές σε αρνητικές τιμές, χωρίς να παίρνει η τιμή μηδέν.

Μερικοί μελετητές, για να υπολογίσουν τη διατμητική δύναμη, έκανα χρήση της ακόλουθης σχέσης 28 :

$$F_s = -\gamma_s * u_s \quad (28)$$

όπου  $\gamma_s$  είναι η διατμητική σταθερά απόσβεσης χωρίς φυσική ερμηνεία. Η σχέση αυτή δίνει μη ρεαλιστικά αποτελέσματα για αξονικές και μη συγκρούσεις. Επίσης, ο πειραματικός υπολογισμός της διατμητικής σταθερά απόσβεσης είναι πολύ δύσκολος.

Η ασυνέχεια που παρατηρείται στη σχέση 27 της δύναμης, μπορεί να αποφευχθεί συνδυάζοντας τις σχέσεις 27 και 28 και έτσι προκύπτει η ακόλουθη σχέση 29 :

$$F_s = - \min(|\gamma_s * u_s|, |\mu * F_n|) * \text{sign } u_s \quad (29)$$

Στη σχέση αυτή, ο συντελεστής  $\gamma_s$  μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μια τεχνική παράμετρο η οποία θα πρέπει να έχει μία τιμή αρκετά υψηλή για ιδιότητες σύγκρουσης που δεν διαφέρουν σημαντικά από εκείνες τις εξισώσεις (27). Με την αύξηση του  $\gamma_s$ , η δύναμη που υπολογίζεται από τη σχέση 28 προσεγγίζει τη συμπεριφορά της δύναμης που υπολογίζεται από τη (27). Η ίδια τάση παρατηρείται για το  $e(\sin\theta)$ . Προφανώς, ένας μικρός συντελεστής  $\gamma_s$  αλλάζει κατά κύριο λόγο τις ιδιότητες των “πλαγίων” συγκρούσεων, καθιστώντας πιο ελαστικές. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μορφή της  $e(\sin\theta)$  είναι καθοριστική για την απαγωγή της θερμότητας των κόκκων σε ένα εκτεταμένο σύστημα κοκκωδών σφαιρών, φαίνεται πολύ σημαντικό το γεγονός το ότι στο συντελεστή  $\gamma_s$  δίνεται μια αρκετά υψηλή τιμή. Η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογισμού της δύναμης είναι μια από τις πιο δημοφιλέστερες που υπάρχουν.

Όλες οι προηγούμενες μέθοδοι υπολογισμού της επαπτόμενης δύναμης δεν λάμβαναν μέρος την επαπτομενική ελαστικότητα. Παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Cundall & Strack (1979), όπου μετέπειτα χρησιμοποιήθηκε και από πολλούς άλλους μελετητές και υπολογίσετέ από την ακόλουθη σχέση 30 :

$$F_s = - \min(|k_s * \zeta|, |\mu * F_n|) * \text{sign } \zeta \quad (30)$$

όπου  $k_s$  είναι η όποια διατμητική ευκαμψία και  $\zeta$  δηλώνει τη μετατόπιση στην κατεύθυνση της επαπτόμενης η οποία πραγματοποιήθηκε όταν ξεκίνησε η σύγκρουση για πρώτη φορά.

Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί υψηλή υπολογιστική προσπάθεια και δυσκολίες στο κώδικα αρχικοποίησης.

#### 4.5 Θεωρητικό Υπόβαθρο Κώδικα Προσομοίωσης για Ξηρά Κοκκώδη Σωματίδια

Κατά τη διάρκεια σύγκρουσης δύο σφαιρικών σωματιδίων στην αξονική διεύθυνση, θεωρούμε μη γραμμικές ελαστικές δυνάμεις και δυνάμεις τριβής ενώ εγκάρσια θεωρούμε ότι ενεργούν καθαρά δυνάμεις τριβής.

Πιο συγκεκριμένα, για τις αξονικές δυνάμεις έχουμε υιοθετήσει τη δύναμη σύμφωνα με το τύπο του Hertz (dissipative model-σχέση 31) για ιξώδη-ελαστικά υλικά η οποία έχει προταθεί από τον Brilliantov et al (1996) :

$$F_n = -\widetilde{k}_n * \xi^{\frac{3}{2}} - \gamma_n * \xi^{\frac{1}{2}} * \dot{\xi} \quad (31)$$

Όπου  $\gamma_n$  είναι η σταθερά απόσβεσης συνδεδεμένη με τις ακτίνες των σφαιρών και τους συντελεστές ιξώδους του φορτίου.  $\widetilde{k}_n$  είναι η μη γραμμική ακαμψία ενός ελατηρίου του οποίου η επιμήκυνση  $\xi$  (σχέση 32) είναι:

$$\xi = \max(0, R_i + R_j - |r_i - r_j|) \quad (32)$$

όπου  $\xi$  συνδέεται με τις ελαστικές ιδιότητες και τις ακτίνες των σφαιρικών σωματιδίων μέσω της ακόλουθης σχέσης (33) :

$$\widetilde{k}_n = 2 * Y * \frac{\sqrt{R_{eff}}}{3} (1 - \nu^2) \quad (33)$$

$Y$  συμβολίζει το μέτρο του Young και  $\nu$  το λόγο του Poisson. Η επιλογή αυτού του μοντέλου βασίζεται σε ένα συνδυασμό της υπολογιστικής της αξίας και των περιορισμών που προκύπτουν από τα άλλα μοντέλα. Συγκεκριμένα, το γραμμικό μοντέλο απόσβεσης-ελατηρίου περιορίζεται μόνο σε μικρές μεταβολές λόγω της γραμμικής υπόθεσης του. Το δεύτερο μοντέλο του Hertz, αγνοεί την απαγωγή της ενέργειας κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να προσπεραστεί προσθέτοντας το όρο της απόσβεσης, όπως έκαναν οι Wagg and Bishop (2000). Στο τρίτο μοντέλο (Hertz-dissipative model) ο όρος της απόσβεσης είναι γραμμικό και παρόλο που μπορεί να παράγει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τα προηγούμενα μοντέλα, παράγει μη ρεαλιστικά αποτελέσματα όταν πρόκειται για συγκρούσεις υψηλής ταχύτητας Schafer et al (1996). Αυτή η μη ρεαλιστική συμπεριφορά αποφεύγεται όταν ο dissipative όρος υιοθετεί τη μη γραμμική μορφή του τέταρτου μοντέλου Brillianton et al (1996). Το μοντέλο αρχικά αναπτύχθηκε για άκαμπτα σωματίδια καθώς είναι η περίπτωση της έρευνας μας και το πέμπτο μοντέλο μας αντανακλά μια πλαστική προσέγγιση παραμόρφωση (η οποία δεν είναι η περίπτωσή μας) και αγνοεί το διάχυση της ενέργειας.

Όσον αφορά την εγκάρσια δύναμη μεταξύ των κοκκωδών σωματιδίων (σχέση 34), υιοθετήθηκε το μοντέλο των Haff & Werner (1986):

$$F_t = - \min(\gamma_s |u_s|, \mu |F_n|) * \text{sign } u_s \quad (34)$$

$\gamma_s$  είναι η σταθερά απόσβεσης και  $u_s$  η συνιστώσα της διατμητικής ταχύτητας για τη δισδιάστατη περίπτωση και εκφράζεται ως (σχέση 35):

$$u_s = (u_i - u_j) * s + \omega_i * R_i + \omega_j * R_j \quad (35)$$

$\mu$  αντιπροσωπεύει το συντελεστή δυναμικής τριβής και  $s$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην ευθεία που ενώνει τα δύο κέντρα των σφαιρών. Το μοντέλο αυτό συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο πρώτων εγκάρσιων μοντέλων χωρίς τους περιορισμούς τους. Οι Kuwabara & Kono (1987), διαφωνούν ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, που

στηρίζονται στην εξίσωση, είναι σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα, όταν  $\gamma_s$  λαμβάνει υψηλές τιμές (π.χ. 20Ns / m).

Οι κινήσεις σωματιδίων διέπονται από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για τη μεταφορική και περιστροφική κίνηση τους (σχέση 36,37):

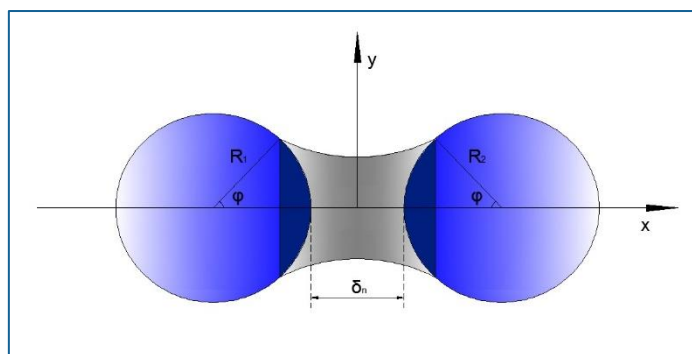
$$\frac{d^2 r_i}{dt^2} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{ij}(r_{ij}, u_i, u_j, \omega_i, \omega_j) \quad (36)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{1}{J_i} \sum_{j=1, j \neq i}^N M_{ij}(r_{ij}, u_i, u_j, \omega_i, \omega_j) \quad (37)$$

Η δύναμη  $F_{ij}$  και η ροπή  $M_{ij}$  που ενεργούν σε κάποια χρονική στιγμή σε ένα σωματίδιο  $i$  μάζας  $m_i$  και ροπή αδράνειας  $J_i$  είναι συναρτήσεις των αποστάσεων του ενός σωματιδίου  $i$  από το άλλο σωματίδιο  $j$  που βρίσκονται σε εγγύτητα, όπου  $u_i, u_j$  οι αντίστοιχες ταχύτητες και  $\omega_i, \omega_j$  οι γωνιακές ταχύτητες. Εάν θεωρούμαι μόνο σφαιρικά σωματίδια, ο γωνιακός προσανατολισμός τους δεν εισάγεται στον υπολογισμό.

#### 4.6 Θεωρητικό Υπόβαθρο Κώδικα Προσομοίωσης για Υγρά Κοκκώδη Σωματίδια

Όταν δύο σφαιρικά σωματίδια έρθουν σε επαφή σε περιβάλλον στο οποίο επικρατεί κάποιο ποσοστό υγρασίας, τότε ανάμεσα στα δύο σφαιρικά σωματίδια δημιουργείται ένα στρώμα υγρού ο λεγόμενος ‘μηνίσκος’ (εικόνα 28). Αυτό προκύπτει από μια ανεπάρκεια της πίεσης στον όγκο του υγρού και από την επιφανειακή τάση του υγρού που ενεργεί επί των δύο σφαιρών. Λόγω του ‘μηνίσκου’, δημιουργείται η δύναμη προσκόλλησης που έχουμε ήδη αναφέρει. Η δύναμη που δημιουργείται εξαρτάται από την απόσταση διαχωρισμού μεταξύ των σφαιρών και η υγρή γέφυρα θα είναι σταθερή μόνο μέχρι κάποια κρίσιμη απόσταση διαχωρισμού στη οποία θα επέλθει και η ρήξη της υγρής γέφυρας. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται σε μεγέθυνση ο μηνίσκος που δημιουργείται σε δύο σφαιρικά σωματίδια ίδιας διαμέτρου με ακτίνες  $R_1$  και  $R_2$  αντίστοιχα,  $\phi$  η γωνία πλήρωσης του μηνίσκου και  $\delta_n$  η απόσταση μεταξύ των δύο σφαιρικών σωματιδίων.

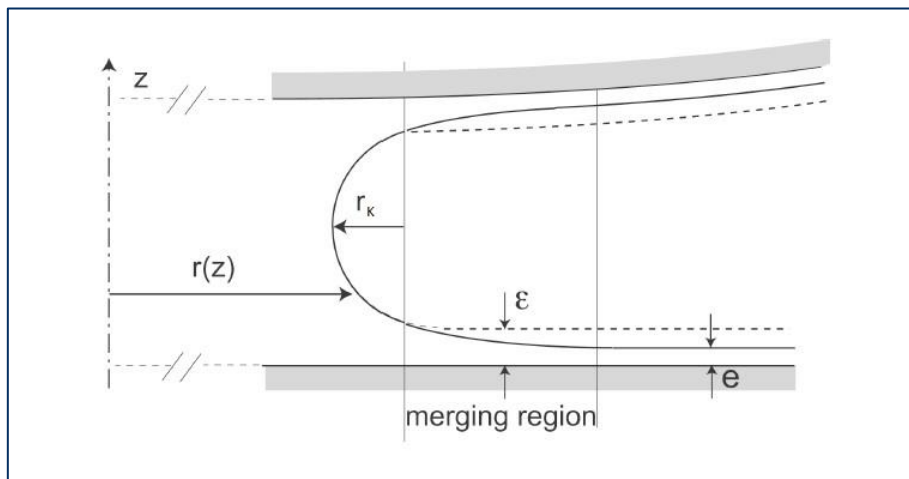


Εικόνα 28 : Μια συμμετρική υγρή γέφυρα ‘μηνίσκος’ μεταξύ δύο ίδιων σφαιρικών σωματιδίων με μη μηδενική γωνία επαφής

Στην περιοχή όπου ο μηνίσκος συγχωνεύεται με τη μεμβράνη διαβροχής (εικόνα 29), η αλληλεπίδρασή της με το στερεό τοίχωμα δεν είναι αμελητέα, και η πίεση στο υγρό είναι το άθροισμα της πίεσης αποσύνδεσης και της τοπικής τριχοειδής πίεσης (Crassous et al,2011). Η καμπυλότητα του μηνίσκου δεν είναι σταθερή και κυμαίνεται από  $r_c^{-1}$  σε 0. Αυτό οδηγεί σε μια τοπική πύκνωση της μεμβράνης διαβροχής ίση προς:

$$\varepsilon = e + \frac{W_{slv(e)}}{\Pi_{d(e)}} \quad (38)$$

έτσι ώστε η συνολική γεωμετρία είναι ισοδύναμη με ένα μηνίσκο σταθερής ακτίνας καμπυλότητας  $r_c$  συγχωνeuόμενο με μία μηδενική γωνία επαφής πάνω σε ένα εικονικό φιλμ πάχους  $\varepsilon$ .



Εικόνα 29 : Συγχώνευση του μηνίσκου με τη μεμβράνη διαβροχής ονομαστικού πάχους  $e$  μακριά από τη γέφυρα (όχι σε κλίμακα). Η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει ένα μηνίσκο κυκλικού σχήματος που συνδέεται επαπτομενικά σε ένα εικονικό υγρό φιλμ πάχους  $\varepsilon$ . (Crassous , 2011)

Η τριχοειδής δύναμη της εικόνας τότε λαμβάνεται δηλώνοντας ότι όταν τα εικονικά φιλμ έρχονται σε επαφή, η τριχοειδής δύναμης έχει τυπική τιμή (σχέση 39) για  $R \gg r_c$  με μηδενική γωνία επαφής:

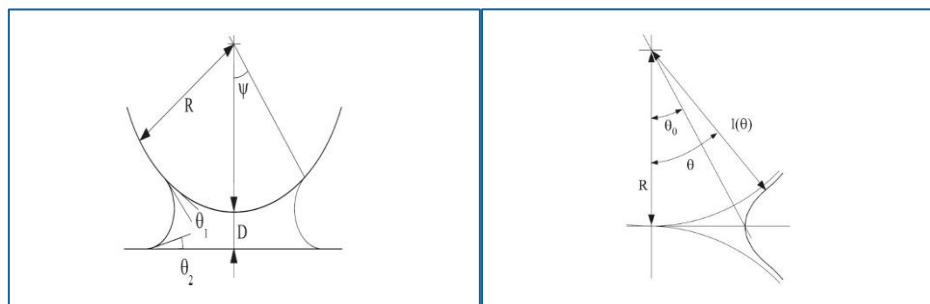
$$F_{cap(D=2e)} = 4(2)\pi\gamma_{lv}R \quad (39)$$

Εδώ ο αριθμός (2) μεταξύ των παρενθέσεων συμβολίζει τη περίπτωση σφαίρα-σφαίρα (SS). Καθώς η μεταβολή της τριχοειδούς δύναμης με την απόσταση είναι γραμμική, όταν  $R \gg r_c$ , η μέγιστη τριχοειδής δύναμη που λαμβάνεται σε επαφή (σχέση 40) είναι :

$$\frac{F_{sp(ss)}}{2\pi\gamma_{lv}R} = 2(1) \left[ 1 + \frac{\varepsilon}{r_k} \right] \quad (40)$$

όπου  $sp$  (αντίστοιχα SS) αναφέρεται στην γεωμετρία σφαίρας-επιπέδου (αντίστοιχα σφαίρα-σφαίρα) και ο αριθμός στην παρένθεση ξεχωρίζει για την (SS) περίπτωση (Εικόνα 30).

Αυτή η έκφραση της δύναμης προέκυψε από τους Christenson et al (1994) και Charlaix et al (2005).



Εικόνα 30 : (α) Υγρή γέφυρα μεταξύ σφαιρικού σωματιδίου και επιπέδου. (β) Υγρή γέφυρα μεταξύ σφαιρικών σωματιδίων ίδιας διαμέτρου .( Crassous , 2011)

Η βασική υπόθεση του Crassous et al (2011) όσον αφορά σφαιρικό σωματίδιο μικρής διαμέτρου είναι ότι η φυσική της συγχωνευμένης περιοχής δεν επηρεάζεται από τη πρόσθετη τρισδιάστατη καμπυλότητα. Η αξιμουθιακή καμπυλότητα μιας αξονοσυμμετρικής επιφάνειας που ορίζεται από το προφίλ του  $R(z)$  γύρω από τον Οζ άξονα, ίση με  $1/r(1+(dr/dz)^2)^{1/2}$  γίνεται πράγματι αμελητέα στη συγχωνευμένη περιοχή όπου  $dr/dz$  αποκλίνει. Ως εκ τούτου, όπως και στην δισδιάστατη περίπτωση, το σχήμα του μηνίσκου είναι ισοδύναμο με ένα μηνίσκο σταθερής μέσης καμπυλότητας  $1/r_k$  συγχωνευμένο με μια μηδενική γωνία επαφής σε στερεές εικονικές επιφάνειες που λαμβάνονται από τις πραγματικές με τη συμπλήρωσή τους με ένα στρώμα σταθερού πάχους  $\epsilon$ , όπως δίνεται από την εξίσωση 4. Αλλά τώρα η μέση καμπυλότητα  $1/r_k$  περιλαμβάνει την αξιμουθιακή καμπυλότητα.

Το πρόβλημα του αξονοσυμμετρικού μηνίσκου σταθερής μέσης καμπυλότητας μεταξύ σφαίρας και ενός επιπέδου έχει λυθεί από τον Orr et al (1975). Οι Crassous et al (2011) χρησιμοποίησαν τη λύση τους, λαμβάνοντας μια εικονική σφαίρα ακτίνας  $R + \epsilon$  ώστε να λάβει υπόψη τη συγχώνευση στην συμπληρωματική σφαίρα και μια απόσταση  $D - 2\epsilon$  μεταξύ των εικονικών επιφανειών. Η λύση από τους Orr et al (1975), εκφράζεται από την μέση αδιάστατη καμπυλότητα μηνίσκου  $HR$  (σχέση 41) όπου  $H = -1 / 2r_k$ , η γωνία  $\Psi$  πλήρωσης ορίζεται στο επίπεδο της γραμμής επαφής για τη σφαίρα, και  $\theta_1$  η γωνία επαφής στην σφαίρα και  $\theta_2$  η γωνία επαφής του επιπέδου:

$$2HR = \Psi \left[ \theta - \frac{1}{k} [E(\varphi_2, k) - E(\varphi_1, k)] + \frac{1-k^2}{k} [F(\varphi_2, k) - F(\varphi_1, k)] \right] \quad (41)$$

όπου :



$$\begin{aligned} \Psi &= 1/(\delta+1-\cos\psi) \\ \Theta &= -\cos(\theta_1+\psi)-\cos\theta_2 \\ \varphi_1 &= -(\theta_1+\psi)+\pi/2 \\ \varphi_2 &= \theta_2-\pi/2 \\ k &= 1/(1+c)^{1/2} \\ c &= 4H^2R^2\sin^2\psi - 4HR\sin\psi\sin(\theta_1+\psi) \\ H &= -1/2r_k \end{aligned}$$

και  $\delta = D / R$  είναι η μειωμένη απόσταση σφαίρας-επιπέδου και E, F είναι τα ελλiptικά ολοκληρώματα πρώτου και δεύτερου είδους. Η γεωμετρία της σφαίρας-επιπέδου αντιστοιχεί στην περίπτωση μας σε  $\theta_1 = \theta_2 = 0$ , ενώ η γεωμετρία σφαίρα-σφαίρα είναι  $\theta_1 = 0$  και  $\theta_2 = \pi / 2$ . Η τριχοειδής δύναμη είναι το άθροισμα της δύναμης τάσης και της τριχοειδή δύναμη πίεσης (σχέση 42):

$$F = 2\pi R\gamma_{lv}[\sin\psi \sin(\theta_1 + \psi) - HR\sin^2\psi] \quad (42)$$

Μέσω των παραπάνω εξισώσεων δε μπορεί να βρεθεί μια ακριβή αναλυτική λύση για την  $\psi$  ως συνάρτηση του  $r_k / R$  και ως εκ τούτου μια αναλυτική έκφραση της τριχοειδή δύναμη ως συνάρτηση του  $r_k / R$  και  $D / R$ . Οι Crassous et al (2011), για να προσεγγίσει την τριχοειδή δύναμη μέσω των παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται χρησιμοποίησε το λογισμικό Mathematica. Η σχέση εστιάζεται τόσο στη περίπτωση σφαίρα-σφαίρα όσο και στη περίπτωση σφαίρα-επιφάνεια. Η σχέση που προκύπτει είναι η ακόλουθη (σχέση 43):

$$\frac{F}{2\pi R\gamma_{lv}} = \alpha_0 \left(1 - \frac{D}{2r_k}\right) + \alpha_1 \left(1 + \frac{D}{4r_k}\right) \left(\frac{r_c}{R}\right)^{1/2} + \alpha_2 \frac{r_k}{R} \quad (43)$$

όπου οι τιμές των συντελεστών  $\alpha_0, \alpha_1$  και  $\alpha_2$  δίνονται στον ακόλουθο πίνακα 2. Η μέγιστη δύναμη προκύπτει όταν τα δύο σωματίδια είναι σε επαφή και αντικαθιστώντας το R με R+ε και το D με -2ε και είναι η ακόλουθη (σχέση 44) :

$$\frac{F_{cap}}{2\pi R\gamma_{lv}} = \alpha_0 \left(1 + \frac{\varepsilon}{r_k}\right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{\varepsilon}{2r_k}\right) \left(\frac{r_c}{R}\right)^{1/2} + \alpha_2 \frac{r_k}{R} \quad (44)$$

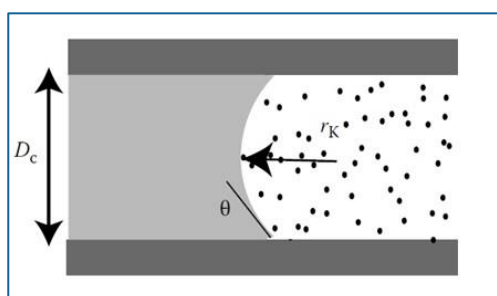
	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_0$
Sphere-Plane	2	$-(\pi)/(4)=-0,7854$	$-(\pi^2)/(64)=-0,1542$	2
Sphere-Sphere	1	$-(\pi)/(4(2)^{1/2})=-0,555$	$1/2-(\pi^2)/(64)=0,346$	$(2)^{1/2}$

Πίνακας 2 :Αριθμητικές Τιμές των Συντελεστών των Εξισώσεων της Τριχοειδής Δύναμης

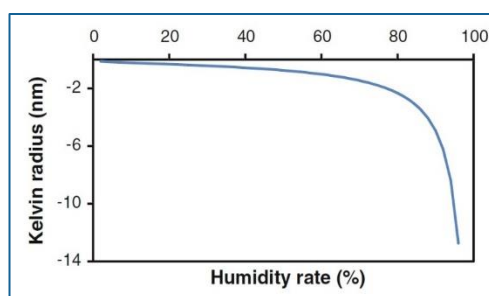
Όπως ήδη έχουμε αναφέραμε σε προηγούμενα κεφάλαια, διάφορα μοντέλα υπάρχουν για να περιγράψουν την μείωση της ελκτικής δύναμης, που συνδέεται με το ποσοστό υγρασίας, όταν τα δύο σφαιρικά σωματίδια κινούνται χώρια. Οι δύο κύριες θεωρίες είναι είτε μια εκθετική αποσύνθεση Soulie et al (2006) και Mikami et al (1998) ή ένα γραμμικό μοντέλο Charlaix et al (2005). Δεδομένου ότι η εκθετική αποσύνθεση πραγματικά δεν ορίζει μια μέγιστη τιμή

μετά από την οποία μπορούμε να πούμε ότι δεν υπάρχει ελκτική δύναμη μεταξύ των δύο σφαιρών, προτιμήσαμε να χρησιμοποιήσουμε το μη γραμμικό μοντέλο. Απλά πρέπει να βρεθεί η μέγιστη τιμή της ελκτικής δύναμης η οποία είναι συναρτήσει της  $f_0$  και της κλίσης μείωσης της. Η εύρεση των δύο τιμών γίνεται μέσω της ποσοτικοποίηση σύμφωνα με τον Charlaix et al (2005).

Αρχικά, είναι γνωστό ότι η ελκτική δύναμη εξαρτάται από την ακτίνα του Kelvin  $r_k$  η οποία συνδέεται με το ποσοστό υγρασίας όπως φαίνεται στην εικόνα 31 και 32. Αν λάβουμε υπόψη μόνο αυτή τη βασική «γεωμετρική» αλληλεπίδραση, μπορούμε να υπολογίσουμε το εύρος της ακτίνας το οποίο είναι της τάξης των 15 nm. Αν συγκρίνουμε το εύρος αυτό με το εύρος των υάλινων σφαιριδίων που χρησιμοποιούνται από τον Gómez et al (2012), το οποίο κυμαίνεται από 500 μm έως 2 χιλιοστά τότε παίρνουμε μια αναλογία της τάξεως  $\sim 0,003\%$ . Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτή η αλληλεπίδραση είναι συγκριτικά πολύ μικρότερη από το κανονικό φάσμα των πιθανών επικαλύψεων που παράγονται στο μαλακό σφαιρικό μοντέλο DEM (συνήθως χαμηλό ποσοστό %).



Εικόνα 31 : Ακτίνα Kelvin μεταξύ δυο επιφανειών Oger , (2013)

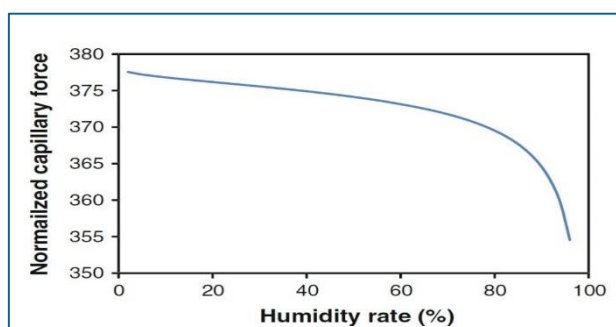


Εικόνα 32 : Η ακτίνα του Kelvin  $r_k$  (nm) συναρτήσεαι του ποσοστού υγρασίας (%) όπως προέκυψε από τα πειράματα των Luc Oger et al (2013)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι Charlaix et al (2005) έχουν προτείνει ένα πολύ απλό μοντέλο με την ακριβή έκφραση της ελκτικής δύναμης με βάση τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί μεταξύ δύο συγκρουόμενων σφαιρών. Με σκοπό την προσαρμογή του τύπου του Charlaix et al (2005), στην περίπτωση των Oger et al (2013), απεικόνισαν τη μέγιστη ελκτική δύναμη όταν τα σωματίδια αποχωρίζονται, έναντι του ποσοστού υγρασίας (εικόνα 33). Φυσικά, αυτός ο επιπλέον όρος αφορά το μη επικαλυπτόμενο μέρος σύγκρουσης μεταξύ των δύο σφαιρών, στο οποίο υποθέτουμε ότι η κλίση αρχίζει τη μέγιστη τιμή  $f_m$  στο τέλος της αλληλεπικάλυψης της επαφής και μειώνεται στο μηδέν. Η μέγιστη δύναμη  $f_m$  ακολουθεί την παρακάτω εξίσωση (σχέση 45):

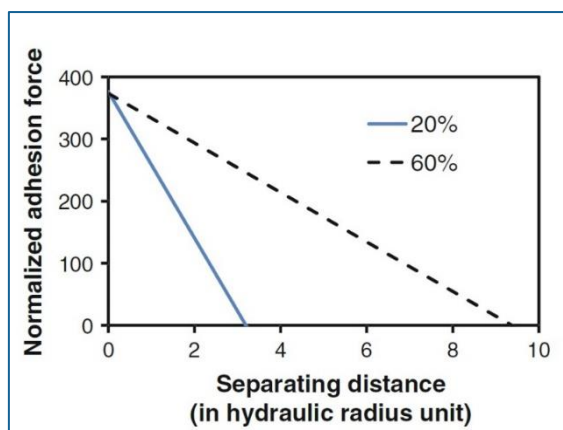
$$f_m = f_0(a_0 + a_1\sqrt{r_k} + a_2 * r_k) \quad (45)$$

όπου οι τιμές των τριών σταθερών συντελεστών είναι  $a_0 = 1$ ,  $a_1 = -0,555$  και  $a_2 = 0,346$  όπως καθορίστηκαν από τον Crassous et al (2011) και προβάλλονται στο πίνακα 2.

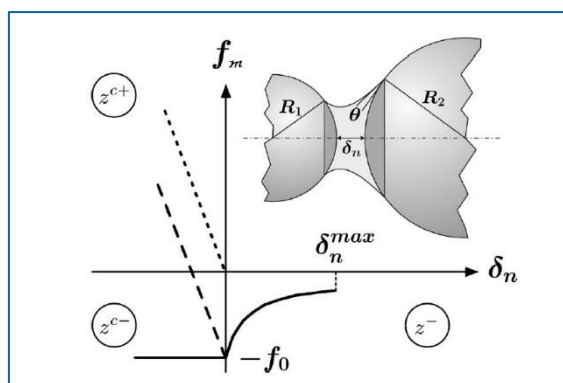


Εικόνα 33 : Μέγιστη δύναμη προσκόλλησης συναρτήσει της  $f_0$  και του ποσοστού υγρασίας (%) όπως προέκυψε από τα πειράματα των Luc Oger · Ana M. Vidales · Rodolfo O. Uñac.( Oger , 2013)

Για να έχουμε μια σαφή εικόνα της ελκτικής δύναμης σε σχέση με την απόσταση των δύο σφαιρών εκτός από το καθαρό σημείο επαφής, οι Oger et al (2013), έχουν σχεδιάσει την εξέλιξη της δύναμης για δύο διαφορετικά ποσοστά υγρασίας (εικόνα 34,35). Στη πραγματικότητα δεν μπορούμε να παρατηρούμε μεγάλη διαφορά για τη μέγιστη τιμή των  $f_m$  αλλά μπορούμε να δούμε μια μεγάλη διαφορά αμέσως μετά που η απόσταση των δύο σφαιρών  $\delta_n$  γίνεται θετική. Μπορούμε επίσης, να παρατηρήσουμε ότι η μέγιστη απόσταση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο σφαιρών που συνδέεται με τον όρο προσκόλλησης που προέρχεται από το ποσοστό υγρασίας RH είναι της τάξης των λίγων τοις εκατό της ακτίνας σφαίρας (δηλαδή έως και 10 φορές η υδραυλική ακτίνα), της ίδιας τάξης όταν η αλληλεπίδραση  $\delta$  είναι αρνητική.



Εικόνα 34 : Η δύναμη προσκόλλησης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των σφαιρικών σωματιδίων και για διαφορετικά ποσοστά υγρασίας 20% και 60% αντίστοιχα όπως προέκυψε από τα πειράματα των Luc Oger · Ana M. Vidales · Rodolfo O. Uñac. .( Oger , 2013)



Εικόνα 35 : Τυπική συμπεριφορά ελκτικής δύναμης συναρτήσει της απόστασης των δύο σφαιρικών σωματιδίων. . ( Oger , 2013)

Η απόσταση μεταξύ των επιφανειών των σωματιδίων δίνεται από τη συνάρτηση  $\xi$ . Για να υπάρχει προσέγγιση των σφαιρικών σωματιδίων θα πρέπει αυτή η συνάρτηση να μικραίνει μέχρι ένα σημείο όπου μηδενίζεται, δηλαδή να έχουμε επαφή. Κατά τη διάρκεια της επαφής παίρνει αρνητικές τιμές και μειώνεται μέχρι ένα ελάχιστο σημείο. Από αυτό το σημείο και έπειτα αυξάνεται μέχρι να γίνει μηδέν (επαφή και πάλι των επιφανειών) παίρνει θετικές τιμές και στη συνέχεια αυξάνεται καθώς τα σωματίδια απομακρύνονται. Στη συγκεκριμένη εργασία, όσον αφορά τις δυνάμεις μεταξύ των σφαιρικών σωματιδίων, θεωρούμε τα ακόλουθα :

1. Όταν τα σφαιρικά σωματίδια ταξιδεύουν αντίθετα με σκοπό να συγκρουστούν, δεν ενεργεί καμία δύναμη μεταξύ τους εκτός φυσικά της βαρύτητας.
2. Όταν συγκρουστούν να σφαιρικά σωματίδια, ενεργούν μόνο οι δυνάμεις κρούσης και όχι ελκτικές δυνάμεις λόγω υγρασίας.
3. Όταν τα σφαιρικά σωματίδια μετά τη κρούση, αρχίσουν να αποχωρίζονται, τότε εφαρμόζεται η ελκτική δύναμη λόγω υγρασίας και στα δύο σωματίδια.
4. Για να ισχύει η ελκτική δύναμη μεταξύ των σφαιρικών σωματιδίων, πρέπει πρώτα τα σφαιρικά σωματίδια να έρθουν σε επαφή.

Στο αριθμητικό του μοντέλο, οι Richefeu et al (2006), χρησιμοποίησαν το κλασικό μοντέλο που περιγράφεται από Richefeu et al (2006) και Soulie et al (2006), όπου η δύναμη είναι συνάρτηση της υγρής γέφυρας μεταξύ των δύο σφαιρών και του μέγεθος της και όταν οι δύο σφαίρες είναι σε επαφή (απόσταση κέντρων  $\delta = 0$ ) δεν εξαρτάται από το όγκος της υγρής γέφυρας, αλλά μόνο από την επιφανειακή τάση του υγρού  $\gamma_s$ , τη γωνία διαβροχής του υγρού  $\theta$  και τις ακτίνες των δύο σφαιρών. Κατά συνέπεια, όταν η απόσταση μεταξύ δύο σφαιρών ( $\delta \leq 0$ ) μπορεί να θεωρηθεί μικρή σε σύγκριση με τις διαμέτρους των σφαιρών, το πλάτος της δύναμης δίνεται από την ακόλουθη Σχέση 2:

$$f_0 = -k * R \quad (2)$$

όπου  $R$  είναι η διάμετρος των σφαιρών και  $k = 2\pi * \gamma_s * \cos \theta$  με  $\gamma_s$  επιφανειακή τάση και  $\cos \theta$  περίπου ίσο με 0,60.

Οι Anand et al (2009), ερεύνησαν τις παραμέτρους που επηρεάζουν την ταχύτητα εκκένωσης ενός υγρού συνεκτικού συστήματος από μια τρισδιάστατη ορθογώνια χοάνη με τη χρήση του DEM με τη μέθοδο μοριακής δυναμικής (molecular dynamics). Για τον υπολογισμό των δυνάμεων συνοχής ακολούθησαν την κλασική φόρμουλα των Richefeu et al (2006) και Soulie et al (2006). Οι παραδοχές που χρησιμοποίησαν στην μελέτη τους και μπορούμε να τις ακολουθήσουμε και εμείς είναι οι ακόλουθες :

- Το συνολικό υγρό περιεχόμενο του συστήματος διανέμεται έτσι ώστε κάθε σωματίδιο έχει ένα σταθερό πάχος του υγρού γύρω από αυτό
- Όταν δύο σωματίδια έρχονται σε επαφή, μια υγρή γέφυρα σχηματίζεται μεταξύ τους
- Όταν τα σωματίδια βρίσκονται σε διαρκή επαφή, στα σωματίδια δρα μια δύναμη ελατηρίου, μια δύναμη τριβής, και μια ελκυστική συνεκτική δύναμη λόγω της σχηματισμένης υγρής γέφυρας
- Η τιμή της συνεκτικής δύναμης παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της επαφής
- Όταν τα σωματίδια χωριστούν μετά την επαφή, μόνο η δύναμη της βαρύτητας και η ελκυστική δύναμη λόγω της σχηματισμένης υγρής γέφυρας δρα στην κανονική κατεύθυνση.

Παρατήρησαν ότι η επίδραση του υγρού περιεχομένου εξαρτάται από τον αριθμό των δεσμών μεταξύ των σωματιδίων. Για χαμηλό αριθμό δεσμών, πανομοιότυπα ποσοστά εκκένωσης ελήφθησαν, παρά τις μεταβαλλόμενες τιμές του υγρού περιεχομένου. Αυτό το αποτέλεσμα επιβεβαιώνει ότι το χαμηλό ποσοστό υγρασίας δεν έχει καμία σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά μιας κοκκώδους ροής.

## ΜΕΡΟΣ II : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

---

### Κεφάλαιο 5

#### Περιγραφή Κώδικα Προσομοίωσης

##### 5.1 Εισαγωγή

---

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται ο κώδικας προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς των σωματιδίων κατά τη διάρκεια του φαινομένου της ρευστοποίησης φορτίου. Ο συγκεκριμένος κώδικας θα γραφτεί σε γλώσσα προγραμματισμού C++ διότι είναι μια σχετικά εύκολη γλώσσα, ευρέως γνωστή στο συγκεκριμένο μελετητικό κοινό που ασχολείται με το συγκεκριμένο φαινόμενο και τέλος υποστηρίζεται από πολλά προγράμματα προσομοίωσης. Ο κώδικας βασίζεται στην ντετερμινιστική μέθοδο *molecular dynamics* και έχει ήδη αναπτυχθεί στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής για την περίπτωση ξηρού φορτίου (Spondonidis & Spyrou, 2013) σε γλώσσα προγραμματισμού C++. Πριν παρουσιαστεί ο κώδικας που κατασκευάστηκε, κρίθηκε σωστό να αναφερθούν κάποιες αρχικές διαδικασίες πάνω στις οποίες θα βασιστεί ο συγκεκριμένος κώδικας.

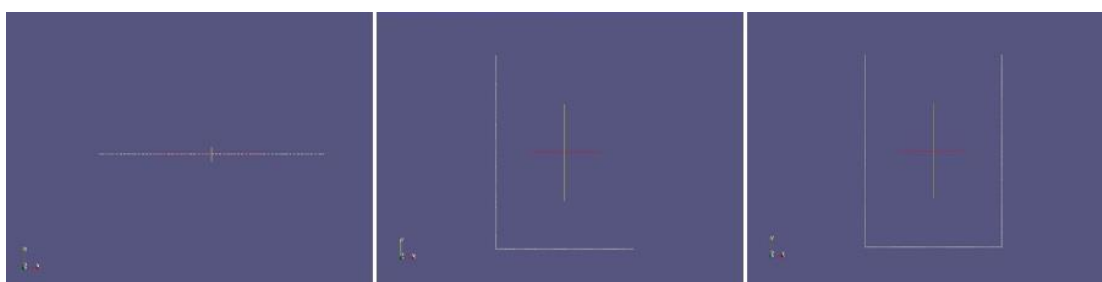
##### 5.2 Κατασκευή Δεξαμενής Προσομοίωσης Κοκκωδών Σωματιδίων

---

Όσον αφορά τη δεξαμενή που θα χρησιμοποιήσουμε στο κώδικα προσομοίωσης που θα κατασκευάσουμε, θεωρούμε ότι είναι μία ορθογώνια, λεία και άκαμπτη δεξαμενή την οποία και γεμίζουμε μερικώς με ξηρά σφαιρικά σωματίδια. Το σύστημα συντεταγμένων τοποθετείται στην αριστερή κάτω γωνία της δεξαμενής μας. Η δεξαμενή μπορεί να κινηθεί ελεύθερα σε κάθε διεύθυνση ανάλογα με την διέγερση που επιθυμούμε. Για τη κατασκευή της δεξαμενής μας, ακολουθώντας τη μέθοδο των Schafer et al (1996) και γενικά την τυπική πρακτική, χρησιμοποιούμε τα ίδια τα σωματίδια για να χτίσουμε τα τοιχώματα της και την τραχύτητα των επιφανειών. Αρχικά, πρέπει να κατασκευαστεί συγκεκριμένος αλγόριθμος προγραμματισμού για το χτίσιμο της δεξαμενής και πρέπει να δοθούν όλα τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων που εξετάζονται, τα οποία είναι: η μάζα τους, το Young Modulus, ο συντελεστής  $A$ , ο συντελεστής τριβής  $\mu$ , ο συντελεστής απόσβεσης  $\gamma$ , το χρονικό βήμα και η συνολική διάρκεια των επαφών μεταξύ των σωματιδίων. Αφού δοθούν οι παραπάνω τιμές,

τότε ο αλγόριθμος αρχίζει και χτίζει τη δεξαμενή από σωματίδια με μια συγκεκριμένη διαδικασία.

Ο κώδικας περιλαμβάνει αλγόριθμους όπου βοηθούν να χτιστεί η δεξαμενή για κάθε άξονα συντεταγμένων ξεχωριστά. Ο αλγόριθμος χτίζει τη βάση της δεξαμενή κατά των άξονα x ο οποίος αποτελείται από 103 σφαιρικά σωματίδια  $i$ , το οποίο το καθένα αναπτύσσεται κατά απόσταση  $0,003 \cdot i$  από το κέντρο του προηγούμενου και με τις υπόλοιπες συντεταγμένες να είναι μηδενικές. Μόλις τελειώσει το χτίσιμο του άξονα x τότε ξεκινώντας από το θέση  $x=0$  αρχίζει με τον ίδιο τρόπο να χτίζεται το αριστερό μέρος και τέλος από τη τελευταία θέση  $x=0.306$  αρχίζει και χτίζεται το δεξιό μέρος της δεξαμενής μας.



Εικόνα 36 : Δεξαμενή Προσομοίωσης Δυναμικής Συμπεριφοράς Κοκκωδών Σωματιδίων

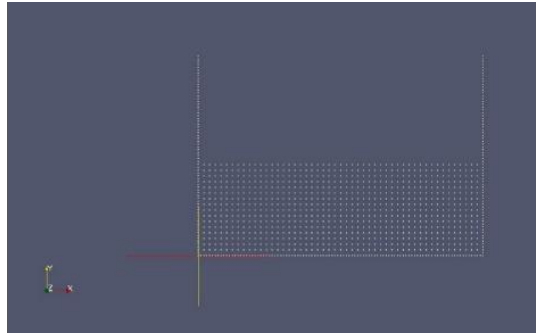
Τα σωματίδια τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε στη προσομοίωση μας είναι σφαίρες οξική κυτταρίνης διαμέτρου 6mm και στον ακόλουθο πίνακα βρίσκονται τα χαρακτηριστικά του υλικού τους.

Parameter	Unit	Value	Parameter	Unit	Value
Diameter	mm	6	Young Modulus	N/m <sup>2</sup>	$3,2 \times 10^6$
Density	gr/cm <sup>3</sup>	1,319	Coulomb Friction		0,22
Poisson Ratio		0,28	Shear Damping	N s/m	20

Πίνακας 3 : Αριθμητικές τιμές για τους συντελεστές των σωματιδίων.

Εφόσον έχουμε κατασκευάσει τη δεξαμενή και ξέρουμε τα σωματίδια που θα χρησιμοποιήσουμε, μπορούμε να τα τοποθετήσουμε ανά στήλη ξεκινώντας από την αρχή του άξονα x και κάθε στήλη αποτελείται από 18 σωματίδια.





Εικόνα 37 : Δεξαμενή Προσομοίωση με τοιχώματα κατασκευασμένα από σωματίδια.

Επομένως, η δεξαμενή που τελικά κατασκευάσαμε και θα χρησιμοποιήσουμε στη προσομοίωση μας, θα έχει συνολικό μήκος 0,306 μέτρα και ύψος 0,306 μέτρα. Ο αριθμός των σωματιδίων τα οποία τοποθετήθηκαν εντός της δεξαμενής είναι 784 και έχουν ύψος 0,108 μέτρα. Όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια, σε πολλές περιπτώσεις προσομοίωσης, αναγκαστήκαμε να μεγαλώσουμε τα πλαϊνά μέρη της δεξαμενής ούτως ώστε να μη βγαίνουν εκτός τα σφαιρικά σωματίδια λόγω υψηλών ταχυτήτων που αναπτύσσουν.

### 5.3 Κλίμακα Πραγματικού Πλοίου-Δεξαμενής

Κάτι το πολύ σημαντικό που πρέπει να αναφερθεί, είναι οι διαστάσεις της δεξαμενής μας σε σχέση με αυτές που αναμένονται σε ρεαλιστικά σενάρια δεξαμενών φορτηγών πλοίων μεταφοράς φορτίου χύδην. Για να μπορέσουμε να κάνουμε μια αντιστοιχία, θα πρέπει να υπολογιστεί η αδιάστατη συχνότητα  $\omega$  η οποία πρέπει να είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις (πειραματική δεξαμενή και πραγματικό πλοίο). Η αδιάστατη συχνότητα υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση 46 :

$$\omega * \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (46)$$

επομένως αν θεωρήσουμε  $\omega_1$  και  $l_1$  την κυκλική συχνότητα και το πλάτος του πλοίου αντίστοιχα,  $\omega_2$  και  $l_2$  την κυκλική συχνότητα και το πλάτος της δεξαμενής μας αντίστοιχα και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $g=9.81\text{m/sec}^2$ ), τότε πρέπει να ισχύει η ακόλουθη ισότητα 47:

$$\omega_1 * \sqrt{\frac{l_1}{g}} = \omega_2 * \sqrt{\frac{l_2}{g}} \quad (47)$$

Εάν γνωρίζουμε το πλάτος ενός συνήθους πλοίου, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συχνότητα διέγερσής του που αναλογεί στην συχνότητα που διεγείρουμε τη δεξαμενή.

Όσον αφορά την αντιστοιχία στο πλάτος της διέγερσης, αυτή δίνεται από τη σχέση 48:

$$\frac{\zeta_1}{l_1} = \frac{\zeta_2}{l_2} \quad (48)$$

$\zeta_1, \zeta_2$  το πλάτος διέγερσης τη δεξαμενής και του πλοίου αντίστοιχα και  $l_1, l_2$  το πλάτος της δεξαμενής και του πλοίου αντίστοιχα.

#### 5.4 Περιγραφή Διαδικασίας Προσομοίωσης

Οι κινήσεις που θα προσομοιωθούν μέσω του κώδικα που κατασκευάσαμε είναι η γωνία ηρεμίας (Angle of Repose), ο διατοιχισμός (Roll) και η εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση (Sway).

Για το υπό εξέταση υλικό, πραγματοποιείται μία σειρά προσομοιώσεων όσον αφορά τη γωνία ηρεμίας (Angle of Repose), τη κίνηση του διατοιχισμού (Roll) και της εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης (Sway). Διάφορα ποσοστά υγρασίας εξετάζονται και συγκεκριμένα οι τιμές κυμαίνονται από 10% έως 70% αφού αν το ποσοστό υγρασίας υπερβεί το 70% τότε από τη pendular state (τα σωματίδια συγκρατούνται μεταξύ τους με γέφυρες υγρού στο σημείο επαφής τους) στην οποία βρίσκονται τα σφαιρικά σωματίδια, μεταβαίνει στη funicular state (ορισμένοι πόροι είναι πλήρως κορεσμένοι με υγρό, αλλά ακόμα εκεί παραμένουν κενά που γεμίζουν με αέρα) κάτι το οποίο ξεφεύγει από το πλαίσιο μελέτης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

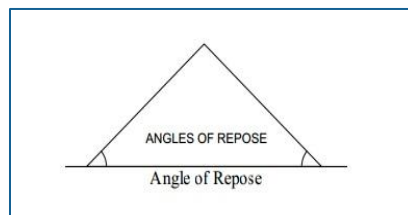
Για κάθε κίνηση που μελετήσαμε, εκτελέσαμε μία σειρά προσομοιώσεων αλλάζοντας κάθε φορά τη συχνότητα διέγερσης, το πλάτος της διέγερσης και την ταχύτητα της γωνίας κλίσης. Συγκεκριμένα, για τον έλεγχο της γωνίας ηρεμίας (Angle of Repose), η ταχύτητα της γωνίας κλίσης της δεξαμενής παίρνει τιμές 0.30 μ/δ, 1.00 μ/δ, 3.00 μ/δ και 6.00 μ/δ. Για κάθε ταχύτητα εκτελείται και διαφορετικό πείραμα για όλο το εύρος τιμών της υγρασίας. Ο χρόνος τρεξίματος (time steps) της κίνησης ποικίλει ανάλογα με τη ταχύτητα της γωνίας κλίσης και κυμαίνεται από 70.000 time steps έως 2.680.000 time steps. Για την κίνηση διατοιχισμού Roll, το εύρος συχνοτήτων κυμαίνεται από 0.1 έως 3.0Hz με βήμα 0.2 και με πλάτος, που στην ουσία αντιστοιχεί στη γωνία κλίσης, από 10° έως 40° με βήμα 10°, αντίστοιχα. Για την κίνηση Sway, το εύρος συχνοτήτων κυμαίνεται από 0.1 έως 3.0Hz με βήμα 0.2 ίδιο στην ουσία με τη κίνηση Roll και το εύρος του πλάτους κυμαίνεται από 0.02 έως 1.00cm. Η διάρκεια του κάθε πειράματος και στις δύο κινήσεις είναι 10 δευτερόλεπτα περίπου 100.000 time step.

Πριν από την έναρξη των προσομοιώσεων, θεωρούμε σωστό να ηρεμήσουμε τα σωματίδια εντός της δεξαμενής ούτως ώστε η αρχική τους κινητικότητα, αφού τα τοποθετήσουμε εντός της δεξαμενής, να μην επηρεάσει τα αποτελέσματα μας. Τα σωματίδια εντός της δεξαμενής ηρεμούν για περίπου είκοσι δευτερόλεπτα και έπειτα εξάγουμε το τελικό αρχείο που θα χρησιμοποιήσουμε στο τρέξιμο του κώδικα.

## 6.1 Γωνία Ηρεμίας (Angle of Repose)

## 6.1.1 Εισαγωγή

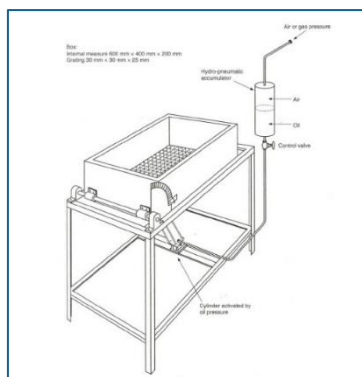
Η γωνία ηρεμίας είναι μια από τις πιο σημαντικές μακροσκοπικές παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά του κοκκωδών υλικών και ορίζεται ως η μέγιστη γωνία κλίσης του μη συνεκτικού κοκκώδους υλικού. Μετριέται ως η γωνία μεταξύ ενός οριζοντίου επιπέδου και της κλίσης του κώνου που σχηματίζεται από το εν λόγω υλικό (εικόνα 38).



Εικόνα 38 : Γωνία μεταξύ ενός οριζοντίου επιπέδου και της κλίσης του κώνου

Σχετίζεται με πολλά σημαντικά φαινόμενα όπως η κατακρήμνιση, η διαστρωμάτωση και ο διαχωρισμός και είναι επομένως εστία έρευνας για πολλά χρόνια. Έχει βρεθεί ότι η γωνία κλίσεως εξαρτάται έντονα από ιδιότητες των υλικών, όπως τη τριβή ολίσθησης, της πυκνότητας των σωματιδίων και τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων όπως το μέγεθος και το σχήμα. Ο IMO Solid Bulk Cargoes Code απαιτεί τον καθορισμό της γωνία ηρεμίας καθώς και διάφορες άλλες ιδιότητες του φορτίου. Η γωνία ηρεμίας είναι ενδεικτική της μη συνεκτικής σταθερότητα του φορτίου και η τιμή της καθορίζει ποιες διατάξεις του κώδικα πρέπει να εφαρμοστούν.

Η προτεινόμενη μέθοδος του IMO ονομάζεται “tilting box test” και προσδιορίζει τη γωνία ηρεμίας των κοκκωδών υλικών για μέγεθος μικρότερο από 10 χιλιοστών. Η συσκευή απεικονίζεται παρακάτω, στην κορυφή της οποίας τοποθετείται η δεξαμενή διαστάσεων 600 χιλιοστά μήκος, 400 χιλιοστά πλάτος και 200 χιλιοστά ύψος (εικόνα 39). Η κλίση του κιβωτίου πραγματοποιείται μέσω ενός υδραυλικού κυλίνδρου που τοποθετείται μεταξύ του πλαισίου και το κάτω μέρος της δεξαμενής. Άλλα μέσα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ληφθεί η απαιτούμενη κλίση αλλά σε όλες τις περιπτώσεις πρέπει να εξαλειφθεί η όποια δόνηση μπορεί να υπάρχει. Το ποσοστό της κλίσης πρέπει να είναι περίπου 0.3 μ/δ.



Εικόνα 39: ‘‘Tilting Box Test’’(IMSBC)

Η δεξαμενή είναι γεμάτη με το υλικό που πρόκειται να ελεγχθεί το οποίο χύνεται αργά και προσεκτικά από το χαμηλότερο ύψος στη δεξαμενή προκειμένου να επιτύχει ομοιομορφία της φόρτωσης. Η περίσσεια υλικού αποξέεται με τη βοήθεια μιας ευθείας ακμής, κεκλιμένη κατά περίπου 45° προς τη κατεύθυνση της απόξεσης. Το σύστημα κλίσεως στη συνέχεια ενεργοποιείται και σταματά όταν το υλικό μόλις αρχίζει να ολισθαίνει. Η γωνία της κορυφής της δεξαμενής προς την οριζόντια μετρείται από το μοιρογνωμόνιο και καταγράφεται.

Εναλλακτική μέθοδος ή η ‘‘shipboard test’’ μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της γωνίας ηρεμίας αναπαύσου όταν η μέθοδος ‘‘tilting box test’’ δεν είναι διαθέσιμη.

Ο απαραίτητος εξοπλισμός για τη διεξαγωγή της δοκιμής ‘‘shipboard test’’ διεξάγεται με τα ακόλουθα:

- Οριζόντιο τραπέζι χωρίς κραδασμούς.
- Ένα φύλλο σκληρό και τραχύ χαρτί πάνω στο οποίο το υλικό θα πρέπει να χύνεται.
- Ένα μοιρογνωμόνιο
- Ένα 3-λίτρων κωνική φιάλη.

Τοποθετούμε το φύλλο χαρτιού πάνω στο τραπέζι. Διασπάμε 10L του υλικού που πρόκειται να δοκιμαστεί σε τρεις υπο-δείγματα και δοκιμάζεται το καθένα με τον ακόλουθο τρόπο:

Ρίχνουμε τα δύο τρίτα του υπο-δείγματος (δηλαδή 2 λίτρα) επί του φύλλου, που παράγει ένα κώνο. Το υπόλοιπο υλικό (δηλαδή 1 λίτρο) στη συνέχεια χύνεται πολύ προσεκτικά από ύψος λίγων χιλιοστών πάνω από το κώνο. Θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε ο κώνος θα πρέπει να δημιουργηθεί συμμετρικά. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με περιστροφή της φιάλης αργά κοντά γύρω από την κορυφή του κώνου κατά την έκχυση. Κατά τη μέτρηση, θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε το μοιρογνωμόνιο δεν αγγίζει τον κώνο, αλλιώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ολίσθηση του υλικού και να χαλάσει τη δοκιμή. Η γωνία πρέπει να μετράτε σε τέσσερα σημεία γύρω από τον κώνο, περίπου 90 μοιρών. Αυτή η δοκιμή θα πρέπει να

επαναληφθεί για τις άλλες δύο υπο-δείγματα. Ακόμα και αν αυτές οι δύο μέθοδοι είναι επαρκείς για το προσδιορισμό της γωνίας ηρεμίας, δε παύουν να είναι άκρως εμπειρικές και δε μπορούν να χειριστούν περιπτώσεις όπου η δυναμική συμπεριφορά είναι παρούσα. Ο Burkalow (1945) σε πειράματα που διεξήγαγε διαπίστωσε ότι η γωνία ηρεμίας μειώνεται όταν αυξάνεται η πυκνότητα των σφαιρικών σωματιδίων. Τέλος, ο Dorbolo (2005) διαπίστωσε ότι η γωνία ηρεμίας αυξάνεται όταν ο λόγος του πλάτους της δεξαμενής προς τη διάμετρο σωματιδίου μειώνεται.

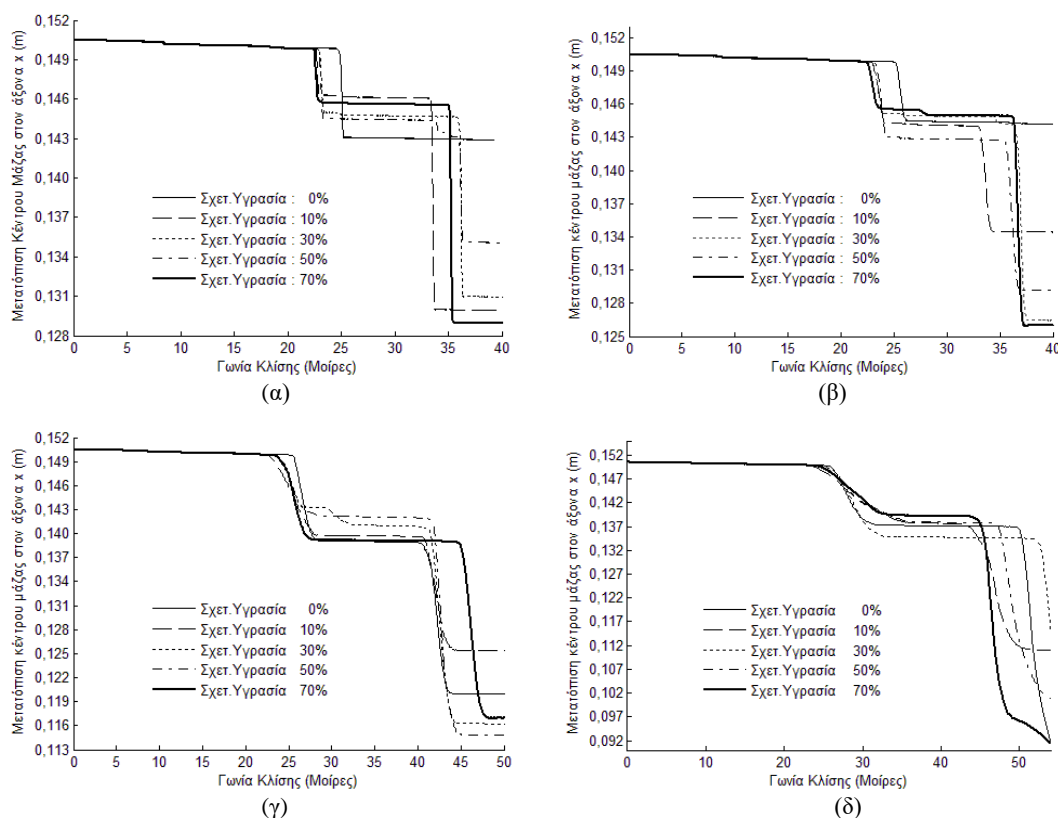
Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζουμε την απόκριση των σφαιρικών σωματιδίων εντός της δεξαμενής στην περίπτωση της γωνίας ηρεμίας. Οι μεταβλητές μας είναι οι ακόλουθες:

α) το ποσοστό υγρασίας (0-70%)

β) ταχύτητα γωνίας κλίσης δεξαμενής (0.30 μ/δ, 1.00 μ/δ, 3.00 μ/δ, 6.00 μ/δ)

### 6.1.2 Αποτελέσματα Γωνίας Ηρεμίας

Αφού εκτελέσουμε τον κώδικα για τιμές της γωνίας ηρεμίας 0.30, 1.00, 3.00 και 6.00 μοίρες ανά δευτερόλεπτο, κατασκευάζουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα 1α, 1β, 1γ και 1δ, τα οποία παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σφαιρικών σωματιδίων στο άξονα x, στη περίπτωση χωρίς υγρασία και για ποσοστά υγρασίας 10%, 30%, 50% και 70%.



Διάγραμμα 1 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για ποσοστά υγρασίας 0%, 10%, 30%, 50%, 70% και για ταχύτητα γωνίας κλίσης (α) 0,30 μ/δ (β) 1.00 μ/δ (γ) 3.00 μ/δ (δ) 6.00 μ/δ

Από την εξέταση των διαγραμμάτων 1α, 1β,1γ και 1δ, μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα :

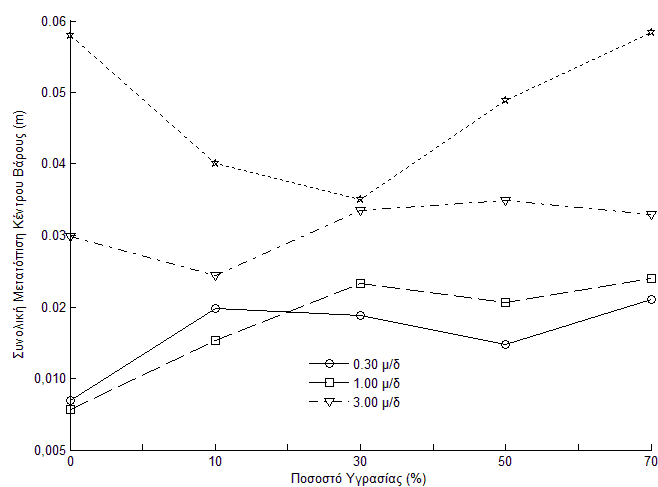
1. Με τη προσθήκη υγρασίας στα σφαιρικά σωματίδια, παρατηρούμε ότι αρχίζουν να ολισθαίνουν σε μικρότερη γωνία κλίσης από ότι στη περίπτωση με μηδενική υγρασία δηλαδή σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα. Το φαινόμενο παρατηρείται και στις τρεις περιπτώσεις που εξετάσαμε, δηλαδή ανεξάρτητα από τη τιμή της ταχύτητα γωνίας κλίσης της δεξαμενής.
2. Η γωνία που συμβαίνει η πρώτη κατακρήμνιση στη περίπτωση για ταχύτητα 0.30 μ/δ είναι 24.74 μοίρες ενώ στις περιπτώσεις όπου είναι η υγρασία παρούσα, η γωνία μειώνεται στις 22.23 μοίρες περίπου δηλαδή παρατηρείται μια διαφορά περίπου 2.51 μοίρες. Η διαφορά αυτή μειώνεται στις 2.04 μοίρες στη περίπτωση για ταχύτητα γωνίας κλίσης 1.00 μ/δ ενώ για την ίδια ταχύτητα κλίσης και για υγρασία 70%, παρατηρούμε μεγαλύτερη διαφορά στις γωνίες περίπου 3 μοίρες. Για ταχύτητα γωνίας κλίσης 3.00 μ/δ, η διαφορά μεταξύ των γωνιών, πλησιάζει κατά πολύ τη περίπτωση της ταχύτητας 1.00 μ/δ ενώ για 6.00 μ/δ, η διαφορά είναι πολύ ελάχιστη σχεδόν αμελητέα.
3. Όταν η υγρασία δεν είναι παρούσα ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια, τότε στις περιπτώσεις ταχύτητας γωνίας κλίσης 0.30 μ/δ και 1.00 μ/δ, συμβαίνει μόνο μια κατακρήμνιση των σφαιρικών σωματιδίων στις 24.74 μοίρες και στις 25.14 μοίρες αντίστοιχα, όποτε τα σωματίδια μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μετά το πέρας της κατακρήμνισης έχουν σταθεροποιηθεί.
4. Στη περίπτωση ταχύτητας γωνίας κλίσης 3.00 μ/δ και 6.00 μ/δ, παρατηρούμε ότι στη περίπτωση απουσίας υγρασίας ανάμεσα στα σωματίδια, πραγματοποιείται και μια δεύτερη,εξίσου σημαντική κατακρήμνιση των σφαιρικών σωματιδίων στις 41.10 μοίρες και 49.74 μοίρες αντίστοιχα.
5. Για ταχύτητα γωνίας κλίσης 0.30 μ/δ, η πρώτη κατακρήμνισή είναι μεγαλύτερη από όλες τις αντίστοιχες για ποσοστά υγρασίας, ενώ στις υπόλοιπες ταχύτητες γωνίας κλίσης που εξετάζουμε, βρίσκεται σχεδόν στα ίδια επίπεδα με τις περιπτώσεις υγρασίας.
6. Η τιμή της μετατόπισης του κέντρου βάρους για ταχύτητα γωνίας κλίσης 1.00 μ/δ χωρίς παρουσία υγρασίας στη πρώτη κατακρήμνιση, κυμαίνεται περίπου στα ίδια επίπεδα με αυτή για υγρασία 10%,50% και 70%, ενώ είναι λίγο μικρότερη από τη τιμή για υγρασίας 50%, οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι όταν υπάρχει υγρασία στο φορτίο τότε η πρώτη κατακρήμνιση είναι εξίσου σημαντική αλλά όχι και τόσο λόγω του ότι λαμβάνει χώρα σε μικρή σχετικά γωνία κλίσης του πλοίου.

7. Σε όλες τις περιπτώσεις ταχύτητας γωνίας κλίσης που εξετάζουμε και σε όλες τις περιπτώσεις υγρασίας, εκτός από τη πρώτη κατακρήμνιση που πραγματοποιείται, λαμβάνει χώρα μια δεύτερη κατακρήμνιση σφαιρικών σωματιδίων, η οποία είναι εξίσου σημαντική και πολύ μεγαλύτερη σε τιμή από τη πρώτη.
8. Η γωνία εμφάνισης των δεύτερων κατακρημνίσεων στις περιπτώσεις ταχύτητας γωνίας κλίσης 0.30 μ/δ και 1.00 μ/δ, κυμαίνεται από 32 μοίρες μέχρι 36 μοίρες για όλες τις περιπτώσεις υγρασίας που μελετάμε.
9. Στη περίπτωση ταχύτητας γωνίας κλίσης 3.00 μ/δ, παρατηρούμε ότι οι δεύτερες κατακρημνίσεις πραγματοποιούνται σε πολύ μεγαλύτερες γωνίες κλίσης από ότι στις προηγούμενες περιπτώσεις και κυμαίνονται από 41 μέχρι 45 μοίρες. Συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι για τις περιπτώσεις μη ύπαρξης υγρασίας και για ποσοστό υγρασίας 10%, 50% και 70%, η γωνία δεύτερης κατακρήμνισης είναι περίπου 41.10 μοίρες ενώ όταν το ποσοστό αυξηθεί σε 70% η γωνία αυξάνεται σε 44.84 μοίρες.
10. Στη περίπτωση ταχύτητας γωνίας κλίσης 6.00 μ/δ, ομοίως παρατηρούμε ότι οι δεύτερες κατακρημνίσεις πραγματοποιούνται σε πολύ μεγαλύτερες γωνίες κλίσης από ότι στις προηγούμενες περιπτώσεις και κυμαίνονται από 44 μέχρι 51 μοίρες και ότι τη μεγαλύτερη γωνία κατακρήμνισης την έχουμε όταν δεν είναι παρούσα η υγρασία και για ποσοστό 30% με τιμή 50 και 52 μοίρες αντίστοιχα.
11. Για ταχύτητα γωνίας κλίσης 0.30 μ/δ, η δεύτερη κατακρήμνιση στις περιπτώσεις υγρασίας 50% και 70%, συμβαίνουν νωρίτερα από τις υπόλοιπες με αποτέλεσμα τα σφαιρικά σωματίδια να σταθεροποιούνται πολύ πιο γρήγορα ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις υγρασίας αυτό συμβαίνει σε μεγαλύτερες γωνίες κλίσης περίπου 36 μοίρες, κάτι το οποίο είναι αρνητικό φυσικά.
12. Για ταχύτητα γωνίας κλίσης 1.00 μ/δ, σε όλες τις περιπτώσεις υγρασίας τα σωματίδια σταθεροποιούνται στην ίδια γωνία περίπου 37 μοίρες, με εξαίρεση τη περίπτωση υγρασίας 10% όπου σταθεροποιούνται λίγο νωρίτερα και σε αντίθεση με τη περίπτωση ταχύτητας γωνίας κλίσης 3.00 μ/δ, όπου σε όλες τις περιπτώσεις υγρασίας τα σωματίδια σταθεροποιούνται στην ίδια γωνία με εξαίρεση τη περίπτωση για υγρασία 70% όπου σταθεροποιούνται περίπου 6 μοίρες αργότερα ενώ για ταχύτητα 6.00 μ/δ, μέχρι τη γωνία που εξετάσαμε δεν παρατηρήσαμε σταθεροποίηση των σωματιδίων πάρα μόνο στη περίπτωση για υγρασία 10%.
13. Στη περίπτωση όπου η ταχύτητα γωνίας κλίσης είναι 3.00 μ/δ και 6.00 μ/δ, οι δεύτερες κατακρημνίσεις πραγματοποιούνται σε μεγάλες γωνίες, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο όταν εξετάζουμε την ευστάθεια ενός πλοίου, αφού το πλοίο έχει ήδη αναπτύξει μεγάλη γωνία κλίσης και μια επιπρόσθετη μετατόπιση φορτιού θα του επιφέρει επιπλέον σημαντικά προβλήματα στη δυναμική του συμπεριφορά και κατ' επέκταση στην ευστάθεια του.



14. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα γωνίας κλίσης της δεξαμενής, παρατηρούμε ότι η κλίση της ευθείας της μετατόπισης του κέντρου βάρους γίνεται πιο ομαλή, κάτι το οποίο σημαίνει ότι τα σωματίδια δεν πέφτουν τόσο απότομα και το ένα παρασέρνει το άλλο λόγω της ελκυστικής δύναμης που αναπτύσσεται μεταξύ τους.

Επιθυμώντας να βγάλουμε κάποια συγκεντρωτικά συμπεράσματα, όσον αφορά την εξέταση της γωνίας ηρεμίας στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, κατασκευάζουμε το ακόλουθο διάγραμμα 2, όπου παριστάνει τη συνολική μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για ταχύτητες γωνίας κλίσης 0.30 μ/δ, 1.00 μ/δ, 3.00 μ/δ και 6.00 μ/δ στις περιπτώσεις υγρασίας 0% ,10%, 30%, 50% και 70%.



Διάγραμμα 2 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για ταχύτητα γωνίας κλίσης 0.30 μ/δ , 1.00 μ/δ , 3.00 μ/δ και 6.00 μ/δ και υγρασία 0%,10%,30%,50% και 70%.

Από την εξέταση του διαγράμματος 2, οδηγούμαστε στα ακόλουθα συμπεράσματα :

1. Όσο αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας στα σφαιρικά σωματίδια και αυξάνεται και η ταχύτητα κλίσης της δεξαμενής, τότε η μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων αυξάνεται ανάλογα, οπότε κάλλιστα μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα όσον αφορά την ευστάθεια ενός πλοίου που είναι φορτωμένο με εμπόρευμα που υπόκειται στη περίπτωση που εξετάζουμε.
2. Όταν η υγρασία δεν είναι παρούσα ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια, παρατηρούμε ότι η συνολική κατακρήμνιση του κέντρου βάρους είναι μεγαλύτερη στη περίπτωση για ταχύτητα γωνίας κλίσης 1.00 μ/δ από ότι για 0.30μ/δ, ενώ στη περίπτωση για ταχύτητα γωνίας κλίσης 3.00 μ/δ και 6.00 μ/δ, η συνολική μετατόπιση του κέντρου βάρους είναι αρκετά μεγαλύτερη και συγκεκριμένα έχει μετατοπιστεί κατά 3 και 5.7

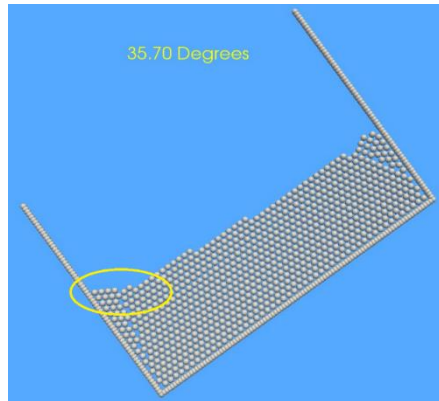
εκατοστά αντίστοιχα, σε αντίθεση με τις μικρότερες ταχύτητες όπου έχουμε μετατόπιση λιγότερη από 1 εκατοστό.

3. Για ποσοστό υγρασίας 10%, παρατηρούμε αύξηση της συνολικής μετατόπισης του κέντρου βάρους των σωματιδίων στις περιπτώσεις ταχύτητας 0.30μ/δ και 1.00 μ/δ και η τιμή της είναι μεγαλύτερη στη πρώτη περίπτωση περίπου 2 εκατοστά ενώ στη δεύτερη αγγίζει τη τιμή του 1.5 εκατοστού όπου και οι δύο περιπτώσεις είναι τριπλάσιες από τη περίπτωση χωρίς υγρασία.
4. Στη περίπτωση τώρα για ταχύτητα 3.00μ/δ η συνολική μετατόπιση του κέντρου βάρους για υγρασία 10%, είναι η μικρότερη που παρατηρείται για όλες τις περιπτώσεις υγρασίας και μη, είναι της τάξεως των 2.5 εκατοστών, μικρότερη από την αντίστοιχη για ταχύτητα 6.00 μ/δ και μεγαλύτερη κατά 23% περίπου σε σχέση με τη περίπτωση για ταχύτητα 0,30 μ/δ και 60% περίπου για τη περίπτωση για ταχύτητα 1,00 μ/δ.
5. Όταν το ποσοστό υγρασίας ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια αυξηθεί, τότε παρατηρούμε ότι η συνολική μετατόπιση του κέντρου βάρους στη περίπτωση ταχύτητας γωνίας κλίσης 1.00 μ/δ γίνεται μεγαλύτερη από ότι στη περίπτωση 0.30 μ/δ και η ευθεία που απεικονίζει τη μετατόπιση ακολουθεί σχεδόν την ίδια πορεία.
6. Από υγρασία 30% μέχρι 70% μεταξύ των σφαιρικών σωματιδίων, στις δύο πρώτες περιπτώσεις ταχύτητας γωνίας κλίσης, παρατηρούμε ότι η συνολική μετατόπιση του κέντρου βάρους στη δεύτερη περίπτωση είναι μεγαλύτερη, σε ποσοστό που κυμαίνεται από 20% έως και 40%.
7. Η μέγιστη τιμή της συνολικής μετατόπισης του κέντρου βάρους στη περίπτωση για ταχύτητα γωνίας κλίσης 0.30 μ/δ, παρατηρείται για ποσοστό υγρασίας 70% και είναι 2.1 εκατοστά, η οποία είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από τη τιμή για ποσοστό υγρασίας 10%. Για ποσοστό υγρασίας 50%, παρατηρούμε μια μείωση στη μετατόπιση του κέντρου βάρους που πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι πριν την κατακρήμνιση στις 36 μοίρες, πραγματοποιείται μια μικρότερη στις 33.85 μοίρες με μετατόπιση περίπου 1.5 χιλιοστό και λογικά τα σωματίδια ολισθαίνουν τμηματικά δηλαδή ένας μικρό αριθμός στην αρχή και στη συνέχεια τα υπόλοιπα.
8. Η μέγιστη τιμή της συνολικής μετατόπισης του κέντρου βάρους στη περίπτωση για ταχύτητα γωνίας κλίσης 1.00 μ/δ, παρατηρείται για ποσοστό υγρασίας 70% και είναι 2.4 εκατοστά, η οποία είναι σχεδόν ίδια με τη τιμή για ποσοστό υγρασίας 30% και περίπου 17% μεγαλύτερη από τη περίπτωση για υγρασία 50%.
9. Στη περίπτωση όπου η ταχύτητα γωνίας κλίσης είναι 3.00 μ/δ, παρατηρούμε ότι με αύξηση του ποσοστού υγρασίας πάνω από 10% αρχίζει και αυξάνεται η συνολική μετατόπιση του κέντρου βάρους και μετά από ποσοστό 30% υγρασία σταθεροποιείται.

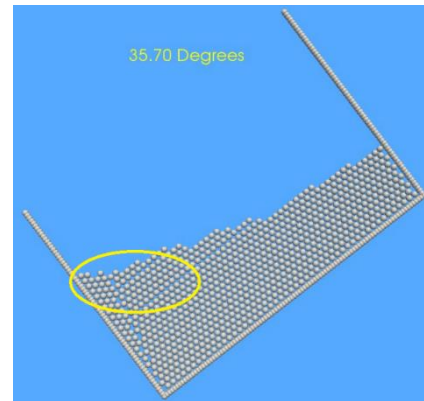
10. Για ταχύτητα γωνίας κλίσης 6.00 μ/δ, παρατηρούμε ότι με τη προσθήκη υγρασίας ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια δεν παρουσιάζεται καμία αλλαγή όσον αφορά τη συμπεριφορά των σφαιρικών σωματιδίων πάρα μόνο μια μείωση της συνολικής μετατόπισης και για το μέγιστο ποσοστό υγρασίας 70%, που εξετάζουμε έχουν παρόμοια μετατόπιση και συμπεριφορά.
11. Η μέγιστη τιμή της συνολικής μετατόπισης του κέντρου βάρους για ταχύτητα γωνίας κλίσης 3.00 μ/δ, λαμβάνει τη τιμή των 3.5 εκατοστών για ποσοστό υγρασίας 50% ενώ τα ποσοστά 30% και 70% κυμαίνονται σε λίγο μικρότερα επίπεδα.
12. Η μεγαλύτερη συνολική μετατόπιση παρατηρείται για ποσοστό 70% υγρασία και ταχύτητα 3.00 μ/δ και παίρνει τη τιμή των 3.5 εκατοστών. Είναι η μεγαλύτερη από κάθε άλλη περίπτωση που έχουμε μελετήσει μέχρι τώρα χωρίς να υπολογίζουμε τη τιμή για ταχύτητα 6.00 μ/δ αφού δεν παρουσιάζει διαφορά με τη περίπτωση χωρίς υγρασία.. Οι αντίστοιχες τιμές για μικρότερες ταχύτητες κλίσης είναι 2.1 εκατοστά για 0.30μ/δ και 2.4 εκατοστά για 1.00 μ/δ.
13. Η συνολική μετατόπιση του κέντρου βάρους των σφαιρικών σωματιδίων στις περιπτώσεις ταχύτητας γωνίας κλίσης 0.30 μ/δ και 1.00μ/δ, παρατηρούμε ότι παρουσιάζει μεγάλη διαφορά στη περίπτωση υγρασίας και μη και συγκεκριμένα με τη προσθήκη 70% υγρασίας στα σωματίδια και στις δύο περιπτώσεις ταχύτητας, έχουμε μεγαλύτερη μετατόπιση των σφαιρικών σωματιδίων κατά 1.5 εκατοστά και 1.9 εκατοστά αντίστοιχα.
14. Στη περίπτωση ταχύτητας γωνίας κλίσης 3.00 μ/δ, παρατηρούμε μεν μια αύξηση στη μετατόπιση του κέντρου βάρους λόγω υγρασίας αλλά αν υπολογίσουμε τη τιμή της μετατόπισης θα διαπιστώσουμε ότι δεν είναι και τόσο σημαντική η διαφορά. Συγκεκριμένα, με τη προσθήκη υγρασίας 50%, όπου παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή μετατόπισης, έχουμε συνολική μετατόπιση κέντρου βάρους 3.5 εκατοστά ενώ στη περίπτωση χωρίς υγρασία έχουμε 3.0 εκατοστά.
15. Σε υψηλές ταχύτητες γωνίας κλίσης, παρατηρούμε ότι η προσθήκη υγρασίας στα σφαιρικά σωματίδια δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη κίνηση των σωματιδίων, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις για χαμηλή ταχύτητα γωνίας κλίσης όπου η διαφορά είναι σημαντική.

Στην εικόνα 40 και 41, απεικονίζεται στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους για ταχύτητα γωνίας κλίσης 0,30 μ/δ και 1.00 μ/δ αντίστοιχα, για τη περίπτωση 0% και 70% υγρασία αμέσως μετά το πέρας της κατακρήμνισης των σφαιρικών σωματιδίων. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, τα σφαιρικά σωματίδια έχουν σταθεροποιηθεί (μέχρι τη γωνία κλίσης που εξετάζουμε) πολύ νωρίτερα φυσικά στη περίπτωση χωρίς υγρασία και μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι με τη προσθήκη υγρασίας ανάμεσα στα

σωματίδια, ένας πολύ μεγαλύτερος αριθμός σωματιδίων μετακινούνται προς το αριστερό μέρος της δεξαμενής, κάτι το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο αυτό πρέπει να συνυπολογιστεί στο παράγοντας ευστάθειας.

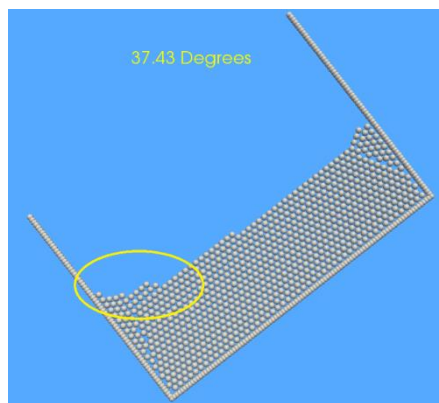


(α)

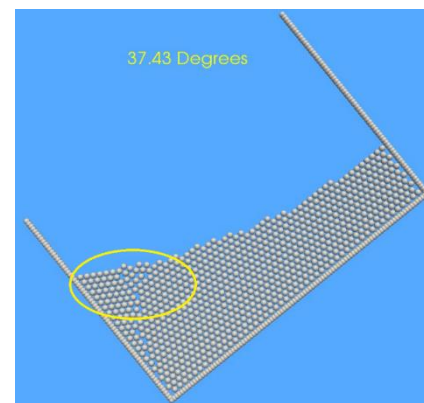


(β)

Εικόνα 40 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπιση κέντρου βάρους για ταχύτητα γωνίας κλίσης 0,30 μ/δ (α) υγρασία 0% στις 35.70° (β) υγρασία 70% στις 35.70°

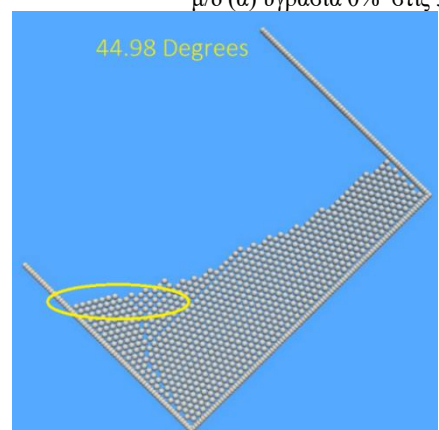


(α)

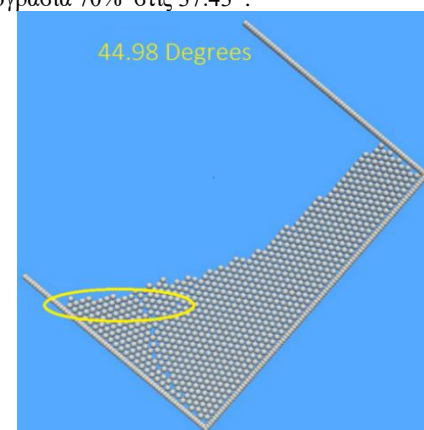


(β)

Εικόνα 41: Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπιση κέντρου βάρους για ταχύτητα γωνίας κλίσης 1.00 μ/δ (α) υγρασία 0% στις 37.43° (β) υγρασία 70% στις 37.43°.



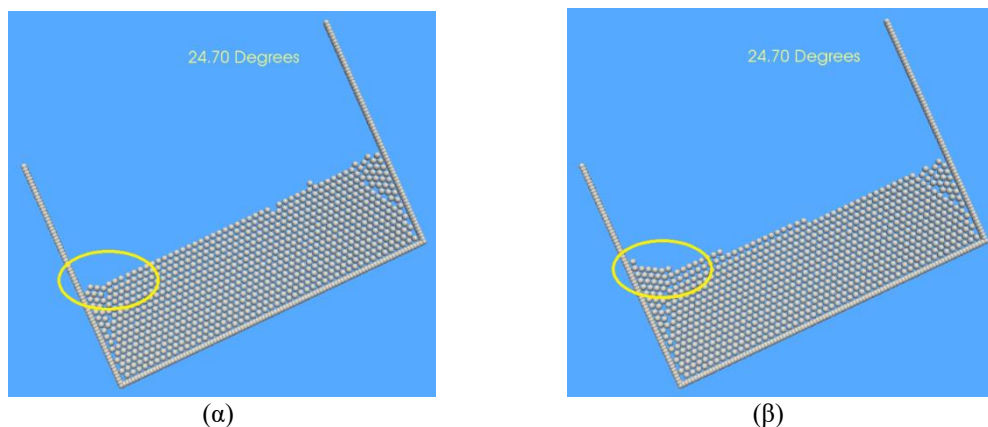
(α)



(β)

Εικόνα 42: Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπιση κέντρου βάρους για ταχύτητα γωνίας κλίσης 3.00 μ/δ (α) υγρασία 0% στις 44.98° (β) υγρασία 50% στις 44.98°.

Στην εικόνα 42, παρατηρούμε τη συνολική μέγιστη μετατόπιση που πραγματοποιήθηκε για ταχύτητα γωνίας κλίσης 3.00 μ/δ και για ποσοστό υγρασίας 50% όπου παρατηρείται η μέγιστη τιμή στη συγκεκριμένη περίπτωση. Η διαφορά από τη περίπτωση μη ύπαρξης υγρασίας είναι πολύ μικρότερη όπως φαίνεται και από τις εικόνες αφού έχει μετακινηθεί μικρότερο μέρος σφαιρικών σωματιδίων από ότι στις προηγούμενες περιπτώσεις ταχύτητας γωνίας κλίσης.

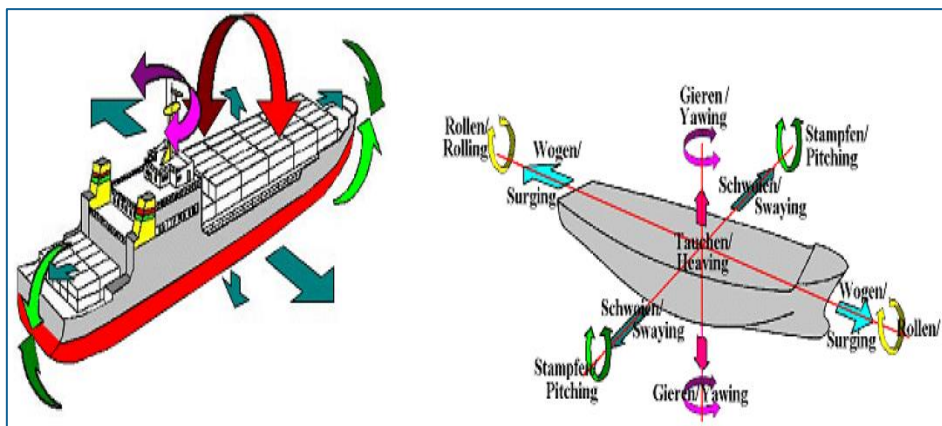


Εικόνα 43: Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπιση κέντρου βάρους για ταχύτητα γωνίας κλίσης 1.00 μ/δ (α) υγρασία 0% στις 24.70° (β) υγρασία 50% στις 24.70° τη στιγμή της πρώτης κατακρήμισης.

Στη παραπάνω εικόνα 43, παρουσιάζεται η πρώτη κατακρήμιση που πραγματοποιείται στη περίπτωση για ταχύτητα γωνίας κλίσης 1.00 μ/δ, που όπως ήδη παρατηρήσαμε, στη περίπτωση της υγρασίας τα σωματίδια αρχίζουν και κινούνται νωρίτερα, ενώ στη περίπτωση χωρίς υγρασίας δεν έχουν ξεκινήσει ακόμα.

Η Διατοίχιση ή διατοιχισμός (Rolling), είναι όρος της Ναυτιλίας και αφορά μορφή ταλάντωσης του πλοίου κατά τον εγκάρσιο άξονα δηλαδή οι κλίσεις δεξιά και αριστερά που παίρνει το πλοίο, είτε όταν κινείται, είτε όταν είναι αγκυροβολημένο. Αιτία που προκαλεί τη διατοίχιση είναι είτε ο υφιστάμενος πλάγιος κυματισμός, είτε ο κυματισμός που προκαλεί διερχόμενο πλοίο.

Το εύρος της διατοίχισης μετράτε με χρήση ειδικού οργάνου που φέρεται στη «Γέφυρα» του πλοίου και ονομάζεται κλισιόμετρο. Περίοδος διατοιχισμού, καλείται ο χρόνος μέσα στον οποίο πραγματοποιείται η απλή διατοίχιση, δηλαδή μια πλήρης ταλάντωση, από τη μέγιστη κλίση προς μία πλευρά στη μέγιστη κλίση στην άλλη πλευρά και επιστροφή στην αρχική θέση.



Εικόνα 44 : Γραμμικές και Περιστροφικές Κινήσεις Πλοίου(Wiki)

Η μεγάλη διατοίχιση «εν πλω» είναι πολύ επικίνδυνη και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, αφού υπήρξε πολλές φορές αιτία μετακίνησης φορτίου, ιδίως μεταλλευμάτων με καταστροφικό αποτέλεσμα για πολλά πλοία. Επίσης επικίνδυνη για πρόκληση ζημιών είναι η διατοίχιση που προκαλείται από κυματισμό διερχόμενου πλοίου πολύ κοντά σε μαρίνες όπου τα σκάφη εκεί βρίσκονται κυρίως πλαγιοδετημένα.



Εικόνα 45 : Πλοίο που εκτελεί διατοιχισμό εν πλώ (Wiki)

Τα σύγχρονα πλοία Επιβατηγά και Κρουαζιερόπλοια, όπου η άνεση των επιβατών είναι σημαντικός παράγοντας, για μείωση του διατοιχισμού φέρουν στα ύφαλα σταθερωτήρες ή πτερύγια ευστάθειας. Οι διάφοροι χειρισμοί του πλοίου, η κατανάλωση καυσίμων και ποσίμου ύδατος, η ποσότητα του μεταφερόμενου φορτίου, ο τρόπος στοιβασίας του, η πλήρωση, ή η εκκένωση θαλασσέρματος είναι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια του πλοίου.

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζουμε την απόκριση των σφαιρικών σωματιδίων εντός της δεξαμενής που εκτελεί κίνηση διατοιχισμού. Οι μεταβλητές μας είναι τέσσερις:

- A) το ποσοστό υγρασίας (0-70%)
- B) η συχνότητα διέγερσης (0-1.4 Hz)
- Γ) το πλάτος διέγερσης και (0-40 deg)
- Δ) το σημείο περιστροφής (τα σημεία  $(x,y) - (0.15, 0), (0.15, 0.11)$ )

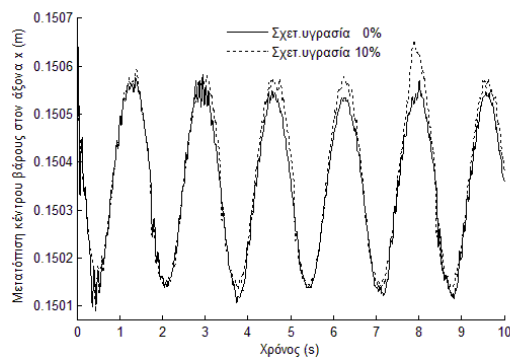
Η διάρκεια του κάθε πειράματος είναι 10 δευτερόλεπτα δηλαδή 100.000 time steps και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου το υλικό δεν έχει σταθεροποιηθεί αρκετά, εκτελούμε το κώδικα για 20 δευτερόλεπτα δηλαδή 200.000 time steps.



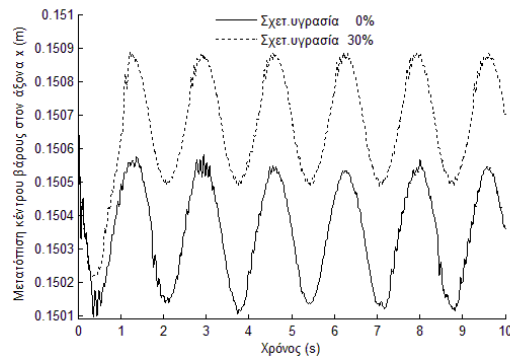
## 7.1.2 Σημείο Περιτροφής (0.15,0)

### 7.1.2.1 Γωνία Διατοιχισμού $10^0$ μοίρες

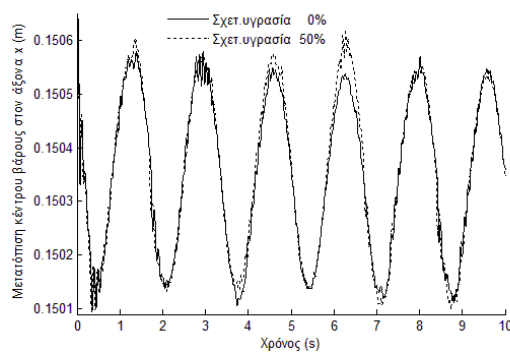
Μετά το πέρας του τρεξίματος του κώδικα και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων για γωνία διατοίχισης  $10^0$  μοίρες, κατασκευάζουμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για συχνότητα διατοίχισης 0.6 Hz και ποσοστά υγρασίας 0,10%,30%,50% και 70%. Τόσο στον άξονα x όσο και στον άξονα y, η μετατόπιση του κέντρου βάρους των σφαιρικών σωματιδίων για συχνότητα διατοιχισμού 0.2Hz δεν παρουσιάζει σημαντική αλλαγή με τη προσθήκη υγρασίας λόγω του ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι μικρή η τιμή της γωνίας και της συχνότητας διατοίχισης και γι' αυτό το λόγο δεν παρουσιάζεται.



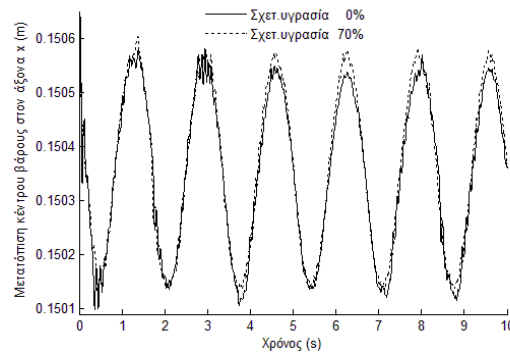
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Διάγραμμα 3 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού  $10^0$  μοίρες , συχνότητα 0.6 Hz και υγρασία (α) 10% (β) 30% (γ) 50% (δ) 70%.

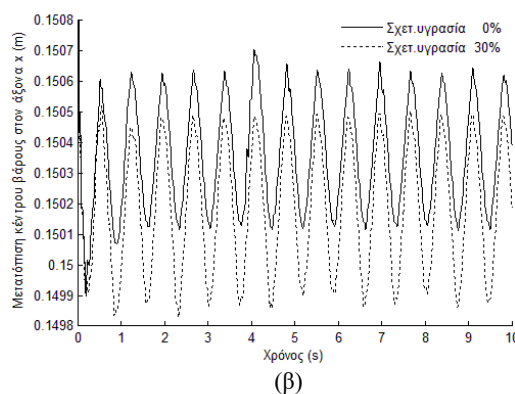
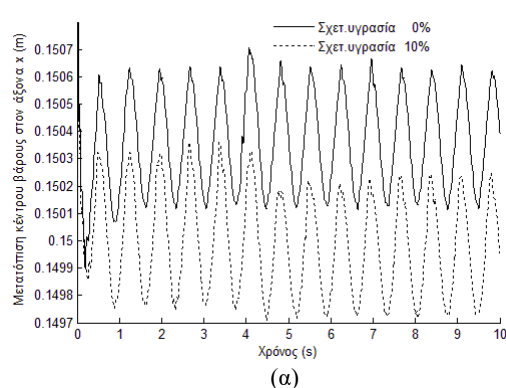
Από την εξέταση των διαγραμμάτων 3(α), 3(γ) και 3(δ), συμπεραίνουμε ότι η μετατόπιση του κέντρου βάρους δε παρουσιάζει καμία σημαντική αλλαγή με τη προσθήκη υγρασίας στα σφαιρικά σωματίδια. Στη περίπτωση με ποσοστό υγρασία 10%, παρατηρείται μια μικρή

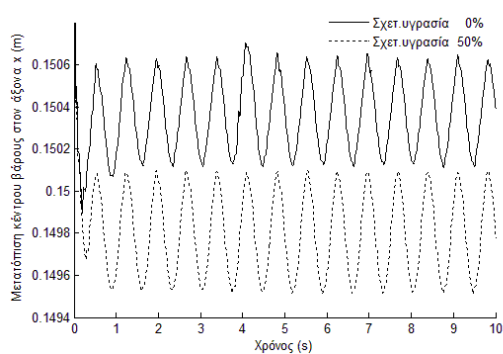
αύξηση του πλάτους ταλάντωσης με τη μεγαλύτερη τιμή να παρουσιάζεται στα 7.9 δευτερόλεπτα. Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο παρατηρείται και για τιμές υγρασίας 50% και 70% όμως παρουσιάζεται λίγο νωρίτερα στα 6,3 δευτερόλεπτα.

Από την εξέταση του διαγράμματος 3 (β), μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα :

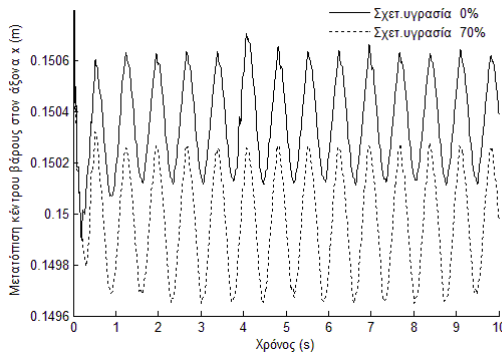
1. Στη πρώτη ημιπερίοδο, το πλάτος διατοιχισμού είναι ελαφρά μεγαλύτερο στη περίπτωση μη παρουσίας υγρασίας από ότι στη περίπτωση για υγρασία 30% λόγω των ελκυστικών δυνάμεων μεταξύ των σφαιρικών σωματιδίων που αναπτύσσονται.
2. Στη δεύτερη ημιπερίοδο, το πλάτος διατοιχισμού αυξάνεται απότομα προς τα πάνω δηλαδή το κέντρο βάρους των σφαιρικών σωματιδίων μετατοπίζεται προς το δεξί μέρος της δεξαμενής και συνεχίζει την ταλάντωση του με το ίδιο περίπου πλάτος όπως και στη περίπτωση της μη παρουσίας υγρασίας.
3. Λόγω του ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η συχνότητα διατοιχισμού είναι σχετικά μικρή επομένως η περίοδος διατοιχισμού είναι σχετικά μεγάλη, το φαινόμενο της μετακίνησης των σωματιδίων, δε δημιουργείται στη πρώτη ημιπερίοδο διότι τα σωματίδια δεν έχουν προλάβει ακόμα να αναπτύξουν επαρκή ταχύτητα και έτσι συμβαίνει στη δεύτερη ημιπερίοδο και για αυτό το λόγω το κέντρο βάρους μετατοπίζεται προς το δεξί μέρος της δεξαμενής.
4. Η μετατόπιση του κέντρου βάρους στο δεξί μέρος της δεξαμενής είναι σχετικά μικρή, οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν αλλάζει και πολύ η συμπεριφορά των σωματιδίων με τη προσθήκη υγρασίας στη συγκεκριμένη γωνία και συχνότητα.

Όταν η συχνότητα διατοιχισμού αυξηθεί τότε τα αποτελέσματα αλλάζουν σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις που εξετάσαμε. Έτσι λοιπόν αυξήσαμε τη συχνότητα στα 1.4Hz και κατασκευάσαμε τα ακόλουθα διαγράμματα 2(α) έως 2(δ), τα οποία παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για συχνότητα διατοίχισης 1.4Hz και ποσοστά υγρασίας 0,10%,30%,50% και 70% όπως και πριν.





(γ)



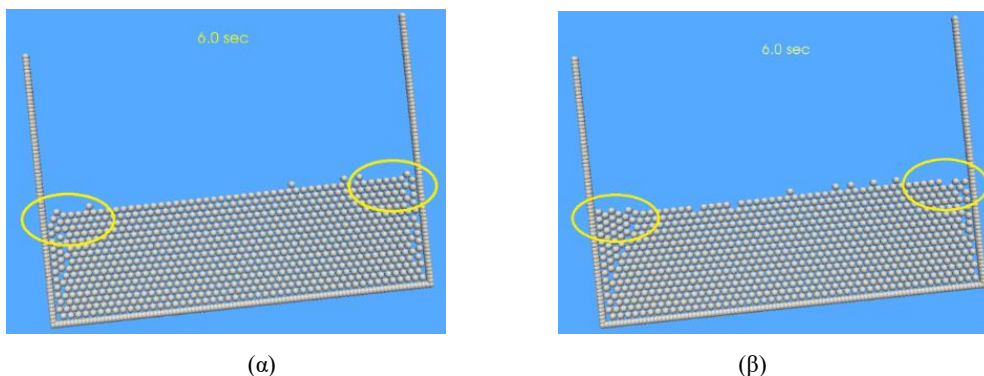
(δ)

Διάγραμμα 4 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού 10 μίρες , συχνότητα 1.4 Hz και υγρασία (α) 10% (β) 30% (γ) 50% (δ) 70%.

Από την εξέταση των διαγραμμάτων 4(α) έως 4(δ), μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα :

1. Και στις τέσσερις περιπτώσεις υγρασίας που εξετάζουμε, τα σφαιρικά σωματίδια ταλαντεύονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως και πριν με τη διαφορά ότι ο άξονας ταλάντωσης, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, είναι μετατοπισμένος προς τα κάτω αυτή τη φορά δηλαδή έχουμε μια μετατόπιση του κέντρου βάρους προς την αριστερή μεριά της δεξαμενής.
2. Η μετατόπιση του άξονα ταλάντωσης, οφείλεται στο ξεκίνημα της ταλάντωσης και συγκεκριμένα στη πρώτη ημιπερίοδο λόγω της ελκυστικής δύναμης που δέχονται τα σφαιρικά σωματίδια όταν είναι παρούσα η υγρασία μεταξύ τους και έτσι το ένα παρασέρνει το άλλο.
3. Το γεγονός ότι τα σφαιρικά σωματίδια μετατοπίζονται προς το αριστερό μέρος της δεξαμενής, οφείλεται στη μεγάλη τιμή της συχνότητας διατοιχισμού και επομένως μικρή περίοδο διατοιχισμού και τα σφαιρικά σωματίδια έχουν προλάβει να αναπτύξουν επαρκή ταχύτητα και έτσι το ένα παρασέρνει το άλλο και επομένως η μετατόπιση γίνεται προς το αριστερό μέρος.
4. Για υγρασία 10% και 30% η μετατόπιση του κέντρου βάρους προ την αριστερή μεριά της δεξαμενής είναι σχετικά μικρή σε αντίθεση με την περίπτωση για 70% υγρασία και πόσο μάλλον για 50% όπως διακρίνουμε από τα διαγράμματα.
5. Όσον αφορά τώρα τα πλάτη διατοιχισμού, παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει μια μικρή αύξηση ενώ στη περίπτωση που η υγρασία είναι της τάξεως του 10%, παρατηρούμε ότι η ταλάντωση από την αρχή της έως και τα 4,2 δευτερόλεπτα παρουσιάζει μεγαλύτερο πλάτος από ότι τα επόμενα δευτερόλεπτα.
6. Για υγρασία 70%, η μετατόπιση του κέντρου βάρους είναι της τάξεως των 0,5 χιλιοστών ενώ στην περίπτωση με 50% υγρασία είναι της τάξεως των 0,7 χιλιοστών.

Η μικρή συσσώρευση των σφαιρικών σωματιδίων προς το αριστερό μέρος της δεξαμενής απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα 46 τη χρονική στιγμή 1.5 δευτερόλεπτα δεξαμενή και είναι εμφανή τα σφαιρικά σωματίδια που έχουν μετακινηθεί.



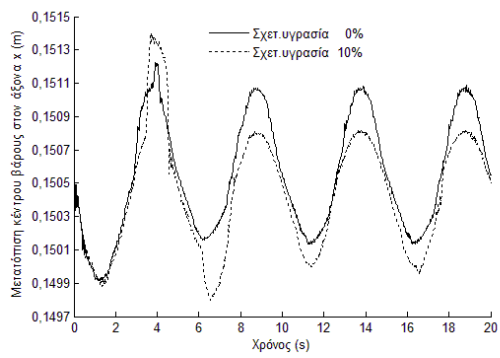
Εικόνα 46 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 6.0 sec για γωνία διατοίχισης 10 μοίρες, συχνότητα 1.4 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 50%

#### 7.1.2.2 Γωνία Διατοίχισμού 20<sup>0</sup> μοίρες

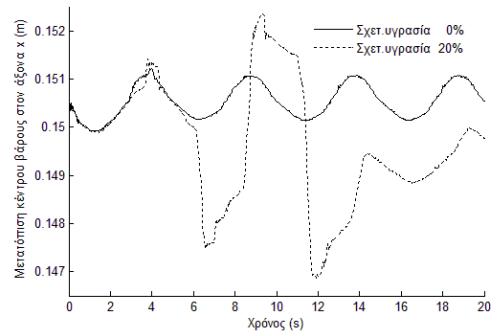
Σε δύσκολες καιρικές συνθήκες, πολλές φορές τα πλοία χύδην φορτίου και όχι μόνο, αναπτύσσουν μεγαλύτερες γωνίες κλίσης από 10 μοίρες όπως είναι λογικό. Στη συνέχεια, αυξάνουμε τη γωνία διατοίχισμού σε 20 μοίρες και κατασκευάζουμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για συχνότητα διατοίχισης 0.2Hz και ποσοστά υγρασίας 0%,10%,30%,50% και 70%.

Εξετάζοντας προσεκτικά τα αποτελέσματα εξαγωγής από το τρέξιμο του κώδικα στη συγκεκριμένη περίπτωση, παρατηρήσαμε ότι για 20 μοίρες γωνία διατοίχισμού και μικρές συχνότητες διατοίχισμού 0.2Hz και 0.6Hz, τα σωματίδια αναπτύσσουν μια διαφορετική κίνηση και επομένως διπλασιάσαμε το χρόνο ταλάντωση ούτως ώστε να ισορροπήσουν τα σφαιρικά σωματίδια και να βγάλουμε καλύτερα και πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα.

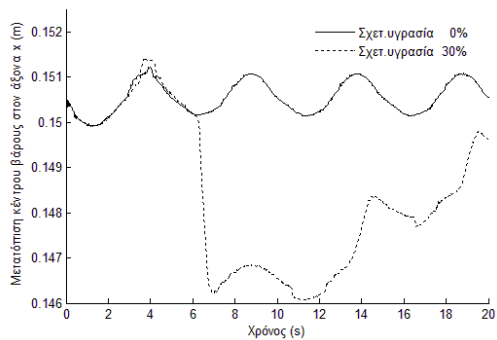
Επίσης, επιθυμώντας να βρούμε πιο είναι το κρίσιμο όριο υγρασίας μετά το οποίο τα σφαιρικά σωματίδια ξεκινούν να έχουν ποιοτικά διαφορετική συμπεριφορά ή το ποσοστό μετά το οποίο παύουν τα σφαιρικά σωματίδια να είναι ευκίνητα, κατασκευάσαμε επιπρόσθετα διαγράμματα για υγρασία 20%, 40% και 60%.



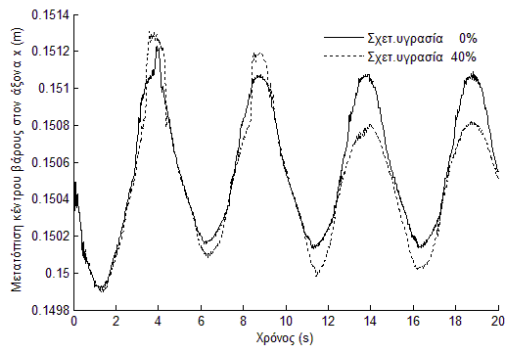
(α)



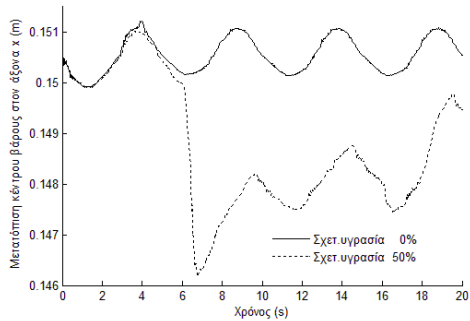
(β)



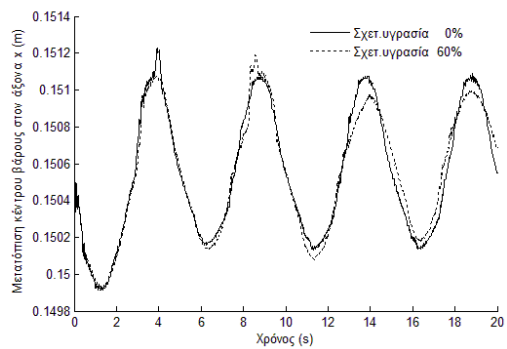
(γ)



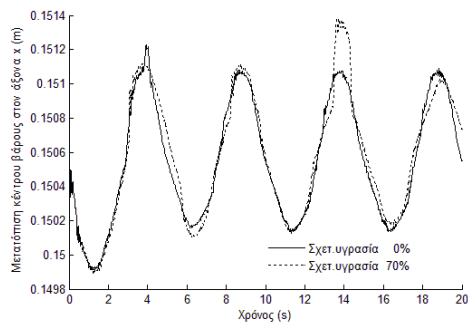
(δ)



(ε)



(ζ)



(η)

Διάγραμμα 5 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού 20 μοίρες , συχνότητα 0.2 Hz και υγρασία (α) 10% (β) 20% (γ) 30% (δ) 40% (ε) 50% (ζ) 60% (η) 70%

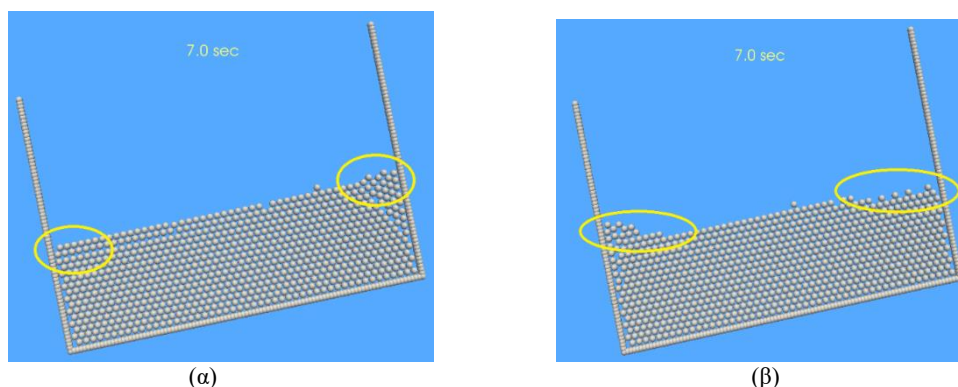
Από την εξέταση των διαγραμμάτων 5(α) έως 5(η), μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα:

1. Με τη προσθήκη υγρασίας ανάμεσα στα σωματίδια, διαπιστώνουμε ότι αλλάζει σημαντικά η κίνηση των σφαιρικών σωματιδίων σε πολλές περιπτώσεις υγρασίας που εξετάσαμε σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς υγρασία.
2. Για ποσοστό υγρασίας 10%, παρατηρούμε ότι στην έναρξη του διατοιχισμού και μέχρι τα πρώτα 3 δευτερόλεπτα δεν παρουσιάζονται μεγάλες αλλαγές στη μετατόπιση του κέντρου βάρους. Στη συνέχεια όμως, παρατηρούμε μια αύξηση στο πλάτος διατοιχισμού με αποτέλεσμα να έχουμε τελικά μια μόνιμη μετατόπιση του κέντρου βάρους στην αριστερή πλευρά της δεξαμενής και να συνεχίζεται ο διατοιχισμός με το ίδιο περίπου πλάτος.
3. Όταν το ποσοστό υγρασίας αυξηθεί στο 20%, και ενώ μέχρι τα 6 δευτερόλεπτα η ταλάντωση του κέντρου βάρους είναι ακριβώς η ίδια με τη περίπτωση χωρίς υγρασία, αμέσως μετά πραγματοποιείται απότομη μετατόπιση του κέντρου βάρους, όπου τα σφαιρικά σωματίδια γίνονται πολύ ευκίνητα και αρχίζουν και ταλαντεύονται μέχρι τα 14 δευτερόλεπτα περίπου με τριπλάσιο πλάτος και στη συνέχεια ισορροπούν μετατοπισμένα όμως προς το αριστερό μέρος τα δεξαμενής.
4. Η απότομη μετακίνηση των σφαιρικών σωματιδίων εντός της δεξαμενής, παρατηρείται και για ποσοστό υγρασία 30% και 50% μετά τα 6 δευτερόλεπτα. Για ποσοστό υγρασίας 30%, παρατηρούμε ότι μετά το πέρας της απότομης μετατόπισης των σωματιδίων, δεν επανέρχονται κοντά στη περίπτωση χωρίς υγρασίας αλλά συνεχίζουν τον διατοιχισμό τους μετατοπισμένα προς το αριστερό μέρος της δεξαμενής και σιγά σιγά πλησιάζουν την αρχική τους κατάσταση, ενώ στη περίπτωση υγρασίας 50% πλησιάζουν ωρύτερα την αρχική τους κατάσταση.
5. Ενώ θα περιμέναμε αντίστοιχη συμπεριφορά και για ποσοστό υγρασίας 40%, παρατηρούμε ότι το συγκεκριμένο ποσοστό έχει ίδια συμπεριφορά με τη περίπτωση για ποσοστό υγρασίας 10% χωρίς επίσης απότομη αύξηση του πλάτους στις πρώτες περιόδου ταλάντωσής.
6. Για ποσοστό υγρασίας 50% και 70%, αλλάζει και πάλι η συμπεριφορά των σωματιδίων και συμπεριφέρονται όπως ακριβώς στη περίπτωση χωρίς υγρασίας και υγρασίας 10% και 40%.
7. Η απότομη μετακίνηση των σφαιρικών σωματιδίων στις περιπτώσεις υγρασίας, πραγματοποιούνται όλες τη χρονική στιγμή των 6 δευτερολέπτων όποτε μπορούμε να τη θεωρήσουμε κρίσιμη τιμή για τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.
8. Παρατηρούμε ότι όταν το ποσοστό υγρασίας γίνει 20%, τότε πραγματοποιείται η απότομη μετακίνηση των σωματιδίων και αλλάζει τελείως η συμπεριφορά του όποτε

μπορούμε να το θεωρήσουμε ως το κρίσιμο όριο υγρασίας μετά το οποίο το υλικό ξεκινάει να έχει ποιοτικά διαφορετική συμπεριφορά.

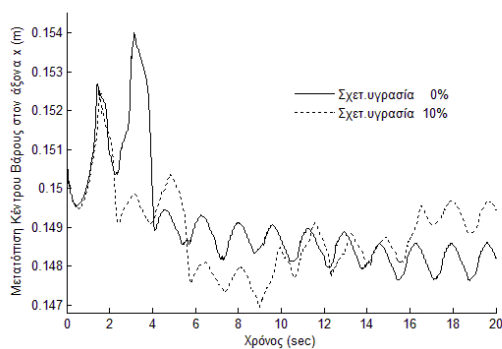
9. Τα σωματίδια συνεχίζουν να είναι ευκίνητα και για μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας όμως παρατηρούμε ότι για ποσοστό υγρασίας 40%, 60% και 70%, παύουν να είναι ευκίνητα και συμπεριφέρονται όπως στη περίπτωση χωρίς υγρασία.
10. Τη μεγαλύτερη τιμή η μετατόπιση του κέντρου βάρους την λαμβάνει όταν το ποσοστό υγρασίας μεταξύ των σφαιρικών σωματιδίων είναι 20%. Αυτή η τιμή θα είναι πολύ σημαντική όταν μελετάμε την ευστάθεια του πλοίου.

Επίσης στην ακόλουθη εικόνα 47, απεικονίζεται η συσσώρευση των σφαιρικών σωματιδίων προς το αριστερό μέρος της δεξαμενής τη χρονική στιγμή των 7.0 δευτερόλεπτων για τη περίπτωση χωρίς υγρασίας και ποσοστό υγρασίας 30% και είναι εμφανή η μεγαλύτερη συσσώρευση σφαιρικών σωματιδίων προς το αριστερό μέρος της δεξαμενής.

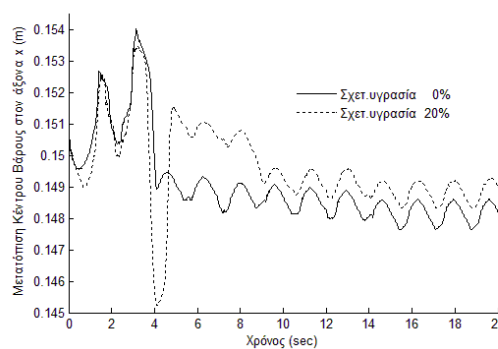


Εικόνα 47 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 7.0 sec για γωνία διατοίχισης 20 μοίρες , συχνότητα 0.2 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 30%.

Συνεχίζουμε τη μελέτη μας, αυξάνοντας τη συχνότητα διατοίχισμού σε 0.6Hz και κατασκευάζουμε τα αντίστοιχα ακόλουθα Διαγράμματα 6(α) έως 6(η).

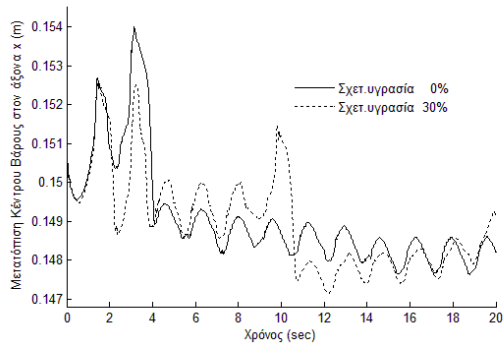


(α)

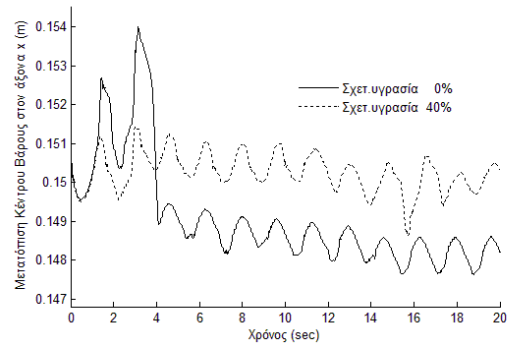


(β)

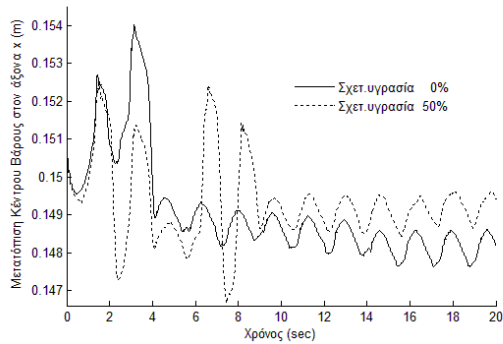




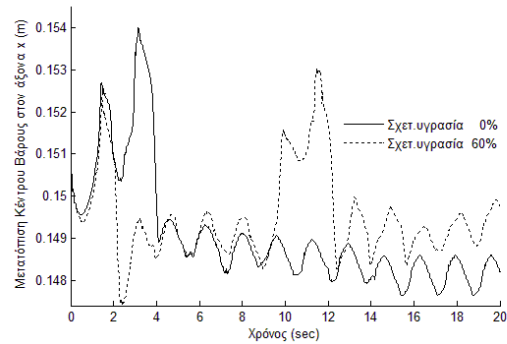
(γ)



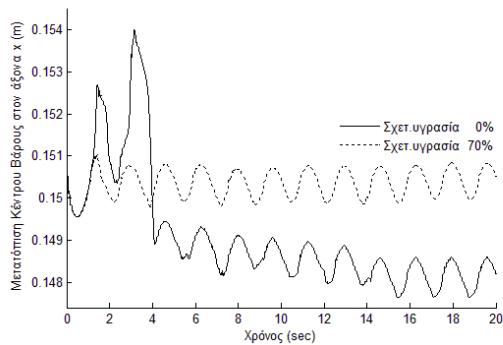
(δ)



(ε)



(ζ)



(η)

Διάγραμμα 6 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού 20 μοίρες , συχνότητα 0.6 Hz και υγρασία (α) 10% (β) 20% (γ) 30% (δ) 40% (ε) 50% (ζ) 60% (η) 70%

Από την εξέταση των διαγραμμάτων 6(α) έως 6(η), μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα:

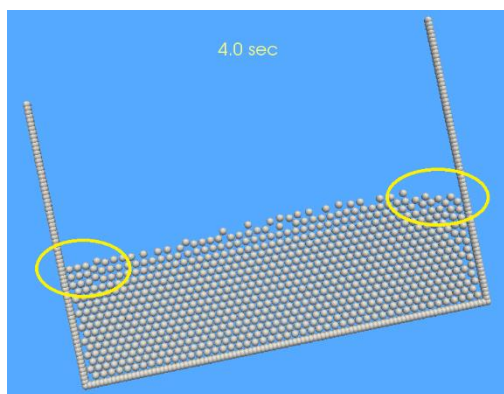
1. Με τη προσθήκη υγρασίας ανάμεσα στα σωματίδια, διαπιστώνουμε ότι αλλάζει σημαντικά η κίνηση των σφαιρικών σωματιδίων σε πολλές περιπτώσεις υγρασίας που εξετάσαμε σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς υγρασία.
2. Στη περίπτωση χωρίς υγρασία, παρατηρούμε μια απότομη αύξηση της μετατόπισης του κέντρου βάρους τη στιγμή των 2.5 δευτερολέπτων, όμως στη συνέχεια και

συγκεκριμένα στα 4 δευτερόλεπτα, σταθεροποιούνται και ταλαντεύονται με σταθερό πλάτος.

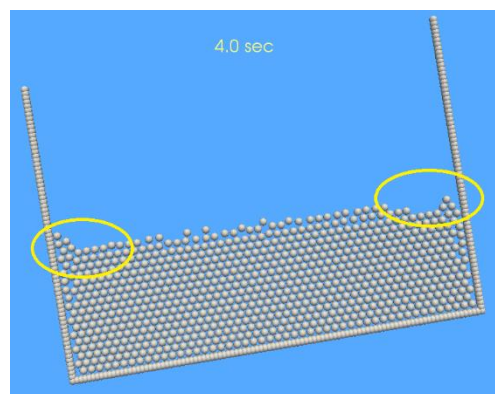
3. Για ποσοστό υγρασίας 10% και μέχρι τα δύο δευτερόλεπτα περίπου, παρατηρούμε ότι έχουμε την ίδια συμπεριφορά όσον αφορά τη μετατόπιση του κέντρου βάρους, όμως από κει και έπειτα και μέχρι τα 20 δευτερόλεπτα το πλάτος ταλάντωσης διαφοροποιείται. Συγκεκριμένα, μετά τα δύο δευτερόλεπτα το κέντρο βάρους στη περίπτωση της μη υγρασίας μετατοπίζεται προς τα δεξιά ενώ στη περίπτωση της υγρασίας συνεχίζει προς τα αριστερά και ταλαντώνεται με πολύ μικρότερο πλάτος.
4. Όταν είναι παρούσα η υγρασία σε ποσοστό 10%, η ταλάντωση μετά τα 4 δευτερόλεπτα περίπου συνεχίζει να αυξομειώνεται απότομα, δηλαδή τα σωματίδια είναι περισσότερο ευκίνητα, σταθεροποιείται μετά τα 11 δευτερόλεπτα περίπου για λίγο και έπειτα μετά τα 15 δευτερόλεπτα, παρατηρείται πάλι μια απότομη μετακίνηση ενώ στην περίπτωση χωρίς υγρασία, τα σωματίδια έχουν έχει ήδη σταθεροποιηθεί από τα 4 δευτερόλεπτα.
5. Παρατηρούμε ότι όταν δεν υπάρχει υγρασία ανάμεσα στα σωματίδια, τότε το κέντρο βάρους ταλαντεύεται με σταθερό πλάτος απλά μετατοπισμένο προς την αριστερή μεριά της δεξαμενής, ενώ για ποσοστό υγρασία 10 %, έχουμε συνεχής μετατοπίσεις είτε προς την αριστερή είτε προς της δεξιά μεριά χωρίς να τελικά να καταλήγει να ταλαντεύεται με σταθερό πλάτος.
6. Όταν το ποσοστό υγρασίας αυξηθεί στο 20%, παρατηρούμε μια πολύ μικρή αύξηση στο πλάτος ταλάντωσης στο πρώτο δευτερόλεπτο και στη συνέχεια όμως, μέχρι τα 3.5 δευτερόλεπτα, παρατηρούμε ότι τα σωματίδια έχουν την ίδια συμπεριφορά με τη περίπτωση χωρίς υγρασία.
7. Σε αντίθεση με τη περίπτωση για υγρασία 10%, όταν έχουμε 20% υγρασία, παρατηρούμε ότι μετά τα 3.5 δευτερόλεπτα τα σφαιρικά σωματίδια γίνονται ευκίνητα και μετατοπίζονται κατά πολύ σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς υγρασία, συνεχίζοντας τη ταλάντωση με αυξομειώσεις μέχρι τα 9 δευτερόλεπτα, όπου τελικά σταθεροποιούνται μετατοπισμένα όμως λίγο προς το δεξί μέρος της δεξαμενής.
8. Για ποσοστό υγρασίας 30%, στα 2.2 δευτερόλεπτα ομοίως παρατηρείται η απότομη μεταβολή στο κέντρο βάρους λόγω της απότομης κίνησης των σωματιδίων με τη μόνη διαφορά ότι ενώ στα 4 δευτερόλεπτα έχει αρχίσει και σταθεροποιείται το πλάτος ταλάντωσης, στα 10 δευτερόλεπτα έχουμε πάλι απότομη μετακίνηση των σωματιδίων που όμως μετά από λίγα δευτερόλεπτα σταθεροποιείται και πάλι.
9. Όπως και στη περίπτωση για συχνότητα διατοιχισμού 0.2Hz, έτσι και τώρα παρατηρούμε τελείως διαφορετική συμπεριφορά για ποσοστό υγρασίας 40%. Και ενώ μετά από 1 δευτερόλεπτο παρατηρείται μια μικρή μετατόπιση του κέντρου βάρους, το πλάτος ταλάντωσης σταθεροποιείται 1 δευτερόλεπτο νωρίτερα από ότι στη

- περίπτωση χωρίς υγρασίας και συνεχίζει σταθερό εκτός από μια στιγμή περί τα 15 δευτερόλεπτα που παρατηρούμε επίσης μια μικρή απότομη κίνηση σωματιδίων.
10. Το φαινόμενο της απότομης κίνησης των σφαιρικών σωματιδίων παρατηρείται και για ποσοστά υγρασίας 50% πιο έντονο από κάθε άλλη περίπτωση. Συγκεκριμένα, μετά τα 2 δευτερόλεπτα έχουμε μεγάλη κίνηση των σφαιρικών σωματιδίων και εν συνεχεία αφού ηρεμήσουν για λίγο, κινούνται απότομα και πάλι από τα 6 δευτερόλεπτα μέχρι τα 9 δευτερόλεπτα όπου και τελικά σταθεροποιούνται και ταλαντεύονται με το ίδιο πλάτος όπως και στη περίπτωση χωρίς υγρασία.
  11. Στη περίπτωση για ποσοστό υγρασίας 50%, το πλάτος ταλάντωσης του κέντρου βάρους λαμβάνει τιμές ακόμα και 5 φορές μεγαλύτερες από ότι στη περίπτωση χωρίς υγρασία.
  12. Στη περίπτωση υγρασίας 60%, αρχικά στα 2.2 δευτερόλεπτα παρατηρούμε πάλι τη μικρή μετατόπιση των σφαιρικών σωματιδίων, που όμως μετά τα 4 δευτερόλεπτα τα σωματίδια σταθεροποιούνται και ακολουθούν τη συμπεριφορά της περίπτωσης χωρίς υγρασίας. Από τα 9.5 δευτερόλεπτα και μετά, τα σφαιρικά σωματίδια κινούνται απότομα και αλλάζει τελείως η συμπεριφορά τους με αποτέλεσμα να ταλαντεύονται με πολύ μεγαλύτερο πλάτος μέχρι τα 12 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια σταθεροποιούνται μετατοπισμένα κατά το δεξί μέρος της δεξαμενής.
  13. Για ποσοστό υγρασίας 70%, αλλάζει η συμπεριφορά των σωματιδίων και πλησιάζει τη περίπτωση για υγρασία 40%. Μετά τα 4 δευτερόλεπτα τα σωματίδια σταθεροποιούνται και το πλάτος παραμένει σταθερό χωρίς αυξομειώσεις.
  14. Παρατηρούμε ότι όταν το ποσοστό υγρασίας γίνει 20%, τότε πραγματοποιείται η απότομη μετακίνηση των σωματιδίων και αλλάζει τελείως η συμπεριφορά τους όποτε μπορούμε να το θεωρήσουμε ως το κρίσιμο όριο υγρασίας μετά το οποίο το υλικό ξεκινάει να έχει ποιοτικά διαφορετική συμπεριφορά.
  15. Τα σωματίδια συνεχίζουν να είναι ευκίνητα και για μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας όμως παρατηρούμε ότι για ποσοστό υγρασίας 40% και 70%, παύουν να είναι ευκίνητα και συμπεριφέρονται όπως στη περίπτωση χωρίς υγρασία.
  16. Τη μεγαλύτερη τιμή η μετατόπιση του κέντρου βάρους την λαμβάνει όταν το ποσοστό υγρασίας μεταξύ των σφαιρικών σωματιδίων είναι 20%. Αυτή η τιμή θα είναι πολύ σημαντική όταν μελετάμε την ευστάθεια του πλοίου.
  17. Κρίσιμη κατάσταση πρέπει να θεωρηθεί και η περίπτωση για υγρασία 50% και 60%, διότι τα σωματίδια γίνονται πολύ ευκίνητα για μερικά δευτερόλεπτα και ιδιαίτερα για ποσοστό υγρασίας 50% τη χρονική στιγμή από 6 μέχρι 9 δευτερόλεπτα, όπου το πλάτος ταλάντωσης πενταπλασιάζεται από το αντίστοιχο της περίπτωσης χωρίς υγρασία, ενώ για ποσοστό υγρασίας 60% κρίσιμη στιγμή μπορεί να θεωρηθεί η στιγμή 9.5 μέχρι 12 δευτερόλεπτα όπου το πλάτος αυξάνεται κατά πολύ.

Στις εικόνες 48,49 και 50, αποτυπώνεται η προσομοίωση της συνολικής μετατόπισης του κέντρου βάρους για ποσοστά υγρασίας 20%,50% και 60%, όπου ήδη παρατηρήσαμε από το διάγραμμα τη διαφορά του πλάτους μεταξύ των δύο περιπτώσεων, για γωνία διατοίχισης 20 μοίρες, συχνότητα 0.6 Hz.Εύκολα μπορούμε να διακρίνουμε ότι αρκετά σφαιρικά σωματίδια έχουν αποχωρήσει από την αρχική τους κατάσταση και έχουν συσσωρευτεί είτε στη δεξιά μεριά είτε στην αριστερή λόγω της υγρασίας που υπάρχει ανάμεσα τους

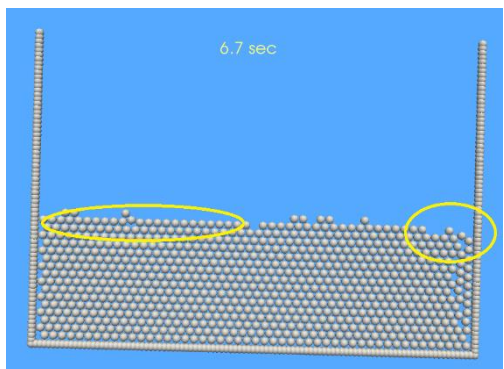


(α)

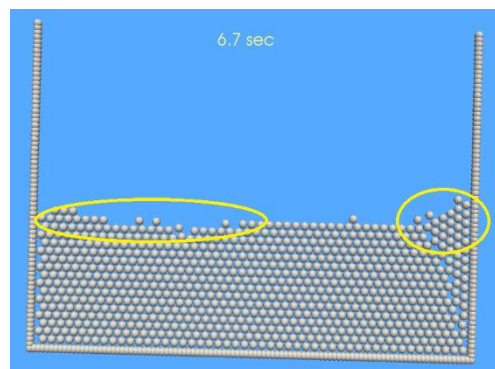


(β)

Εικόνα 48 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 4.0 sec για γωνία διατοίχισης 20 μοίρες , συχνότητα 0.6 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 20%

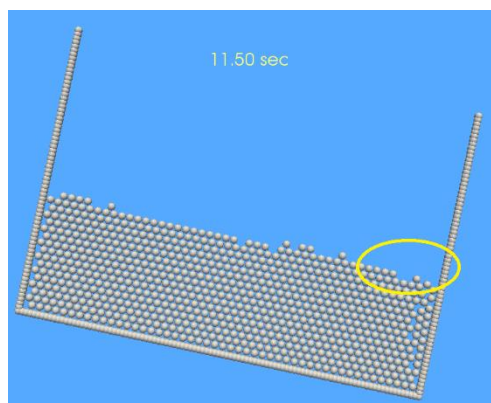


(α)

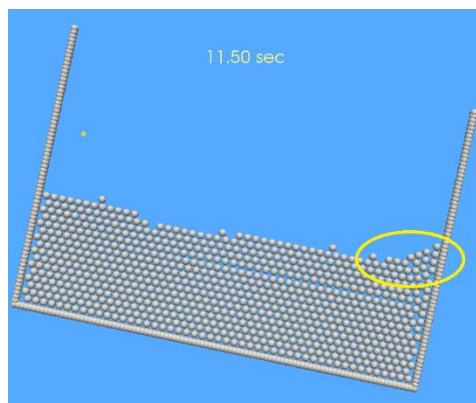


(β)

Εικόνα 49 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 6.7 sec για γωνία διατοίχισης 20 μοίρες , συχνότητα 0.6 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 50%

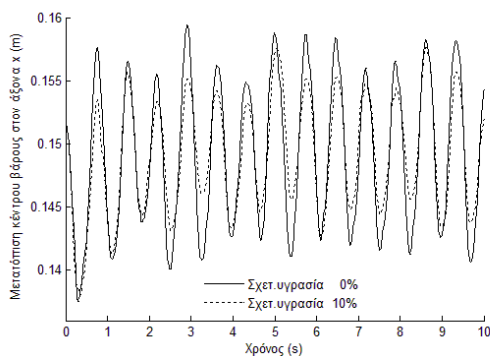


(α)

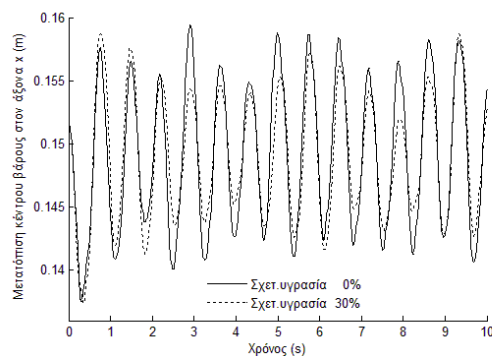


(β)

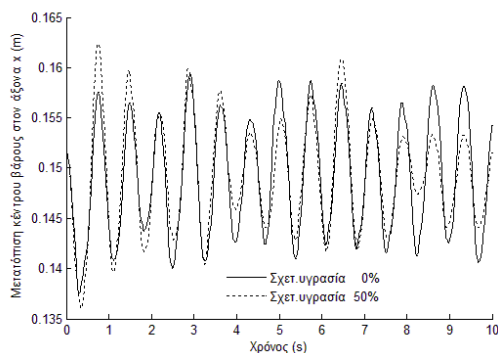
Εικόνα 50 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 11.50 sec για γωνία διατοίχισης 20 μοίρες , συχνότητα 0.6 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 60%



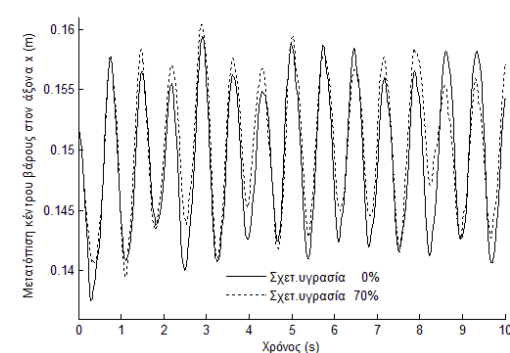
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Διάγραμμα 7 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού 20 μοίρες , συχνότητα 1.4 Hz και υγρασία (α) 10% (β) 30% (γ) 50% (δ) 70%

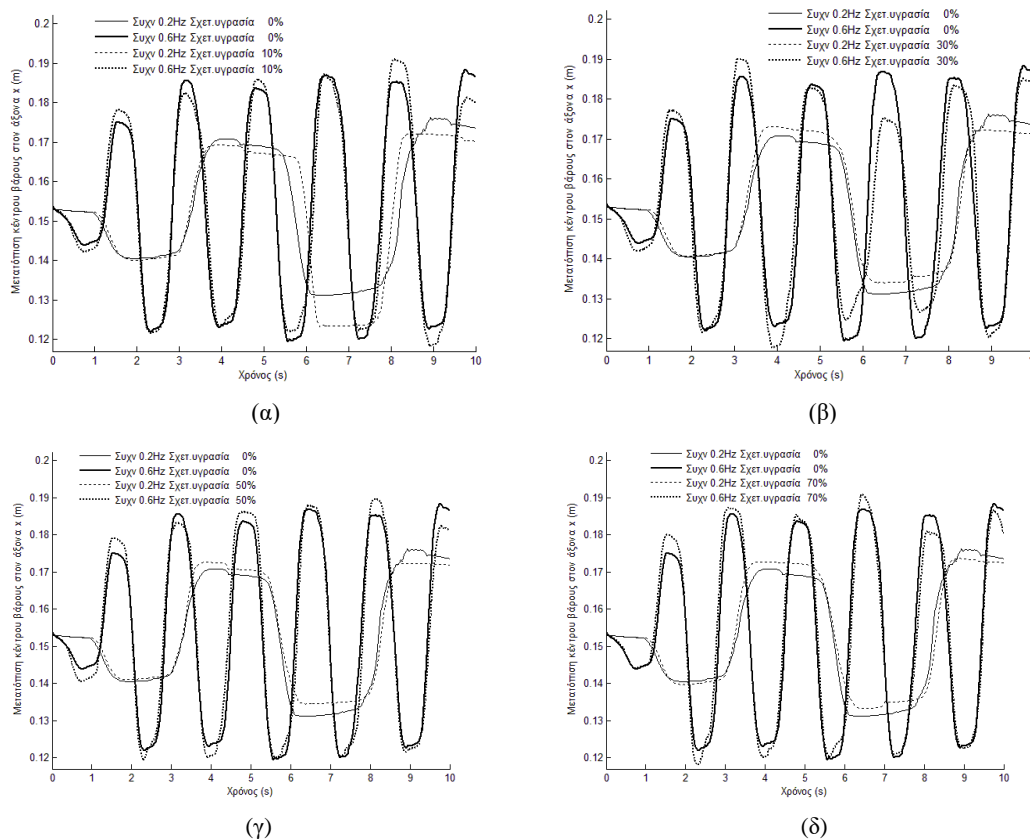
Παρατηρώντας τώρα προσεκτικά τα παραπάνω διαγράμματα 7(α) έως 7(δ), τα οποία παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους κατά τον άξονα x για γωνία διατοιχισμού 20 μοίρες, συχνότητα 1,4Hz, οδηγούμαστε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Το πλάτος διατοιχισμού του κέντρου βάρους των σφαιρικών σωματιδίων, αυξάνεται λόγω αύξηση της συχνότητας διατοίχισης.
2. Στις περιπτώσεις υγρασίας 10% και 30%, δεν παρατηρούμε να υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ της περίπτωσης χωρίς υγρασία και των υπολοίπων περιπτώσεων και συγκεκριμένα διαπιστώνουμε ότι σε πολλές περιόδους διατοιχισμού το πλάτος με τη προσθήκη της υγρασίας 10% είναι αρκετά μικρότερο ενώ για ποσοστό υγρασίας 30% αρχίζει και πλησιάζει τη περίπτωση χωρίς υγρασία.
3. Για ποσοστό υγρασίας 50%, παρατηρούμε ότι στις πρώτες περιόδους ταλάντωσης, το πλάτος διατοιχισμού του κέντρου βάρους των σωματιδίων είναι μεγαλύτερο από ότι για τη περίπτωση χωρίς υγρασία όμως στη συνέχεια ελαττώνεται και γίνεται μικρότερο με εξαίρεση τη χρονική στιγμή των 6.5 δευτερολέπτων όπου έχουμε μια μικρή απότομη αύξηση.

4. Όταν το ποσοστό υγρασίας αυξηθεί σε 70%, παρατηρούμε ότι το πλάτος διατοιχισμού καθ' όλη τη διάρκεια της ταλάντωσης είναι μεγαλύτερο από ότι στη περίπτωση χωρίς υγρασία όμως χωρίς κάποια τεράστια διαφορά.
5. Για μεγάλες συχνότητες διατοιχισμού πάνω από 1.4Hz, διαπιστώνουμε ότι η προσθήκη υγρασίας στα σφαιρικά σωματίδια, σε όποιο ποσοστό και αν προστεθεί, δεν επηρεάζει και τόσο τη μετατόπιση του κέντρου βάρους και γενικότερα τη συμπεριφορά τους και στην ουσία η μεγάλη τιμή της συχνότητας διατοιχισμού είναι αυτή που επηρεάζει.

### 7.1.2.3 Γωνία Διατοιχισμού 30<sup>0</sup> μοίρες

Στη συνέχεια της μελέτης μας, αυξάνουμε τη γωνία διατοιχισμού σε 30 μοίρες και κατασκευάζουμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για συχνότητα διατοίχισης 0.2 Hz και 0.6Hz για ποσοστά υγρασίας 0%,10%,30%,50% και 70%. Λόγω του ότι η γωνία διατοιχισμού είναι αρκετά μεγάλη, μεγάλος μέρος των σωματιδίων βγαίνουν εκτός δεξαμενής παρόλο που έχουμε υψώσει κατά πολύ τα τοιχώματά. Έτσι, τα ακόλουθα διαγράμματα είναι μόνο κατά τον άξονα x αφού στον άξονα y οι τιμές που προκύπτουν δεν είναι αληθής.



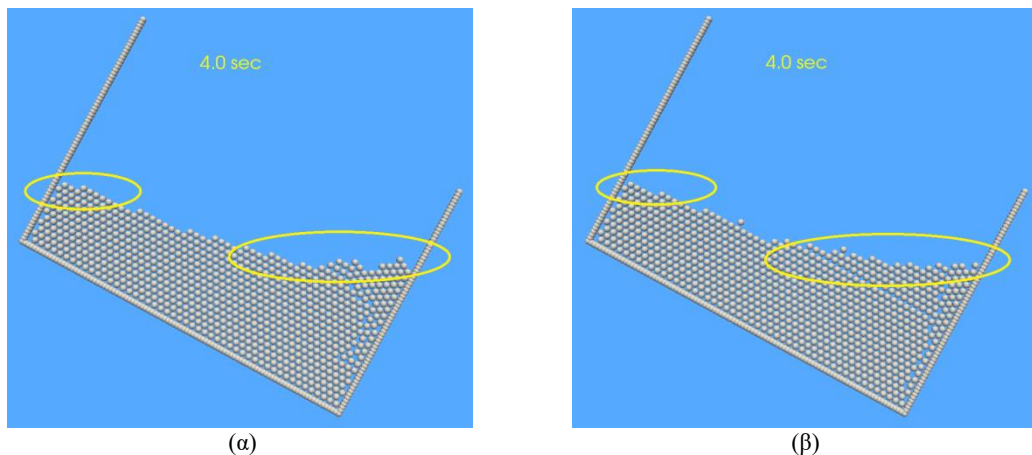
Διάγραμμα 8 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού 30 μοίρες , συχνότητα 0.2 και 0.6 Hz και υγρασία (α) 10% (β) 30% (γ) 50% (δ) 70%.

Από την εξέταση των διαγραμμάτων 8(α) έως 8(δ), μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα:

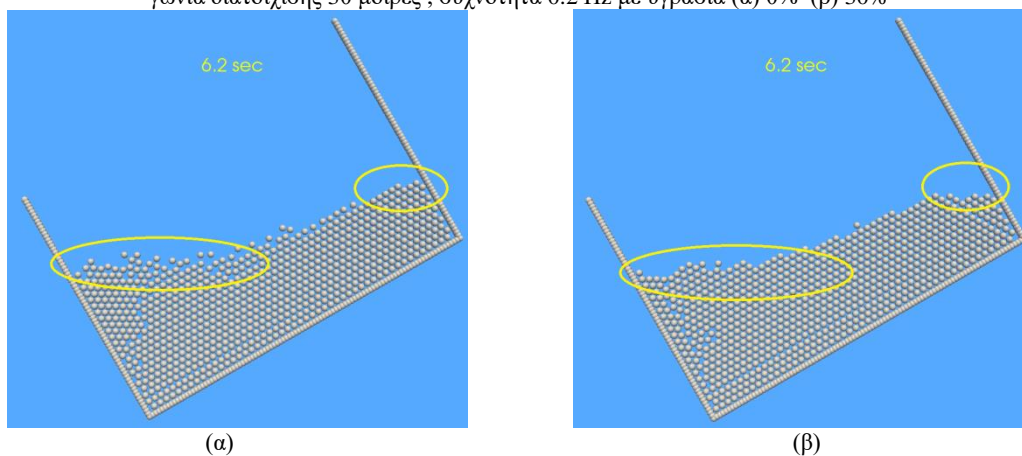
1. Με την αύξηση της συχνότητα διατοιχισμού της δεξαμενής, αυξάνεται και το πλάτος ταλάντωσης των σφαιρικών σωματιδίων όπως είναι φυσιολογικό άλλωστε.
2. Όσον αφορά τώρα τη συχνότητα διατοιχισμού 0.2Hz, βλέπουμε ότι κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου η μετατόπιση του κέντρου βάρους κυμαίνεται στις ίδιες τιμές για τις περιπτώσεις υγρασίας και μη υγρασίας, μόνο που παρουσιάζεται μια μικρή διαφοροποίηση στο πλάτος διατοιχισμού περίπου 0,5 εκατοστά για τις περιπτώσεις υγρασίας 30%,50% και 70% σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς υγρασία. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε μια μόνιμη μετατόπιση του κέντρου βάρους προς τα δεξιά αφού η καμπύλες τις υγρασίας είναι πάνω από τη καμπύλη χωρίς υγρασία.
3. Για ποσοστό υγρασίας 10%, παρατηρούμε ότι αρχικά το πλάτος διατοιχισμού κυμαίνεται επίσης στις ίδιες τιμές με τη περίπτωση χωρίς υγρασία αλλά μετά την έναρξη της δεύτερης περιόδου, παρατηρούμε μεγάλη αλλαγή στο πλάτος διατοιχισμού και συγκεκριμένα μια μετατόπισης προς τα αριστερά της δεξαμενής περίπου 1.0 εκατοστό.
4. Παρόλο που στην έναρξη της δεύτερης περιόδου παρατηρούμε μετατόπιση του κέντρου βάρους στη περίπτωση υγρασίας 10%, στη συνέχεια συνεχίζεται η ταλάντωση με την ίδια συμπεριφορά όπως και χωρίς υγρασία.
5. Για συχνότητα διέγερσης της δεξαμενής 0.6Hz, παρατηρούμε ότι η διαφορά στο πλάτος διατοιχισμού μεταξύ των περιπτώσεων υγρασίας και μη, δεν είναι τόσο μεγάλη, όσο στη προηγούμενη περίπτωση για συχνότητα 0.2Hz.
6. Με τη προσθήκη υγρασίας στη δεξαμενή για συχνότητα διέγερσης 0.6Hz, παρατηρούμε ότι το πλάτος ταλάντωσης στη πρώτη περίοδο σε όλες τις περιπτώσεις υγρασίας αυξάνεται σε σχέση με το κανονικό και επίσης βλέπουμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις υγρασίας και σε διαφορετικές πάντα χρονικές στιγμές το πλάτος ταλάντωσης των σωματιδίων αυξάνεται σε σχέση με το πλάτος ταλάντωσης χωρίς υγρασία όπως στη περίπτωση υγρασίας 30% τη χρονική στιγμή των 3 δευτερολέπτων και στη περίπτωση υγρασίας 50% τη χρονική στιγμή των 8 δευτερολέπτων.
7. Λόγω της μεγάλης γωνίας διατοιχισμού, δε παρατηρούμε γενικά μεγάλες διαφορές στη συμπεριφορά και στη κίνηση των σφαιρικών σωματιδίων παρά σε μεμονωμένες χρονικές στιγμές όπου η μετακίνηση μέρους των σφαιρικών σωματιδίων είναι εμφανής
8. Μια κρίσιμη τιμή της μετατόπισης μπορούμε να θεωρήσουμε για συχνότητα διέγερσης 0.2Hz και υγρασία 10%, τη χρονική στιγμή των 6.2 δευτερολέπτων όπου παρατηρούμε την απότομη κίνηση των σωματιδίων.



Στην ακόλουθη εικόνα 51, παρατηρούμε τη συσσώρευση των σφαιρικών σωματιδίων προς το δεξί μέρος της δεξαμενής τη χρονική στιγμή 4.0 δευτερόλεπτα για υγρασία 30%, ενώ στην εικόνα 52 απεικονίζεται η αυξημένη συσσώρευση των σφαιρικών σωματιδίων τη χρονική στιγμή 6.2 δευτερολέπτων για υγρασία 10%.



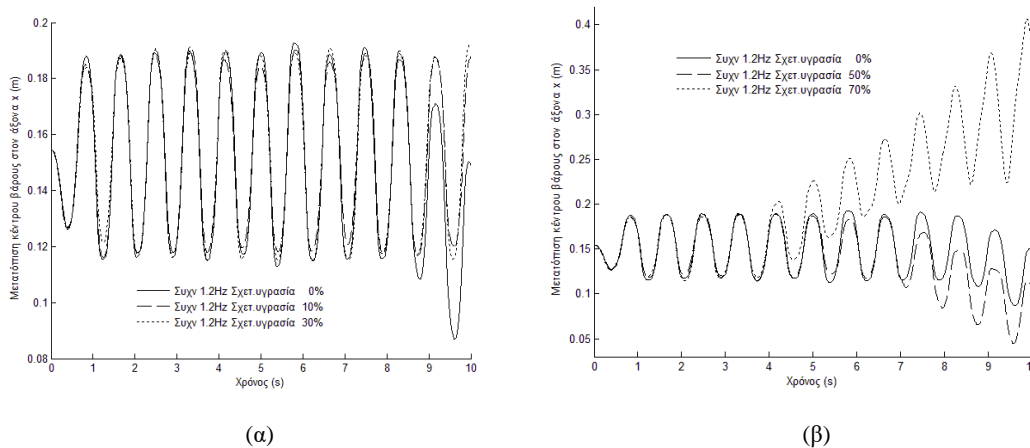
Εικόνα 51 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 4.0 sec για γωνία διατοίχισης 30 μοίρες , συχνότητα 0.2 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 30%



Εικόνα 52 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 6.2 sec για γωνία διατοίχισης 30 μοίρες , συχνότητα 0.2 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 10%

Λόγω τη μεγάλη γωνίας διατοίχισμού που εξετάζουμε και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για μεγάλες τιμές συχνότητας διατοίχισμού της δεξαμενής, κατασκευάσαμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα όποια παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για γωνία διατοίχισμού 30 μοίρες και συχνότητα ταλάντωσης δεξαμενής 1.2 Hz και για υγρασίας 10%,30%,50% και 70%.





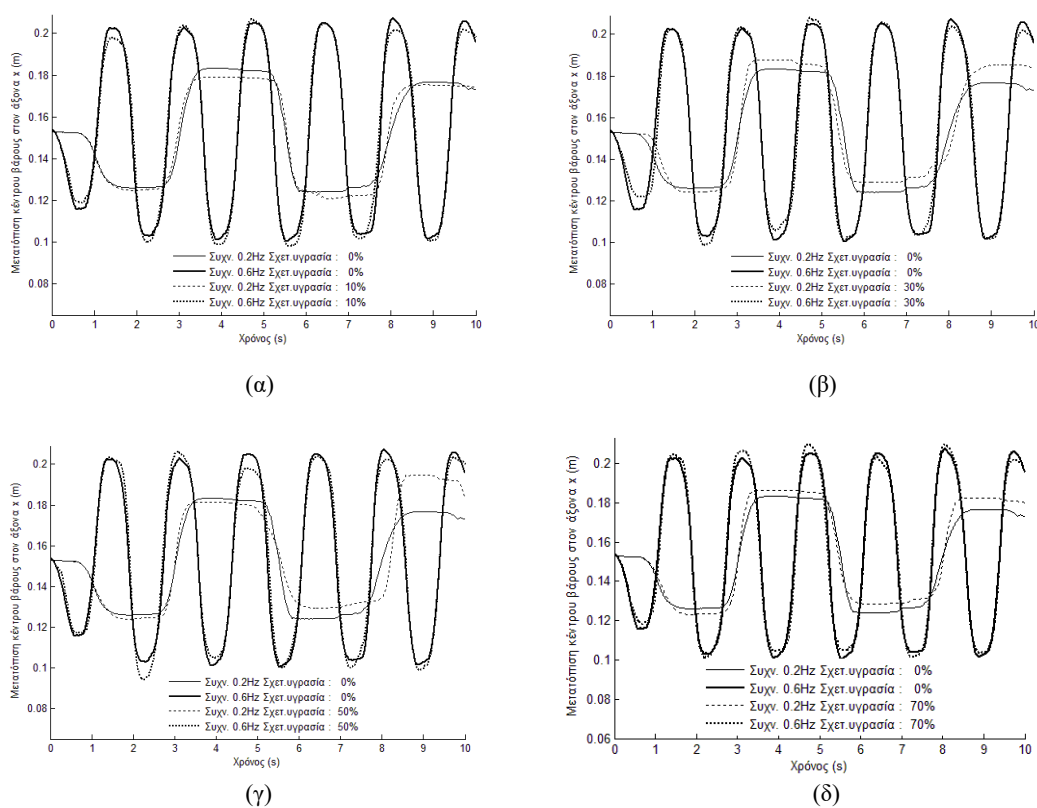
Διάγραμμα 9 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού 30 μοίρες , συχνότητα 1.2 και 0.6 Hz και υγρασία (α) 10% & 30% (β) 50% & 70%.

Από την εξέταση των διαγραμμάτων 9(α) και 9(β), μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα :

1. Για ποσοστά υγρασίας 10% και 30% ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια, παρατηρούμε ότι δεν έχουμε τεράστιες διαφορές όσον αφορά το πλάτος ταλάντωσης των σφαιρικών σωματιδίων πάρα μόνο κάποιες μεμονωμένες στιγμές όπου το πλάτος αυξομειώνεται και στις δυο περιπτώσεις υγρασίας του διαγράμματος πάντα σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς υγρασία απλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.
2. Παρόλο τις ψηλές πλαϊνές πλευρές της δεξαμενής, όταν ανάμεσα στα σωματίδια προστεθεί υψηλό ποσοστό υγρασίας τότε σωματίδια αρχίζουν και ξεπερνούν τα πλαϊνά της δεξαμενής και βγαίνουν εκτός αυτής με αποτέλεσμα τα αποτελέσματα τα όποια παίρνουμε δεν είναι αληθής.
3. Συγκεκριμένα, όσο πιο μεγάλο είναι το ποσοστό υγρασίας ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια, τόσο πιο νωρίς βγαίνουν εκτός δεξαμενής και όπως φαίνεται αναλυτικότερα από το διάγραμμα, για ποσοστό υγρασίας 50% έχουμε έξοδο των σφαιρικών σωματιδίων από τη δεξαμενή τη χρονική στιγμή 4.1 δευτερόλεπτα ενώ για ποσοστό υγρασίας 0% έχουμε τη χρονική στιγμή 7.2 δευτερόλεπτα.
4. Κρίνοντας σωστό να βρούμε μια κρίσιμη τιμή πάνω από την οποία έχοντας ήδη ψηλώσει τα πλαϊνά της δεξαμενής, τα σωματίδια εκτοξεύονται εκτός αυτής, μπορούμε να θεωρήσουμε το 50% κρίσιμο ποσοστό υγρασίας πάνω από το οποίο τα σωματίδια εκτοξεύονται εκτός δεξαμενής.

### 7.1.2.4 Γωνία Διατοιχισμού 40<sup>0</sup> μοίρες

Στη συνέχεια της μελέτης μας, η μεγαλύτερη γωνία διατοιχισμού που εξετάζουμε είναι οι 40 μοίρες και κατασκευάζουμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για συχνότητα διατοίχισης 0.2 Hz και 0.6Hz για ποσοστά υγρασίας 0%,10%,30%,50% και 70%. Λόγω του ότι επίσης η γωνία διατοιχισμού είναι αρκετά μεγάλη, μεγάλος μέρος των σωματιδίων βγαίνουν εκτός δεξαμενής παρόλο που έχουμε υψώσει κατά πολύ τα τοιχώματά. Έτσι, τα ακόλουθα διαγράμματα είναι μόνο κατά τον άξονα x αφού στον άξονα y οι τιμές που προκύπτουν δεν είναι αληθής.



Διάγραμμα 10 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού 40 μοίρες , συχνότητα 0.2 και 0.6 Hz και υγρασία (α) 10% (β) 30% (γ) 50% (δ) 70%.

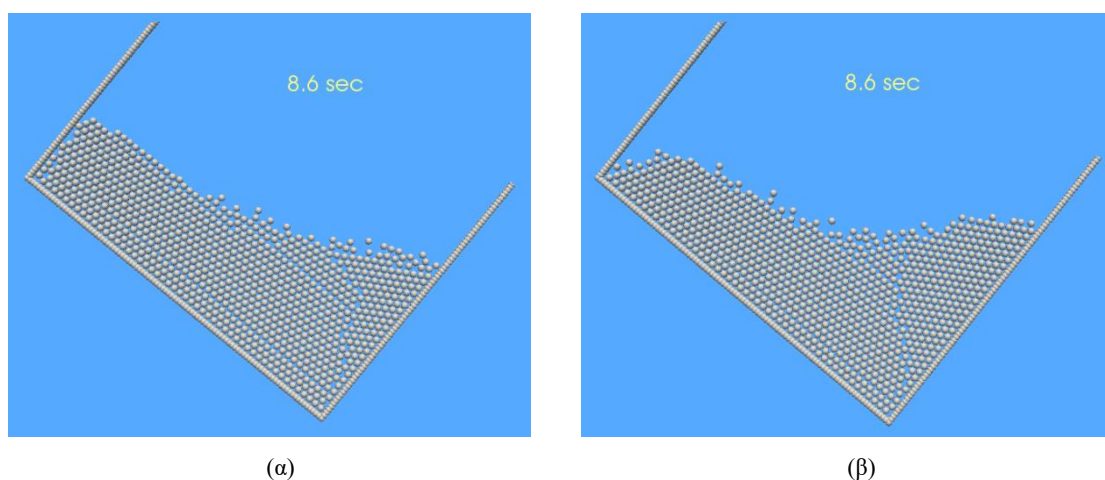
Από την εξέταση των διαγραμμάτων 10(α) έως 10(δ),μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα :

1. Αυξάνοντας τη συχνότητα διατοιχισμού της δεξαμενής και τη γωνία διατοιχισμού σε 40 μοίρες, αυξάνεται και το πλάτος όπως είναι φυσιολογικό άλλωστε και το μέγεθος της μετατόπισης του κέντρου βάρους των σωματιδίων που πραγματοποιείται.

2. Όσον αφορά τώρα τη συχνότητα διατοιχισμού 0.2Hz, βλέπουμε ότι κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου η μετατόπιση του κέντρου βάρους κυμαίνεται στις ίδιες τιμές για τις περιπτώσεις υγρασίας και μη υγρασίας, μόνο που παρουσιάζεται μια μικρή διαφοροποίηση στο πλάτος διατοιχισμού για τις περιπτώσεις υγρασίας 30%, 50% και 70% σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς υγρασία όπως και για γωνία 30 μοίρες όπως ήδη έχουμε εξετάσει. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε μια μόνιμη μετατόπιση του κέντρου βάρους προς τα δεξιά αφού η καμπύλες τις υγρασίας είναι πάνω από τη καμπύλη χωρίς υγρασία.
3. Στα 3.5 δευτερόλεπτα περίπου, παρατηρούμε ότι το πλάτος στις περιπτώσεις υγρασίας 30% και 70% αυξάνεται, κάτι το οποίο δε συμβαίνει στις υπόλοιπες περιπτώσεις που εξετάσαμε.
4. Μετά τη μικρή αύξηση του πλάτους που παρατηρείται στα 3.5 δευτερόλεπτα, τα σωματίδια συνεχίζουν να ταλαντεύονται με το ίδιο πλάτος όπως στη περίπτωση χωρίς υγρασίας, μόνο που ο άξονας ταλάντωσης έχει μετατοπιστεί κατά 0.6 εκατοστά περίπου στις περιπτώσεις υγρασίας 30%, 50% και 70%.
5. Λίγο πριν το πέρας της ταλάντωσης και συγκεκριμένα στα 8.4 δευτερόλεπτα, παρατηρούμε μια απότομη αύξηση του πλάτους ταλάντωσης λόγω μεγαλύτερης ευκινήσιας των σφαιρικών σωματιδίων για τις περιπτώσεις υγρασίας 30% και 50%.
6. Καθώς αυξάνεται η γωνία διατοιχισμού της δεξαμενής, παρατηρούμε ότι οι κρίσιμες τιμές του πλάτους και κατά συνέπεια αλλαγή στη συμπεριφορά των σφαιρικών σωματιδίων, προέρχονται από τα μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας μεταξύ των σωματιδίων κάτι που στις μικρότερες γωνίες διατοιχισμού δεν ίσχυε.
7. Για συχνότητα διέγερσης 0.6Hz, παρατηρούμε ότι η διαφορά στο πλάτος διατοιχισμού μεταξύ των περιπτώσεων υγρασίας και μη, δεν είναι τόσο μεγάλη, όσο στη προηγούμενη περίπτωση για συχνότητα 0.2Hz και υγρασία 50%.
8. Με τη προσθήκη υγρασίας στη δεξαμενή παρατηρούμε ότι το πλάτος ταλάντωσης στη πρώτη περίοδο σε όλες τις περιπτώσεις υγρασίας αυξάνεται σε σχέση με το κανονικό και επίσης βλέπουμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις υγρασίας και σε διαφορετικές πάντα χρονικές στιγμές το πλάτος ταλάντωσης των σωματιδίων αυξάνεται λίγο σε σχέση με το πλάτος ταλάντωσης χωρίς υγρασία όπως στη περίπτωση υγρασίας 50% τη χρονική στιγμή των 2.1 δευτερολέπτων.
9. Ανάλογα το ποσοστό υγρασία που υπάρχει ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια, κάθε φορά συμπεριφέρονται με τελείως διαφορετικό τρόπο και εμφανίζουν μέγιστα πλάτη σε τελείως διαφορετικές χρονικές στιγμές κάτι το οποίο είναι πολύ δύσκολο να το προβλέψεις.
10. Το ότι σε μεγάλες γωνίες και συχνότητες διατοιχισμού δε παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές στο πλάτος ταλάντωσης του κέντρου βάρους των σφαιρικών σωματιδίων,

μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι τα σφαιρικά σωματίδια αναπτύσσουν μεγάλες ταχύτητες και η ελκτική δύναμη δεν μπορεί να συγκρατήσει τα σωματίδια μεταξύ τους.

Η συσσώρευση των σφαιρικών σωματιδίων στην δεξιά μεριά της δεξαμενής λόγω της μετατόπισης που δημιουργείται για γωνία διατοιχισμού 40 μοίρες, συχνότητα 0.2Hz και υγρασία 0% και 50%, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα 53 την χρονική στιγμή 8.7 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 53 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 8.6 sec για γωνία διατοίχισης 40 μοίρες , συχνότητα 0.2 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 70%.

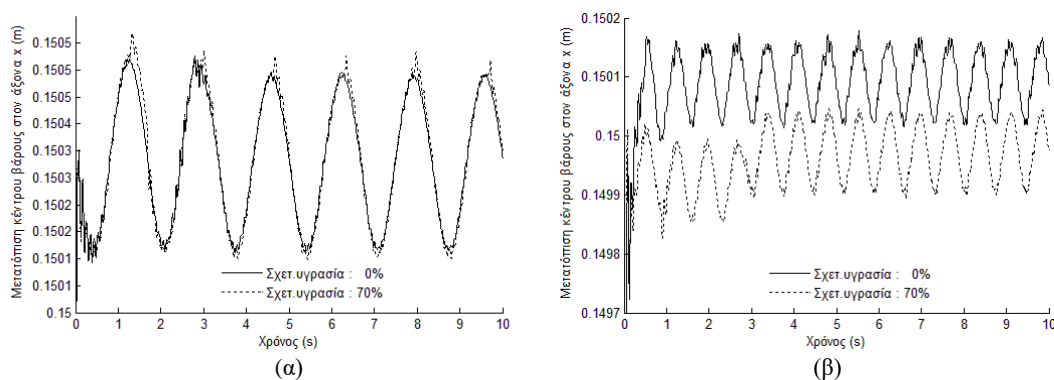
Αναλύοντάς τα αποτέλεσμα από τις προσομοιώσεις που εκτελέσαμε για γωνία διατοιχισμού 40 μοίρες και συχνότητά 1.2 Hz, διαπιστώσαμε ότι ακόμα και μερικά σφαιρικά σωματίδια βγαίνουν εκτός δεξαμενής λόγω του γρήγορου διατοιχισμού με αποτέλεσμα τα αποτελέσματα που προκύπτουν να μην είναι ακριβή και γι' αυτό το λόγο δεν παρουσιάζονται.

## 7.1.3 Σημείο Περιστροφής (0.15,0.11)

### 7.1.3.1 Γωνία Διατοίχισμού $10^0$ μοίρες

Στη συνέχεια της μελέτης μας, εξετάζουμε την περίπτωση όπου το σημείο περιστροφής της δεξαμενής αλλάζει κατά τον άξονα y και τοποθετείται στην πάνω επιφάνεια των σφαιρικών σωματιδίων δηλαδή περίπου στα 0,11 μέτρα. Τα υπόλοιπα μεγέθη της προσομοίωσης και η μεθοδολογία που ακολουθείται παραμένει η ίδια όπως και προηγουμένως.

Κατασκευάζουμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για συχνότητα διατοίχισης 0.6 Hz για ποσοστό υγρασίας 0 και 70% και για συχνότητα διατοίχισης 1,4Hz για ποσοστό υγρασίας 0 και 70% αντίστοιχα, για σημείο περιστροφής (0.15,0.11). Η επιλογή υγρασίας 70% επιλέχθηκε λόγω του ότι είναι η δυσμενέστερη περίπτωση ενώ τα υπόλοιπα ποσοστά υγρασίας συμπεριφέρονται πάνω κάτω με το ίδιο τρόπο.



Διάγραμμα 11 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοίχισμού  $10^0$  μοίρες , υγρασία 0% και 70% για συχνότητα (α) 0.6Hz (β) 1.4Hz

Από το παραπάνω διάγραμμα 11(α), μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα:

1. Για γωνία διατοίχισμού  $10^0$  μοίρες και συχνότητα 0.6Hz, δεν παρατηρείται καμία σημαντική αλλαγή στη συμπεριφορά του κέντρου βάρους πάρα μόνο μια μικρή μείωση στο πλάτος διατοίχισμού. Αυτό λογικά θα οφείλεται στο γεγονός του ότι τόσο η γωνία διατοίχισσης όσο και η συχνότητα είναι μικρές.
2. Και στη περίπτωση που έχει μετατοπιστεί το σημείο περιστροφής, με τη προσθήκη υγρασία στα σωματίδια, έχουμε ίδια πλάτη διατοίχισμού με πάρα πολύ μικρές αλλαγές όπως και στην αρχική περίπτωση για σημείο περιστροφής (0.15,0).

Εξετάζοντας προσεκτικά το διάγραμμα 11(β), οδηγούμαστε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

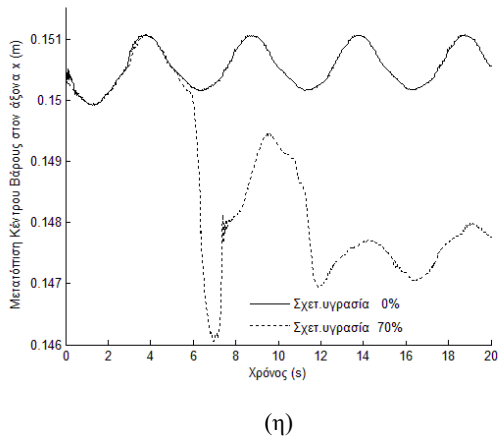
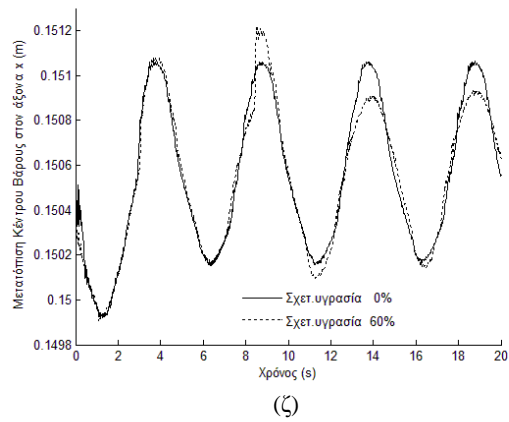
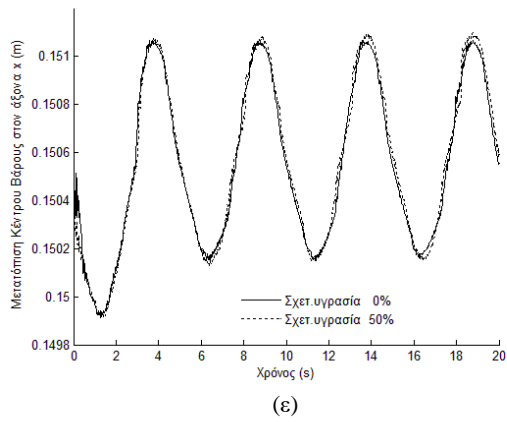
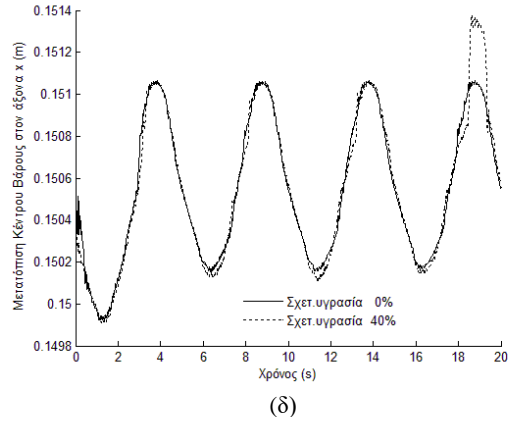
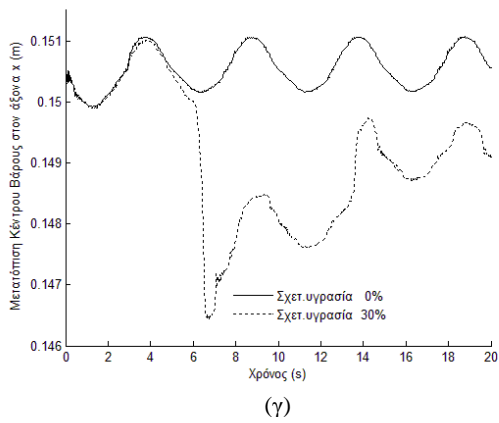
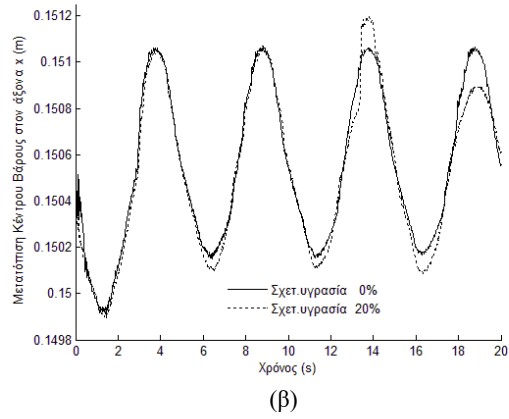
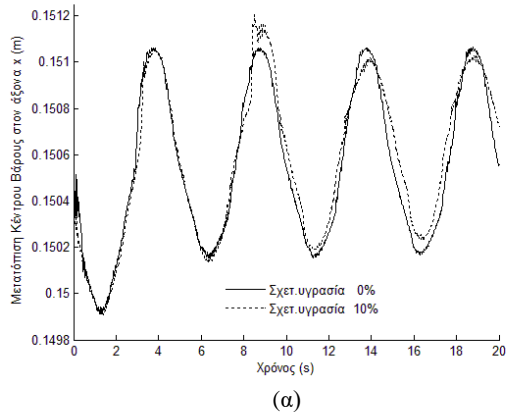
1. Το πλάτος διατοιχισμού όταν το σημείο περιστροφής είναι το (0.15,0) είναι πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος όταν σημείο περιστροφής είναι το (0.15,0.11) δηλαδή στην ουσία έχουμε μεγαλύτερη μετατόπιση του κέντρου βάρους στη πρώτη περίπτωση.
2. Και στις δύο περιπτώσεις περιστροφής της δεξαμενής που εξετάζουμε, παρατηρούμε μια μετατόπιση σφαιρικών σωματιδίων προς το αριστερό μέρος της.
3. Όταν η δεξαμενή περιστρέφεται περί το σημείο (0.15,0.11), η ταλάντωση των σφαιρικών σωματιδίων και στη περίπτωση υγρασίας και χωρίς υγρασία, πραγματοποιείται πιο κοντά στο μέσο της δεξαμενής από ότι στο σημείο περιστροφής (0.15,0) όπου είναι πιο δεξιά από το μέσο.
4. Μετά τα 3.5 δευτερόλεπτα περίπου, το σημείο ισορροπίας του κέντρου βάρους στις περιπτώσεις υγρασίας και για τα δύο σημεία είναι το ίδιο, κάτι το οποίο δεν ισχύει στη περίπτωση της μη υγρασίας όπου υπάρχει όπως είπαμε εμφανή διαφορά.
5. Γενικά, λόγω της μικρής γωνίας διατοιχισμού, δε παρατηρούμε κάποια σημαντική διαφορά στη μετατόπιση του κέντρου βάρους μεταξύ των δύο σημείων περιστροφής που εξετάσαμε.

#### 7.1.3.2 Γωνία Διατοιχισμού 20<sup>0</sup> μοίρες

---

Στη συνέχεια της μελέτης μας, εξετάζουμε την περίπτωση όπου το σημείο περιστροφής της δεξαμενής αλλάζει κατά τον άξονα y και τοποθετείται στην πάνω επιφάνεια των σφαιρικών σωματιδίων δηλαδή περίπου στα 0,11 μέτρα. Τα υπόλοιπα μεγέθη της προσομοίωσης και η μεθοδολογία που ακολουθείται παραμένει η ίδια όπως και προηγουμένως.

Αυξάνοντας τώρα τη γωνία διατοιχισμού στις 20 μοίρες, κατασκευάζουμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν ομοίως τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για συχνότητα διατοίχισης 0.2Hz, 0.6Hz και 1.4Hz για μεγαλύτερο εύρος υγρασίας από 0% έως 70% διότι παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον .



Διάγραμμα 12 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού 20 μοίρες, συχνότητα 0.2 Hz και υγρασία (α) 10% (β) 20% (γ) 30% (δ) 40% (ε) 50% (ζ) 60% (η) 70%

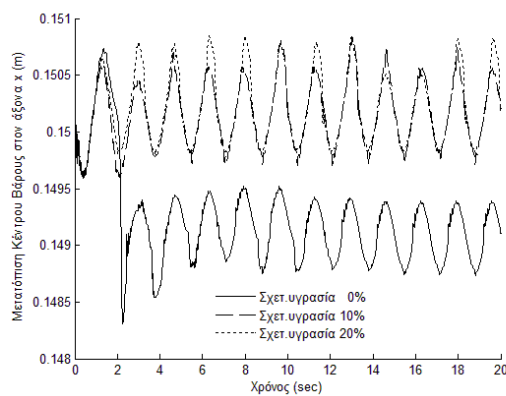
Εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα 12(α) έως 12(η), παρατηρούμε τα ακόλουθα :

1. Και στις δύο περιπτώσεις περιστροφής που μελετάμε, παρατηρούμε ίδια τιμή για το πλάτος διατοιχισμού πιθανότατα λόγω της χαμηλής συχνότητας διέγερσης.
2. Σε αντίθεση με τη περίπτωση όπου το σημείο περιστροφής είναι το (0.15,0) όπου παρατηρούμε μια αύξηση στο πλάτος διατοιχισμού για ποσοστό υγρασίας 10% με αποτέλεσμα να έχουμε τελικά μια μόνιμη μετατόπιση του κέντρου βάρους στην αριστερή πλευρά της δεξαμενής, στο σημείο (0.15,0.11) παρατηρούμε ίδια συμπεριφορά στη ταλάντωση με μια μόνο μικρή αύξηση του πλάτους τη χρονική στιγμή των 9 δευτερολέπτων.
3. Για ποσοστό υγρασίας 20%, παρατηρούμε ίδια συμπεριφορά με τη περίπτωση χωρίς υγρασίας, κάτι το οποίο δεν ισχύει στο σημείο περιστροφής (0.15,0) όπου τα σωματίδια ήταν πολύ πιο ευκίνητα.
4. Όταν αυξήσουμε το ποσοστό υγρασίας σε 30%, παρατηρούμε πάλι ίδια συμπεριφορά όσον αφορά τα σωματίδια με σχεδόν ίδια μετατόπισης του κέντρου βάρους και με τη διαφορά ότι στο σημείο περιστροφής (0.15,0.11), τα σωματίδια τείνουν να σταθεροποιηθούν πιο νωρίτερα, μετατοπισμένος όμως ο άξονας περιστροφής προ το αριστερό μέρος της δεξαμενής.
5. Για ποσοστά υγρασίας 40%, 50% και 60%, δεν παρατηρούμε σημαντικές αλλαγές στη μετατόπιση του κέντρου βάρους, πάρα μόνο μικρές αυξήσεις του πλάτους ταλάντωσης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.
6. Οι δύο περιπτώσεις συμπίπτουν για ποσοστό υγρασίας 10%, 30%, 40% και 60%, όμως για 20%, 50% και 70% έχουν τελείως αντίθετη συμπεριφορά τα σφαιρικά σωματίδια. Στη πρώτη περίπτωση περιστροφής για υγρασία 20% και 50%, παρατηρούμε απότομες και μεγάλες μετακινήσεις σφαιρικών σωματιδίων και μη σταθερή ταλάντωση του κέντρου βάρους, ενώ στη δεύτερη παρατηρούμε σταθερό πλάτος ταλάντωσης χωρίς καθόλου απότομες αλλαγές στη συμπεριφορά των σωματιδίων.
7. Για ποσοστό υγρασίας 70%, παρατηρούμε τεράστια αλλαγή στη συμπεριφορά των σωματιδίων στη δεύτερη περίπτωση περιστροφής και πραγματοποιείται απότομη μετακίνηση σωματιδίων, ενώ στο πρώτο σημείο περιστροφής το πλάτος ήταν σταθερό και χωρίς απότομες μετακινήσεις.
8. Παρατηρούμε ότι όταν το ποσοστό υγρασίας γίνει 30%, τότε πραγματοποιείται η απότομη μετακίνηση των σωματιδίων και αλλάζει τελείως η συμπεριφορά του όποτε μπορούμε να το θεωρήσουμε ως το κρίσιμο όριο υγρασίας μετά το οποίο το υλικό ξεκινάει να έχει ποιοτικά διαφορετική συμπεριφορά.

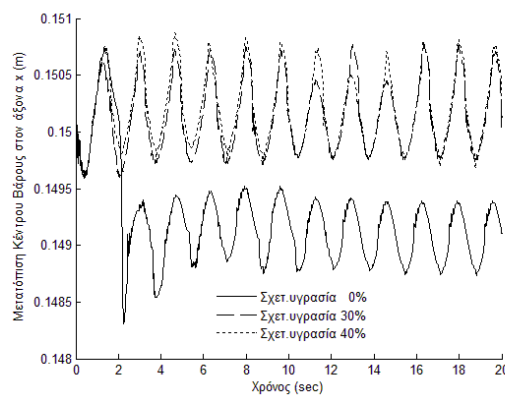


9. Τα σωματίδια συνεχίζουν να είναι ευκίνητα και για μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας όμως παρατηρούμε ότι για ποσοστό υγρασίας 40%,50% και 60%, παύουν να είναι ευκίνητα και συμπεριφέρονται όπως στη περίπτωση χωρίς υγρασία.
10. Τη μεγαλύτερη τιμή η μετατόπιση του κέντρου βάρους την λαμβάνει όταν το ποσοστό υγρασίας μεταξύ των σφαιρικών σωματιδίων είναι 70%. Αυτή η τιμή θα είναι πολύ σημαντική όταν μελετάμε την ευστάθεια του πλοίου.

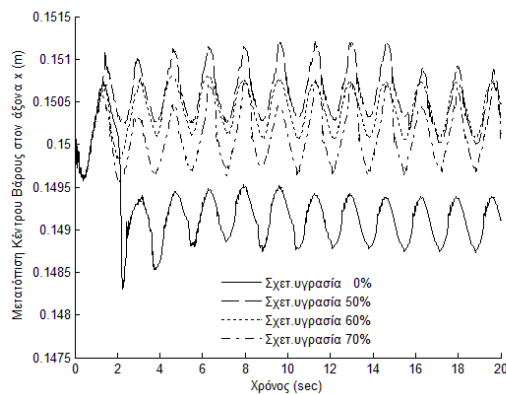
Στο διάγραμμα 13 απεικονίζεται η μετατόπιση του κέντρου βάρους για γωνία διατοιχισμού 20 μοίρες και συχνότητα 0.6Hz για υγρασία από 0% έως 70%.



(α)



(β)



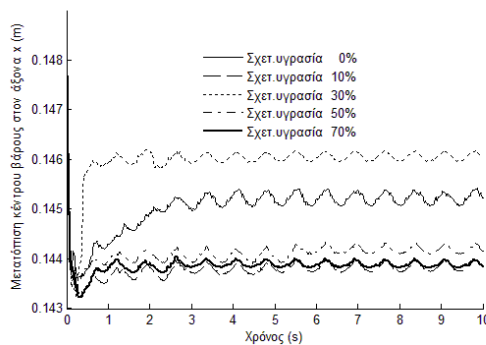
(γ)

Διάγραμμα 13 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού 20 μοίρες , συχνότητα 0.6 Hz και υγρασία (α) 10%,20%,(β)30% ,40% (γ) 50% ,60% ,70%

Εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα 13(α) έως 13(γ), παρατηρούμε τα ακόλουθα :

1. Όταν το σημείο περιστροφής της δεξαμενής είναι το (0.15,0.11) στη περίπτωση χωρίς υγρασία, επίσης παρατηρούμε απότομη αύξηση του πλάτους ταλάντωση στην πρώτη περίοδο, όπως συνέβαινε και στη πρώτη περίπτωση, μόνο που συμβαίνει προς την αντίθετη κατεύθυνση από πριν δηλαδή προς το αριστερό μέρος της δεξαμενής.

- Όταν η υγρασία δεν είναι παρούσα στα σωματίδια, τότε στη πρώτη περίπτωση περιστροφής το πλάτος σταθεροποιούνται τη χρονική στιγμή των 4 δευτερολέπτων, ενώ τώρα σταθεροποιούνται σχεδόν 2 δευτερόλεπτα νωρίτερα και συνεχίζει την ταλάντωσή με σταθερό πλάτος.
- Ενώ στις περιπτώσεις υγρασίας 20% και 30% στη πρώτη περίπτωση περιστροφής είχαμε απότομες κινήσεις των σωματιδίων τόσο στην αρχή όσο και κατά τη διάρκεια του διατοιχισμού και έπειτα σταθεροποιούνται, στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούμε μια σταθεροποίηση του πλάτους από την αρχή της ταλάντωση με μετατοπισμένο τον άξονα ταλάντωσης προς το μέσο της δεξαμενής για τις περιπτώσεις υγρασίας από 10% έως 40%.
- Η ίδια μετατόπιση του κέντρου ταλάντωσης ισχύει και για τις περιπτώσεις υγρασίας 50%,60% και 70% διαφορετική για κάθε περίπτωση, μόνο που από το 15 δευτερόλεπτο και μετά παρατηρείται μια μείωση του πλάτους ταλάντωσης.
- Σε όλες τις περιπτώσεις υγρασίας για σημείο περιστροφής (0.15,0.11), παρατηρούμε αύξησή του πλάτους διατοιχισμού σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς υγρασία.



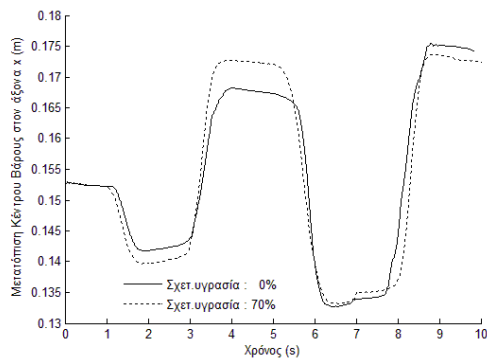
Διάγραμμα 14 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού 20 μοίρες , συχνότητα 1.4 Hz και υγρασία 10%,20%,30% ,40% ,50% ,60% ,70%

Από την εξέταση του διαγράμματος 14, συμπεραίνουμε τα εξής:

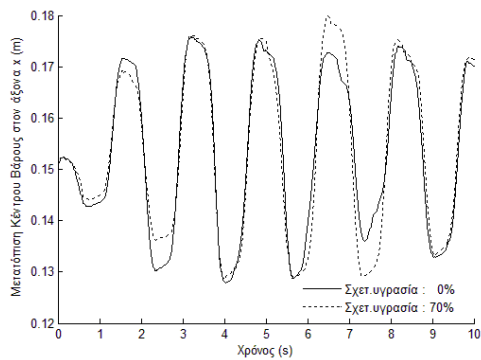
- Όταν η δεξαμενή περιστρέφεται περί το σημείο (0.15,0.11), τότε το πλάτος διατοιχισμού μειώνεται υπερβολικά μέχρι και 9 φορές, όποτε θεωρούμε πιο ασφαλή τη περίπτωση του σημείο περιστροφής (0.15,0.11) όπως είναι προφανές.
- Ενώ σε όλες τις περιπτώσεις υγρασίας, το κέντρο βάρους μετατοπίζεται προς το αριστερό μέρος της δεξαμενής, στη περίπτωση της υγρασίας σε ποσοστό 30%, μετατοπίζεται προς την αντίθετη κατεύθυνση.
- Είναι προφανές, ότι η δυσμενέστερη περίπτωση στη συγκεκριμένη συχνότητα ταλάντωσης είναι η ταλάντωση γύρω από το σημείο (0.15,0), η οποία επηρεάζει περισσότερο τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.

### 7.1.3.3 Γωνία Διατοιχισμού 30<sup>0</sup> μοίρες

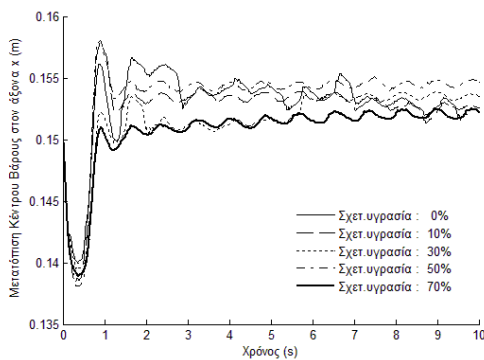
Ένα από τους λόγους που επιπλέον εξετάσαμε την διατοίχιση της δεξαμενής σε διαφορετικό σημείο περιστροφής, είναι για να μπορέσουμε να εξετάσουμε τις συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων χωρίς να δημιουργούνται τέτοιου είδους προβλήματα. Έτσι, κατασκευάζουμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για συχνότητα διατοίχισης 0.2 Hz και 0.6Hz για ποσοστό υγρασίας 0% και 70%, όπου το ποσοστό 70% είναι η πιο δυσμενέστερη περίπτωση όπως προέκυψε μετά από έλεγχο, για σημείο περιστροφής (0.15,0.11). Το σημείο περιστροφής της δεξαμενής αλλάζει κατά τον άξονα y και τοποθετείται στην πάνω επιφάνεια των σφαιρικών σωματιδίων δηλαδή περίπου στα 0,11 μέτρα. Τα υπόλοιπα μεγέθη της προσομοίωσης και η μεθοδολογία που ακολουθείται παραμένει η ίδια όπως και προηγουμένως.



(α)



(β)



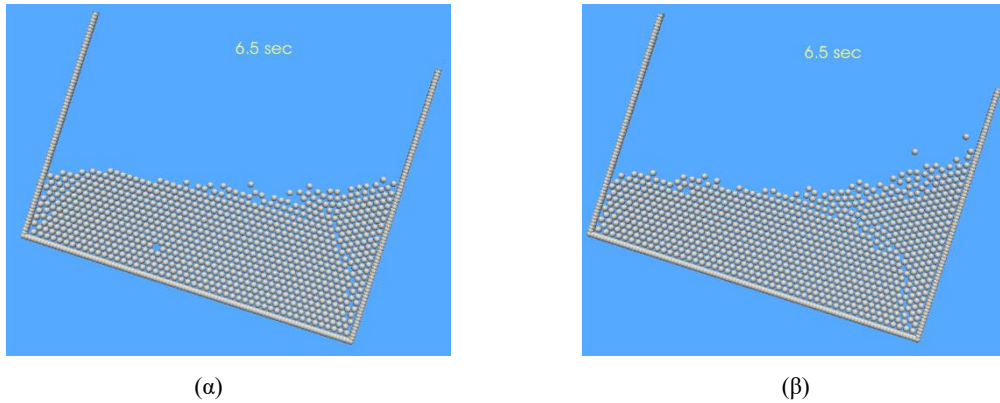
(γ)

Διάγραμμα 15: Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού 30 μοίρες , για σημείο περιστροφής (0.15,0.11) , υγρασία 0% και 70% για συχνότητα (α) 0.2Hz (β) 0.6Hz (γ) 1.2Hz

Από την εξέταση των διαγραμμάτων 15(α) έως 15(γ), μπορούμε να βγάλουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα :

1. Και στις δύο περιπτώσεις περιστροφής που μελετάμε, παρατηρούμε ίδια περίπου συμπεριφορά όσο αφορά τη ταλάντωση των σφαιρικών σωματιδίων.
2. Για συχνότητα διστοιχισμού 0.2Hz, παρατηρούμε ίδιο πλάτος ταλάντωσης για το κέντρο βάρους μόνο που ο άξονας ταλάντωσης έχει μετατοπιστεί προς το κέντρο της δεξαμενής κατά 0.5 εκατοστά.
3. Για συχνότητα διατοιχισμού 0.6 Hz ισχύει το αντίθετο, δηλαδή έχει μείνει σταθερός ο άξονας γύρω από τον οποίο ταλαντώνονται τα σφαιρικά σωματίδια αλλά έχει μειωθεί το πλάτος ταλάντωσης στη περίπτωση του σημείου περιστροφής (0.15,0.11) κατά 1.5 εκατοστά.
4. Για συχνότητα διατοιχισμού 1.2Hz, παρατηρούμε τεράστιες αλλαγές όσον αφορά το πλάτος διατοιχισμού, το οποίο στη περίπτωση του σημείου περιστροφής (0.15,0.11) φτάνει να μειώνεται μέχρι και 4 εκατοστά περίπου.
5. Το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης των σωματιδίων λόγω της απότομης κίνησης των σωματιδίων που παρατηρήθηκε στη πρώτη περίπτωση για συχνότητα διατοιχισμού 0.2 Hz τη χρονική στιγμή των 6.2 δευτερόλεπτων, στη περίπτωση της περιστροφής γύρω από το σημείο (0.15,0.11) εμφανίζεται πολύ πιο νωρίς και συγκεκριμένα τη χρονική στιγμή 3.4 όμως με μικρότερη τιμή αυτή τη φορά.
6. Για συχνότητα διατοιχισμού 0.6Hz στη περίπτωση περιστροφής γύρω από το σημείο (0.15,0.11), παρατηρούμε ότι με τη προσθήκη υγρασίας μικραίνει το πλάτος ταλάντωσης των σφαιρικών σωματιδίων στις δυο πρώτες περιόδους ταλάντωσης ενώ αργότερα αυξάνεται και γίνεται μεγαλύτερο ιδιαίτερα στις τελευταίες περιόδους.
7. Για συχνότητα ταλάντωσης 1.2Hz, παρατηρούμε ότι με τη προσθήκη υγρασίας στη δεξαμενή τα σωματίδια παρόλο που το αρχικό πλάτος ταλάντωσης λόγω της γωνίας είναι αρκετά μεγάλο, στη συνέχεια ταλαντεύονται με σταθερό πλάτος χωρίς απότομες κατακρημνίσεις όπως στη περίπτωση χωρίς υγρασία και έχουμε μετατόπιση του κέντρου βάρους προς το δεξί μέρος της δεξαμενής ιδιαίτερα στις περιπτώσεις υγρασίας 30% και 70%. Επίσης, το σημαντικό είναι ότι αλλάζοντας το σημείο περιστροφής της δεξαμενής, δεν αντιμετωπίζουμε προβλήματα με έξοδο των σφαιρικών σωματιδίων από τη δεξαμενή και έχουμε ομαλά αποτελέσματα.

Στην ακόλουθη εικόνα 54, παρατηρούμε τη συσσώρευση των σφαιρικών σωματιδίων προς το δεξί μέρος της δεξαμενής τη χρονική στιγμή 6.5 δευτερόλεπτα για υγρασία 0% και 70% για σημείο περιστροφής (0.15,0.11).

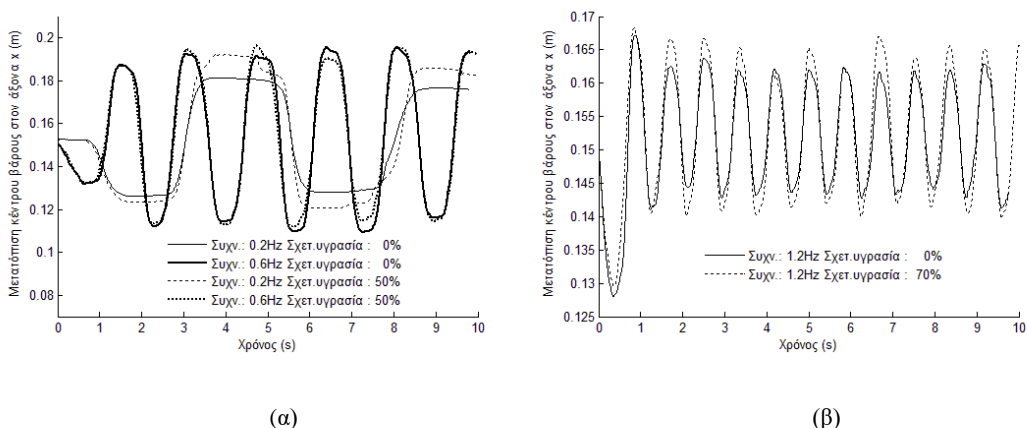


Εικόνα 54 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 6.5 sec για γωνία διατοίχισης 30 μοίρες , συχνότητα 0.6 Hz ,σημείο περιστροφής (0.15,0.11) με υγρασία (α) 0% (β) 70%

#### 7.1.3.4 Γωνία Διατοίχισμού 40<sup>0</sup> μοίρες

Στη συνέχεια, εξετάζουμε την περίπτωση όπου το σημείο περιστροφής της δεξαμενής αλλάζει κατά τον άξονα y και τοποθετείται στην πάνω επιφάνεια των σφαιρικών σωματιδίων δηλαδή περίπου στα 0,11 μέτρα. Τα υπόλοιπα μεγέθη της προσομοίωσης και η μεθοδολογία που ακολουθείται παραμένει η ίδια όπως και προηγουμένως.

Αυξάνοντας τώρα τη γωνία διατοίχισμού στις 40 μοίρες, κατασκευάζουμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν ομοίως τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για συχνότητα διατοίχισης 0.2Hz και 0.6Hz για ποσοστό υγρασίας αυτή τη φορά 0% και 70%,για σημείο περιστροφής (0.15,0.11) αντίστοιχα.



Διάγραμμα 16: Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοίχισμού 30 μοίρες , για σημείο περιστροφής (0.15,0.11) , για συχνότητα (α) 0.2Hz / 0.6Hz - υγρασία 50% (β) 1.2Hz - υγρασία 70%

Από το διάγραμμα 16(α), παρατηρούμε τα ακόλουθα :

1. Οι δυο ταλαντώσεις στα δύο σημεία περιστροφής, παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά όσον αφορά το πλάτος ταλάντωσης των σφαιρικών σωματιδίων.

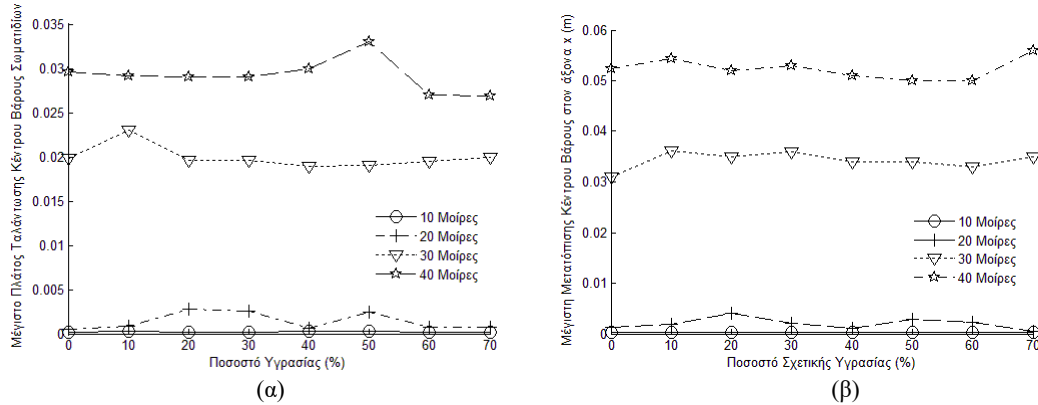
2. Ενώ στη περίπτωση περιστροφής γύρω από το σημείο (0.15,0), παρατηρήσαμε μια αύξηση του πλάτους διατοιχισμού των σωματιδίων στα 8 δευτερόλεπτα περίπου, στο σημείο περιστροφής (0.15,0.11) παρατηρούμε δύο αυξήσεις του πλάτους ταλάντωσης, μια στο τέλος όπως και ισχύει και για το άλλο σημείο περιστροφής και μια στο τέλος της πρώτης περιόδου όπου το πλάτος αυξάνεται περίπου 30% σε σχέση με το αρχικό σημείο περιστροφή που εξετάσαμε.
3. Για συχνότητα ταλάντωσης της δεξαμενής 0.6Hz, παρατηρούμε ότι οι δύο περιπτώσεις έχουν περίπου ίδια συμπεριφορά με τη μόνη διαφορά ότι στη περίπτωση του σημείου περιστροφής (0.15,0.11) έχουμε μικρότερο πλάτος ταλάντωσης των σφαιρικών σωματιδίων κατά 2.0 εκατοστά.
4. Στη περίπτωση περιστροφής γύρω από το σημείο (0.15,0.11), παρατηρούμε ότι με τη προσθήκη υγρασίας το πλάτος ταλάντωσης των σφαιρικών σωματιδίων στις δυο πρώτες περιόδους ταλάντωσης παραμένει το ίδιο ενώ αργότερα μειώνεται ελαφρά.

Λόγω του ότι δεν εξετάσαμε στο σημείο περιστροφής τη συχνότητα ταλάντωσης 1.4Hz, επειδή τα αποτελέσματα δεν ήταν αληθή λόγω της εξόδου από τη δεξαμενή σφαιρικών σωματιδίων, κατασκευάζουμε τα διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους στον άξονα x για γωνία διατοιχισμού 40 μοίρες, συχνότητα ταλάντωσης 1.2 Hz και ποσοστό υγρασίας 70%, στο σημείο περιστροφής (0.15,0.11).

Από το διάγραμμα 16(β), συμπεραίνουμε τα ακόλουθα :

1. Με τη προσθήκη υγρασίας ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια, το πλάτος ταλάντωσης τους αυξάνεται και συγκεκριμένα για ποσοστό υγρασίας 70% αυξάνεται περίπου 1 εκατοστό.
2. Το πλάτος ταλάντωσης των σφαιρικών σωματιδίων είναι αρκετά μικρότερο από ότι για σημείο περιστροφής (0.15,0) και γι' αυτό το λόγο δεν έχουμε εξόδους των σωματιδίων από τη δεξαμενή και μπορούμε να απεικονίσουμε τα αποτελέσματα του κώδικα.
3. Λόγω της όχι και τόσο υψηλής ταχύτητας που αναπτύσσουν τα σφαιρικά σωματίδια μέσω της συγκριμένης περιστροφής, μπορούμε να διακρίνουμε διαφορές ανάμεσα στις περιπτώσεις υγρασίας και χωρίς υγρασία, κάτι το οποίο δεν ήταν εφικτό σε προηγούμενες περιπτώσεις λόγω των υψηλών ταχυτήτων που ανέπτυσαν τα σωματίδια και η ελκτική δύναμη πιθανώς να υπερνικούνταν.

Επιθυμώντας τελικά να βγάλουμε κάποια συγκεντρωτικά συμπεράσματα όσον αφορά την εξέταση της κίνησης του διατοιχισμού στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, κατασκευάζουμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν το πλάτος εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης για γωνίες διατοιχισμού 10,20,30 και 40 μοίρες και συχνότητες ταλάντωσης 0.2Hz και 0.6Hz.



Διάγραμμα 17 : Μέγιστο Πλάτος Ταλάντωσης Κέντρου Βάρους για μοίρες από 10° έως 40° για συχνότητα (α) 0.2Hz (β) 0.6Hz

Από τα τελικά διαγράμματα 17(α) και 17(β) όπου απεικονίζει τη συνολική μετατόπιση του κέντρου βάρους για συχνότητα διατοιχισμού 0.2Hz και 0.6Hz, μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα :

1. Όταν η γωνία διατοιχισμού είναι 10 μοίρες, παρατηρούμε ότι η μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων δεν αλλάζει σχεδόν καθόλου με τη προσθήκη οποιoδήποτε ποσοστού υγρασίας ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια και γι' αυτό το λόγο ούτε η άλλο δεν κατασκευάσαμε τα αντίστοιχα διαγράμματα.
2. Όταν η γωνία διατοιχισμού αυξηθεί και γίνει 20 μοίρες, παρατηρούμε μεγαλύτερη τιμή της μετατόπισης όπως είναι αναμενόμενο άλλωστε σε σχέση με τη γωνία διατοιχισμού 10 μοίρες και με προσθήκη υγρασίας ανάμεσα στα σωματίδια παρατηρούμε αύξηση της σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς υγρασία.
3. Τη μεγαλύτερη τιμή της μετατόπισης του κέντρου βάρους των σωματιδίων στη περίπτωση για γωνία διατοιχισμού 20 μοίρες, τη λαμβάνουμε για ποσοστό υγρασίας 20%. Υψηλές τιμές του πλάτους ταλάντωσης λαμβάνουμε και για μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας.
4. Για ποσοστό υγρασίας 20%, παρατηρούμε ότι η αυξημένη μετατόπιση των σφαιρικών σωματιδίων παραμένει σταθερή σε πολλά ποσοστά υγρασίας με εξαίρεση

το ποσοστό 40%,60% και 70% και σε αυτό το λόγω οφείλεται και η αρνητική κλίση της ευθείας.

5. Για γωνία διατοιχισμού 30 μοίρες, παρατηρούμε ότι σε μικρό ποσοστό υγρασίας, το πλάτος ταλάντωσης των σφαιρικών σωματιδίων αυξάνεται, ενώ στη συνέχεια με αύξηση του ποσοστού υγρασίας, το πλάτος ταλάντωσης ελαφρώς μειώνεται και σχηματίζει σχεδόν μια ευθεία γραμμή, που σημαίνει ότι δεν παρατηρούμε και μεγάλες αλλαγές στη συμπεριφορά των σφαιρικών σωματιδίων όταν αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας.
6. Για γωνία διατοιχισμού 40 μοίρες, παρατηρούμε ότι το πλάτος ταλάντωση για τις περιπτώσεις υγρασίας που εξετάζουμε, σχηματίζει πλήρως ευθεία γραμμή με εξαίρεση τα μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας από 50% έως 70%, όπου παρατηρούμε μια μικρή αύξηση για 50% υγρασίας ενώ στη συνέχεια μειώνεται και λαμβάνει τιμές ίδιες με τις αρχικές, που σημαίνει ότι εκτός από το ποσοστό υγρασίας 50%, τα σωματίδια έχουν την ίδια δυναμική συμπεριφορά με τη περίπτωση χωρίς υγρασία.

Από το τελικό διαγράμματα 60 όπου απεικονίζει τη συνολική μετατόπιση του κέντρου βάρους για συχνότητα διατοιχισμού 0.6Hz, μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα :

1. Ομοίως όπως και στη περίπτωση για συχνότητα διατοιχισμού 0.2 Hz έτσι και τώρα, όταν η γωνία διατοιχισμού είναι 10 μοίρες, παρατηρούμε ότι η μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων δεν αλλάζει σχεδόν καθόλου με τη προσθήκη οποιοδήποτε ποσοστού υγρασίας ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια.
2. Όταν η γωνία διατοιχισμού αυξηθεί και γίνει 20 μοίρες, παρατηρούμε μεγαλύτερη τιμή της μετατόπισης όπως είναι αναμενόμενο άλλωστε σε σχέση με τη γωνία διατοιχισμού 10 μοίρες και με προσθήκη υγρασίας ανάμεσα στα σωματίδια παρατηρούμε αύξηση της σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς υγρασία.
3. Για 20 μοίρες, παρατηρούμε ότι η αυξημένη μετατόπιση των σφαιρικών σωματιδίων πραγματοποιείται σε μεμονωμένα ποσοστά υγρασίας και την υψηλότερη τιμή την λαμβάνει για ποσοστό υγρασίας 20% ενώ υψηλές είναι οι τιμές και για υγρασία 50% και 60%.
4. Για γωνία διατοιχισμού 30 μοίρες, παρατηρούμε ότι σε μικρό ποσοστό υγρασίας, το πλάτος ταλάντωσης των σφαιρικών σωματιδίων αυξάνεται, ενώ στη συνέχεια με αύξηση του ποσοστού υγρασίας, το πλάτος ταλάντωσης σχηματίζει σχεδόν μια ευθεία γραμμή, που σημαίνει ότι δεν παρατηρούμε και μεγάλες αλλαγές στη συμπεριφορά των σφαιρικών σωματιδίων όταν αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας.

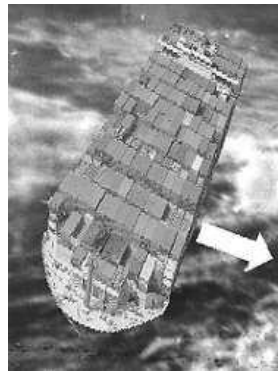


5. Το πλάτος ταλάντωσης για γωνία διατοιχισμού 40 μοίρες, σχηματίζει ευθεία γραμμή, με μια απότομη αύξηση του πλάτους για ποσοστό υγρασίας 70% και πλησιάζει πολύ τη περίπτωση για συχνότητα διατοιχισμού 0.2Hz.
6. Και στις δύο περιπτώσεις συχνότητας, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η γωνία διατοιχισμού της δεξαμενής, τόσο μικρότερη είναι η επίδραση της υγρασίας στα σφαιρικά σωματίδια.

## 7.2 Εγκάρσια Οριζόντια Ταλάντωση (Sway)

### 7.2.1 Εισαγωγή

Ο εγκάρσιος οριζόντιος διατοιχισμός (Sway), είναι όρος της Ναυτιλίας και αφορά τη κίνηση του πλοίου κατά μήκος του εγκάρσιου άξονα. Είναι μια κίνηση εξίσου σημαντική και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή διότι το πλοίο μπορεί να τεθεί σε σημαντικές δυνάμεις στρέψης και επίσης να τεθεί σε σημαντικό κίνδυνο το εμπόρευμα του. Στην ακόλουθη εικόνα βλέπουμε εμπορικό πλοίο υπό την κίνηση sway εν πλω.



Εικόνα 55 : Πλοίο που εκτελεί κίνηση sway εν πλω

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζουμε την απόκριση των σφαιρικών σωματιδίων εντός της δεξαμενής που εκτελεί κίνηση εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης. Οι μεταβλητές μας είναι τρεις:

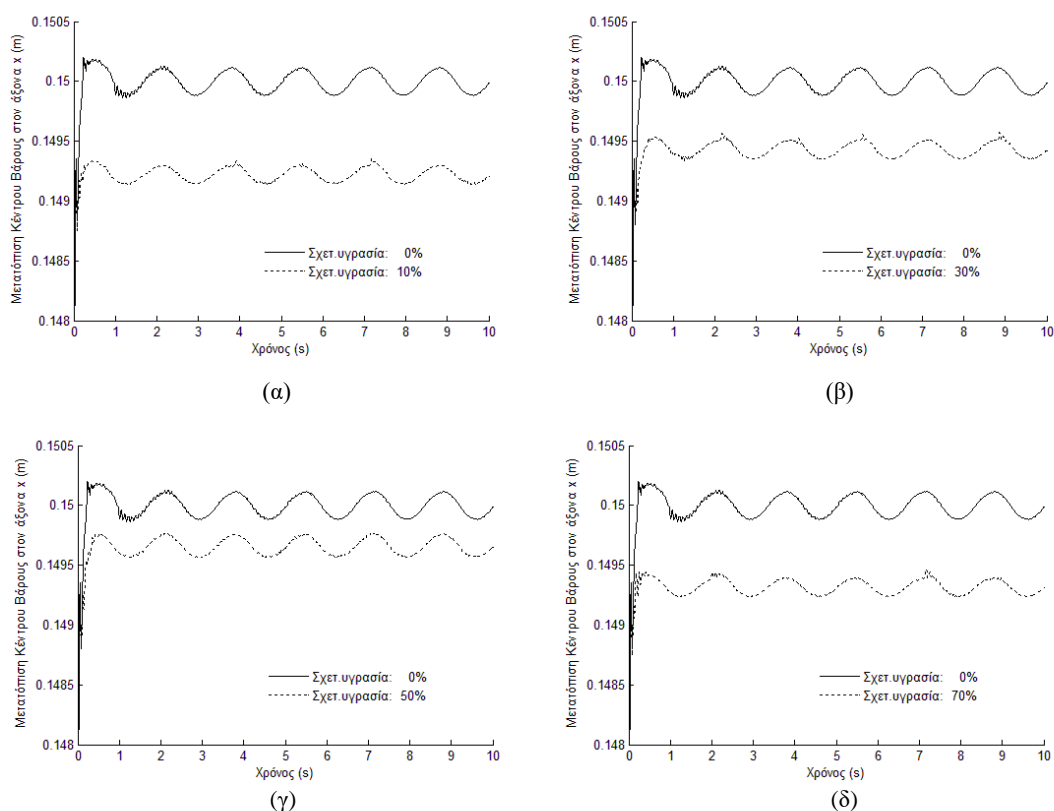
- A) το ποσοστό υγρασίας (0-70%)
- B) η συχνότητα διέγερσης (0-1.4 Hz)
- Γ) το πλάτος διέγερσης (2 cm, 6 cm, 10 cm)

Ο συνδυασμός των μεγάλων τιμών πλάτους και συχνότητας, ωθεί πολλά σφαιρικά σωματίδια εκτός δεξαμενής, οπότε για να αποφύγουμε αυτό το ανεπιθύμητο γεγονός, μεγαλώνουμε το ύψος των τοιχωμάτων της δεξαμενής για να μην αλλοιωθούν τα αποτελέσματα μας. Η διάρκεια του κάθε πειράματος είναι 10 δευτερόλεπτα δηλαδή 100.000 time steps.

Έχοντας συγκεντρώσει όλα τα αποτελέσματα από το τρέξιμο του κώδικα, παρατηρούμε ότι για πλάτος οριζόντιας εγκάρσιας ταλάντωσης 2 εκατοστά δεν παρουσιάζονται σημαντικές αλλαγές στη συμπεριφορά των σφαιρικών σωματιδίων και δε κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν, όποτε κατασκευάσαμε διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά, συχνότητα διατοίχισης 0.6 Hz και ποσοστά υγρασίας 0,10%,30%,50% και 70%.

### 7.2.2 Πλάτος Εγκάρσιας Οριζόντιας Ταλάντωσης 6 εκατοστά

Στη συνέχεια της μελέτης μας, επιλέγουμε πλάτος εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης σε 6 εκατοστά, θέλοντας να δούμε πως συμπεριφέρεται το κέντρο βάρους και κατασκευάζουμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για συχνότητα διατοίχισης 0.6 Hz και ποσοστά υγρασίας 0,10%,30%,50% και 70%. Λόγω του ότι για συχνότητα ταλάντωσης 0.2Hz, οι διαφορές στη μετατόπιση του κέντρου βάρους είναι πολύ μικρές και δεν μπορούν να αποτυπωθούν σε διάγραμμα, κατασκευάζουμε διάγραμμα για 0.6Hz για τη μετατόπιση του κέντρου βάρους κατά τον άξονα x.

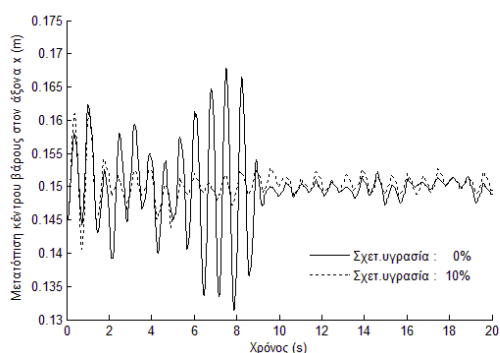


Διάγραμμα 18 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x για πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά, συχνότητα 0.6 Hz και υγρασία (α) 0% (β) 30% (γ) 50% (δ) 70%.

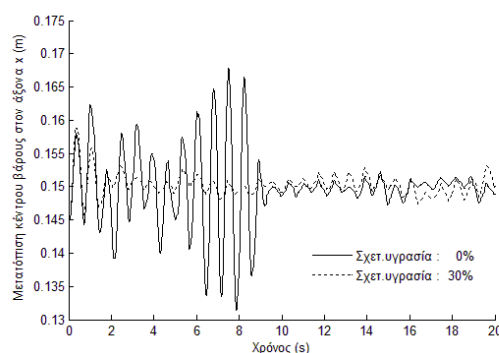
Από την εξέταση των διαγραμμάτων 18(α) έως 18(δ) συμπεραίνουμε τα ακόλουθα:

1. Με την αύξηση του πλάτους ταλάντωσης, άρχισαν και ξεχωρίζουν σημαντικά οι περιπτώσεις υγρασίας από τη περίπτωση χωρίς υγρασία και μάλιστα παρατηρούμε διαφορές στη τιμή γύρω από την οποία ταλαντώνονται σταθερά.
2. Όσο αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας στα σφαιρικά σωματίδια, παρατηρούμε ότι το κέντρο βάρους των σφαιρικών σωματιδίων μετατοπίζεται προς το κέντρο της δεξαμενής με εξαίρεση τη περίπτωση για υγρασία 70%.
3. Με τη προσθήκη υγρασίας, το πλάτος ταλάντωσης μειώνεται αλλά παραμένει σταθερό χωρίς έντονες αυξομειώσεις.

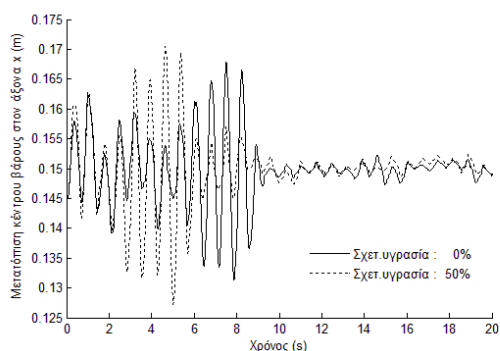
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται διαγράμματα που αφορούν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους για σχετικές υγρασίες 10%, 30%, 50% και 70% με αυξημένη τη συχνότητα ταλάντωσης στα 1.4Hz.



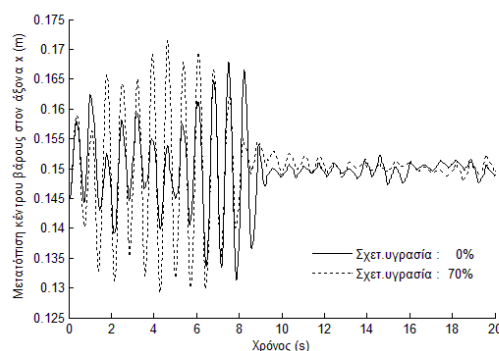
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Διάγραμμα 19 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x για πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά, συχνότητα 1.4 Hz και υγρασία (α) 0% (β) 30% (γ) 50% (δ) 70%.

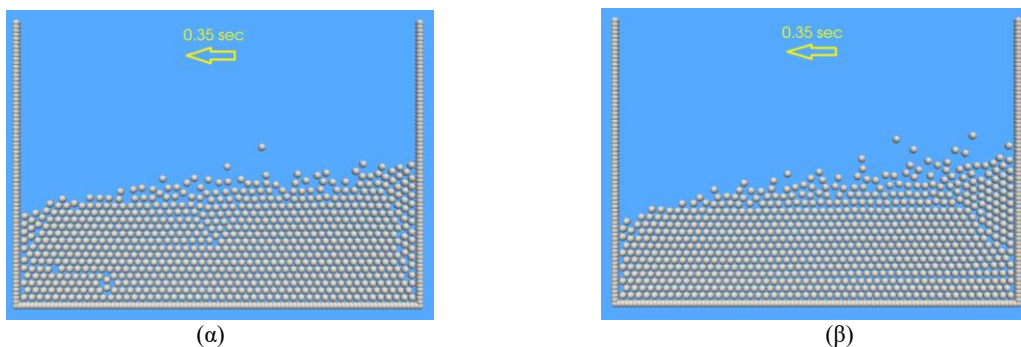
Από την εξέταση των διαγραμμάτων 19(α) έως 19(γ), συμπεραίνουμε τα ακόλουθα:

1. Για όλες τις περιπτώσεις υγρασίας που εξετάσαμε και για τη περίπτωση χωρίς υγρασία, παρατηρούμε ότι μετά τα 9 δευτερόλεπτα περίπου το πλάτος διατοιχισμού σταθεροποιείται και παρόλο τις μικρές αυξομειώσεις, τα σφαιρικά σωματίδια έχουν

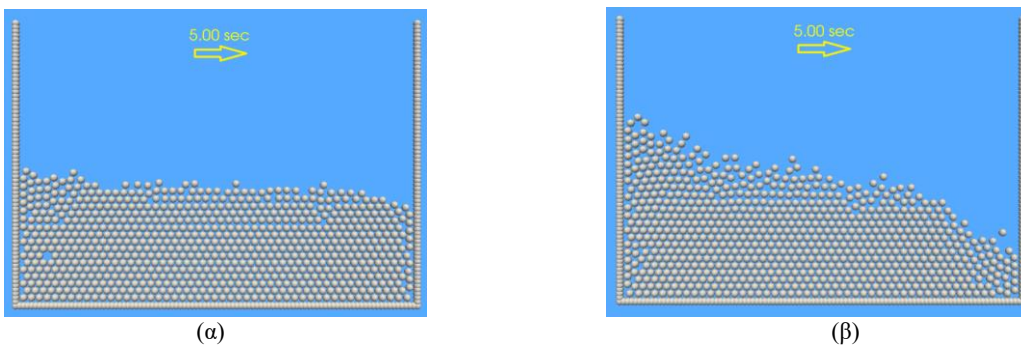
την ίδια δυναμική συμπεριφορά κάτι το οποίο δεν ισχύει πριν τα 9 δευτερόλεπτα όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα.

2. Για ποσοστό υγρασίας 10% και 30% ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια, παρατηρούμε την ακριβώς αντίθετη κατάσταση την οποία περιμέναμε, δηλαδή με τη προσθήκη υγρασίας ανάμεσα στα σωματίδια το πλάτος ταλάντωσης μειώνεται κατά πολύ αντί να αυξάνεται, όποτε μπορούμε να θεωρήσουμε ακίνδυνες τις συγκεκριμένες συνθήκες.
3. Εάν αυξήσουμε το ποσοστό της υγρασίας ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια σε 50%, αμέσως από την πρώτη περίοδο ταλάντωσης, παρατηρούμε ότι το πλάτος ταλάντωσης στη περίπτωση της υγρασίας είναι μεγαλύτερο περίπου κατά μισό εκατοστό και η ταλάντωση συνεχίζεται με το ίδιο πλάτος μέχρι τα 2,6 δευτερόλεπτα περίπου.
4. Από τα 2.6 δευτερόλεπτα και μέχρι τα 6.2 δευτερόλεπτα περίπου, το πλάτος ταλάντωσης στη περίπτωση χωρίς υγρασία μειώνεται ενώ για τη περίπτωση της υγρασίας σε ποσοστό 50% αυξάνεται κατά πολύ και επομένως παρατηρούμε μια έντονη κίνηση των φαρικών σωματιδίων και αλλάζει τελείως η δυναμική τους συμπεριφορά και σε μερικές χρονικές στιγμές διπλασιάζεται.
5. Τη χρονική στιγμή 4.6 δευτερόλεπτα, το κέντρο βάρους έχει μετατοπιστεί περίπου 2 εκατοστά από ότι στη περίπτωση χωρίς υγρασία όπου έχει μετατοπιστεί λίγα μόνο χιλιοστά. Μετά τα 6.2 δευτερόλεπτα, παρατηρούμε ότι στη περίπτωση της υγρασίας, μειώνεται το πλάτος ταλάντωσης στη μισή τιμή του πλάτους ταλάντωσης για την περίπτωση χωρίς υγρασίας.
6. Και στη περίπτωση χωρίς υγρασία και με ποσοστό υγρασία 50%, υπάρχει μια χρονική περίοδος, όπου το πλάτος ταλάντωσης του κέντρου βάρους των σφαιρικών σωματιδίων είναι το μέγιστο και σε όλη αυτή τη χρονική περίοδο παραμένει περίπου σταθερό. Με τη προσθήκη υγρασίας στα σφαιρικά σωματίδια, το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης και η συνεχής ταλάντωση γύρω από αυτό, πετυχαίνει σε πολύ λιγότερο χρόνο στη περίπτωση της υγρασίας και συγκεκριμένα στα 2.6 δευτερόλεπτα από ότι στη περίπτωση χωρίς υγρασία όπου συμβαίνει στα 6 δευτερόλεπτα περίπου.
7. Με τη προσθήκη υγρασίας, μειώνεται κατά πολύ ο χρόνος όπου πραγματοποιείται σταθερή ταλάντωσή με μέγιστο πλάτος και συνεπώς ότι πρόβλημα πιθανώς δημιουργηθεί, θα δημιουργηθεί πιο σύντομα.

Στις εικόνες 56 και 57, αποτυπώνεται η προσομοίωση της συνολικής μετατόπισης του κέντρου βάρους τη χρονική στιγμή 0.35 όπου πετυχαίνει το μέγιστο πλάτος κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου και τη χρονική στιγμή 5.0 δευτερόλεπτα όπου το έχουμε το μέγιστο πλάτος στη αντίθετη πλευρά της δεξαμενής.



Εικόνα 56 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 0.35 sec για πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά, συχνότητα 1,4 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 50%



Εικόνα 57 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 5 sec για πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά, συχνότητα 1,4 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 50%

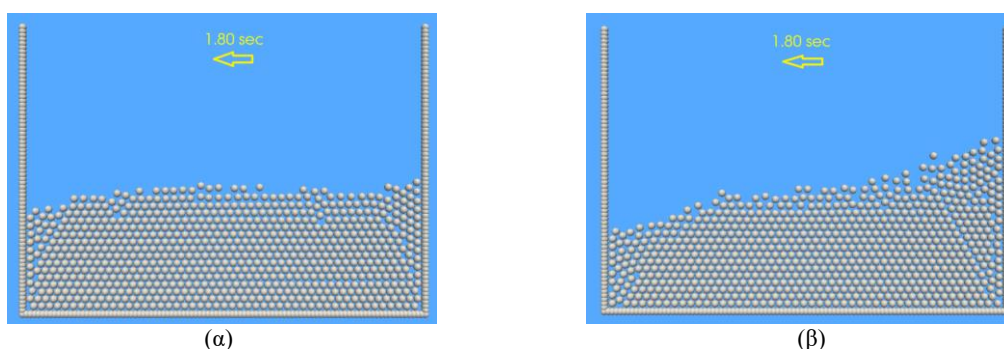
Από την εξέταση του διαγράμματος 19(δ), μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα :

1. Για το μέγιστο ποσοστό υγρασίας 70% που εξετάζουμε, αρχικά παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά του κέντρου βάρους των σφαιρικών σωματιδίων, είναι παρόμοια με τη περίπτωση όπου το ποσοστό υγρασίας ήταν 50%.
2. Διαπιστώνουμε ότι σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια των 10 δευτερολέπτων της προσομοίωσης που εκτελέσαμε, το πλάτος ταλάντωσης για υγρασία 70% είναι μεγαλύτερο από ότι χωρίς υγρασία και σε πολλές περιπτώσεις λαμβάνει τριπλάσια τιμή.
3. Από την έναρξη της ταλάντωσης, παρατηρούμε ότι το πλάτος είναι ελαφρώς μεγαλύτερο στη περίπτωση της υγρασίας και μικρότερο από τη περίπτωση για 50% υγρασία, όμως στη συνέχεια η ταλάντωση συνεχίζεται με πολύ μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης από τη περίπτωση χωρίς υγρασίας κάτι το οποίο σημαίνει ότι πολλά περισσότερα σφαιρικά σωματίδια μετατοπίζεται από την μια άκρη της δεξαμενής στην άλλη.
4. Αν μετρήσουμε τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σφαιρικών σωματιδίων τη χρονική στιγμή των 1.7 δευτερολέπτων, από τη καμπύλη υγρασία 70%, προκύπτει μετατόπιση του κέντρου βάρους από τη αρχική θέση ισορροπίας των σωματιδίων 1.8

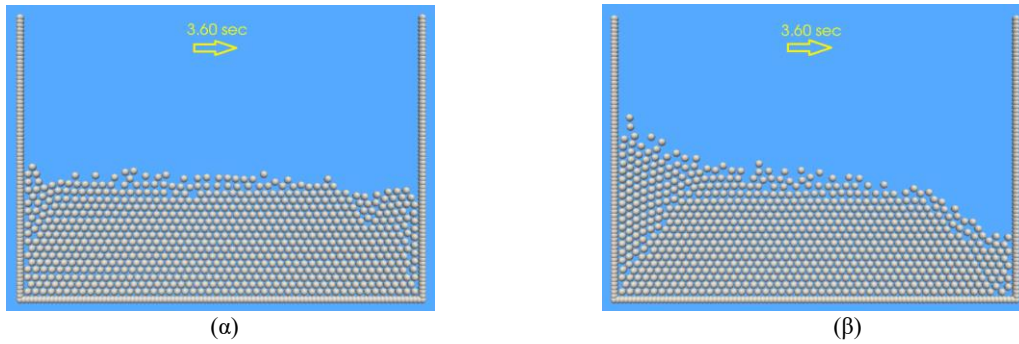
εκατοστά ενώ από τη καμπύλη χωρίς υγρασία 0.6 εκατοστά και επομένως συμπεραίνουμε ότι με τη προσθήκη υγρασία έχουμε τριπλασιασμό της μετατόπισης όπως ήδη αναφέραμε.

5. Ενώ στη περίπτωση για ποσοστό υγρασίας 50%, είχαμε μια μείωση του χρόνου εμφάνισης του μέγιστου πλάτος ταλάντωσης, στη συγκεκριμένη περίπτωση για ποσοστό υγρασίας 70%, παρατηρούμε ότι από την αρχή η δεξαμενή ταλαντεύεται με μέγιστο πλάτος και η μετατόπιση των σφαιρικών σωματιδίων είναι αρκετά μεγαλύτερη κάτι το οποίο μπορεί κάλλιστα να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα ευστάθειας αλλάζοντας σημαντικά τη δυναμική συμπεριφορά των σωματιδίων.
6. Τη μεγαλύτερη διαφορά στη μετατόπιση του κέντρου βάρους την παρατηρούμε τη χρονική στιγμή των 4.6 δευτερολέπτων στη οποία για υγρασία 70% λαμβάνει τη τιμή 2.1 εκατοστά ενώ χωρίς υγρασία 0.4 εκατοστά σχεδόν πέντε φορές μεγαλύτερη και μπορούμε να τη θεωρήσουμε κρίσιμη τιμή για τη δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος.
7. Τα σωματίδια αρχίζουν να είναι ευκίνητα για τιμές υγρασίας πάνω από 50% και επομένως το συγκεκριμένο ποσοστό υγρασίας είναι το κρίσιμο όριο υγρασίας μετά το οποίο το υλικό ξεκινάει να έχει ποιοτικά διαφορετική συμπεριφορά.

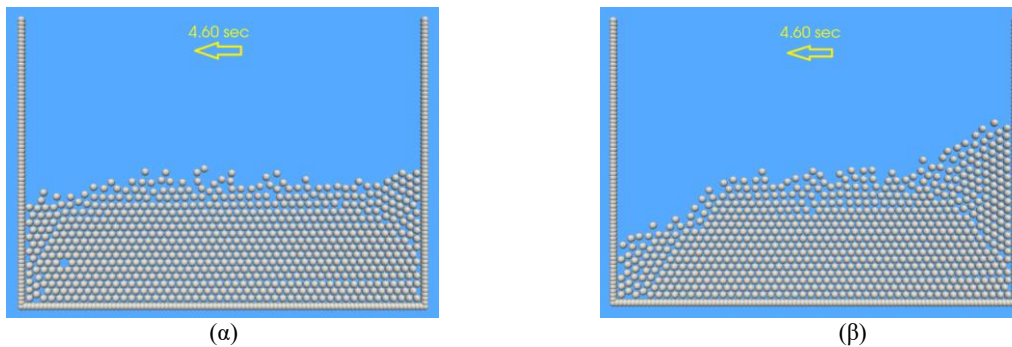
Στην ακόλουθη εικόνα 58,59 και 60, αποτυπώνεται η προσομοίωση της συνολικής μετατόπισης του κέντρου βάρους τη χρονική στιγμή 1.8 και 4.6 όπου η δεξαμενή κινείται προς τα αριστερά και τη χρονική στιγμή 3.6 δευτερόλεπτα όπου το έχουμε το μέγιστο πλάτος στη αντίθετη πλευρά της δεξαμενής.



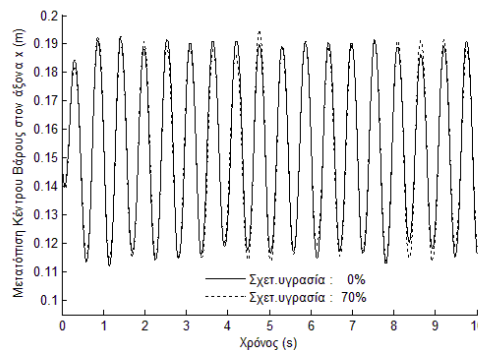
Εικόνα 58 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 1.8 sec για πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά, συχνότητα 1,4 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 70%



Εικόνα 59 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 3.6 sec για πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά, συχνότητα 1,4 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 70%



Εικόνα 60 : Στιγμιότυπο προσομοίωσης συνολικής μετατόπισης κέντρου βάρους χρονική στιγμή 4.6 sec για πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά, συχνότητα 1,4 Hz με υγρασία (α) 0% (β) 70%



Διάγραμμα 20 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x για πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά , συχνότητα 1.8 Hz και υγρασία 0% και 70%.

Παρατηρώντας τώρα το διάγραμμα 20 όπου παρουσιάζει τη μετατόπιση του κέντρου βάρους κατά τον άξονα x για πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά και συχνότητα 1.8Hz, παρατηρούμε τα ακόλουθα :

1. Και οι δύο καταστάσεις παρουσιάζουν ίδια περίπου συμπεριφορά με πολύ μικρές διαφορές στο πλάτος ταλάντωσης οι οποίες είναι δύσκολα να γίνουν ορατές από το διάγραμμα.
2. Επίσης, πρέπει να αναφέρουμε το γεγονός ότι οι τιμές του κέντρου βάρους στον άξονα y είναι πολύ πιο υψηλές από τις αντίστοιχες για άλλα πλάτη ταλάντωσης που εξετάσαμε, διότι λόγω της μεγάλης τιμής του πλάτους και της συχνότητας, αρκετά

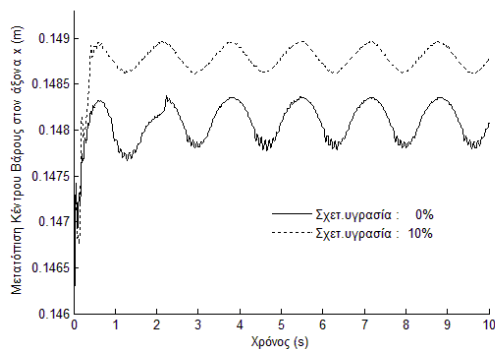


σωματίδια κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης έβγαιναν έξω από τη δεξαμενή και με την αύξηση του ύψους των τοιχώματος παραμένουν μέσα, όμως συνυπολογίζονται στο μέσο όρο από τον κώδικα.

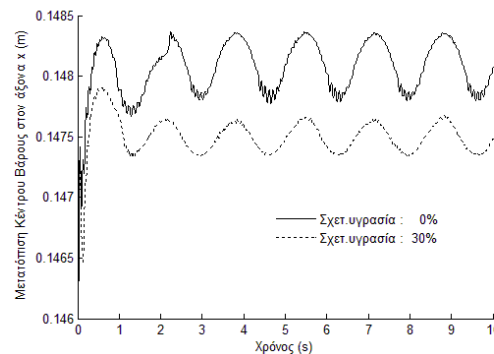
3. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της συχνότητας ταλάντωσής δεν παρατηρούμε διαφορετική δυναμική συμπεριφορά των σφαιρικών σωματιδίων ακόμα και σε μεγάλα ποσοστά υγρασίας.

### 7.2.3 Πλάτος Εγκάρσιας Οριζόντιας Ταλάντωσης 0.10 εκατοστά

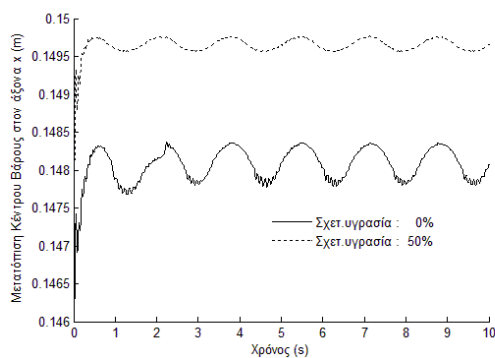
Τέλος, αυξάνουμε το πλάτος εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης σε 0.10Hz, θέλοντας να δούμε πως συμπεριφέρεται το κέντρο βάρους και κατασκευάζουμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων για συχνότητα διατοίχισης 0.6 Hz και ποσοστά υγρασίας 0,10%,30%,50% και 70%. Επίσης, λόγω του ότι για συχνότητα ταλάντωσης 0.2Hz, οι διαφορές στη μετατόπιση του κέντρου βάρους είναι πολύ μικρές και δεν μπορούν να αποτυπωθούν σε διάγραμμα, κατασκευάζουμε διάγραμμα για 0.6Hz για τη μετατόπιση του κέντρου βάρους κατά τον άξονα x.



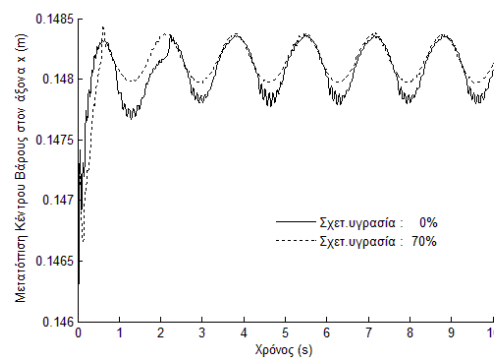
(α)



(β)



(γ)



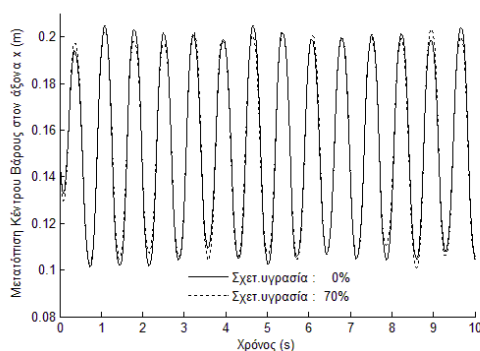
(δ)

Διάγραμμα 21 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x για πλάτος ταλάντωσης 10 εκατοστά , συχνότητα 0.6 Hz και υγρασία (α) 0% (β) 30% (γ) 50% (δ) 70%.



Από την εξέταση των διαγραμμάτων 21(α) έως 21(δ), συμπεραίνουμε τα ακόλουθα:

1. Για ποσοστό υγρασίας 10%, παρατηρούμε μετατόπιση του κέντρου βάρους των σωματιδίων προς το δεξί μέρος της δεξαμενής και το πλάτος ταλάντωσης έχει μειωθεί.
2. Για ποσοστά υγρασίας 30% και 50%, ομοίως βλέπουμε μια μικρή μείωση στο πλάτος ταλάντωσης και επίσης παρατηρούμε μια ελαφρά μετατόπιση του κέντρου βάρους προς τη μια πλευρά της δεξαμενής. Συγκεκριμένα για υγρασία 30% υπάρχει συσσώρευση σφαιρικών σωματιδίων προς την αριστερή μεριά ενώ για ποσοστό υγρασίας 50% προς την αντίθετη πλευρά όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα.
3. Τη μεγαλύτερη μετατόπιση του κέντρου βάρους των σφαιρικών σωματιδίων την παρατηρούμε για τη περίπτωση υγρασίας 50% όμως με πολύ περισσότερο μειωμένος πλάτος ταλάντωσης.
4. Για ποσοστό υγρασίας 70%, δεν παρατηρούμε κάποια σημαντική αλλαγή όσον αφορά τη μετατόπιση του κέντρου βάρους πάρα μόνο μια μικρή μείωση του πλάτος ταλάντωσης σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς υγρασία. Επίσης, η κατακρήμνιση των σφαιρικών σωματιδίων στη περίπτωση της υγρασίας γίνεται πιο ομαλή από ότι χωρίς υγρασία που οφείλεται στις ελκτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια οπότε λογικά το ένα θα συγκρατεί το άλλο.
5. Σε όλες τις περιπτώσεις, δε παρατηρούμε αυξομειώσεις του πλάτος επομένως τα σωματίδια ταλαντεύεται με σταθερό πλάτος χωρίς απότομες κινήσεις που να επηρεάζουν σημαντικά τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.
6. Με τη προσθήκη υγρασίας στα σφαιρικά σωματίδια παρατηρούμε ότι το κέντρο βάρους συγκεντρώνεται προς το μέσο της δεξαμενής όπως και στη περίπτωση για πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά στην ίδια συχνότητα 0.6Hz.



Διάγραμμα 22 : Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x για πλάτος ταλάντωσης 10 εκατοστά, συχνότητα 1.4 Hz και υγρασία 0% και 70%.

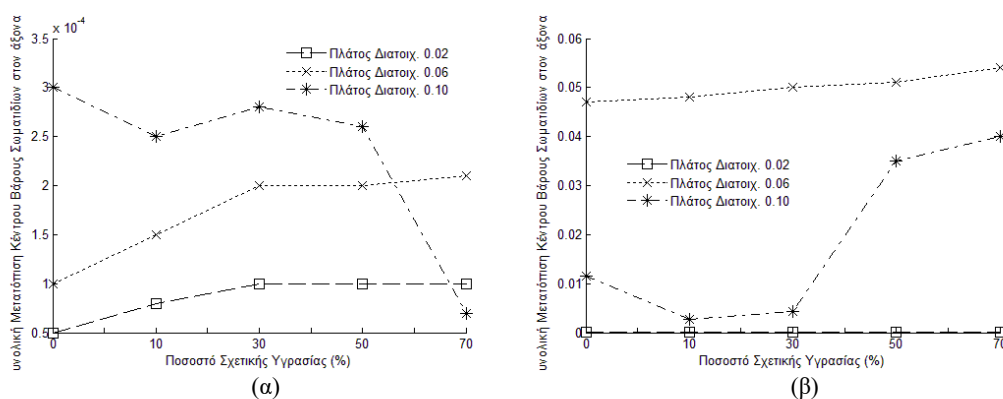
Παρατηρώντας τώρα το διάγραμμα 22 όπου παρουσιάζει τη μετατόπιση του κέντρου βάρους κατά τον άξονα x για πλάτος ταλάντωσής 10 εκατοστά και συχνότητα 1.4Hz, παρατηρούμε τα ακόλουθα:

1. Και οι δύο καταστάσεις παρουσιάζουν ίδια περίπου συμπεριφορά με πολύ μικρές διαφορές στο πλάτος ταλάντωσης της τάξεως του μισού εκατοστού οι οποίες είναι δύσκολα να γίνουν ορατές από το διάγραμμα.
2. Επίσης, πρέπει να αναφέρουμε το γεγονός ότι οι τιμές του κέντρου βάρους στον άξονα y είναι πολύ πιο υψηλές από τις αντίστοιχες για άλλα πλάτη ταλάντωσης που εξετάσαμε, διότι λόγω της μεγάλης τιμής του πλάτους και της συχνότητας, αρκετά σωματίδια κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης έβγαιναν έξω από τη δεξαμενή και με την αύξηση του ύψους των τοιχώματος παραμένουν μέσα, όμως συνυπολογίζονται στο μέσο όρο από τον κώδικα.

Δεν κατασκευάστηκαν διαγράμματα για τις υπόλοιπες περιπτώσεις υγρασίας, διότι δίνουν περίπου τα ίδια αποτελέσματα και θεωρήθηκε υπερβολικό.

## 7.2.4 Συγκριτικά Αποτελέσματα

Επιθυμώντας τελικά να βγάλουμε κάποια συγκεντρωτικά συμπεράσματα όσον αφορά την εξέταση της εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, κατασκευάζουμε τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν το πλάτος εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης για πλάτη ταλάντωσης 2,6 και 10 εκατοστά και συχνότητες ταλάντωσης 0.6Hz και 1.4Hz.



Διάγραμμα 23 : Πλάτος Εγκάρσιας Οριζόντιας Ταλάντωσης σε σχέση με το ποσοστό υγρασίας για πλάτη ταλάντωσης 2 , 6, και 10 εκατοστά και συχνότητα ταλάντωσης (α) 0.6Hz (β) 1.4Hz.

Από τα τελικά διαγράμματα 23(α) και 23(β) τα οποία προκύπτουν, μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα :

1. Το πλάτος ταλάντωσης για συχνότητα 0.6 Hz, με τη προσθήκη υγρασίας, γενικά αυξάνεται αλλά όχι τόσο σημαντικά και με μόνη εξαίρεση τη περίπτωση για πλάτος ταλάντωσης 10 εκατοστά όπου παρατηρούμε μια απότομη μείωση του πλάτους ταλάντωσης σε τιμή που πλησιάζει τη περίπτωση για πλάτος 0.02 μέτρα.
2. Για συχνότητα ταλάντωσης 0.6 Hz και σε όλα σχεδόν τα πλάτη που εξετάσαμε, παρατηρείται μια μετατόπιση του σημείου γύρω από το οποίο ταλαντεύεται το κέντρο βάρους των σωματιδίων, είτε από τη δεξιά μεριά είτε από την αριστερά, ανάλογα κάθε φορά το ποσοστό υγρασίας που υπάρχει ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια.
3. Με την αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης στα 1.4Hz αυτόματα αυξάνεται και το πλάτος ταλάντωσης και παίρνει πολύ μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με συχνότητα 0.6Hz. Μια πολύ σημαντική αύξηση στο πλάτος ταλάντωσης παρατηρήσαμε για συχνότητα ταλάντωσης 1.4Hz και συγκεκριμένα για πλάτος 6 εκατοστά, το οποίο είναι το μεγαλύτερο από κάθε περίπτωση πλάτους ταλάντωσης που έχουμε εξετάσει.
4. Ενώ θα περιμέναμε με την αύξηση του πλάτους ταλάντωσης της δεξαμενής σε 10 εκατοστά και συχνότητα ταλάντωσης 1.4Hz, να είχαμε μια μεγάλη αύξηση και στο πλάτος ταλάντωσης του κέντρου βάρους των σωματιδίων, δεν ισχύει κάτι τέτοιο και μπορούμε να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη υγρασίας στα σωματίδια τα οποία ταλαντεύονται σε μεγάλες τιμές πλάτους, δεν τα επηρεάζει και τόσο, λόγω του ότι τα σφαιρικά σωματίδια σε αυτές τις συνθήκες έχουμε ήδη πολύ υψηλές ταχύτερες, με αποτέλεσμα να εξασθενεί η ελκτική δύναμη λόγω παρουσίας υγρασίας και να συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο ακριβώς όπως και πριν.
5. Μόνο στο πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά της δεξαμενής, παρατηρούμε και στις δύο συχνότητές μεγάλη αύξηση του πλάτους ταλάντωσης των σφαιρικών σωματιδίων, κάτι το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί άκρως επικίνδυνη και θα πρέπει να δοθεί εξαιρετική σημασία στους υπολογισμούς ευστάθειας.

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 των σωματιδίων υπό την επίδραση υγρασίας.

#### 8.1 Συμπεράσματα

---

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση σφαιρικών σωματιδίων εντός δισδιάστατης δεξαμενής και η εστίαση της αφορά την διαφοροποίηση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος κάτω από διαφορετικά ποσοστά υγρασίας στις κινήσεις διατοιχισμού (Roll), εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης (Sway) και γωνίας ηρεμίας (Angle of Repose). Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν είναι τα ακόλουθα για κάθε κίνηση ξεχωριστά.

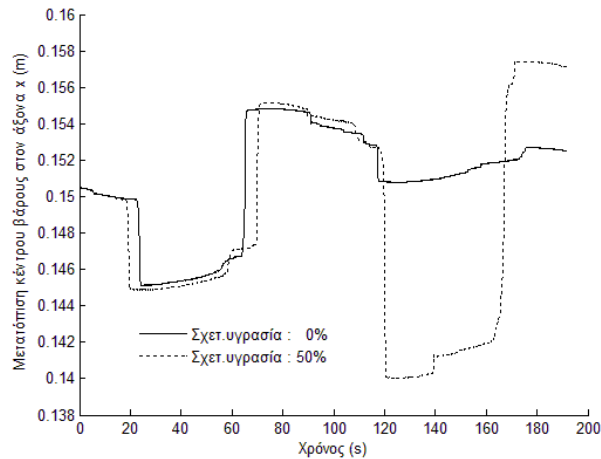
##### Γωνία Ηρεμίας (Angle of Repose) :

1. Με τη προσθήκη υγρασίας στα σφαιρικά σωματίδια, παρατηρούμε ότι αρχίζουν να ολισθαίνουν σε μικρότερη γωνία κλίσης από ότι στη περίπτωση με μηδενική υγρασία δηλαδή σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα. Το φαινόμενο παρατηρείται και στις τρεις περιπτώσεις που εξετάσαμε, δηλαδή ανεξάρτητα από τη τιμή της ταχύτητα γωνίας κλίσης της δεξαμενής.
2. Όταν η υγρασία δεν είναι παρούσα ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια, τότε στις περιπτώσεις ταχύτητας γωνίας κλίσης 0.30 μ/δ και 1.00 μ/δ, συμβαίνει μόνο μια κατακρήμνιση των σφαιρικών σωματιδίων στις 24.74 μοίρες και στις 25.14 μοίρες αντίστοιχα, όπου τα σωματίδια μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μετά το πέρας της κατακρήμνισης σταθεροποιούνται.
3. Στη περίπτωση ταχύτητας γωνίας κλίσης 3.00 μ/δ και 6.00 μ/δ, παρατηρούμε ότι στη περίπτωση απουσίας υγρασίας ανάμεσα στα σωματίδια, πραγματοποιείται και μια δεύτερη,εξίσου σημαντική κατακρήμνιση των σφαιρικών σωματιδίων στις 41.10 μοίρες και 49.74 μοίρες αντίστοιχα.
4. Σε όλες τις περιπτώσεις ταχύτητας γωνίας κλίσης που εξετάσαμε και όλες τις περιπτώσεις υγρασίας, εκτός από τη πρώτη κατακρήμνιση που πραγματοποιείται,

λαμβάνει χώρα μια δεύτερη κατακρήμνιση σφαιρικών σωματιδίων, η οποία είναι εξίσου σημαντική και πολύ μεγαλύτερη σε τιμή από τη πρώτη.

5. Η γωνία εμφάνισης των δεύτερων κατακρημνίσεων στις περιπτώσεις ταχύτητας γωνίας κλίσης 0.30 μ/δ και 1.00 μ/δ, κυμαίνεται από 32 μοίρες μέχρι 36 μοίρες για όλες τις περιπτώσεις υγρασίας που μελετάμε, ενώ στις μεγαλύτερες ταχύτητες γωνίας κλίσης 3.00 μ/δ και 6.00 μ/δ, οι δεύτερες κατακρημνίσεις πραγματοποιούνται σε πολύ μεγαλύτερες γωνίες κλίσης από 41 μέχρι 45 μοίρες και από 44 μέχρι 51 μοίρες αντίστοιχα.
6. Η εμφάνιση των δεύτερων κατακρημνίσεων σε μεγαλύτερες γωνίες κλίσης για υψηλότερες ταχύτητες γωνίες κλίσης της δεξαμενής, όταν εξετάζουμε την ευστάθεια ενός πλοίου, είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες αφού το πλοίο έχει ήδη αναπτύξει μεγάλη γωνία κλίσης και μια επιπρόσθετη μετατόπιση φορτιού θα του επιφέρει επιπλέον σημαντικά προβλήματα στη δυναμική του συμπεριφορά και κατ' επέκταση στην ευστάθεια του.
7. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα γωνίας κλίσης της δεξαμενής, παρατηρούμε ότι η κλίση της ευθείας της μετατόπισης του κέντρου βάρους γίνεται πιο ομαλή, κάτι το οποίο σημαίνει ότι τα σωματίδια δεν πέφτουν τόσο απότομα αλλά το ένα παρασέρνει το άλλο λόγω της ελκυστικής δύναμης που αναπτύσσεται μεταξύ τους λόγω της υγρασίας.
8. Σε υψηλές ταχύτητες γωνίας κλίσης, παρατηρούμε ότι η προσθήκη υγρασίας στα σφαιρικά σωματίδια δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη κίνηση των σωματιδίων, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις για χαμηλή ταχύτητα γωνίας κλίσης όπου η διαφορά είναι σημαντική.

Όπως διαπιστώσαμε από την εξέταση της γωνίας ηρεμίας για ταχύτητα γωνίας κλίσης 1.00 μ/δ, με τη προσθήκη υγρασίας ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια, η πρώτη κατακρήμνιση συμβαίνει σε μικρότερη γωνία κλίσης από ότι για τη περίπτωση χωρίς υγρασία, όπου εκτελέσαμε τη κίνηση διατοιχισμού για γωνία ακριβώς μετά το πέρας της κατακρήμνιση των σωματιδίων με παρουσία υγρασίας και συγκεκριμένα για 24.70 μοίρες. Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει τη κίνηση του διατοιχισμού για γωνία 24.70 μοίρες και συχνότητα 0.01Hz, όπου η συγκεκριμένη συχνότητα επιλέχθηκε για να πετύχουμε πλήρη κύκλο της κίνηση διατοιχισμού.



Διάγραμμα 24: Μετατόπιση κέντρου βάρους στον άξονα x (m) για γωνία διατοιχισμού 24.70 μοίρες , για σημείο περιστροφής (0.15,0) , υγρασία 0% και 50% .

Παρατηρώντας προσεκτικά το παραπάνω διάγραμμα, όντως παρατηρούμε ότι τα σωματίδια αρχίζουν και κινούνται νωρίτερα με τη προσθήκη υγρασία ανάμεσα τους και μετά το πέρας της πρώτης περιόδου, παρατηρούμε επίσης ότι η δυναμική τους συμπεριφορά αλλάζει κατά πολύ με αποτέλεσμα η μετατόπιση του κέντρου βάρους να αυξάνεται τουλάχιστον 1 εκατοστό και η ταλάντωση των σωματιδίων να συνεχίζεται με πολύ μεγαλύτερο ασταθές πλάτος από ότι στη περίπτωση χωρίς υγρασία όπου το πλάτος παραμένει σταθερό. Έτσι, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τις δύο ξεχωριστές κινήσεις συμβαδίζουν και έχουμε μια ξεκάθαρη εικόνα για τη δυναμική συμπεριφορά των σφαιρικών σωματιδίων υπό την επίδραση ποσοστού υγρασίας.

#### Διατοιχισμός (Roll) :

1. Όταν η γωνία διατοιχισμού είναι 10 μοίρες, παρατηρούμε ότι η μετατόπιση του κέντρου βάρους των σφαιρικών σωματιδίων δεν αλλάζει σχεδόν καθόλου με τη προσθήκη οποιοδήποτε ποσοστού υγρασίας τους και γι' αυτό το λόγο ούτος ή άλλο δεν κατασκευάσαμε τα αντίστοιχα διαγράμματα μετατόπισης κέντρου βάρους.
2. Όταν η γωνία διατοιχισμού αυξηθεί και γίνει 20 μοίρες, παρατηρούμε μεγαλύτερη τιμή της μετατόπισης του κέντρου βάρους, όπως είναι αναμενόμενο άλλωστε, σε σχέση με τη γωνία διατοιχισμού 10 μοίρες και με προσθήκη υγρασίας ανάμεσα στα σωματίδια παρατηρούμε αύξηση της μετατόπισης σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς υγρασία.
3. Για 20 μοίρες, παρατηρούμε ότι η αυξημένη μετατόπιση των σφαιρικών σωματιδίων πραγματοποιείται σε μεμονωμένα ποσοστά υγρασίας και την υψηλότερη τιμή την λαμβάνει για ποσοστό υγρασίας 20% ενώ υψηλές είναι οι τιμές για υγρασία 50% και

60% με εξαίρεση το ποσοστό 40%,60% και 70% για συχνότητα 0.6Hz όπου η τιμή της κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με τη περίπτωση χωρίς υγρασία.

4. Για γωνία διατοιχισμού 30 μοίρες, παρατηρούμε ότι σε μικρό ποσοστό υγρασίας, το πλάτος ταλάντωσης των σφαιρικών σωματιδίων αυξάνεται, ενώ στη συνέχεια με αύξηση του ποσοστού υγρασίας, το πλάτος ταλάντωσης ελαφρώς μειώνεται και σταθεροποιείται, που σημαίνει ότι δεν παρατηρούμε και μεγάλες αλλαγές στη συμπεριφορά των σφαιρικών σωματιδίων όταν αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας.
7. Για γωνία διατοιχισμού 40 μοίρες, παρατηρούμε ότι το πλάτος ταλάντωση για τις περιπτώσεις υγρασίας που εξετάζουμε είναι σταθερό, με εξαίρεση τα μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας, όπου παρατηρούμε μια μικρή αύξηση.
8. Και στις δύο περιπτώσεις συχνότητας, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η γωνία διατοιχισμού της δεξαμενής, τόσο μικρότερη είναι η επίδραση της υγρασίας στα σφαιρικά σωματίδια.

#### Εγκάρσια Οριζόντια Ταλάντωση :

1. Το πλάτος ταλάντωσης του κέντρου βάρους των σφαιρικών σωματιδίων για συχνότητα 0.6Hz, με τη προσθήκη υγρασίας αυξάνεται αλλά όχι τόσο σημαντικά και με μόνη εξαίρεση τη περίπτωση για πλάτος ταλάντωσης 10 εκατοστά όπου παρατηρούμε μια απότομη μείωση του σε τιμή που πλησιάζει τη περίπτωση για πλάτος 2 εκατοστά.
2. Για συχνότητα ταλάντωσης 0.6Hz και σε όλα σχεδόν τα πλάτη που εξετάσαμε, παρατηρείται μια μετατόπιση του σημείου γύρω από το οποίο ταλαντεύεται το κέντρο βάρους των σωματιδίων, είτε προς τη δεξιά μεριά είτε προς την αριστερά τα δεξαμενής, ανάλογα κάθε φορά το ποσοστό υγρασίας που υπάρχει ανάμεσα στα σφαιρικά σωματίδια.
3. Με την αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης στα 1.4Hz, αυτόματα αυξάνεται και το πλάτος ταλάντωσης και παίρνει πολύ μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με συχνότητα 0.6Hz. Μια πολύ σημαντική αύξηση στο πλάτος ταλάντωσης παρατηρήσαμε για συχνότητα ταλάντωσης 1.4Hz και πλάτος 6 εκατοστά, το οποίο είναι το μεγαλύτερο από κάθε περίπτωση πλάτους ταλάντωσης που έχουμε εξετάσει.
4. Ενώ θα περιμέναμε με την αύξηση του πλάτους ταλάντωσης της δεξαμενής σε 10 εκατοστά και συχνότητα ταλάντωσης 1.4Hz, να είχαμε μια μεγάλη αύξηση και στο πλάτος ταλάντωσης του κέντρου βάρους των σωματιδίων, δεν ισχύει κάτι τέτοιο και μπορούμε να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη υγρασίας στα σωματίδια τα οποία ταλαντεύονται σε μεγάλες τιμές πλάτους, δεν τα επηρεάζει και τόσο, λόγω του ότι τα σφαιρικά σωματίδια σε αυτές τις συνθήκες έχουμε ήδη πολύ υψηλές

ταχύτερες, με αποτέλεσμα να εξασθενεί η ελκτική δύναμη λόγω παρουσίας υγρασίας και να συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο ακριβώς όπως και πριν.

5. Μόνο στο πλάτος ταλάντωσης 6 εκατοστά της δεξαμενής, παρατηρούμε και στις δύο συχνότητες μεγάλη αύξηση του πλάτους ταλάντωσης των σφαιρικών σωματιδίων, κάτι το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί άκρως επικίνδυνη και θα πρέπει να δοθεί εξαιρετική σημασία στους υπολογισμούς ευστάθειας.
6. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι από τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει, δε παρατηρούμε αλλαγές στη δυναμική συμπεριφορά των σφαιρικών σωματιδίων με τη προσθήκη υγρασίας πάρα μόνο στη περίπτωση για πλάτος 6 εκατοστά, που όμως τελικά τα σωματίδια συμπεριφέρονται πάλι με το ίδιο τρόπο κι συγκεντρώνονται πάλι προς το μέσο της δεξαμενής. Το γεγονός αυτό έρχεται σε ταύτιση με τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί από τους Koromila et al, ISSW 2013, οι οποίοι διαπίστωσαν ότι, με τη προσθήκη υγρασίας σε άμμο εντός δεξαμενής, για μικρές συχνότητες ταλάντωσης, τα σωματίδια δημιουργούν έναν ομοιόμορφο λοφίσκο στο κέντρο της και για μεγάλες συχνότητες συγκεντρώνεται ομοιόμορφα στις δύο άκρες της υλικό, με αποτέλεσμα το κέντρο βάρους του υλικού να μένει σταθερό στο κέντρο της δεξαμενής όπως και στη δική μας περίπτωση.

## 8.2 Μελλοντική Μελέτη

---

Για την πληρέστερη κατανόηση του φαινομένου της ρευστοποίησης, ως συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρούνται τα ακόλουθα βήματα:

1. Εξέταση της δυναμικής συμπεριφορά των σφαιρικών σωματιδίων με την εμφάνιση του φαινομένου της ρευστοποίησής ούτως ώστε να συνυπολογιστεί και η ποσότητα του νερού που προκύπτει στην επιφάνεια της δεξαμενής.
2. Εξέταση διαφορετικού υλικού που μπορεί να ρευστοποιηθεί με σκοπό να ελέγξει αν αλλάζει κατά πολύ η συμπεριφορά του σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς υγρασία.
3. Εξέταση της συμπεριφοράς των υλικών στην περίπτωση συζευγμένων κινήσεων της π.χ διατοιχισμός και εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση ταυτόχρονα.



- [1] Bridges F, Hatzes A., Lin D., *Nature* 309 (1984) 333.
- [2] Brilliantov N-V-, Spahn F., Hertzsch J-M- and Poschel T., *preprint* (1995).
- [3] Brilliantov, N.V, Spahn, F., Hertzsch, J.-M., Poschel, T., 1996. *A model for collisions in granular gases*. Physical Review E 53, 5382.
- [4] Charlaix, E., Crassous, J., In: *Adhesion forces between wetted solid surfaces*. J. Chem. Phys. 122, 184701 (2005)
- [5] Charlaix, E., Ciccotti, M.: *Chap. 12 Capillary condensation in confined media*. In: Sattler, K.D. (ed.) Handbook of Nanophysics: Principles and Methods. CRC Press, Boca Raton (2010).
- [6] Crassous, J., Ciccotti M, Charlaix E., 2011. *Capillary Force between Wetted Nanometric Contacts and Its Application to Atomic Force Microscopy*. Langmuir, 27, 3468–3473
- [7] Christenson, H. *Phys. Rev. Lett.* 1994, 73, 1821–1824.
- [8] Cundall P-A- and Strack O-D-L-, *Gdotechnique* 29 (1979) 47.
- [9] Dong, K., Yand, R., Zou, R., Yu, A. In : *Role of interparticle forces in the formation of random loose packing*. Phys.Rev. Lett. 96, 145505 (2006)
- [10] Dong, K., Yand, R., Zou, R., Yu, A. In: *Settling of particles in liquids: effects of material properties*. A.I.Ch.E. 58(5), 1409–1421 (2012)
- [11] Drake T., Shreve R-L-, J. *Rheol.* 30 (1986) 981.
- [12] Foerster S-F-, Louge M-Y-, Chang H., Allia K., *Phys. Fluids* 6 (1994) 1108.
- [13] Forn, L., Pezron, I., Guignon, P., Kounjer, L. In : *Peculiar absorption of water by hydrophobized glass beads*. Coll. Surf. A: Physicochem.Eng. Aspects 270–271, 263–269 (2005)
- [14] Gard AS, 2014. *Liquefaction of Solid Bulk Cargoes*, Gard News 197, February/April 2010.
- [15] Goldsmith W., *Impact* (Edward Arnold Publ., London, 1960).
- [16] Gómez, I., Ippolito, I., Chertcoff, R.: *Characterization of wet granular media behavior under different relative humidity conditions*. Powder Technol. submitted (2012)
- [17] Haff P.K., Werner B-T-, *Powder Technology*. 48 (1986) 239.
- [18] Haff, P.K., Werner, B.T., 1986. *Computer simulation of the mechanical sorting of grains*. Powder Technology 48, 239.
- [19] Harison I, 2012. *Cargo Liquefaction – Hazards and Developments*. Intercargo, December 2012

- [20] Herminghaus, S.: *Dynamics of wet granular matter*. Adv. Phys.54(3), 221–261 (2005)
- [21] Hertz H., J. *fir die reine u. angew. Math.* 92 (1882) 136.
- [22] Hornbaker D, Albert R, Albert I., Barabási, P. Schiffer *What keeps sandcastles standing*. Department of Physics, University of Notre Dame, Notre Dame, Nature 387, 765 (1997)
- [23] Iveson S, Philippe A.L. Wauters, Forrest S, James D. Litster, Gabrie M.H. Meesters, Scarlett B. *Growth regime map for liquid-bound granules: further development and experimental validation*, Powder Technology 117 83-97 ,2001.
- [24] Johnson K., *Contact Mechanics* ,Univ. Press, Cambridge, (1989)
- [25] Koromila I., 2013. Thesis: *Cargo Liquefaction* , May 2013.
- [26] Kohonen, M.M., Geromichalosb, D., Scheelb, M., Schierb, C., Herminghaus, S. In: *On capillary bridges in wet granular materials*. Phys.A 339, 7–15 (2004)
- [27] Kuwabara G., Kono K., Jap. J. Appl. Phys. 26 (1987) 1230.
- [28] Lian, G., Thornton, C., Adams, M.J. In: *Discrete particle simulation of agglomerate impact coalescence*. Chem. Eng. Sci. 53(19), 3381–3391 (1998)
- [29] Lomas R., 2012. *Cargo Liquefaction – Regulatory developments and implications for ship design*. Intercargo , September 2012.
- [30] Mitarai N., Noria F., 2006. *Wet Granular Materials*. Advances in Physics, Vol. 55, Nos. 1–2, January–April 2006, 1–45
- [31] Mikami, T., Kamiya, H., Horio, M.: *Numerical simulation of cohesive powder behavior in a fluidized bed*. Chem. Eng. Sci. **53**(10), 1927 (1998)
- [32] Oger L ,Ana M. Vidales, Rodolfo O. Uñac, Irene Ippolito , In : *Tilting process with humidity: DEM modeling and comparison with experiments Granular Matter* (2013) 15:629–643 ,2013
- [33] Orr, F.; Scriven, L.; Rivas, A. J. *Fluid Mech.* 1975, 67, 723–742.
- [34] Schafer J., Dippel, S., Wolf, D.E., 1996. *Force schemes in simulations of granular materials*. Journal de Physique I6, 5–20.
- [35] Skuld Pocket Guide for Masters and Officers, 2013. Bulk Mineral Cargo Liquefaction
- [36] Spandonidis C, Spyrou K, In: *Micro-scale modeling of excited granular ship cargos: A numerical approach*. Ocean Engineering 74 (2013) 22–36 , 2013.
- [37] Spencer c., Tilsley D., 2011. Bulk Cargo Liquefaction (Iron Ore Fines and Nickel Ore). The Standard Cargo. February 2011
- [38] Soulié, F., Cherblanc, F., Youssoufin, M.S.E., Saix, C.: *Influence of liquid bridges on the mechanical behaviour of polydisperse granular materials*. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 13, 213 (2006)

- [39] Sondergaard R., Chaney K. and Brennen C-E-, *J. Appl. Mech.* 57 (1990) 694.
- [40] Tegzes, P., Albert, R., Paskvan, M., Barabasi, A., Vicsek, T., Schiffer, P.. In: *Liquid-induced transitions in granular media*. *Phys. Rev. E* 60(5), 5823–5826 (1999)
- [41] Taguchi Y.-h., *J. Phys. II France* 2 (1992) 2103.
- [42] Walton O., Braun It-L-, *J. Rheoi.* 30 (1986) 949.
- [43] Wagg, D.J., Bishop, S.R., 2000. *A note on modeling multi-degree-of-freedom vibro-impact systems using coefficient of restitution models*. *Journal of Sound and Vibration* 236(1), 176–184.