

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΜΕ
ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΓΡΟΥ**

υπό

ΒΙΚΟΠΟΥΛΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ - ΔΕΣΠΟΙΝΑ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2006



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5021/1
Ημερ. Εισ.: 14-11-2006
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2006
ΒΙΚ

© 2006 Αικατερίνη – Δέσποινα Βικοπούλου

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν.5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής :

Πρώτος εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος εξεταστής Δρ. Μιχάλης Βλαχογιάννης
Διδάσκων Π.Δ. 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Πελεκάσης
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Βασίλειο Μποντόζογλου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Νικόλαο Ανδρίτσο, Μιχάλη Βλαχογιάννη και Νικόλαο Πελεκάση για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ευχαριστώ τις φίλες μου Μαριάννα, Λίνα, Αμαρυλλίδα και Αλεξάνδρα για την ηθική υποστήριξή τους. Επίσης, ευχαριστώ τον Γιώργο για την κατανόησή του, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Γεώργιο και Αικατερίνη Βικοπούλου για την ολόψυχη αγάπη, την αμέριστη υποστήριξη και την αδιάκοπη προσπάθειά τους να μου παρέχουν το καλύτερο δυνατό όλα αυτά τα χρόνια.

Αφιερώνω αυτή την εργασία
στην μητέρα μου και στον πατέρα μου.

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΓΡΟΥ

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ - ΔΕΣΠΟΙΝΑ ΒΙΚΟΠΟΥΛΟΥ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
2006

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου,
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Τομέας Ενέργειας, Βιομηχανικών
Διεργασιών και Τεχνολογίας Αντιρρύπανσης,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζουμε την αλληλεπίδραση σφαιρικού αντικειμένου σε ελεύθερη πτώση με αρχικά αδιατάραχτη επιφάνεια νερού. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται τόσο στις δυνάμεις αλληλεπίδρασης σώματος-νερού (που καθορίζουν την εξέλιξη της ταχύτητας του αντικειμένου), όσο και στις δομές που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του νερού.

Το πείραμα εκτελείται σε απλή ιδιοσυσκευή και τα πρωτογενή δεδομένα είναι αλληλουχία εικόνων που λαμβάνονται με χρήση ψηφιακής κάμερας υψηλής ταχύτητας. Η επεξεργασία των εικόνων παρέχει πληροφορίες τόσο για τα χαρακτηριστικά των δομών της ελεύθερης επιφάνειας όσο και για την ακριβή κίνηση της σφαίρας.

Ταυτοποιούνται τρία στάδια εξέλιξης της ελεύθερης επιφάνειας που περιλαμβάνουν (i) αρχική διαβροχή της εισερχόμενης σφαίρας από υμένα υγρού και σχηματισμό πρόδρομου πίδακα, (ii) υπερακόντιση υγρού πάνω από τη σφαίρα και σχηματισμό του κύριου πίδακα και (iii) τριχοειδή διάσπαση

του κύριου πίδακα με αποκόλληση σταγόνων. Εξετάζεται η επίδραση της διαμέτρου της σφαίρας και του ύψους ρίψης, και διαπιστώνεται ότι η πρώτη επηρεάζει όλα τα μεγέθη (διάμετρο και ύψος πίδακα, μέγεθος αποκολλούμενων σταγόνων, χρόνο σχηματισμού πίδακα) ενώ το δεύτερο επηρεάζει ισχυρά το ύψος του κύριου πίδακα. Τέλος, εξετάζεται η κίνηση της σφαίρας στο νερό και συγκρίνεται με κίνηση ανάλογης αρχικής ταχύτητας σε νερό χωρίς ελεύθερη επιφάνεια.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή.....	7
Κεφάλαιο 2	Πειραματική Διαδικασία.....	8
	2.1 Πειραματική Διάταξη.....	8
	2.2 Διαδικασία Συλλογής Μετρήσεων.....	12
Κεφάλαιο 3	Ανάλυση και Αποτελέσματα Μετρήσεων.....	15
	3.1 Επαλήθευση ελεύθερης πτώσης.....	15
	3.1.1 Επεξεργασία Μετρήσεων.....	15
	3.1.2 Προβλήματα.....	17
	3.2 Φαινόμενο Πίδακα.....	19
	3.2.1 Οπτική Περιγραφή.....	19
	3.2.2 Πιθανή Ερμηνεία Φαινομένου.....	22
	3.2.3 Γεωμετρικά και Χρονικά Χαρακτηριστικά Πίδακα.....	23
	3.2.4 Αξιοπιστία των Μετρήσεων.....	28
	3.2.5 Γενικές Παρατηρήσεις.....	29
	3.3 Ανάλυση Κίνησης της Μπίλιας στο Νερό.....	32
	3.3.1 Θεωρητική Προσέγγιση.....	32
	3.3.2 Μετρήσεις.....	34
	3.3.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	35
Κεφάλαιο 4	Συμπεράσματα.....	36
Κεφάλαιο 5	Προτάσεις.....	37
	Βιβλιογραφία.....	38

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Στις περισσότερες περιπτώσεις πτώσης ενός αντικειμένου σε υγρό παρατηρείται μια διαταραχή στην επιφάνεια του υγρού. Η διαταραχή αυτή οφείλεται σε διάφορους λόγους και εξαρτάται από ποικίλες παραμέτρους. Το αντικείμενο που πραγματεύεται η διπλωματική εργασία είναι η μελέτη αυτής της διαταραχής σε ένα περιορισμένο φάσμα παραμέτρων. Ειδικότερα μελετάται το φαινόμενο του πίδακα νερού που δημιουργείται μετά την πτώση συμπαγούς σφαίρας από ύψος που δεν ξεπερνά το ένα μέτρο και οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης σώματος-νερού.

Η αλληλεπίδραση ταχέως κινούμενου αντικειμένου με την ελεύθερη επιφάνεια υγρού αποτελεί ένα θεμελιώδες ρευστομηχανικό πρόβλημα με ποικίλες εφαρμογές. Μία βασική παράμετρος που ενδιαφέρει να προσδιοριστεί είναι η δύναμη που το υγρό εξασκεί στο εισερχόμενο σώμα. Για παράδειγμα, κατά την προσθαλάσωση ενός υδροπλάνου επιθυμούμε να γνωρίζουμε την δύναμη που δέχονται οι πλωτήρες του [1]. Πέρα από παρόμοιας φύσης στρατιωτικές εφαρμογές (πχ. είσοδος πυραύλου στο νερό), η πρόσκρουση σώματος σε υγρό εμφανίζεται σε φυσικά φαινόμενα διαφόρων κλιμάκων, από την γεωφυσική έως την μικροσκοπική. Η πρόσκρουση αστεροειδών σε πλανήτες είναι ένα συναφές φαινόμενο μεγάλης κλίμακας, ενώ η πτώση των σταγόνων της βροχής αποτελεί ένα παράδειγμα μικρής κλίμακας [2]. Παρόμοια φαινόμενα μικρής κλίμακας απαντώνται κατά την επίστρωση επιφανειών με σταγονίδια (spray coating) και την εκτύπωση με δέσμη (ink-jet printing).

Σε πολλές από τις παραπάνω εφαρμογές, η έκταση και η μορφή της διαταραχής της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού επηρεάζουν το φαινόμενο. Για παράδειγμα, μας ενδιαφέρει αν το υγρό σχηματίζει κορώνα ή/και πίδακα ή/και διασπάται σε σταγονίδια. Η παρούσα εργασία αποτελεί μία πρώτη προσπάθεια μέτρησης τόσο των δυνάμεων κρούσης όσο και των χαρακτηριστικών της ελεύθερης επιφάνειας, κατά την πρόσκρουση σφαιρικού αντικειμένου με σχετικά χαμηλή ταχύτητα.

Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται ο εξοπλισμός της πειραματικής διάταξης. Τα βασικά στοιχεία είναι ένα δοχείο με υγρό, σφαίρες από ρουλεμάν ως αντικείμενα ρίψης και μια βιντεοκάμερα υψηλής ταχύτητας

για την καταγραφή του φαινομένου. Στη συνέχεια αναπτύσσεται η διαδικασία με την οποία συλλέγονται οι μετρήσεις και επεξεργάζονται μέσω του προγράμματος της κάμερας.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος. Αρχικά αποδεικνύεται ότι η κίνηση της σφαίρας στον αέρα συνιστά ελεύθερη πτώση και στη συνέχεια αναλύεται το φαινόμενο του πίδακα. Περιγράφεται καταρχάς οπτικά η εξέλιξη του φαινομένου και επιχειρείται η ερμηνεία του. Στη συνέχεια προσδιορίζονται και αναλύονται τα γεωμετρικά και χρονικά χαρακτηριστικά του πίδακα. Στο τελευταίο στάδιο μελετάται η κίνηση της σφαίρας στο εσωτερικό της μάζας του νερού.

Τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 4 και 5.

Κεφάλαιο 2 Πειραματική Διαδικασία

2.1 Πειραματική Διάταξη

Για την διεξαγωγή του πειράματος κατασκευάστηκε δοχείο διαστάσεων 40X40X20 cm, από πλάκες Plexiglas που κολλήθηκαν με χλωροφόρμιο το οποίο εμπεριείχε τρίμματα από Plexiglas.

Πάνω από το δοχείο τοποθετήθηκε σε στύλο κατακόρυφα κινούμενη δαγκάνα για σταθερότερες ρίψεις, μεγαλύτερο εύρος ύψους και δυνατότητα μέτρησής του.

Οι απαιτήσεις του πειράματος για συγκεκριμένο φωτισμό κατά την διαδικασία λήψης εικόνων ικανοποιήθηκαν με τη χρήση προβολέα ισχύος 500W, ο οποίος στηρίχτηκε σε τρίποδα πίσω από το δοχείο. Στην "εκτεθειμένη" στον προβολέα πλευρά του δοχείου κολλήθηκε ριζόχαρτο, το οποίο επιτρέπει τη διέλευση διάχυτου φωτός και τονίζει τις διεπιφάνειες μεταξύ διαφορετικών φάσεων. Έτσι, η κάμερα μπορεί να καταγράψει ακριβέστερα το εξελισσόμενο φαινόμενο.



Σαν αντικείμενα ρίψης χρησιμοποιήθηκαν λείες χαλύβδινες σφαίρες από ρουλεμάν, διαμέτρου 22.25mm, 15.9mm και 9.5mm, βάρους 44.7gr, 15.3 gr, και 3.5gr αντίστοιχα, καθώς και γυάλινη σφαίρα διαμέτρου 15.9mm και βάρους 5.3 gr για την ύπαρξη ποικίλων πιθανών παρατηρήσεων σχετικά με

το φαινόμενο του πίδακα. Οι μετρήσεις που συλλέχθηκαν από το υπό εξέτασιν πείραμα είχαν ως σημείο αναφοράς τη σφαίρα από ρουλεμάν διαμέτρου 15.9mm η οποία ήταν πιο εύχρηστη για το χρησιμοποιούμενο σύστημα ρίψης.

Μπίλια	υλικό	διάμετρος(mm)	μάζα (gr)
1.	χάλυβας	22.25	44.7
2.	χάλυβας	15.9	16.3
3.	χάλυβας	9.5	3.5
4.	γυαλί	15.9	5.3

Στον πάτο του δοχείου τοποθετήθηκε σφουγγάρι για να αποφευχθούν τυχόν φθορές από την κρούση με τις μπίλιες.

Το υγρό που επελέγη για να εισαχθεί στο δοχείο ήταν το νερό, για λόγους ευχρηστίας, σε ποσότητα μεταβαλλόμενη, κατάλληλη για την βέλτιστη παρουσίαση του φαινομένου. Θερμοκρασία του υγρού θεωρήθηκε η θερμοκρασία περιβάλλοντος με κάποια αμελητέα αύξηση λόγω της θερμότητας που εξέπεμπε ο προβολέας και πίεση μια ατμόσφαιρα.

Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες ιδιότητες νερού και αέρα σε θερμοκρασίες που αφορούν το πείραμα.

Θερμοφυσικές ιδιότητες κορεσμένου νερού και ξηρού αέρα.

T (°C)	ΑΕΡΑΣ		ΝΕΡΟ	
	ρ (kg/m ³)	$\nu \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	ρ (kg/m ³)	$\nu \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)
15	1.2256	14.63	999.1	1.141
20	1.2047	15.08	998.2	1.007
25	1.1845	15.54	997.1	0.897
30	1.1650	16	995.7	0.804

Η λήψη και η επεξεργασία εικόνων του πειράματος έγινε με τη REDLAKE, βιντεοκάμερα υψηλής ανάλυσης, τοποθετημένη σε απόσταση περίπου 2m μπροστά από το δοχείο. Συγκεκριμένα, η κάμερα είναι

μονόχρωμη και περιέχει ένα CCD αισθητήρα, ενώ δεν υπάρχει πίνακας ή σύστημα ελέγχου. Από μπροστά βιδώνεται ο φακός ο οποίος έχει 3 ρυθμιστές (για μεγέθυνση, φωτεινότητα ,καθαρότητα) που ελέγχονται κατάλληλα από τον χειριστή. Το υψηλής ταχύτητας ψηφιακό σύστημα απεικόνισης (MotionScope System) καταγράφει μια ακολουθία από ψηφιακές εικόνες με ρυθμό 50-1000 εικόνες ανά δευτερόλεπτο, ανάλογα με το μοντέλο που χρησιμοποιείται. Αυτές οι εικόνες μπορούν να αξιοποιηθούν κατάλληλα, ώστε να αναλυθεί η κίνηση και ο χρόνος κατά τη διάρκεια του γεγονότος.

Το σύστημα παρέχει έλεγχο του φωτοφράχτη διαφράγματος (shutter) που επιτρέπει να μειωθεί ο χρόνος έκθεσης της εικόνας για να εξαιρεθεί η θολότητα εξαιτίας της κίνησης. Παρατηρείται ότι η φωτεινότητα της εικόνας μειώνεται όσο η ρύθμιση του φωτοφράχτη μειώνει το χρόνο έκθεσης. Η κάμερα απαιτεί να λαμβάνεται αρκετό φως για να φαίνονται οι λεπτομέρειες της εικόνας και να καταγράφεται το αντικείμενο στο βέλτιστο μέγεθος, έτσι ώστε να φανούν καθαρά τα σημαντικά μέρη της κίνησης.

Ο παρερχόμενος χρόνος καταγραφής εξαρτάται από τον αριθμό των εικόνων ανά δευτερόλεπτο που λαμβάνονται και τον αριθμό των εικόνων που η μνήμη μπορεί να αποθηκεύσει. Ο χρόνος αυτός μπορεί να επιλεγεί από την εντολή «Record rate».

Ένα γεγονός καταγράφεται μέχρι ο χειριστής να επιλέξει την εντολή «Stop» ή μια ώθηση, που παράγεται από μια εξωτερική πηγή, να σταματήσει τη διαδικασία εγγραφής. Υπάρχει μια καθυστέρηση του συστήματος, ώστε να φανούν και κάποιες εικόνες αφού λάβει την εντολή να σταματήσει.

Γενικά το MotionScope παρέχει αρκετά χαρακτηριστικά για να εξεταστεί ένα καταγεγραμμένο γεγονός:

- Υπάρχει η δυνατότητα να αναπαράγει το βίντεο σε μεγάλες ταχύτητες μπροστά ή πίσω (Playback Rate), ή σε κάθε χρονική στιγμή (>|) , (|<).
- Η δυνατότητα να επιλεγεί, χρησιμοποιώντας τον ολισθαίνοντα ρυθμιστή, όποια εικόνα από την ακολουθία του βίντεο είναι επιθυμητή.

- Το παράθυρο αναπαραγωγής βίντεο παρουσιάζει τον τρέχοντα αριθμό εικόνων που επιδεικνύεται και τον χρόνο από την εικόνα 0. Το κουμπί έναρξης επιτρέπει να επαναρυθμιστεί η εικόνα 0.
- Το σταυρόνημα (reticle) είναι μια αναφορά θέσης που μπορεί να επιβληθεί στην εικόνα που αποθηκεύεται στη μνήμη. Είναι μια οριζόντια και κάθετη γραμμή που τέμνονται σε ένα στόχο παρέχοντας χ-ψ συντεταγμένες.
- Με το reticle μπορούν να καθοριστούν οι αποστάσεις μεταξύ 2 σημείων στην εικόνα . Το σύστημα πρέπει να βαθμονομηθεί με τη μέτρηση της φυσικής απόστασης μεταξύ 2 σημείων ενδιαφέροντος εισάγοντας την απόσταση μεταξύ των καθορισμένων σημείων στο σύστημα. Κατόπιν υπολογίζει την απόσταση μεταξύ 2 οποιονδήποτε σημείων στο μόνιτορ. Εάν τα σημεία είναι σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, το σύστημα υπολογίζει επίσης την ταχύτητα του σημείου ενδιαφέροντος.

**Χρόνοι εγγραφής και μέγιστος χώρος αποθήκευσης για το εν χρήσει μοντέλο,
MotionScope® 1000 S Monochrome**

Frame Rate (frames/sec)	Resolution (Pixels)	Standard Memory	
		# of frames	Record Time(sec)
50	480 × 420	512	10.2
50E	240 × 210	2.048	41.0
660	480 × 420	512	8.5
60E	240 × 210	2.048	34.2
125	480 × 420	512	4.1
125E	240 × 210	2.048	16.4
250	480 × 420	512	2.0
250E	240 × 210	2.048	8.2
500	320 × 280	1.024	2.0
500E	240 × 210	2.048	4.1
1000S	320 × 156	2.048	2.0

Χρόνοι έκθεσης σε σχέση με ταχύτητα φωτοφράχτη και χρόνο εγγραφής (σε ms)

Shutter Speed	50	60	125	250	500	1000	2000	8000
1X	20	17	8	4	2	0.91	0.41	0.12
2X	10	8.3	4	2	1	0.5	0.25	0.06
3X	6.7	5.6	2.67	1.33	0.665	0.335	0.165	0.04
4X	5	4.2	2	1	0.5	0.25	0.125	0.03
5X	4	3.3	1.65	0.8	0.4	0.2	0.1	0.025
10X	2	1.7	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.01
15X	1.3	1.1	0.54	0.27	0.13	0.06	0.03	0.005
20X	1	0.83	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025	0.005

2.2 Διαδικασία Συλλογής Μετρήσεων

Αρχικά εισάγεται στο δοχείο ποσότητα νερού περίπου μέχρι το μέσο, τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η βεβαιότητα ανεπηρέαστης εξέλιξης του φαινομένου και η πλήρης επίβλεψή του πάνω από την επιφάνεια του υγρού.

Στη συνέχεια η δαγκάνα τοποθετείται στο εκάστοτε επιθυμητό ύψος πάνω από το δοχείο, στηριζόμενη από τον κάθετο στύλο. Το μέγιστο ύψος που χρησιμοποιήθηκε ήταν 800 mm (η μέτρηση έγινε με μέτρο) αλλά για πρακτικούς λόγους τελικά δεν επελέγη να μελετηθεί. Τα προβλήματα που προέκυψαν από τις ρίψεις μεγάλου ύψους θα αναφερθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

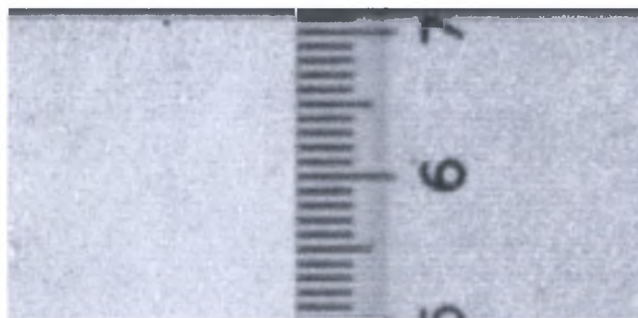
Εφόσον στηθεί η κάμερα μπροστά από το δοχείο, επιλέγονται οι επιθυμητές παράμετροι μέσω του προγράμματος. Αρχικά ανοίγεται η κάμερα (open camera) ενώ ενεργοποιείται αυτόματα η ζωντανή λήψη και εμφανίζεται το κύριο μενού. Για την ξεκάθαρη αποτύπωση του φαινομένου απαιτείται ο ρυθμός εγγραφής record rate-1000s, και shutter-1/1000 ή 1/5000. Σύμφωνα με την επιλογή των παραπάνω παραμέτρων γίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις στην κάμερα που αφορούν την καθαρότητα, την εστίαση και την φωτεινότητα.

Με βάση την μέγιστη ταχύτητα της μπίλιας και το shutter υπολογίζεται μια ενδεικτική τιμή για το μήκος που διανύει η μπίλια όσο ο φωτοφράχτης παραμένει ανοιχτός :

$$ds = u \frac{1}{1000} = 3,43 \text{ mm} \quad \text{και} \quad ds = u \frac{1}{5000} = 0,686 \text{ mm}$$

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η εγγραφή πατώντας την εντολή Rec και ακολουθεί η ρίψη της μπίλιας. Το σύστημα συνεχίζει την εγγραφή μέχρι να πάρει την εντολή της παύσης ([]). Λόγω των συγκεκριμένων ρυθμίσεων όμως που προεπελέγησαν, δίνεται η δυνατότητα λήψης μόνο των δύο τελευταίων δευτερολέπτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται η άμεση αντίδραση του χειριστή σχετικά με την παύση της εγγραφής, μετά την πτώση του αντικειμένου στο υγρό.

Εφόσον αποθηκευτεί το βίντεο, σαν αρχείο AVI, στην μνήμη του Η/Υ ξεκινάει η διαδικασία βαθμονόμησης. Η βαθμονόμηση έγινε με βάση την διάμετρο της μπίλιας και η ακρίβεια επιβεβαιώθηκε με την εκάστοτε λήψη φωτογραφίας του χάρακα που έδινε απευθείας μέτρηση της πραγματικής απόστασης.

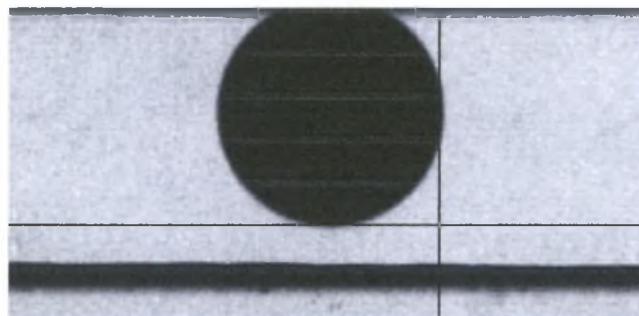


Χρησιμοποιώντας την εντολή Reticle-Enable εμφανίζονται μια κάθετη και οριζόντια γραμμή που μπορούν να μετακινηθούν και να μαρκάρουν (set point) τα δύο επιθυμητά σημεία, σύμφωνα με τα οποία θα καθοριστεί το μέγεθος και η μονάδα μέτρησης (calibrate).

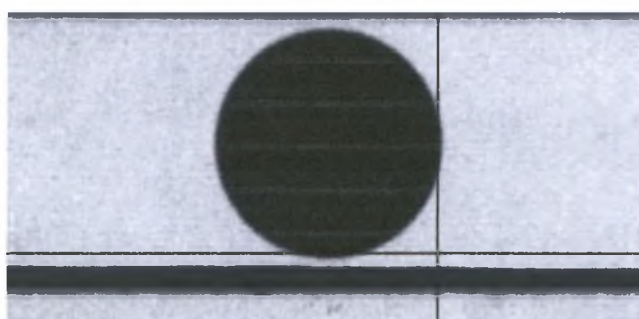
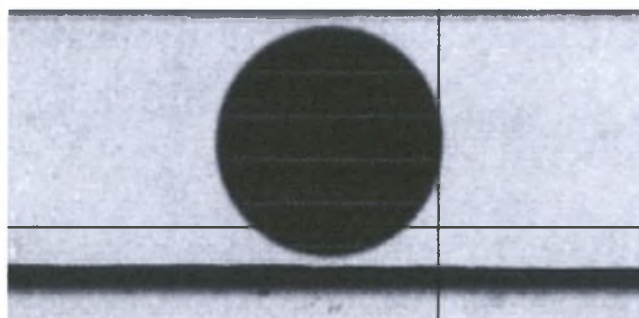
Για να προκύψουν οι μετρήσεις του ύψους και της ταχύτητας της μπίλιας μετράται η μετακίνησή της σε κάθε χρονική στιγμή. Αναλυτικότερα, αφού αποφασιστεί η αρχική εικόνα, μαρκάρεται το κάτω όριο της μπίλιας και το ίδιο σημείο την επόμενη χρονική στιγμή. Συγχρόνως, εμφανίζονται στην οθόνη η απόσταση των σημείων αυτών και η ταχύτητά τους. Μετά από κάθε

επανάληψη αυτής της διεργασίας, τα δεδομένα αποθηκεύονται και μπορούν να ληφθούν συγκεντρωμένα από την επιλογή Reticle-Data.

Αρχική εικόνα



Επόμενη χρονική στιγμή



Κεφάλαιο 3 Ανάλυση και Αποτελέσματα Μετρήσεων

Οι αρχικές δοκιμαστικές ρίψεις καθοδήγησαν την επιλογή παραμέτρων του πειράματος. Το πείραμα χωρίστηκε σε τρεις φάσεις και κατ'επέκταση πάρθηκαν τρεις διαφορετικές λήψεις εικόνων, για καλύτερη εστίαση που παρείχε μεγαλύτερη ακρίβεια και πιο ευδιάκριτα αποτελέσματα. Η πρώτη αφορούσε την επαλήθευση ελεύθερης πτώσης της μπίλιας μέσα στον αέρα, η δεύτερη την απεικόνιση του φαινομένου του πίδακα και η τρίτη την πορεία της μπίλιας μέσα στο νερό.

3.1 Επαλήθευση Ελεύθερης Πτώσης

3.1.1 Επεξεργασία Μετρήσεων

Αρχικός στόχος ήταν η επαλήθευση της ελεύθερης πτώσης, στο αντικείμενο μελέτης, με την βοήθεια των πειραματικών μετρήσεων. Εφόσον η υπόθεση ελεύθερης πτώσης επαληθεύεται ικανοποιητικά, η ταχύτητα πρόσκρουσης στην επιφάνεια του υγρού μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από το ύψος απελευθέρωσης του αντικειμένου.

Η παράμετρος του ύψους επελέγη σύμφωνα με πρακτικά κριτήρια. Η ρίψη από τα 0,2m επέτρεπε την πτώση της μπίλιας χωρίς περιστροφές και την άμεση αντίδραση για την καταγραφή του γεγονότος, εφόσον υπήρχαν μόνο δύο δευτερόλεπτα διαθέσιμα από την στιγμή που η μπίλια διέφευγε της δαγκάνας.

Κατά την ελεύθερη πτώση ισχύουν:

$$\left. \begin{array}{l} F = m \frac{du}{dt} \\ F = mg \end{array} \right\} \frac{du}{dt} = g \Rightarrow u \frac{du}{dt} = \frac{dh}{dt} g \Rightarrow \int u du = \int g dh \Rightarrow \frac{1}{2} u^2 = gh \Rightarrow u = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

$$h = u_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (2)$$

$$u = u_0 + g t$$

Δεδομένα : $g=9.807 \text{ m/s}^2$

$h=0.2 \text{ m}$

άρα μέσω της (1) $\rightarrow u=1,98 \text{ m/s}$

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των μετρήσεων πρέπει να συμπίπτουν με τα αποτελέσματα της θεωρίας.

Ενδεικτικός πίνακας μετρήσεων

σημείο	απόσταση (mm)	ταχύτητα (mm/s)
1	1,867	1.866,65
2	1,867	1.866,65
3	1,867	1.866,65
4	1,936	1.935,65
5	1,867	1.866,65
6	1,936	1.935,65
7	1,936	1.935,65
8	1,936	1.935,65

*Κάθε σημείο λαμβάνεται ανά sec.

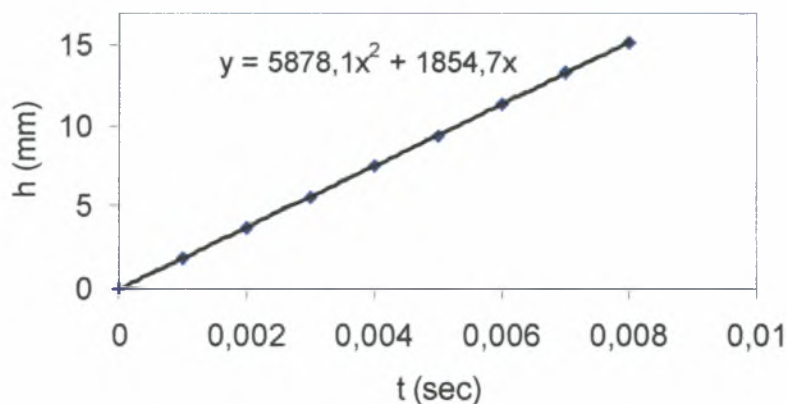
Η απόσταση αναφέρεται σε δύο διαδοχικά σημεία.

Όπως παρατηρείται, τα δεδομένα προσεγγίζουν ικανοποιητικά τη θεωρητική λύση. Με τα αντίστοιχα δεδομένα του ύψους σχηματίστηκε το

παρακάτω διάγραμμα όπου $h = \sum_{i=0}^8 h_i$

σημείο	t	h
0	0	0
1	0,001	1,867
2	0,002	3,734
3	0,003	5,601
4	0,004	7,537
5	0,005	9,404
6	0,006	11,34
7	0,007	13,276
8	0,008	15,212

Διάγραμμα h-t



Όπως φαίνεται, από το γράφημα, προκύπτει η εξίσωση:

$$y = 1.854,7x + 11.756,2 \frac{1}{2} x^2$$

που έχει στην ουσία τη μορφή της εξίσωσης (2) με $u_0 = 1.854,7$ mm/s και $g = 11.756,2$ mm/s². Διαπιστώνεται ότι η αρχική ταχύτητα είναι λογική σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις ενώ η βαρυτική επιτάχυνση έχει μεγαλύτερη απόκλιση από την θεωρητική, αλλά την πλησιάζει ικανοποιητικά γι' αυτό γίνεται αποδεκτή.

Ένας άλλος τρόπος για να επιβεβαιωθεί η συνθήκη της ελεύθερης πτώσης είναι να δείχθεί ότι η αντίσταση του αέρα είναι αμελητέα.

Δηλ. $F = F_{\beta\alpha\rho.} - F_{\sigma\pi\iota\sigma\theta.}$. Εφόσον ζητείται να αποδειχθεί η αμελητέα αντίσταση

του αέρα πρέπει να ισχύει $F = F_{\beta\alpha\rho.} \Rightarrow m \frac{du}{dt} = mg$ άρα $F_{\sigma\pi\iota\sigma\theta.} \approx 0$.

$$F_{\sigma\pi\iota\sigma\theta.} = C_D \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) = 0.23 \cdot 10^{-3} \text{ N} \ll F_{\beta\alpha\rho.} = m \cdot g = 0.159 \text{ N}$$

Δεδομένα: $D = 0.0159$ m

$$\rho_{25^\circ\text{C}} = 1.18 \text{ kg/m}^3$$

$$u = 1.98 \text{ m/s}$$

$$\nu = 15.54 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2\text{/s)}$$

$$\text{Re} = \frac{uD}{\nu} = 2.025,869$$

$$C_D = f(\text{Re}) = 0.5$$

$$m = 0.0163 \text{ Kg}$$

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2$$

Τελικά η υπόθεση που τέθηκε είναι σωστή, αποδεικνύεται η ύπαρξη ελεύθερης πτώσης, οπότε η κίνηση είναι ομαλά επιταχυνόμενη.

3.1.2 Προβλήματα

Από τις δοκιμαστικές λήψεις προέκυψαν κάποιες δυσκολίες που καθυστέρησαν ή απλά επηρέασαν το πείραμα. Το κύριο πρόβλημα ήταν η επίτευξη της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Σχεδόν σε κάθε περίπτωση η

προσπάθεια αύξησης της ακρίβειας οδηγούσε στην βελτίωση κάποιας μεταβλητής προκαλώντας αντιστρόφως ανάλογα αποτελέσματα στην τιμή μιας άλλης μεταβλητής.

Αρχικά το πείραμα συμπεριελάμβανε μόνο μια λήψη του φαινομένου, όπου διαπιστώθηκε πως η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μπορούσε να αυξηθεί με την μεγαλύτερη μεγέθυνση. Με αυτόν τον τρόπο όμως χάνονταν απαραίτητα στοιχεία, όπως το καθολικό φαινόμενο του πίδακα και σημαντικός αριθμός μετρήσεων μέσα στο νερό, πράγμα που ανάγκασε να βρεθεί η προαναφερθείσα λύση της καταγραφής κάθε πειραματικής συνθήκης πτώσης σε τρεις διαφορετικές λήψεις.

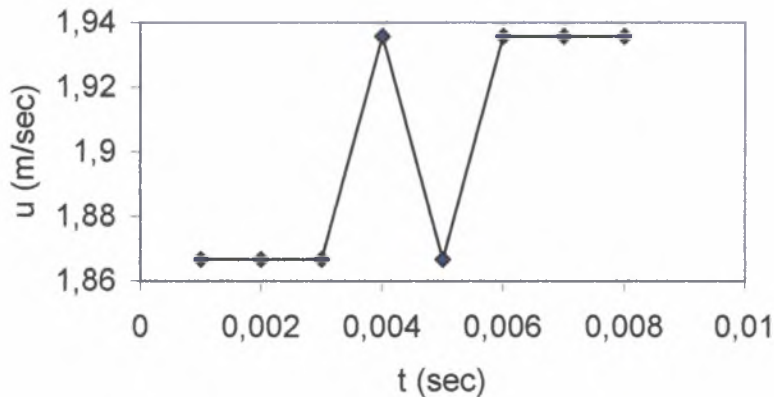
Η χρήση της δαγκάνας βοήθησε κυρίως στις επαναλαμβανόμενες ρίψεις από σταθερό ύψος. Για να πέσει η μπίλια έπρεπε να δοθεί μια μικρή ώθηση, η οποία θεωρήθηκε αμελητέα αλλά συχνά επηρέαζε το φαινόμενο.

Λόγω του ύψους άρα κατά συνέπεια και της ταχύτητας, μειωνόταν η δυνατότητα διάκρισης των ορίων της μπίλιας καθώς και ο αριθμός μετρήσεων, γεγονός που επηρέαζε την ακρίβεια. Στην πρώτη περίπτωση η λύση ήταν η αύξηση της ταχύτητας διαφράγματος (shutter speed), που απαιτούσε την αύξηση της φωτεινότητας μέσω της κάμερας και αν δεν επαρκούσε την προσθήκη επιπλέον προβολέα. Στην δεύτερη περίπτωση επιλέχθηκε ρίψη σφαιρών από χαμηλό ύψος για πιο μικρή ταχύτητα, γεγονός που προσέφερε το μέγιστο αριθμό μετρήσεων. Επόμενη κίνηση ήταν να επιλεγεί η βέλτιστη μεγέθυνση ώστε να υπάρξει ικανός αριθμός μετρήσεων με ασφαλή αποτελέσματα.

Ένα άλλο πρόβλημα ήταν το σφάλμα ψηφιοποίησης. Οι μετρήσεις περιορίζονταν συνέχεια ανάμεσα σε 2 τιμές, με αποτέλεσμα να μην φαίνεται η σταδιακή αύξηση της ταχύτητας. Η ποικιλία των μετρήσεων αυτών εξαρτιόταν από τα pixels της κάμερας, τα οποία όμως δεν είναι μεταβαλλόμενα.

Κατά την ανάλυση των μετρήσεων τα δεδομένα της ταχύτητας εισήχθησαν στο Excel και έδωσαν την γραφική παράσταση που ακολουθεί.

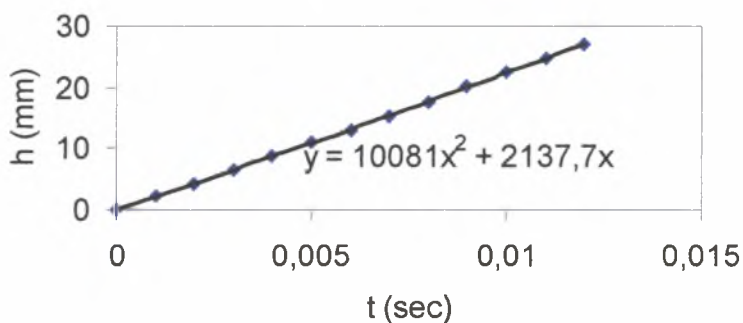
Διάγραμμα u-t



Λόγω της αδυναμίας διεξαγωγής συμπερασμάτων από το συγκεκριμένο γράφημα προκλήθηκε η ανάγκη αναζήτησης άλλης διεξόδου, η οποία ήταν η χρήση των δεδομένων της απόστασης συναρτήσει του χρόνου.

Οι αρχικές μετρήσεις έγιναν με shutter 1/1000, κάτι που φαινομενικά, τουλάχιστον στο πειραματικό μέρος (αριθμό μετρήσεων, όρια μπίλιας...) δεν επηρέαζε την συλλογή των αποτελεσμάτων, αλλά επηρέαζε τα ίδια τα αποτελέσματα όπως φαίνεται παρακάτω:

Διάγραμμα h-t



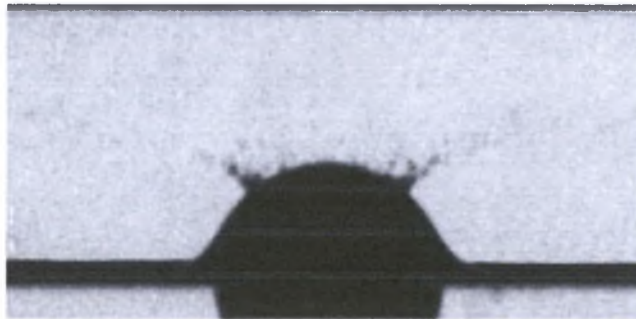
Παρατηρείται ότι $g = 20.162 \text{ m/s}^2$ περίπου το διπλάσιο από την πραγματική τιμή. Δηλαδή, το σφάλμα στον υπολογισμό της ταχύτητας και της επιτάχυνσης (πρώτη και δεύτερη παράγωγος αντίστοιχα της θέσης) είναι μεγαλύτερο από το σφάλμα στην καταγραφή της θέσης.

Αύξηση της ταχύτητας διαφράγματος στα 1/5000, έδωσε ικανοποιητική ακρίβεια καταγραφής της θέσης ώστε η γραφική παράσταση θέσης-χρόνου να δίνει επιτάχυνση κοντά στην σωστή τιμή.

3.2 Φαινόμενο του Πίδακα

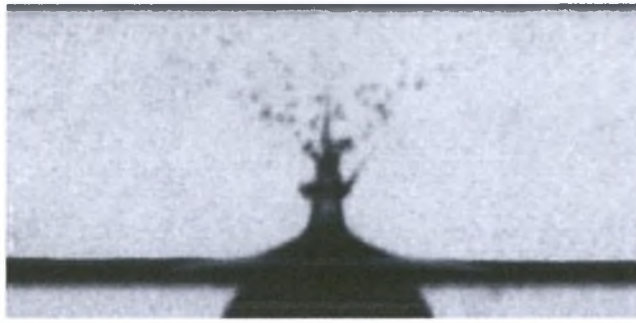
3.2.1 Οπτική Περιγραφή

Η είσοδος της σφαίρας στο νερό συνοδεύεται από τα εξής φαινόμενα: Κατά τα πρώτα στάδια εισόδου, το τμήμα της σφαίρας που δεν έχει ακόμα βυθιστεί καλύπτεται από λεπτό στρώμα νερού σχηματίζοντας μια κορώνα. Το χείλος της κορώνας διασπάται σε μικρά σταγονίδια.

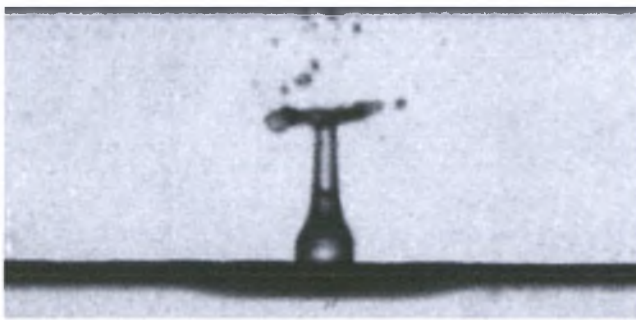


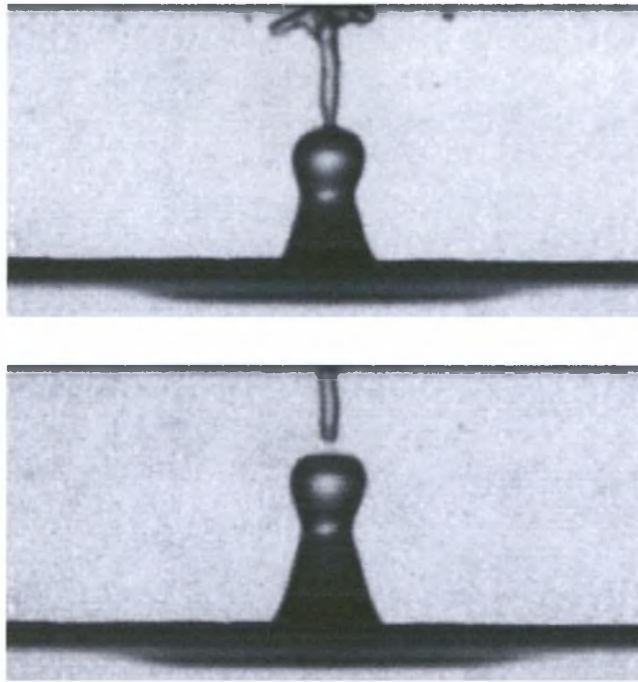
Σταδιακά, όσο η σφαίρα βυθίζεται, η κορώνα κλείνει δημιουργώντας έναν μικρό πίδακα.





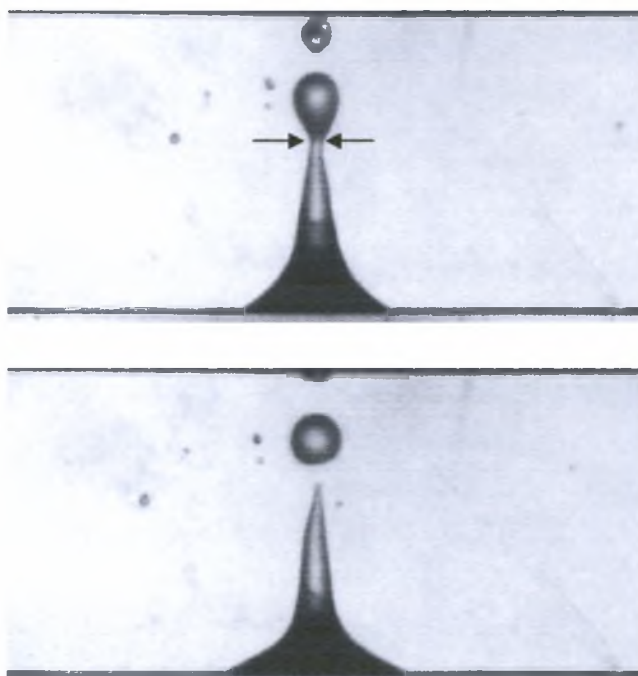
Αφού η σφαίρα έχει καλυφθεί ολόκληρη και ο μικρός πίδακας συνεχίζει να ανεβαίνει, αναπηδά μία μεγαλύτερη ποσότητα νερού, που αποτελεί τον κύριο πίδακα. Πολύ σύντομα η αρχική ποσότητα νερού που σχηματίστηκε είτε αφομοιώνεται στον κύριο πίδακα (για μικρές ταχύτητες και διαμέτρους μπίλιας), είτε διαχωρίζεται συνεχίζοντας ανοδική πορεία και διασπάται σε σταγονίδια.





Στη συνέχεια ενώ ο πίδακας εξελίσσεται, προς την κορυφή του δημιουργείται ένας λαιμός και κάποια στιγμή λαμβάνει χώρο ο σχηματισμός και αποκόλληση μιας σταγόνας. Η σταγόνα διαφεύγει και συνεχίζει την ανοδική της πορεία για κάποια ms.

Ο υπόλοιπος πίδακας, ήδη κατά το σχηματισμό του λαιμού, ακολουθεί καθοδική πορεία μέχρι που τελικά απλώνει στο νερό και ακολουθεί η πτώση της σταγόνας.



3.2.2 Πιθανή Ερμηνεία Φαινόμενου

Σε γενικές γραμμές το φαινόμενο του πίδακα μπορεί να διακριθεί σε τρεις κύριες φάσεις.

Η πρώτη αναφέρεται στην αντίδραση του νερού κατά την εισαγωγή της μπίλιας σ' αυτό. Μόλις η μπίλια μπει, το νερό ανεβαίνει στην επιφάνειά της να τη "γλύφει" και εκτινάσσεται σε μικροπίδακες οι οποίοι επιδρούν με τις δίνες von Karman του αέρα (αφού $Re_{min}=1210 > 40$) και στην κορυφή τους διασπώνται σε σταγονίδια, ενώ στην συνέχεια τα υπόλοιπα μέρη τους συγκρούονται και σχηματίζουν ένα μικρό πίδακα.

Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει τη δημιουργία του κύριου πίδακα. Με την ολοκλήρωση της εισόδου της μπίλιας δημιουργείται παροδικά πάνω από την μπίλια ένα κενό αέρος, το οποίο δεν γίνεται αντιληπτό από την κάμερα. Η διαφορά υδροστατικής πίεσης ωθεί το νερό να κλείσει το κενό και να υπερακοντιστεί δημιουργώντας ένα μεγάλο πίδακα.

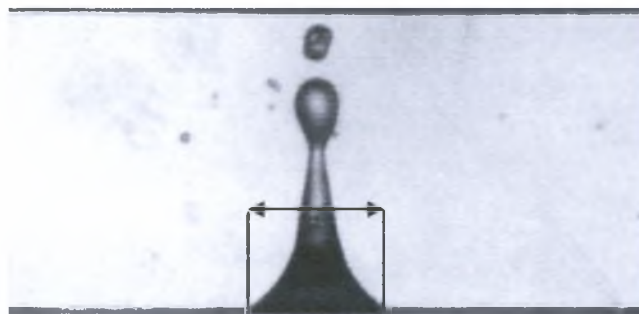
Τέλος, η τρίτη φάση έχει ως αντικείμενο το διαχωρισμό της σταγόνας. Λόγω καμπυλότητας του πίδακα παράγεται μια αλλαγή στην πίεση που απαιτείται για να ισορροπήσει τη δράση της επιφανειακής τάσης. Η πίεση αυτή έχει ως συνέπεια την μείωση της διατομής της στένωσης με αποτέλεσμα το διαχωρισμό της σταγόνας. Η διαδικασία αυτή διάσπασης μίας δέσμης νερού σε σταγόνες υπό την αποσταθεροποιητική επίδραση της επιφανειακής τάσης είναι ένα κλασσικό φαινόμενο υδροδυναμικής αστάθειας [3].

3.2.3 Γεωμετρικά και Χρονικά Χαρακτηριστικά Πίδακα

Οι παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η εξέλιξη του φαινόμενου και επιλέχθηκαν να μελετηθούν είναι η διάμετρος της μπίλιας και το ύψος από το οποίο αυτή αφήνεται.

Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά του πίδακα συσχετισμένα με τις παραμέτρους όταν αυτές μεταβάλλονται.

I. Το σχήμα του πίδακα προσομοιάζει με κώνο. Με βάση αυτό το γεγονός συλλέχθηκαν κάποιες μετρήσεις για την τελική **διάμετρο της βάσης** του πίδακα λίγο πριν αρχίσει να απλώνεται στο νερό, δηλ. μέχρι τη στιγμή που έχει ανυψωθεί η μέγιστη ποσότητα νερού.



Διάμετροι βάσης πίδακα

ύψος Διάμετρος	200 mm	400 mm
9,5 mm	9,093 mm	9,5 mm
15,9 mm	14,233 mm	13,335 mm
22,25 mm	21,190 mm	20,661 mm

Όσο αυξάνεται η διάμετρος της μπίλιας, αυξάνεται αισθητά η διάμετρος του πίδακα, σε αντίθεση με την αύξηση του ύψους ρίψης που δεν μεταβάλλει ιδιαίτερα τη διάμετρό του. Παρατηρήθηκε λοιπόν, ότι σε κάθε περίπτωση, ανεξάρτητα από το ύψος ρίψης, η τιμή της διαμέτρου του πίδακα κινείται πολύ κοντά στην τιμή της διαμέτρου της μπίλιας, κάτι που φαίνεται λογικό σύμφωνα με το μηχανισμό σχηματισμού του πίδακα. Επίσης εξακριβώνεται πως η διάμετρος της μπίλιας μπορεί να θεωρηθεί ως το χαρακτηριστικό μήκος της ανάλυσης.

II. Στη συνέχεια εξετάστηκε το μέγιστο **ύψος του πίδακα**, το οποίο ορίζεται ως το ύψος στην τελευταία εικόνα πριν την αποκόλληση της σταγόνας. Τα αποτελέσματα οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι το μέγιστο ύψος

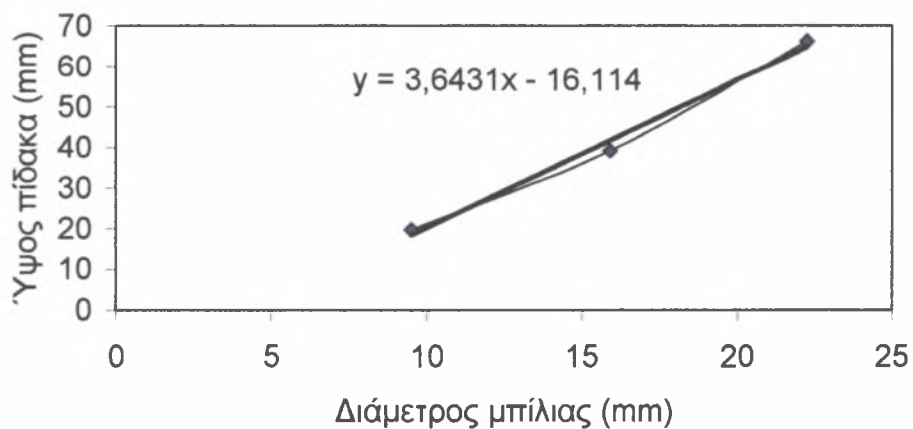
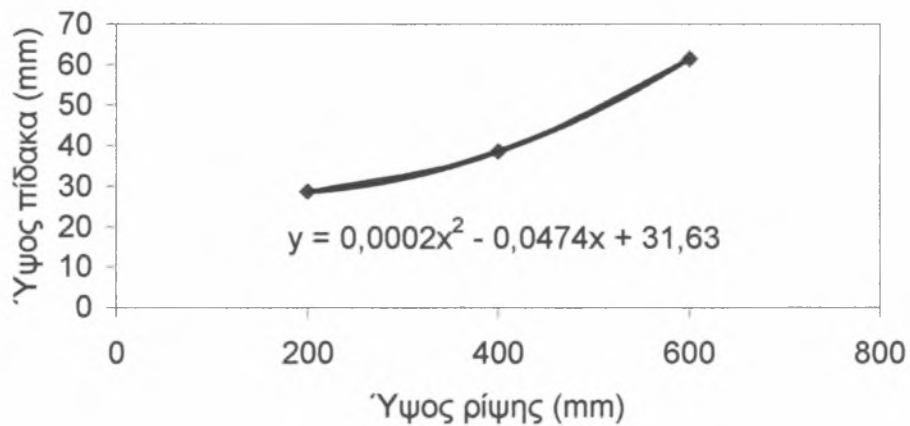
πίδακα αυξάνεται με τη διάμετρο της μπίλιας και το ύψος ρίψης. Ειδικότερα, λήφθηκαν τα εξής αποτελέσματα:

Μέγιστα ύψη πίδακα

διάμετρος \ ύψος	15,9 mm
200 mm	28.620 mm
400 mm	38.570 mm
600 mm	64.130 mm

ύψος \ διάμετρος	400 mm
9,5 mm	19.760 mm
15,9 mm	39,273 mm
22,25 mm	66.220 mm

Με βάση τα παραπάνω, κατασκευάστηκαν οι εξής γραφικές παραστάσεις:



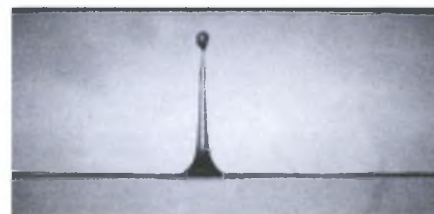
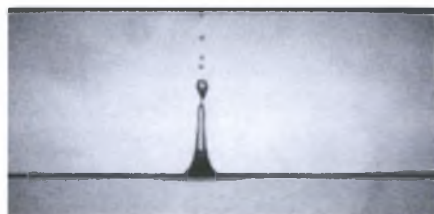
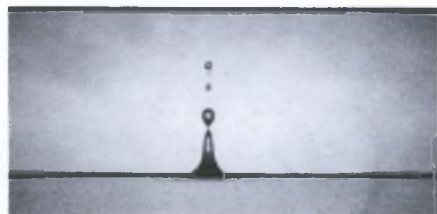
Σύμφωνα με το πρώτο διάγραμμα, το ύψος του πίδακα είναι ανάλογο του τετραγώνου του ύψους ρίψης. Σύμφωνα με το δεύτερο υπάρχει γραμμική

εξάρτηση από τη διάμετρο της μπίλιας. Μια εποπτική αναπαράσταση του μέγιστου κύριου πίδακα και των σταγόνων που τείνουν να αποκολληθούν προσφέρεται από τις παρακάτω εικόνες. Στην πρώτη περίπτωση φαίνεται για σταθερή διάμετρο 15,9 mm και μεταβαλλόμενο ύψος ρίψης και στη δεύτερη για σταθερό ύψος ρίψης 400 mm και μεταβαλλόμενες διαμέτρους :

200 mm

400 mm

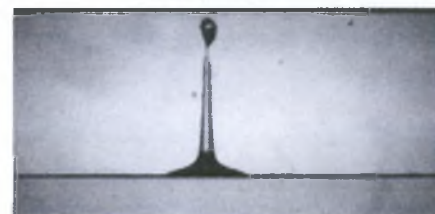
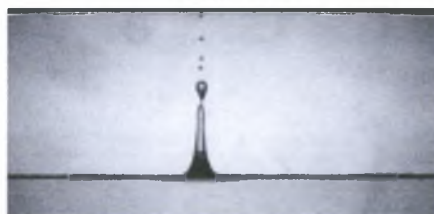
600 mm



9,5 mm

15.9 mm

22.25 mm



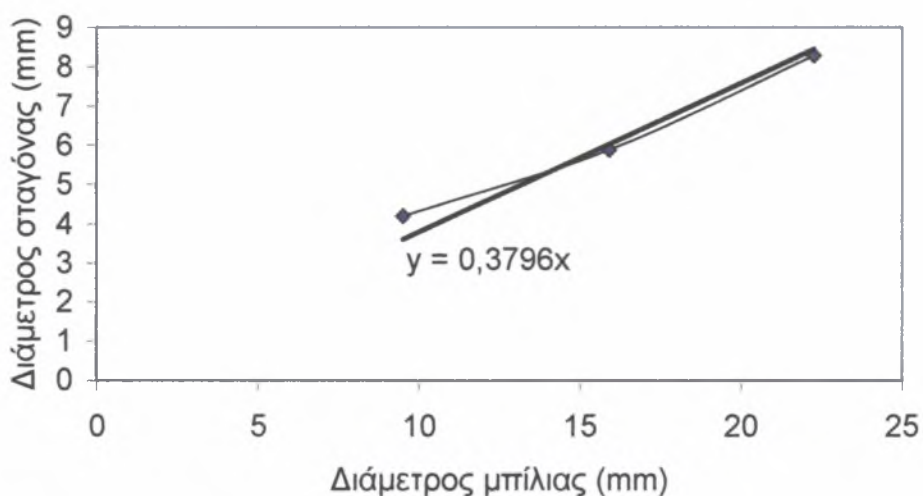
III. Σε κάθε περίπτωση πίδακα αποκολλάται τουλάχιστον μια **σταγόνα**. Ο αριθμός των σταγόνων που αποκολλώνται αυξάνεται με το ύψος ρίψης, ενώ παραμένει σταθερός με την αλλαγή της διαμέτρου της σφαίρας. Για παράδειγμα με τη μπίλια διαμέτρου 15,9 mm διαχωρίζεται 1 σταγόνα στα 200 mm, 3 στα 400 mm και 4 στα 600mm. Οι διαμέτροι των αρχικών σταγόνων που μετρήθηκαν ήταν:

διάμετρος ύψος	15,9 mm
200 mm	5,7 mm
400 mm	5,9 mm
600 mm	5,68 mm

ύψος διάμετρος	400 mm
9,5 mm	4,2 mm
15,9 mm	5,9 mm
22,25 mm	8,29 mm

Παρατηρείται ότι, καθώς το ύψος ρίψης αυξάνει η διάμετρος της σταγόνας παραμένει σχετικά αμετάβλητη. Σύμφωνα με το παρακάτω

διάγραμμα, το μέγεθος της σταγόνας μεταβάλλεται γραμμικά με τη διάμετρο της μπίλιας, και συνεπώς με τη διάμετρο της βάσης του πίδακα. Μία πρακτική εκτίμηση είναι ότι η σταγόνα έχει διάμετρο περίπου ίση με το 40% αυτής της σφαίρας. Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι η αποκόλληση των σταγόνων είναι τριχοειδές φαινόμενο και συνεπώς ελέγχεται μόνον από τη διάμετρο του πίδακα.



IV. Οι μετρήσεις του **χρόνου σχηματισμού του πίδακα** από τη στιγμή που θα εμφανιστεί μέχρι το μέγιστο ύψος του είναι :

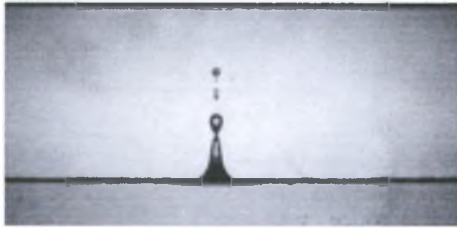
Χρόνοι σχηματισμού πίδακα

διάμετρος	15,9 mm
ύψος	
200 mm	47 ms
400 mm	45 ms
600 mm	54 ms

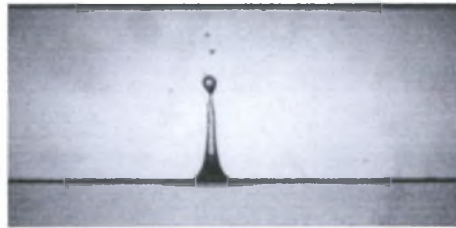
ύψος	400 mm
διάμετρος	
9,5 mm	18 ms
15,9 mm	38 ms
22,25 mm	87 ms

Από τον πρώτο πίνακα παρατηρούμε πως όταν μεταβάλλεται το ύψος ρίψης ο χρόνος σχηματισμού του μέγιστου πίδακα παραμένει πρακτικά σταθερός. Δηλαδή, ο πίδακας αναπτύσσεται με ρυθμό ανάλογο του ύψους (και συνεπώς της αρχικής ταχύτητας διεξόδου) της σφαίρας, και στον ίδιο χρόνο ο κάθε πίδακας έχει διαφορετικό ύψος, αντίστοιχο του ύψους ρίψης της μπίλιας.

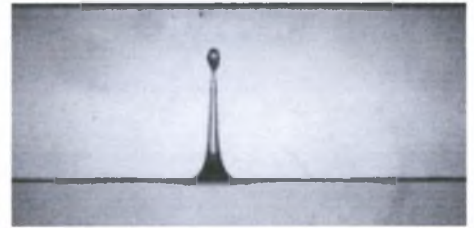
200 mm (40ms)



400 mm (40ms)

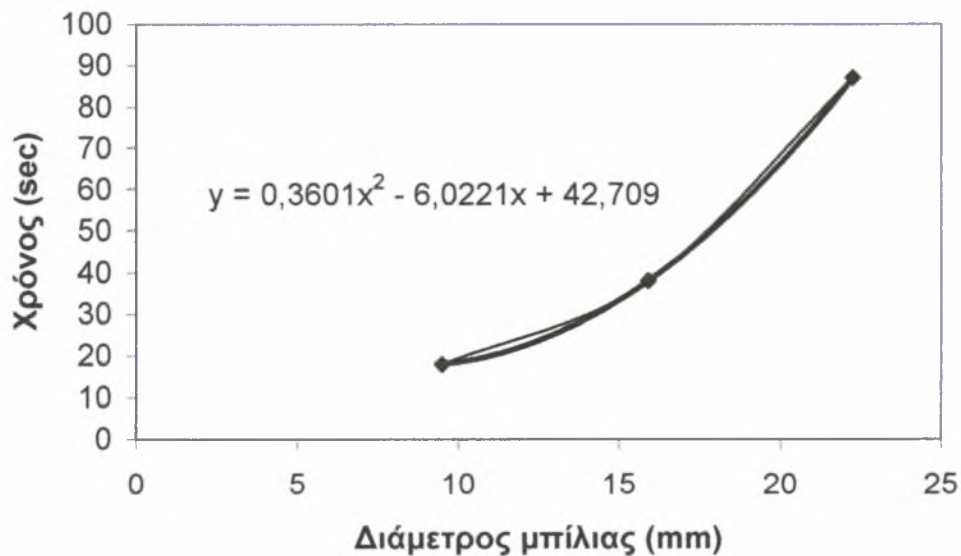


600 mm (40ms)



Το τελικό χρονικό αποτέλεσμα όμως είναι εξάρτηση και του χρόνου σχηματισμού του λαιμού και διαχωρισμού της σταγόνας που διαφέρει σε κάθε περίπτωση, γι'αυτό το λόγο προκύπτουν τα παραπάνω αποτελέσματα σχετικά με το ύψος ρίψης της μπίλιας.

Στο γράφημα που ακολουθεί φαίνεται ο χρόνος σχηματισμού του πίδακα, από σταθερό ύψος ρίψης 400mm συναρτήσει της διαμέτρου της μπίλιας. Επομένως ο χρόνος σχηματισμού του πίδακα εξαρτάται από το τετράγωνο της διαμέτρου της μπίλιας.



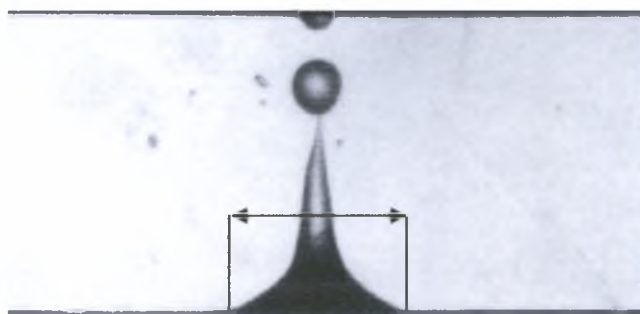
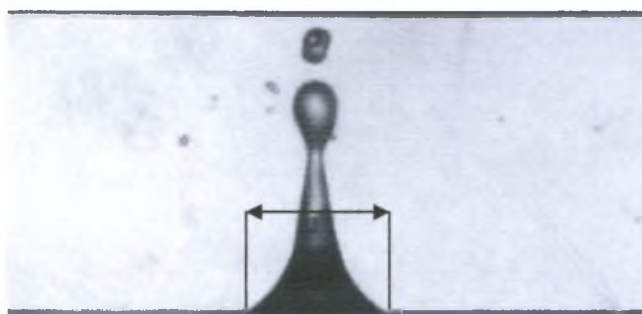
3.2.4 Αξιοπιστία των μετρήσεων

Ένα σημαντικό πρόβλημα ήταν η ρίψη της μπίλιας από μεγάλα ύψη γιατί δημιουργούσε περιστροφές και κατά συνέπεια άλλη συμπεριφορά στην εξέλιξη του πίδακα και της επιφάνειας του νερού. Δεν είναι σαφές αν η

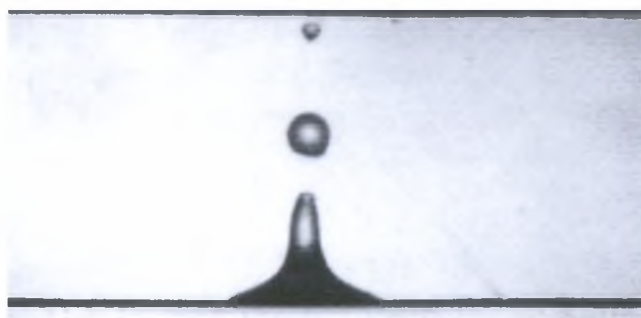
περιστροφή της σφαίρας οφείλεται σε ατέλεια του συστήματος ρίψης ή είναι εγγενής αστάθεια της κίνησης που προκαλείται λόγω των δινών vonKarman.

Οι λήψεις για διαφορετικά ύψη ή διαφορετική διάμετρο γίνονταν με τη ίδια μεγέθυνση ώστε να διατηρείται η ίδια ακρίβεια, όπως για παράδειγμα οι εικόνες για το ύψος του πίδακα. Συνεπώς οι λήψεις γίνονταν με κριτήριο την αποτύπωση του πιο ψηλού πίδακα με αποτέλεσμα όμως τη δυσκολία μέτρησης των υπόλοιπων μεγεθών καθώς τα όριά τους δεν ήταν τόσο ευδιάκριτα αφού τα φαινόμενα είχαν μικρότερα χαρακτηριστικά, άρα χαμηλότερη ακρίβεια.

Κατά τη μέτρηση της διαμέτρου της βάσης του πίδακα σημειώθηκαν ακανόνιστες αυξομειώσεις που οφείλονται στο σφάλμα μέτρησης. Ήταν αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί με το μάτι το ακριβές σημείο της τελικής διαμέτρου καθώς η διάμετρος συνέχιζε να αυξάνει με το πέρασμα του χρόνου.



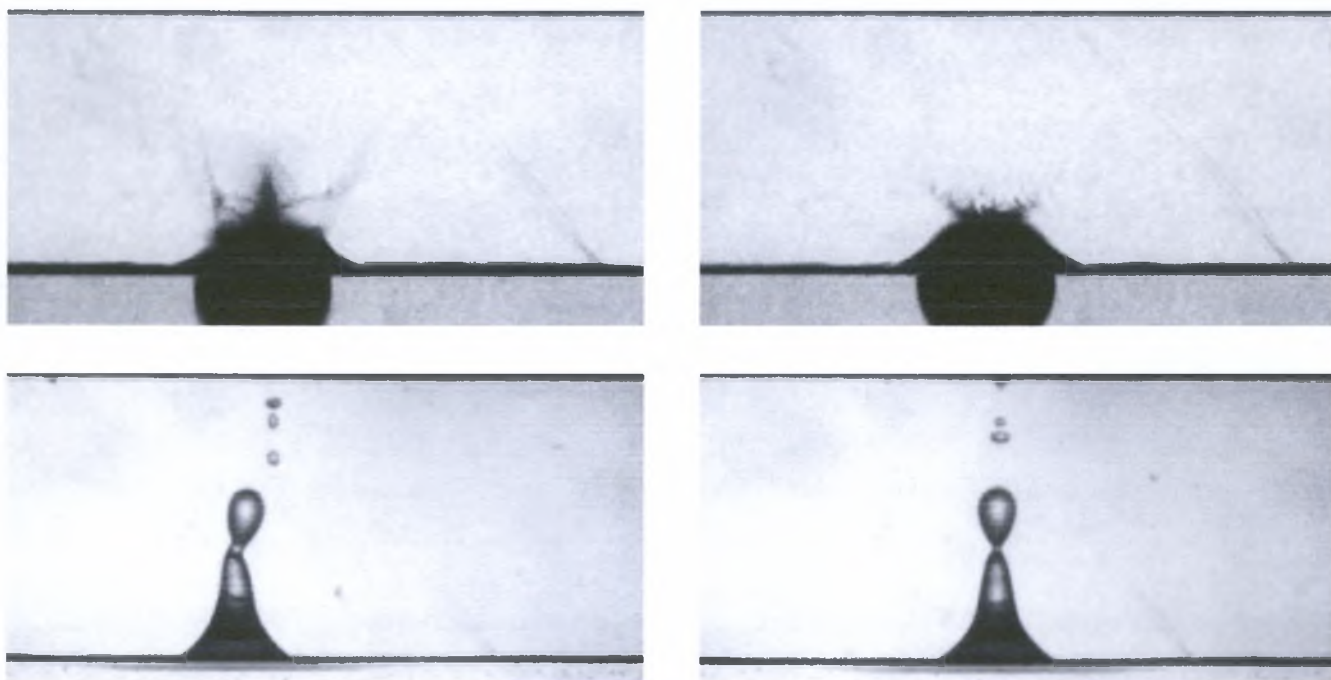
Τέλος, σχετικά με τις σταγόνες οι μετρήσεις των διαμέτρων τους είναι προσεγγιστικές, αφού σπάνια η σταγόνα σχημάτιζε σφαίρα.



3.2.5 Γενικές Παρατηρήσεις

I. Μια επιπλέον παράμετρος, που εξετάστηκε όμως μόνον ενδεικτικά, ήταν η πυκνότητα της σφαίρας. Η εναλλακτική μπίλια που χρησιμοποιήθηκε ήταν γυάλινη ίδιας διαμέτρου με την κύρια μπίλια του πειράματος. Παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη διάμετρος της βάσης έχει την ίδια συμπεριφορά, δηλ. επηρεάζεται μόνο από τη διάμετρο της μπίλιας. Αντίθετα, το ύψος του πίδακα είναι μικρότερο στην ελαφριά μπίλια όταν πέφτει από μικρό ύψος και μεγαλύτερο όταν πέφτει από μεγάλο ύψος. Η συμπεριφορά αυτή πιθανόν να υποκρύπτει σφάλμα μέτρησης, αλλά δεν υπήρχε χρόνος για επανάληψη των πειραμάτων και λεπτομερή ανάλυση.

II. Η περιστροφή που έπαιρνε κάποιες φορές η μπίλια μπορούσε να διαπιστωθεί από την εμφανή ασυμμετρία α)στην κορώνα και β)στο σχηματισμό του πίδακα. Στις εικόνες που ακολουθούν συγκρίνονται η κορώνα και ο πίδακας πτώσης σφαίρας με και χωρίς περιστροφή.



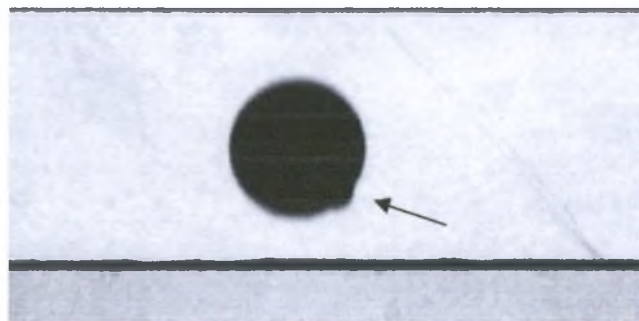
Το αποτέλεσμα λοιπόν της επίδρασης της περιστροφής είναι ότι χαλαίει η συμμετρία του σχήματος. Ο βαθμός ασυμμετρίας φαίνεται να είναι ανάλογος της ταχύτητας περιστροφής.

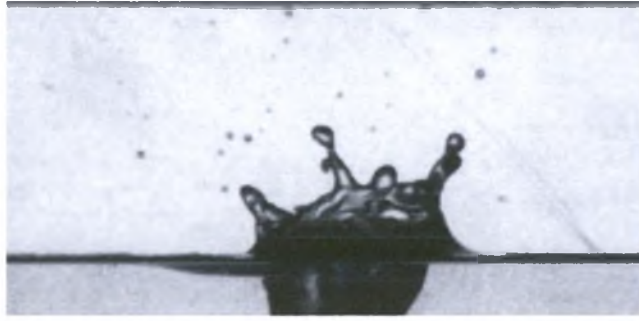
III. Η διάμετρος της βάσης του πίδακα και το ύψος του δεν μεγιστοποιούνται ταυτόχρονα. Πρώτα μεγιστοποιείται η διάμετρος και ακολουθεί το ύψος.

IV. Το μήκος του σχηματιζόμενου λαιμού είναι εξάρτηση του ύψους ρίψης και της διαμέτρου της μπίλιας. Ειδικότερα, μικρής διαμέτρου πίδακας οδηγεί σε μακρύ λαιμό. Έτσι, καθώς ο πίδακας ψηλώνει και η διάμετρος του λεπταίνει, μειώνεται η δράση της επιφανειακής τάσης με αποτέλεσμα την επιμήκυνση του λαιμού.

V. Στις περιπτώσεις που ο πίδακας είναι ψηλός, μετά την πτώση του επαναλαμβάνονται οι σχηματισμοί μικρότερων πιδάκων μέχρι να πέσει και η τελευταία σταγόνα, η οποία ανάλογα με την ταχύτητα που έχει είτε θα σταματήσει αυτή τη διαδικασία, είτε μπορεί να προκαλέσει τον τελευταίο πίδακα.

VI. Παρατηρήθηκε από σύμπτωση ότι η ρίψη μιας μπίλιας με επιφανειακή υγρασία είχε ως αποτέλεσμα να επηρεαστεί εμφανώς το φαινόμενο του πίδακα. Με βάση αυτή την παρατήρηση, τοποθετήθηκε εξ επίτηδες μια σταγόνα πάνω στην μπίλια και παρατηρήθηκε το εξής φαινόμενο:





Είναι δηλαδή εμφανές ότι δεν αναπτύσσεται ένας κύριος πίδακας, αλλά υποκαθίσταται από μία εκτεταμένη κορώνα με ασύμμετρες εκβλαστήσεις μικροδεσμών (ligaments). Οι μικρές αυτές δέσμες καταλήγουν σε αποκόλληση σταγόνων λόγω τριχοειδούς αστάθειας.

3.3 Ανάλυση Κίνησης της Σφαίρας στο Νερό

Στο τελευταίο στάδιο μελετάται η πορεία της μπίλιας στο νερό. Όπως και στην περίπτωση της ελεύθερης πτώσης αναφερόμαστε στην μπίλια διαμέτρου 15,9 mm και ύψος ρίψης 200 mm. Θα εξεταστεί θεωρητικά η συμπεριφορά της σε μεγάλο βάθος και πειραματικά κοντά στην επιφάνεια του νερού. Στόχος είναι να διαπιστωθεί αν η αλληλεπίδραση με την ελεύθερη επιφάνεια απορροφά σημαντικό ποσοστό της αρχικής ενέργειας της σφαίρας. Στην περίπτωση αυτή, η πειραματική εξέλιξη της θέσης της σφαίρας με το χρόνο θα αποκλίνει αισθητά από την θεωρητική πρόβλεψη με βάση τον συντελεστή οπισθέλκουσας για σφαίρα εξ' ολοκλήρου βυθισμένη σε υγρό χωρίς παραμορφώσιμη ελεύθερη επιφάνεια.

3.3.1 Θεωρητική Προσέγγιση

Η μπίλια, βαθιά στο νερό, ακολουθεί την εξίσωση κίνησης:

$$F = F_{\beta\alpha\rho.} - F_{\omicron\pi\sigma\theta.} \Rightarrow m \frac{du}{dt} = m \cdot g - C_D \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right)$$

Αρχικά υπολογίζουμε την αρχική αντίσταση του νερού και το βάρος της σφαίρας, σύμφωνα με τα παρακάτω δεδομένα:

$$F_{\omicron\pi\sigma\theta.} = C_D \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) = 0,164 \text{ N} \text{ και } F_{\beta\alpha\rho.} = m \cdot g = 0.159 \text{ N}$$

Δεδομένα: $D=0.0159$ m

$$\rho_{25^{\circ}\text{C}}=997.1 \text{ kg/m}^3$$

$$u=1.98 \text{ m/s}$$

$$\nu=0,897 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$$\text{Re} = \frac{uD}{\nu} = 35097$$

$$C_D = f(\text{Re}) = 0.4 + \frac{24}{\text{Re}_D} + \frac{6}{1 + \text{Re}_D^{1/2}} = 0,43$$

$$m=0.0163 \text{ Kg}$$

$$g=9.807 \text{ m/s}^2$$

Διαπιστώνεται ότι η αντίσταση του νερού παίζει ρόλο στην κίνηση της μπίλιας.

Για την εύρεση της ταχύτητας της μπίλιας στο νερό θα λυθεί η εξίσωση της κίνησης με τα παραπάνω δεδομένα. Λόγω της πολυπλοκότητας της διαφορικής εξίσωσης η επίλυση έγινε αριθμητικά με τη χρήση της μεθόδου Euler στη Fortran. Αρχική συνθήκη της εξίσωσης θεωρήθηκε η ταχύτητα πρόσκρουσης $u_0 = 1.98$ m/sec και οι τιμές βρέθηκαν με βήμα 0.001 sec.

```
Program water
implicit none
real t,u,dt,un
integer i,n
dt=0.001
u=1.98
n=nint(0.2/dt)

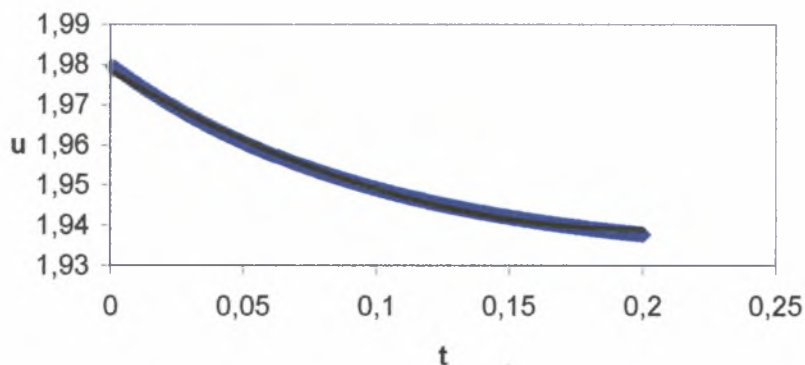
do i=1,n
    un=u+dt*du(u)
    t=t+dt
    u=un
    write(*,10) t,un
end do

10 format(f5.3,x,f10.7)

contains
real function du(u)
    real u
du=(0.159854-u*(0.000134029+u*(0.0395961+(0.593942/(1+133.138*sqrt(u))))))/0.0163
end function
end program
```

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δώσανε την παρακάτω γραφική παράσταση:

Διάγραμμα u-t



Η μεταβλητή που θα αξιοποιηθεί είναι το ύψος, οπότε θα προκύψει από την ταχύτητα:

$$u = \frac{dh}{dt} \Rightarrow dh \approx u dt \Rightarrow h_2 = h_1 + u \Delta t$$

Παρακάτω παρουσιάζεται για ένα ενδεικτικό εύρος τιμών του χρόνου με τα αποτελέσματα της ανάλυσης:

t	u	h
0	1,98	0
0,001	1,9795088	1,98
0,002	1,9790225	3,959509
0,003	1,9785413	5,938531
0,004	1,9780649	7,917073
0,005	1,9775934	9,895138
0,006	1,9771267	11,87273
0,007	1,9766648	13,84986
0,008	1,9762076	15,82652
0,009	1,9757551	17,80273
0,01	1,9753071	19,77849
0,011	1,9748636	21,75379
0,012	1,9744247	23,72866
0,013	1,9739903	25,70308
0,014	1,9735603	27,67707
0,015	1,9731348	29,65063
0,016	1,9727135	31,62377
0,017	1,9722965	33,59648
0,018	1,9718837	35,56878
0,019	1,9714751	37,54066
0,02	1,9710706	39,51213

3.3.2 Μετρήσεις

Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από τις μετρήσεις είναι :

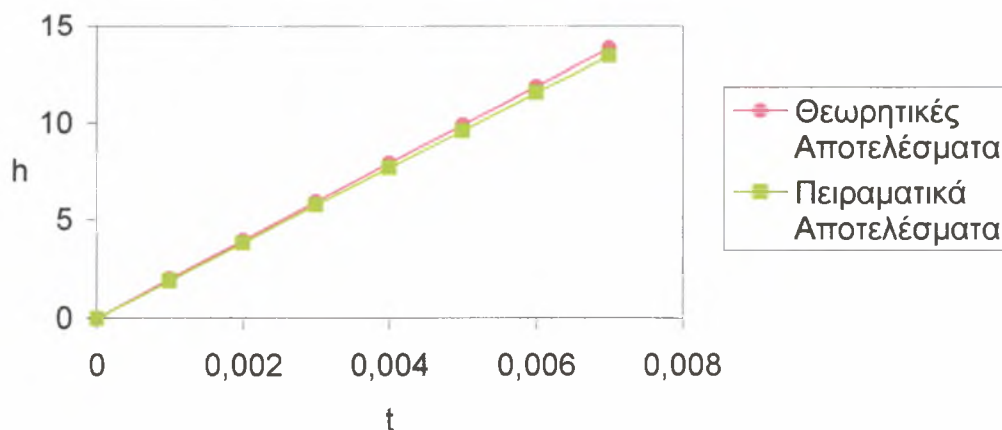
Ενδεικτικός πίνακας μετρήσεων

χρόνος (sec)	σημείο	απόσταση* (mm)	ύψος (mm)	ταχύτητα (mm/s)
0	0	0	0	1980
0,001	1	1,903	1,903	1902,56
0,002	2	1,903	3,806	1902,56
0,003	3	1,971	5,777	1970,51
0,004	4	1,903	7,68	1902,56
0,005	5	1,903	9,583	1902,56
0,006	6	1,971	11,554	1970,51
0,007	7	1,903	13,457	1902,56

*Η απόσταση αναφέρεται σε δύο διαδοχικά σημεία.

3.3.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Τα συγκεντρωμένα αποτελέσματα για την μεταβολή του ύψους συναρτήσει του χρόνου σε κάθε περίπτωση στο νερό φαίνονται στο γράφημα:



Η σύγκριση μεταξύ των δύο καταστάσεων, δηλ. βαθιά στο νερό όπου η μπίλια σταθεροποιείται και κινείται με την εξίσωση που αναφέρθηκε, και η πορεία της μπίλιας με το που εισέρχεται στο νερό εξετάζεται για να διαπιστωθεί αν η πρόσκρουση της μπίλιας στο νερό επηρεάζει την συμπεριφορά της κίνησης της μπίλιας στο νερό.

Από το γράφημα επιβεβαιώνονται τα πειραματικά αποτελέσματα, εφόσον η απόκλιση από τα θεωρητικά είναι πολύ μικρή και λογική δεδομένων των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν στο πείραμα, ενώ ταυτόχρονα διαπιστώνεται η ασήμαντη επιρροή της πρόσκρουσης στην πορεία της μπίλιας στο νερό.

Κεφάλαιο 4 Συμπεράσματα

- Μελετήθηκε πειραματικά η αλληλεπίδραση πύπτοντος σώματος σε ελεύθερη επιφάνεια υγρού με τη χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας και με κατάλληλη επεξεργασία των εικόνων. Εξετάστηκαν η επίδραση της διαμέτρου της σφαίρας και του ύψους ρίψης.
- Επαληθεύτηκε ότι οι σφαίρες που χρησιμοποιήθηκαν εκτελούν στον αέρα ελεύθερη πτώση. Έτσι, η ταχύτητα εισόδου στο υγρό υπολογίζεται άμεσα από το ύψος ρίψης.
- Ταυτοποιήθηκαν τρία στάδια εξέλιξης της ελεύθερης επιφάνειας:
 1. Αρχική διαβροχή της εισερχόμενης σφαίρας από υμένα υγρού ο οποίος οδηγεί στο σχηματισμό μικρού (πρόδρομου) πίδακα.
 2. Επανακατάληψη από υγρό του χώρου πίσω από την εισερχόμενη σφαίρα, με αποτέλεσμα την υπερακόντιση υγρού και το σχηματισμό του κύριου πίδακα
 3. Τριχοειδής διάσπαση του κύριου πίδακα με αποκόλληση σταγόνων
- Διαπιστώθηκε ότι η διάμετρος της βάσης του κύριου πίδακα και το μέγεθος των σταγόνων είναι ανάλογα της διαμέτρου της σφαίρας. Ειδικότερα, η διάμετρος της πρώτης σταγόνας είναι περίπου το 40% της διαμέτρου της σφαίρας.

Το ύψος του πίδακα είναι ανάλογο: 1. της διαμέτρου της σφαίρας,
2. του τετραγώνου του ύψους ρίψης

Τέλος ο χρόνος σχηματισμού του πίδακα εξαρτάται από το τετράγωνο της διαμέτρου της σφαίρας.
- Εξετάστηκε η κίνηση της σφαίρας στο νερό και συγκρίθηκε με την κίνηση ανάλογης αρχικής ταχύτητας σε νερό χωρίς ελεύθερη επιφάνεια. Οι μικρές διαφορές που παρατηρήθηκαν δείχνουν ότι το ποσοστό της ενέργειας της σφαίρας που απορροφάται από τις παραμορφώσεις της ελεύθερης επιφάνειας είναι μάλλον αμελητέο.

Κεφάλαιο 5 Προτάσεις

Στην γενική περίπτωση του πειράματος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την διεξαγωγή του ήταν λεία σφαίρα να αλληλεπιδρά με επιφάνεια νερού. Για την περαιτέρω μελέτη της συμπεριφοράς του φαινομένου του πίδακα θα μπορούσε κανείς να εμβαθύνει στην επιρροή της ορμής σ'αυτή. Επίσης, η ρίψη από πολύ μεγάλα ύψη είναι πιθανό να αλλοιώνει την εξάρτηση των χαρακτηριστικών του πίδακα από τις εξεταζόμενες παραμέτρους.

Ως επέκταση του πειράματος που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι οι εξής περιπτώσεις:

- Η ρίψη αντικειμένου διαφορετικής επιφάνειας ή σχήματος.
- Η αλληλεπίδραση με υγρό μεγαλύτερου ιξώδους.

Τέλος, θα μπορούσε να βρεθεί και να μελετηθεί κάποιος αδιάστατος αριθμός που χαρακτηρίζει το φαινόμενο. Οι κύριες δυνάμεις που επιδρούν στην εξέλιξη της ελεύθερης επιφάνειας για υγρό χαμηλού ιξώδους (νερό) είναι οι αδρανειακές και οι τριχοειδείς. Η ισορροπία αυτών των δυνάμεων

εκφράζεται με τον αριθμό $We = \frac{\text{αδρανειακές δυνάμεις}}{\text{τριχοειδείς δυνάμεις}} = \frac{u^2 D \rho}{\sigma}$

Στην περίπτωση άλλου υγρού με μεγαλύτερο ιξώδες σημασία μπορεί να έχει ο αριθμός Reynolds, που εκφράζει το πηλίκο αδρανειακών προς ιξώδεις

δυνάμεις: $Re = \frac{\text{αδρανειακές δυνάμεις}}{\text{δυνάμεις ιξώδους}} = \frac{uD}{\nu}$.

Βιβλιογραφία

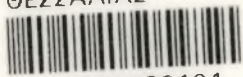
[1] J. W. Glasheen and T. A. McMahon, "Vertical water entry of disks at low Froude numbers", Phys. Fluids, Vol. 8, No. 8, (1996)

[2] Raymond Bergmann, "Void Collapse and Jet Formation: The impact of a disk on a water surface", University of Twente (2004)

[3] D. J. Tritton, "Physical Fluid Dynamics", Oxford Science Publications

[4] Robert S. Brodkey and Harri C. Hershey, "Φαινόμενα Μεταφοράς", McGraw Hill (1988)

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000089101

