

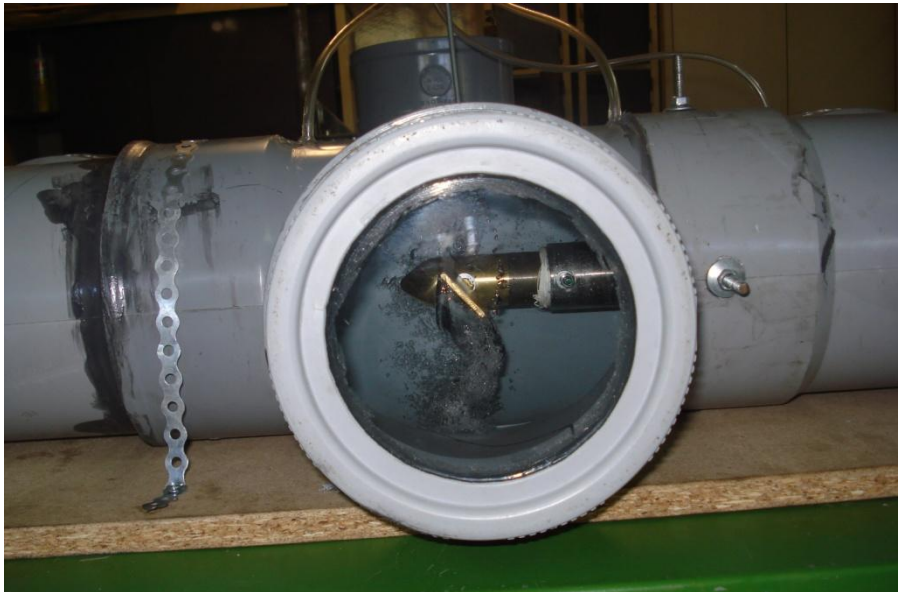
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΕΩΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΚΟΛΛΙΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (Α.Μ. 6063)

ΣΤΙΒΑΚΤΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ (Α.Μ.6123)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΑΥΡΙΔΗΣ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2015

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας, με θέμα «Κατασκευή πειραματικής συσκευής οπτικοποίησης του φαινομένου της σπηλαιώσεως».

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μας εργασίας κ. Ιωάννη Γιαννάκη, κ. Κωνσταντίνο Μαυρίδη καθώς επίσης και τον καθηγητή κ. Τσίρκα Σωτήριο που μας βοήθησε στη φάση κατασκευής της πειραματικής συσκευής, στις εγκαταστάσεις του μηχανουργείου του ιδρύματος.

Ακόμη, τις θερμές μας ευχαριστίες θα θέλαμε να εκφράσουμε στον συμφοιτητή μας Νταμάτη Κωνσταντίνο, του οποίου η βοήθεια συνέβαλε καθοριστικά στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας. Επίσης, θα θέλαμε να πούμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στους συναδέλφους Φαρμασώνη Ιωάννη, Σωτηροπούλου Γεωργία, Χούτα Αθηνά για τη βοήθεια κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας.

Τέλος, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τους γονείς μας για τη στήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μας.

I. Κόλλιας - Π. Στιβακτάς

Πάτρα 2015

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ

Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε οι συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επι ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου. Έχουμε δε αναφέρει στη Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομα του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

(Ονοματεπώνυμο)

.....
(Υπογραφή)

.....
(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014 – 2015 στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδος. Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή πειραματικής συσκευής οπτικοποίησης του φαινομένου της σπηλαίωσης σε περύγια διαφορετικής γεωμετρίας και λήψη μετρήσεων με σκοπό την υπολογιστική διερεύνησή του και σύγκριση τους με θεωρητικές τιμές.

Η συσκευή θα υποστηρίξει τα σχετικά πειράματα του εργαστηρίου Ρευστοδυναμικών Μηχανών με σκοπό την ευρύτερη εκπαίδευση των σπουδαστών και τη μεταφορά της θεωρητικής γνώσης με χρήση πειραματικών δεδομένων και μεθόδων.

Στο **1ο Κεφάλαιο** γίνεται μια εκτεταμένη παρουσίαση και ανάλυση του φαινομένου της σπηλαίωσης καθώς και των ειδών αυτής, των αιτιών που την προκαλούν, των προβλημάτων που δημιουργεί αλλά και τρόπους για την αντιμετώπισή της.

Στο **2ο Κεφάλαιο** δίνονται ορισμοί και αναλύονται κάποια μεγέθη που σχετίζονται με την σπηλαίωση και τη λειτουργία της. Η αναφορά στα μεγέθη αυτά είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να μπορέσει ο αναγνώστης να κατανοήσει και να εξάγει δεδομένα από την πειραματική διαδικασία.

Στο **3ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής της πειραματικής συσκευής και της περωτής που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων, καθώς και οι τρόποι κατασκευής αυτών. Έχουν χρησιμοποιηθεί εικόνες και σχήματα για την ευκολότερη αναγνώριση των κομματιών και του εντοπισμού των σημείων που έχουν τοποθετηθεί στην συσκευή.

Στο **4ο Κεφάλαιο** παρακολουθούμε αναλυτικά την διεξαγωγή του πειράματος και την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε καθώς και τους τρόπους εξαγωγής μετρήσεων από την πειραματική συσκευή. Επίσης υπάρχει εκτεταμένη ανάλυση των ποτελεσμάτων που εξήχθησαν με συγκεκριμένα όργανα, αλλά και οι απαραίτητες γραφικές παραστάσεις και διαγράμματα που προέκυψαν από την πειραματική διάταξη.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίησή της και στο παράρτημα δίνονται τα μηχανολογικά σχέδια όλων των εξαρτημάτων που κατασκευάστηκαν για την πειραματική συσκευή και την περωτή.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
1 ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗ.....	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ	1
1.2.1 Αίτια εμφάνισης	3
1.2.2 Οι φυσαλίδες στην σπηλαίωση.....	4
1.3 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΗΣ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ.....	6
1.4 ΣΥΜΠΤΩΜΑΤΑ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ.....	8
1.5 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ	10
1.6 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ.....	12
2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ.....	14
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	14
2.2 ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΗΣ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ.....	15
2.3 ΠΥΡΗΝΕΣ ΤΗΣ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ	17
2.3.1 Εξίσωση Rayleigh-Plesset.....	19
2.4 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΦΥΣΑΛΙΔΩΝ	21
2.5 ΔΙΑΧΥΣΗ ΜΑΖΑΣ	23
2.6 ΘΕΡΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΣΤΕΡΑΝΟΝ.....	25
2.7 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	26
2.8 ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ.....	27
2.9 ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ	27
3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ.....	29
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	29
3.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ	29
3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ.	30
3.3.1 Σύνδεση σωληνώσεων	30
3.3.2 Κρίσιμα σημεία κατασκευής	32
3.3.3 Ξύλινη βάση	32
3.3.4 Κάνουλα αποστράγγισης	33
3.4 ΑΞΟΝΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ.....	34
3.5 ΦΩΛΙΕΣ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	34

3.5.1	Φωλιά εμβαπτιζόμενου ρουλεμάν	35
3.5.2	Φωλιά στεγανοποίησης εσωτερικής τσιμούχας.....	37
3.5.3	Φωλιά εξωτερικού ρουλεμάν	40
3.6	ΣΥΝΔΕΣΗ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΦΩΛΙΕΣ	42
3.7	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	43
3.8	ΠΤΕΡΩΤΗ	45
3.8.1	A: Πτερύγια.	46
3.8.2	B: Οπίσθια τμήμα πτερωτής, βάση συγκράτησης των πτερυγίων.	48
3.8.3	C: Εμπρόσθια τμήμα της πτερωτής.....	49
3.8.4	D: Ντίζες ένωσης της πτερωτής.	50
3.8.5	Σύνδεση πτερωτής	51
3.9	ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΠΤΕΡΩΤΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΑΞΟΝΑ	52
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	55
4.1	ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	55
4.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	55
4.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	57
4.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	60
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	62
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	63

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Ορατές επιπτώσεις διάβρωσης σε περύγια λόγω σπηλαίωσης.....	2
Εικόνα 1.2 Φθορές σε περωτή έπειτα από την ανάπτυξη του φαινομένου της σπηλαίωσης	11
Εικόνα 1.3 Τοπική φθορά – διάτρηση περυγίου έπειτα από την ανάπτυξη του φαινομένου της σπηλαίωσης.	11
Εικόνα 2.1 Σπηλαίωση σε σωλήνα Venturi.	15
Εικόνα 2.2 Προχωρημένη σπηλαίωση σε σωλήνα Ventouri.....	16
Εικόνα 2.3 Σπηλαίωση πάνω σε περύγιο σε υδροδυναμικό τούνελ.	28
Εικόνα 3.1 Συνδεσμολογία σωληνώσεων	30
Εικόνα 3.2 Διαμόρφωση σωληνώσεων	31
Εικόνα 3.3 Διαδικασία κόλλησης σωληνώσεων.	31
Εικόνα 3.4 Τελική σύνδεση σωληνώσεων, μετά την ολοκλήρωση της κόλλησης.	32
Εικόνα 3.5 Στερέωση συσκευής πάνω στη ξύλινη βάση με μεταλλικές ταινίες.	33
Εικόνα 3.6 Κάνουλα αποστράγγισης.	33
Εικόνα 3.7 Άξονας περιστροφής.	34
Εικόνα 3.8 Τελική εικόνα φωλιάς εμβαπτιζόμενου ρουλεμάν.....	36
Εικόνα 3.9 Κατεργασία σύνδεσης φωλιάς εμβαπτιζόμενου ρουλεμάν με τη συσκευή.	36
Εικόνα 3.10 Κεντράρισμα φωλιάς εμβαπτιζόμενου ρουλεμάν στη σωλήνωση της συσκευής.....	37
Εικόνα 3.11 Διαδικασία κατεργασίας φωλιάς στεγανοποίησης – καθάρισμα εξωτερικής επιφάνειας.	38
Εικόνα 3.12 Διαδικασία κατεργασίας φωλιάς στεγανοποίησης – κεντράρισμα για διάνοιξη οπών.	38
Εικόνα 3.13 Διαδικασία κατεργασίας φωλιάς στεγανοποίησης –διάνοιξη οπών.	39
Εικόνα 3.14 Τελική μορφή φωλιάς στεγανοποίησης εσωτερικής τσιμούχας.	39
Εικόνα 3.15 Διαδικασία κατεργασίας φωλιάς εξωτερικού ρουλεμάν – διαμόρφωση εσωτερικής διαμέτρου.	40
Εικόνα 3.16 Διαδικασία κατεργασίας φωλιάς εξωτερικού ρουλεμάν – λείανση πίσω επιφάνειας	41
Εικόνα 3.17 Διαδικασία κατεργασίας φωλιάς εξωτερικού ρουλεμάν – διάνοιξη οπών.....	41
Εικόνα 3.18 Τελική μορφή φωλιάς εξωτερικού ρουλεμάν.	42
Εικόνα 3.19 Σύνδεση περιστρεφόμενου άξονα με φωλιές και τάπα δεξαμενής.	42
Εικόνα 3.20 Διαδικασία περάσματος φωλιάς στον άξονα με σφυρί και μεγαλύτερης διαμέτρου σωλήνα.	43
Εικόνα 3.21 Κινητήρας.	44
Εικόνα 3.22 Σύνδεση περιστροφικού άξονα με κινητήρα.	44
Εικόνα 3.23 Διαδικασία κατεργασίας περυγίου – καθάρισμός εξωτερικής επιφάνειας.....	46
Εικόνα 3.24 Πτερύγιο έπειτα από το πρώτο στάδιο της κατεργασίας.	47
Εικόνα 3.25 Διαδικασία κατεργασίας περυγίου φρεζάρισμα για τη διαμόρφωση της επίπεδης επιφάνειας του περυγίου.	47
Εικόνα 3.26 Τελική μορφή περυγίου.....	48
Εικόνα 3.27 Διαμόρφωση υδροδυναμικής κωνικής κεφαλής εμπρόσθιου τμήματος περωτής.....	50
Εικόνα 3.28 Σύνδεση επιμέρους τμημάτων του άξονα περωτής.	51
Εικόνα 3.29 Τελική μορφή περωτής.....	52
Εικόνα 3.30 Διαδικασία κατεργασίας συνδέσμου – καθάρισμα εξωτερικής επιφάνειας.....	53
Εικόνα 3.31 Διαδικασία κατεργασίας συνδέσμου – διάνοιξη οπών.	54
Εικόνα 3.32 Σύνδεση περωτής με περιστροφικό άξονα.	54
Εικόνα 4.1 Σημεία μέτρησης της πίεσης του ρευστού στην πειραματική διάταξη.	56

Εικόνα 4.2 Εικόνα του φαινομένου της σπηλαίωσης κατά τη διεξαγωγή του πειράματος	56
--	----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες μονοβάθμιας φυγοκέντρου αντλίας ,όπου εκδηλώνεται σπηλαίωση.....	9
Σχήμα 1.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες μονοβάθμιας φυγοκέντρου αντλίας, στην οποία εκδηλώνεται σπηλαίωση.....	10
Σχήμα 1.3 Ανάπτυξη φυσαλίδων σε περυγίο λόγω κακής σχεδίασης του.	12
Σχήμα 2.1 Φυσαλίδα σε ρευστό.	17
Σχήμα 2.2 Ακτίνα ισοροπίας φυσαλίδας, συναρτήσει της πίεσης.....	18
Σχήμα 2.3 Τυπικό φάσμα πυρήνων από Venturi.Κάθε σημείο δίνει τον αριθμό των πυρήνων, των οποίων η κρίσιμη πίεση είναι μεγαλύτερη από την τιμή του οριζόντιου άξονα.	18
Σχήμα 2.4 Φυσαλίδα σε ρευστό.	19
Σχήμα 2.5 Αδιάστατη κατανομή της πίεσης ρευστού, κατά την κατάρρευση φυσαλίδας.	21
Σχήμα 2.6 Λογαριθμική μείωση της ελεύθερης ταλάντωσης φυσαλίδας σε νερό συναρτήσει της ακτίνας ισοροπίας R_0	22
Σχήμα 2.8 Συντελεστής απόσβεσης β για μικρού πλάτους εξαναγκασμένες ταλαντώσεις φυσαλίδας σε νερό, συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας.	23
Σχήμα 3.1 Σκαρίφημα της φωλιάς εμβαπτιζόμενου ρουλεμάν [Solidworks].	35
Σχήμα 3.2 Σκαρίφημα φωλιάς στεγανοποίησης εσωτερικής τσιμούχας [Solidworks].	37
Σχήμα 3.3 Σκαρίφημα φωλιάς εξωτερικού ρουλεμάν [Solidworks].	40
Σχήμα 3.4 Σκαρίφημα περωτής και συνδέσμου [Solidworks].	45
Σχήμα 3.5 Σκαρίφημα περυγίου [Solidworks].....	46
Σχήμα 3.6 Σκαρίφημα οπίσθιου τμήματος περωτής.	48
Σχήμα 3.7 Σκαρίφημα εμπρόσθιου τμήματος περωτής [Solidworks].	49
Σχήμα 3.8 Σκαρίφημα ντίζας [Solidworks].	50
Σχήμα 3.9 Σκαρίφημα συνδέσμου περωτής με περιστροφικό άξονα [Solidworks].	53
Σχήμα 4.1 Διαφορά πιέσεως αναρρόφησης, συναρτήσει της ταχύτητας του κινητήρα, για κλίση περυγίου 35°	58
Σχήμα 4.2 Διαφορά πιέσεως καταθλίψεως, συναρτήσει της ταχύτητας του κινητήρα, για κλίση περυγίου 35°	58
Σχήμα 4.3 Διαφορά πιέσεως σε τυχαίο σημείο, συναρτήσει της ταχύτητας του κινητήρα, για κλίση περυγίου 35°	59
Σχήμα 4.4 Διαφορά πιέσεως αναρρόφησης, συναρτήσει της ταχύτητας του κινητήρα, για κλίση περυγίου 45°	59
Σχήμα 4.5 Διαφορά πιέσεως καταθλίψεως, συναρτήσει της ταχύτητας του κινητήρα, για κλίση περυγίου 45°	60
Σχήμα 4.6 Διαφορά πιέσεως σε τυχαίο σημείο, συναρτήσει της ταχύτητας του κινητήρα, για κλίση περυγίου 45°	60

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Συμβολισμοί μεγεθών και συντελεστών.....	14
Πίνακας 2.2 Ιδιότητες νερού στους 20°C, σύμφωνα με Stepanov.....	25
Πίνακας 4.1 Μετρήσεις με κλίση πτερυγίων 35°.....	57
Πίνακας 4.2 Μετρήσεις με κλίση πτερυγίων 45°.....	57

1 ΣΠΗΛΑΙΩΣΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα γίνει αναφορά και ανάλυση στα θεωρητικά στοιχεία της σπηλαίωσης. Η σπηλαίωση είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στον τομέα των Ρευστοδυναμικών Μηχανών. Η αντιμετώπιση και η πρόληψη του φαινομένου μπορεί να επιφέρει μεγάλα οικονομικά οφέλη. Στις παρακάτω ενότητες θα αναλυθούν τα θεωρητικά κομμάτια γύρω από το ευρύτερο πρόβλημα της σπηλαίωσης, τα αίτια αλλά και τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου.

Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή πειραματικής συσκευής οπτικοποίησης του φαινομένου της σπηλαίωσης. Επίσης θα γίνουν μέτρησεις για την καλύτερη δυνατή κατανόηση του προβλήματος της σπηλαίωσης. Η συσκευή θα υποστηρίξει τα σχετικά πειράματα του εργαστηρίου Ρευστοδυναμικών Μηχανών, με σκοπό την ευρύτερη εκπαίδευση των σπουδαστών και τη μεταφορά της θεωρητικής γνώσης με χρήση πειραματικών δεδομένων και μεθόδων.

1.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ

Η εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαίωσης επηρεάζει τις βιομηχανικές και πειραματικές εφαρμογές και αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα ασφαλούς λειτουργίας και πυρήνα διάβρωσης και εσφαλμένων αποτελεσμάτων και αποδόσεων.

Πιο συγκεκριμένα, σπηλαίωση ονομάζεται ο σχηματισμός θυλάκων ή φυσαλίδων ατμού του υγρού, που προέρχονται από την εξάτμισή του στις περιοχές, όπου η στατική πίεση ελαττώνεται μέχρι την τιμή της πίεσης των ατμών του υγρού, για τη θερμοκρασία που επικρατεί. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε όλες τις ρευστοδυναμικές μηχανές και γενικά σε διατάξεις με περιστροφική κίνηση προπέλας, έλικας ή πτερυγώσεων, μέσα σε νερό.

Στις αντλίες, η μείωση της στατικής πίεσης εμφανίζεται λόγω της τοπικής αύξησης της ταχύτητας του υγρού, κυρίως στην πλευρά της αναρρόφησης της αντλίας.

Το φαινόμενο της σπηλαίωσης αναπτύσσεται και στους υδροστροβίλους, με τρόπο ανάλογο με την περίπτωση των αντλιών. Για το λόγο αυτό, στην περίπτωση των υδροστροβίλων, η

πλέον πιθανή περιοχή ανάπτυξης σπηλαιώσης είναι η περιοχή εξόδου του υγρού από την περωτή, όπου η μέση στατική πίεση είναι χαμηλή.



Εικόνα 1.1 Ορατές επιπτώσεις διάβρωσης σε περυγία λόγω σπηλαιώσης.

Η ανάπτυξη σπηλαιώσης οδηγεί ακόμη και βραχυπρόθεσμα σε σημαντική διάβρωση στις επιφάνειες των περυγίων, λόγω των πολύ υψηλών, κρουστικής φύσεως, υπερπιέσεων, που αναπτύσσονται κατά τη φάση επαναυροποίησης των φυσαλίδων ατμού. Η διάβρωση γίνεται πιο έντονη, όσο περισσότερο ανομοιόμορφη είναι η δομή του κράματος από το οποίο έχουν κατασκευαστεί τα περυγία.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την έκταση του φαινομένου, τη διάρκεια και κατά συνέπεια τις επιπτώσεις του, μπορούν να ομαδοποιηθούν. Οι φυσικές ιδιότητες του ρευστού μεταβάλλουν το χρόνο που μεσολαβεί μέχρι την εμφάνιση των πρώτων φυσαλίδων, το μέγεθός τους και θεωρητικά την ένταση του φαινομένου. Κάποιες από τις ιδιότητες αυτές είναι η θερμοκρασία του υγρού (νερό στην προκειμένη περίπτωση), η πυκνότητα και οι πιθανές εναλλαγές στην περιεκτικότητά του. Να σημειωθεί ότι καθοριστικό ρόλο παίζει και η κατανομή της πίεσης, βασισμένη σε ενδογενείς και εξωγενείς παράγοντες. Αυτό οδηγεί στη δεύτερη κατηγορία μεταβλητών εμφάνισης του φαινομένου. Εδώ περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά της ροής και οι διαστάσεις ενδεχομένως των διατάξεων που την προκαλούν. Ο προσανατολισμός της ροής και η πιθανή ανακύκλωσή της, η μορφολογία των περυγώσεων, η ταχύτητα περιστροφής, η διάμετρος των σωλήνων, αν υφίστανται, το υλικό

της πτερωτής εντάσσονται στους παράγοντες, που επηρεάζουν τεχνικά την ένταση, την ισχύ και την οπτική διάσταση του φαινομένου.

1.2.1 Αίτια εμφάνισης

Η σπηλαίωση μπορεί να είναι αποτέλεσμα πολλών και διαφορετικών αιτιών. Υπάρχουν τρόποι να αποφευχθεί ή να περιοριστεί, σύμφωνα με τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Ωστόσο, οι λόγοι εμφάνισης των φυσαλίδων είναι ακόμα περισσότεροι. Οι λόγοι αυτοί εντοπίζονται στα χαρακτηριστικά της διάταξης και στις μεταβλητές της ροής και αναφέρονται συνοπτικά.

Αρχικά, η σπηλαίωση σχηματίζεται λόγω της ανομοιομορφίας που μπορεί να υπάρχει στην οδηγό ακμή των πτερυγίων. Για παράδειγμα, οι οξείες γωνίες, που ενδέχεται να έχουν σχηματιστεί, διαταράσσουν τη ροή με τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργούνται ανεπιθύμητες φυσαλίδες. Στο κομμάτι αυτό συμπεριλαμβάνονται όλες οι αναντιστοιχίες στην κατασκευή των πτερυγίων, δεδομένων των ανοχών μετά από μια μηχανουργική διαδικασία. Το χρονικό διάστημα επίσης, που έχει χρησιμοποιηθεί μια πτερύγωση μπορεί να την έχει ουσιαστικά παραμορφώσει ή ακόμα και να την έχει καταστήσει ακατάλληλη. Σε τέτοιες περιπτώσεις το φαινόμενο είναι πιο ορατό.

Ο άξονας μπορεί να επηρεάσει τη ροή και να την ανακόψει σε σημείο ικανό να παρατηρηθεί σπηλαίωση. Γενικότερα, οι εναλλαγές στη ροή είναι ικανές να αυξήσουν την ένταση του φαινομένου και τις διαβρωτικές του επιπτώσεις. Για παράδειγμα, ο λανθασμένος συσχετισμός ανάμεσα στη μηχανική ισχύ και τη διαθέσιμη ενέργεια του ρευστού, μπορεί να οδηγήσει σε ξαφνικές εναλλαγές στην ταχύτητα, η οποία σε τοπικό επίπεδο, θα οδηγήσει σε εναλλαγή της πίεσης και εντέλει στο σχηματισμό των φυσαλίδων.

Ένας ακόμη λόγος που μπορεί να ενταχθεί στη φύση της ροής, είναι η ύπαρξη άλλων φυσαλίδων. Πολλές φορές, σε πρακτικά παραδείγματα, η ροή που υφίσταται μια πτερωτή μπορεί να περιέχει φυσαλίδες από άλλους εξωγενείς παράγοντες, που απλά μεταφέρονται. Η κατάσταση αυτή εντάσσεται στα αίτια της σπηλαίωσης καθώς οι φυσαλίδες αυτές ενδέχεται να προσκολληθούν στα πτερύγια και το φαινόμενο να δημιουργηθεί ακόμα και σε χαμηλότερες ταχύτητες από αυτές που θα ξεκινούσε σε άλλες περιπτώσεις η εμφάνιση του φαινομένου.

Το καθαρό ύψος αναρρόφησης είναι μέγεθος που συναντάται στην περίπτωση των αντλιών και αντιπροσωπεύει το ύψος εκείνο που μετράται από την επιφάνεια της δεξαμενής αναρρόφησης, συνυπολογίζοντας τις απώλειες μέχρι τον άξονα της αντλίας. Σε κάθε περίπτωση, μια μικρή τιμή του ύψους αυτού μπορεί να οδηγήσει σε συνθήκες κατάλληλες για να δημιουργηθεί σπηλαιώση. Συνεπώς, σε αυτή την εφαρμογή πρέπει να ορίζεται το ελάχιστο καθαρό ύψος αναρρόφησης, που απαιτείται για να μη συμβεί σπηλαιώση και επομένως να παρατηρηθούν μακροπρόθεσμα, αποκλίσεις στη λειτουργία της αντλίας.

Η μικρή στατική πίεση, σε σύγκριση με τη μέγιστη τάση ατμών του υγρού που αντλείται, οδηγεί σε μια εναλλαγή πιέσεων, υπεύθυνη για το σχηματισμό φυσαλίδων. Είναι ένας ακόμη παράγοντας που πρέπει να σημειωθεί, και ανήκει στο πεδίο της ροής.

Η παροχή μπορεί επίσης να οδηγήσει σε σπηλαιώση. Όταν οι τιμές της πραγματικής παροχής είναι μεγαλύτερες από την προβλεπόμενη, ή από την ονομαστική τιμή, αν προβλέπεται για κάποια στροβιλομηχανή, τότε ενδέχεται να παρατηρηθεί σπηλαιώση και αποκλίσεις στα αποτελέσματα και τις αποδόσεις που μπορούν να υπολογιστούν. Οι τιμές της παροχής πρέπει να οριοθετηθούν με βάση αυτό το σκεπτικό για την αποφυγή των ανεπιθύμητων συνεπειών.

Η ροή συνεπώς, εμπεριέχει τις περισσότερες από τις αιτίες εμφάνισης του φαινομένου. Η απότομη αλλαγή στη διεύθυνση της, όπως και οι διεύρυνση των διόδων της πρέπει να συνυπολογιστούν. Τέλος, όλες οι συνθήκες που οδηγούν σε πιθανές απώλειες, σε τυρβώδεις ροές και ανομοιομορφίες ροϊκού πεδίου κάνουν το φαινόμενο πιο πιθανό ή αυξάνουν στην έντασή του στις περιπτώσεις που έχει ήδη εμφανιστεί.

1.2.2 Οι φυσαλίδες στην σπηλαιώση

Οι θύλακες αέρα που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του φαινομένου δημιουργούνται, αυξάνουν το μέγεθος τους και καταρρέουν εντός του ρευστού με αποτέλεσμα την αύξηση του τυρβώδους της ροής του. Αυτή η αστάθεια έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση κραδασμών και αντιληπτών θορύβων, που οφείλονται στην κατάρρευση των φυσαλίδων.

Τα στάδια της σπηλαιώσης ειδικότερα:

- Βήμα 1: Σχηματισμός των φυσαλίδων στο εσωτερικό του υγρού.

Κατά την εναλλαγή συσχετισμών σε πιέσεις και ταχύτητες συμβαίνει τοπικά η αλλαγή φάσης του ρευστού από υγρή σε αέρια (ατμοποίηση). Η αλλαγή αυτή γίνεται οπτικά με τη δημιουργία των φυσαλίδων.

- Βήμα 2: Ανάπτυξη – μεγέθυνση φυσαλίδων.

Δεδομένου ότι οι συνθήκες λειτουργίας της μηχανής παραμένουν σταθερές, στο εσωτερικό του ρευστού θα συνεχίσουν να δημιουργούνται νέες φυσαλίδες και με την πάροδο του χρόνου θα αυξάνονται ως προς το μέγεθός τους. Οι φυσαλίδες εντάσσονται στην τοπική ροή και μετατίθενται από το κέντρο του στροφείου, κατά μήκος των πτερυγίων, μέχρι την οδηγό ακμή τους. Η διαδρομή αυτή γίνεται με αύξουσα ταχύτητα, οι ρυθμοί της οποίας αποτυπώνονται στις υψηλές τιμές της πίεσης, με αποτέλεσμα να αρχίζει η κατάρρευση των φυσαλίδων μετά από ένα συγκεκριμένο σημείο. Έχει υπολογιστεί προσεγγιστικά ότι ο κύκλος ζωής μίας φυσαλίδας είναι περίπου 0,003 sec.

- Βήμα 3 : Κατάρρευση των φυσαλίδων

Κατά την διάρκεια της κίνησης των φυσαλίδων ατμού στην επιφάνεια των πτερυγίων, η πίεση στο περιβάλλον των φυσαλίδων αυξάνεται μέχρι το σημείο όπου η πίεση είναι μεγαλύτερη από το εσωτερικό της φυσαλίδας. Έτσι, στο σημείο αυτό η στατική πίεση τείνει να γίνει μεγαλύτερη από την πίεση αμμοποίησης και δημιουργούνται οι συνθήκες επαναυροποίησης του ατμού. Αυτή η μετατροπή από ατμό σε υγρό δε γίνεται να συμβεί ακαριαία, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια μεταβατική περίοδος, όπου συνυπάρχουν και οι δυο φάσεις. Η φυσαλίδα συνεπώς καταρρέει. Η διαδικασία κατάρρευσης δεν είναι μια απλή έκρηξη προς τα έξω αλλά μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια κατάρρευση-έκρηξη προς το εσωτερικό. Εκατοντάδες φυσαλίδες καταρρέουν περίπου στο ίδιο σημείο του πτερυγίου.

Λόγω ακριβώς της μεγάλης διαφοράς στην πυκνότητα μεταξύ της υγρής φάσης και της φάσης ατμού (για το νερό σε θερμοκρασία μικρότερη των 100°C ο συσχετισμός για την πυκνότητα είναι $\rho_V/\rho_A > 900$), το φαινόμενο της επαναυροποίησης συνοδεύεται τοπικά από μια σημαντική αύξηση της στατικής πίεσης, κρουστικής μορφής. Ο λόγος της αύξησης της κρουστικής ορμής μπορεί να εξηγηθεί απλά με το ότι ο όγκος του υγρού κατά την επαναυροποίηση είναι μικρότερος από τον όγκο που καταλαμβάνει ο ατμός, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα κενό. Αυτό το κενό τείνει να καλυφτεί με μεγάλη ορμή από το ρευστό στο περιβάλλον, το οποίο επιτυγχάνεται με την μορφή micro-jet. Τότε, το micro-jet διαρρηγνύει τη φυσαλίδα με δύναμη που δρα σαν σφυρηλάτηση. Σύμφωνα με το θεώρημα της ορμής, αυτή η απότομη μείωση της ταχύτητας του ρευστού έχει ως αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της στατικής πίεσης.

Έχουν αναφερθεί πιέσεις κατάρρευσης φυσαλίδων μεγαλύτερες από 1 GPa. Αυτό το τοπικά έντονο φαινόμενο της σφυρηλάτησης, μπορεί να δημιουργήσει κοιλότητες στο στροφείο.

Μετά την κατάρρευση της φυσαλίδας, εκπέμπεται ηχητικό κύμα που πηγάζει από το σημείο της κατάρρευσης. Αυτό το ηχητικό κύμα αποτελεί ένδειξη της σπηλαιώσης στην αντλία. Η ένταση του φαινομένου αναδεικνύεται από το μεγάλο αριθμό φυσαλίδων, που τελικά καταρρέουν και παράλληλα αποτυπώνεται ηχητικά στην κίνηση του στροφείου.

1.3 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΗΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ

Ο διαχωρισμός των περιπτώσεων του φαινομένου, μπορεί να γίνει με βάση τα αίτια που το προκαλούν. Με βάση αυτό το σκεπτικό η σπηλαιώση διακρίνεται σε *various* και *gaseous* (cavitation).

- Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις περιπτώσεις που ξεκινούν από τη ανεπάρκεια του διαθέσιμου καθαρού θετικού ύψους αναρρόφησης ή λόγω του φαινομένου της εσωτερικής επανακυκλοφορίας. Είναι ο πιο συχνός τύπος σπηλαιώσης που εμφανίζεται στις εγκαταστάσεις διαδικασίας. Η σπηλαιώση αυτού του τύπου, εκδηλώνεται υπό μορφή μειωμένης απόδοσης αντλιών, υπερβολικό θόρυβο, δονήσεις και φθορά των μερών της αντλίας. Η έκταση της ζημίας που προκαλεί η σπηλαιώση, κυμαίνεται από ένα μικρό ποσοστό διάβρωσης μετά από χρόνια λειτουργίας ως και πλήρης καταστροφή της αντλίας μόνο σε μια σχετικά μικρή χρονική περίοδο. Αναπτύσσεται όταν σε κάποιο σημείο της ροής η στατική πίεση γίνεται μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού, όποτε αυτό ατμοποιείται και κατά συνέπεια αναπτύσσεται ένας θύλακας ατμοποιημένου υγρού. Αντίστροφα, εκεί που η στατική πίεση τείνει να αυξηθεί πάνω από το προηγούμενο όριο, η μάζα του ατμού επαναυγροποιείται. Το φαινόμενο της επαναυγροποίησης συνοδεύεται τοπικά από μια υποτυπώδη κρούση. Πιο συγκεκριμένα, το υγρό υφίσταται εναλλαγές πιέσεων. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες, η πίεση σε ορισμένες περιοχές μιας ρευστοδυναμικής μηχανής μπορεί να πέσει χαμηλότερα από την πίεση των ατμών του υγρού, δημιουργώντας συνθήκες σπηλαιώσης. Ένας από τους σημαντικότερους λόγους που εμφανίζονται συχνά αυτές οι συνθήκες είναι το συχνά μεγάλο μέγεθος των σωληνώσεων, που απαρτίζουν τη διάταξη. Η σπηλαιώση λόγω επανακυκλοφορίας είναι ένας τύπος λιγότερο γνωστός αλλά ταυτοχρόνως και αρκετά συχνός. Οφείλεται σε ανεπιθύμητες διακυμάνσεις στην κατεύθυνση και ομοιογένεια της ροής, συνήθως εντοπίζεται στην αναρρόφηση και αποτελεί μια από τις πιο δύσκολα αντιμετωπίσιμες μορφές.

- Η δεύτερη κατηγορία εμφανίζεται όταν κατά την εισαγωγή του νερού στην φυγοκεντρική αντλία έχουμε ταυτόχρονα μια ανεπιθύμητη εισαγωγή αέρα (οι συνέπειες είναι αντίστοιχες και με άλλα αέρια). Μια φυγοκεντρική αντλία μπορεί να χειριστεί τον αέρα σε ποσοστό 0,5 % του όγκου του. Εάν το ποσοστό αέρα αυξηθεί σε ποσοστό 6 %, τότε έχουμε την εμφάνιση σπηλαιώσης. Κατά τη σπηλαιώση αυτού του τύπου, οι φυσαλίδες αερίου σχηματίζονται λόγω της παρουσίας διαλυμένων αερίων στο αντλούμενο υγρό. Το πιο προφανές σύμπτωμα είναι η πτώση παροχής, σε συνδυασμό με αυτό τον τύπο σπηλαιώσης.

Ο τρόπος και τα σημεία στα οποία εκδηλώνεται το φαινόμενο αποτελούν ένα ακόμη κριτήριο διάκρισης.

- Ο πιο συνηθισμένος τύπος σπηλαιώσης που εμφανίζεται στις ρευστοδυναμικές μηχανές είναι η **σπηλαιώση εξόδου** που εντάσσει την πλειοψηφία των περιπτώσεων και περιγράφεται στο μηχανισμό του φαινομένου στην αντίστοιχη παράγραφο. Οφείλεται αποκλειστικά στη διαφορά πίεσης και είναι η πιο συχνή εκδοχή εμφάνισης του φαινομένου.
- Η μορφή σπηλαιώσης που αναπτύσσεται κοντά στην διατομή εισόδου των πτερυγίων, στην εξωτερική επιφάνεια ονομάζεται **σπηλαιώση εισόδου εξωτερικής επιφάνειας**. Συναντάται στους ταχύστροφους στροβίλους και η ανάπτυξη αυτής της μορφής σπηλαιώσης εξαρτάται από την διαμόρφωση της ακμής πρόσπτωσης των πτερυγίων.
- Η **σπηλαιώση εισόδου εσωτερικής επιφάνειας** χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση φυσαλίδων ατμού μεγάλου μεγέθους, εσωτερικά του πτερυγίου και στην περιοχή της ακμής εισόδου. Έχει μικρές διαβρωτικές επιπτώσεις αλλά συνδυάζεται με έντονο θόρυβο.
- Σε σημεία λειτουργίας πέραν του κανονικού η ροή εξέρχεται του δρομέα με μη μηδενική συστροφή. Για χαμηλές τιμές τις παραμέτρου σπηλαιώσης, σ , κάτω από την πλήμνη σχηματίζεται μια **στήλη σπηλαιώσης** που περιστρέφεται με την φορά της περιφερειακής ταχύτητας στην έξοδο του δρομέα. Οι διαστάσεις της στήλης σπηλαιώσης εξαρτώνται από την τιμή της παραμέτρου σ της εγκατάστασης, με μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση. Η ανάπτυξη της στήλης σπηλαιώσης εξαρτάται από την διαμόρφωση του δρομέα και την μορφή του αποκλίνοντος αγωγού εξόδου. Οι συνέπειες της στήλης σπηλαιώσης περιορίζονται στις μηχανικές ταλαντώσεις. Η

διακύμανση της λειτουργίας της μηχανής είναι πιο έντονη στην περίπτωση ανάπτυξη ελικοειδούς στήλης σπηλαιώσης.

- Η **σπηλαιώση πλήμνης** εμφανίζεται στο σφαιρικό τμήμα της πλήμνης και προκαλεί σημαντική πτώση του βαθμού απόδοσης. Ανήκει στις έντονες εκδοχές του φαινομένου και προκαλεί εκτεταμένες φθορές.
- Για τις διατάξεις χωρίς εξωτερική στεφάνη (υδροστρόβιλοι αξονικής ροής) ο τύπος σπηλαιώσης που αντιστοιχεί είναι η **σπηλαιώση ακροπτερυγίων**. Η ανάπτυξη αυτής της μορφής σπηλαιώσης οφείλεται στην υψηλή ταχύτητα που αναπτύσσει η ροή μεταξύ των ακροπτερυγίων και του εξωτερικού κελύφους.

1.4 ΣΥΜΠΤΩΜΑΤΑ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ

- Θόρυβος:

Είναι αποτέλεσμα της πρόσκρουσης του υγρού στις μεταλλικές επιφάνειες κατά την απότομη συμπύκνωση των φυσαλίδων.

- Κραδασμοί της αντλίας:

Λόγω της διαδοχικής αλλαγής της πίεσης παρατηρούνται κραδασμοί οι οποίοι μεταφέρονται σε όλα τα εξαρτήματα της συσκευής, ακόμα και στη βάση στήριξης. Οι κραδασμοί αυτού του τύπου προκαλούνται από τις ταλαντώσεις των τμημάτων, στα οποία προσκρούει το υγρό. Οι κραδασμοί και ο θόρυβος είναι ανάλογοι του μεγέθους της διάταξης. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος αυτό τόσο πιο ευδιάκριτο γίνεται το φαινόμενο και μεγαλώνει η ένταση του.

- Φθορά των μεταλλικών επιφανειών:

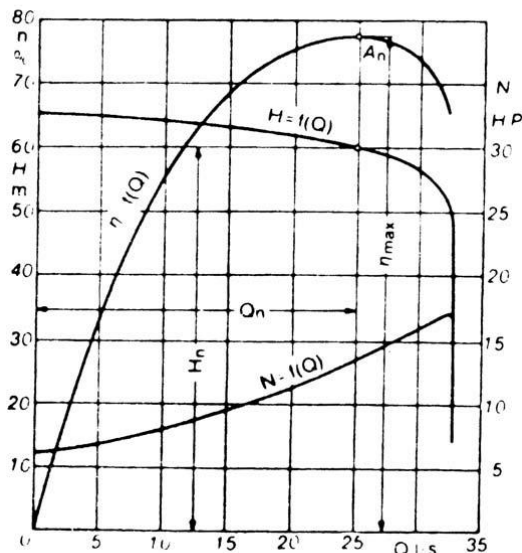
Η φθορά των επιφανειών διαφέρει μακροσκοπικά από τη συνήθη διάβρωση των μετάλλων, γιατί εμφανίζεται μόνο σε μικρά τμήματα και όχι σε ολόκληρη την επιφάνεια. Αναφέρεται ότι, το φαινόμενο της διάβρωσης είναι πιο έντονο όταν το υγρό περιέχει διαβρωτικά στοιχεία (οξυγόνο ή οξέα). Η αντοχή που παρουσιάζει το εκάστοτε μέταλλο στη σπηλαιώση εξαρτάται από τη χημική του σύσταση και από το βαθμό λείανσης της επιφανείας του. Έπειτα από πειραματικά αποτελέσματα (Schroter, 1953) παρατηρήθηκε ότι τα διάφορα υλικά έχουν διαφορετική αντοχή στην σπηλαιώση. Η κατάταξη τους είναι κατά σειρά αύξουσας αντοχής στο φαινόμενο και είναι η εξής:

1) Μόλυβδος

- 2) Χυτοσίδηρος
- 3) Ορείχαλκος
- 4) Αλουμίνιο με άνθρακα
- 5) Ανοξείδωτο ατσάλι

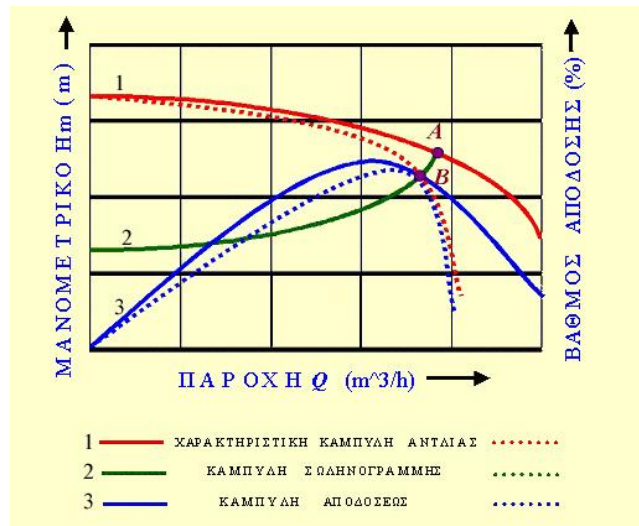
- Απότομη πτώση των χαρακτηριστικών καμπυλών:

Γενικά, οφείλεται στο ότι στη ζώνη σπηλαίωσης αυξάνονται οι τριβές και οι υδραυλικές απώλειες. Εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και κυρίως από την ειδική ταχύτητα της αντλίας. Στις φυγόκεντρες αντλίες με μικρή ειδική ταχύτητα (<30) η πτώση των χαρακτηριστικών καμπυλών είναι πιο έντονη. Στο Σχ.1.1 η σπηλαίωση εκδηλώνεται σε παροχή 32,5 lit/s..



Σχήμα 1.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες μονοβάθμιας φυγόκεντρου αντλίας, όπου εκδηλώνεται σπηλαίωση.

Στο επόμενο σχήμα (Σχ 1.2.) φαίνεται ένα επίσης γενικό παράδειγμα των επιπτώσεων του φαινομένου της σπηλαίωσης σε μια φυγόκεντρική αντλία. Με συνεχείς γραμμές δίνονται οι καμπύλες πριν τη σπηλαίωση, ενώ με διακεκομμένες οι αντίστοιχες καμπύλες μετά την εμφάνιση του φαινομένου.



Σχήμα 1.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες μονοβάθμιας φυγοκέντρου αντλίας, στην οποία εκδηλώνεται σπηλαίωση.

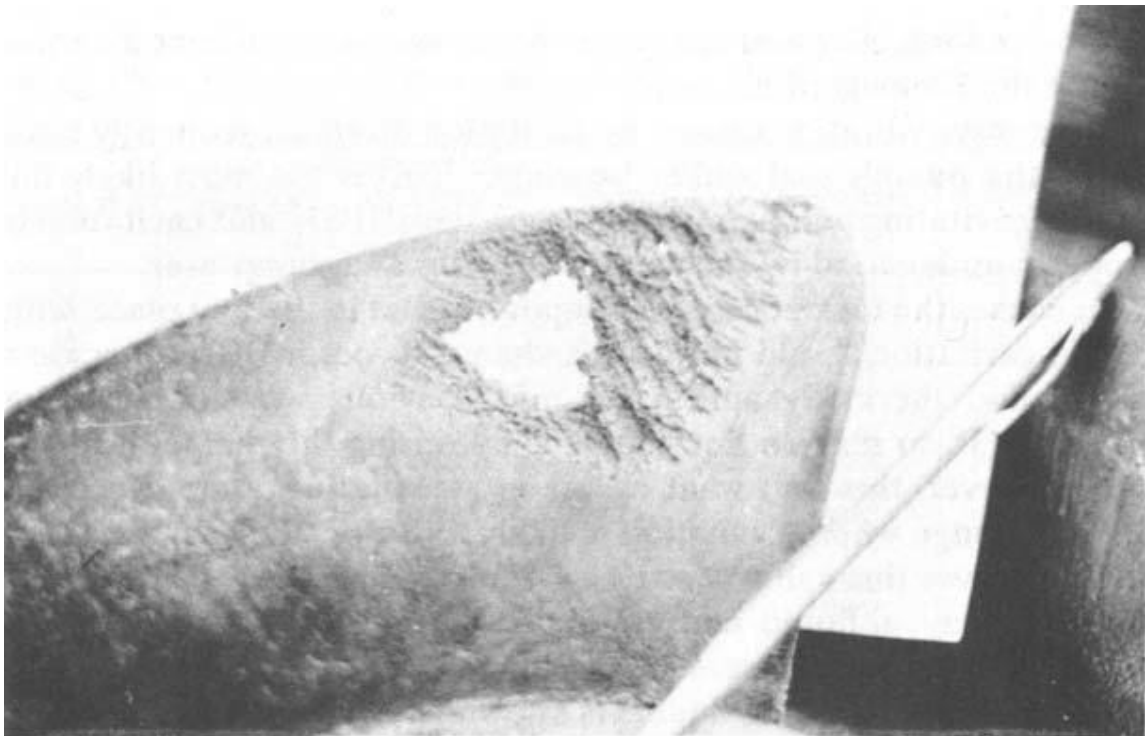
1.5 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ

Η σπηλαίωση είναι ένα από τα μεγαλύτερα ζητήματα στην κατασκευή και εφαρμογή των ρευστοδυναμικών μηχανών. Τα προβλήματα που προκαλεί είναι ποικίλης φύσεως και επικεντρώνονται στην καταστροφή κομματιών της μηχανής, σε τοπικό επίπεδο, στην υποβάθμιση της απόδοσης της και τελικά στην καταστροφή της ίδιας της μηχανής λειτουργικά, αν δεν υπάρχει αντίστοιχη πρόληψη για την προστασία της.

Ο πιο σοβαρός λόγος που οδηγεί στην καταστροφή είναι η κατάρρευση των φυσαλίδων στις επιφάνειες των πτερυγώσεων. Κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης των φυσαλίδων πάνω στον άξονα, στην περωτή και στα εξαρτήματα της μηχανής οι επιφάνειες καταπονούνται και τελικά αλλοιώνονται σημαντικά. Αυτή η αλλοίωση αυξάνεται σταδιακά και οδηγεί ακόμη και σε βραχυπρόθεσμη και μη αντιστρεπτή αλλαγή στα πτερύγια, τα οποία καθίστανται πλέον μη λειτουργικά.



Εικόνα 1.2 Φθορές σε περωτή έπειτα από την ανάπτυξη του φαινομένου της σπηλαιώσης



Εικόνα 1.3 Τοπική φθορά – διάτρηση περυγίου έπειτα από την ανάπτυξη του φαινομένου της σπηλαιώσης.

Το τελικό στάδιο της φάσης των φυσαλίδων έχει ως αποτέλεσμα την διάτρηση των περυγίων, τα οποία σταδιακά δεν ανταπεξέρχονται στους αναμενόμενους βαθμούς απόδοσης. Αυτό έχει άμεση επίδραση στον ολικό βαθμό απόδοσης της διάταξης. Για να γίνει

αντιληπτό κάτι τέτοιο αρκεί κάποιος να παρατηρήσει την καμπύλη λειτουργίας της μηχανής, συγκρίνοντας την με τον ονομαστικού βαθμού απόδοσης της.

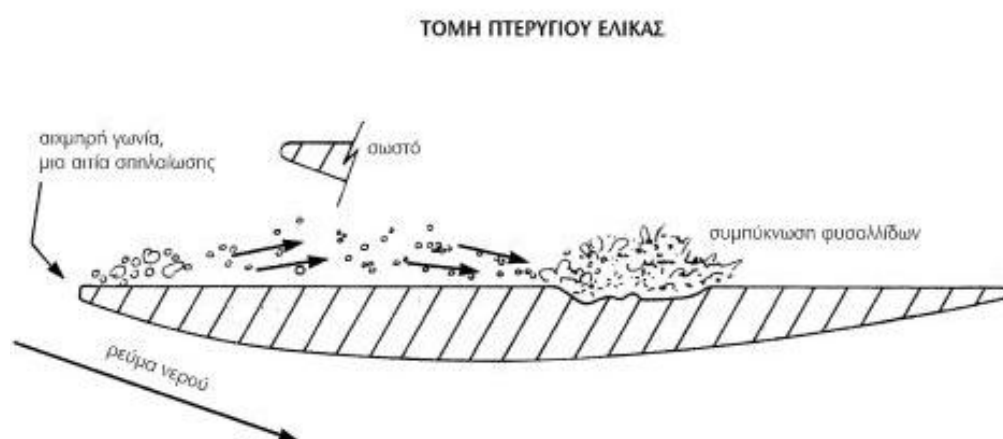
Καθώς οι φυσαλίδες καταρρέουν η μηχανή υπόκειται σε διαρκείς ταλαντώσεις και κραδασμούς. Αυτοί οι κραδασμοί έχουν σαν αποτέλεσμα την εφαρμογή φορτιών σε όλα τα τμήματα της διάταξης. Αυτά τα φορτία είναι ανάλογα της έντασης του φαινομένου. Σε πολύ μεγάλο βαθμό μπορεί να αποβούν επιβλαβή για τις συνδέσεις μεταξύ των επιμέρους κομματιών της συσκευής. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία οπών, με κίνδυνο να παρατηρηθεί διαρροή του ρευστού.

Ένα ακόμη αποτέλεσμα της σπηλαιώσης είναι και η ηχορύπανση κατά τη λειτουργία της μηχανής, που μπορεί να φτάσει σε σημείο να μειώσει πρακτικά την εργονομία και κατά συνέπεια να συμπεριληφθεί στα κριτήρια επιλογής της.

1.6 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ

1) Σωστός σχεδιασμός ή επιλογή της περωτής.

Η περωτή θα πρέπει να έχει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά κατασκευής, ώστε να ανταποκριθεί η μηχανή και να περιοριστεί το ενδεχόμενο εμφάνισης της σπηλαιώσης. Μια κακοσχεδιασμένη περυγώση με πιθανές ατέλειες ακόμη και στο στάδιο της κατασκευής μπορεί να αποτελέσει αιτία για τη δημιουργία φυσαλίδων.



Σχήμα 1.3 Ανάπτυξη φυσαλίδων σε περυγίο λόγω κακής σχεδίασης του.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που χρίζει μεγάλης προσοχής κατά τη σχεδίαση – επιλογή μιας περωτής, είναι το βήμα και η γενική μορφή των περυγίων του στροφέιου. Επίσης,

σημαντικός παράγοντας είναι το υλικό από το οποίο θα κατασκευαστεί η πτερωτή, καθώς και οι διαστάσεις και το βάρος που θα πρέπει να έχει, ώστε να ανταπεξέλθει στις λειτουργικές απαιτήσεις.

Η σωστή συντήρηση και προφύλαξη του πτερύγιου είναι απαραίτητες για τη λειτουργική κατάστασή του. Αμυχές, ρωγμές και χτυπήματα αλλοιώνουν την γεωμετρία της προβλεπόμενης επιφάνειας των πτερυγίων και μπορούν να αποτελέσουν εναρκτήρια σημεία για το φαινόμενο.

2) Ταχύτητα ρευστού

Ένας ακόμα παράγοντας που πρέπει να συνυπολογιστεί, με βάση τα αίτια που αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι η ταχύτητα του ρευστού μέσα στη συσκευή. Συγκεκριμένα, προτείνεται η αποφυγή αποτόμων στενώσεων, οι οποίες μπορούν να περιορίσουν την ταχύτητα της ροής σε αρκετά χαμηλά επίπεδα. Επίσης, οι παροχές σε ονομαστικό ή επιθυμητό επίπεδο υποβαθμίζουν την ένταση του φαινομένου της σπηλαιώσης.

3) Θερμοκρασία ρευστού

Για την περαιτέρω υποβάθμιση του φαινομένου της σπηλαιώσης, είναι χρήσιμο να ελαχιστοποιηθεί η θερμοκρασία του ρευστού μέσα στη μηχανή. Επιπρόσθετα, πρέπει να περιοριστεί όσο το δυνατόν περισσότερο η ποσότητα των φυσαλίδων αέρα που ενδέχεται να προϋπάρχουν στο ρευστό, λόγω μιας ανεπιθύμητης αναλογίας αέρα.

4) Περιορισμός του μεγέθους της διάταξης

Είναι πρακτικό κατά το σχεδιασμό της συσκευής να περιοριστεί ο αριθμός των περιττών εξαρτημάτων και να σχεδιαστούν σωληνώσεις με μικρό σχετικό μήκος, χωρίς μεγάλες και απότομες αλλαγές στην κατεύθυνση. Η επικείμενη ομαλοποίηση της ροής καταλήγει στις ζητούμενες μειωμένες τιμές της ταχύτητας.

5) Μείωση ταχύτητας περιστροφής του στροφείου

Ο περιορισμός της ταχύτητας περιστροφής σε χαμηλότερα επίπεδα οδηγεί σε μεταβολή τοπικά της στατικής πίεσης και σε τελικό περιορισμό των συνθηκών και πιθανοτήτων εμφάνισης του φαινομένου.

2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν εκτεταμένα οι σχέσεις που αναλύουν τις μεταβολές των ιδιοτήτων και μεταβλητών του φαινομένου της σπηλαιώσης. Το μαθηματικό μοντέλο του φαινομένου περιλαμβάνει συσχετισμούς μεγεθών (κατά κύριο λόγο πιέσεων) και συντελεστών απαραίτητων για την περιγραφή, κατανόηση και κατά συνέπεια περιορισμό του φαινομένου.

Τα μεγέθη αυτά όπως και οι απαιτούμενοι συντελεστές παρουσιάζονται με τους αντίστοιχους συμβολισμούς τους στον εκτενή πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2.1 Συμβολισμοί μεγεθών και συντελεστών.

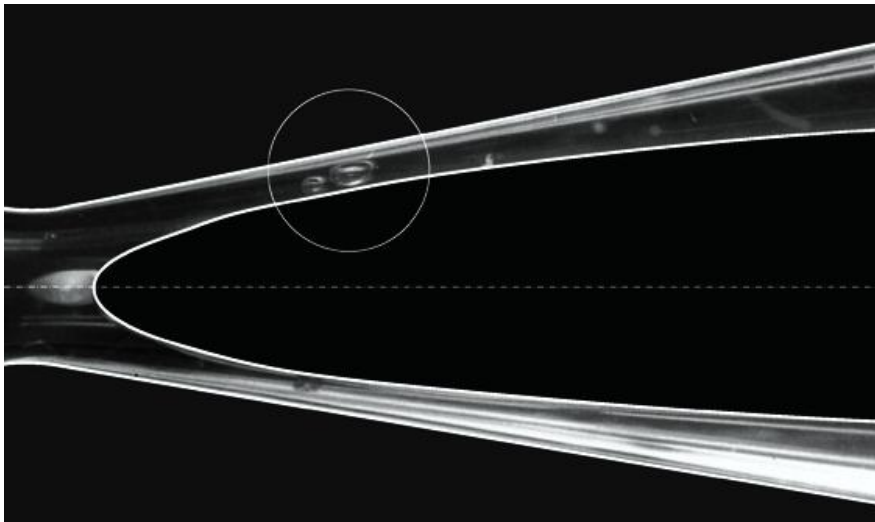
B	Παράγοντας Stepanov	p	Πίεση
C_p	Συντελεστής πίεσης	p_g	Πίεση μη-συμπυκνώσιμου αερίου
C_{pl}	Θερμοχωρητικότητα υγρού	p_v	Πίεση ατμού
D	Χαρακτηριστικό μήκος κλίμακας	R	Ακτίνα φυσαλίδας
F	Συνάρτηση της ακτίνας (στις ταλαντώσεις των φυσαλίδων)	\bar{R}	Αδιάστατη ακτίνα (R/D)
		\dot{R}, \ddot{R}	Χρονικές παράγωγοι ακτίνας
f	Συχνότητα αντήχησης φυσαλίδων	r	Απόσταση από το κέντρο της φυσαλίδας
		S	Επιφανειακή τάση
h	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην κοινή επιφάνεια αλληλεπίδρασης	T	θερμοκρασία
		t	χρόνος
L	Λανθάνουσα θερμότητα από την εξάτμιση	V, v	ταχύτητα
N_u	Αριθμός Nusselt	V_l, V_v	όγκοι
α_l	Θερμική διαχυτικότητα υγρού	v	Κινηματικό ιξώδες (μ/ρ)
γ	Λόγος θερμοχωρητικότητας του αερίου	Π	Αδιάστατη πίεση
Δ_{pv}^*	Μείωση της πίεσης ατμού		
ΔT	Πτώση θερμοκρασίας	ρ	Πυκνότητα υγρού
ΔT^*	Θερμοκρασιακή πτώση αναφοράς	σ_v	Παράμετρος σπηλαιώσης
		τ	Χρόνος κατάρρευσης φυσαλίδας, Χρόνος μετάβασης
λ_l	Θερμική αγωγιμότητα υγρού	τ_T	Θερμικός χρόνος
μ	Δυναμικό ιξώδες υγρού	min	ελάχιστο
0	αρχικό	ref	αναφοράς
d	τελική κατάσταση	v	ατμού
i	εκκίνηση	∞	άπειρο
l	υγρό		

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι, υπάρχουν μεγέθη που τυχάνει να μην αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα και να συναντώνται στις σχέσεις που ακολουθούν. Σε αυτές τις περιπτώσεις δίνονται κατάλληλες διευκρινήσεις.

2.2 ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΗΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ

Αρχικά, εξετάζοντας την ταχύτητα στη ροή, είναι εμφανές ότι για χαμηλά επίπεδα ροής, όπου δεν παρατηρείται το φαινόμενο της σπηλαιώσης, η ταχύτητα είναι μέγιστη στις περιοχές όπου η πίεση ελαχιστοποιείται. Η διαπίστωση αυτή προκύπτει από την κλασική εξίσωση του Bernoulli:

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{Constant} \quad (2.1)$$

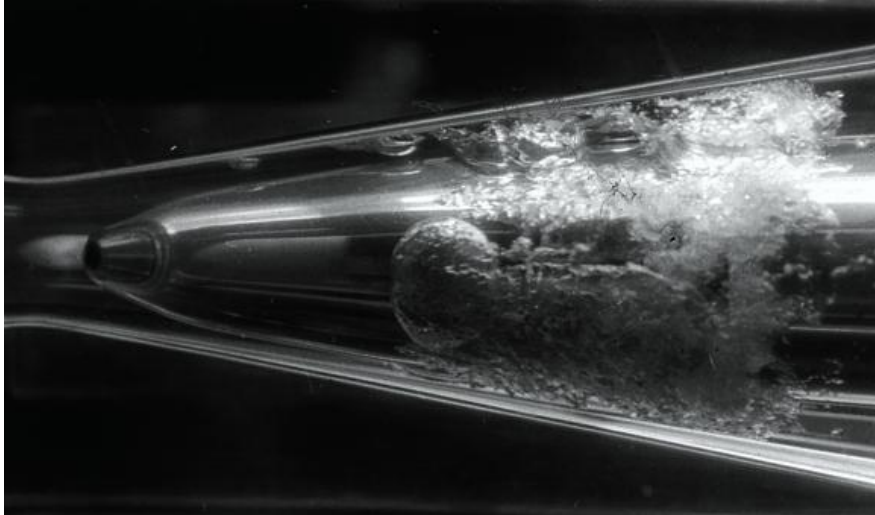


Εικόνα 2.1 Σπηλαιώση σε σωλήνα Venturi.

Η ύπαρξη του φαινομένου προϋποθέτει ότι η ελάχιστη πίεση στη ροή είναι μικρότερη, ή το πολύ ίση με την πίεση ατμού.

$$p_{min} \leq p_v \quad (2.2)$$

Αναφέρεται ότι η ισότητα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες συνθήκες.



Εικόνα 2.2 Προχωρημένη σπηλαιώση σε σωλήνα Ventouri.

Αυτή η εξίσωση αδιαστατοποιείται χρησιμοποιώντας την αδιάστατη παράμετρο που ακολουθεί και εμπεριέχει την πίεση και τον ταχύτητα αναφοράς.

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{\frac{1}{2}\rho V_{ref}^2} \quad (2.3)$$

Χρησιμοποιώντας συνεπώς, τον αδιάστατο συντελεστή για την πίεση, η παραπάνω ανισότητα παίρνει τη μορφή:

$$\sigma_v \leq -C_p \min \quad (2.4)$$

Η αδιάστατη παράμετρος σπηλαιώσης σ_v ορίζεται ως:

$$\sigma_v = \frac{p_{ref} - p_v}{\frac{1}{2}\rho V_{ref}^2} \quad (2.5)$$

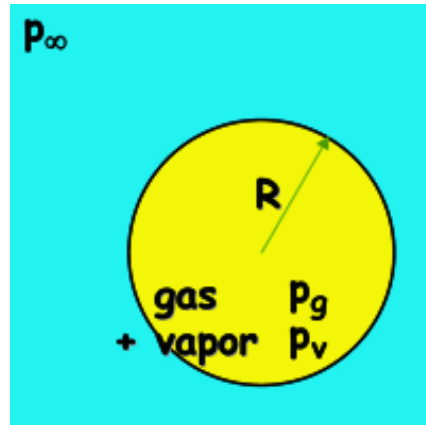
Για υψηλές τιμές στην πίεση αναφοράς (ή αντίστοιχα χαμηλές στην ταχύτητα αναφοράς), η παράμετρος σπηλαιώσης είναι πολύ μεγάλη και το φαινόμενο δεν υφίσταται. Η έναρξη της σπηλαιώσης συνοδεύεται από μια κρίσιμη τιμή στην παράμετρο αυτή.

$$\sigma_{vi} = -C_p \min \quad (2.6)$$

Η ανάπτυξη του φαινομένου συμβαίνει όσο μειώνεται η παράμετρος σπηλαιώσης κάτω από την κρίσιμη αυτή τιμή.

Υπάρχει μια ακόμη κρίσιμη τιμή για την παράμετρο σπηλαιώσης. Είναι ένας αδιάστατος αριθμός, σαφώς μεγαλύτερος από την σ_{vi} , που αποδίδει την παράμετρο σπηλαιώσης όπου το φαινόμενο εξαφανίζεται, ξεκινώντας από τιμές στις παραμέτρους που το φαινόμενο υφίσταται και αυξάνοντας την σ_v διαρκώς μέχρι το φαινόμενο να μην παρατηρείται πια. Η κρίσιμη αυτή τιμή συμβολίζεται με σ_{vd} .

2.3 ΠΥΡΗΝΕΣ ΤΗΣ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ



Σχήμα 2.1 Φυσαλίδα σε ρευστό.

Η ισορροπία των πιέσεων στις πλευρές στις επιφάνειες της φυσαλίδας προκύπτει από την ισχύ της παρακάτω εξίσωσης:

$$p_g + p_v = p_\infty + \frac{2S}{R} \quad (2.7)$$

Η παρούσα εξίσωση αποτυπώνει ότι το άθροισμα των πιέσεων υγρού και ατμού στο εσωτερικό και την επιφάνεια στις φυσαλίδας είναι μεγαλύτερο από την πίεση που έχει το υγρό, λόγω της τάσης.

Η ανάπτυξη των πυρήνων είναι θεωρητικά ισοθερμική, έτσι ώστε χρησιμοποιώντας τον νόμο των ιδανικών αερίων, η πίεση ατμού να μεταβάλλεται αντιστρόφως με τον όγκο της φυσαλίδας:

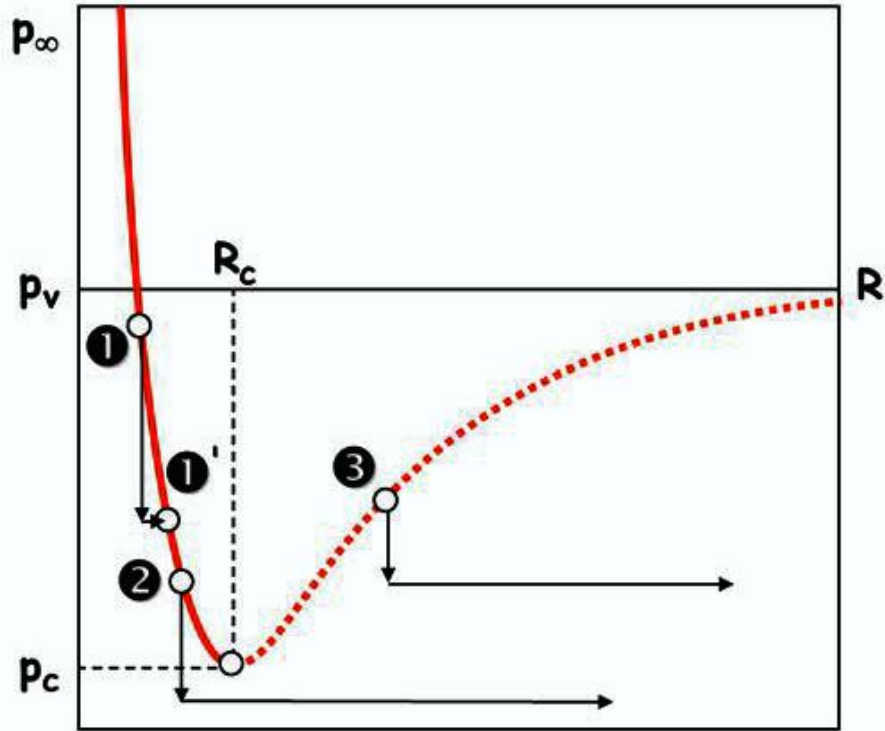
$$p_g = \frac{K}{R^3} \quad (2.8)$$

Η σταθερά K είναι χαρακτηριστική του θεωρητικού πυρήνα. Η ισοθερμική εναλλαγή φάσεων προϋποθέτει η εξέλιξη του πυρήνα να είναι πιο αργή από τη μεταφορά θερμότητας, έτσι ώστε να μην διαταράσσεται το ενεργειακό ισοζύγιο.

Με μια αντικατάσταση στις εξισώσεις που προηγήθηκαν προκύπτει απλά ότι:

$$\frac{K}{R^3} + p_v = p_\infty + \frac{2S}{R} \quad (2.9)$$

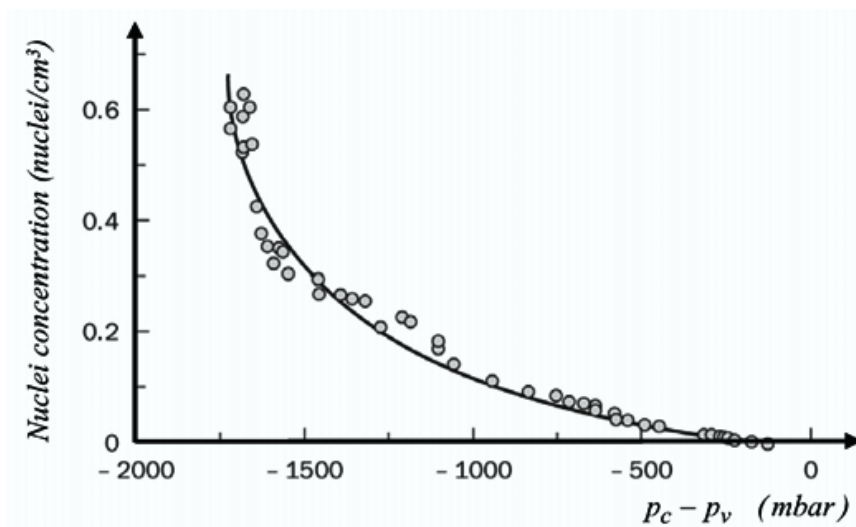
Για κάθε πυρήνα που χαρακτηρίζεται από μια δεδομένη τιμή της σταθεράς K , η παραπάνω εξίσωση οδηγεί στον πλήρη συσχετισμό της ακτίνας των φυσαλίδων με την πίεση. Η αποτύπωση αυτή φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 2.2 Ακτίνα ισοροπίας φυσαλίδας, συναρτήσει της πίεσης.

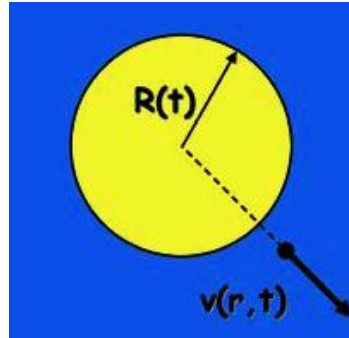
Οι χαρακτηριστικές τιμές ακτίνας και πίεσης που εκπίπτουν από την παραπάνω γραφική παράσταση ορίζονται από τις σχέσεις:

$$\begin{cases} R_c = \sqrt{\frac{3K}{2S}} \\ p_c = p_v - \frac{4S}{3R_c} \end{cases} \quad (2.10)$$



Σχήμα 2.3 Τυπικό φάσμα πυρήνων από Venturi. Κάθε σημείο δίνει τον αριθμό των πυρήνων, των οποίων η κρίσιμη πίεση είναι μεγαλύτερη από την τιμή του οριζόντιου άξονα.

2.3.1 Εξίσωση Rayleigh-Plesset



Σχήμα 2.4 Φυσαλίδα σε ρευστό.

$$p_g(t) = p_{g0} \left[\frac{R_0}{R(t)} \right]^{3\gamma} \quad (2.11)$$

Η ισοθερμική περίπτωση λαμβάνεται υπόψη θέτοντας τιμή 1 στο λόγο γ .

Η δυναμική ισορροπία, πλέον, των φορτίων στην επιφάνεια της φυσαλίδας γράφεται ως:

$$p_g(t) + p_v = p(R, t) + \frac{2S}{R} - 2\mu \left. \frac{\partial v}{\partial r} \right|_{r=R} \quad (2.12)$$

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας για ένα υγρό, οδηγεί στον υπολογισμό της ταχύτητας ροής από την ταχύτητα με την οποία μεταβάλλεται η επιφάνεια:

$$v(r, t) = \dot{R} \frac{R^2}{r^2} \quad (2.13)$$

Η βαθμίδα πίεσης στο υγρό μπορεί να υπολογιστεί από την προβολή της ακτίνας βάσει των εξισώσεων Navier-Stokes:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} \quad (2.14)$$

Με την εξίσωση αυτή ως εργαλείο για την πίεση στο άπειρο και την ταχύτητα, προκύπτει η κατανομή, πλέον, της πίεσης στο υγρό.

$$\frac{p(r, t) - p_\infty(t)}{\rho} = \ddot{R} \frac{R^2}{r} + 2\dot{R}^2 \left[\frac{R}{r} - \frac{R^4}{4r^4} \right] \quad (2.15)$$

Συνεπώς, η πίεση ακριβώς πάνω στην επιφάνεια της φυσαλίδας θα είναι:

$$\frac{p(R, t) - p_\infty(t)}{\rho} = R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \quad (2.16)$$

Και τελικά το ισοζύγιο των επιφανειακών δυνάμεων στη φυσαλίδα, αποτυπώνεται στην εξίσωση Rayleigh - Plesset:

$$\rho \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2}R^2 \right] = [p_v - p_\infty(t)] + p_{g0} \left[\frac{R_0}{R} \right]^{3\gamma} - \frac{2S}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \quad (2.17)$$

η οποία μετασχηματίζεται με την χρήση της ταυτότητας:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{2\dot{R}R^2} \frac{d(\dot{R}^2 R^3)}{dt} \quad (2.18)$$

Και η νέα της μορφή θα είναι:

$$\frac{d(\dot{R}^2 R^3)}{dt} = \frac{2}{3} \frac{p_v - p_\infty}{\rho} \frac{dR^3}{dt} - \frac{2}{3(\gamma-1)} \frac{p_{g0}}{\rho} R_0^{3\gamma} \frac{dR^{3(1-\gamma)}}{dt} - \frac{2S}{\rho} \frac{dR^2}{dt} + 8\nu R\dot{R}^2 \quad (2.19)$$

Η εξίσωση αυτή θα φτάσει σε τελικό στάδιο αν η τιμή της πίεσης στο άπειρο θεωρηθεί σταθερή και αγνοηθούν οι επιδράσεις του ιξώδους. Με βάση αυτές της παραδοχές η εξίσωση παίρνει την τελική και πιο πρακτική της μορφή.

$$\dot{R}^2 = \frac{2}{3} \frac{p_v - p_\infty}{\rho} \left[1 - \frac{R_0^3}{R^3} \right] + \frac{2}{3(\gamma-1)} \frac{p_{g0}}{\rho} \frac{R_0^3}{R^3} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3(\gamma-1)} \right] - \frac{2S}{\rho R} \left[1 - \frac{R_0^2}{R^2} \right] \quad (2.20)$$

Η ταχύτητα με την οποία μεταβάλλεται η ακτίνα της φυσαλίδας υπολογίζεται με βάση την παραπάνω εξίσωση και προκύπτει από τον παρακάτω τύπο.

$$\dot{R} = - \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_\infty - p_v}{\rho} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right]} \quad (2.21)$$

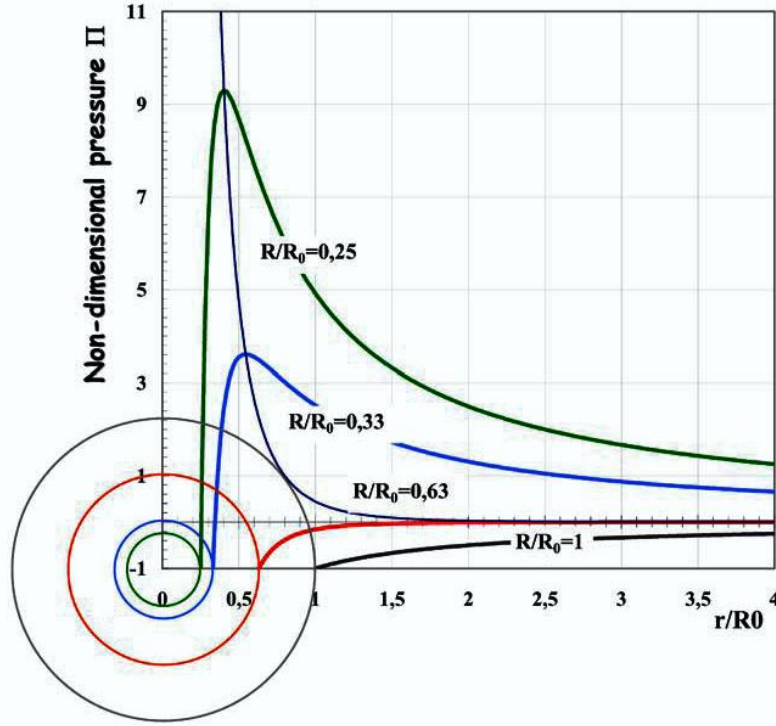
Η κατάρρευση σαφώς προϋποθέτει ότι η πίεση στο άπειρο θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την πίεση στην φυσαλίδα κατά τη διάρκειά της. Αυτό οδηγεί σαφώς σε ρυθμό μείωσης της ακτίνας.

Μια καλή εκτίμηση του χρόνου κατάρρευσης είναι ο χρόνος Rayleigh.

$$\tau = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{\rho}{p_\infty - p_v}} \int_0^{R_0} \frac{dR}{\sqrt{\frac{R_0^3}{R^3} - 1}} \cong 0.915 R_0 \sqrt{\frac{\rho}{p_\infty - p_v}} \quad (2.22)$$

Όσον αφορά στο επίπεδο της αδιάστατης πίεσης μέσα στο υγρό, ο υπολογισμός της θα γίνει με βάση την ταχύτητα με την οποία μεταβάλλεται η επιφάνεια της φυσαλίδας και την εξίσωση 2.15.

$$\Pi(r, t) = \frac{p(r, t) - p_\infty}{p_\infty - p_v} = \frac{R}{3r} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 4 \right] - \frac{R^4}{3r^4} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right] \quad (2.23)$$



Σχήμα 2.5 Αδιάστατη κατανομή της πίεσης ρευστού, κατά την κατάρρευση φυσαλίδας.

2.4 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΦΥΣΑΛΙΔΩΝ

Καθώς η φυσαλίδα αναπτύσσεται μακροσκοπικά η επίδραση τις επιφανειακής τάσης και οι διαφορές της ιδιότητες, με την υπόθεση του ασυμπίεστου αερίου, θεωρούνται αμελητέες. Για μεγάλες τιμές ακτίνας η ταχύτητα κινείται ασυμπτωτικά σε μια υπολογίσιμη και πάλι, τιμή:

$$\dot{R} \cong \sqrt{\frac{2 p_v - p_\infty}{3 \rho}} \quad (2.24)$$

Για R κοντά στην περιοχή του R_0 ισχύει η γραμμική εξίσωση:

$$\ddot{R} - \frac{F''(R_0)}{2} (R - R_0) \cong 0 \quad (2.25)$$

Χρησιμοποιώντας τη δεύτερη παράγωγο τις F προκύπτει εν τέλει η τελική συχνότητα συντονισμού για τις φυσαλίδες, που περιέχει την πλειονότητα των παραπάνω μεταβλητών.

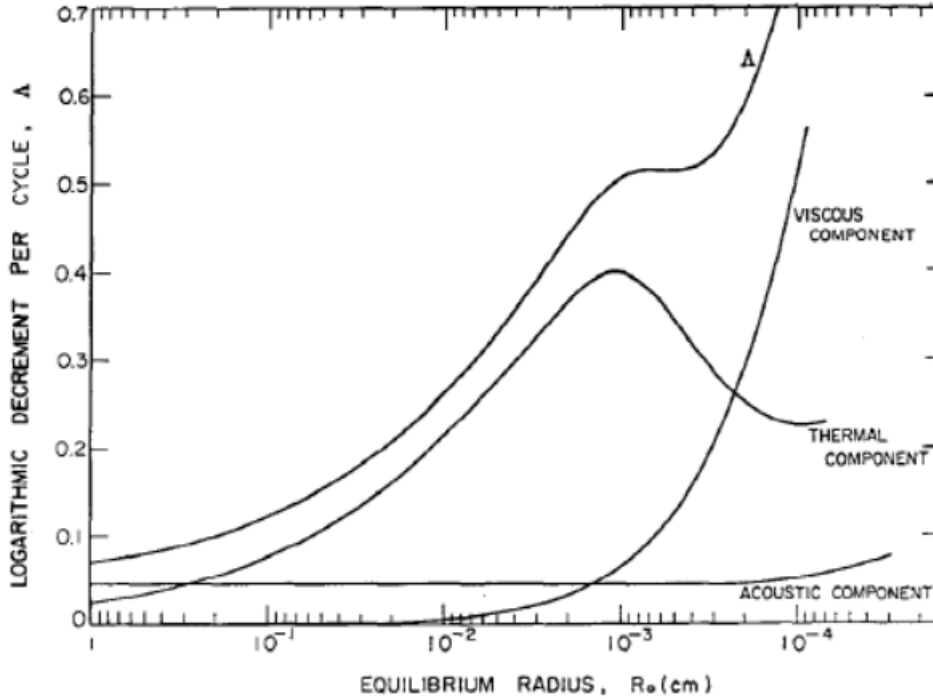
$$f = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left[3\gamma p_{g0} - \frac{2S}{R_0} \right]} = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left[3\gamma \left(p_{\infty 0} - p_v + \frac{2S}{R_0} \right) - \frac{2S}{R_0} \right]} \quad (2.26)$$

Η ακουστική συμβολή θα προκύψει από τον παρακάτω τύπο που περιλαμβάνει και τη συγκέντρωση ατμών στο υγρό [c].

$$\beta_{acoustic} = \frac{1}{2} \omega \frac{\omega R_0 / c}{1 + (\omega R_0 / c)^2} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\omega R_0}{c} \right) \omega \quad (2.27)$$

Η συμβολή αυτή προσδίδει ελάχιστη συμπίεστικότητα στο υγρό.

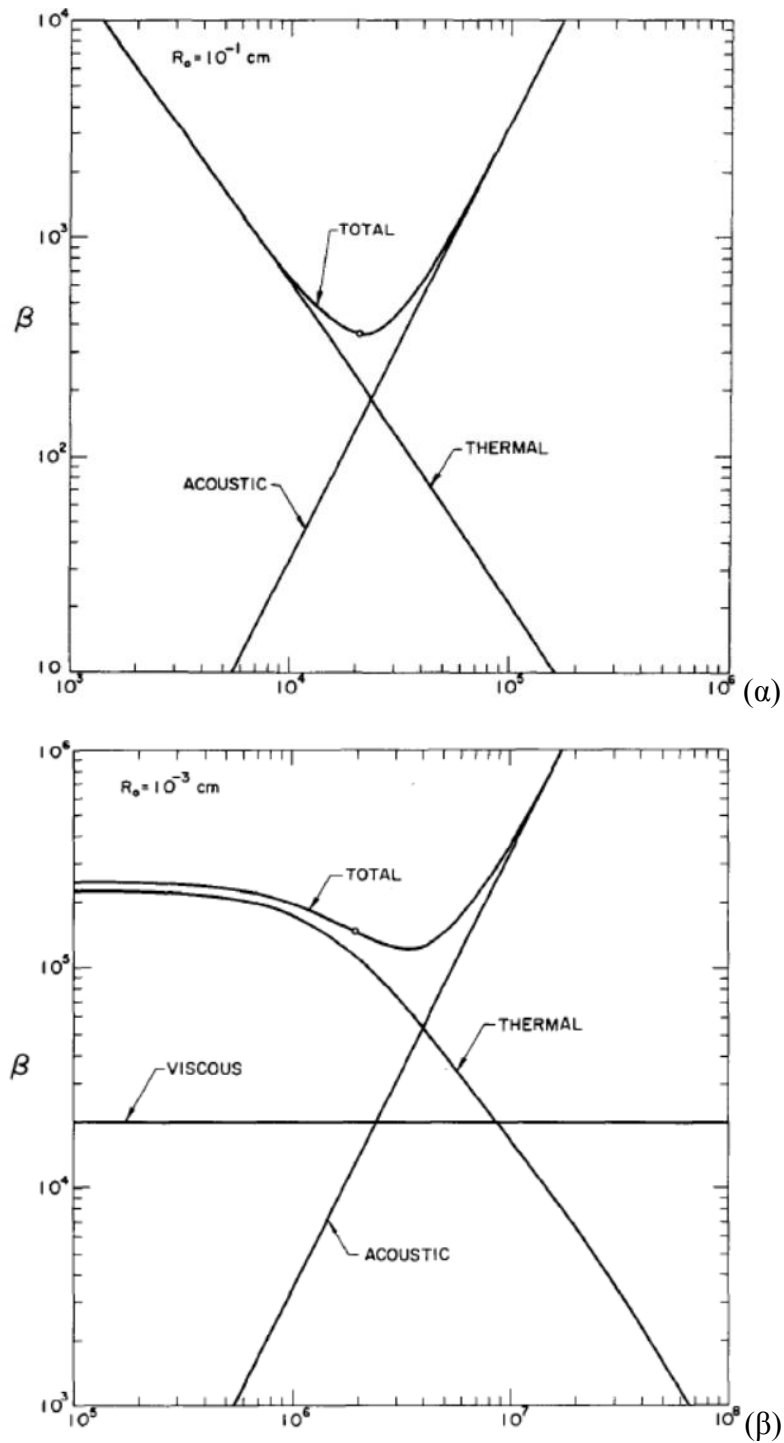
Η λογαριθμική μείωση των ταλαντώσεων μικρού πλάτους, στις φυσαλίδες που αναπτύσσονται κατά το φαινόμενο της σπηλαιώσης, αποτελεί συνάρτηση της μέσης ακτίνας R_0 , της φυσαλίδας, κατά την ταλάντωση αυτή.



Σχήμα 2.6 Λογαριθμική μείωση της ελεύθερης ταλάντωσης φυσαλίδας σε νερό συναρτήσει της ακτίνας ισορροπίας R_0 .

$$\Delta = \frac{2\pi\beta}{\omega_0} \quad (2.28)$$

Όσο για τον συντελεστή απόσβεσης $[\beta]$, οι τιμές του, καθώς και ο τρόπος από τον οποίο προέρχεται η απόσβεση αυτή, φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα για φυσαλίδες σε 2 τάξεις μεγέθους.



Σχήμα 2.7 Συντελεστής απόσβεσης β για μικρού πλάτους εξαναγκασμένες ταλαντώσεις φυσαλίδας σε νερό, συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας.

2.5 ΔΙΑΧΥΣΗ ΜΑΖΑΣ

Η μελέτη αυτής της πλευράς του φαινομένου, ξεκινά από το νόμο του Henry σύμφωνα με τον οποίο επιτυγχάνεται η σύνδεση μεταξύ της μερικής πίεσης του ατμού στην επιφάνεια του υγρού μέσω της οποίας αλληλεπιδρά, με τη συγκέντρωση του υγρού στο αέριο [c_g].

$$c_s = ap_g \quad (2.29)$$

Το a είναι μια σταθερά βασισμένη τους ιδιότητες του νερού υπό την αντίστοιχη θερμοκρασία. Για παράδειγμα $a=2 \times 10^{-5} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ για τους 20°C .

Είναι προφανές ότι για τιμές του c μεγαλύτερες η μικρότερες του c_s η φυσαλίδα αναπτύσσεται ή συρρικνώνεται. Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει αυτή τη διαδικασία με βάση τη συγκέντρωση αποδίδεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{R^2}{r^2} \dot{R} \frac{\partial c}{\partial r} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c}{\partial r} r \right) \quad (2.30)$$

Τα μεγέθη αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν επίσης και για την εφαρμογή της εξίσωσης Rayleigh – Plesset αφού αποδίδουν τον όρο $R\dot{R}$.

$$R\dot{R} = \frac{c_\infty - c_s}{\rho_g} \quad (2.31)$$

$$R\dot{R} = \frac{c_\infty - c_s}{\rho_g} [1 + R(\pi\alpha t)^{-1/2}] \quad (2.32)$$

$$R\dot{R} = \frac{2}{3} a \frac{c_s}{\rho_g} \left(\frac{P_{max} - P_0}{P_0} \right)^2 \quad (2.33)$$

Όταν το υγρό δεν βρίσκεται πλέον σε κατάσταση κορεσμού, οι φυσαλίδες με τη σειρά τους θα εξαφανιστούν αν η ροή μάζας δεν είναι ικανή να εξισορροπήσει το νόμο του Henry.

Η τιμή n_{th} αντιστοιχεί στο εύρος της πίεσης στο κατώτατο όριο για την ανάπτυξη της φυσαλίδας λόγω διάχυσης.

Η τιμή αυτή υπολογίστηκε από τον Strasberg:

$$n_{th} = \left(\frac{3}{2} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{2\sigma}{R_0 P_0} - \frac{c_\infty}{c_s} \right)^{1/2} \quad (2.34)$$

Και για ισόθερμη διαδικασία, ο τύπος γίνεται:

$$n_{th} = \left(\frac{3}{2} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \left(1 - \frac{c_\infty}{c_s} + \frac{2\sigma}{R_0 P_0} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{4\sigma}{3R_0 P_0} \right) \left(1 + \frac{2\sigma}{R_0 P_0} \right)^{-1/2} \quad (2.35)$$

Η ίδια τιμή υπολογίστηκε και με τη σχέση των Eller και Flynn για την περίπτωση που $c_s = c_\infty$:

$$n_{th} = \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \left(\frac{3\sigma}{R_0 P_0} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{\omega^2}{8\omega_0^2} \right)^{-1/2} \quad (2.36)$$

2.6 ΘΕΡΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ STEPANOV

Συμφώνα με τον Stepanov για όγκο υγρού V_l και μεταβολή της θερμοκρασίας κατά ΔT ισχύει η σχέση:

$$\rho_v V_v L = \rho_l V_l c_{pl} \Delta T \quad (2.37)$$

Η αδιαστατοποίηση της θερμοκρασιακής μεταβολής προκύπτει από τον τύπο:

$$\Delta T^* = \frac{\rho_v L}{\rho_l c_{pl}} \quad (2.38)$$

Ο παράγοντας-B Stepanov ορίζεται από το παρακάτω πηλίκο.

$$B = \frac{\Delta T}{\frac{\rho_v L}{\rho_l c_{pl}}} = \frac{V_v}{V_l} \quad (2.39)$$

Με βάση τους τύπους αυτούς οι ιδιότητες που αποδίδονται στο νερό για θερμοκρασία 20°C φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.2 Ιδιότητες νερού στους 20°C, σύμφωνα με Stepanov.

Fluid	Water
Temperature	20°C
$\frac{\rho_l}{\rho_v}$	58 000
ΔT^* (K)	0.010
Σ (m/s ^{3/2}) Brennen's parameter	3.9
$\frac{\Delta p_v^*}{\rho_l \alpha_l}$ (s ⁻¹)	1.0 x 10 ⁴

Η μεταβολή της πίεσης ατμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασιακή διαφορά:

$$\Delta p_v = \frac{dp_v}{dT} \Delta T \quad (2.40)$$

Η θερμοδυναμική εξίσωση του Clapeyron μπορεί να δώσει την κλίση της παραπάνω αναλογικής σχέσης καθώς συνυπολογίζει την πυκνότητα του ατμού του κάθε υγρού.

$$L = T \left[\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right] \frac{dp_v}{dT} \cong \frac{T_\infty}{\rho_v} \frac{dp_v}{dT} \quad (2.41)$$

Συνεπώς η κλίση αυτή προσεγγίζεται:

$$\frac{dp_v}{dT} \cong \frac{\rho_v L}{T_\infty} \quad (2.42)$$

Η παραπάνω σχέση αντιστοιχεί και σε οριακές μεταβολές των μεγεθών αυτών:

$$\Delta p_v^* = \frac{dp_v}{dT} \Delta T^* \quad (2.42)$$

Με βάση αυτούς τους υπολογισμούς η εξίσωση Rayleigh – Plesset θα πάρει 2 νέες μορφές οι οποίες είναι πιο απλουστευμένες και συνδυάζουν τις τιμές τόσο της θερμοκρασίας όσο και της πίεσης.

$$\rho \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right] = p_v(T_\infty - \Delta T) - p_\infty(t) \quad (2.43)$$

$$\rho \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right] + \frac{dp_v}{dT} \Delta T = p_v(T_\infty) - p_\infty(t) \quad (2.44)$$

2.7 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Η ροή θερμότητας φ στην επιφάνεια της φυσαλίδας είναι ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς ΔT :

$$\varphi = h\Delta T \quad (2.45)$$

Η ροή της θερμότητας από το υγρό εξισορροπεί την θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση και συνεπώς την ανάπτυξη φυσαλίδων.

$$h\Delta T(4\pi R^2) = \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) \rho_v L \quad (2.46)$$

Η «συμπύεση» κατά κάποιον τρόπο της θερμοκρασίας προκύπτει τελικά από τον τύπο:

$$\Delta T = \frac{\rho_v L}{h} \dot{R} \quad (2.47)$$

Η μετάφραση της μείωσης της θερμοκρασίας εισάγεται στην εξίσωση Rayleigh – Plesset:

$$\rho \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right] + \frac{dp_v}{dT} \frac{\rho_v L}{h} \dot{R} = p_v(T_\infty) - p_\infty \quad (2.48)$$

Η εξίσωση αυτή εν τέλει, μπορεί να εμπεριέχει και το χρόνο κατάρρευσης.

$$\left[\bar{R}\ddot{\bar{R}} + \frac{3}{2} \dot{\bar{R}}^2 \right] + \frac{1}{Nu} \frac{\Delta p_v^*}{\rho_l \alpha_l} \tau \dot{\bar{R}} = \frac{-C_p - \sigma_v}{2} \quad (2.49)$$

Στην τελευταία αυτή μορφή θεωρούμε ισότητα μεταξύ των συγκεκριμένων ηλικίων:

$$\frac{\Delta p_v^*}{\rho_l \alpha_l} \cong \frac{(\rho_v L)^2}{\rho_l^2 c_{p_l} T_\infty \alpha_l} \quad (2.50)$$

Ο θερμικός χρόνος που έχει περιγραφεί τ_T αρχικά ανάγεται στον τύπο:

$$\tau_T = Nu \frac{\rho_l \alpha_l}{\Delta p_v^*} \quad (2.51)$$

2.8 ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ

Ο πιο σημαντικός δείκτης που περιγράφει και αφορά στο φαινόμενο της σπηλαιώσης, είναι ο αριθμός σπηλαιώσης. Ο αριθμός αυτός ορίζεται από το παρακάτω πηλίκο με μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω:

$$\sigma_v = \frac{p_{ref} - p_v(T_\infty)}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2} \quad (2.52)$$

Απαραίτητος δείκτης είναι ο αριθμός συντήρησης της σπηλαιώσης:

$$\sigma_c = \frac{p_{ref} - p_v(T_\infty - \Delta T)}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2} \quad (2.53)$$

2.9 ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Οι φυσαλίδες κατά την κίνηση τους στο νερό, αφού αναπτυχθούν, υπακούν σε ένα σύνολο εξισώσεων που διέπουν την κίνηση των ρευστών.

Αρχή διατήρησης της μάζας του μίγματος:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m) = 0 \quad (2.54)$$

Αρχή διατήρησης της ορμής του μίγματος:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{u}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m \vec{u}_m) = -\nabla p + [\mu_m \cdot (\nabla \vec{u}_m + \nabla \vec{u}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \quad (2.55)$$

Εξίσωση μεταφοράς για τον ατμό:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m f_v) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m f_v) = R_e - R_c \quad (2.56)$$

Ο όρος R_e αντιστοιχεί στον ορισμό της δημιουργίας ατμών (εξάτμιση υγρού).

$$R_e = C_e \frac{\sqrt{k}}{\gamma} \rho_1 \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{p_1}} (1 - f_v - f_g) \quad (2.57)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για πιέσεις μικρότερες από την τάση ατμού ($p < p_v$).

Ο όρος που αντιστοιχεί στη συνθήκη $p > p_v$ είναι ο R_c . Ο όρος αυτός αντιστοιχεί στο βαθμό συμπύκνωσης του ατμού.

$$R_c = C_c \frac{\sqrt{k}}{\gamma} \rho_1 \rho_1 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{p_1}} \quad (2.58)$$

Οι όροι αυτοί προκύπτουν από τα μεγέθη:

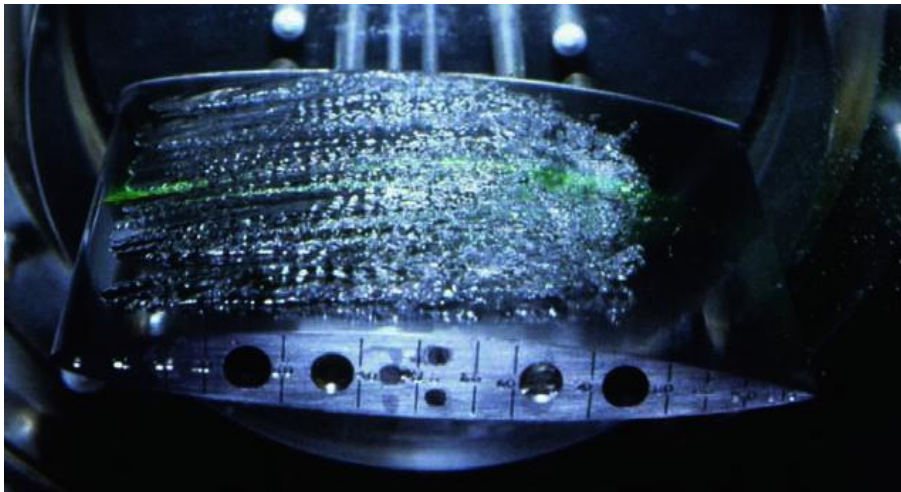
C_e , C_c : σταθερές οι οποίες έχουν δομηθεί με εμπειρικά κριτήρια, μετά από συγκρίσεις πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων, για ένα μεγάλο εύρος αρχικών συνθηκών και γεωμετριών.

k : κινητική ενέργεια (τοπικά).

γ : επιφανειακή τάση.

f_v : κλάσμα μάζας ατμού.

f_g : κλάσμα μάζας ασυμπίεστου αερίου.



Εικόνα 2.3 Σπηλαίωση πάνω σε πτερόγιο σε υδροδυναμικό τούνελ.

3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία έγινε μια προσπάθεια οπτικοποίησης του φαινομένου της σπηλαίωσης. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε κατάλληλη συσκευή, στην οποία, με τη βοήθεια κινητήρα, μεταδίδεται περιστροφική κίνηση σε μία πτερωτή μέσω του άξονα που τα συνδέει. Η όλη πειραματική διαδικασία γίνεται μέσα σε κλειστή δεξαμενή, μέσα στην οποία θα γίνεται η επανακυκλοφορία του νερού, επιδιώκοντας τη δημιουργία συνθηκών σπηλαίωσης. Οι παράμετροι, οι όποιοι εξετάστηκαν ως προς την επίδραση τους στο φαινόμενο της σπηλαίωσης ήταν: η ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής, η θερμοκρασία του ρευστού (νερό) και η κλίση των πτερυγίων της πτερωτής. Στις επόμενες ενότητες θα γίνει αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής της εν λόγω συσκευής.

3.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

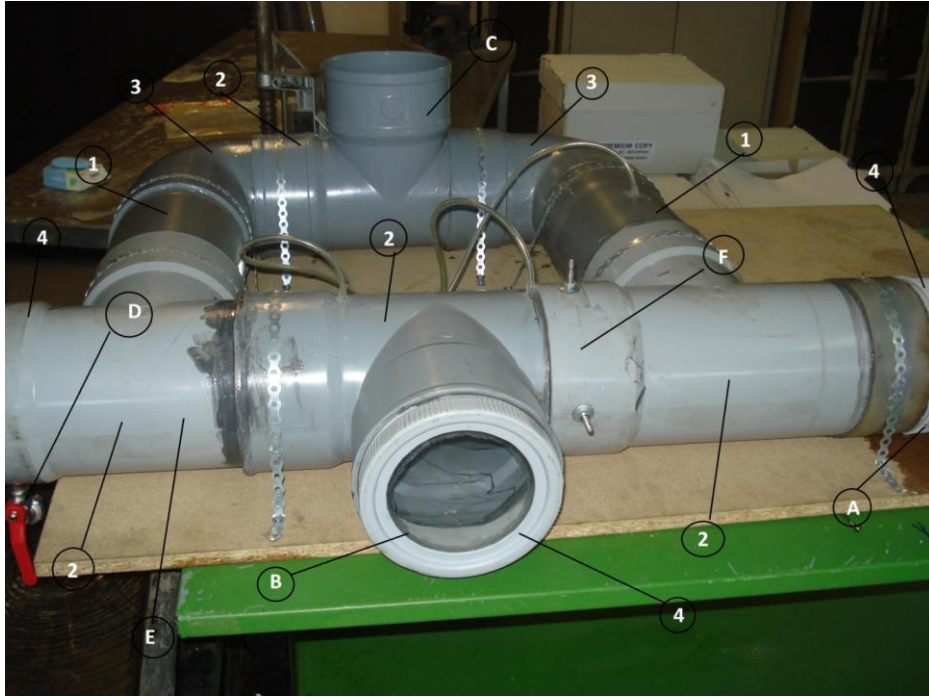
Τα υλικά που επιλέχθηκαν προέκυψαν ύστερα από μελέτη των συνθηκών που θα αναπτυχθούν, έτσι ώστε να είναι ανθεκτικά στις διάφορες φορτίσεις που θα προκύψουν κατά την διεξαγωγή του πειράματος. Αντίστοιχα, και οι συνδέσεις και οι συναρμογές ήταν ικανές να αντέξουν τις διάφορες φορτίσεις που θα προκύψουν.

Στην Εικ 3.1 φαίνεται η τελική μορφή της συσκευής που κατασκευάστηκε. Στην εικόνα είναι εμφανής η ακριβής διάταξη των σωληνώσεων, ενώ ταυτόχρονα επισημαίνονται με αριθμούς οι διάφοροι τύποι σωληνώσεων που χρησιμοποιήθηκαν.

- 1)PVC Σωλήνας Φ160 (μήκος ενός μέτρου).
- 2)PVC Σύνδεσης σωληνώσεων σε σχήμα ταυ Φ160 (X4).
- 3)PVC Σύνδεσης σωληνώσεων Φ160, σε γωνία 90° (X2).
- 4)PVC Τάπες βιδωτές Φ160 (X4).

Επίσης, με γράμματα υποδεικνύονται κάποια κρίσιμα σημεία της κατασκευής, τα οποία είναι τα εξής:

- A) Σημείο εισόδου του άξονα
- B) Σημείο παρακολούθησης του φαινομένου
- C) Σημείο τροφοδοσίας συσκευής με το ρευστό
- D) Κάνουλα αποστράγγισης της δεξαμενής
- E) Φίλτρο εξομάλυνσης ροής
- F) Σημείο έδρασης εμβαπτιζόμενης φωλιάς



Εικόνα 3.1 Συνδεσμολογία σωληνώσεων

3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ.

3.3.1 Σύνδεση σωληνώσεων

Όλες οι γωνίες και τα ταυ όπως και οι τάπες, πλύθηκαν με ακετυλένιο, ώστε να απομακρυνθούν, κατά το μέγιστο δυνατό, τυχόν σωματίδια και λιπαρές ουσίες από τις επιφάνειες τους, με σκοπό την επίτευξη καλύτερης συγκόλλησης,.

Οι σωληνώσεις διαμορφώθηκαν κατάλληλα και στη συνέχεια κολλήθηκαν, όπως φαίνεται στις επόμενες εικόνες. Αναλυτικότερα στην Εικ 3.2 παρουσιάζονται οι σωληνώσεις μετά την κατεργασία κοπής, στην Εικ 3.3 φαίνεται η επάλειψη των σωληνώσεων με κόλα και στην Εικ 3.4 η τελική σύνδεση των σωληνώσεων.



Εικόνα 3.2 Διαμόρφωση σωληνώσεων



Εικόνα 3.3 Διαδικασία κόλλησης σωληνώσεων.



Εικόνα 3.4 Τελική σύνδεση σωληνώσεων, μετά την ολοκλήρωση της κόλλησης.

3.3.2 Κρίσιμα σημεία κατασκευής

Τα πιο καίρια σημεία της κατασκευής είναι τα σημεία Α και Β της Εικ. 3.1.

Το Α είναι το σημείο από το οποίο θα περνά ο άξονας της περρωτής. Αυτό κάνει το σημείο Α το πιο κρίσιμο σημείο της κατασκευής, καθώς είναι απαραίτητη η χρήση ρουλεμάν για την ομαλή περιστροφή του άξονα. Ταυτόχρονα, κρίνεται αναγκαία η στεγανότητα των ρουλεμάν, τόσο για την σωστή λειτουργία όσο και για την προστασία τους από τη διάβρωση και τη φθορά, αλλά και γενικότερα για τη στεγανότητα της όλης συσκευής.

Από το Β σημείο θα γίνεται η παρατήρηση του φαινομένου. Στην τάπα που καλύπτει το ένα άκρο του ταυ ανοίχτηκε τρύπα, η οποία καλύφθηκε με τζάμι κυλινδρικής διατομής

3.3.3 Ξύλινη βάση

Η κατασκευή είναι τοποθετημένη σε ξύλινη στερεή βάση με πρόβλεψη για δεύτερο μοτέρ και χώρο για την εύκολη εισαγωγή των περιφερειακών μετρητικών οργάνων.

Η στερέωση επετεύχθη με τη χρήση διάτρητης γαλβανισμένης μεταλλικής ταινίας που βιδώθηκε σε οκτώ διαφορετικά σημεία. Η κατασκευή έχει γειωθεί επαρκώς για προστασία έναντι τυχών ηλεκτρικών διαρροών.



Εικόνα 3.5 Στερέωση συσκευής πάνω στη ξύλινη βάση με μεταλλικές ταινίες.

3.3.4 Κάνουλα αποστράγγισης

Για την εύκολη μετάγγιση του ρευστού και την αποστράγγιση της συσκευής, έχει τοποθετηθεί κάνουλα αποστράγγισης πριν το φίλτρο εξομάλυνσης ροής και συγκεκριμένα στο σημείο 4 της Εικ 3.1 .



Εικόνα 3.6 Κάνουλα αποστράγγισης.

3.4 ΑΞΟΝΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ

Ο άξονας περιστροφής χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να μεταδοθεί η περιστροφική κίνηση από τον κινητήρα στην πτερωτή. Ο άξονας, που χρησιμοποιήθηκε είναι από σωλήνα τύπου tube κράματος AISI/304L με εξωτερική διατομή $\Phi 35$ και εσωτερική $\Phi 32$. Κόπηκε από πριονοτροχό κατάλληλης σκληρότητας στις απαιτούμενες διαστάσεις. Λειάνθηκε για την διευκόλυνση της εισαγωγής των ρουλεμάν και τρυπήθηκε σε δράπανο με κατάλληλο τρυπάνι, στις επιθυμητές διαστάσεις, για την τοποθέτηση του κινητήρα και της βάσης της πτερωτής. Τα εν λόγω εξαρτήματα συνδέθηκαν στον άξονα με χρήση ντιζών, M6 και M4 αντίστοιχα.

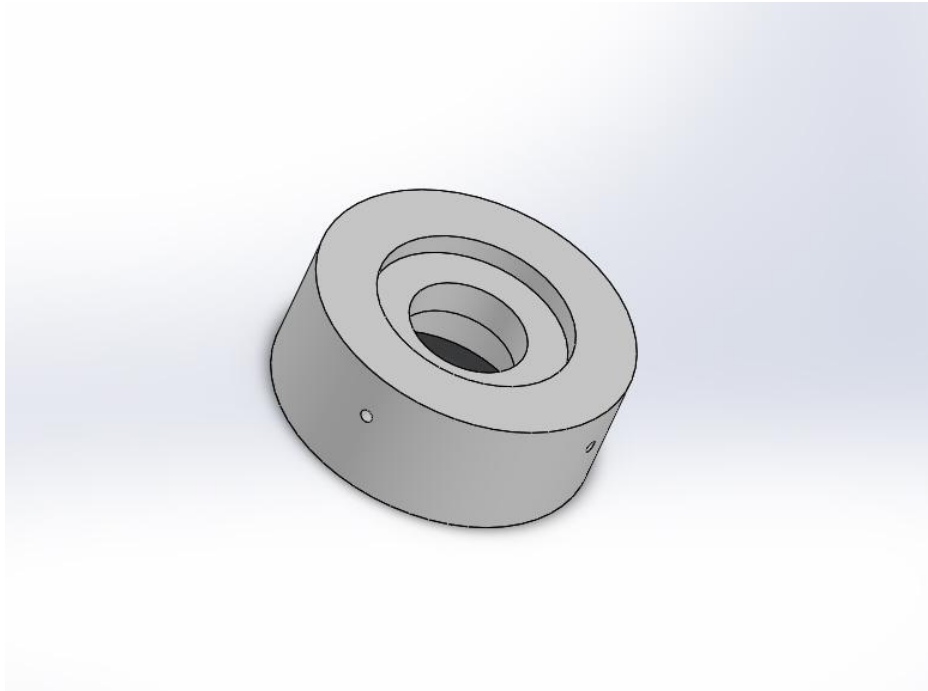


Εικόνα 3.7 Άξονας περιστροφής.

3.5 ΦΩΛΙΕΣ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ

Για να επιτευχτεί η απαραίτητη στεγανότητα και σταθερότητα κρίνεται απαραίτητη η κατασκευή φωλιών, ώστε να τοποθετηθούν μέσα τα ρουλεμάν. Για την περεταίρω στεγανοποίηση θα χρησιμοποιηθούν τσιμούχες.

3.5.1 Φωλιά εμβαπτιζόμενου ρουλεμάν



Σχήμα 3.1 Σκαρίφημα της φωλιάς εμβαπτιζόμενου ρουλεμάν [Solidworks].

Τμήμα πάρθηκε από αλουμίνιο για την δημιουργία της στεγανής εμβαπτιζόμενης φωλιάς του εσωτερικού ρουλεμάν. Το τμήμα τρυπήθηκε ομόκεντρα για να δημιουργηθεί ο διάδρομος ελεύθερης διέλευσης του άξονα. Μετέπειτα κατεργάστηκε και τροποποιήθηκε σε τόρνο για να αποκτήσει τις απαιτούμενες διαστάσεις, ώστε να υποδεχθεί το εσωτερικό ρουλεμάν. Ύστερα, τροποποιήθηκε ξανά και από τις δυο πλευρές, ώστε να υποδεχτεί τις δυο τσιμούχες και να επιτευχτεί η τέλεια στεγανοποίηση του. Τρυπήθηκε κατόπιν σε δράπανο στα τέσσερα σημεία στήριξης του και δημιουργήθηκαν τα κατάλληλα σπειρώματα συγκράτησης των ντιζών ευθυγράμμισης. Μετά την ολοκλήρωση της φωλιάς, τοποθετήθηκε πρεσαριστά το ρουλεμάν στο εσωτερικό της και λιπάνθηκε επαρκώς με την χρήση γράσου. Στη συνέχεια, σφραγίστηκε με τις τσιμούχες, οι οποίες τοποθετήθηκαν πρεσαριστά στην προβλεπόμενη θέση.

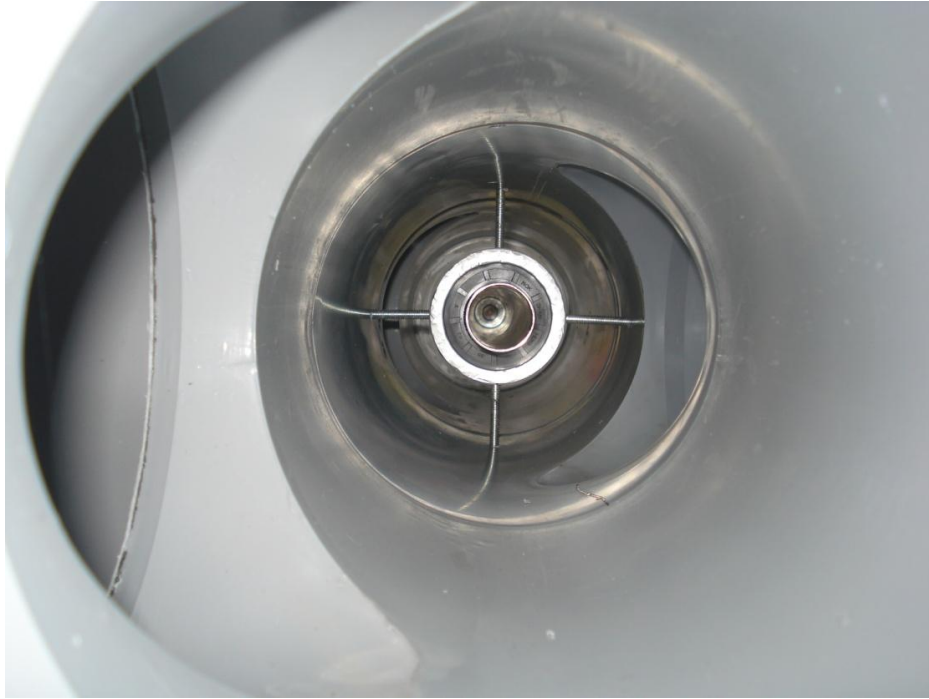


Εικόνα 3.8 Τελική εικόνα φωλιάς εμβαπτιζόμενου ρουλεμάν.

Στο σημείο της σύνδεσης F (Εικ. 3.1) τρυπήθηκε η κατασκευή σε τέσσερα σημεία. Οι τρύπες έχουν προσανατολισμό 90° μεταξύ τους αξονικά. Η παρέμβαση αυτή έγινε για το κεντράρισμα του άξονα και την επίτευξη της σταθερότητας της εμβαπτιζόμενης φωλιάς του ρουλεμάν. Όλες οι συναρμογές στεγανοποιήθηκαν επαρκώς με την χρήση φλάντζας και σιλικόνης, για να μην υπάρχουν διαρροές.

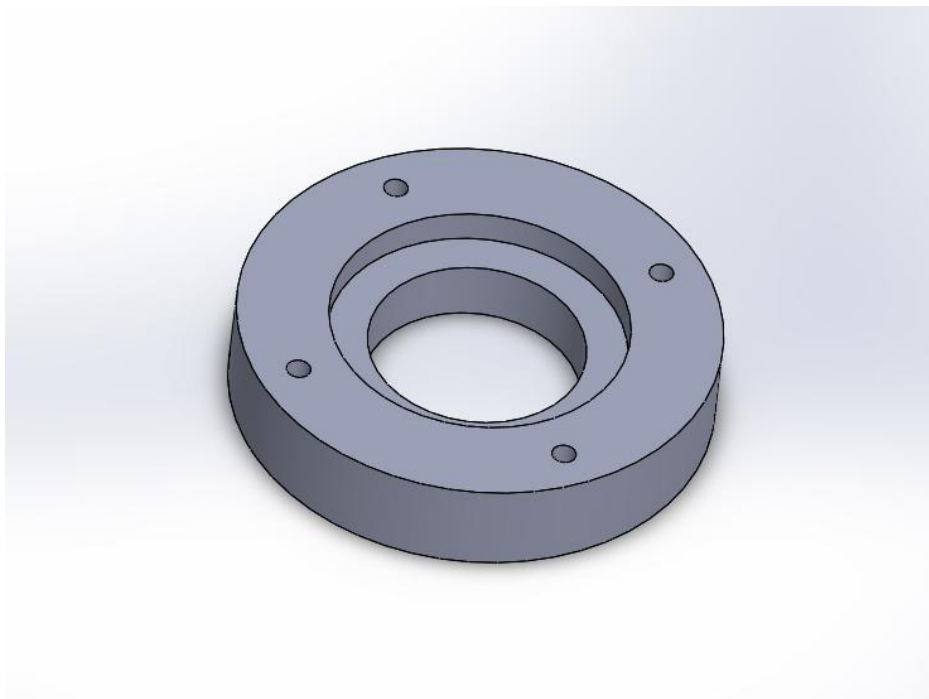


Εικόνα 3.9 Κατεργασία σύνδεσης φωλιάς εμβαπτιζόμενου ρουλεμάν με τη συσκευή.



Εικόνα 3.10 Κεντράρισμα φωλιάς εμβαπτιζόμενου ρουλεμάν στη σωλήνωση της συσκευής

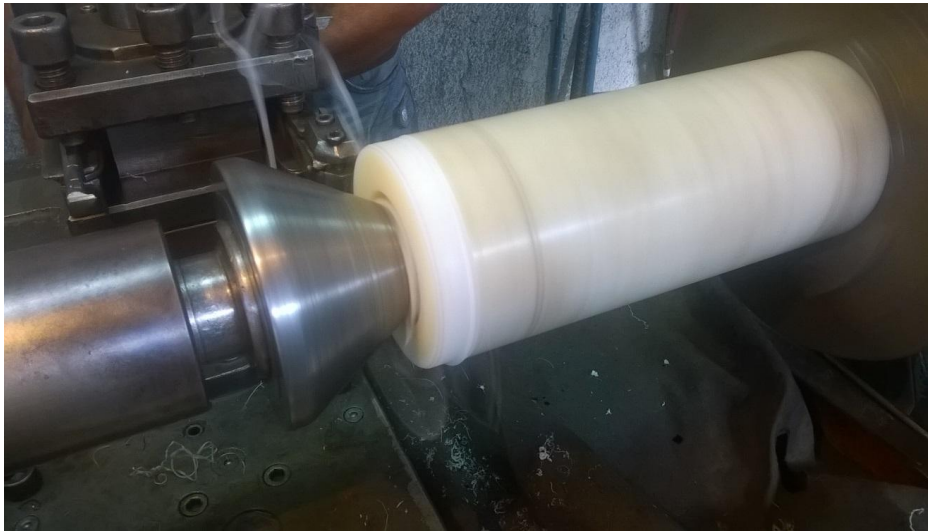
3.5.2 Φωλιά στεγανοποίησης εσωτερικής τσιμούχας



Σχήμα 3.2 Σκαρίφημα φωλιάς στεγανοποίησης εσωτερικής τσιμούχας [Solidworks].

Τμήμα πάρθηκε από τεφλόν για την δημιουργία εμβαπτιζόμενης φωλιάς στεγανοποίησης. Το τμήμα κατεργάστηκε και τροποποιήθηκε σε τόρνο για να αποκτήσει τις απαιτούμενες διαστάσεις, ώστε να υποδεχτεί την τσιμούχα στεγανοποίησης του άξονα περιστροφής. Κατόπιν τρυπήθηκε έκκεντρα σε

τέσσερα σημεία για την δημιουργία θέσεων σύσφιξης με την εξωτερική φωλιά έδρασης του δεύτερου ρουλεμάν, το οποίο θα παρουσιαστεί στην επόμενη ενότητα. Μετά την ολοκλήρωση της φλάντζας, η τσιμούχα τοποθετήθηκε πρεσαριστά στην προβλεπόμενη θέση



Εικόνα 3.11 Διαδικασία κατεργασίας φωλιάς στεγανοποίησης – καθάρισμα εξωτερικής επιφάνειας.



Εικόνα 3.12 Διαδικασία κατεργασίας φωλιάς στεγανοποίησης – κεντράρισμα για διάνοιξη οπών.

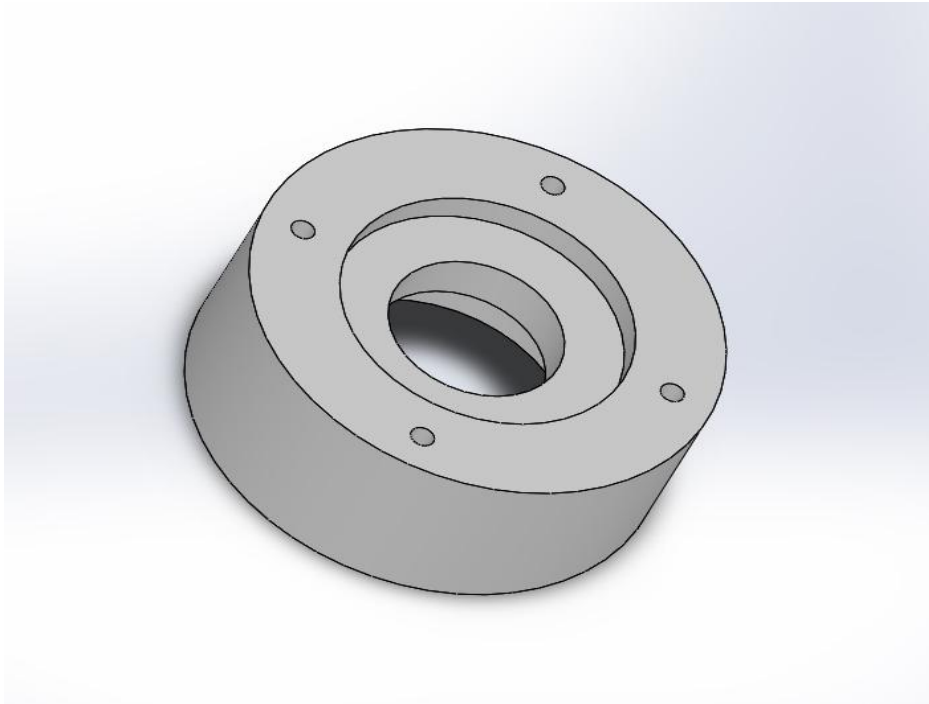


Εικόνα 3.13 Διαδικασία κατεργασίας φωλιάς στεγανοποίησης –διάνοιξη οπών.



Εικόνα 3.14 Τελική μορφή φωλιάς στεγανοποίησης εσωτερικής τσιμούχας.

3.5.3 Φωλιά εξωτερικού ρουλεμάν

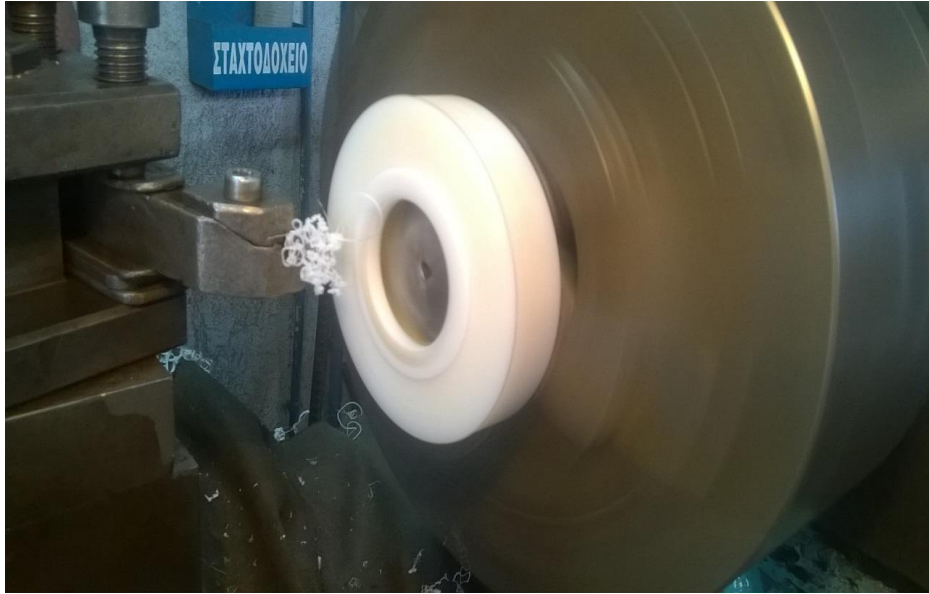


Σχήμα 3.3 Σκαρίφημα φωλιάς εξωτερικού ρουλεμάν [Solidworks].

Τμήμα πάρθηκε από τεφλον για την δημιουργία ξηρής φωλιάς έδρασης του εξωτερικού ρουλεμάν. Το τμήμα κατεργάστηκε και τροποποιήθηκε σε τόρνο, ώστε να υποδεχτεί το ρουλεμάν έδρασης και τον άξονα περιστροφής. Κατόπιν τρυπήθηκε έκκεντρα σε τέσσερα σημεία για την δημιουργία θέσεων σύσφιξης με τη φωλιά στεγανοποίησης εσωτερικής τσιμούχας. Μετά την ολοκλήρωση της φωλιάς, λιπάνθηκε επαρκώς το ρουλεμάν με γράσο και τοποθετήθηκε πρεσσαριστά στην προβλεπόμενη θέση.



Εικόνα 3.15 Διαδικασία κατεργασίας φωλιάς εξωτερικού ρουλεμάν – διαμόρφωση εσωτερικής διαμέτρου.



Εικόνα 3.16 Διαδικασία κατεργασίας φολιάς εξωτερικού ρουλεμάν – λείανση πίσω επιφάνειας.



Εικόνα 3.17 Διαδικασία κατεργασίας φολιάς εξωτερικού ρουλεμάν – διάνοιξη σπών.



Εικόνα 3.18 Τελική μορφή φωλιάς εξωτερικού ρουλεμάν.

3.6 ΣΥΝΔΕΣΗ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΦΩΛΙΕΣ

Η φωλιά εμβαπτιζόμενου ρουλεμάν περάστηκε στον άξονα μέχρι το προκαθορισμένο σημείο με τη βοήθεια σφυριού και μεγαλύτερης διαμέτρου σωλήνα. Κατόπιν, περάστηκε η φωλιά στεγανοποίησης εσωτερικής τσιμούχας χειροκίνητα. Επίσης, χειροκίνητα περάστηκε και η τάπα της δεξαμενής. Τέλος, περάστηκε η φωλιά εξωτερικού ρουλεμάν, χρησιμοποιώντας σφυρί και μεγαλύτερης διαμέτρου σωλήνα. Όλα βιδώθηκαν κατάλληλα και στερεώθηκαν στα προκαθορισμένα σημεία (Εικ. 3.19).



Εικόνα 3.19 Σύνδεση περιστρεφόμενου άξονα με φωλιές και τάπα δεξαμενής.



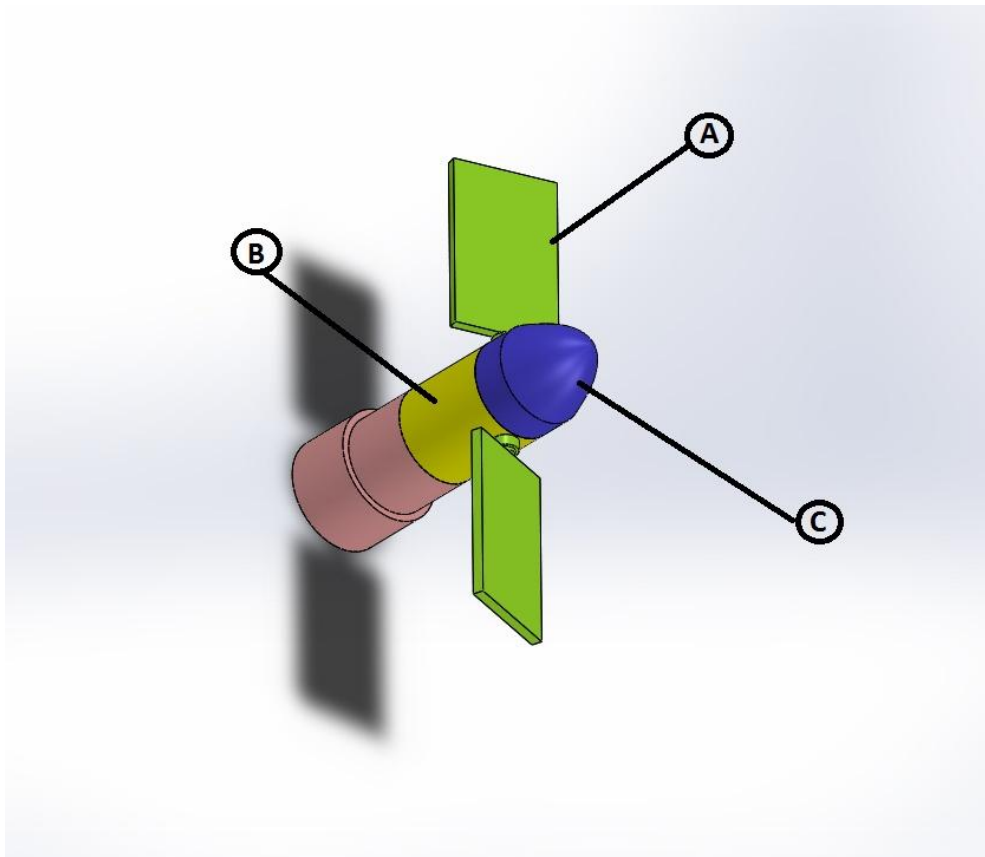
Εικόνα 3.20 Διαδικασία περάσματος φωλιάς στον άξονα με σφυρί και μεγαλύτερης διαμέτρου σωλήνα.

3.7 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ

Για τη μετάδοση της απαιτούμενης περιστροφικής κίνησης τοποθετήθηκε κινητήρας, ο οποίος στερεώθηκε κατάλληλα στη βάση της κατασκευής και προσαρτήθηκε στην υποδοχή του άξονα. Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι εναλλασσόμενης τάσης 230 V και 50 Hz, αερόψυκτος και ο τύπος του είναι ασύγχρονος μονοφασικός με βραχυκυκλωμένο δρομέα. Έχει δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας του από 420 rpm σε 2850 rpm. Ο κινητήρας επίσης, μπορεί να λειτουργήσει με δύο συνδεσμολογίες, δύο και δώδεκα πόλων. Για την καθυστέρηση φάσης απαιτείται ηλεκτρολυτικός πυκνωτής 14 μF , ο οποίος είναι κατάλληλα γειωμένος και αερίζεται επαρκώς.

3.8 ΠΤΕΡΩΤΗ

Η ενότητα αυτή αναφέρεται στον τρόπο κατασκευής της πτερωτής. Η πτερωτή θα τοποθετηθεί στο άκρο του άξονα, η οποία, παίρνοντας κίνηση από τον κινητήρα, οδηγεί στο φαινόμενο της σπηλαίωσης. Συγκεκριμένα, θα περιγραφεί ο τρόπος κατασκευής του κάθε επιμέρους κομματιού καθώς και τα εργαλεία, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή αυτών.



Σχήμα 3.4 Σκαρίφημα πτερωτής και συνδέσμου [Solidworks].

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η μορφή που θα έχει η πτερωτή, ενώ διακρίνονται τα επιμέρους κομμάτια της, τα οποία είναι τα εξής:

A: Πτερύγια

B: Οπίσθια τμήμα πτερωτής, βάση συγκράτησης των πτερυγίων

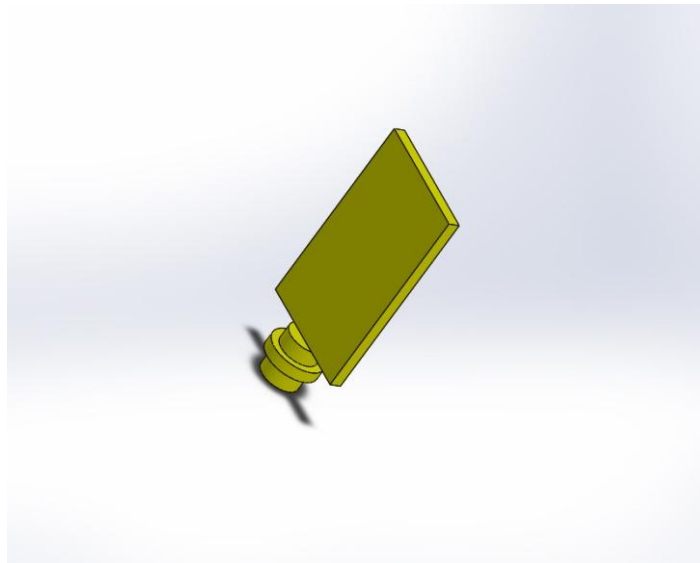
C: Εμπρόσθιο τμήμα της πτερωτής

D: Ντίτζες ένωσης της πτερωτής

E: Σύνδεσμος πτερωτής με περιστρεφόμενο άξονα, ο οποίος θα περιγραφεί στην επόμενη ενότητα.

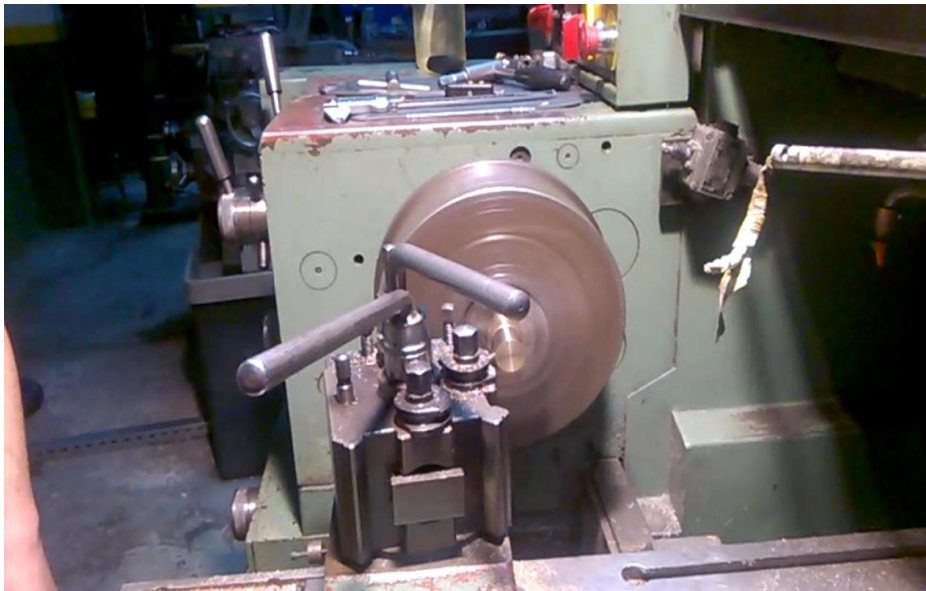
Το κάθε επιμέρους κομμάτι θα κατασκευασθεί ξεχωριστά και μετέπειτα θα συνδεθούν μεταξύ τους με χρήση ντιζών. Στις επόμενες παραγράφους, παρουσιάζεται με αναλυτικό τρόπο η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή του κάθε επιμέρους τμήματος.

3.8.1 Α: Πτερύγια.



Σχήμα 3.5 Σκαρίφημα πτερυγίου [Solidworks].

Συνολικά κατασκευάστηκαν δύο πτερύγια από ορείχαλκο. Για το κάθε πτερύγιο χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικό κομμάτι διατομής $\Phi 30$. Αρχικά, καθαρίζεται η εξωτερική επιφάνεια του κυλινδρικού τμήματος με τη χρήση τόννου. Στη συνέχεια, μειώνεται σταδιακά η διάμετρος του στο ένα άκρο, μέχρις ότου αποκτήσει διατομή $\Phi 10$.



Εικόνα 3.23 Διαδικασία καταργασίας πτερυγίου – καθαρισμός εξωτερικής επιφάνειας



Εικόνα 3.24 Πτερύγιο έπειτα από το πρώτο στάδιο της καταργασίας.

Έχοντας πλέον απομειωθεί η διατομή του ενός άκρου του κυλίνδρου, ακολουθεί η διαμόρφωση του πτερυγίου στο άλλο άκρο. Το κομμάτι μεταφέρεται στη φρέζα, όπου με διαδοχικά περάσματα του κοπτικού εργαλείου, το κυλινδρικό κομμάτι θα αποκτήσει την τελική επίπεδη επιφάνεια του πτερυγίου, όπως φαίνεται στην Εικ. 3.25.



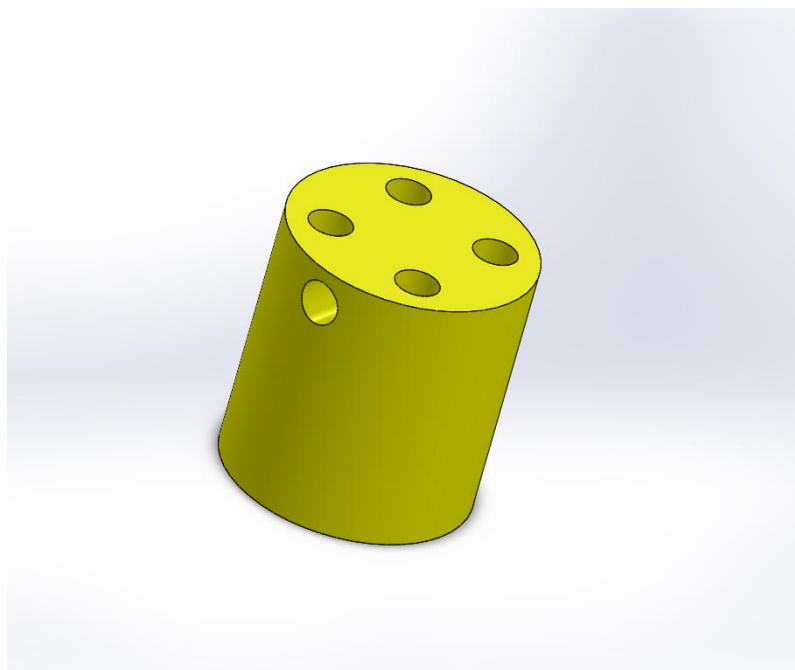
Εικόνα 3.25 Διαδικασία καταργασίας πτερυγίου φρεζάρισμα για τη διαμόρφωση της επίπεδης επιφάνειας του πτερυγίου.

Ολοκληρώνοντας, στο κυλινδρικό άκρο του εξαρτήματος διαμορφώνεται σπείρωμα M6 με την χρήση φιλιέρας, με σκοπό να συνδεθεί μετέπειτα με την οπίσθια βάση συγκράτησης των πτερυγίων. Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάζεται και το δεύτερο πτερύγιο και η τελική του μορφή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.26 Τελική μορφή πτερυγίου.

3.8.2 Β: Οπίσθια τμήμα πτερωτής, βάση συγκράτησης των πτερυγίων.



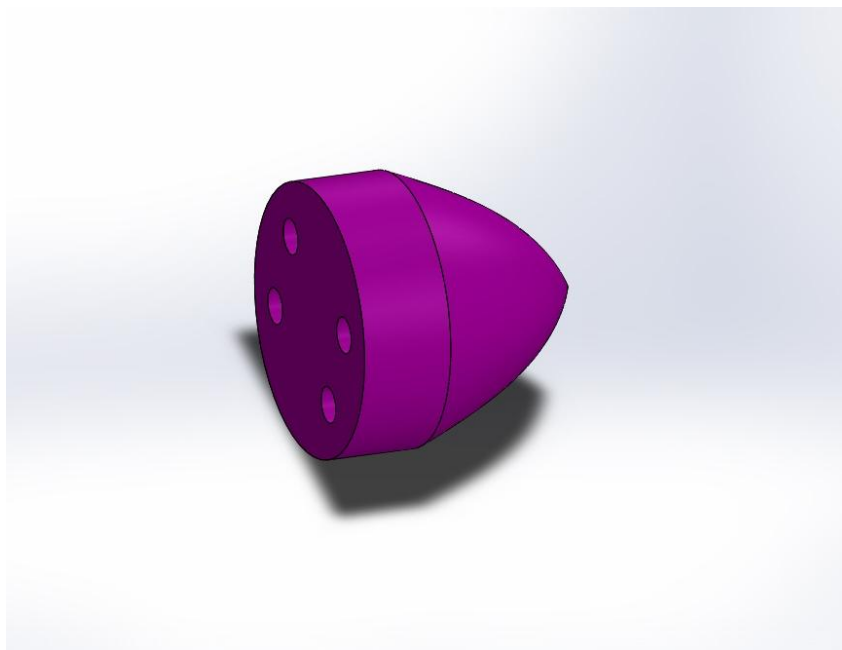
Σχήμα 3.6 Σκαρίφημα οπίσθιου τμήματος πτερωτής.

Το συγκεκριμένο εξάρτημα αποτελεί το οπίσθιο μέρος της πτερωτής, στο οποίο αφενός βιδώνονται τα δύο πτερύγια και αφετέρου ενώνεται με ντίζες με τον σύνδεσμο που θα περιγραφεί στην επόμενη παράγραφο. Για την κατασκευή της χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικό

κομμάτι από ορείχαλκο, διατομής Φ30. Αρχικά, καθαρίζεται η εξωτερική του επιφάνεια με τη χρήση τόνου.

Στη συνέχεια, με δρέπανο γίνεται διάνοιξη τεσσάρων οπών κατά μήκος του κυλίνδρου, από τις οποίες θα περάσουν οι ντίζες ένωσης της περωτής με τα υπόλοιπα εξαρτήματα. Με αντίστοιχο τρόπο, διαμορφώνονται δύο οπές στα πλάγια του κυλίνδρου και σε αντιδιαμετρικά σημεία μεταξύ τους. Οι τελευταίες οπές χρησιμεύουν για τη σύνδεση των πτερυγίων και για το λόγο αυτό διαμορφώνονται σπειρώματα με τη χρήση σπειροτόμου.

3.8.3 C: Εμπρόσθια τμήμα της περωτής.



Σχήμα 3.7 Σκαρίφημα εμπρόσθιου τμήματος περωτής [Solidworks].

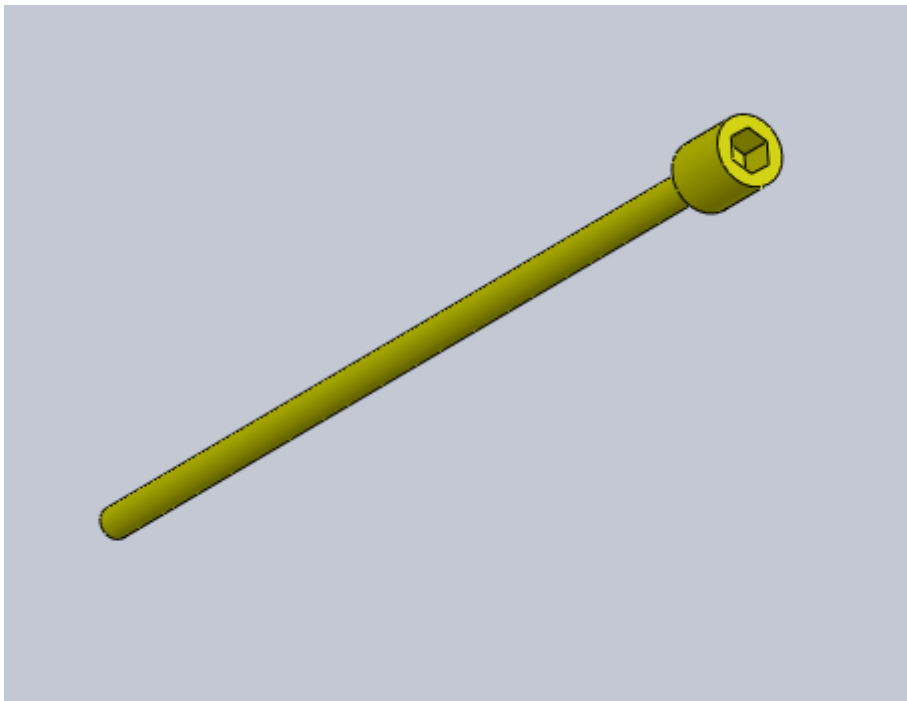
Το τελικό, εμπρόσθιο κομμάτι της περωτής απαρτίζεται από μία υδροδυναμική κωνική κεφαλή, η οποία συμβάλλει στην ομαλή κυκλοφορία του νερού. Όμοια με τα προαναφερθέντα επιμέρους τμήματα της περωτής, χρησιμοποιήθηκε κύλινδρος από ορείχαλκο διατομής Φ30, του οποίου η εξωτερική επιφάνεια καθαρίζεται με τόνου. Στη συνέχεια, διαμορφώνεται η κωνικότητα στο εμπρόσθιο μέρος του εξαρτήματος, χρησιμοποιώντας γυαλόχαρτο και ταυτόχρονα λειαίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο η επιφάνεια του.



Εικόνα 3.27 Διαμόρφωση υδροδυναμικής κωνικής κεφαλής εμπρόσθιου τμήματος περωτής.

Τέλος, ακολουθεί διάνοιξη, με δρέπανο, τεσσάρων οπών κατά μήκος του κυλίνδρου, στις οποίες διαμορφώνεται σπείρωμα M4 με σπειροτόμο. Στις οπές αυτές θα βιδωνονται οι ντίζες ένωσης της περωτής.

3.8.4 D: Ντίζες ένωσης της περωτής.



Σχήμα 3.8 Σκαρίφημα ντίζας [Solidworks].

Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις ντίζες για την ένωση: α) του εμπρόσθιου και του οπίσθιου τμήματος της περωτής μεταξύ τους και β) της περωτής με τα υπόλοιπα εξαρτήματα του μηχανισμού. Πρόκειται για ανοξείδωτες ντίζες εμπορίου, σπειρώματος M4.

3.8.5 Σύνδεση πτερωτής

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η διαδικασία σύνδεσης των επιμέρους τμημάτων της πτερωτής. Αρχικά, πριν τη σύνδεση των τμημάτων, χρησιμοποιήθηκαν λίμα και γυαλόχαρτο για τα απαραίτητα φινιρίσματα τους. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι το εμπρόσθιο και οπίσθιο τμήμα της πτερωτής συνδέθηκαν μεταξύ τους με ντίζες. Ωστόσο, σημειώνεται ότι, προκειμένου να διασφαλισθεί η μη έκκεντρη περιστροφή της πτερωτής, τα κομμάτια Β, C και D ενώθηκαν με τη βάση του άξονα, που θα περιγραφεί στην επόμενη παράγραφο. Τέλος, βεβαιωθήκαμε για την αξιοπιστία των διαστάσεων του συναρμολογούμενου εξαρτήματος και της συμμετρίας των επιμέρους μερών του.



Εικόνα 3.28 Σύνδεση επιμέρους τμημάτων του άξονα πτερωτής.

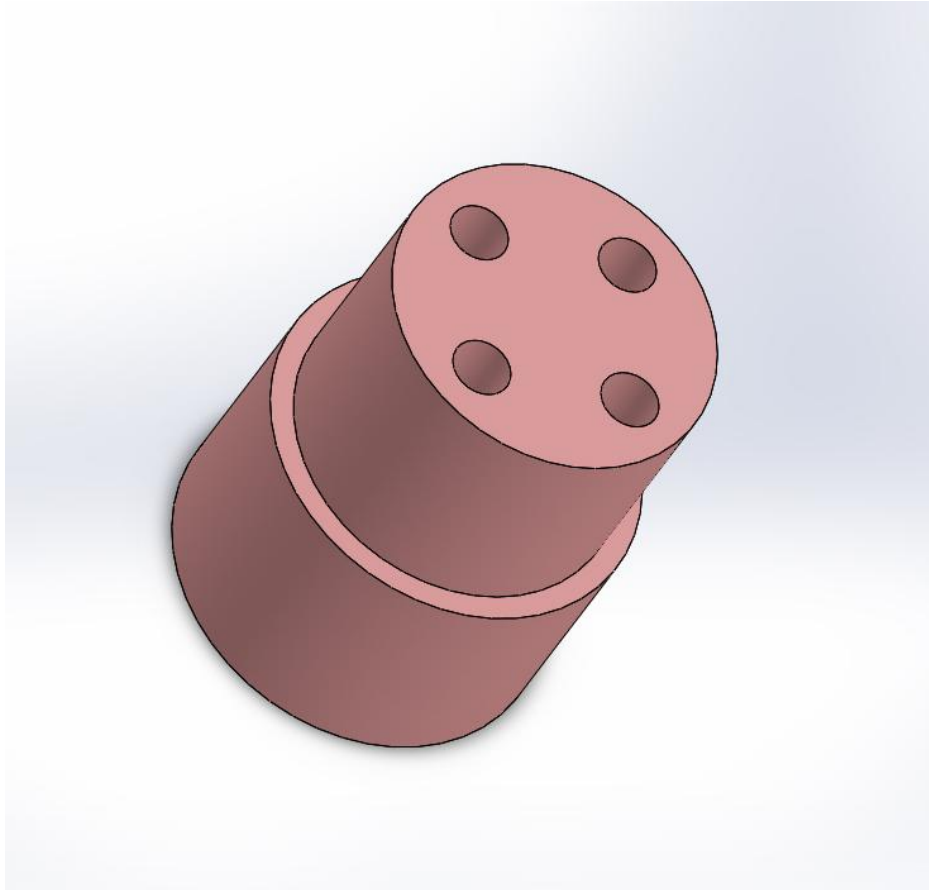
Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι, όσον αφορά στη σύνδεση των πτερυγίων με την υπόλοιπη πτερωτή, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικού μεγέθους αποστάτες, ώστε να είναι δυνατή η μεταβολή της κλίσης. Οι διαφορετικές κλίσεις των πτερυγίων είναι απαραίτητες για τη διεξαγωγή του πειράματος, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή της στο φαινόμενο της σπηλαίωσης.



Εικόνα 3.29 Τελική μορφή πτερωτής.

3.9 ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΠΤΕΡΩΤΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΑΞΟΝΑ

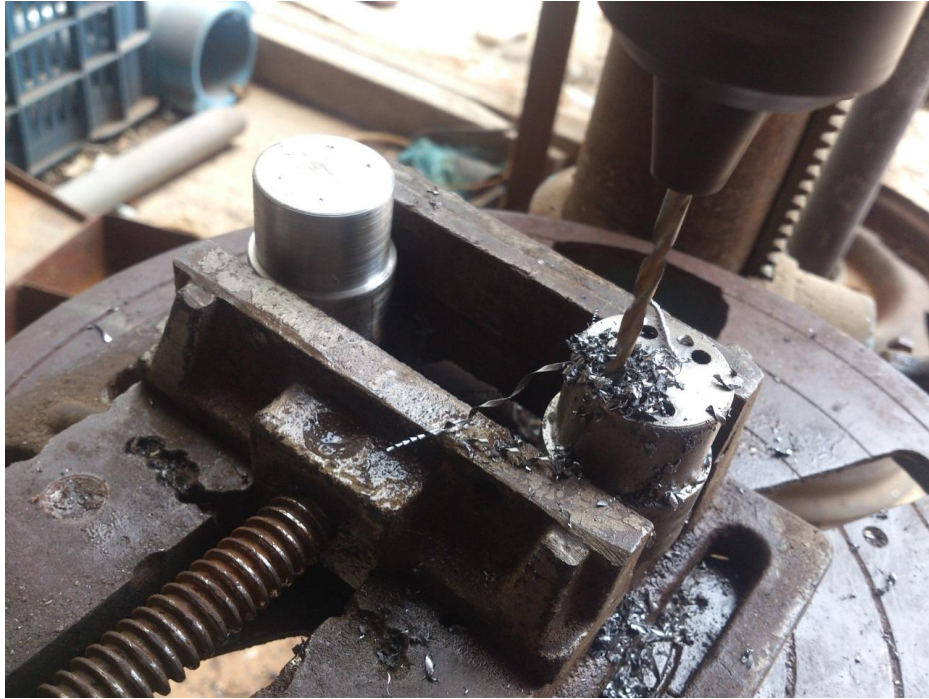
Κυλινδρικό μεταλλικό δοκίμιο διαμορφώθηκε στις κατάλληλες διαστάσεις με τη χρήση τόρνου για να χρησιμοποιηθεί ως βάση στήριξης της πτερωτής. Τρυπήθηκε έκκεντρα σε τέσσερα σημεία για την προσάρτηση της πτερωτής πάνω σε αυτό. Η μια του πλευρά προσαρμόστηκε κατάλληλα στην εσωτερική διάσταση του ανοξείδωτου άξονα, ώστε να εφάπτεται επακριβώς. Κατόπιν δημιουργήθηκε οπή στερέωσης που ταιριάζει ακριβώς με την οπή του άξονα με σκοπό την συναρμογή τους



Σχήμα 3.9 Σκαρίφημα συνδέσμου πτερωτής με περιστροφικό άξονα [Solidworks].



Εικόνα 3.30 Διαδικασία κατεργασίας συνδέσμου – καθάρισμα εξωτερικής επιφάνειας.



Εικόνα 3.31 Διαδικασία κατεργασίας συνδέσμου – διάνοιξη οπών.

Στο εσωτερικό άκρο του άξονα στερεώθηκε η σιδερένια βάση της περωτής. Στη συνέχεια, βιδώθηκε, ώστε να επιτευχθεί η πλήρης συναρμογή αυτής και η ομόκεντρη τοποθέτησή της. Επίσης, υπήρξε πρόβλεψη στεγάνωσης του εσωτερικού του άξονα με τεφλόν.



Εικόνα 3.32 Σύνδεση περωτής με περιστροφικό άξονα.

Εσωτερικά στο σημείο Ε (Εικ 3.1) έχει τοποθετηθεί μια κατασκευή εξομάλυνσης της ροής, με σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη ομοιομορφία των ροϊκών γραμμών του ρευστού και την επίτευξη στρωτής ροής.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

4.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

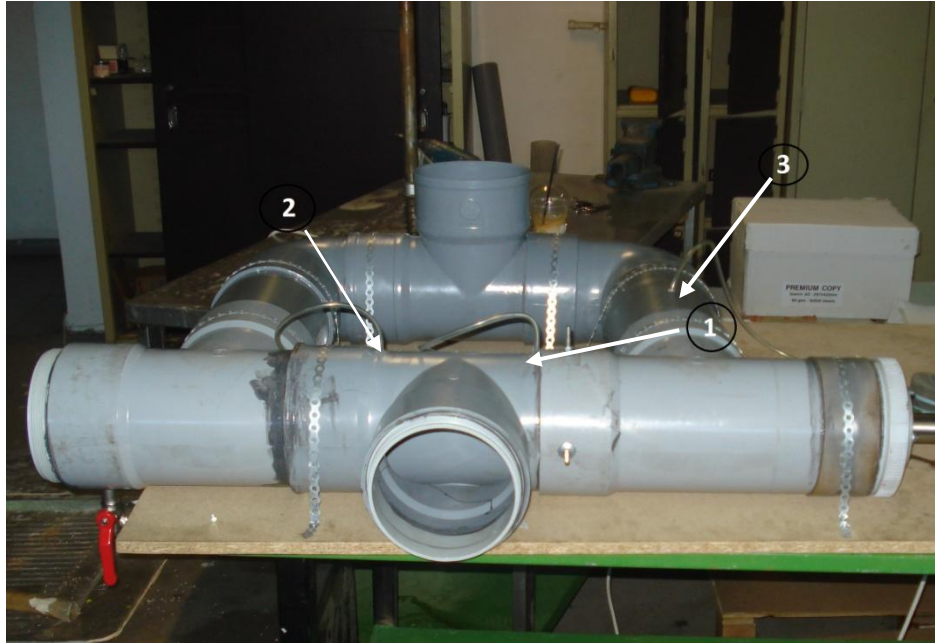
Σκοπός της πειραματικής συσκευής είναι η οπτικοποίηση του φαινομένου της σπηλαίωσης. Επίσης θα μελετηθεί πειραματικά κατά πόσο το φαινόμενο αυτό και κυρίως η πίεση του ρευστού, επηρεάζεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- 1) η θερμοκρασία του ρευστού (νερό)
- 2) η μεταβολή της κλίσης των πτερύγιων
- 3) η ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής

Ακόμη, μελετήθηκε κατά πόσο μεταβάλλεται η ένταση του ήχου ανάλογα με την ένταση του φαινομένου, χρησιμοποιώντας ειδικό όργανο μέτρησης του ήχου.

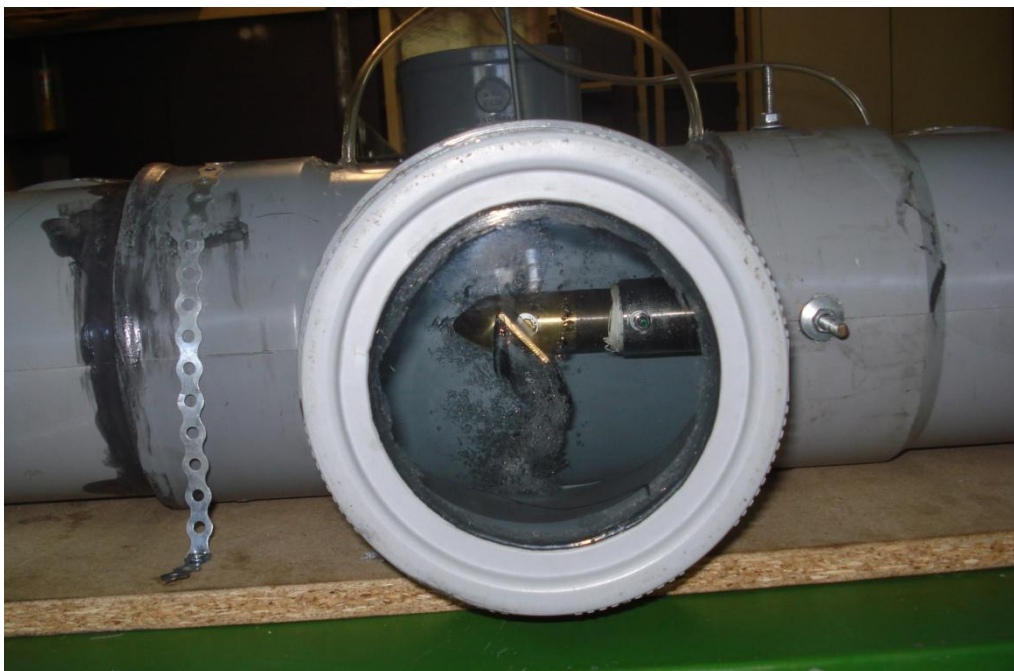
4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφαλαίο 3, για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένας κινητήρας με δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας του από 420 rpm σε 2850 rpm. Επίσης, για την εξαγωγή μετρήσεων σχετικά με τις πιέσεις που αναπτύσσονται στο ρευστό μέσα στη δεξαμενή, χρησιμοποιήθηκαν μανομετρικοί σωληνίσκοι σε διάφορα σημεία της δεξαμενής, οι οποίοι υποδεικνύονται με βέλη στην Εικ 4.1. Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι, η πίεση στη σημείο 1 αντιστοιχεί στην πίεση αναρροφήσεως (P1), στο σημείο 2 στην πίεση κατάθλιψεως (P2) και στο σημείο 3 σε μία τυχαία πίεση που έπεται της κατάθλιψεως και προηγείται της αναρροφήσεως (P3). Οι πιέσεις προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τη μεταβολή του ύψους των σωληνίσκων κατά τη διάρκεια του πειράματος. Τέλος, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του ρευστού μέσα στη δεξαμενή, χρησιμοποιήθηκε αναλογικό θερμόμετρο με ακρίβεια μέχρι και 1°C και δυνατότητα μέτρησης από 0-120°C.



Εικόνα 4.1 Σημεία μέτρησης της πίεσης του ρευστού στην πειραματική διάταξη.

Συνολικά διεξήχθησαν οχτώ πειράματα στα οποία μεταβαλλόταν μία από τις εξεταζόμενες παραμέτρους. Αναλυτικότερα, τα τέσσερα πρώτα πειράματα αναφέρονται σε κλίση 1 (35°) των πτερυγίων, ενώ στα υπόλοιπα τέσσερα η κλίση των πτερυγίων αυξήθηκε στην κλίση 2 (45°), χρησιμοποιώντας κατάλληλους, αποστάτες. Στα πειράματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από ίδια κλίση πτερυγίων μεταβλήθηκε η ταχύτητα του κινητήρα (420 rpm ή 2850 rpm) καθώς και η θερμοκρασία του ρευστού στη δεξαμενή (με εισαγωγή νερού δικτύου ή ζεστού νερό έπειτα από βρασμό). Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι προκειμένου να γίνει αλλαγή της κλίσης των πτερυγίων, απαιτήθηκε πλήρης αποστράγγιση της δεξαμενής.



Εικόνα 4.2 Εικόνα του φαινομένου της σπηλαιώσης κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, που αναφέρονται σε κοινή κλίση των πτερυγίων (35° ή 45°). Συγκεκριμένα, δίνονται οι μετρήσεις σχετικά με τη διαφορά πίεσης, ΔP . Το μέγεθος αυτό υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$\Delta P = \rho gh \quad (4.1)$$

όπου:

ρ : πυκνότητα ρευστού

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

h : μεταβολή του ύψους του σωληνίσκου κατά τη διάρκεια του πειράματος

Επίσης, σύμφωνα με τη μέτρηση του ΔP μπορεί πλέον να προσδιοριστεί η αντίστοιχη πίεση P ως άθροισμα της ΔP και της ατμοσφαιρικής πίεσης. Για το κάθε πείραμα προσδιορίζονται τρεις πιέσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στα τρία σημεία της δεξαμενής. Τέλος, δίνονται οι σχετικές μετρήσεις για τη θερμοκρασία του ρευστού και του θορύβου, που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Πίνακας 4.1 Μετρήσεις με κλίση πτερυγίων 35°.

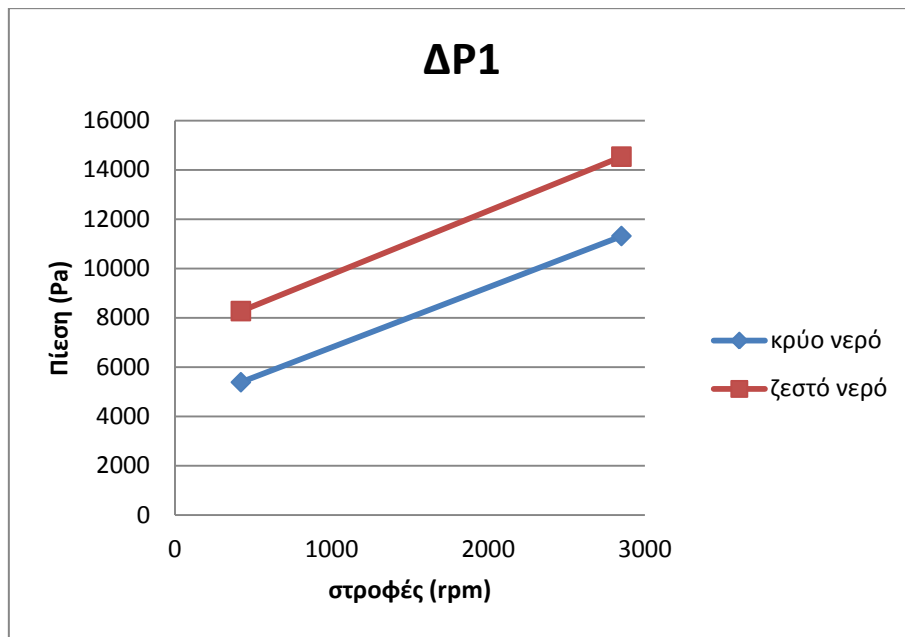
Κλίση 1 (35°)	Στροφές (rpm)	$\Delta P1$	$P1$ (Pa)	$\Delta P2$	$P2$ (Pa)	$\Delta P3$	$P3$ (Pa)	T_N (°C)	Θόρυβος (db)
Νερό δικτύου	420	5384	106709	-4779	96546	25391	126716	27	62
	2850	11312	112637	-7025	94300	29479	130804	28	65
Νερό ζεστό	420	8268	109593	-4779	96546	25391	126716	36	62
	2850	14530	115855	-9168	92157	33839	135164	35	66

Πίνακας 4.2 Μετρήσεις με κλίση πτερυγίων 45°.

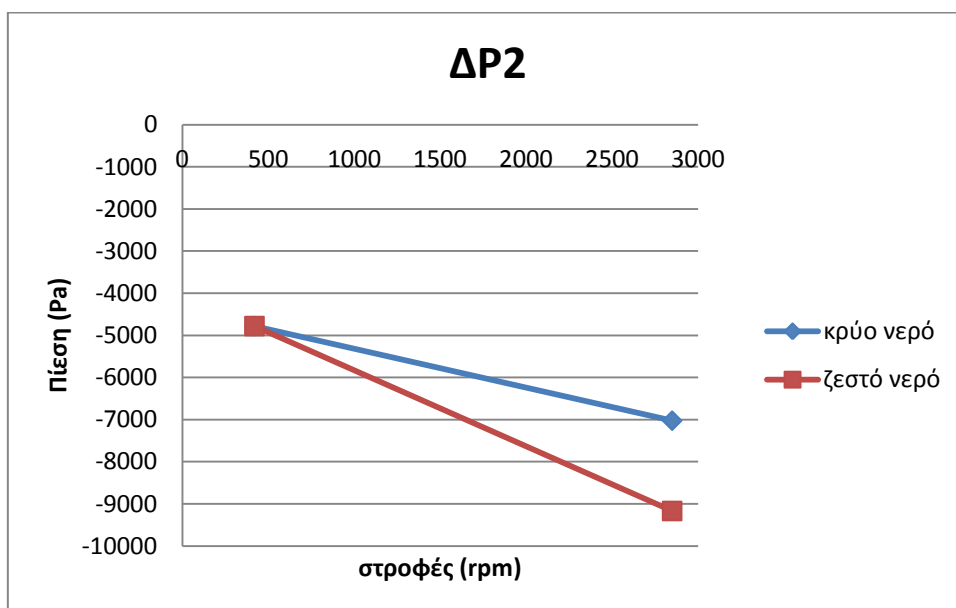
Κλίση 2 (45°)	Στροφές (rpm)	$\Delta P1$	$P1$ (Pa)	$\Delta P2$	$P2$ (Pa)	$\Delta P3$	$P3$ (Pa)	T_N (°C)	Θόρυβος (db)
Νερό δικτύου	420	2647	103972	-2425	98900	8267	109592	28	60
	2850	8268	109593	-7025	94300	14530	115855	28	64
Νερό ζεστό	420	5383	106708	-7025	94300	11312	112637	36	61
	2850	8268	109593	-9168	92157	14530	115855	34	65

Στη συνέχεια, δίνονται σε διαγραμματική μορφή τα σχετικά αποτελέσματα των μετρήσεων, όσον αφορά στη διαφορά πίεσεως ΔP συναρτήσει της ταχύτητας του κινητήρα.

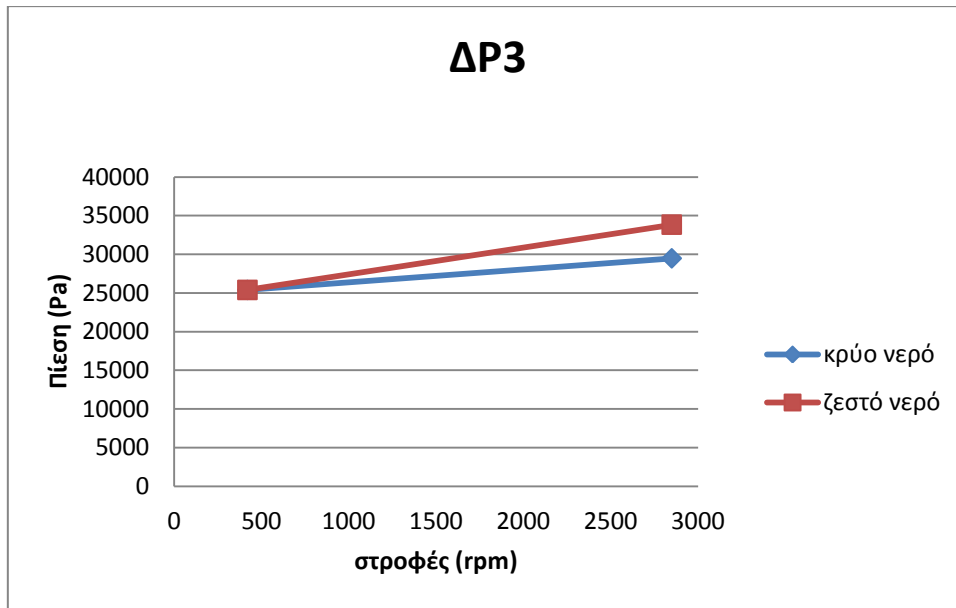
Συγκεκριμένα, δίνεται ξεχωριστό διάγραμμα για τη διαφορά πίεσης σε κάθε σημείο και για κάθε κλίση του πτερυγίου. Τέλος, στο κάθε διάγραμμα δίνονται δύο καμπύλες με τη μία να αναφέρεται στις μετρήσεις με νερό δικτύου και την άλλη στις αντίστοιχες με ζεστό νερό.



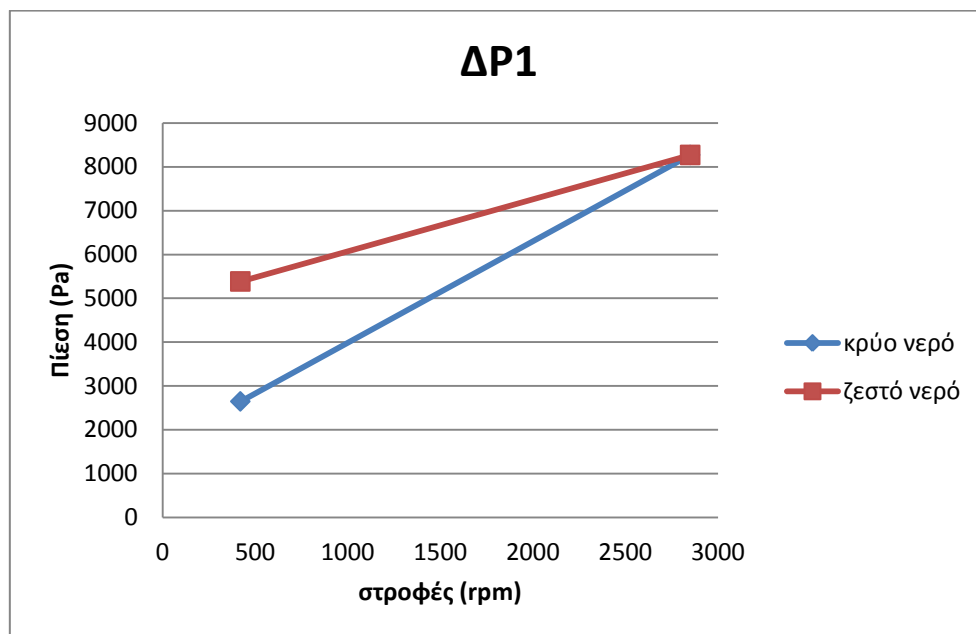
Σχήμα 4.1 Διαφορά πίεσεως αναρρόφησης, συναρτήσεως της ταχύτητας του κινητήρα, για κλίση πτερυγίου 35°.



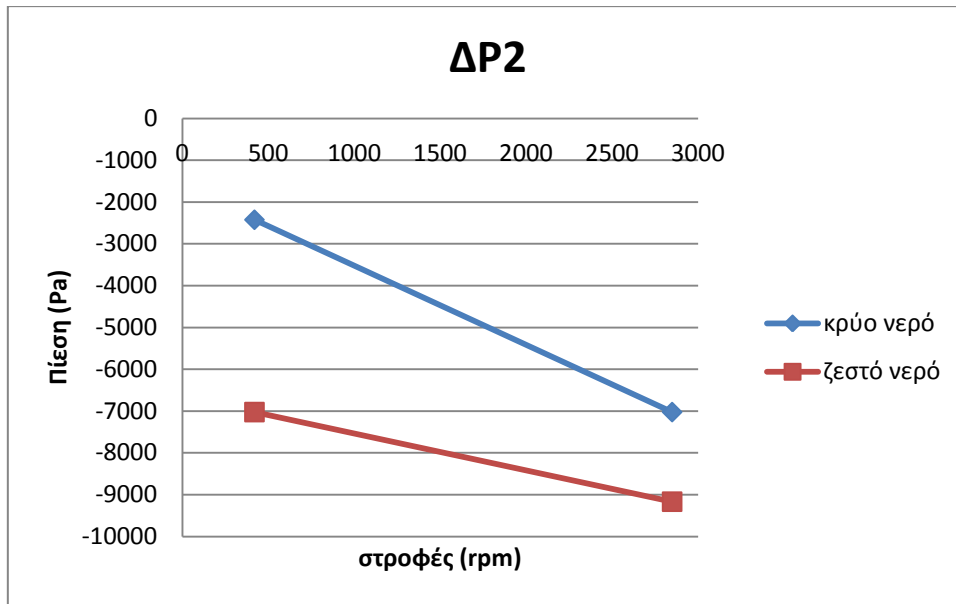
Σχήμα 4.2 Διαφορά πίεσεως καταθλίψεως, συναρτήσεως της ταχύτητας του κινητήρα, για κλίση πτερυγίου 35°.



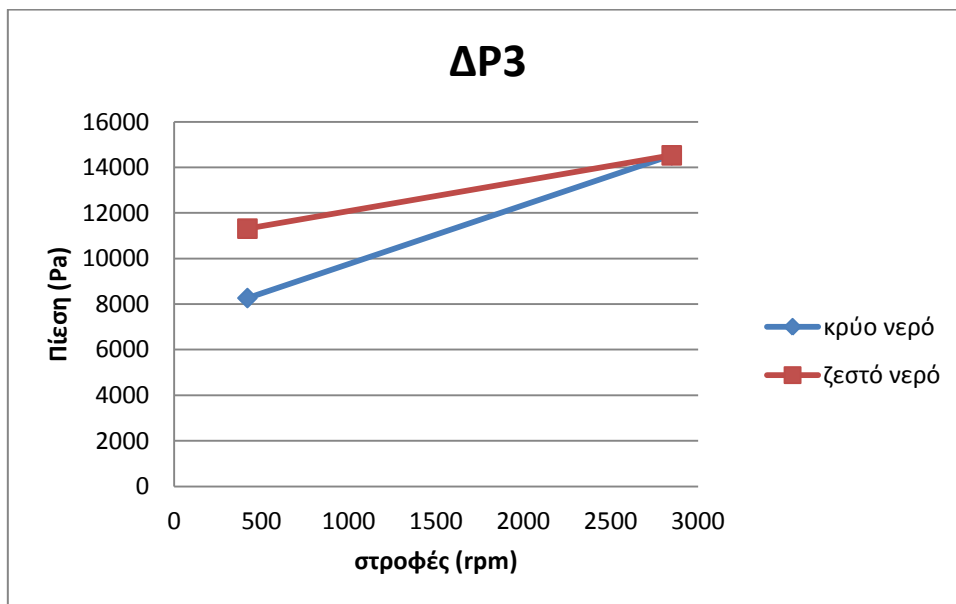
Σχήμα 4.3 Διαφορά πίεσεως σε τυχαίο σημείο, συναρτήσει της ταχύτητας του κινητήρα, για κλίση πτερυγίου 35°.



Σχήμα 4.4 Διαφορά πίεσεως αναρρόφησης, συναρτήσει της ταχύτητας του κινητήρα, για κλίση πτερυγίου 45°.



Σχήμα 4.5 Διαφορά πίεσης καταθλίψεως, συναρτήσει της ταχύτητας του κινητήρα, για κλίση πτερυγίου 45°.



Σχήμα 4.6 Διαφορά πίεσης σε τυχαίο σημείο, συναρτήσει της ταχύτητας του κινητήρα, για κλίση πτερυγίου 45°.

4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα παραπάνω αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- ✓ Η ένταση του θορύβου αυξήθηκε με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.
- ✓ Αμελητέα μεταβολή του θορύβου παρατηρήθηκε κατά την αλλαγή της θερμοκρασίας του εισαγόμενου νερού.

- ✓ Κατά την μεταβολή της κλίσης των πτερυγίων από 35° σε 45° το φαινόμενο της σπηλαίωσης μειώθηκε αισθητά. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν ισχύει για την περίπτωση του εκλυόμενου θορύβου. Συγκεκριμένα, αν και το φαινόμενο περιορίστηκε οπτικά, ο θόρυβος μειώθηκε μόνο κατά 1-3db.
- ✓ Η μεταβολή της πίεσης, ως προς την ατμοσφαιρική, ήταν πιο έντονη όταν η θερμοκρασία του εισαγόμενου νερού ήταν υψηλότερη. Πρόκειται για ένα γενικό φαινόμενο που παρατηρήθηκε σε όλα τα διαγράμματα. Γενικά, η εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαίωσης είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία του ρευστού. Ωστόσο, το φαινόμενο φαίνεται να εντατικοποιείται στις υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, κάτι τέτοιο οδηγεί σε μεγαλύτερες αυξομειώσεις της πίεσης κατά μήκος της ροής.
- ✓ Όσον αφορά στη μεταβολή της κλίσης των πτερυγίων, όπως προαναφέρθηκε, το φαινόμενο είναι πιο έντονο στην περίπτωση της κλίσης εκείνης των 35°. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με την ταχύτητα ροής και τη γωνιακή ταχύτητα της πτερωτής, το φαινόμενο της σπηλαίωσης ήταν δυνατό να αναπτυχθεί για ένα μεγάλο εύρος κλίσης των πτερυγίων. Παρ' όλα αυτά, για τυπικούς λόγους εξετάστηκαν μόνο δύο γωνίες, ώστε να αποδειχθεί πόσο καθοριστικής σημασίας είναι η παράμετρος αυτή για το φαινόμενο.
- ✓ Σε κάθε περίπτωση, η σπηλαίωση εμφανίζεται μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό στροφών και συνεχίζει έως έναν επίσης κρίσιμο αριθμό στροφών, όπου πλέον παύει να είναι ορατή. Σε όλες τις μετρήσεις, ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας τους ρευστού και της κλίσης των πτερυγίων, το φαινόμενο ήταν πιο έντονο στις περιπτώσεις εφαρμογής υψηλής περιστροφικής ταχύτητας. Επομένως, οι μεταβολές στην πίεση τόσο στην αναρρόφηση όσο και στην υπόλοιπη ροή ήταν μεγαλύτερη στην υψηλή ταχύτητα (2850 rpm), γεγονός που δεν άλλαζε καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος μέχρι και την περάτωση του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

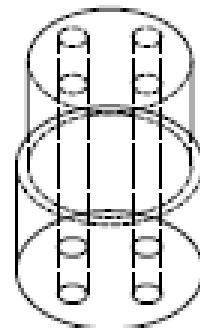
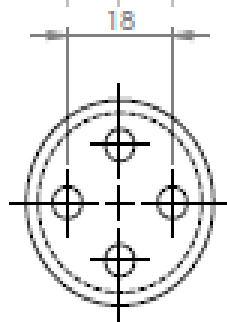
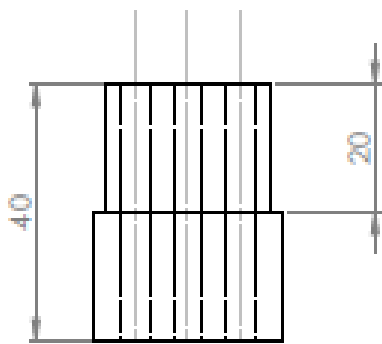
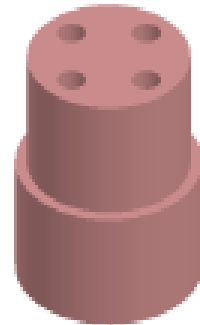
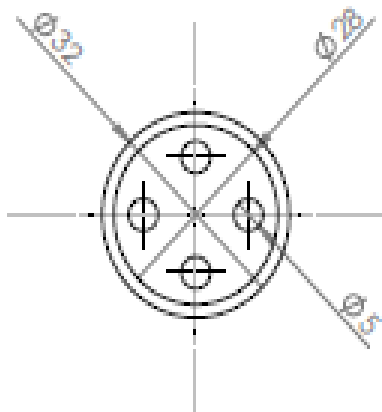
- ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αρτέμης Α. (2013) «Το πρόβλημα της σπηλαιώσης»
2. Κατσαπαράκης Δ., «Σπηλαιώση αντλιών», Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας, ΤΕΙ Κρήτης.
3. Λάμπρου Σ. (2007), « μελέτη του φαινομένου της σπηλαιώσης σε φυγοκεντρική αντλία Cavitation», Μεταπτυχιακή εργασία, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών σπουδών, Εθνικό μετσόβιο Πολυτεχνείο.
4. Πολέμη Κ.(2013), «Σχεδιασμός και Αριθμητική Προσομοίωση Βοηθητικής Πτερωτής αντλίας», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

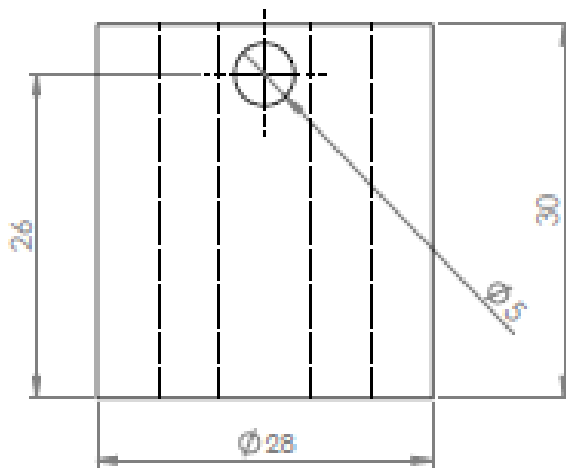
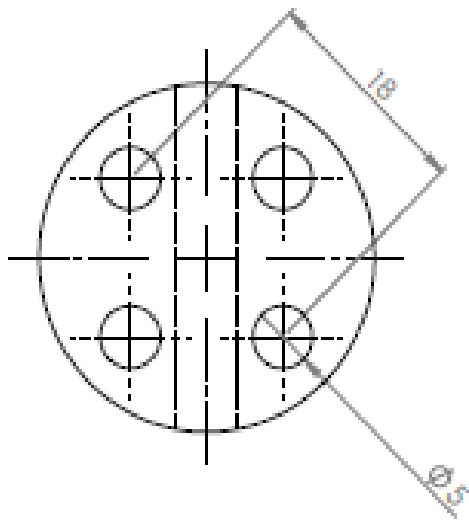
- ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Dular M., Bachert R., Stoffel B, Sirok B. (2005), " Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil", *European Journal of Mechanics B/Fluids* 24, pp 522-538.
2. Franc J. (2006) "Physics and Control of Cavitation", *RTO*.
3. Plesset M.S., Prosperetti A. (1977), "Bubble Dynamics and Cavitation", *Annual Reviews*.

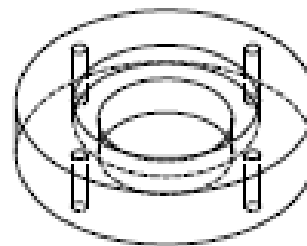
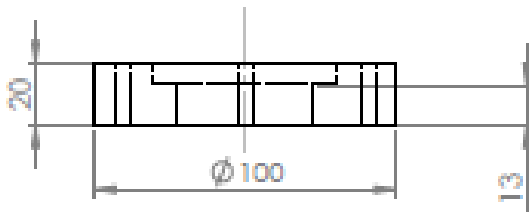
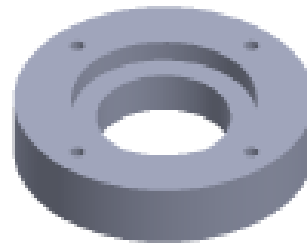
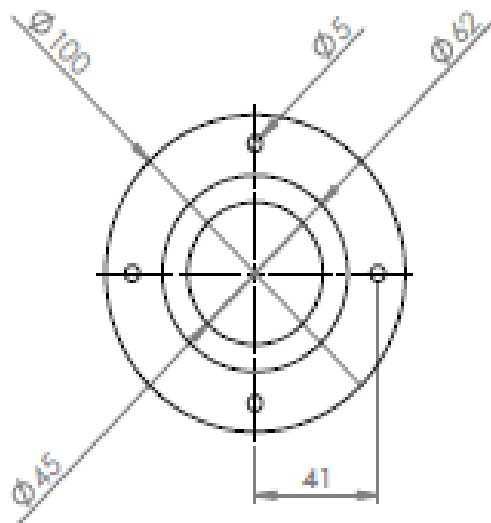
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



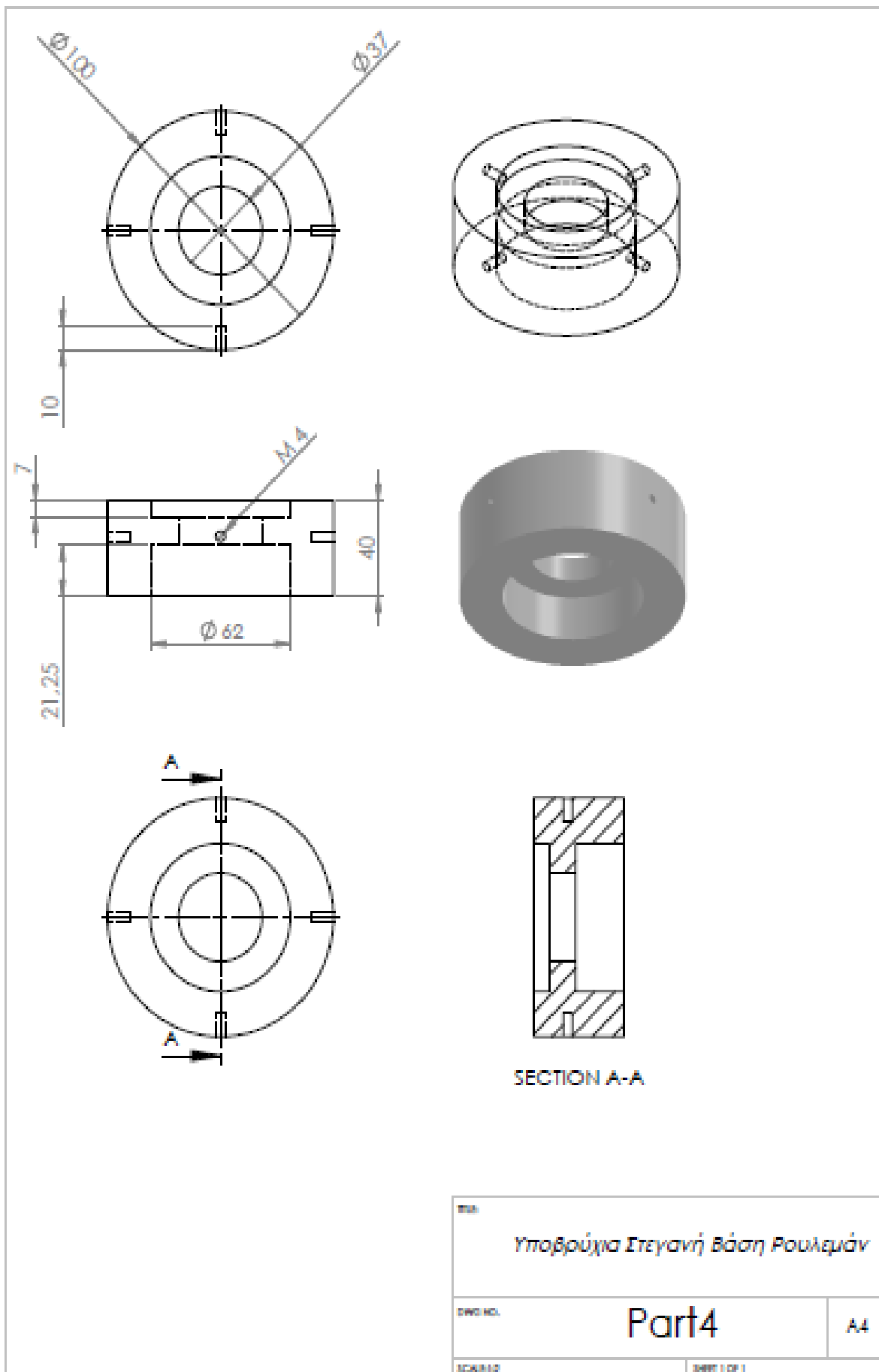
ΤΙΤΛΟΣ	<i>Άξονας Σύνδεσης Πτερυγίων</i>	
ΕΠΩΝΥΜΟ	Part1	A4
ΣΧΗΜΑΤΑ	ΣΕΛΦΕΣ 1 OF 1	



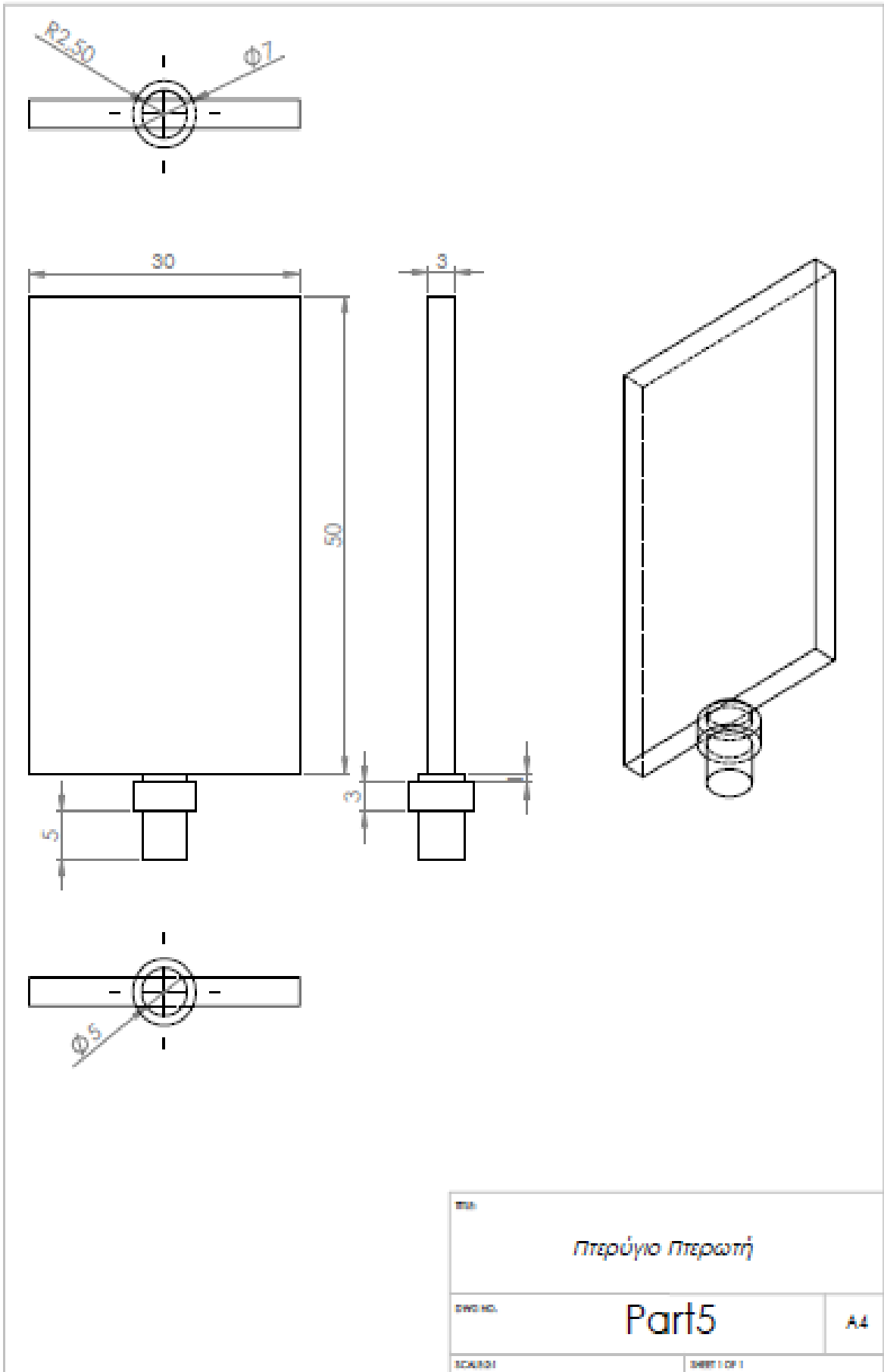
ΤΙΤΛΟΣ <i>Κυρίος Σώμα Πτερωτής</i>	
ΔΩΔ. ΝΟ. Part2	Α4
ΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ	ΣΕΛΙΔΑ 1 ΑΠΟ 1

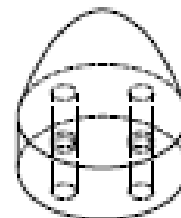
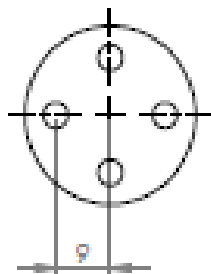
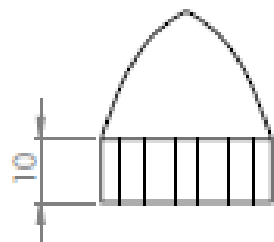
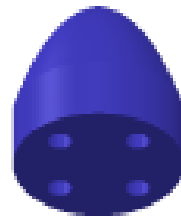
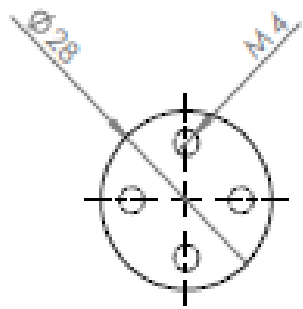


ΤΙΤΛΟΣ Υποβρύχια Φωλιά Τσιμούχας	
ΣΧΗΜΑΤ. ΑΝΤΙΣΤ. Part3	Α4
ΣΚΑΛΗ 1:1	ΣΕΛΙΔΑ 1 OF 1

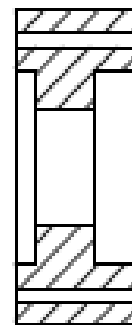
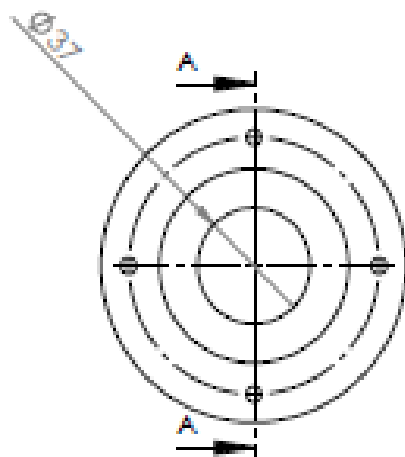
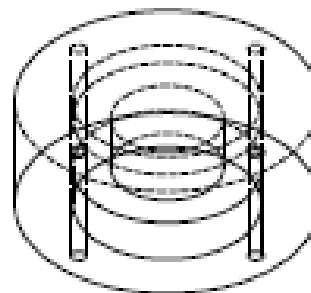
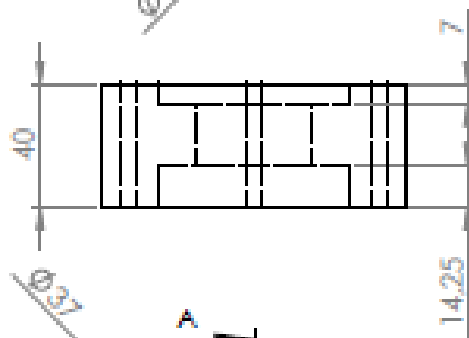
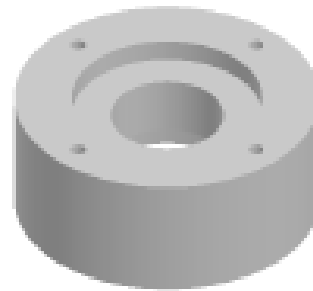
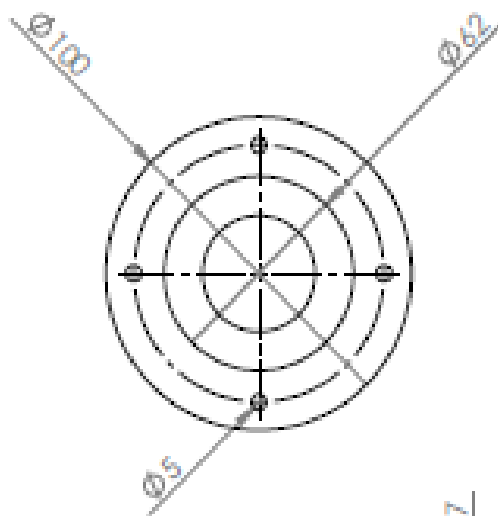


ΤΙΤΛΟΣ Υποβρούχια Στεγανή Βάση Ρουλεμιάν	
ΔΩΔ. ΝΟ.	Part4
ΚΑΛΩ. ΝΟ.	A4
ΚΑΛΩ. ΝΟ.	SHEET 1 OF 1





TITLE <p style="text-align: center;"><i>Κεφαλή Πτερωτής</i></p>		
DWG NO. <p style="text-align: center;">Part6</p>	A4	
SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1	



SECTION A-A

Εξωτερική Φωλιά Ρουλεμάν	
DWG NO.	part7
SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1

A4