

Σχολή Ναυπηγών
Μηχανολόγων
Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

Πειραματική Μελέτη Της Ελεύθερης Επιφάνειας Υγρού
Υπό Κατακόρυφη Διέγερση



ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΛΟΥΜΕΝΟΣ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Ιανουάριος 2013

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια πειραματική εργασία για την μελέτη της παραμετρικής αστάθειας της ελεύθερης επιφάνειας υγρού εντός δεξαμενής, υπό κατακόρυφη διέγερση. Τα πειράματα έγιναν με τη χρήση, για πρώτη φορά, της τράπεζας ταλαντώσεων της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Λόγω του ότι η εν λόγω πειραματική διάταξη χρησιμοποιείται για πρώτη φορά, γίνεται μία λεπτομερής ανάλυση όλων των επιμέρους τμημάτων που τη συνθέτουν καθώς και του λογισμικού της, γεγονός που θα επιτρέψει στον μελλοντικό αναγνώστη της εργασίας να έχει στα χέρια του ένα συνοπτικό εγχειρίδιο του νέου εργαστηρίου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα εκτελεσθέντα πειράματα τα οποία περιελάμβαναν διαδοχικές κατακόρυφες αρμονικές διεγέρσεις ορθογωνικής δεξαμενής εν μέρει γεμάτης με νερό η οποία είχε επί της τράπεζας ταλαντώσεων, επί της οποίας είχε τοποθετηθεί ορθογωνική δεξαμενή η οποία περιείχε νερό μέχρι συγκεκριμένο ύψος, σε διαφορετικά κάθε φορά πλάτη και συχνότητες. Κάθε πείραμα που γίνεται, καταγράφεται μέσω κάμερας και στη συνέχεια αναλύεται: το εάν είχαμε ή όχι αστάθεια, δηλαδή δημιουργία επιφανειακού κυματισμού, και τι είδους κυματισμός ήταν. Απώτερος στόχος μας είναι η απομόνωση και πειραματική απόδειξη της περιοχής bistability. Σύμφωνα με πρόσφατη θεωρητική ανακάλυψη, στην περιοχή αυτή, όπου κατά κανόνα έχουμε ευστάθεια, μπορεί να εμφανιστεί αστάθεια όταν το σύστημα υγρό – δεξαμενή, διεγείρεται από διαφορετικές αρχικές συνθήκες (Srygou & Spandonidis, 2010). Τέλος οι περιοχές αστάθειας που εντοπίσαμε στα πειράματά μας συγκρίνονται με αυτές που προβλέπει η γραμμική θεώρηση (γραμμική Mathieu εξίσωση με απόσβεση). Βασικό αποτέλεσμα της σύγκρισης αυτής είναι η πειραματική επιβεβαίωση, για πρώτη φορά, της περιοχής αστάθειας εξαρτώμενης από τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος στην περιοχή που το γραμμικό μοντέλο προβλέπει ευστάθεια. Το γεγονός αυτό μπορεί να επηρεάσει τις μελέτες και την περαιτέρω ανάλυση που θα πρέπει να γίνουν σε αυτή την περιοχή, με στόχο φυσικά την βελτίωση των χαρτών δυναμικής απόκρισης μερικώς πληρωμένων δεξαμενών.

Abstract

In the present thesis is described an experimental investigation on the parametric sloshing behaviour of a fluid (water) inside a rectangular tank, under vertical excitation. The experiments have been conducted using the shaking table facility that the Faculty of Naval Architecture and Marine Engineering of NTUA have recently acquired. Since the equipment was new and it was used for these experiments for the first time, a detailed presentation of the components that consist the lab is included, in a way that should help the future reader to be quickly accustomed with the lab since he will have in his hands the technical manual. Our main research goal was to experimentally confirm the existence of a region that, although considered according to standard theory of linear parametrically excited systems to be a region of stability, it can be host to unstable behaviour, depending on the initial conditions (Spyrou & Spandonidis, 2011). This phenomenon is often identified in the literature as bi-stability. All experiments performed are described in detail and, after analysis, it is concluded that the region of bi-stability truly exists. Thus the stability map referring to the examined system should be updated.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	2
Abstract	3
Μια Πρώτη Γεύση Από Το Φαινόμενο Που Θα Μελετήσουμε.	8
Σκοπός	11
Περίγραμμα Εργασίας.....	12
Κεφάλαιο 1 : Το Φαινόμενο Του Κλυδασμού	13
1.1 Εισαγωγή.....	13
1.2 Ορισμός Sloshing – Κλυδασμού	13
1.3 Παραμετρικός Κλυδασμός	15
Κεφάλαιο 2 : Ιστορική Αναδρομή	19
2.1 Κριτική Ανασκόπηση Εργασιών.....	19
2.2 Ιστορία Των Τραπεζών Ταλάντωσης (“Shaking Tables”)	21
Κεφάλαιο 3 : Περιγραφή Του Υλικού Του Εργαστηρίου	23
Εισαγωγή	23
Αρχή Λειτουργίας.....	24
3.1 Τράπεζα Πειραμάτων	25
3.2 Βάση Της Τράπεζας	26
3.3 Υδραυλικοί Βραχίονες	27
3.4 Οι Πνευματικοί Βραχίονες	30
3.5 Βάση Δαπέδου	32
3.6 Η Αντλία Λαδιού	33
3.7 Εναλλάκτης Θερμότητας.....	33
3.8 Δεξαμενή Λαδιού	35
3.9 Τα Υδραυλικά Λάδια Που Χρησιμοποιούμε	40
3.10 Διάταξη Υδραυλικού Καταστολέα Σοκ (Hydraulic Shock Suppressor).....	41
3.11 Ο Πίνακας Ελέγχου	42
3.12 Αισθητήρες Πίεσης.....	43
3.13 Αποστασιόμετρο / Inclinometer	46
3.14 Γυροσκόπιο	48
3.15 Κάμερα.....	50

3.16 Δεξαμενή Δοκιμών	51
Κεφάλαιο 4 : Περιγραφή Του Σ.Α.Ε.....	53
Κεφάλαιο 5 : Περιγραφή Του Λογισμικού	56
Εισαγωγή	56
5.1 Γενική Περιγραφή Του Λογισμικού Trireme.....	56
5.2 Καρτέλα «Pump/Filter Status».....	57
5.3 Καρτέλα Data Entry	59
5.4 Καρτέλα Run Test	60
5.5 Καρτέλα Other Control	61
5.6 Καρτέλα DAQ-Graphs	63
Κεφάλαιο 6 : Περιγραφή Του Calibration Του Μηχανήματος.	64
Εισαγωγή	64
6.1 Η Διαδικασία Του Calibration.....	64
Κεφάλαιο 7 : Περιγραφή Και Ανάλυση Των Πειραμάτων Που Έγιναν.	67
Εισαγωγή	67
7.1 Περιγραφή 1 ^{ου} Σετ Πειραμάτων.	69
7.2 Περιγραφή 2 ^{ου} Σετ Πειραμάτων.	76
7.3 Περιγραφή 3 ^{ου} Σετ Πειραμάτων.	82
Κεφάλαιο 8 : Συμπεράσματα Και Συνοπτική Ανασκόπηση.....	87
Εισαγωγή	87
8.1 Γενικά Συμπεράσματα	88
8.2 Αντικείμενα Για Μελλοντική Έρευνα.....	91
Ευχαριστίες.....	94
Βιβλιογραφία.....	95
Πίνακας Γραφημάτων	97
Πίνακας Πινάκων	98
Πίνακας Εικόνων	99

Σκοπός

Αντικειμενικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του φαινομένου του sloshing η αλλιώς κλυδασμού, μέσω κατάλληλης πειραματικής διάταξης. Στόχος μας είναι να μελετήσουμε πειραματικά, τις αποκρίσεις και τη συμπεριφορά της ελεύθερης επιφάνειας υγρού εντός ορθογωνικής δεξαμενής υπο κατακόρυφη διέγερση έτσι ώστε να μπορέσουν να επαληθευτούν πειραματικά τα αποτελέσματα τόσο αναλυτικών όσο και υπολογιστικών εργασιών στον τομέα.

Πιο συγκεκριμένα, κύρια επιδίωξη είναι να διερευνηθεί μέσω πειραματικών αποτελεσμάτων η ύπαρξη ή όχι, του λεγομένου «παραμετρικού τύπου» αστάθειας. Κατά το φαινόμενο αυτό η επιφάνεια του υγρού εντός της δεξαμενής μπορεί να παραμένει ήρεμη ή να κυματίζει περιοδικά κάτω από την ίδια εξωτερική διέγερση, ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες του συστήματος. Απώτερος στόχος της εργασίας είναι η (σε περίπτωση που τα ευρήματα είναι θετικά) επανασχεδίαση των λεγομένων χαρτών δυναμικής απόκρισης η χρήση των οποίων είναι αξιοποιήσιμη σε πλήθος περιοχών των θετικών επιστημών, όπως η ναυπηγική, η αεροναυτική, η διαστημική, η γεωλογία, καθώς μέσω αυτών μπορεί να επιτευχθεί η αποτελεσματικότερη σχεδίαση των δεξαμενών αποθήκευσης υγρών, η επαναξιολόγηση των εν ισχύ κανονισμών ασφαλείας (πλεύσης κτλ) και η εκπαίδευση του εμπλεκόμενου προσωπικού σε νέους τρόπους αποφυγής δυσμενών καταστάσεων.

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα πειράματά μας θα χρησιμοποιηθεί για πρώτη φορά η τράπεζα πειραμάτων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που βρίσκεται στο κτίριο του εργαστηρίου ναυτικής και θαλάσσιας υδροδυναμικής. Η τράπεζα αυτή έχει 6 βαθμούς ελευθερίας και μας επιτρέπει να έχουμε μεγάλη ελευθερία κινήσεων και ακριβή προσομοίωση αληθινών κινήσεων πλοίου λόγω επίδρασης κυματισμού.

Περίγραμμα Εργασίας

Η παρούσα εργασία διαιρείται σε τρία μέρη. Στο πρώτο κεφάλαιο του πρώτου μέρους γίνεται μια θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου έτσι ώστε να αποσαφηνιστούν οι βασικές έννοιες γύρω από αυτό, καθώς και να αναλυθεί η σκοπιμότητα μελέτης γύρω από το φαινόμενο. Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη κριτική ανασκόπηση των εργασιών που έχουν επηρεάσει περισσότερο την έρευνα σχετικά με τον κλυδασμό τόσο σε κατακόρυφη όσο και σε άλλες μορφές διέγερσης.

Στο δεύτερο μέρος γίνεται περιγραφή της πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου. Σκοπός του μέρους αυτού είναι να προσπαθήσουμε να φτιάξουμε ένα μικρό manual της τράπεζας δοκιμών και της όλης διάταξης, που θα μπορέσει να αποτελέσει βοήθημα σε όποιον στο μέλλον ασχοληθεί με αυτή τη πειραματική διάταξη, καθώς κάτι τέτοιο δεν δόθηκε με την παράδοση του μηχανήματος. Με τον τρόπο αυτό όποιος είναι υπεύθυνος στο μέλλον για την τράπεζα ταλαντώσεων, θα μπορεί να ανατρέξει σε αυτή την εργασία και να βρει όποια πληροφορία χρειάζεται σχετικά με το μηχάνημα και τα μέρη που αποτελούν αυτό αλλά και το χώρο του εργαστηρίου.

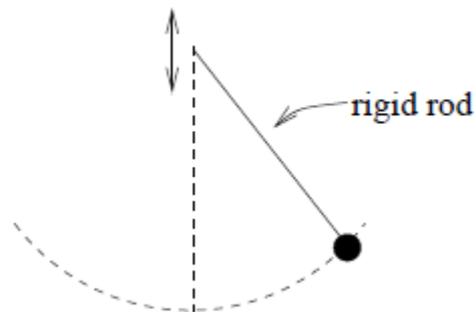
Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 5, θα δούμε τις λειτουργίες του software. Θα κάνουμε μία πλήρη περιγραφή του λογισμικού προκειμένου να μπορεί κάποιος να εξοικειωθεί με αυτό, προτού καν ανοίξει τον υπολογιστή. Επίσης θα αναφέρουμε όλη την διαδικασία του calibration που χρειάζοταν το μηχάνημα προκειμένου τα αποτελέσματά μας να είναι ακριβή καθώς κάτι τέτοιο θα είναι απαραίτητο να γίνεται και στο μέλλον, σε τακτά χρονικά διαστήματα και μία περιγραφή του θα είναι σημαντικότερο βοήθημα στον μελλοντικό χειριστή.

Έπειτα, στο τρίτο μέρος, θα επικεντρωθούμε στα πειράματα που κάναμε, στον τρόπο με τον οποίο έγιναν, την διαδικασία που ακολουθήθηκε, καθώς και τα αποτελέσματα που μας έδωσαν. Αυτή η διαδικασία θα γίνει για κάθε ένα από τα 3 σετ πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα αυτά θα αναλυθούν και θα υπάρξει μια σύγκριση αυτών, με αποτελέσματα αριθμητικών μεθόδων και της ημι-αναλυτικής μεθόδου τροπικής (modal) ανάλυσης, που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν, για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Τέλος στο κεφάλαιο 8 θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην τράπεζα ταλαντώσεων και θα εξάγουμε κάποια συμπεράσματα, σχετικά με την τράπεζα πειραμάτων, τα πειράματα που έγιναν σε αυτή αλλά και την ουσία των αποτελεσμάτων μας.

1.3 Παραμετρικός Κλυδασμός

Ως παραμετρικός κλυδασμός ονομάζεται η κυματοειδής κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού κατά τη διάρκεια κατακόρυφης (ως προς το επίπεδο της αδιατάραχτης ελεύθερης επιφάνειας) διέγερσης (Ibrahim, 2005). Αυτό που διαφοροποιεί την παραμετρικό κλυδασμό από το γενικότερο φαινόμενο είναι ότι στον παραμετρικό το ενεργό βαρυτικό πεδίο είναι χρονικά εξαρτώμενο. Για να γίνει ευκολότερα αντιληπτό αυτό αρκεί να εξεταστεί το μηχανικό ανάλογο που δεν είναι άλλο από ένα εκκρεμές η άκρη του οποίου δύναται να ταλαντώνεται αρμονικά στην κατακόρυφη διέγερση με αποτέλεσμα να εμφανίζεται χρόνο-εξαρτώμενο βαρυτικό πεδίο.



Σχήμα 1: Μηχανικό ισοδύναμο κατακόρυφης διέγερσης.

Όταν μια δεξαμενή είναι μερικώς γεμάτη και τεθεί υπό κατακόρυφη διέγερση, με συχνότητα διέγερσης κοντά στη διπλάσια τιμή της χαμηλότερης φυσικής ιδιοσυχνότητας του συστήματος θα δημιουργηθούν κύματα στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού. Τα κύματα αυτά είναι γνωστά ως κύματα Faraday αφού αυτός ήταν ο ερευνητής που τα παρατήρησε για πρώτη φορά (1831).

Ο Faraday παρατήρησε ότι το υγρό μέσα σε μια γυάλινη δεξαμενή ταλαντώνεται με μια συχνότητα η τιμή της οποίας είναι μισή από αυτήν της κατακόρυφης διέγερσης της δεξαμενής. Η επιβεβαίωση της θεωρίας του ήρθε αργότερα από τα πειράματα του Rayleigh (1883a, 1883b, 1987), τα αποτελέσματα των οποίων δικαίωναν την άποψη του Faraday.

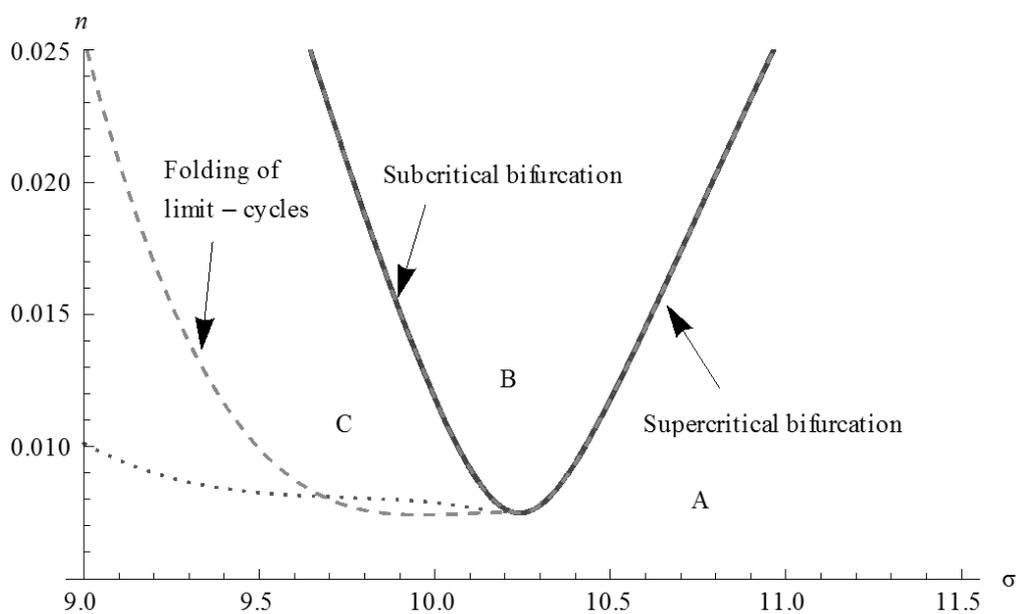
Το 1868 ο Mathieu κατέληξε σε μία γραμμική εξίσωση που φέρει και το όνομά του, η οποία βοήθησε τον Rayleigh να εξηγήσει το φαινόμενο που είδε στα πειράματά του, μαθηματικά. Περαιτέρω έρευνα έγινε από τους Lewis 1950, Taylor 1950, Benjamin & Ursell 1954, Konstantinov, et al. 1978 και Nevolin 1985, που οδήγησε στην δημιουργία διαγραμμάτων ευστάθειας που προέκυπταν από γραμμικές εξισώσεις τύπου Mathieu. Θεωρώντας ως $\ddot{Z}_0 = -\Omega^2 Z_0 \cos(\Omega t)$ την κατακόρυφη διέγερση της δεξαμενής, κατόπιν γραμμικοποίησης η ανάλυση όλων των προηγούμενα αναφερθέντων ερευνητών οδήγησε σε ένα σύστημα εξισώσεων τύπου Mathieu της μορφής:

διαστρωματικά υγρά χαρακτηρίζονται από την ιδιότητά τους να παρουσιάζουν διαβάθμιση πυκνότητας.

Σταδιακά σημαντικοί επιστήμονες όπως οι: Solaas (1995), Faltinsen & Rognbakke (2000), Faltinsen & Timokha (2002a) και Ibrahim et al. (2001), ο dr B. Molin (2002), ο Melenica (2003) και ο Newman (2005) βασισμένοι σε γραμμικές δυναμικές θεωρίες, μελέτησαν το φαινόμενο και έβαλαν τις βάσεις για την ανάπτυξη προγραμμάτων που μπορούσαν να προβλέψουν τις κινήσεις του υγρού σε μία δεξαμενή εάν αυτή δεχτεί κάποια εξωτερική διαταραχή σε διάφορες περιοχές συχνοτήτων, παρουσιάζοντας με αυτό τον τρόπο μια τεχνική (adaptive modal modelling technique) για τη δισδιάστατη περίπτωση κατά την οποία συνυπολογίζονται δυναμικές αλλαγές στους κυρίαρχους κυματισμούς.

Το 2011, κατά την μελέτη του προβλήματος 2D sloshing (Sprou & Spandwnidis), σε μία ορθογώνια δεξαμενή σε κατακόρυφη διέγερση, χρησιμοποιώντας την μέθοδο adaptive analysis που εισήγαγε ο Faltinsen και ο Timokha (2001), προέκυψε το συμπέρασμα ότι υπάρχει μία περιοχή στο διάγραμμα διέγερσης συχνότητας όπου μία αρχική διέγερση μπορεί να οδηγήσει ή να μην οδηγήσει (ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες) σε χαοτική συμπεριφορά της ελεύθερης επιφάνειας - κυματισμό.

Η περιοχή αυτή γίνεται πιο κατανοητή από την παρακάτω σχηματική αναπαράσταση, όπου A η περιοχή ευστάθειας, B η περιοχή κεντρικής αστάθειας και C η περιοχή ευσταθο-αστάθειας (bistability).



Σχήμα 2: Περιοχές αστάθειας-ευστάθειας στο φάσμα συχνοτήτων (Spandwnidis & Sprou, 2011)

Τα πειράματα που θα γίνουν θα αποσκοπούν στην μελέτη αυτής της περιοχής για την διεξαγωγή σίγουρων αποτελεσμάτων με την επιβεβαίωση ή την απόρριψή από την πειραματική μέθοδο αυτής της μελέτης.

ελατήρια που αντιστέκονται στην κίνηση. Ένα πολύτιμο χαρακτηριστικό εδώ είναι ότι το μέγεθος της έκκεντρος μάζας που μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την αρμονική κίνηση που χρειαζόμαστε, παρέχοντας έτσι μια μέθοδο ελέγχου.

Η ιδέα της παραγωγής των κινήσεων από υδραυλικά έμβολα εισήχθη από το MIT μετά το σεισμό του 1933 στο Long Beach, σε έναν πίνακα-τράπεζα που κρεμόταν από πάνω από τα καλώδια. Δύο άλλες καινοτομίες εδώ ήταν υψίστης σημασίας. Πρώτη ήταν μια αναλογική συσκευή χρησιμοποιώντας μια πραγματική καταγραφή των μετρήσεων ως πρώτη ύλη, και η δεύτερη ήταν ο έλεγχος της κίνησης από μία ηλεκτρικά ελεγχόμενη ανάδραση. Η ανάπτυξη αυτών των ιδεών στα shaking table, που χρησιμοποιούμε σήμερα, έπρεπε να περιμένει από την γενική ανάπτυξη του μηχανικού ελέγχου κατά τη διάρκεια του β' παγκοσμίου πολέμου το 1939-1945, ακολουθούμενη από την προσοδοτικά μεγαλύτερη και καλύτερη σε ταχύτητες και αξιοπιστία, χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας.

Φτάνοντας πια στο 1985 όπου οι εξελίξεις στην τεχνολογία των υπολογιστών επέτρεψαν την ταυτόχρονη χρήση- έλεγχο έως και 6 υδραυλικών εμβόλων που έδιναν στα shaking table τους 6 βαθμούς ελευθερίας που διαθέτουν και σήμερα. Να σημειωθεί βέβαια ότι για την εποχή η τεχνολογία ήταν απαγορευτική από οικονομική άποψη και έπρεπε να φτάσουμε στα μέσα της δεκαετίας του 90' για να δούμε τέτοια μηχανήματα σε ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια όπως το δικό μας.

Σήμερα στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο υπάρχουν 2 τέτοια μηχανήματα ένα στη σχολή πολιτικών μηχανικών και ένα στη σχολή ναυπηγών μηχανολόγων μηχανικών. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την μελέτη των επιπτώσεων του sloshing στην ναυπηγική υπάρχουν ελάχιστα shaking tables σε όλο τον κόσμο και το να γίνονται πειράματα σε ένα τέτοιο μηχάνημα στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο είναι κάτι αξιόπαινο. Συγκεκριμένα η σχολή ναυπηγών του ΕΜΠ ήταν η πρώτη σχολή που παρήγγειλε ένα μηχάνημα με τέτοιου είδους προδιαγραφές και στη συνέχεια αντίστοιχες παραγγελίες έγιναν και από την Κορέα, την Γαλλία και την Βραζιλία.

Η παρούσα δε εργασία, είναι η πρώτη που γίνεται σε ένα τέτοιο μηχάνημα και η πρώτη που πειραματικά προσπαθεί να διερευνήσει το φαινόμενο του parametric sloshing.



Εικόνα 8 Κάτω όψη της τράπεζας πειραμάτων



Εικόνα 9 πλάγια όψη της τράπεζας πειραμάτων

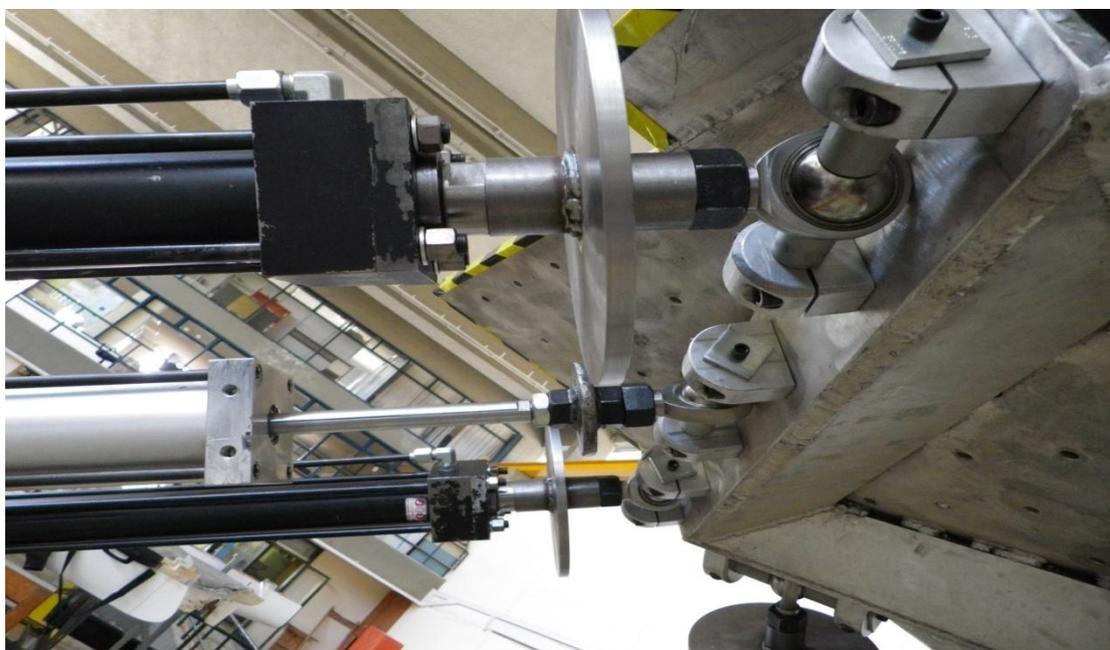
Σε κάθε μία πλευρά της τριγωνικής βάσης υπάρχουν 2 υδραυλικοί και ένας πνευματικός βραχίονας.

3.3 Υδραυλικοί Βραχίονες

Υπάρχουν 6 υδραυλικοί βραχίονες, κάθε ένας εξ αυτών έχει το ένα άκρο του αρθρωμένο στη βάση της τράπεζας και το άλλο αρθρωμένο σε μία βάση, πακτωμένη στο δάπεδο του εργαστηρίου, χρησιμοποιώντας 6 βίδες.

του κυλίνδρου χωρίζει ένα διάφραγμα που στην πραγματικότητα χωρίζει τον κύλινδρο σε δύο διαμερίσματα επιτρέποντας όμως το έμβολο να διέρχεται από αυτό. Τα δύο αυτά διαμερίσματα επικοινωνούν με έναν εξωτερικό σωλήνα που η ροή του λαδιού σε αυτόν ελέγχεται από μια σερβοβαλβίδα³. Κάθε φορά που επιθυμούμε να μετακινηθεί το έμβολο, δίνουμε κατάλληλη εντολή έτσι ώστε η βαλβίδα να επιτρέψει την επιθυμητή-κατάλληλη ροή λαδιού που θα ωθήσει το έμβολο, γεμίζοντας ένα από τα δύο διαμερίσματα του κυλίνδρου.

Στο πάνω μέρος κάθε βραχίονα, σε απόσταση 11,00 cm από την άρθρωση, που ενώνει τον βραχίονα με την βάση της τράπεζας, υπάρχει ένας δίσκος, κατασκευασμένος από αλουμίνιο, με διάμετρο 25,00 cm και πάχος 1,22 cm. Οι δίσκοι αυτοί χρησιμοποιούνται για την προστασία του κυλίνδρου του βραχίονα από απότομες κινήσεις της τράπεζας καθώς και για την πρόσθεση αδράνειας στο σύστημά μας προκειμένου να αποφεύγονται μικροκινήσεις εξαιτίας του βραχίονα.



Εικόνα 12 Πάνω όψη των βραχιόνων.

Στο κάτω μέρος των βραχιόνων, όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία, υπάρχει ένα αποστασιόμετρο που ελέγχει την μετατόπιση του εμβόλου και ανατροφοδοτεί με αυτή τη πληροφορία το σύστημά μας. Εάν η μετατόπιση που έχουμε ζητήσει δεν είναι ίση με αυτή που δείχνει το μετρητικό αυτό όργανο, δίνεται εντολή από το σύστημά μας στην σερβοβαλβίδα προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις.

³ Η σερβοβαλβίδα ελέγχεται ηλεκτρονικά από το πρόγραμμά μας και κάθε ποσότητα λαδιού που θα περάσει στον κύλινδρο ισοδυναμεί σε μία συγκεκριμένη μετατόπιση του εμβόλου.



Εικόνα 13 Το κάτω μέρος ενός υδραυλικού βραχίονα

3.4 Οι Πνευματικοί Βραχίονες

Υπάρχουν 3 πνευματικοί βραχίονες στην κατασκευή. Σκοπός τους είναι να αντισταθμίζουν το μεγάλο βάρος της τράπεζας πειραμάτων, προκειμένου να διευκολύνεται το έργο των υδραυλικών βραχιόνων.

Οι βραχίονες αυτοί έχουν κατασκευαστεί από την εταιρία Motion Controls LLC, και είναι το μοντέλο D160⁴ με κωδικό D160SENC SL75RA1. Πρόκειται για βραχίονες με αλουμινένιο κύλινδρο και έμβολο από ανοξείδωτο χάλυβα, που λειτουργούν με πίεση αέρα έως 250 PSI, σε ένα εύρος θερμοκρασιών από -12 έως 93 βαθμούς C.

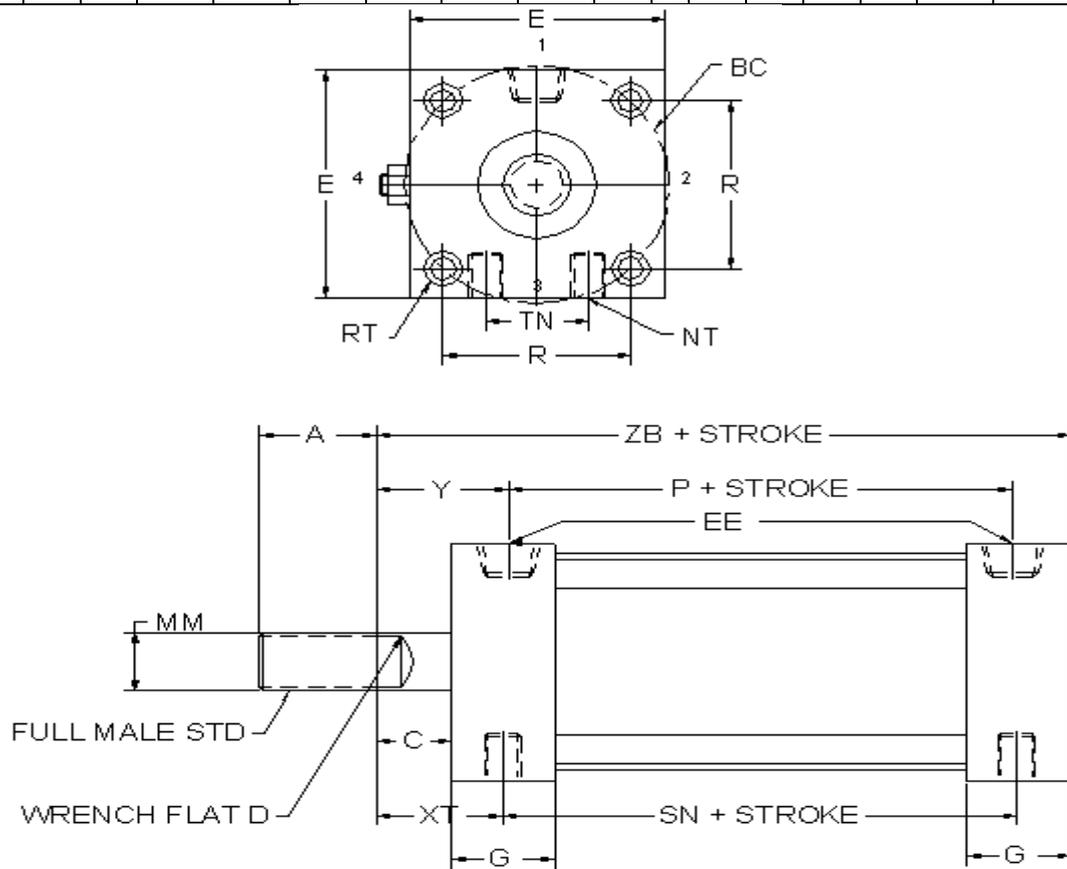
Η λειτουργία τους είναι αρκετά απλή. Εντός του κυλίνδρου υπάρχει ένα πιστόνι που από τη μία πλευρά έχει ένα ελατήριο, καθώς εισάγουμε πεπιεσμένο αέρα μέσα στον κύλινδρο, το πιστόνι αυτό αναγκάζεται να μετακινηθεί προς την επιθυμητή διεύθυνση, συμπιέζοντας το ελατήριο. Προκειμένου να επαναφέρουμε το πιστόνι στην κατάσταση ισορροπίας του, μειώνουμε την παροχή αέρα και με τη βοήθεια του ελατηρίου που υπάρχει, το πιστόνι αναγκάζεται να έρθει στην αρχική του θέση.

Παρακάτω απεικονίζονται τα σχέδια των κυλίνδρων αυτών με τις βασικές διαστάσεις τους.

⁴ <http://www.motioncontrolslc.com/pdfs/D-Series-Datasheet.pdf>

Πίνακας 3-4: Χαρακτηριστικά των πνευματικών βραχιόνων

MO DEL	PAR T NO.	E (in)	T N (in)	BC (in)	R (in)	RT (in)	NT (in)	A (in)	D (in)	G (in)	C	P	Y	S N	X T	ZB	MM	CC	EE
160	7021	5-1/8	2-1/2	5.689	4.024	1/2 - 20X3/4	1/2 - 20X1/2	1-5/8	7/8	1-7/16	1	2-5/16	1-1/16	3-7/16	1-3/8	5-35/64	1	1-8	1/2



Σχήμα 3: Διάφορες όψεις των πνευματικών βραχιόνων

3.6 Η Αντλία Λαδιού

Το λάδι το οποίο χρησιμοποιούν οι υδραυλικοί βραχίονες, παρέχεται από μία αντλία της εταιρίας Lincoln⁵ η οποία αποδίδει 60 HP στις 1775 RPM. Τα χαρακτηριστικά της αντλίας μας είναι:

Πίνακας 3-6: Τα χαρακτηριστικά της αντλίας λαδιού

Volts	230	Volts	460	Volts	190-208/380-415
F.L. Amps	140	F.L. Amps	70	F.L. Amps	167-154/83.5-77
S. F Amps	172	S. F Amps	86	S. F Amps	192-177/96-88.5
RPM	1800	Hertz	60/50		
HP	60	Duty	CONTINUOUS	TYPE	TDR
KW	44.76				
Frame	364TC	Serv. Factor	1.25	Phase	3
Max Amb	40	Design	B	Code	G
Insul Class	F	Protection	NOT	Therm.Prot.	
Eff 100%	95	Eff 75%		PF	84
UL	V-INS, CONST UL REC	CSA	Yes	Bearing OPE	311
CC Number	CC004A	CE		Bearing PE	313
Load Type		Inverter Type	NONE	Speed Range	NONE
Motor Wt.		Enclosure	DP	Lubrication	STANDARD
Nameplate		Mounting	RIGID	Rotation	REV

3.7 Εναλλάκτης Θερμότητας

Η ψύξη του λαδιού γίνεται χάρη σε ένα εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιεί νερό ως μέσο ψύξης. Ο εναλλάκτης αυτός είναι της εταιρίας Thermal Transfer Products⁶ μοντέλο B-1003-B4-F24 SAE. Πρόκειται για εναλλάκτη με σωλήνες διαμέτρου 1/4in, κατασκευασμένους από χαλκό, περίβλημα από ατσάλι, μπρούτζινα διαφράγματα, καθώς επίσης διαθέτει τη δυνατότητα για 4 περάσματα του ψυκτικού μέσου. Παρακάτω παρουσιάζεται το σχέδιο του εναλλάκτη και τα βασικά μεγέθη του.

⁵ <http://www.electricmotorwholesale.com/LINCOLN-LM15570/>

⁶ <http://www.thermasys.com/thermal-transfer-products-site/thermal-transfer-products-home/products/industrial-hydraulic-oil-coolers/>



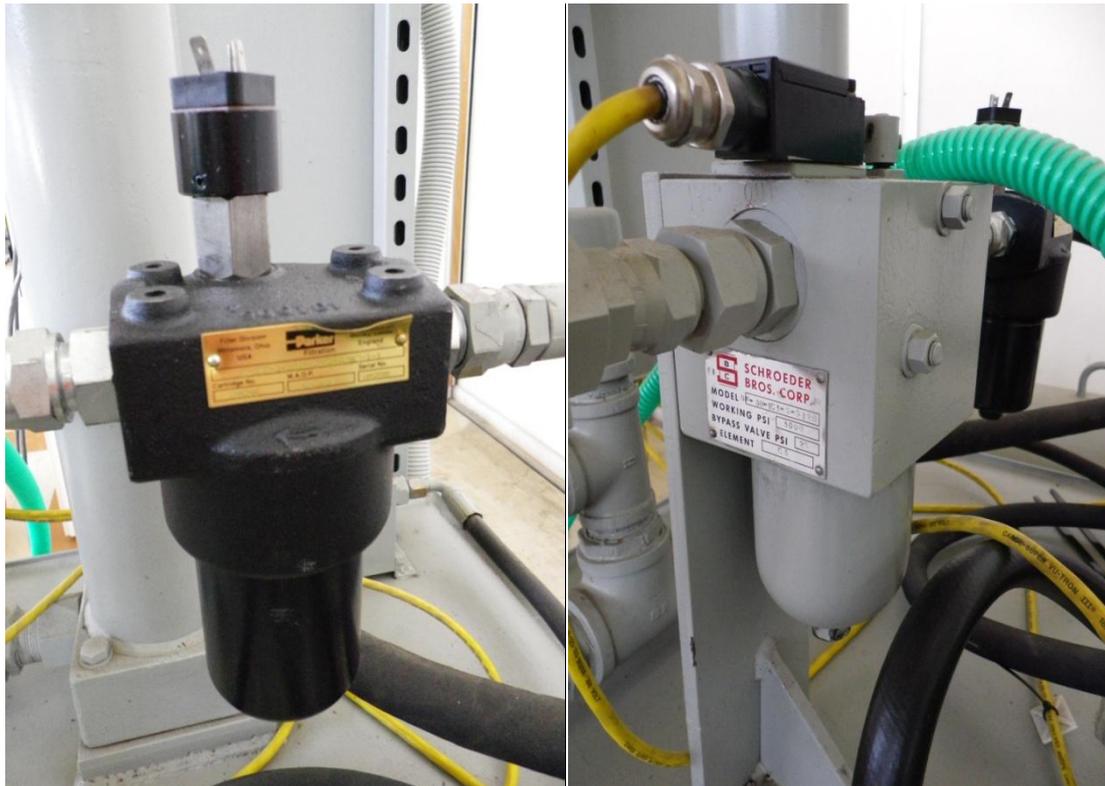
Εικόνα 18 Βαλβίδες στο πάνω μέρος της διάταξης της αντλίας.

Καθώς το λάδι στον σωλήνα κατάθλιψης της αντλίας εξέρχεται από την παραπάνω βαλβίδα, πριν το λάδι οδηγηθεί στους υδραυλικούς βραχίονες, περνάει αρχικά από ένα φίλτρο της εταιρίας Parker⁹ model no.: 0-18P-1-10Q-H2-50-B3R3-1-1, Cartridge No: G04244, M.A.O.P.414 BAR, Serial No: 1052755.

Στη συνέχεια το λάδι οδηγείται σε ένα ακόμη φίλτρο της εταιρίας Schroeder Bros¹⁰, model no: DF-30-1C3-S-G120, που μπορεί δουλεύει με 3000 psi και με bypass valve: 25psi, element: C3

⁹<http://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem.223a4a3cce02eb6315731910237ad1ca/?vgnextoid=05407d9f3075e210VgnVCM10000048021dacRCRD&vgnnextfmt=default&vgnnextfmt=EN>

¹⁰ <http://www.schroederindustries.com/>



Εικόνα 19 Φίλτρα λαδιού στην έξοδο του από την δεξαμενή.

Πάνω στο δεύτερο αυτό φίλτρο υπάρχει ένας αισθητήρας που μπορεί να εντοπίζει αλλαγές πιέσεων προκειμένου να βγάλουμε συμπεράσματα για την ποιότητα του φίλτρου και τη σωστή λειτουργία του. Όπως όλοι οι αισθητήρες στην διάταξή μας οδηγεί την πληροφορία αυτή στον πίνακα ελέγχου.

Ακόμη πάνω στην επιφάνεια της δεξαμενής λαδιών, υπάρχει ένα ακόμα φίλτρο καθαρισμού του λαδιού, το οποίο δέχεται το λάδι που γυρνάει από τους υδραυλικούς βραχίονες στην δεξαμενή λαδιού. Το φίλτρο αυτό είναι της εταιρίας Schroeder Bros και είναι το μοντέλο: JF-20-3J3-S G12, series: C, Element: 3J, το οποίο μπορεί να λειτουργεί σε πίεση 2500psi.

Το λάδι καθώς εξέρχεται από τους υδραυλικούς βραχίονες, κατευθύνεται μέσα από ένα σωλήνα, διαμέτρου 4,87cm, προς τη δεξαμενή λαδιού. Αρχικά περνάει από μία βαλβίδα πάνω στην οποία υπάρχουν δύο αισθητήρια όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας, οποία μεταφέρουν την πληροφορία στον πίνακα ελέγχου. Στη συνέχεια το λάδι εισέρχεται στο φίλτρο λαδιού που αναφέραμε και αφού καθαριστεί, με έναν σωλήνα, διαμέτρου 3,53cm, μεταφέρεται στην δεξαμενή λαδιού.

3.9 Τα Υδραυλικά Λάδια Που Χρησιμοποιούμε

Τα λάδια που χρησιμοποιούμε για το σύστημά μας είναι της εταιρίας Shell, είναι τύπου, Tellus Oil S 32¹¹. Πρόκειται για υδραυλικά λάδια, υψηλής απόδοσης, με σημείο βρασμού άνω των 280 °C και πίεση ατμών λιγότερη από 0,5ρα στους 20 °C.



Εικόνα 22 Ο τύπος λαδιού που χρησιμοποιούμε

Η φύλαξη των λαδιών γίνεται σε 2 βαρέλια, βάρους 182 kg και χωρητικότητας 209 lit έκαστο, τα οποία βρίσκονται πάνω σε μία λεκάνη, προκειμένου σε περίπτωση ατυχήματος η διαρροή να περιοριστεί εντός της λεκάνης. Οι διαστάσεις της λεκάνης είναι: μήκος 108,00 cm, πλάτος 76,00 cm και ύψος 46,00 cm.

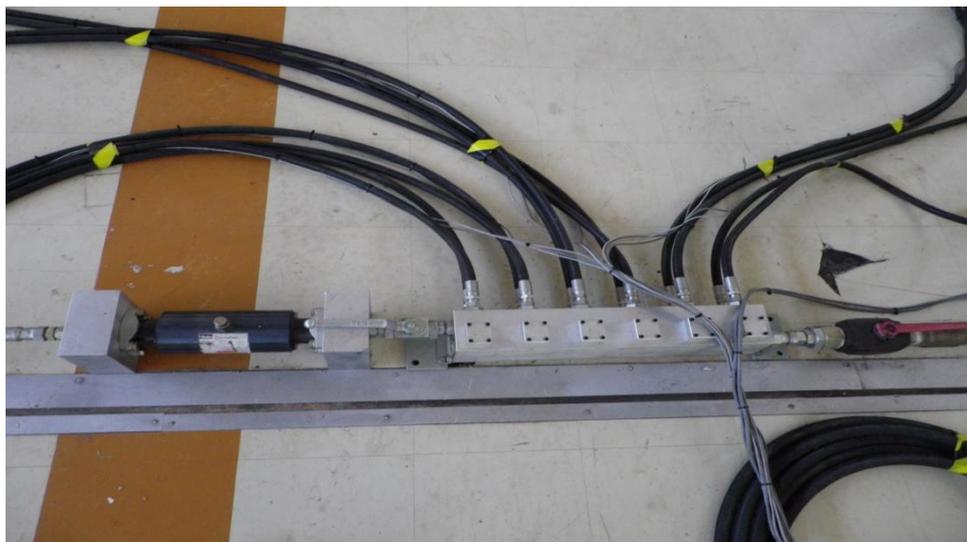
¹¹<https://www.cww.shell.com/wps/gpc/retrieve?countryid=CN&languageid=en&productid=001A0662&formulationid=140000001617&format=09>



Εικόνα 23 Τα δοχεία λαδιού

3.10 Διάταξη Υδραυλικού Καταστολέα Σοκ (Hydraulic Shock Suppressor)

Το λάδι που στέλνεται από την αντλία στους υδραυλικούς βραχίονες, αφού περάσει μέσα από τα φίλτρα καθαρισμού όπως αναφέρθηκαν παραπάνω¹², περνάει μέσα από μία διάταξη για να μειωθεί ο υδραυλικός "θόρυβος" και να μοιραστεί ομοιόμορφα στους 6 υδραυλικούς βραχίονες.



Εικόνα 24 Ο Υδραυλικός καταστολέας

¹² Στο τμήμα της περιγραφής της δεξαμενής λαδιού, κομμάτι 3.



Εικόνα 30 Το κουτί του αποστασιόμετρου.

Πίνακας 3-13: Χαρακτηριστικά του αποστασιόμετρου.

Μονάδες μέτρησης	m/cm/mm
Δίοδος λέιζερ	635 nm, < 1 mW
Κατηγορία λέιζερ	2
Περιοχή μέτρησης	0,05 - 80 m
Ακρίβεια μέτρησης, τυπ.	$\pm 1,5$ mm
Τυπικός χρόνος μέτρησης	< 0,5 s
Μέγιστος χρόνος μέτρησης	4 s
Τροφοδοσία ρεύματος	1 μπαταρία Li-Ion 3,7 V (1250 mAh)
Διάρκεια ζωής της μπαταρίας, ξεχωριστές μετρήσεις περίπου	25.000
Αυτόματη απενεργοποίηση	5 λεπτά
Μήκος x Πλάτος x Ύψος	111 mm x 51 mm x 30 mm
Μνήμη μετρήσεων	έως 10 μετρήσεις
Βάρος (με μπαταρία)	0.180 kg

GPS horizontal position accuracy	< 2.5 m Autonomous < 2.0 m SBAS (CEP, stationary 24 hours, SEP 3.5 m)
GPS timepulse signal accuracy	30 nsec RMS < 60 nsec 99%
GPS acceleration limit	≤ 4 g
GPS altitude limit	no limit
GPS velocity limit	500 m/sec (972 knots)
GPS antenna connector	MMCX type

3.15 Κάμερα

Η κάμερα που χρησιμοποιούμε για την καταγραφή των κινήσεων του νερού εντός της δεξαμενής είναι της εταιρίας Fastec Imaging²¹, TROUBLESHOOTER HR Enchanted memory²² με ανάλυση 1280X1024, μέγιστη ταχύτητα 1000 FPS και μνήμη. Η κάμερα αγοράστηκε από την εταιρία Transam Trading²³ μαζί με μνήμη 3Gb, για 6,1 sec χρόνο καταγραφής, περίπου δηλαδή 6144 frames.

Η κάμερα διαθέτει επίσης φακούς που είναι 16-160mm με ACCYKIT2, μία ενσωματωμένη έγχρωμη οθόνη LCD 5", μνήμη compact flash, μία έξοδο USB 2.0, 4 μπαταρίες D-cell, καθώς επίσης και μια έξοδο για παροχή ρεύματος 110/220 VAC. Μαζί με την κάμερα, αγοράστηκαν παράλληλα μία βαλίτσα μεταφοράς, DC light, battery pack, ένας μετασχηματιστής ρεύματος 220V, ένα καλώδιο USB, μια βάση στήριξης και φακοί 12,5mm και 25mm.

Οι διαστάσεις της κάμερας και το βάρος της είναι : W=6", H=5", D=4" , 2.2lbs χωρίς τις μπαταρίες.

²¹ <http://www.fastecimaging.com/>

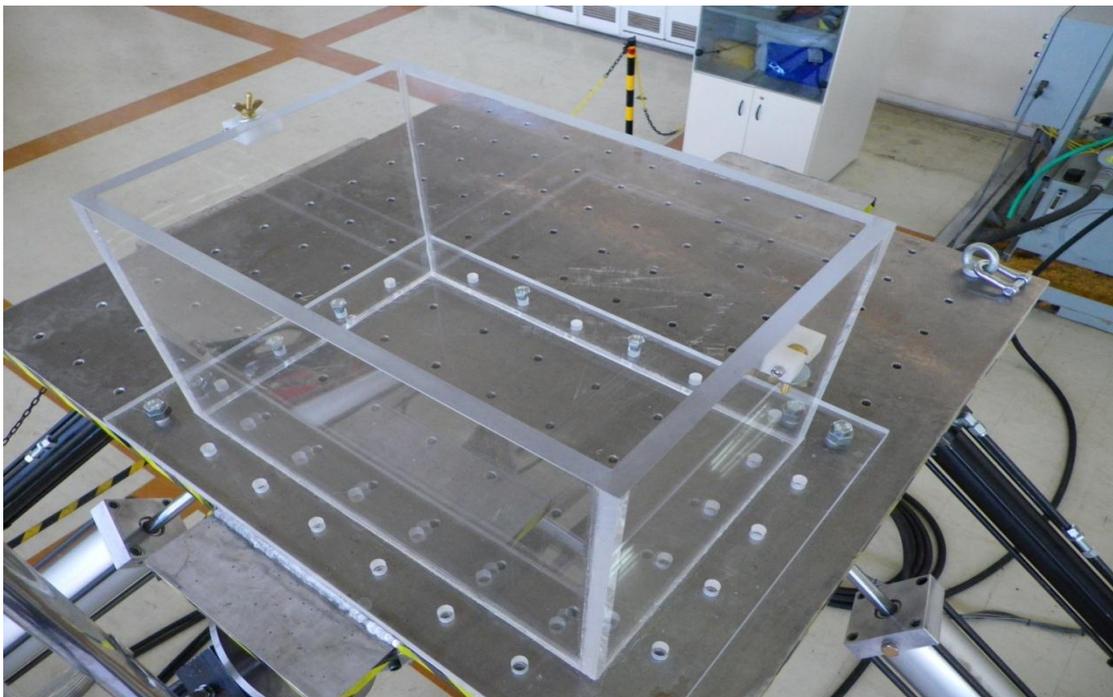
²² <http://www.transam.gr/files/PDFs/TroubleShooter.pdf>

²³ <http://www.transam.gr/default.asp?pid=1&la=1>



Εικόνα 32 Η κάμερα που χρησιμοποιούμε.

3.16 Δεξαμενή Δοκιμών



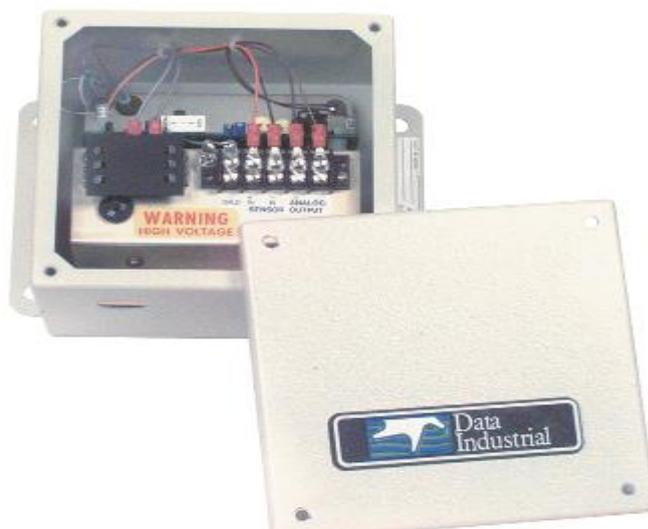
Εικόνα 33 Η δεξαμενή πειραμάτων μας.

Η δεξαμενή πειραμάτων έχει τις εξής διαστάσεις: μήκος 64,00 cm, πλάτος 44,00 cm, ύψος 39,60 cm, πάχος 20 mm και το υλικό κατασκευής της είναι plexiglass με ειδικό βάρος 1.19 gram/cm^3 . Η δεξαμενή στηρίζεται σε μια βάση του ίδιου υλικού, διαστάσεων: μήκος 80,00 cm, πλάτος 60,00 cm, ύψος 2,01 cm. Στη βάση υπάρχουν 24 οπές, διαμέτρου 17,00 mm, προκειμένου να περαστούν οι βίδες που θα συγκρατούν τη βάση στο τραπέζι πειραμάτων. Οι βίδες που χρησιμοποιήθηκαν είναι με σπείρωμα τύπου M16 και μήκους 10,00 cm.



Εικόνα 36 Το μοντέλο NI BNC-2110

Ο "πομπός αναλογικής εξόδου" , δηλαδή ο analog output transmitter που αναφέραμε παραπάνω είναι της εταιρίας Data Industrial²⁷ μοντέλο : Model 750M²⁸ με serial no: 032536²⁹.



Εικόνα 37 Ο πομπός αναλογικής εξόδου : Model 750M

Αυτός ο πομπός λαμβάνει τα ψηφιακά σήματα από τους διάφορους αισθητήρες και τα μετατρέπει σε αναλογικά σήματα. Τα αναλογικά σήματα που μπορεί να παράγει είναι :

1. 4-20 ma
2. 0-1 volt
3. 0-5 volts
4. 0-10 volts

²⁷ <http://www.dataind.com/Main.aspx?PageCode=HOME>

²⁸ <http://www.badgermeter.com/getdoc/7bde59f4-25ef-46e1-97b6-c4b1e6c37a3b/750m.aspx>

²⁹ <http://resources.kele.com/cgi-bin/archive/2002/f5/220P.PDF>

Το πρόγραμμα της εταιρίας ANCO, Trireme V 10, μας δίνει την δυνατότητα για να πραγματοποιήσουμε σύνθετες κινήσεις της τράπεζας που είναι αποτέλεσμα της σύνθεσης 6 επιμέρους κινήσεων:

- Roll (x) - Deg
- Pitch (y) - Deg
- Yaw (z) - Deg
- Surge (x) - Meters
- Sway (y) - Meters
- Heave (z) - Meters

Οποιαδήποτε κίνηση και εάν θέλουμε να κάνουμε το πρόγραμμα απαιτεί από τον χρήστη να εισάγει αυτές τις 6 κινήσεις έστω και ένα κάποιες από αυτές είναι μηδενικές. Παραδείγματος χάρη εάν θέλουμε να εκτελέσουμε μόνο κίνηση heave είναι απαραίτητο να εισάγουμε και τις υπόλοιπες κινήσεις, όμως με μηδενικά deg και meters. Οι περιορισμοί που μας δίνει το πρόγραμμα για αυτές τις κινήσεις είναι ± 40 deg και $\pm 0,5$ meters.

Όταν ο χρήστης ανοίξει το πρόγραμμα θα βρεθεί μπροστά από ένα παράθυρο που θα του εμφανίζει στο πάνω μέρος του 5 καρτέλες με τους εξής τίτλους: Data Entry, Run Test, Other Control, DAQ-Graphs, Pump/Filter Status. Κάθε μία καρτέλα ορίζεται για συγκεκριμένες λειτουργίες και δίνει διαφορετικές δυνατότητες στον χρήστη, οπότε θα μιλήσουμε ξεχωριστά για κάθε καρτέλα παρακάτω.

Εκτός όμως από τις καρτέλες αυτές και το ανάλογο περιβάλλον που κάθε μία προσφέρει δεξιά του παραθύρου υπάρχουν πάντα 6 διαγράμματα, όπου στο κάθε διάγραμμα υπάρχουν δύο γραμμές και εκτός από τα διαγράμματα υπάρχουν τα εξής κουτιά: Total Blocks, οι φορές που θέλουμε να τρέξει το κάθε πείραμα το μηχάνημά μας, Block Time, ο χρόνος που τρέχει το κάθε πείραμα, Elapsed και Strength, η ισχύς με την οποία εκτελείται το κάθε πείραμα.

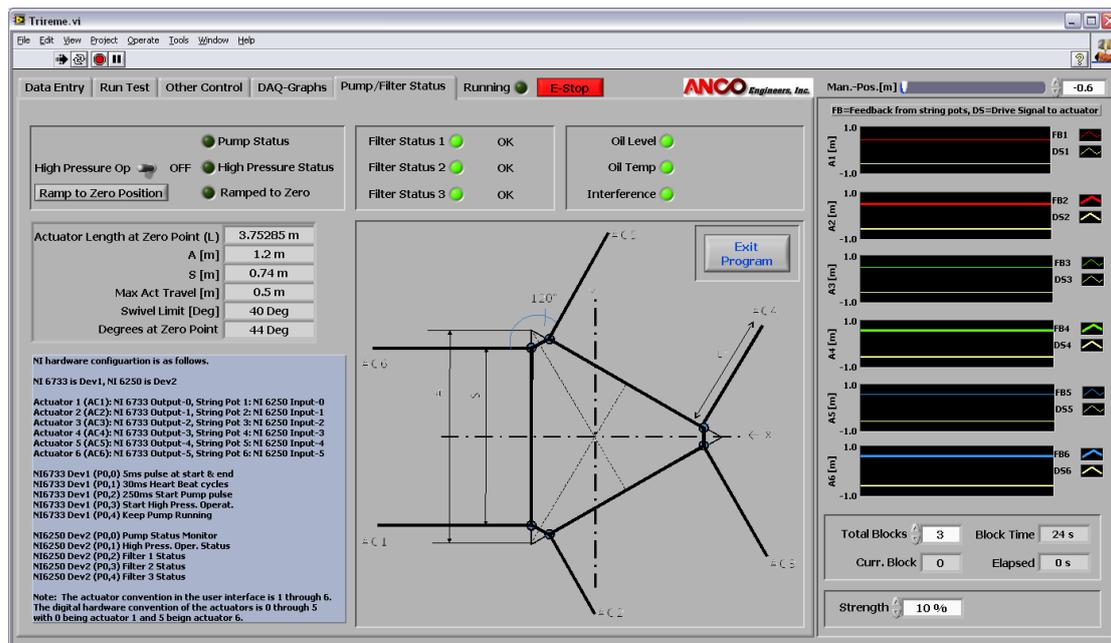
Τα διαγράμματα αυτά περιέχουν δύο γραμμές με διαφορετικό χρώμα η μία γραμμή δηλώνει στην κίνηση που κάνει ο αντίστοιχος βραχίονας, την κάθε στιγμή, ενώ η δεύτερη γραμμή δείχνει την κίνηση που ζητάμε από τον αντίστοιχο βραχίονα την κάθε στιγμή. Όπως καταλαβαίνουμε θεωρητικά αυτές οι δύο γραμμές έπρεπε πάντα να συμπίπτουν, αυτό όμως ποτέ δεν μπορεί να επιτευχθεί καθώς δεν μπορούμε να μηδενίσουμε τους θορύβους και τις καθυστερήσεις στην κίνηση που θα οδηγούσαν σε τέλεια ανταπόκριση.

5.2 Καρτέλα «Pump/Filter Status»

Η πιο σημαντική καρτέλα ίσως είναι η «Pump/Filter Status» πολύ απλά γιατί σε αυτή μας εμφανίζεται η επιλογή για να ανοίξουμε και να κλείσουμε το μηχάνημα. Στο πάνω μέρος αριστερά του παραθύρου εμφανίζονται δύο κομβία με τίτλο : «Start Pump» και «High Pressure op». Προκειμένου να εκκινήσουμε το μηχάνημα πρέπει να πατήσουμε το κουμπί «Pump on», το οποίο ενεργοποιεί την αντλία και στη συνέχεια μετά από λίγα

δευτερόλεπτα να πατήσουμε το κουμπί «High Pressure on» που στέλνει λάδι στους βραχίονες του μηχανήματος.

Ακριβώς από κάτω από τα δύο προαναφερθέντα κουμπιά βρίσκεται ένα άλλο με τίτλο «Hydraulics off» το κουμπί αυτό απενεργοποιεί την αντλία και την παροχή λαδιού, κλείνει στην πραγματικότητα το μηχάνημα.



Εικόνα 38 Η καρτέλα «Pump/Filter Status»

Αριστερά από το παράθυρο των προαναφερομένων κομβίων βρίσκονται 6 βασικές ενδείξεις για την κατάσταση του μηχανήματος. Αυτές είναι : «Filter status 1», «Filter status 2», «Filter Status 3», «Oil Level», «Oil temp», «Interference». Οι τρεις πρώτες μας δείχνουν την κατάσταση των τριών φίλτρων του μηχανήματος, όπως αυτά έχουν αναλυθεί στο κεφάλαιο περιγραφή του εργαστηρίου. Πρόκειται για τα δύο φίλτρα στην έξοδο του λαδιού από την δεξαμενή λαδιού και το μεγάλο φίλτρο στην είσοδο του λαδιού σε αυτή. Οι επόμενες μεταβλητές μας δείχνουν το επίπεδο του λαδιού στη δεξαμενή και την θερμοκρασία του.

Στο κάτω μέρος του παραθύρου υπάρχει ένα σχεδιάγραμμα του μηχανήματος και πάνω από αυτό το κουμπί «Exit Program» με το οποίο τερματίζεται το πρόγραμμα και βγαίνουμε από αυτό.

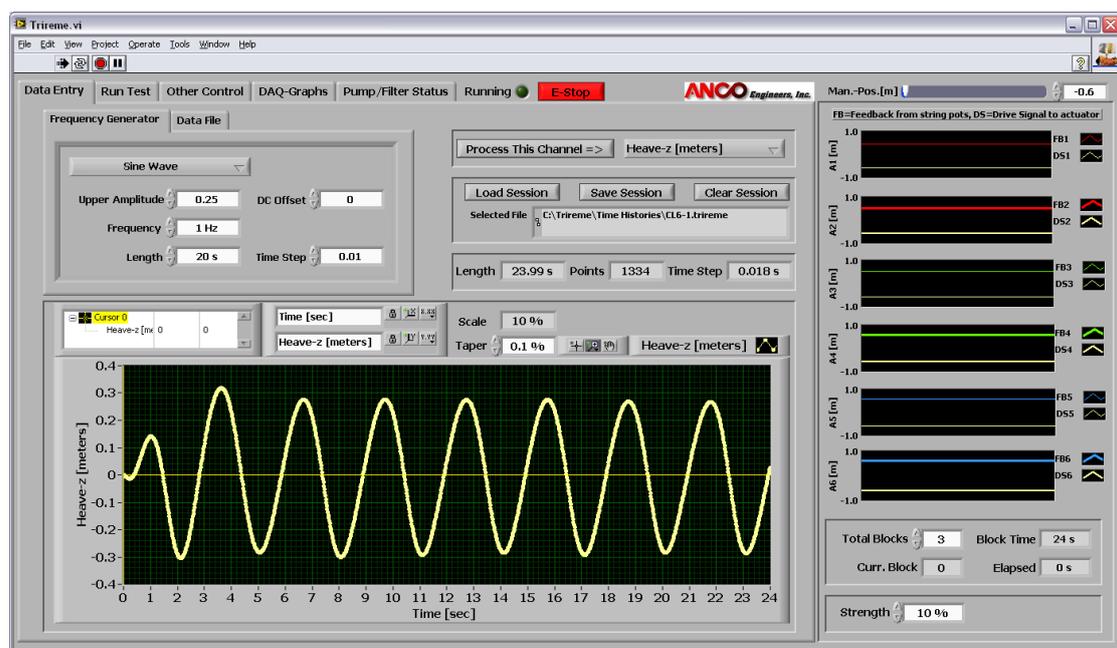
Στο αριστερό κάτω μέρος αυτής της καρτέλας μας εμφανίζονται διάφορες μεταβλητές όπως : Actuator Length at Zero Point(L), A(m), S(m), Max Act Travel(m), Swivel Limit(Deg), Degrees at Zero Point. Αυτές οι μεταβλητές είναι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του μηχανήματος όπως π.χ. η γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους οι βραχίονες ή το μήκος τους.

5.3 Καρτέλα Data Entry

Η καρτέλα «Data Entry», είναι αυτή στην οποία ο χρήστης μπορεί να δώσει στο μηχάνημα την κίνηση που θέλει να εκτελέσει. Όσο σύνθετη ή απλή είναι η κίνηση, θα προκύψει από την συμβολή και των 6 διαθέσιμων κινήσεων, Roll, Pitch, Yaw, Surge, Sway, Heave.

Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και κίνηση Heave να θέλουμε να εκτελέσει μόνο το μηχάνημα θα πρέπει να εισάγουμε και κίνηση για κάθε μία από τις άλλες 5 μεταβλητές απλά το πλάτος τους, σε deg ή meters, θα είναι 0.

Στην αριστερή πλευρά του παραθύρου, υπάρχουν τα εξής κουτιά προς συμπλήρωση: upper altitude, που είναι το πλάτος τη κίνησης, Frequency, η συχνότητα στην οποία θέλουμε να κάνει αυτή την κίνηση η τράπεζα, Padding Beginning, Phase, DC Offset και Padding End .



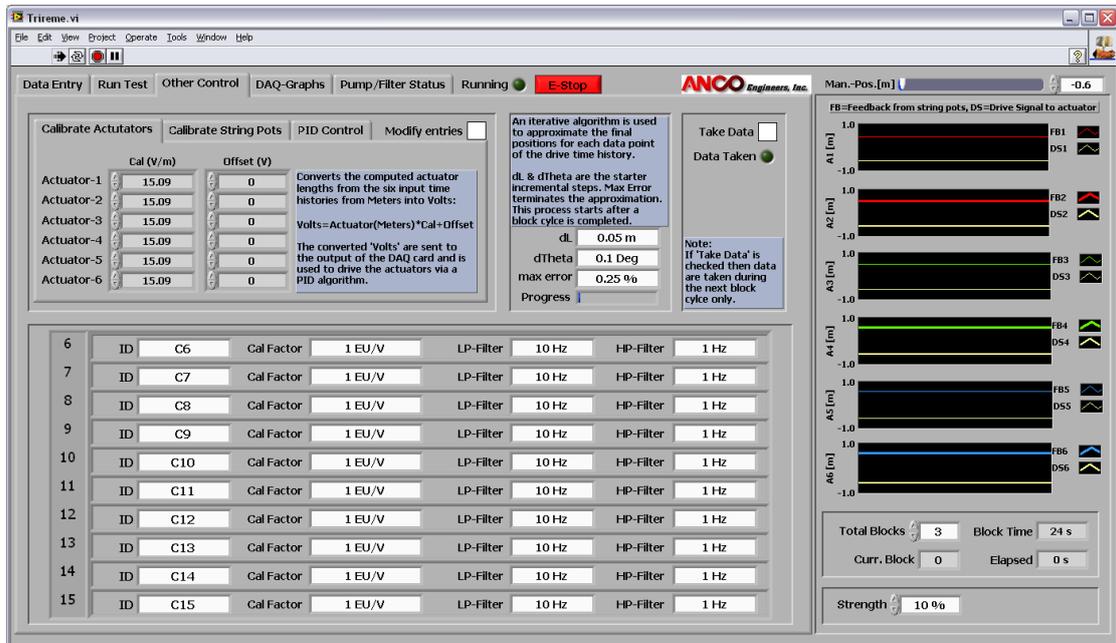
Εικόνα 39 Η καρτέλα "Data Entry"

Στην δεξιά πλευρά της καρτέλας εμφανίζονται οι εξής επιλογές: Load Session, Save Session, Clear Session, Funct-Duration, η χρονική διάρκεια του πειράματος, dt-Function , Points.

Στο κάτω μέρος της καρτέλας εμφανίζεται το σχεδιάγραμμα της κίνησης σε ημιτονική-συνημιτονική μορφή, σε πράσινο φόντο και άξονες πάντα για χ τον χρόνο και για Y είτε deg είτε meters. Επίσης μπορούμε να δούμε τα εξής κουτιά : Strength, το ποσοστό της ισχύς με το οποίο θα εκτελέσει την κίνηση το μηχάνημα, taper, είναι η καθυστέρηση

5.5 Καρτέλα Other Control

Η καρτέλα other control είναι από τις πιο χρήσιμες καθώς εδώ το πρόγραμμα μας επιτρέπει να κάνουμε ένα βασικό calibration του μηχανήματος, χάρη στη δυνατότητα που έχουμε σε αυτή την καρτέλα να επηρεάζουμε το cal (v/m) και το offset (v) κάθε βραχίονα, κάθε spring pot και κάθε gain PID.



Εικόνα 41 Η καρτέλα other control

Αρχικά μας εμφανίζεται η υποκαρτέλα calibrate actuators, βλέπουμε λοιπόν το gain και το offset κάθε βραχίονα. Να σημειώσουμε ότι σύμφωνα με το πρόγραμμα μας τα volts που χρειάζεται σήμα ο κάθε βραχίονας για να κινηθεί είναι: volts= actuators (meters)* cal (v/m) + offset. Χάρη σε αυτή τη σχέση για κάθε ζητούμενη επιμήκυνση κάθε βραχίονα το πρόγραμμα υπολογίζει πόσα volts θα στείλει σήμα. Επηρεάζοντας- αλλάζοντας το cal και το offset επηρεάζουμε αυτό το σήμα με αποτέλεσμα να μπορούμε να ελέγξουμε την κίνηση κάθε βραχίονα.

Στη συνέχεια μπορούμε να δούμε την υποκαρτέλα calibrate string pots, σε αυτή μπορούμε να ελέγξουμε το σήμα που έρχεται στον υπολογιστή από τους αισθητήρες απόστασης που υπάρχουν στη βάση κάθε βραχίονα. Αυτό το σήμα χρησιμοποιείται, από τον υπολογιστή, προκειμένου να βρει τι απόκλιση έχει η κίνηση που πραγματοποιεί ο βραχίονας από την ζητούμενη. Η εξίσωση που χρησιμοποιεί, ο υπολογιστής για να μέτρηση την κίνηση των βραχιόνων είναι: meters= SP(V)*Cal-SP + Offset -SP. Ρυθμίζοντας το SP και το Offset, μπορούμε να ρυθμίσουμε το σήμα που παίρνει ο υπολογιστής άρα και την απόκλιση που αυτός αντιλαμβάνεται.

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1 Περιοχές ευστάθειας και αστάθειας όπως προέκυψαν από τα πειράματα του πρώτου σετ, στο αρχείο excel. Στην πραγματικότητα το αρχείο αυτό ήταν μία πρώτη καταγραφή των αποτελεσμάτων, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του σετ των πειραμάτων. ...	70
Πίνακας 2 Περιοχές ευστάθειας και αστάθειας όπως προέκυψαν από τα πειράματα του δεύτερου σετ, στο αρχείο excel. Στην πραγματικότητα το αρχείο αυτό ήταν μία πρώτη καταγραφή των αποτελεσμάτων, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του σετ των πειραμάτων. ...	76
Πίνακας 3 Περιοχές ευστάθειας και αστάθειας όπως προέκυψαν από τα πειράματα του δεύτερου σετ, στο αρχείο excel. Στην πραγματικότητα το αρχείο αυτό ήταν μία πρώτη καταγραφή των αποτελεσμάτων, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του σετ των πειραμάτων. ...	83

Εικόνα 40 Η καρτέλα Run Test.....	60
Εικόνα 41 Η καρτέλα other control.....	61
Εικόνα 42 Η υποκαρτέλα calibrate string pots	62
Εικόνα 43 Η υποκαρτέλα PID control.....	62
Εικόνα 44 Καρτέλα DAQ-Graphs.....	63
Εικόνα 45 Απεικόνιση των μενού, του προγράμματος, στα οποία βρίσκονται τα παραπάνω στοιχεία που αναφέρθηκαν.	65
Εικόνα 46 Διάγραμμα ευστάθειας της εξίσωσης του Mathieu, άξονας χ: $(\sigma/\sigma)^2$, άξονας γ: $(\delta \sigma/\sigma)^2$	69
Εικόνα 47: Στιγμιότυπο από το πείραμα $F=1,05\text{HZ}$, $A=0,045\text{m}$	71
Εικόνα 48: Στιγμιότυπο από το πείραμα $F=2,05\text{HZ}$, $A=0,05\text{m}$	72
Εικόνα 49 Στάσιμα κύματα που αντιστοιχούν σε συμμετρικούς και μη συμμετρικούς φυσικούς κυματισμούς για sloshing σε μία δισδιάστατη ορθογώνια δεξαμενή.....	73
Εικόνα 50 Στιγμιότυπα από το πείραμα $F=3,05\text{HZ}$, $A=0,04\text{m}$	73
Εικόνα 51 Στιγμιότυπα από το κύμα συχνότητας 1,49 HZ πλάτους 0,021m	78
Εικόνα 52 Στιγμιότυπο του κύματος συχνότητας 1,93HZ και πλάτους 0,021m.....	79
Εικόνα 53 Στιγμιότυπο από το κύμα που δημιουργείται για συχνότητα 2,05 HZ και πλάτος 0,019 m.....	80
Εικόνα 54 Στιγμιότυπο του επιφανειακού κυματισμού για διέγερση πλάτους 0,019m και συχνότητας 1,93HZ	84
Εικόνα 55 Στιγμιότυπο επιφανειακού κύματος που προκαλείται από διέγερση πλάτους 0,015m και συχνότητας 2.01HZ.....	85
Εικόνα 56 Στιγμιότυπο κύματος που δημιουργείται σε διέγερση πλάτους 0,017m και συχνότητας 2,29HZ	86
Εικόνα 57 Στιγμιότυπο κύματος που δημιουργείται σε διέγερση πλάτους 0,021m και συχνότητας 1,77HZ	86