



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Υπολογιστική διερεύνηση του φαινομένου της σπηλαίωσης σε  
υδροστροβίλους FRANCIS**

**Κουμασίδης Ιωάννης 2701**

**Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Βαφειάδης Κυριάκος**

**Κοζάνη, Οκτώβριος 2024**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Υπολογιστική διερεύνηση του φαινομένου της σπηλαίωσης σε  
υδροστροβίλους FRANCIS**

**Κουμασίδης Ιωάννης 2701**

**Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Βαφειάδης Κυριάκος**

**Κοζάνη, Οκτώβριος 2024**



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η υπολογιστική διερεύνηση του φαινομένου της σπηλαίωσης στον υδροστρόβιλο FRANCIS του ΥΗΣ Πολυφήτου.

Αρχικά γίνεται μια ιστορική αναδρομή στους υδροστροβίλους FRANCIS, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα χαρακτηριστικά αυτών καθώς και τον τρόπο λειτουργίας τους.

Η σπηλαίωση είναι μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στον ΥΗΣ Πολυφήτου, ο οποίος βρίσκεται στην τεχνητή λίμνη Πολυφήτου του ποταμού Αλιάκμονα, στο Νομό Κοζάνης. Η σπηλαίωση προκαλεί βλάβη και υποβάθμιση της απόδοσης των εξαρτημάτων των υδραυλικών στροβίλων.

Πραγματοποιήθηκε αριθμητική ανάλυση για τη διερεύνηση του φαινομένου της σπηλαίωσης στον στρόβιλο Francis. Για την ανίχνευση της σπηλαίωσης, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τύρβης k-ε και SST με τη χρήση της εξίσωσης πλέγματος Rayleigh στο ANSYS-CFX. Ωστόσο επιλέχθηκε το μοντέλο τύρβης k-ε, ως πιο γρήγορο, λιγότερο απαιτητικό σε υπολογιστική δύναμη και με ικανοποιητικά αποτελέσματα

Ο στρόβιλος διερευνάται για δύο διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή μερικό φορτίο και πλήρες φορτίο υπό σπηλαίωση και χωρίς σπηλαίωση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με βάση τη διακύμανση της πίεσης και το κλάσμα όγκου ατμού. Παρατηρήθηκε ότι οι μεταβολές στην κατανομή της πίεσης και της ταχύτητας είναι ελάχιστες μεταξύ των κανονικών συνθηκών λειτουργίας χωρίς σπηλαίωση, σε ονομαστική εκροή και ύψος. Υπό συνθήκες μερικού φορτίου, ο σχηματισμός φυσαλίδων ατμού στην είσοδο του δρομέα, καθώς και στον αγωγό απαγωγής βρέθηκε να είναι μέγιστος.

Λέξεις κλειδιά: Υδροστρόβιλος Francis, σταθερά πτερύγια, περιστρεφόμενα πτερύγια, δρομέας, σπηλαίωση, συντελεστής Thoma Ansys-CFX,

## Abstract

In the present thesis the computational investigation of the cavitation phenomenon in the FRANCIS turbine of the Polyphytos hydroelectric power plant was carried out.

At first, a historical review of FRANCIS hydro turbines, their advantages and disadvantages, their characteristics and their mode of operation is given.

Cavitation is one of the most important challenges at the Polyfytou WWTP, which is located in the Polyfytou artificial lake of the Aliakmon river, in the Kozani region. Cavitation causes damage and degradation of the performance of the hydraulic turbine components.

Numerical analysis was performed to investigate the cavitation phenomenon in Francis turbine. To detect cavitation, the  $k-\varepsilon$  and SST turbulence model was used to detect cavitation using Rayleigh grid equation in ANSYS-CFX. However, the  $k-\varepsilon$  turbulence model was chosen as faster, less computationally demanding and with satisfactory results.

The turbine is investigated for two different operating conditions, i.e. partial load and full load under cavitation and without cavitation. The results are presented based on pressure variation and steam volume fraction. It was observed that the variations in pressure and velocity distribution are minimal between the normal operating conditions without cavitation, at nominal discharge and head. Under part load conditions, the formation of steam bubbles at the rotor inlet as well as in the exhaust duct was found to be maximum.

Key words: Francis hydroturbine, fixed blades, rotating blades, rotor, cavitation, Thoma coefficient  
Ansys-CFX

## Ευχαριστίες

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που μου συμπαραστάθηκε όλον αυτό τον καιρό. Η στήριξη τους μου έδινε ώθηση για να συνεχίσω. Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στον Επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βαφειάδη Κυριάκο για την πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγηση και συμβουλές προκειμένου να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία και να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ευχαριστώ επίσης τον κουμπάρο μου Κεπίδη Χαρίτων, ο οποίος μου έδωσε όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τη λειτουργία του ΥΗΣ Πολυφύτου.

## Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	4
Abstract.....	5
Ευχαριστίες.....	6
Πίνακας περιεχομένων εικόνων .....	9
Συντομογραφίες.....	12
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	18
1.1.1 Ενέργεια , Ισχύς και Ύψος υδατόπτωσης .....	19
1.1.2 ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΘΕΩΡΗΜΑ (Π) Buckingham .....	20
1.2 Σκοπός Εργασίας.....	22
1.3 Περιγραφή Υδροστροβίλων FRANCIS .....	23
1.3.1 Ανάλυση Υδροστροβίλου FRANCIS.....	24
1.3.2 Βασικές Εξισώσεις .....	26
1.3.3 Θεωρία ομοιότητας – Ειδικός αριθμός στροφών.....	29
2 Σπηλαίωση .....	32
2.1 Κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης.....	34
2.2 Σπηλαίωση σε υδροστροβίλους Francis .....	35
2.2.1 Συντελεστής Thoma.....	40
3 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) .....	42
3.1 Εξισώσεις πεδίου ροής - Εξισώσεις Navier-Stokes .....	42
3.2 Μοντελοποίηση Τύρβης .....	44
3.2.1 Στατιστικά μοντέλα τύρβης .....	44
3.2.2 Εξισώσεις RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes).....	45
3.2.3 Μοντέλο $k - \epsilon$ .....	46
3.2.4 Μοντέλο $k-\omega$ .....	47
3.2.5 Μοντέλο SST (Shear Stress Transport) .....	47
3.3 Πολυφασική ροή .....	48
3.3.1 Μοντέλο σπηλαίωσης (Cavitation).....	49
3.3.2 Το μοντέλο Rayleigh-Plesset.....	49
3.4 Υπολογιστική Προσομοίωση του φαινομένου της σπηλαίωσης σε υδροστροβίλο Francis .....	51
3.4.1 Χαρακτηριστικά υδροστροβίλου πραγματικού μοντέλου .....	51
3.4.2 Χαρακτηριστικά υδροστροβίλου υπολογιστικού μοντέλου .....	57
3.4.3 Σχεδίαση υπολογιστικών όγκων.....	58

3.4.4 Διακριτοποίηση πλέγματος .....	60
3.4.5 Οριακές συνθήκες .....	62
3.5 Συνθήκες πλήρους φορτίου .....	63
3.6 Πραγματικές Συνθήκες Μερικού Φορτίου .....	65
3.7 Υπολογιστικές μετρήσεις για μερικό φορτίο. ....	65
3.7.1 Περιγράμματα Μερικού Φορτίου 85MW .....	66
3.7.2 Περιγράμματα Μερικού φορτίου 50MW.....	69
4 Συμπεράσματα και περεταίρω βελτιώσεις .....	72
Βιβλιογραφία .....	73



## Πίνακας περιεχομένων εικόνων

Εικόνα 1- Εγκατεστημένη υδροηλεκτρική ισχύς ανά περιοχή. ΠΗΓΗ: "Cavitation in Hydraulic Turbines International Journal of Heat and Technology".....	14
Εικόνα 2- Κορυφαίες χώρες παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας ΠΗΓΗ: "Cavitation in Hydraulic Turbines International Journal of Heat and Technology".....	15
Εικόνα 3-Υδροηλεκτρική ενέργεια σε MW ανά Ήπειρο και υπό περιοχές ΠΗΓΗ: <a href="https://globalenergymonitor.org/projects/global-hydropower-tracker/summary-tables">https://globalenergymonitor.org/projects/global-hydropower-tracker/summary-tables</a> .....	15
Εικόνα 4- Γεωγραφική θέση υδροηλεκτρικών σταθμών στην Ελλάδα. ΠΗΓΗ: Διδακτικές σημειώσεις "Υδροστρόβιλοι και Υδροηλεκτρικά Έργα" Α. Τουρλιδάκης .....	16
Εικόνα 5- Τεχνικά στοιχεία υδροηλεκτρικών σταθμών Ελλάδας (έτος 1998). ΠΗΓΗ: Διδακτικές Σημειώσεις "Υδροστρόβιλοι και Υδροηλεκτρικά Έργα" Α. Τουρλιδάκης. ....	17
Εικόνα 6-Περιοχές ισχύος ειδικών ταχυτήτων για στροβιλομηχανές διαφόρων ειδών. ΠΗΓΗ: "Στροβιλομηχανές S.L. DIXON / C.A.....	22
Εικόνα 7-Τομή υδροστροβίλου Francis .....	24
Εικόνα 8-Τομή περυγίων στροβίλου Francis και διαγράμματα ταχυτήτων στην είσοδο και στην έξοδο του δρομέα ΠΗΓΗ: «Στροβιλομηχανές» S.L. DIXON/ C.A. HALL.....	25
Εικόνα 9-Τρίγωνα ταχυτήτων στροβίλου Francis σε πλήρες φορτίο και σε μερικό φορτίο. ΠΗΓΗ: «Στροβιλομηχανές» S.L. DIXON/ C.A. HALL .....	26
Εικόνα 10-Είσοδος και έξοδος δρομέα και ο αγωγός απαγωγής ΠΗΓΗ: «Στροβιλομηχανές» S.L. DIXON/ C.A. HALL.....	28
Εικόνα 11-Συσχετισμός ειδικού αριθμού στροφών ανάλογα τον τύπο υδροστροβίλου και ύψος υδατόπτωσης. ΠΗΓΗ: Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ/Σημειώσεις "Υδροστρόβιλοι- Υδροηλεκτρικά έργα" .....	31
Εικόνα 12-Κατανομή διαφόρων απωλειών υδροστροβίλου Francis σε σχέση με τον ειδικό αριθμό στροφών $N_s$ . ΠΗΓΗ: Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ/Σημειώσεις "Υδροστρόβιλοι- Υδροηλεκτρικά έργα" » .....	31
Εικόνα 13-Φαινόμενο υπερσπηλαίωσης. ΠΗΓΗ: " <a href="https://maredu.hcg.gr/modules/document/file.php/MAK212/Μηχανική Ρευστών/ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΠΕΡΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ.pdf">https://maredu.hcg.gr/modules/document/file.php/MAK212/Μηχανική Ρευστών/ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΠΕΡΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ.pdf</a> " .....	33
Εικόνα 14-Σπηλαίωση λόγω δινών στις άκρες ακροπερυγίων. ΠΗΓΗ: " (PDF) Cavitation in Francis turbines (researchgate.net) " .....	33
Εικόνα 15-Κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης (NPSH) <sub>R</sub> και (NPSH) <sub>A</sub> σε συνάρτηση με την παροχή. ΠΗΓΗ: "Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ/Σημειώσεις "Υδροστρόβιλοι- Υδροηλεκτρικά έργα" .....	35
Εικόνα 16-Τύπος σπηλαίωσης leading edge cavitation. ΠΗΓΗ: "Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of cavitation" .....	36
Εικόνα 17-Travelling bubble cavitation. ΠΗΓΗ: "Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of cavitation" .....	37
Εικόνα 18-Στήλη σπηλαίωσης (Draft swirl tube) σε μερικό φορτίο. ΠΗΓΗ: "Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of cavitation" .....	38

Εικόνα 19- Στήλη σπηλαίωσης ( Draft swirl tube) σε υπερφόρτωση. ΠΗΓΗ: "Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of cavitation" .....	38
Εικόνα 20-Interblade vortex cavitation. ΠΗΓΗ: " : "Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of cavitation" .....	39
Εικόνα 21- Παραδείγματα τύπων σπηλαίωσης σε υδροστροβίλους Francis ανάλογα το φορτίο και το υψόμετρο. ΠΗΓΗ: "Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of cavitation" .....	40
Εικόνα 22-Μεταβολή του συντελεστή σπηλαίωσης ( $\sigma$ ) συναρτήσει της ειδικής ταχύτητας. ΠΗΓΗ: "Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ/Σημειώσεις "Υδροστρόβιλοι- Υδροηλεκτρικά έργα" .....	41
Εικόνα 23-Τομή υδροστροβίλου Francis ΥΗΣ Πολυφύτου. ΠΗΓΗ: "Αρχείο ΥΗΣ Πολυφύτου" .....	52
Εικόνα 24-Απεικόνιση σταθερών & περιστρεφόμενων πτερυγίων. ΠΗΓΗ: "Αρχείο ΥΗΣ Πολυφύτου".....	53
Εικόνα 25-Τομή δρομέα και σχεδιαστικές λεπτομέρειες πτερυγίων δρομέα. ΠΗΓΗ: " Αρχείο ΥΗΣ Πολυφύτου" ..	54
Εικόνα 26-Σχεδιαστικές λεπτομέρειες των σταθερών πτερυγίων του σπειροειδούς κελύφους. ΠΗΓΗ: " Αρχείο ΥΗΣ Πολυφύτου".....	55
Εικόνα 27-Υδροστρόβιλος Francis. ΠΗΓΗ: "Αρχείο ΥΗΣ Πολυφύτου" .....	56
Εικόνα 28- Πειραματικός Υδροστρόβιλος Francis Ansys .....	57
Εικόνα 29- Τομή πειραματικού υδροστροβίλου Francis .....	57
Εικόνα 30- Σπειροειδές κέλυφος υδροστροβίλου. Εσωτερικά διακρίνονται τα σταθερά πτερύγια.....	58
Εικόνα 31- Δρομέας υδροστροβίλου ο οποίος διαθέτει 15 πτερύγια.....	58
Εικόνα 32-Περιβάλλοντας όγκος σπειροειδούς κελύφους μαζί με τα σταθερά και περιστρεφόμενα πτερύγια.....	59
Εικόνα 33- Περιβάλλοντας όγκος δρομέα υδροστροβίλου.....	59
Εικόνα 34-Περιβάλλοντας όγκος αγωγού απαγωγής.....	59
Εικόνα 35-Διακριτοποίηση πλέγματος draft tube για element size 0,35 m .....	60
Εικόνα 36- Διακριτοποίηση πλέγματος σπειροειδούς κελύφους με element size 0.35m.....	61
Εικόνα 37- Διακριτοποίηση πλέγματος δρομέα για element size 0,35m .....	61
Εικόνα 38- Διακριτοποίηση πλέγματος δρομέα για element size 0,5m .....	61
Εικόνα 39- Διακριτοποίηση πλέγματος αγωγού απαγωγής για element size 0,5m.....	62
Εικόνα 40- Διακριτοποίηση πλέγματος σπειροειδούς κελύφους για element size 0,5m .....	62
Εικόνα 41- Διάνυσμα ταχύτητας ροής για το μοντέλο k-ε και το SST.....	63
Εικόνα 42- Πίεση ροής αριστερά με το μοντέλο k-ε και δεξιά με το μοντέλο SST.....	64
Εικόνα 43- Πίεση ροής στον αγωγό απαγωγής αριστερά με το μοντέλο k-ε και δεξιά με το μοντέλο SST.....	64
Εικόνα 44- Ταχύτητα ροής στην έξοδο του δρομέα με το μοντέλο k-ε και το μοντέλο SST .....	65
Εικόνα 45 Περίγραμμα πίεσης στον αγωγό απαγωγής χωρίς σπηλαίωση .....	66
Εικόνα 46- Περίγραμμα πίεσης στο σπειροειδές κέλυφος χωρίς σπηλαίωση .....	66
Εικόνα 47-Περίγραμμα ταχύτητας ροής στον αγωγό απαγωγής χωρίς σπηλαίωση .....	67
Εικόνα 48- Περίγραμμα ταχύτητας στο σπειροειδές κέλυφος χωρίς σπηλαίωση .....	67
Εικόνα 49- Περίγραμμα πίεσης στον αγωγό απαγωγής και το σπειροειδές κέλυφος με σπηλαίωση .....	68
Εικόνα 50- Περίγραμμα κλάσμα όγκου ατμών στη σπηλαίωση.....	68
Εικόνα 51-Περίγραμμα πίεσης ροής στον αγωγό απαγωγής χωρίς σπηλαίωση .....	69
Εικόνα 52- Περίγραμμα πίεσης στο σπειροειδές κέλυφος χωρίς σπηλαίωση .....	69

<i>Εικόνα 53- Περίγραμμα πίεσης στον αγωγό απαγωγής με σπηλαίωση.....</i>	<i>70</i>
<i>Εικόνα 54-Περίγραμμα πίεσης στο σπειροειδές κέλυφος με σπηλαίωση.....</i>	<i>70</i>
<i>Εικόνα 55- Περίγραμμα κλάσμα όγκου ατμών (volume of fraction) .....</i>	<i>71</i>

## Συντομογραφίες

$P$  (W): ισχύς

$C_u$  ( $\text{ms}^{-1}$ ): περιφερειακή ταχύτητα

$D$  (m): διάμετρος δρομέα

$E$  ( $\text{J kg}^{-1}$ ): ειδική υδροδυναμική ενέργεια

$N$  (rpm) :στροφές ανά λεπτό δρομέα

$N_s$  : Ειδικός αριθμός στροφών

$NPSH$  ( $\text{J kg}^{-1}$ ): Ελάχιστο θετικό ύψος αναρρόφησης ή κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης

$p$  (Pa): πίεση

$p_v$  (Pa): πίεση κορεσμένου ατμού

$Q$  ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ): παροχή ρευστού

$r$  (m): ακτίνα

$r_g$  : gas volume fraction

$r_{nuc}$  : volume fraction of the nucleation sites

$R_{nuc}$  (m): ακτίνα της περιοχής σχηματισμού πυρήνων

$U_1$  ( $\text{m s}^{-1}$ ): rotating velocity at the outer diameter at the runner outlet

$\mu$  ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) :δυναμικό ιξώδες

$\mu_t$  ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ): ιξώδες τύρβης

$\nu$  : κινηματικό ιξώδες

$\rho_g$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ): πυκνότητα ατμών

$\rho_f$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) :πυκνότητα ρευστού

$\sigma$  : συντελεστής Thoma

$S$  : Ειδικός αριθμός στροφών σπηλαίωσης

$\Omega$  ( $\text{rads}^{-1}$ ) ταχύτητα περιστροφής δρομέα

$m$  ( $\text{kgs}^{-1}$ ): παροχή μάζας

$P_h$  (W): υδραυλική ισχύς

$dh_{fFe}$  (m): απώλειες τυρβώδους ροής στον αγωγό προσαγωγής

$H$  (m): καθαρό ύψος υδατόπτωσης

$dh_{fAA}$  (m): απώλειες αγωγού απαγωγής

$H_n$  (m): ωφέλιμο ύψος υδατόπτωσης

$P_m$  (W): μηχανική ισχύς

$n$ : βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου

$\psi$ : συντελεστής φορτίου

$\hat{P}$  : συντελεστής ισχύος

$Re$ : αριθμός Reynolds

$e$ : τραχύτητα επιφάνειας

$\Phi$ : συντελεστής παροχής

$\Omega_{sp}$ : ειδική ταχύτητα ισχύος

$\alpha_1$ : απόλυτη γωνία ροής στην είσοδο των πτερυγίων του κελύφους

$\beta_2$ : γωνία ροής στην είσοδο των πτερυγίων του δρομέα

$\beta_3$ : γωνία ροής στην έξοδο από το δρομέα

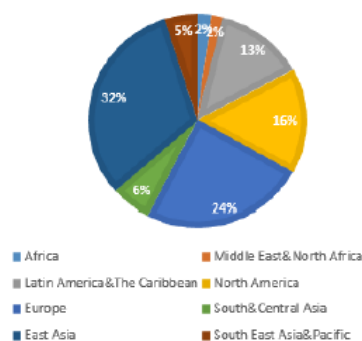
$V_B$  (m<sup>3</sup>): όγκος φυσαλίδων

$\Delta W$  (J/kg): θεωρητικό έργο στροβίλου ανά μονάδα μάζας

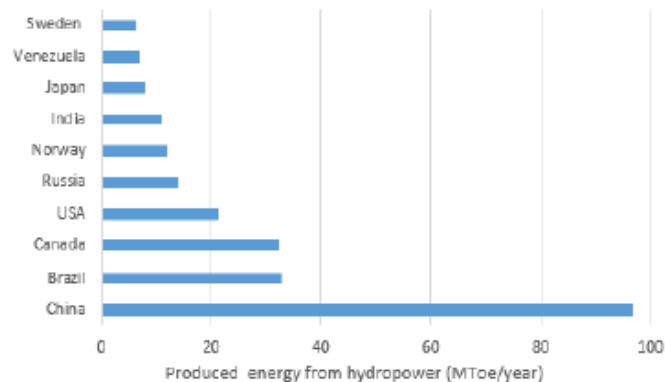
## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας η κατανάλωση ενέργειας έχει φτάσει σε επίπεδα ρεκόρ, ενώ αναμένεται να αυξηθεί πολύ περισσότερο στο μέλλον. Η ενέργεια, που παράγεται σήμερα από θερμικές πηγές (π.χ. άνθρακας, φυσικό αέριο και πετρέλαιο) αγγίζει το 80% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας παγκοσμίως. Ωστόσο οι μορφές αυτές ενέργειας έχουν αρχίσει να προβληματίζουν τις χώρες διεθνώς, καθώς έχουν αρχίσει να εξαντλούνται, και υλοποιώντας τις συνόδους κορυφής που πραγματοποιήθηκαν στη Βραζιλία και στο Κιότο, για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, δεν επιτρέπεται τη χρήση τους για μακροχρόνια ενεργειακή στρατηγική. Ήδη η Ελλάδα έχει αποφασίσει και ανακοινώσει ότι θα προχωρήσει στην παύση λειτουργίας όλων των λιγνιτικών μονάδων της στο τέλος του 2025.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η χρήση της ενέργειας που προέρχεται από φυσικούς πόρους γίνεται ένας δημοφιλής τρόπος παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον οι ευνοϊκές πολιτικές για την ενθάρρυνση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν οδηγήσει σε συνεχή αύξηση τους. Οι κυριότερες πηγές καθαρών ενεργειακών πόρων είναι η ηλιακή, η αιολική, γεωθερμική και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας, η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η κορυφαία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Στις εικόνες 1 και 2, δίνεται η εγκατεστημένη δυναμικότητα υδροηλεκτρικής ενέργειας ανά περιοχή και οι κορυφαίες υδροηλεκτρικές χώρες παραγωγής, όπου ΜΤοε αναφέρεται σε εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου. Από στοιχεία του 2016, οι κορυφαίες χώρες παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι η Κίνα, η Βραζιλία και ο Καναδάς.



Εικόνα 1- Εγκατεστημένη υδροηλεκτρική ισχύς ανά περιοχή. ΠΗΓΗ: "Cavitation in Hydraulic Turbines International Journal of Heat and Technology"



Εικόνα 2- Κορυφαίες χώρες παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας ΠΗΓΗ: "Cavitation in Hydraulic Turbines International Journal of Heat and Technology"

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μια από τις πλουσιότερες και πιο χρήσιμες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στον κόσμο. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μια ζωτικής σημασίας πηγή, καθώς είναι η καθαρή πηγή ενέργειας, βιώσιμη και, τέλος, οικονομικά αποδοτική.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια παρέχει μια συνεχή και ανανεώσιμη παροχή νερού, καθώς χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια και τον υδρολογικό κύκλο. Από όλες τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας η υδροηλεκτρική καταλαμβάνει πάνω από το 71%, σύμφωνα με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας και παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας με σκοπό τη βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας.

Σήμερα η υδροηλεκτρική ενέργεια καλύπτει το 20% περίπου της διεθνούς ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ σε 65 χώρες φτάνει στο 50% της εθνικής ενεργείας, σε 32 χώρες αγγίζει το 80% και σε 13 χώρες καλύπτει το 100%. Χώρες όπως Κίνα, Βραζιλία, Καναδάς, ΗΠΑ εκμεταλλεύονται την υδροηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλο ποσοστό και θεωρούν ότι η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι το κλειδί για την οικονομική τους ανάπτυξη.

Hydropower Capacity by Region and Subregion (MW)										
Global Hydropower Tracker, April 2024										
Tracker includes hydropower projects 75 MW and greater										
The Global Hydropower Tracker uses the United Nations Statistics Division's definition of geographic regions										
Global Energy Monitor										
Region	Subregion	Operating	Construction	Pre-construction	Announced	Prospective (Sum of Construction, Pre-construction, Announced)	Shelved	Mothballed	Retired	Cancelled
<b>Global Total</b>		<b>1,133,406</b>	<b>250,780</b>	<b>528,842</b>	<b>309,113</b>	<b>1,088,735</b>	<b>49,470</b>	<b>9,945</b>	<b>773</b>	<b>64,115</b>
Africa	Northern Africa	6,123	2,735	0	1,000	3,735	0	0	0	0
	Sub-Saharan Africa	31,287	12,875	15,201	19,677	47,753	5,284	0	0	7,928
Americas	Latin America and the Caribbean	177,775	9,071	13,552	42,638	65,261	7,935	1,210	140	14,470
	Northern America	162,758	1,100	6,898	58,838	66,936	5,240	0	351	11,370
Asia	Central Asia	15,257	2,336	2,528	5,663	10,527	200	0	0	0
	Eastern Asia	372,686	172,161	309,852	81,558	563,571	5,862	82	0	1,339
	South-eastern Asia	44,573	11,869	38,352	20,015	70,236	4,152	6,077	0	9,847
	Southern Asia	70,164	31,963	112,971	57,255	202,189	11,680	2,071	0	9,926
	Western Asia	31,466	1,351	3,244	2,436	7,031	447	170	0	3,059
Europe	Eastern Europe	69,021	1,890	4,402	5,265	11,257	2,662	335	0	850
	Northern Europe	44,801	0	4,486	4,710	9,196	0	0	0	600
	Southern Europe	45,390	519	8,471	867	9,857	2,068	0	0	2,151
	Western Europe	49,943	960	2,677	1,178	4,815	3,615	0	282	550
Oceania	Australia and New Zealand	12,005	2,250	5,348	7,935	15,533	325	0	0	225
	Melanesia	157	0	860	78	938	0	0	0	1,800
	Micronesia	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Polynesia	0	0	0	0	0	0	0	0	0

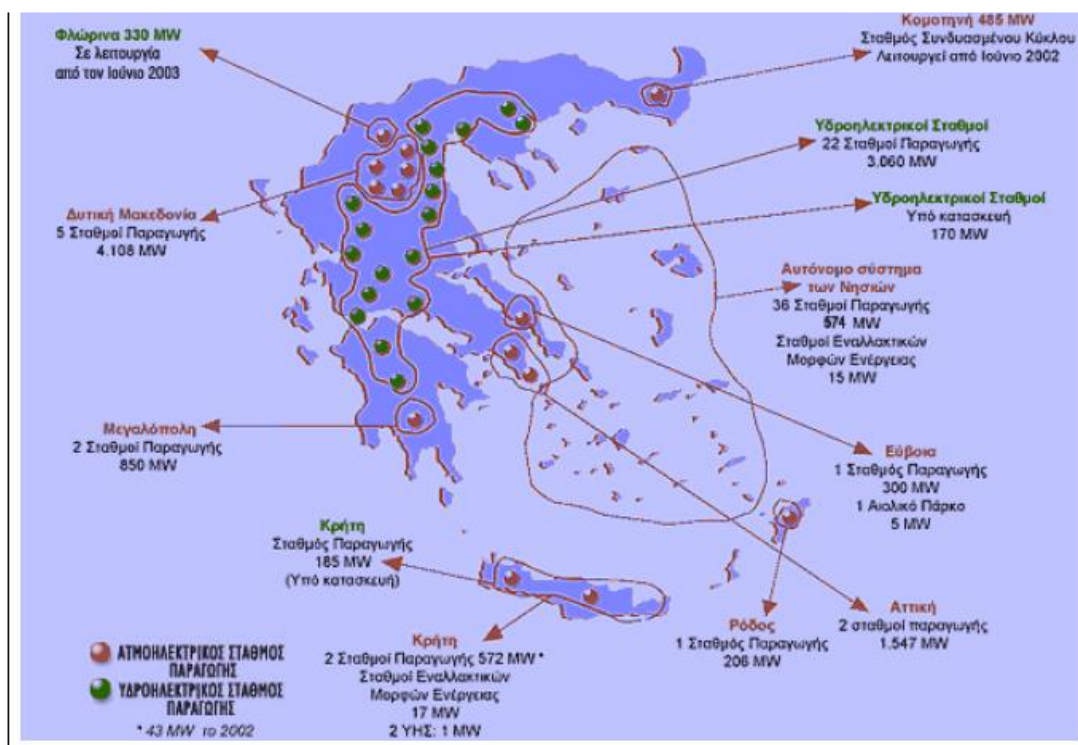
Εικόνα 3-Υδροηλεκτρική ενέργεια σε MW ανά Ήπειρο και υπό περιοχές ΠΗΓΗ: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-hydropower-tracker/summary-tables>

Το 2008, σημαντικός αριθμός έργων ανάπτυξης υδροηλεκτρικής ενέργειας συνολικής δυναμικότητας 100.000 MW είχε ξεκινήσει ή βρισκόταν σε εξέλιξη σε όλο τον κόσμο. Η Ασία είχε τη σημαντικότερη συμβολή στην τρέχουσα ανάπτυξη της υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η Νότια Αμερική, η Αφρική και η Ευρώπη είχαν επίσης σημαντική συμβολή. Η Αφρική έχει εγκατεστημένη υδροηλεκτρική ισχύ άνω των 37 GW και το υψηλότερο ανεκμετάλλευτο δυναμικό σε ολόκληρο τον κόσμο.

Η χρήση της υδροηλεκτρικής ενέργειας έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, το χαμηλότερο ενεργειακό κόστος και η δημιουργία θέσεων εργασίας. Επιπλέον σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υπερτερεί, καθώς αυτές δεν είναι σε θέση να παρέχουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας λόγω του ότι παρουσιάζουν διακοπτόμενη λειτουργία.

Παρόλα αυτά η κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού σταθμού έχει ορισμένες επιπτώσεις τόσο στην κοινωνία όσο και στο περιβάλλον. Οι κοινωνικές επιπτώσεις έγκειται στο γεγονός ότι, η δημιουργία του φράγματος, επιβάλλει τη μετεγκατάσταση των ανθρώπων που κατοικούν εκεί σε νέα περιοχή, ενώ οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις έχουν να κάνουν με το γεγονός ότι το φράγμα τροποποιεί τη ροή του ποταμού, τη θερμοκρασία και τη διαύγεια του νερού. Επιπλέον ο ταμιευτήρας ή φράγμα εμποδίζει τη διέλευση ψαριών και την αύξηση του πλαγκτόν.

Στην Ελλάδα οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί που υπάρχουν μπορούν να καταταγούν σε α) Μεγάλους Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς (ΥΗΣ), οι οποίοι έχουν εγκατεστημένοι ισχύ μεγαλύτερη από 15MW και β) Μικρούς Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη από 15MW. Η γεωγραφική θέση των υδροηλεκτρικών σταθμών φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4- Γεωγραφική θέση υδροηλεκτρικών σταθμών στην Ελλάδα. ΠΗΓΗ: Διδακτικές σημειώσεις "Υδροστρόβιλοι και Υδροηλεκτρικά Έργα" Α. Τουρλιδάκης



Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των Υδροηλεκτρικών Σταθμών της ΔΕΗ Α.Ε. ανέρχεται σε 3.060 MW. Παρακάτω παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός υδροηλεκτρικών σταθμών που υπήρχαν στην Ελλάδα το έτος 1998.

Σταθμός Παραγωγή:	Μονάδα	Έτος Εγκ	Ισχύς		Παραγωγή		Συντελεστής Εκμετάλλευσης
			Εγκατεστημένη		Συνολική	Καθαρή	
			[MW <sub>e</sub> ]				
1. ΑΓΡΑΣ	1	1954	25.0	50.0	19.352.0	19.241.0	4.4%
	2	1954	25.0				
2. ΕΔΕΣΣΑΙΟΣ	1	1969	19.0	19.0	15.892.0	15.791.0	9.5%
3. ΑΣΩΜΑΤΩΝ	1	1985	54.0	108.0	118.550.0	117.306.0	12.5%
	2	1985	54.0				
4. ΓΚΙΩΝΑΣ	1	1988	8.5	8.5	32.087.0	31.872.0	43.1%
5. ΘΗΣΑΥΡΟΥ	1	1997	140.0	420.0	272.110.0	267.680.0	7.4%
	2	1997	140.0				
	3	1998	140.0				
6. ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ	1	1969	80.0	320.0	618.785.0	617.318.0	22.1%
	2	1969	80.0				
	3	1969	80.0				
	4	1969	80.0				
7. ΚΡΕΜΑΣΤΩΝ	1	1966	109.0	436.0	924.010.0	921.922.0	24.2%
	2	1966	109.0				
	3	1966	109.0				
	4	1967	109.0				
8. ΛΑΔΩΝΑ	1	1955	35.0	70.0	173.102.0	172.732.0	28.2%
	2	1955	35.0				
9. ΛΟΥΡΟΥ	1	1954	2.5	10.3	47.435.0	47.278.0	52.6%
	2	1954	2.5				
	3	1964	5.3				
10. ΜΑΚΡΟΧΩΡΙΟΥ	1	1992	3.6	10.8	29.479.0	29.126.0	31.2%
	2	1992	3.6				
	3	1992	3.6				
11. ΠΟΛΥΦΥΤΟΥ	1	1974	125.0	375.0	357.456.0	354.344.0	10.9%
	2	1974	125.0				
	3	1975	125.0				
12. ΠΟΥΡΝΑΡΙΟΥ Ι	1	1981	100.0	300.0	271.870.0	270.500.0	10.3%
	2	1981	100.0				
	3	1981	100.0				
13. ΠΟΥΡΝΑΡΙΟΥ 2	1	1998	16.2	32.4	20.654.0	20.513.0	7.3%
	2	1998	16.2				
14. ΠΛΑΣΤΗΡΑ	1	1960	43.0	129.0	195.178.0	194.440.0	17.3%
	2	1961	43.0				
	3	1962	43.0				
15. ΣΦΗΚΙΑΣ	1	1985	105.0	315.0	316.365.0	312.299.0	11.5%
	2	1986	105.0				
	3	1985	105.0				
16. ΠΗΓΩΝ ΑΛΟΥ	1	1990	105.0	210.0	140.603.0	139.145.0	7.6%
	2	1991	105.0				
17. ΣΤΡΑΤΟΥ Ι	1	1989	75.0	150.0	277.145.0	275.895.0	21.1%
	2	1989	75.0				
18. ΣΤΡΑΤΟΥ ΙΙ	1	1988	3.0	6.0	12.437.0	12.286.0	23.7%
	2	1988	3.0				
19. ΣΕΡΡΩΝ	1	1931	0.3	0.7	1.196.0	1.196.0	19.5%
	2	1931	0.3				
	3	1931	0.1				
20. ΠΑΤΡΩΝ	1	1927	1.6	1.6	10.578.0	10.517.0	75.5%
21. ΒΕΡΟΙΑΣ	1	1929	0.9	1.8	5.499.0	5.499.0	34.9%
	2	1929	0.9				
22. ΑΛΜΥΡΟΣ (Κρήτη)			0.3	0.6	1.077.3	1.069.3	20.5%
23. ΑΓΥΙΑ (Κρήτη)			0.3				
Διασυνδεδεμένο Σύστημα	21		2.974.1	2.974.1	3.859.783.0	3.836.900.0	14.8%
Σύνολο Ελλάδας	23		2.974.7	2.974.7	3.860.860.3	3.837.969.3	14.8%

Εικόνα 5- Τεχνικά στοιχεία υδροηλεκτρικών σταθμών Ελλάδας (έτος 1998). ΠΗΓΗ: Διδακτικές Σημειώσεις "Υδροστρόβιλοι και Υδροηλεκτρικά Έργα" Α. Τουρλιδάκης.

Σε αυτή την ισχύ έρχονται να προστεθούν πέντε νέα έργα, τα οποία αναμένεται να υλοποιηθούν στα επόμενα χρόνια. Τα έργα περιλαμβάνουν την κατασκευή πέντε νέων σταθμών αντλησιοταμίευσης παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ολική ισχύς αυτών των έργων εκτιμάται ότι θα είναι μεγαλύτερη από 1,1 GW.

Οι τρεις από τους πέντε σταθμούς θα κατασκευαστούν στην ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας, ένας θα δημιουργηθεί στην περιοχή της Μεγαλόπολης και ένας στην περιοχή της Βέροιας.

Η λειτουργία όλων των προαναφερθέντων υδροηλεκτρικών σταθμών πραγματοποιείται με τη χρήση υδροστροβίλων. Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής: αν το νερό (φυσική ροή) συγκεντρωθεί σε μία υψηλή δεξαμενή με ύψος  $z_E$ , αρχίζει να ρέει σε μια άλλη δεξαμενή χαμηλότερου ύψους  $z_A$  και αφού προηγουμένως εισέλθει μέσα από έναν υδροστρόβιλο, τότε η δυναμική ενέργεια  $g(z_E - z_A)$ , ανά μονάδα μάζας, του νερού μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια. Οι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν τη δυναμική ενέργεια του νερού, σε μηχανική, λέγονται υδροστρόβιλοι.

Οι υδροστρόβιλοι κατατάσσονται σε δύο (2) μεγάλες κατηγορίες οι οποίες είναι:

- Υδροστρόβιλοι δράσεως (impulse)
- Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως (reaction)

και ο διαχωρισμός γίνεται με βάση το βαθμό αντιδράσεως (R) .

Ο βαθμός αντιδράσεως υδροστροβίλου μιας βαθμίδας είναι το πηλίκο της μεταβολής της δυναμικής ενέργειας του νερού μέσω του δρομέα προς τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας σε όλο τη βαθμίδα.

Οι στρόβιλοι δράσεως έχουν υψηλό ύψος, χαμηλή εκροή και χαμηλή ειδική ταχύτητα και λειτουργούν σε ατμοσφαιρική πίεση, ενώ οι στρόβιλοι αντίδρασης λειτουργούν υπό χαμηλό και μεσαίο ύψος με υψηλή ειδική ταχύτητα και λειτουργούν υπό μεταβλητή πίεση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετήσουμε το φαινόμενο της σπηλαιώσης στους υδροστροβίλους αντιδράσεως και ειδικότερα τον υδροστρόβιλο FRANCIS, ο οποίος είναι και αυτός που έχει επικρατήσει μεταξύ των υδροστροβίλων αντιδράσεως.

Η σπηλαιώση είναι ανεπιθύμητο φαινόμενο και πιο επιρρεπές στους στροβίλους αντίδρασης. Αποτελεί μια από τις προκλήσεις σε κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό, η οποία προκαλεί κραδασμούς, υποβάθμιση της απόδοσης και βλάβες στα εξαρτήματα του υδραυλικού στροβίλου.

## 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Ο υδρόμυλος ήταν ο πρώτος και απλούστερος υδροστρόβιλος που κατασκευάστηκε από τους αρχαίους Έλληνες. Με το πέρασμα των αιώνων η μορφή και η χρησιμότητα των υδροστροβίλων βελτιωνόταν συνεχώς, όπου το 1849 ο βρετανός μηχανικός James Francis σχεδίασε τον πρώτο υδροστρόβιλο ακτινικής εισόδου και αξονικής εξόδου, ο οποίος πήρε και το όνομα του. Ο υδροστρόβιλος Francis

περιλάμβανε μία στεφάνη με κινητά (ρυθμιστικά) πτερύγια και με τον τρόπο αυτό ρύθμιζε την παροχή. Δεδομένου ότι είχε άριστα αποτελέσματα, ο υδροστροβίλος Francis χρησιμοποιούταν ευρέως, ειδικά για υδραυλικά ύψη από 50 και 100 μέτρα. Σήμερα είναι ίσως ο καταλληλότερος τύπος υδροστροβίλου αντιδράσεως για ύψη από 50 έως 500 μέτρα.

### 1.1.1 Ενέργεια , Ισχύς και Ύψος υδατόπτωσης

Όπως αναφέρθηκε στην Εισαγωγή παραπάνω, ο σκοπός του υδροστροβίλου είναι η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού σε μηχανική ενέργεια. Αν  $z_E$  είναι η στάθμη του νερού στον άνω ταμιευτήρα και  $z_A$  είναι η στάθμη στον κάτω ταμιευτήρα η θεωρητική ενέργεια του νερού που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική (ανά μονάδα μάζας) δίδεται από τη σχέση

$$E = g \cdot h = g \cdot (z_E - z_A) \quad (1.1)$$

Η υδραυλική ισχύς  $P$ , εάν έχουμε παροχή νερού  $Q$  και πυκνότητας  $\rho$ , θα είναι:

$$P_h = \dot{m} \cdot E = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h = \rho \cdot Q \cdot g \cdot (z_E - z_A) \quad (1.2)$$

Ωστόσο στο αγωγό προσαγωγής και τον υδροστροβίλο εμφανίζονται απώλειες και επομένως η μηχανική ισχύς ( $P_m$ ) που θα πάρουμε θα είναι μικρότερη από υδραυλική ισχύ. Οι απώλειες αυτές, για πλήρως τυρβώδης ροή, είναι ανάλογες του τετραγώνου της παροχής και υπολογίζονται από τη εξίσωση

$$\delta h_{f_{Ee}} = k_e \cdot Q^2 \quad (1.3)$$

Συνεπώς το καθαρό ύψος πτώσεως θα είναι ισούται με:

$$H = h - \delta H_{f_{Ee}} = h - k_e \cdot Q^2 \quad (1.4)$$

Επιπλέον καθώς το νερό εξέρχεται από το δρομέα του υδροστροβίλου μέχρι και την ελεύθερη επιφάνεια του κάτω ταμιευτήρα λαμβάνουν χώρα απώλειες  $\delta h_{faA}$ , οι οποίες από το ισοζύγιο ενέργειας είναι ίσες με την κινητική ενέργεια που έχει το νερό στην έξοδο από το δρομέα και ισχύει ότι

$$\delta h_{faA} = \frac{c_a^2}{2 \cdot g} \quad (1.5)$$

Από τις εξισώσεις (1.3), (1.4) το τελικό ωφέλιμο ύψος υδατόπτωσης ( $H_n$ ) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_n = h - \delta H_{f_{Ee}} - \delta h_{faA} = h - k_e \cdot Q^2 - \frac{c_a^2}{2 \cdot g} \quad (1.6)$$

ενώ η μηχανική ισχύς που θα πάρουμε θα δίδεται από τη σχέση:

$$P_m = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_n \quad (1.7)$$

Τελικά για τη μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική ισχύ πρέπει να λάβουμε υπόψη και το βαθμό απόδοσης μετατροπής  $n$  του υδροηλεκτρικού σταθμού, ο οποίος ισούται με το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου  $n_{στρ}$ , της γεννήτριας  $n_{γεν}$  και του μετασχηματιστή  $n_{μετ}$  δηλαδή

$$n = n_{στρ} \cdot n_{γεν} \cdot n_{μετ} \quad (1.8)$$

οπότε η ηλεκτρική ισχύς θα υπολογίζεται από τη εξίσωση:

$$P = n \cdot \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_n \quad (1.9)$$

Ενδεικτικά να αναφέρουμε ότι ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου Francis ( $n_{στρ}$ ) λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.70 έως 0.94, ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας ( $n_{γεν}$ ) κυμαίνεται από 0.96 έως 0.97 και του μετασχηματιστή ( $n_{μετ}$ ) μεταξύ 0.98 και 0.99.

### 1.1.2 ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΘΕΩΡΗΜΑ (Π) Buckingham

Η διαστατική ανάλυση είναι μία διαδικασία κατά την οποία το σύνολο των μεταβλητών που εκφράζουν μία φυσική κατάσταση, μπορεί να ελαττωθεί σε αριθμό μικρότερων αδιάστατων ομάδων για εξοικονόμηση προσπαθειών. Εφαρμόζεται σε στροβιλομηχανές και μας επιτρέπει: α) την πρόβλεψη της απόδοσης της πρωτότυπης στροβιλομηχανής μέσω της προσομοίωσης σε υπό δοκιμή μοντέλα και β) να επιλέξουμε την κατάλληλη στροβιλομηχανή συναρτήσει της μέγιστης απόδοσης, για δεδομένο εύρος φορτίου, ταχύτητας και παροχής.

Ας υποθέσουμε μια επιφάνεια ελέγχου με δεδομένα χαρακτηριστικά γύρω από μία στροβιλομηχανή και ας αγνοήσουμε όλες τις λεπτομέρειες της ροής. Η μελέτη που θα διεξάγουμε θα αφορά μόνο τη συγκεκριμένη μηχανή. Προκειμένου να μπορέσουμε να μεγαλώσουμε την γκάμα για εξέταση και άλλων μηχανών θα πρέπει να συμπεριλάβουμε την επίδραση των γεωμετρικών μεταβλητών στην απόδοση. Αυτές οι γεωμετρικές μεταβλητές είναι η διάμετρος της πτερωτής  $D$ , το σχήμα μπορεί να γραφτεί σαν λόγος μηκών  $l1/D$ ,  $l2/D$  και η ποιότητα της επιφάνειας να έχει ένα χαρακτηριστικό μήκος τραχύτητας  $e$ .

Η επίδοση μια στροβιλομηχανής είναι δυνατό να γραφτεί συναρτήσει των μεταβλητών ελέγχου, γεωμετρικών μεταβλητών καθώς και των ιδιοτήτων του ρευστού. Επομένως αν θεωρήσουμε ως εξαρτημένες μεταβλητές τον βαθμό απόδοσης ( $n$ ), την ισχύ ( $P$ ) και την ωφέλιμη ενέργεια  $g \cdot H$  μπορούμε να καταλήξουμε σε τρεις (3) σχέσεις:

$$g \cdot H = f_1 \left( Q, \Omega, D, \rho, \mu, e, \frac{l1}{D}, \frac{l2}{D}, \dots \right) \quad (1.10)$$

$$n = f_2 \left( Q, \Omega, D, \rho, \mu, e, \frac{l1}{D}, \frac{l2}{D}, \dots \right) \quad (1.11)$$

$$P = f_3\left(Q, \Omega, D, \rho, \mu, e, \frac{l1}{D}, \frac{l2}{D}, \dots\right) \quad (1.12)$$

Για γεωμετρικά όμοιες στροβιλομηχανές οι όροι  $l1/D$ ,  $l2/D$ , παραλείπονται. Ο αριθμός των αδιάστατων ομάδων που χρειάζονται για την δυναμική ομοιότητα υπολογίζονται από το  $\pi$ -θεώρημα του Buckingham. Το  $\pi$ -θεώρημα μας λέει ότι αν έχουμε  $M$  ανεξάρτητες μεταβλητές και  $N$  διαστάσεις, τότε πρέπει να υπάρχουν το ελάχιστο  $M-N$  αδιάστατες ομάδες, η μορφή των οποίων δεν είναι προφανής.

Μερικές μορφές οι οποίες μπορούν να αναχθούν είναι οι παρακάτω:

- **Συντελεστής φορτίου ( $\psi$ )** και η μαθηματική του έκφραση είναι

$$\psi = \frac{g \cdot H}{(\Omega \cdot D)^2} = f_4\left(\frac{Q}{\Omega \cdot D^3}, \frac{\rho \cdot \Omega \cdot D^2}{\mu}, \frac{e}{D}\right) \quad (1.13)$$

- **Βαθμός απόδοσης**

$$n = f_5\left(\frac{Q}{\Omega \cdot D^3}, \frac{\rho \cdot \Omega \cdot D^2}{\mu}, \frac{e}{D}\right) \quad (1.14)$$

- **Συντελεστής ισχύος**

$$\hat{P} = \frac{P}{\rho \cdot \Omega^3 \cdot D^5} = f_4\left(\frac{Q}{\Omega \cdot D^3}, \frac{\rho \cdot \Omega \cdot D^2}{\mu}, \frac{e}{D}\right) \quad (1.15)$$

Η ποσότητα  $Q/(\Omega D^3)$  είναι ένας συντελεστής ογκομετρικής παροχής και από αυτήν την αδιάστατη ομάδα προκύπτει ο συντελεστής παροχής  $\Phi$ , ο οποίος είναι

$$\Phi = \frac{Q}{\Omega \cdot D^3} \quad (1.16)$$

Θα θεωρήσουμε ότι η ποιότητα της επιφάνειας και κατ' επέκταση η τραχύτητα  $e$ , είναι πολύ μικρή και ότι ο αριθμός Reynolds ( $Re$ ) είναι μεγάλος, επομένως οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$\psi = f_4\left(\frac{Q}{\Omega \cdot D^3}\right) \quad (1.17)$$

$$n = f_5\left(\frac{Q}{\Omega \cdot D^3}\right) \quad (1.18)$$

$$\hat{P} = f_4\left(\frac{Q}{\Omega \cdot D^3}\right) \quad (1.19)$$

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε έναν υδροστρόβιλο με σταθερή γεωμετρία. Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι υπάρχει μία μοναδική σχέση ανάμεσα στο βαθμό απόδοσης και τον συντελεστή παροχής, όταν δεν έχουμε εμφάνιση σπηλαίωσης και η επίδραση του αριθμού Reynolds ( $Re$ ) είναι αμελητέα. Σε

αυτήν την περίπτωση η μέγιστη απόδοση  $\eta = \eta_{\max}$  εμφανίζεται για μία μοναδική τιμή του συντελεστή παροχής  $\Phi = \Phi_1$ , όπως επίσης και σε μοναδικές τιμές  $\psi = \psi_1$  και  $\hat{P} = \hat{P}_1$  και μπορούμε να γράψουμε

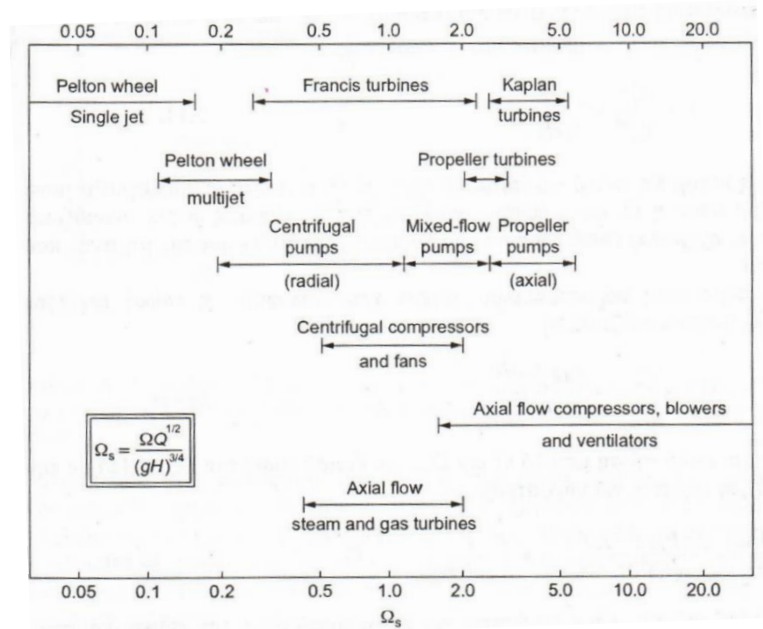
$$\Phi_1 = \frac{Q}{\Omega \cdot D^3} = \text{σταθερό} \quad (1.20)$$

$$\psi_1 = \frac{g \cdot H}{\Omega^2 \cdot D^2} = \text{σταθερό} \quad (1.21)$$

$$\hat{P}_1 = \frac{P}{\rho \cdot \Omega^3 \cdot D^5} = \text{σταθερό} \quad (1.22)$$

Ένα μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται συχνά στους υδροστροβίλους είναι και ειδική ταχύτητα ισχύος  $\Omega_{SP}$ , η οποία ορίζεται ως

$$\Omega_{SP} = \frac{\hat{P}_1^{1/2}}{\psi_1^{5/4}} = \frac{\Omega \cdot (P/\rho)^{1/2}}{(g \cdot H)^{5/4}} \quad (1.23)$$



Εικόνα 6-Περιοχές ισχύος ειδικών ταχυτήτων για στροβιλομηχανές διαφόρων ειδών. ΠΗΓΗ: "Στροβιλομηχανές S.L. DIXON / C.A.

## 1.2 Σκοπός Εργασίας

Μια από τις σημαντικές πηγές ανανεώσιμης ενέργειας στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας είναι οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις στον Πολύφητο στην ομόνυμη λίμνη. Το συγκεκριμένο υδροηλεκτρικό εργοστάσιο τέθηκε σε λειτουργία το 1974 και φέρει τρεις υδροστροβίλους Francis 125MW ο καθένας. Ωστόσο, η διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή το τμήμα του στροβίλου, παρουσιάζει μείωση της απόδοσης με το πέρασμα των χρόνων, καθώς υφίσταται βλάβες κυρίως λόγω σπηλαιώσης, διάβρωσης από λάσπη, ελαττωμάτων υλικού και κόπωσης. Η μελέτη του φαινομένου της σπηλαιώσης

είναι χρήσιμη για τη μείωση των βλαβών και τη μείωση της απόδοσης του υδροστροβίλου και των εξαρτημάτων του. Έτσι, η μελέτη του φαινομένου της σπηλαίωσης είναι ζωτικής σημασίας, προκειμένου να μπορέσει να συνεχίσει να υφίσταται το συγκεκριμένο εργοστάσιο και να συμβάλλει θετικά στη περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας (π.χ. θέσεις εργασίας, περιβάλλον, αγροτική οικονομία κ.α.)

### 1.3 Περιγραφή Υδροστροβίλων FRANCIS

Οι υδροστρόβιλοι Francis ανήκουν στην κατηγορία υδροστροβίλων αντιδράσεως και αποτελείται από τα εξής παρακάτω μέρη:

- Σπειροειδές κέλυφος ή συλλέκτης όπου στο εσωτερικό υπάρχουν τα οδηγητικά πτερύγια και ο δρομέας
- Οδηγητικά πτερύγια τα οποία είναι σταθερά (στατικά πτερύγια) ή περιστρεφόμενα (πύλες διόδου)
- Δρομέα (ή ρότορας) ο οποίος φέρει πτερύγια τα οποία περιστρέφονται

Τα κύρια χαρακτηριστικά των υδροστροβίλων είναι:

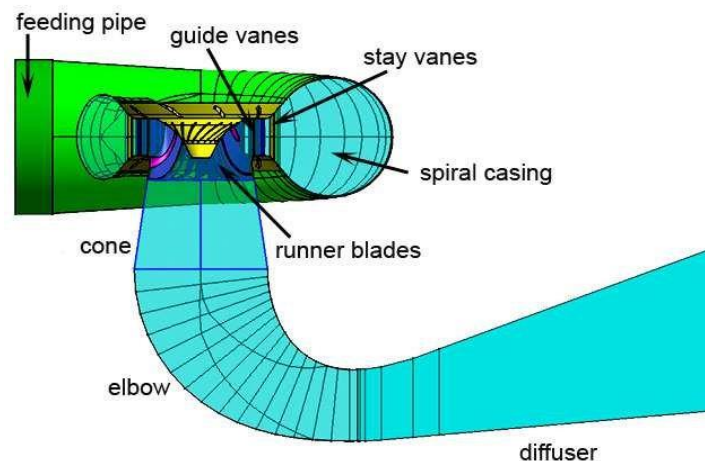
- Από τη συνολική πτώση πίεσης, μόνο ένα μέρος λαμβάνει χώρα στην διατομή εισόδου της περωτής, ενώ η εναπομείναν πτώση πίεσης εμφανίζεται στην περωτή
- Η ροή του νερού γεμίζει πλήρως τις διόδους του δρομέα σε αντίθεση με τον υδροστρόβιλο Pelton, όπου μόνο ένα (1) ή δύο (2) πτερύγια έρχονται σε επαφή με το νερό σε μια χρονική στιγμή
- Τα ρυθμιστικά πτερύγια είναι μεταβλητής γωνίας προκειμένου να επιτυγχάνεται αλλαγή της διεύθυνσης της ροής, όπως επίσης και για έλεγχο και ρύθμιση της παροχής
- Ο αγωγός απαγωγής τοποθετείται κατά κύριο λόγο στην έξοδο του στροβίλου και θεωρείται μέρος του

Η ροή του νερού εισρέει εφαπτομενικά, μέσω του σπειροειδούς κελύφους, στο στρόβιλο με μεγάλη πίεση. Η επιφάνεια του σπειροειδούς κελύφους, κατά την κίνηση του νερού, μειώνεται σταδιακά κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η ταχύτητα της ροής να παραμένει σταθερή. Κατά την είσοδο στο κέλυφος η ροή έρχεται σε επαφή με τα οδηγητικά πτερύγια, τα οποία βρίσκονται περιμετρικά του κελύφους, προκειμένου να την οδηγήσουν με τη σωστή γωνία στα ρυθμιστικά πτερύγια και με τη σειρά τους στο δρομέα και να τον περιστρέψουν. Η ταχύτητα στην είσοδο του κελύφους και λίγο πριν προσκρούσει στα σταθερά πτερύγια έχει ακτινική διεύθυνση φοράς. Στη συνέχεια τα περιστρεφόμενα πτερύγια ρυθμίζονται κατά τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να ελέγξουμε την παροχή του όγκου νερού στο δρομέα. Η γωνία κλίσης των ρυθμιζόμενων πτερυγίων στις συνθήκες λειτουργίας είναι τέτοια, προκειμένου η ροή, καθώς εξέρχεται από αυτά, να είναι παράλληλη με τα πτερύγια του δρομέα. Συνήθως ο αριθμός

των σταθερών (οδηγητικών) πτερυγίων είναι ίδιος με τον αριθμό των ρυθμιστικών, ενώ ο αριθμός των πτερυγίων του δρομέα δεν έχει κοινό πολλαπλάσιο με τα ρυθμιστικά πτερύγια, για την αποφυγή κρουστικών απωλειών. Σε διαφορετική περίπτωση θα είχαμε εμφάνιση έντονων δονήσεων, η οποία θα ήταν συνέπεια της ταυτόχρονης πρόσκρουσης, της ροής, δύο ή περισσότερων ρυθμιστικών πτερυγίων με τα πτερύγια του δρομέα. Το σύνολο των ρυθμιστικών πτερυγίων υπολογίζεται με μία προσεγγιστική σχέση και είναι  $Z \approx 17 \cdot R_d^{1/3}$ , όπου  $R_d$  είναι η ακτίνα της στεφάνης που τοποθετούνται. Ο αριθμός  $Z$  που υπολογίζεται είναι ο πλησιέστερος ακέραιος και πολλαπλάσιο του 2 ή του 4 για λόγους συμμετρίας της στεφάνης και την κατασκευή της σε 2 ή 4 τμήματα. Για τα πτερύγια του δρομέα του στροβίλου Francis προτιμάται ο αριθμός τους να είναι μονός για τη μη εμφάνιση ταλαντώσεων και συντονισμού, όπως αναφέρθηκε παραπάνω και συνήθως είναι  $Z=11, 13, 15$ , ενώ υπάρχει μία ιδιαίτερη προτίμηση για  $Z=13$ . Καθώς ο δρομέας περιστρέφεται δημιουργείται πτώση πίεσης, ενώ ένα μέρος της ορμής του νερού μεταφέρεται στο δρομέα. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της στροφορμής του νερού και τη δημιουργία έργου στην άτρακτο του στροβίλου. Η ροή κατά την έξοδο της από το δρομέα έχει αξονική διεύθυνση και δεν υπάρχει στροφορμή στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Στη συνέχεια διέρχεται στον αγωγό απαγωγής και καταλήγει στη διώρυγα απαγωγής. Σε αυτό το σημείο να τονίσουμε ότι ο αγωγός απαγωγής και ειδικότερα η έξοδος του, είναι αναγκαίο να βρίσκεται βυθισμένη κάτω από την επιφάνεια του νερού στη διώρυγα εκφυγής, προκειμένου ο στρόβιλος να έχει πάντοτε νερό, ενώ ο αγωγός χρησιμεύει και σαν διαχύτης, όπου μπορούμε να μειώσουμε την κινητική ενέργεια εξόδου και να πετύχουμε μεγαλύτερη δυνατή μετατροπή ενέργειας μέσα στο στρόβιλο.

### 1.3.1 Ανάλυση Υδροστροβίλου FRANCIS

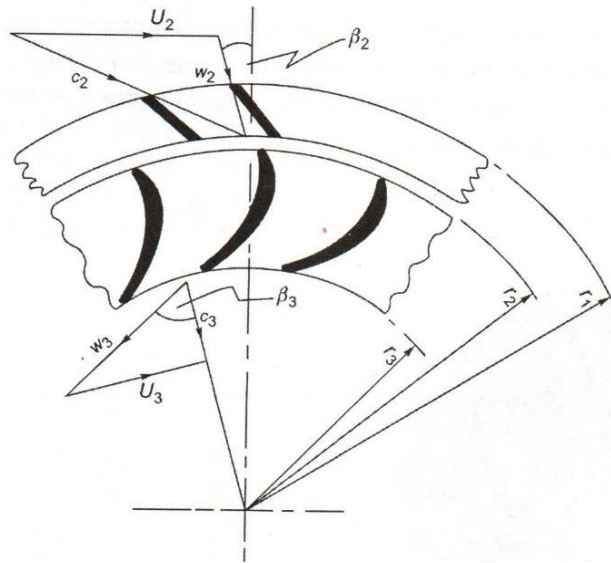
Η εικόνα 7 μας απεικονίζει την τομή ενός υδροστροβίλου Francis, όπου διακρίνονται η είσοδος του νερού, το σπειροειδές κέλυφος, τα σταθερά και ρυθμιζόμενα πτερύγια, ο δρομέας με τα πτερύγια, ο αγωγός απαγωγής και ο διαχύτης.



Εικόνα 7-Τομή υδροστροβίλου Francis



Όπως φαίνεται και από την εικόνα 7 η ροή στην είσοδο είναι ακτινική, ενώ στην έξοδο του στροβίλου είναι αξονική. Αυτό γίνεται καλύτερα αντιληπτό από την εικόνα 8 παρακάτω, όπου φαίνονται τα τρίγωνα ταχυτήτων τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο.



Εικόνα 8-Τομή πτερυγίων στροβίλου Francis και διαγράμματα ταχυτήτων στην είσοδο και στην έξοδο του δρομέα ΠΗΓΗ: «Στροβιλομηχανές» S.L. DIXON/ C.A. HALL

Η ροή εισέρχεται στα οδηγητικά πτερύγια ακτινικά (δεν έχουμε αξονική διεύθυνση) και η ταχύτητα είναι η απόλυτη και ίση με  $c_1$ . Στην είσοδο των πτερυγίων η απόλυτη γωνία της ροής είναι:

$$a_1 = \tan^{-1} \left( \frac{c_{u1}}{c_{r1}} \right) \quad (1.24)$$

Καθώς εξέρχεται από τα οδηγητικά πτερύγια η ροή έχει γωνία  $a_2$  και απόλυτη ταχύτητα  $c_2$  και με αυτές τις συνθήκες εισέρχεται στο δρομέα. Ο δρομέας περιστρέφεται με μία ταχύτητα  $u_2$ , επομένως η σχετική ταχύτητα την οποία αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής που βρίσκεται στο δρομέα είναι  $w_2=c_2-u_2$ . Η σχέση αυτή προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των ταχυτήτων. Η ροή προσκρούει με γωνία  $\beta_2$  στα πτερύγια του δρομέα και υπολογίζεται από τη σχέση

$$\beta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{c_{u2} - u_2}{c_{r2}} \right) \quad (1.25)$$

Κατά την έξοδο από το δρομέα θα θεωρήσουμε ότι η ροή έχει μόνο ακτινική/εφαπτομενική διεύθυνση, χωρίς αυτή η παραδοχή να επηρεάζει την ανάλυση μας. Ωστόσο στην πραγματικότητα στην έξοδο υφίσταται μία συνιστώσα της ταχύτητας στην αξονική διεύθυνση. Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι η διεύθυνση της ταχύτητας της ροής τόσο στην είσοδο των οδηγητικών πτερυγίων, όσο και στην είσοδο των πτερυγίων του δρομέα, εφάπτεται της μέσης γραμμής κυρτότητας του κάθε πτερυγίου στην ακμή προσβολής τους. Η συνθήκη αυτή είναι η ιδανική, διότι με τον τρόπο αυτό μειώνονται οι απώλειες

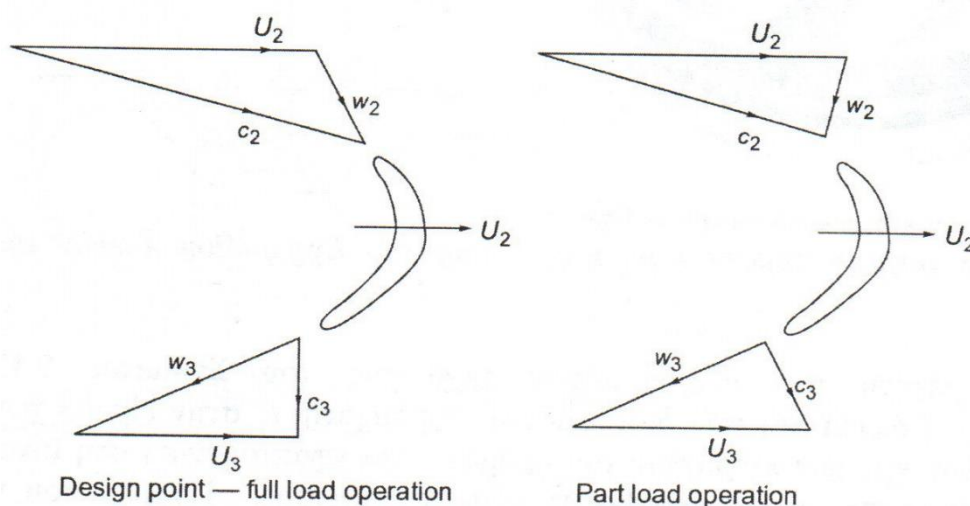
εισόδου. Επομένως η γωνία ροής του νερού είναι αυτή που παίζει σημαντικό ρόλο στην ισχύ εξόδου των στροβίλων και όχι η γωνία των πτερυγίων.

Η σχετική ταχύτητα εξόδου του νερού από το δρομέα ορίζεται ως  $w_3$  και η γωνία εξόδου δίδεται από τη σχέση

$$\beta_3 = \tan^{-1} \left( \frac{c_{u3} + u_3}{c_{r3}} \right) \quad (1.26)$$

Όπως και προηγουμένως η απόλυτη ταχύτητα εξόδου της ροής είναι η  $c_3$  και υπολογίζεται διανυσματικά από τη σχέση  $c_3 = w_3 + u_3$ . Στον υπολογισμό της γωνίας  $\beta_3$  η ταχύτητα  $c_{u3}$  αφορά την αξονική διεύθυνση, την οποία στις αναλύσεις θα θεωρήσουμε ότι είναι ίση με το μηδέν.

Ορισμένες φορές ο στρόβιλος Francis είναι αναγκαίο να λειτουργήσει υπό μερικό φορτίο. Σε αυτή την περίπτωση τα ρυθμιστικά πτερύγια περιστρέφονται κατάλληλα και η ισχύς του στροβίλου μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μειώνεται η διαθέσιμη ελεύθερη επιφάνεια της ροής, κατά συνέπεια μειώνεται και η παροχή του νερού, ενώ η περιστροφική ταχύτητα των πτερυγίων του δρομέα παραμένει σταθερή. Επίσης σε συνθήκες μειωμένου φορτίου αυξάνεται η γωνία προσβολής των πτερυγίων στην είσοδο, ενώ στην έξοδο του δρομέα η απόλυτη ταχύτητα της ροής έχει μία υπολογίσιμη εφαπτομενική συνιστώσα. Στις εν λόγω συνθήκες εμφανίζονται μεγάλες απώλειες πίεσης και άρα ύψος υδατόπτωσης. Στην εικόνα 9 απεικονίζονται τα τρίγωνα ταχύτητας ενός στροβίλου Francis σε λειτουργία πλήρους φορτίου και μερικού φορτίου.



Εικόνα 9-Τρίγωνα ταχυτήτων στροβίλου Francis σε πλήρες φορτίο και σε μερικό φορτίο. ΠΗΓΗ: «Στροβιλομηχανές» S.L. DIXON/ C.A. HALL

### 1.3.2 Βασικές Εξισώσεις

Το θεωρητικό έργο που δέχεται ο υδροστροβίλος από το νερό, ανά μονάδα μάζας, υπολογίζεται από τη σχέση του Euler και είναι

$$\Delta W = u_2 \cdot c_{u2} - u_3 \cdot c_{u3} \quad (1.27)$$

Επειδή όμως θεωρήσαμε ότι η ροή στην έξοδο του στροβίλου δεν έχει συστροφή, η ταχύτητα  $u_3$  είναι ίση με το μηδέν ( $u_3=0$ ) επομένως η σχέση (1.27) γράφεται ως εξής

$$\Delta W = u_2 \cdot c_{u2} \quad (1.28)$$

Ο υδροστρόβιλος Francis, όπως όλοι οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως, έχουν ωφέλιμο ύψος υδατόπτωσης ίσο με  $H_e$ , το οποίο είναι ίσο με το ολικό ύψος στην είσοδο του σπειροειδούς κελύφους σε σχέση με την επιφάνεια της διώρυγας απαγωγής (πίσω ταμιευτήρας). Καθώς το νερό εισέρχεται στο δρομέα του υδροστροβίλου η συνολική ενέργεια είναι άθροισμα της δυναμικής ενέργειας (λόγω υψομετρικής διαφοράς από την ελεύθερη επιφάνεια του άνω ταμιευτήρα), της κινητικής ενέργειας (λόγω της ταχύτητας του νερού στο σημείο εκείνο) και της ενέργειας λόγω πίεσης. Επίσης θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και τις απώλειες ύψους  $\Delta H_N$ , λόγω τριβής στο κέλυφος, στα οδηγητικά και ρυθμιστικά πτερύγια. Εάν εφαρμόσουμε την εξίσωση Bernoulli στην είσοδο του δρομέα και στην έξοδο θα προκύψει η παρακάτω εξίσωση

$$g \cdot (\Delta H_E - \Delta H_N) = \frac{p_2 - p_a}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot c_2^2 + g \cdot z_2 \quad (1.29)$$

Στην εξίσωση (1.29)  $p_2$  είναι η απόλυτη στατική πίεση στην είσοδο του δρομέα, ενώ  $p_a$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση.

Καθώς το νερό εξέρχεται του δρομέα, η ενέργεια του ελαττώνεται κατά ένα ποσό  $\Delta W$ , το οποίο είναι το ειδικό έργο και κατά ένα ποσό  $g\Delta H_R$ , το οποίο είναι το έργο των δυνάμεων τριβής στο δρομέα και η ενέργεια του νερού που απομένει είναι το σύνολο της δυναμικής, της κινητικής και της ενέργειας πίεσης. Εφαρμόζοντας για ακόμη μία φορά την εξίσωση Bernoulli θα προκύψει η εξής εξίσωση

$$g \cdot (\Delta H_E - \Delta H_N - \Delta H_R) - \Delta W = \frac{p_3 - p_a}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot c_3^2 + g \cdot z_3 \quad (1.30)$$

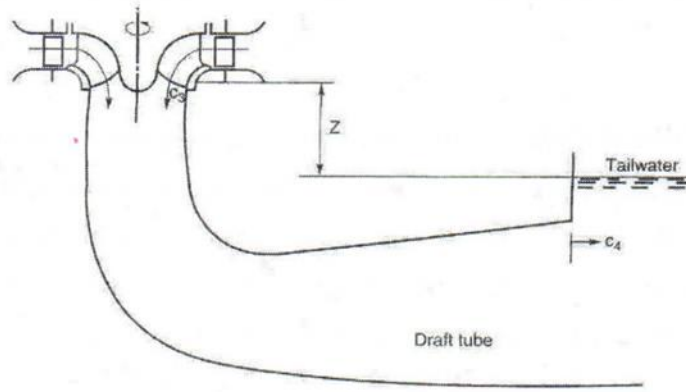
όπου  $p_3$  είναι η στατική πίεση στην έξοδο του δρομέα.

Αν τις σχέσεις (1.29) και (1.30) τις αφαιρέσουμε μεταξύ τους θα λάβουμε το ειδικό έργο με της εξής σχέση:

$$\Delta W = \frac{p_{03} - p_{02}}{\rho} - g \cdot \Delta H_R + g \cdot (z_2 - z_3) \quad (1.31)$$

όπου  $p_{03}$  και  $p_{02}$  είναι οι ολικές πιέσεις στην έξοδο και την είσοδο του δρομέα αντίστοιχα.

Τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω φαίνονται στην εικόνα 10 που ακολουθεί, στην οποία έχουμε έναν υδροστρόβιλο Francis κατακόρυφου άξονα.



Εικόνα 10-Είσοδος και έξοδος δρομέα και ο αγωγός απαγωγής ΠΗΓΗ: «Στροβιλομηχανές» S.L. DIXON/ C.A. HALL

Στην εικόνα 10 το ύψος  $z$  είναι το ύψος  $z_3$ , δηλαδή ισχύει ότι  $z=z_3$  και είναι η πιο σημαντική διάσταση. Το ύψος  $z$  είναι η κατακόρυφη απόσταση από την έξοδο του δρομέα και την ελεύθερη επιφάνεια του κάτω ταμιευτήρα (draft tube).

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας από την έξοδο του δρομέα μέχρι και ελεύθερη επιφάνεια του κάτω ταμιευτήρα μπορεί να γραφτεί ως εξής

$$\frac{p_3}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot c_3^2 + g \cdot z - g \cdot \Delta H_{DT} = \frac{p_a}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot c_4^2 \quad (1.32)$$

Το γινόμενο  $g\Delta H_{DT}$  εκφράζει τις απώλειες της ενέργειας στον αγωγό απαγωγής ενώ η ταχύτητα  $c_4$  είναι η ταχύτητα του νερού στην έξοδο.

Αν θέλουμε να ορίσουμε τον υδραυλικό βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου Francis θα υπολογίζεται από τη σχέση

$$n_H = \frac{\Delta W}{g \cdot H_E} = \frac{u_2 \cdot c_{u2} - u_3 \cdot c_{u3}}{g \cdot H_E} \quad (1.33)$$

Παραπάνω όμως θεωρήσαμε ότι  $c_{u3}=0$  και επομένως ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης απλοποιείται και γράφεται

$$n_H = \frac{\Delta W}{g \cdot H_E} = \frac{u_2 \cdot c_{u2}}{g \cdot H_E} \quad (1.34)$$

Προκειμένου να υπολογίσουμε το συνολικό βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου θα πρέπει να γνωρίζουμε τον υδραυλικό βαθμό απόδοσης  $n_H$ , που υπολογίσαμε παραπάνω, καθώς και τον μηχανικό βαθμό απόδοσης του  $n_m$ . Δηλαδή ισχύει  $n_0 = n_H \cdot n_m$ . Ωστόσο όταν έχουμε στρόβιλο της τάξης των 500 ~1000 MW οι μηχανικές απώλειες  $n_m$  είναι μικρές και ουσιαστικά ισχύει ότι  $n_0 = n_H$ .

Οι υδροστροβίλοι Francis συνήθως συνδυάζονται με γεννήτριες οι οποίες περιστρέφονται με 50~60 Hz, για το λόγο αυτό η ταχύτητα περιστροφής τους είναι σταθερή. Όταν οι συνθήκες το απαιτήσουν και πρέπει να λειτουργήσει υπό μερικό φορτίο, τότε μεταβάλλεται η γωνία των ρυθμιστικών περυγίων σε

μια βέλτιστη γωνία. Παρόλα αυτά έχουμε τη δημιουργία ταχύτητας συστροφής στην έξοδο του δρομέα και κατά συνέπεια τη μείωση του βαθμού απόδοσης. Επιπλέον η συστροφή αυτή είναι ικανή να προκαλέσει σχηματισμό φυσαλίδων σπηλαιώσης κατά μήκος του αγωγού απαγωγής.

### 1.3.3 Θεωρία ομοιότητας – Ειδικός αριθμός στροφών

Όπως γνωρίζουμε όλοι ο υδροστροβίλος είναι μία μεγάλη κατασκευή, γεγονός το οποίο καθιστά τη δοκιμή του σχεδόν αδύνατη σε πλήρη κλίμακα. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται οι νόμοι της ομοιότητας, οι οποίοι διευκολύνουν τη μελέτη - δοκιμή του υδροστροβίλου μέσω διαφόρων τεχνικών προτύπων ή μοντέλων. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα ως προς τη λειτουργία του πραγματικού υδροστροβίλου, όσον αφορά τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας, το βαθμό απόδοσης, τη σπηλαιώση, τη λειτουργία σε συνθήκες μερικού φορτίου κλπ. Οι δοκιμές αυτές μας επιτρέπουν, όταν το μοντέλο μας δεν επιτυγχάνει το επιθυμητό αποτέλεσμα, να το τροποποιούμε – βελτιώνουμε και να επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρι την ικανοποίηση του στόχου.

Οι νόμοι που χρησιμοποιούνται για να ορίσουν όμοιους υδροστροβίλους στα ίδια σημεία λειτουργίας και με την προϋπόθεση ότι έχουμε πλήρως τυρβώδη ροή είναι οι εξής:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \quad (1.35)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (1.36)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \cdot \frac{n_1}{n_2} \quad (1.37)$$

Στις παραπάνω σχέσεις (1.35), (1.36), (1.37) H, Q, D, N, P και n είναι το ύψος (H), η παροχή (Q), η διάμετρος (D), ο αριθμός στροφών (N), η ισχύς (P) και ο βαθμός απόδοσης (n) αντίστοιχα, ενώ με το δείκτη 1 και 2 συμβολίζουμε τους δύο υδροστροβίλους όπου μελετάμε.

Παρατηρώντας τις παραπάνω σχέσεις και ειδικότερα τη σχέση με την ισχύ είναι πρακτικά αδύνατο να έχουμε ακριβή γεωμετρική ομοιότητα, μεταξύ των δύο (2) υδροστροβίλων λόγω του ότι:

- τα πτερύγια του μοντέλου πιθανώς να είναι παχύτερα από του πρωτότυπου
- η σχετική τραχύτητα των πτερυγίων του μοντέλου είναι μεγαλύτερη
- τα ακτινικά διάκενα, στην κεφαλή των πτερυγίων, είναι μεγαλύτερα και επομένως θα είναι μεγαλύτερες και οι απώλειες διαρροής.

και κατά συνέπεια δεν θα είναι ίδιος και ο βαθμός απόδοσης άρα τα αποτελέσματα τα οποία θα πάρουμε δεν θα είναι ακριβή.

Για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης έχουν αναπτυχθεί πειραματικές σχέσεις διόρθωσης του. Μία από τις γνωστότερες απλουστεύσεις είναι του Moody και Zowski (1969) η οποία για τον υδροστροβίλο Francis γράφεται ως εξής:

$$\frac{1-n}{1-n_m} = \left( \frac{D_m}{D} \right)^{0.2} \quad (1.38)$$

όπου το  $m$  συμβολίζει το μοντέλο μας.

Ένα επιπλέον μέγεθος το οποίο πρέπει να γνωρίζουμε για τη μελέτη του υδροστροβίλου είναι και ο Ειδικός Αριθμός Στροφών ( $N_s$ ). Ο Ειδικός Αριθμός Στροφών είναι σταθερός για γεωμετρικά όμοιους υδροστροβίλους, αποτελεί κριτήριο της γεωμετρικής μορφής του δρομέα και δίδεται από τη γενική σχέση:

$$N_s = \frac{K \cdot N \cdot Q^{\frac{1}{2}}}{(g \cdot H)^{\frac{3}{4}}} \quad (1.39)$$

Ο συντελεστής  $K$  περιλαμβάνει την πυκνότητα και διάφορους συντελεστές που εξαρτώνται από τις μονάδες που χρησιμοποιούμε.

Η παραπάνω σχέση (1.39) μπορεί να απλοποιηθεί αν παραλείψουμε το συντελεστή  $K$  και επομένως ο Ειδικός Αριθμός Στροφών γράφεται

$$N_s = \frac{N \cdot Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (1.40)$$

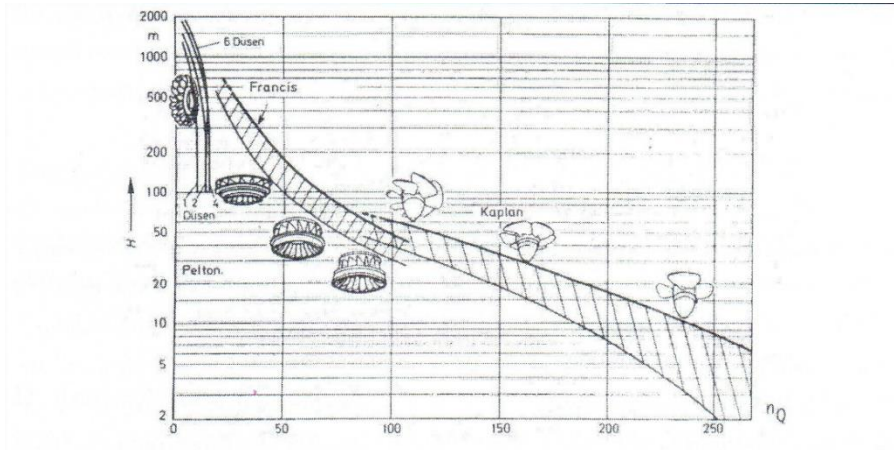
Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι ο ειδικός αριθμός στροφών για σημείο λειτουργίας, όπου η παροχή νερού είναι  $Q=1$  και το ύψος υδατόπτωσης είναι  $H=1$ , ισούται με τον αριθμό των στροφών κατ' επέκταση της περιστροφικής ταχύτητας και όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι ίδιος για γεωμετρικά όμοιους υδροστροβίλους.

Παρόλα αυτά οι μεταβλητές που εμφανίζονται συνήθως στους υδροστροβίλους είναι το ύψος υδατόπτωσης και η παραγόμενη ισχύς του υδροστροβίλου και αν λάβουμε υπόψη τις σχέσεις ομοιότητας μπορούμε να διατυπώσουμε τον ειδικό αριθμό στροφών συναρτήσει αυτών των μεταβλητών ως εξής:

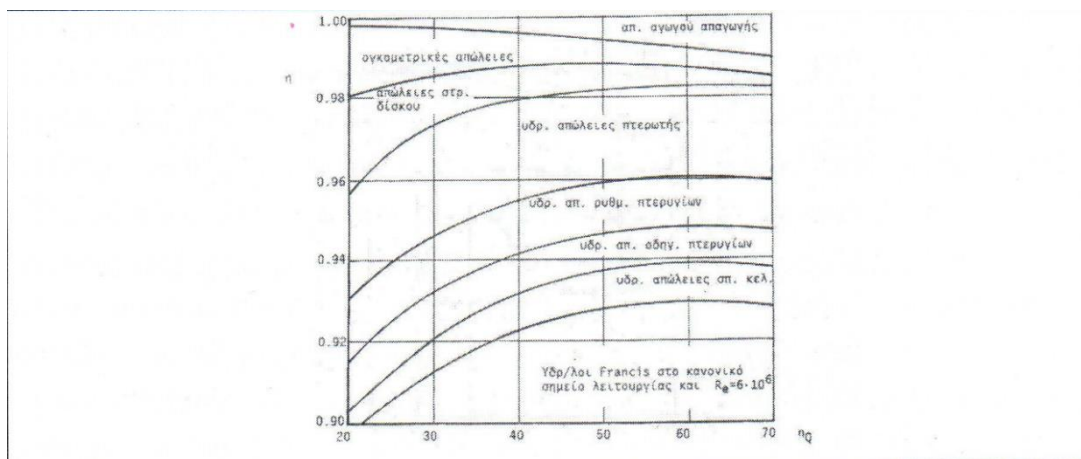
$$N_{s,T} = \frac{N \cdot P^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (1.41)$$

Σε αυτή την περίπτωση ο ειδικός αριθμός στροφών ισούται με την ταχύτητα περιστροφής γεωμετρικά όμοιου υδροστροβίλου για διαθέσιμο ύψος λειτουργίας  $H=1$  και παράγει ισχύ  $P=1$ .

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές των  $N_s$  και  $N_{s,T}$  εξαρτώνται από τις μονάδες που θα χρησιμοποιήσουμε. Οι συνηθέστερες μονάδες μέτρησης είναι rpm για τον αριθμό των στροφών, m για το διαθέσιμο ύψος,  $m^3/s$  για την παροχή νερού και kW για την ισχύ. Επιπλέον η σχέση του ειδικού αριθμού στροφών ( $N_{s,T}$ ) σε σύγκριση με τον ειδικό αριθμό στροφών ( $N_s$ ), έχει το μειονέκτημα ότι εμπεριέχει το βαθμό απόδοσης  $\eta$ , ο οποίος είναι άγνωστος και πρέπει να υπολογιστεί.



Εικόνα 11-Συχετισμός ειδικού αριθμού στροφών ανάλογα τον τύπο υδροστροβίλου και ύψος υδατόπτωσης. ΠΗΓΗ: Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ/Σημειώσεις “Υδροστρόβιλοι- Υδροηλεκτρικά έργα”



Εικόνα 12-Κατανομή διαφόρων απωλειών υδροστροβίλου Francis σε σχέση με τον ειδικό αριθμό στροφών  $N_s$ . ΠΗΓΗ: Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ/Σημειώσεις “Υδροστρόβιλοι- Υδροηλεκτρικά έργα” »

## 2 Σπηλαιώση

Η σπηλαιώση είναι ένα φαινόμενο σύνθετο, το οποίο αποτελείται από το σχηματισμό και την κίνηση θυλάκων ατμού μέσα σε ένα υγρό μέσο. Έχει αρνητικές επιπτώσεις όπως διάβρωση της επιφάνειας στο στρόβιλο, θόρυβο, κραδασμούς και τελικά μείωση του βαθμού απόδοσης. Η εμφάνιση και η συνέχεια της σπηλαιώσης σε υδροστροβίλους εξαρτάται από κάποιους παράγοντες όπως το ύψος αναρρόφησης, την ταχύτητα ροής, την ατμοσφαιρική πίεση, τη θερμοκρασία την επιφανειακή τάση, αν το υγρό περιέχει αέρια, καθώς και από τις ώρες λειτουργίας του στροβίλου. Το φαινόμενο της σπηλαιώσης είναι δύσκολο να εξαφανιστεί πλήρως, ιδιαίτερα σε συνθήκες εκτός ονομαστικής λειτουργίας. Παρόλα αυτά, θα πρέπει κατά τη σχεδίαση των στροβίλων, η εμφάνιση της να είναι η μικρότερη δυνατή και πάντα εντός αποδεκτών ορίων.

Με τη λέξη σπηλαιώση εννοούμε το βρασμό του νερού που βρίσκεται συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ενώ η στατική πίεση του είναι πολύ μικρή. Το φαινόμενο της σπηλαιώσης παρατηρείται με την εξάτμιση του νερού και την εμφάνιση φυσαλίδων ατμού νερού. Όταν συμβαίνει το φαινόμενο της σπηλαιώσης η πίεση του νερού είναι μικρότερη από την κρίσιμη πίεση ατμών στη συγκεκριμένη θερμοκρασία και το νερό περνάει από την υγρή φάση στην αέρια.

Στις περιοχές όπου έχουμε την έναρξη της σπηλαιώσης δημιουργούνται φυσαλίδες ατμού, οι οποίες μετακινούνται από μία περιοχή χαμηλής πίεσης σε μία περιοχή υψηλής πίεσης, εντός του ρευστού, με αποτέλεσμα την απότομη συμπύκνωση τους και το υγρό που περιέχουν προσκρούει στα τοιχώματα. Η κατάρρευση των θυλάκων δημιουργεί κύμα πίεσης το οποίο μεγαλώνει την στατική πίεση σε εκείνη την περιοχή και καθώς επαναλαμβάνεται το φαινόμενο αυτό προκαλεί διάβρωση, στις στερεές επιφάνειες των περυγίων, λόγω σπηλαιώσης.

Ένα άλλο μέσο ανίχνευσης της σπηλαιώσης είναι ο θόρυβος ή λευκός θόρυβος. Η έκρηξη των φυσαλίδων ατμού προκαλεί θόρυβο σε μία μεγάλη γκάμα συχνοτήτων (έχει μετρηθεί μέχρι 1 MHz) και από πειράματα που έγιναν το 1968 από τους Pearsall και McNulty, βρέθηκε ότι το επίπεδο θορύβου σπηλαιώσης και συσχετίζεται με τη διάβρωση σε κυλίνδρους. Επομένως κατά τη σχεδίαση στροβίλων οι κατασκευαστές θα πρέπει να λάβουν υπόψη την αποφυγή έναρξης σπηλαιώσης.

Τα είδη της σπηλαιώσης είναι τα εξής:

- **Σταθερή σπηλαιώση** όπου αρχίζει και τελειώνει σε μια προκαθορισμένη περιοχή
- **Υπερσπηλαιώση (super cavitation)** στην οποία η περιοχή σπηλαιώσης βρίσκεται σε μια μεγάλη περιοχή μακριά από το σημείο όπου δημιουργείται. Η υπερσπηλαιώση, είναι ένα φαινόμενο σπηλαιώσης κατά το οποίο η φυσαλίδα που σχηματίζεται από τη σπηλαιώση γίνεται αρκετά μεγάλη ώστε να περικλείει τον ατμό, οποίος ταξιδεύει μέσα στο υγρό. Οι πιθανές εφαρμογές της υπερσπηλαιώσης είναι στη μείωση της αντίστασης και του θορύβου σε υποβρύχιες μεταφορές υψηλής ταχύτητας, στον μετριασμό των επιπτώσεων από την είσοδο στο



νερό, καθώς και στην καταστολή του θορύβου. Σε γενικές γραμμές, η υπερσπηλαίωση μπορεί να επιτευχθεί με φυσικό τρόπο ή μέσω εξαερισμού με αέριο. Η φυσική υπερσπηλαίωση απαιτεί συνήθως μείωση της πίεσης ή αύξηση της ταχύτητας ροής έως ότου η περιβάλλουσα πίεση είναι αρκετά χαμηλή ώστε το νερό να εξατμιστεί. Η αεριζόμενη υπερσπηλαίωση, ωστόσο, μπορεί να παραχθεί σε πολύ χαμηλότερες ταχύτητες και υψηλότερη πίεση περιβάλλοντος με την έγχυση μη συμπυκνούμενου αερίου γύρω από ένα αντικείμενο σπηλαίωσης (π.χ. σπηλαιωτής).



Εικόνα 13-Φαινόμενο υπερσπηλαίωσης. ΠΗΓΗ: "[https://maredu.hcg.gr/modules/document/file.php/MAK212/Μηχανική Ρευστών/ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ\\_ΥΠΕΡΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ.pdf](https://maredu.hcg.gr/modules/document/file.php/MAK212/ΜηχανικήΡευστών/ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ_ΥΠΕΡΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ.pdf)"

- **Σπηλαίωση λόγω δινών** που δημιουργούνται στις άκρες των πτερυγίων π.χ. προπέλες. Αυτού του τύπου σπηλαίωση δημιουργείται από στροβιλισμό, συνήθως σε συγκεκριμένα σημεία της προπέλας όπως: στις άκρες των πτερυγίων, στη μπροστινή ακμή και στην πλήμη. Τα εν λόγω φαινόμενα σπηλαίωσης πηγάζουν από τον πυρήνα χαμηλής πίεσης των στροβίλων που αποβάλλει η προπέλα. Είναι άξιο λόγου να αναφερθεί ότι η ορατή όψη μιας δίνης παραμένει στο τμήμα σπηλαίωσης όπου οι πιέσεις είναι χαμηλές. Ωστόσο, η δίνη εξαπλώνεται πολύ πέρα από αυτό από την περιοχή όπου παρακολουθούμε.



Εικόνα 14-Σπηλαίωση λόγω δινών στις άκρες ακροπτερυγίων. ΠΗΓΗ: "(PDF) Cavitation in Francis turbines (researchgate.net)"

- **Ατμώδης σπηλαίωση.** Κατά την εμφάνιση του φαινομένου, η πίεση που επικρατεί στο νερό είναι χαμηλότερη της πίεσης ατμών, με αποτέλεσμα ποσότητα του νερού να αλλάζει φάση και να γίνεται ατμός. Η διαδικασία αυτή οδηγεί συνήθως σε δυναμικά φαινόμενα, ιδιαίτερα όταν στην συνέχεια του φαινομένου ο ατμός γίνεται ξανά ρευστό. Αυτό το φαινόμενο της απότομης αλλαγής κατάστασης, από ατμό σε υγρό, συνοδεύεται από τοπικά κρουστικά φαινόμενα. Το μέγεθος της βλάβης που μπορεί να επιφέρει η σπηλαίωση, κυμαίνεται από μία μικρή φθορά-διάβρωση μετά από κάποια χρόνια λειτουργίας ως και την πλήρη καταστροφή αν αναφερόμαστε σε μεγάλη χρονική περίοδο.
- **Δημιουργία φύλλου σπηλαίωσης.** Το είδος αυτό της σπηλαίωσης χαρακτηρίζεται από μια περιοχή ατμού, η οποία παραμένει στην ίδια θέση του πτερυγίου του στροβίλου. Σε αυτό το είδος σπηλαίωσης αυτό που παρατηρείται είναι ότι το φαινόμενο είναι ενσωματωμένο στο φύλλο του μετάλλου του πτερυγίου. Η επιφάνεια αυτής της σπηλαίωσης μπορεί να είναι πολύ γυαλιστερή και συχνά δεν χαρακτηρίζεται από διαφάνεια. Η σπηλαίωση φύλλου παρατηρείται όταν η πίεση στην άκρη του πτερυγίου είναι πολλή χαμηλή.
- **Εμφάνιση θυλάκων σπηλαίωσης.** Οι θυλάκες παρουσιάζονται αμέσως μετά την πίεση που έχει μεταδοθεί μέσω του νερού.
- **Αέριος σπηλαίωση.** Η σπηλαίωση εμφανίζεται σε τμήματα όπου η πίεση του νερού είναι μικρότερη από την πίεση του περιβάλλοντος, έτσι ώστε να εισέρχεται αέρας από το περιβάλλον προς τη συγκεκριμένη περιοχή. Ακόμη μπορεί να σχηματιστεί στην περίπτωση όπου το αέριο, το οποίο έχει ήδη αναμιχθεί με το νερό, συγκεντρώνεται σε περιοχές, τις οποίες η πίεση του νερού είναι μικρότερη από την πίεση κορεσμού.

## 2.1 Κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης

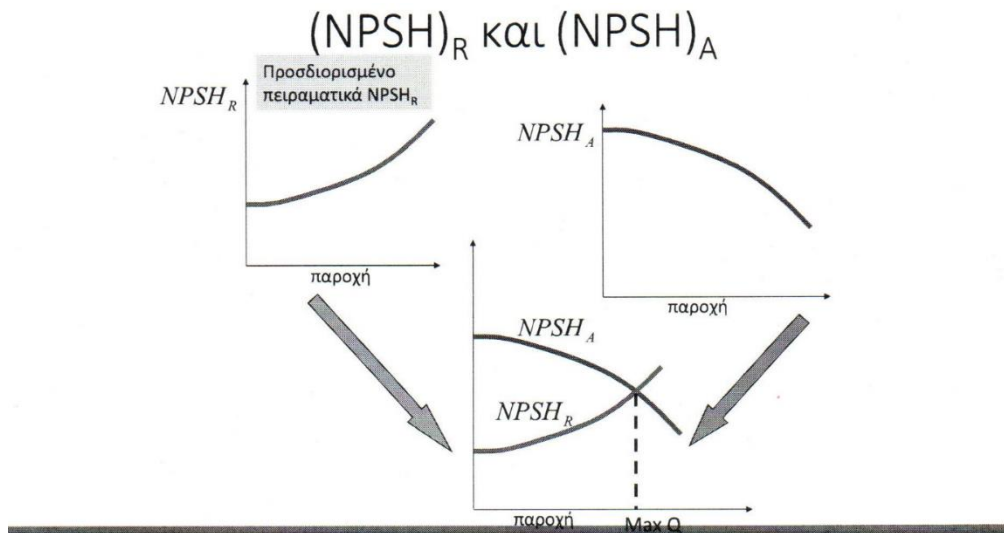
Στην προηγούμενη ενότητα αναφέραμε ότι η σπηλαίωση σε ένα υγρό εμφανίζεται όταν η στατική πίεση, γίνει μικρότερη από την τάση ατμών για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία του υγρού. Προκειμένου να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα εμφάνισης σπηλαίωσης χρησιμοποιούμε μία παράμετρο, η οποία είναι γνωστή ως κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης στην έξοδο του στροβίλου. Το κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης ή το ελάχιστο θετικό ύψος αναρρόφησης του στροβίλου (Net Positive Suction Head (NPSH ή  $H_s$ )) μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση

$$NPSH = \frac{P_s - P_v}{\rho \cdot g} \quad (2.1)$$

όπου  $p_s$  είναι η ελάχιστη πίεση στην είσοδο του στροβίλου ενώ  $p_v$  είναι κρίσιμη πίεση ατμών σε σχέση με τη θερμοκρασία του νερού.

Το κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης λαμβάνει δύο τιμές. Η πρώτη τιμή είναι το ελάχιστο απαιτούμενο ύψος αναρρόφησης  $(NPSH)_R$  που απαιτεί ο υδροστροβίλος για να λειτουργήσει και εξαρτάται από τη

σχεδίαση του δρομέα, ειδικά στην είσοδο και δίδεται από τον κατασκευαστή ως συνάρτηση της παροχής. Επομένως ο υπολογισμός του  $(NPSH)_R$  είναι πειραματικός και έχει τη μορφή καμπύλης. Η δεύτερη τιμή είναι το ελάχιστο διαθέσιμο ύψος αναρρόφησης  $(NPSH)_A$  το οποίο όμως σχετίζεται με την εγκατάσταση, δηλαδή το σύστημα σωληνώσεων μέχρι την είσοδο του στροβίλου. Προκειμένου ο υδροστρόβιλος να έχει μια ασφαλή λειτουργία πρέπει να ισχύει  $(NPSH)_A > (NPSH)_R$ .



Εικόνα 15-Κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης  $(NPSH)_R$  και  $(NPSH)_A$  σε συνάρτηση με την παροχή. ΠΗΓΗ: “Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ/Σημειώσεις “Υδροστρόβιλοι-Υδροηλεκτρικά έργα”

Κατά αντιστοιχία μπορούμε να αναφέρουμε και την ελάχιστη θετική ενέργεια αναρρόφησης στροβίλου (NPSE), η οποία υπολογίζεται κατά αντίστοιχο τρόπο ως:

$$NPSE = \frac{p_s - p_v}{\rho} \quad (2.2)$$

Όταν προκύπτει ότι  $NPSE=0$  ή  $NPSE<0$ , τότε ισχύει  $p_s=p_v$  ή  $p_s<p_v$  και άρα έχουμε την εμφάνιση σπηλαίωσης.

## 2.2 Σπηλαίωση σε υδροστροβίλους Francis

Το φαινόμενο της σπηλαίωσης στους υδροστροβίλους εμφανίζεται στην έξοδο των πτερυγίων του δρομέα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όπως κινούνται τα πτερύγια του δρομέα έρχονται σε επαφή με τη ροή του νερού, αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, παράγουν τοπικές επιταχύνσεις και μειώνεται η στατική πίεση, στο σημείο αυτό, σε τιμές πολύ χαμηλότερες από την ατμοσφαιρική (μικρότερες από την τάση ατμών του νερού) με αποτέλεσμα την εμφάνιση σπηλαίωσης. Οι εν λόγω περιοχές εμφανίζονται εκεί όπου έχουμε χαμηλό ύψος πτώσης και μεγάλη ταχύτητα, ενώ ο στρόβιλος βρίσκεται υψηλότερα από την ελεύθερη επιφάνεια του κάτω ταμιευτήρα. Για την αποφυγή - μείωση του φαινομένου, όταν έχουμε κατασκευή δρομέων μεγάλων μηχανών, η άτρακτος τοποθετείται σε κάθετη θέση.

Ειδικότερα στους υδροστροβίλους οι κύριες περιοχές και οι τύποι σπηλαιώσης είναι:

- **Φυσαλίδες σπηλαιώσης στην ακμή προσβολής (leading edge cavitation)**

Μπορεί να εμφανιστεί στην πλευρά αναρρόφησης των πτερυγίων του δρομέα και εμφανίζεται σαν προσκολλημένη φυσαλίδα πάνω στα πτερύγια. Αυτός ο τύπος σπηλαιώσης δημιουργείται όταν ο στρόβιλος λειτουργεί σε υψηλότερο ύψος από το ύψος σχεδιασμού της μηχανής, όταν η γωνία πρόσπτωσης της ροής είναι θετική και μεγαλύτερη από  $10^\circ$  περίπου και διαφέρει σε πολύ μεγάλο βαθμό από την τιμή σχεδιασμού. Επίσης μπορεί να δημιουργηθεί στην πλευρά της πίεσης όταν ο στρόβιλος λειτουργεί σε χαμηλότερο ύψος από το ύψος σχεδιασμού και όταν η γωνία πρόσπτωσης της ροής είναι αρνητική μικρότερη από  $-2^\circ$  περίπου. Αυτός ο τύπος σπηλαιώσης παρουσιάζει ένα ασταθές στάδιο, το οποίο είναι πολύ επιθετικό, τείνει να διαβρώσει βαθιά τα πτερύγια και να προκαλέσει διακυμάνσεις της πίεσης.

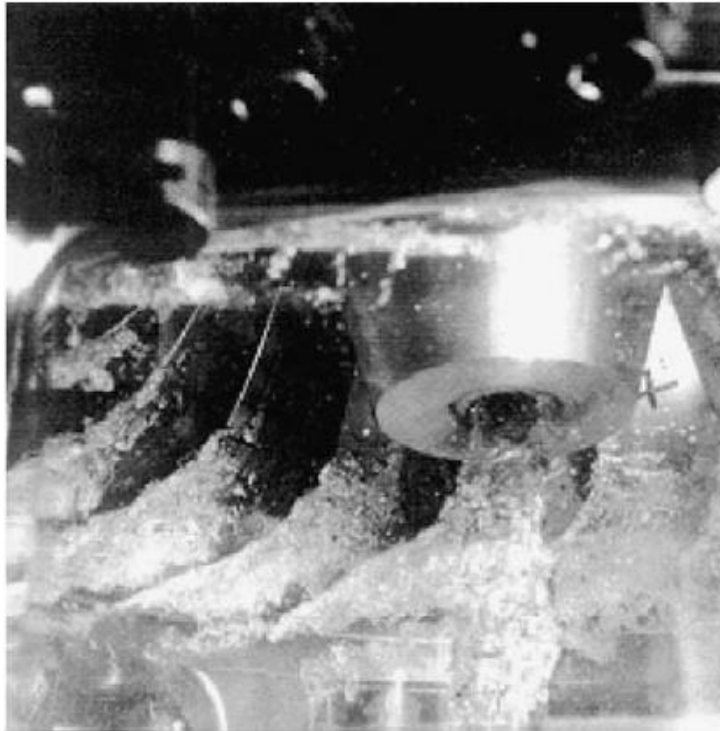


Εικόνα 16-Τύπος σπηλαιώσης leading edge cavitation. ΠΗΓΗ: "Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of cavitation"

- **Φυσαλίδες που μεταφέρονται δια μέσω των περασμάτων μεταξύ των πτερυγίων (travelling bubble cavitation)**

Αυτός ο τύπος σπηλαιώσης έχει τη μορφή μεμονωμένων φυσαλίδων που συνδέονται με την πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου κοντά στη μεσαία χορδή, δίπλα στην ουρά και συνήθως παρατηρείται όταν έχουμε χαμηλό αριθμό σπηλαιώσης. Ο σχηματισμός των φυσαλίδων αυξάνεται καθώς αυξάνεται το φορτίο και γίνεται μέγιστος όταν οι μηχανές λειτουργούν στο μέγιστο φορτίο όπου η ροή είναι μέγιστη. Είναι πολύ σοβαρή και θορυβώδης σπηλαιώση και επιπλέον μειώνει σημαντικά την απόδοση της μηχανής. Μπορεί να προκαλέσει διάβρωση σε περιπτώσεις που η φυσαλίδα σπάσει στα πτερύγια. Ο εν λόγω τύπος σπηλαιώσης είναι πολύ

ευαίσθητος στην περιεκτικότητα των πυρήνων σπηλαίωσης και στην τιμή του αριθμού σπηλαίωσης ή Thoma.



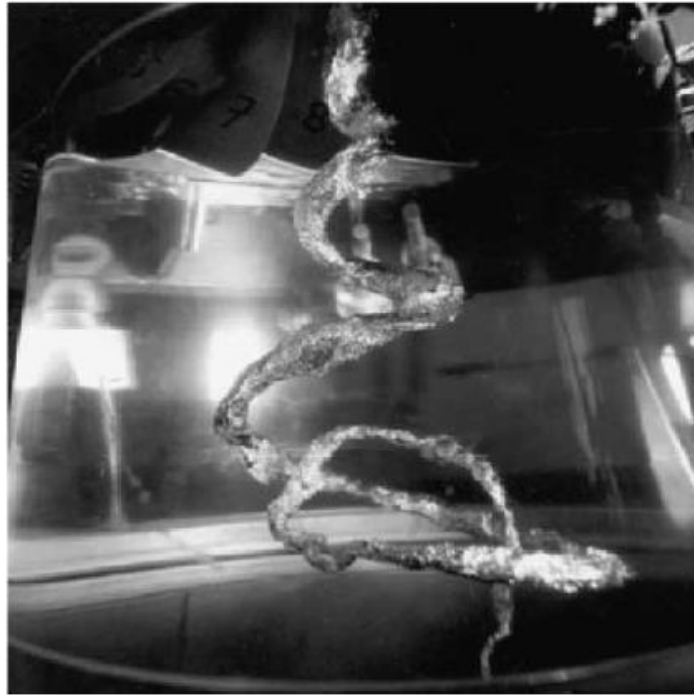
Εικόνα 17- Travelling bubble cavitation. ΠΗΓΗ: "Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of cavitation"

- **Στήλη σπηλαίωσης λόγω συστροφής και μειωμένης πίεσης στον αγωγό απαγωγής (draft swirl tube)**

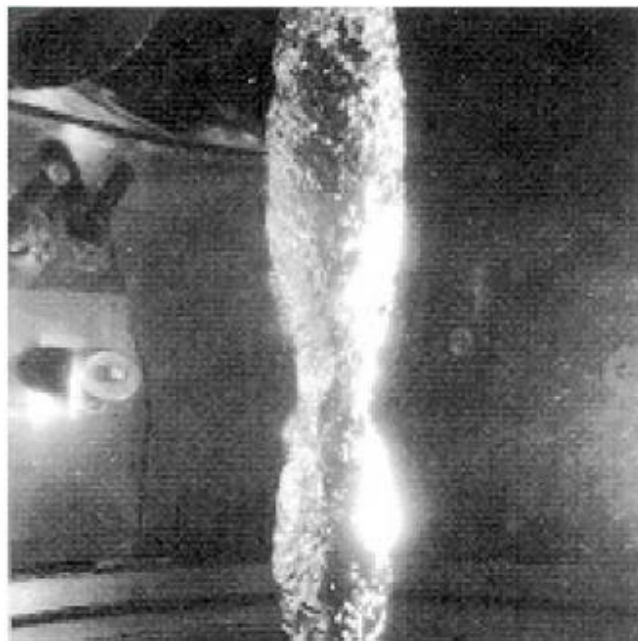
Η στήλη σχηματίζεται μετά τον δρομέα, στην έξοδο της περωτής, στο κέντρο της διατομής αρχίζει από τον ομφαλό της και εξαπλώνεται στον αγωγό απαγωγής. Η εμφάνιση της στήλης σπηλαίωσης οφείλεται στη συστροφή που δημιουργείται στην έξοδο του δρομέα, σε συνθήκες λειτουργίας εκτός του κανονικού, π.χ. λειτουργία σε μερικό φορτίο ή λειτουργία σε υπερφόρτωση. Ειδικότερα, η ποσότητα  $c_u \cdot r$  είναι σταθερή με βάσει την αρχή διατήρηση της συστροφής, επομένως περαιτέρω μείωση της ακτίνας συνεπάγεται ότι θα αυξηθεί η ταχύτητα  $c_u$  και θα μειωθεί η στατική πίεση. Ο σχηματισμός της στήλης σπηλαίωσης, κάτω από την πλήμνη, εξαρτάται από τον αριθμό σπηλαίωσης ( $\sigma$ ). Για μικρές τιμές ( $\sigma$ ) η στήλη περιστρέφεται με την κατεύθυνση της περωτής του δρομέα για μερικό φορτίο (μικρή παροχή) ενώ σε λειτουργία υπερφόρτωσης (μεγάλες παροχές) η κατεύθυνση της στήλης αντιστρέφεται. Σε λειτουργία με μερικό φορτίο, από 50% έως 80%, η στήλη έχει ελικοειδές σχήμα και η εικόνα που παρουσιάζει είναι σαν, μία εξωτερική πηγή διέγερσης να προκαλεί εξαναγκασμένη ταλάντωση στο σύστημα. Η ταχύτητα περιστροφής είναι περίπου 25 - 35% της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Όταν έχουμε μεγάλες παροχές (υπερφόρτωση) η δίνη είναι αξονοσυμμετρική και περιστρέφεται με ταχύτητα  $-N$  rpm. Στην περίπτωση, όπου η στήλη έχει



ελικοειδή μορφή δημιουργείται ένα ασταθές πεδίο ροής, το οποίο παρουσιάζει έντονες ταλαντώσεις στον αγωγό απαγωγής και με τη σειρά τους να οδηγήσουν σε αστάθεια στην παροχή της μηχανής και την ισχύ εξόδου. Επιπλέον η ύπαρξη της στήλης σπηλαιώσης είναι η αιτία για τη περιοδική μεταβολή της στατικής πίεσης στο σωλήνα απαγωγής με αποτέλεσμα την πρόκληση ισχυρών δονήσεων στον στρόβιλο και ακόμη πριν το σπειροειδές κέλυφος.



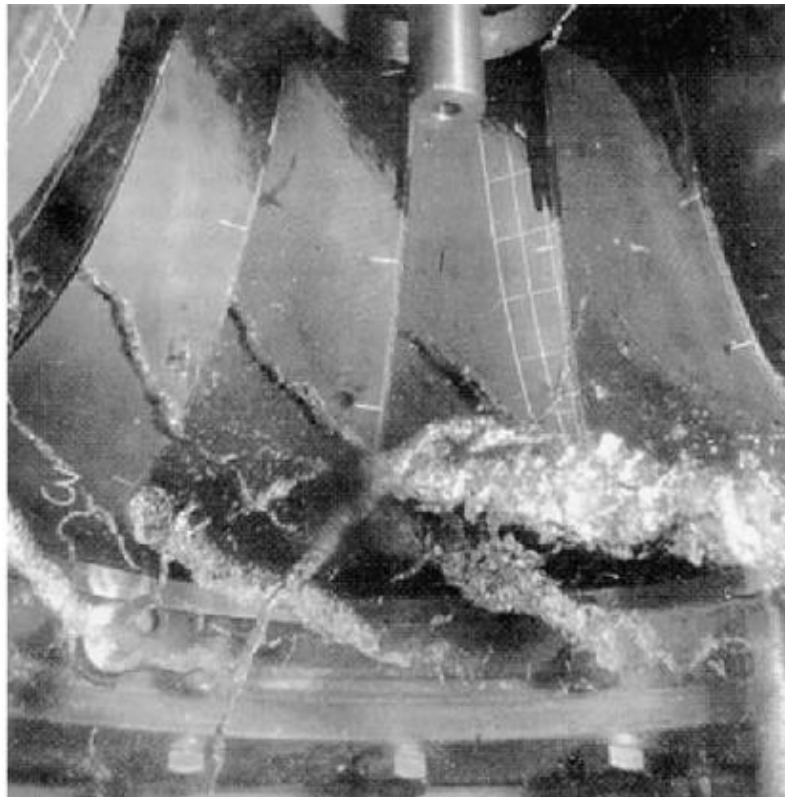
*Εικόνα 18-Στήλη σπηλαιώσης (Draft swirl tube) σε μερικό φορτίο. ΠΗΓΗ: "Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of cavitation"*



*Εικόνα 19- Στήλη σπηλαιώσης (Draft swirl tube) σε υπερφόρτωση. ΠΗΓΗ: "Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of cavitation"*

- **Λόγω δινών στα άκρα πτερυγίων (interblade vortex cavitation)**

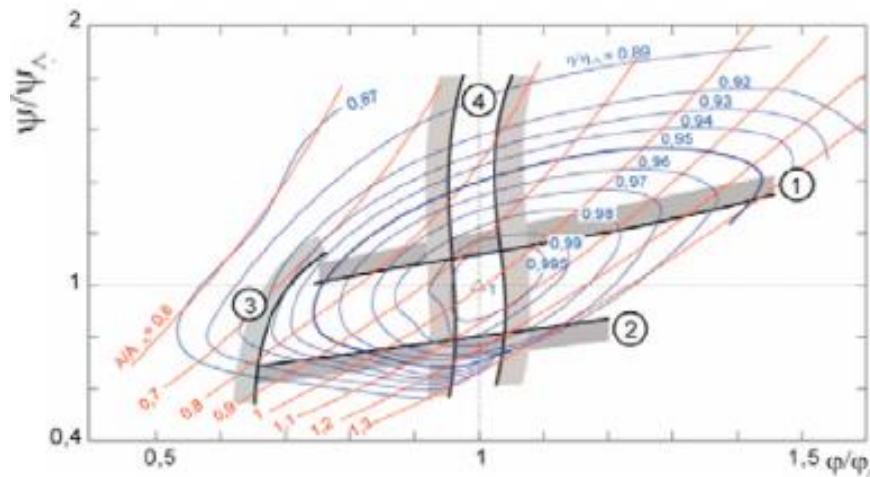
Όταν ο στρόβιλος λειτουργεί με μερικό φορτίο, ή σε καθεστώς χαμηλής ροής, παρατηρείται σύνθετη ανακυκλοφορία ροής στην είσοδο του δρομέα, η οποία οδηγεί στο σχηματισμό δινών που συνδέονται με την ακμή και εκτείνονται μέχρι τη δίοδο πτερυγίου προς πτερύγιο. Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι ο στρόβιλος λειτουργεί εκτός σχεδιασμού. Αυτή η δίνη σχηματίζεται από δευτερογενείς δίνες που υπάρχει στην υδατόπτωση μεταξύ των πτερυγίων. Οι δίνες αυτές σχηματίζονται λόγω της διακύμανσης της δυναμικής της ροής, λόγω της μεταβολής της προσβολής από την άκρη προς τη στεφάνη. Μπορούν να προσκολληθούν στην τομή της ακμής εισόδου των πτερυγίων με τη στεφάνη ή στο μέσο της στεφάνης μεταξύ των πτερυγίων κοντά στην πλευρά αναρρόφησης. Εάν η επιφάνεια του δρομέα συγκρουστεί με την επιφάνεια των δινών, έχει ως αποτέλεσμα τη διάβρωση ή τη διάτρηση των πτερυγίων. Μπορούν επίσης να εμφανιστούν σε περιοχές λειτουργίας με πολύ υψηλό ύψος επειδή ο αριθμός σπηλαίωσης ή ο αριθμός Thoma  $\sigma$  είναι σχετικά χαμηλός. Στην περίπτωση αυτή, οι δίνες γίνονται ασταθείς και προκαλούν ισχυρές δονήσεις.



Εικόνα 20-Interblade vortex cavitation. ΠΗΓΗ: "Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of cavitation"

Παρακάτω απεικονίζεται ένα διάγραμμα του υδροστροβίλου Francis και η πιθανότητα εμφάνισης σπηλαίωσης ανάλογα τα φορτία λειτουργίας ( $\varphi$ ) και υψομέτρου ( $\psi$ ). Το νούμερο 1 και 2 αναφέρεται σε σπηλαίωση στην ακμή προσβολής αναρρόφησης και πίεσης. Το νούμερο 3 μας δείχνει τη πιθανότητα εμφάνισης σπηλαίωσης λόγω δινών στα άκρα πτερυγίων, ενώ το

νούμερο 4 την πιθανότητα εμφάνισης σπηλαιώσης λόγω συστροφής και μειωμένης πίεσης στον αγωγό απαγωγής (draft swirl tube)



Εικόνα 21- Παραδείγματα τύπων σπηλαιώσης σε υδροστροβίλους Francis ανάλογα το φορτίο και το υψόμετρο.  
ΠΗΓΗ: "Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of cavitation"

### 2.2.1 Συντελεστής Thoma

Όπως αναφέρθηκε η σπηλαιώση σε υδροστροβίλους εξαρτάται από το κρίσιμο ύψος σπηλαιώσης και διακρίναμε τις δύο τιμές του. Ωστόσο η συμπεριφορά περί εμφάνισης ή μη της σπηλαιώσης σε υδροστροβίλους Francis μπορεί να προσδιοριστεί από τον συντελεστή Thoma που συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα ( $\sigma$ ) και ορίζεται ως:

$$\sigma = \frac{H_s}{H_E} = \frac{(p_a - p_v) / (\rho \cdot g) - z}{H_E} \quad (2.3)$$

Από την παραπάνω σχέση ο όρος  $H_s$  είναι το ελάχιστο θετικό ύψος αναρρόφησης (NPSH) για την αποφυγή σπηλαιώσης, ενώ ο όρος  $z$  είναι το ύψος όπως ορίζεται στην Εικόνα 4 παραπάνω. Ο παρονομαστής  $H_E$  είναι το ολικό διαθέσιμο ύψος πτώσεως στην είσοδο του υδροστροβίλου σε σχέση με την ελεύθερη επιφάνεια του κάτω ταμιευτήρα. Στην εξίσωση παραπάνω  $p_a$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση και  $p_v$  είναι η πίεση ατμών του νερού. Η χρήση του συντελεστή Thoma γίνεται αποκλειστικά στους στροβίλους και ο υπολογισμός του μας δείχνει το ποσοστό του ολικού διαθέσιμου ύψους  $H_E$ , το οποίο δεν αξιοποιείται προκειμένου να παράγουμε έργο. Συνεπώς μεγάλη τιμή του ( $\sigma$ ) φανερώνει ότι το ποσοστό του ολικού διαθέσιμου ύψους που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε είναι μικρό.

Εάν εφαρμόσουμε την εξίσωση ενέργειας από την έξοδο του δρομέα μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια του κάτω ταμιευτήρα η σχέση που θα πάρουμε θα είναι:

$$\frac{p_a - p_3}{\rho \cdot g} - z = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot (c_3^2 - c_4^2) - \Delta H_{DT} \quad (2.4)$$



Όταν  $p_3=p_v$  το πρώτο μέλος της εξίσωσης είναι ίσο με το  $H_S$  και αυτό με τη σειρά του θα είναι ίσο με το δεύτερο μέλος της εξίσωσης.

Ένας άλλος ενδεικτικός αριθμός για τον προσδιορισμό της περιοχής εμφάνισης ή μη της σπηλαίωσης είναι και η Ειδική ταχύτητα  $\Omega_{SP}$  σε σχέση με τον συντελεστή Thoma και η σχέση με την οποία την υπολογίζουμε είναι:

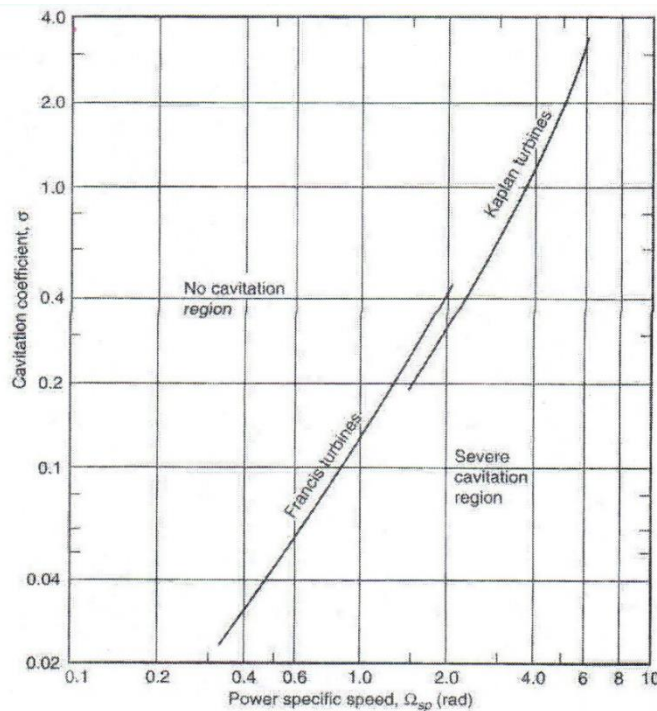
$$\Omega_{SP} = \frac{\omega \cdot \left( \frac{P_R}{\rho} \right)^{1/2}}{(g \cdot H)^{5/4}} \quad (2.5)$$

Η Ειδική ταχύτητα μπορούμε επίσης να την εκφράσουμε και ως Ειδικός αριθμός στροφών σπηλαίωσης (S), ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S = \frac{\omega \cdot P^{1/2}}{(NPSH)_R^{5/4}} \quad (2.6)$$

Όταν ο ειδικός αριθμός στροφών σπηλαίωσης λάβει τιμή ίση με τέσσερα (4) τότε έχουμε εμφάνιση σπηλαίωσης και ονομάζεται κρίσιμος  $S_{κρ} \approx 4$ .

Με βάση την ειδική ταχύτητα και το συντελεστή Thoma προκύπτουν διαγράμματα που σκοπό έχουν να βοηθήσουν στον αρχικό σχεδιασμό του υδροστροβίλου και την επιλογή βασικών διαστάσεων προκειμένου να αποφύγουμε το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 22-Μεταβολή του συντελεστή σπηλαίωσης ( $\sigma$ ) συναρτήσει της ειδικής ταχύτητας. ΠΗΓΗ: "Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ/Σημειώσεις "Υδροστροβίλοι-Υδροηλεκτρικά έργα"

### 3 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD)

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική ή CFD, από τα αρχικά των λέξεων Computational Fluid Dynamics, είναι η μελέτη συστημάτων, τα οποία περιέχουν ροή ρευστού, μεταφορά θερμότητας, χημικές αντιδράσεις κ.α. με τη βοήθεια υπολογιστή και της προσομοίωσης. Έχει υιοθετηθεί ως εργαλείο για την πρόβλεψη των παραμέτρων απόδοσης και των χαρακτηριστικών δυναμικής των ρευστών. Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) παρέχει μια οικονομικά αποδοτική και ακριβή εναλλακτική λύση έναντι των δοκιμών σε μοντέλα κλίμακας, με τις παραλλαγές της προσομοίωσης να εκτελούνται γρήγορα. Μπορούν εύκολα να εκφραστούν και να κατανοηθούν οι συμπεριφορές των ρευστών, όπως το νερό, σε περιπτώσεις που είναι αδύνατο να διερευνηθούν πειραματικά.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τις διέπουσες εξισώσεις, που θα χρησιμοποιηθούν για την υπολογιστική προσομοίωση, μέσω του του υπολογιστικού προγράμματος ANSYS-CFX.

#### 3.1 Εξισώσεις πεδίου ροής - Εξισώσεις Navier-Stokes

Κάθε πεδίο ροής αποτελείται από ένα σύνολο διεπουσών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν την διατήρηση της ορμής και της ενέργειας. Οι εξισώσεις αυτές είναι γνωστές ως εξισώσεις Navier-Stokes. Αν σε αυτές προσθέσουμε τις αρχικές και οριακές συνθήκες του προβλήματος καθώς και την εξίσωση της συνέχειας, προκύπτει ένα πλήθος σχέσεων με τις οποίες μπορούμε να μελετήσουμε το πεδίο ροής.

Παρόλα αυτά θα πρέπει να γίνουν κάποιες παραδοχές, όπως: το ρευστό είναι συνεχές μέσο, η ροή είναι ασυμπίεστη δηλαδή η πυκνότητα ( $\rho$ ) δεν μεταβάλλεται και έχουμε θερμοδυναμική ισορροπία.

Οι εξισώσεις διατήρησης μάζας (ή εξίσωση συνέχειας) και ορμής μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$\text{\underline{Εξίσωση συνέχειας:}} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{V}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\text{\underline{Εξισώσεις ορμής:}} \quad \frac{\partial (\rho \cdot \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \otimes V) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (3.2)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις ισχύει:

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (3.3), \text{ είναι το διάνυσμα της ταχύτητα στις τρεις (3) συνιστώσες της στους άξονες } x, y, z$$

$$V \otimes V = \begin{bmatrix} V_x V_x & V_x V_y & V_x V_z \\ V_y V_x & V_y V_y & V_y V_z \\ V_z V_x & V_z V_y & V_z V_z \end{bmatrix} \quad (3.4) \quad \text{και } \tau = \mu \cdot \left[ \nabla V + (\nabla V)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot V \right] \quad (3.5) \quad \text{είναι ο}$$

τανυστής τάσεων και σχετίζεται με το ρυθμό παραμόρφωσης,  $\mu$  είναι το δυναμικό ιξώδες του νερού και

$$(\delta) \text{ είναι η συνάρτηση του Kronecker για την οποία ισχύει } \delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6), \text{ ενώ } S_M \text{ είναι}$$

παράγοντες δημιουργίας της ορμής.

Επιπλέον ο υδροστρόβιλος που θα μελετήσουμε έχει το δρομέα, ο οποίος περιστρέφεται, επομένως η ροή μας επηρεάζεται από την περιστροφή. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να λάβουμε υπόψη στην εξίσωση της ορμής τις δυνάμεις που εξασκούνται από την περιστροφή. Οι δυνάμεις αυτές είναι η φυγόκεντρος δύναμη και η δύναμη Coriolis. Θα μπορούσαμε να λάβουμε υπόψη και τη βαρυτική δύναμη, αλλά είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις άλλες δύο (2), οπότε τη θεωρούμε ίση με το μηδέν. Ο δρομέας περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , ενώ η ολική δύναμη της περιστροφής είναι:

$$S_{Mrot} = S_{cor} + S_{φυγ} \quad (3.7)$$

$$\text{Η δύναμη Coriolis υπολογίζεται από τη σχέση: } S_{cor} = -2\rho\omega \cdot V \quad (3.8)$$

ενώ η φυγόκεντρος δύναμη:  $S_{φυγ} = -\rho\omega \cdot (\omega \cdot r)$  (3.9), όπου  $r$  είναι το διάνυσμα θέσης και  $V$  η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα για το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η εξίσωση ορμής μπορεί να γραφτεί με την παρακάτω μορφή

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \nabla(\rho V \otimes V) = -\nabla \left( p\delta + \mu(\nabla V + (\nabla V)^T) \right) - 2\rho\omega \times V - \rho\omega \times (\omega \times r) \quad (3.10)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ο όρος της μεταφοράς στην εξίσωση της ορμής χρησιμοποιεί τη σχετική ταχύτητα του συστήματος. Το ANSYS CFX παρόλα αυτά μεταβάλλει την εν λόγω εξίσωση και στον όρο της μεταφοράς πλέον χρησιμοποιεί την απόλυτη ταχύτητα του συστήματος και όχι τη σχετική. Η μεταβολή αυτή του όρου της ταχύτητας μεταβάλλει και την εξίσωση της ορμής η οποία τελικά γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \nabla(\rho V \otimes V_{abs}) = -\nabla \cdot \left( p\delta + \mu(\nabla V + (\nabla V)^T) \right) - \rho\omega \times V - \rho\omega \times (\omega \times r) \quad (3.11)$$

και εφόσον το ρευστό μας είναι ασυμπίεστο, η πυκνότητα είναι σταθερή, μπορούμε να διαιρέσουμε την εξίσωση με την πυκνότητα και να καταλήξουμε στη σχέση:

$$\frac{\partial(\vec{V})}{\partial t} + \nabla(V \otimes V_{abs}) = -\nabla \cdot \left( \frac{P}{\rho} \delta + \nu (\nabla V + (\nabla V)^T) \right) - \omega \times V - \omega \times (\omega \times r) \quad (3.12)$$

Όπου  $\nu$  είναι το κινητικό ιξώδες του ρευστού και είναι ίσο με  $\nu = \mu/\rho$ .

Οι όροι του πρώτου μέλους της εξίσωσης της ορμής μας δίνουν τις επιταχύνσεις, ενώ ο πρώτος όρος στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης μας δίνει την πίεση που ασκούν οι δυνάμεις του σώματος στο περιστρεφόμενο πλαίσιο, ενώ ο δεύτερος και τρίτος όρος του δεύτερου μέλους εκφράζουν τις απώλειες.

## 3.2 Μοντελοποίηση Τύρβης

Η τύρβη αποτελείται από αυξομειώσεις του πεδίου ροής στο χρόνο και στο χώρο. Πρόκειται για μια διαδικασία, η οποία είναι τρισδιάστατη, ασταθής και αποτελείται από πολλές κλίμακες. Μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά της ροής. Η τύρβη εμφανίζεται όταν οι δυνάμεις αδράνειας στο ρευστό γίνονται σημαντικές σε σύγκριση με τις δυνάμεις ιξώδους και χαρακτηρίζεται από υψηλό αριθμό Reynolds.

Οι εξισώσεις Navier-Stokes περιγράφουν τόσο τις στρωτές όσο και τις τυρβώδεις ροές χωρίς την ανάγκη πρόσθετων πληροφοριών σε πρώτη φάση. Παρόλα αυτά, οι τυρβώδεις ροές όσον αφορά ρεαλιστικούς αριθμούς Reynolds καλύπτουν μία μεγάλη περιοχή τυρβωδών κλιμάκων μήκους και χρόνου, και γενικά αποτελούνται από κλίμακες μήκους πολύ μικρότερες από το μικρότερο πλέγμα πεπερασμένου όγκου, το οποίο μπορεί πρακτικά να χρησιμοποιηθεί σε μια αριθμητική ανάλυση. Η άμεση αριθμητική προσομοίωση (DNS) αυτών των ροών θα απαιτούσε υπολογιστική ισχύ η οποία είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την υπάρχουσα διαθέσιμη ισχύ.

Για να καταστεί δυνατή η πρόβλεψη της επίδρασης της τύρβης, ένα μεγάλο μέρος της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής έρευνας έχει εστιάσει σε μεθόδους που χρησιμοποιούν μοντέλα τύρβης. Τα μοντέλα τύρβης έχουν αναπτυχθεί ειδικά για να λαμβάνουν υπόψη τα αποτελέσματα της τύρβης χωρίς να χρειάζεται η προσφυγή σε απαγορευτικά λεπτό πλέγμα και σε άμεση αριθμητική προσομοίωση. Τα περισσότερα μοντέλα τύρβης είναι μοντέλα στατιστικής τύρβης, όπως περιγράφεται παρακάτω. Ωστόσο στο ANSYS CFX υπάρχουν δύο εξαιρέσεις, οι οποίες είναι το μοντέλο προσομοίωσης μεγάλων στροβίλων (Large Eddy Simulation) και το μοντέλο προσομοίωσης αποκομμένων στροβίλων (Detached Eddy Simulation).

### 3.2.1 Στατιστικά μοντέλα τύρβης

Όταν εξετάζουμε χρονικές κλίμακες σημαντικά μεγαλύτερες από τις χρονικές κλίμακες των τυρβωδών διακυμάνσεων, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι η τυρβώδης ροή μπορεί να αναλυθεί ως το άθροισμα μιας μέσης τιμής και μιας χρονικά μεταβαλλόμενης συνιστώσας. Για παράδειγμα, μια συνιστώσα ταχύτητας μπορεί να χωριστεί σε μια μέση συνιστώσα και σε μια χρονικά μεταβαλλόμενη συνιστώσα.

Γενικά, τα μοντέλα τύρβης προσπαθούν να μεταβάλλουν τις αρχικές ασταθείς εξισώσεις Navier-Stokes με την εισαγωγή του αθροίσματος μιας ποσότητας μέσου όρου και μιας μεταβαλλόμενης ποσότητας, προκειμένου να δημιουργήσουν τις εξισώσεις Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS). Αυτές οι εξισώσεις αναπαριστούν μόνο τις μέσες ποσότητες ροής, ενώ κατατάσσουν τα φαινόμενα τύρβης χωρίς να απαιτείται η μελέτη των τυρβωδών διακυμάνσεων. Τα μοντέλα τύρβης που βασίζονται στις εξισώσεις RANS είναι γνωστά ως μοντέλα στατιστικής τύρβης λόγω του στατιστικού μέσου όρου που χρησιμοποιείται για τη λήψη των εξισώσεων.

Η προσομοίωση των εξισώσεων RANS μειώνει σημαντικά την υπολογιστική ισχύ αν την συγκρίνουμε με την άμεση αριθμητική προσομοίωση (DNS). Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται οι μέσοι όροι προσθέτει επιπλέον άγνωστους όρους, οι οποίοι λειτουργούν σαν πρόσθετες τάσεις στο ρευστό. Αυτοί οι όροι, που ονομάζονται «τυρβώδεις» ή «τάσεις Reynolds», είναι δύσκολο να προσδιοριστούν άμεσα και έτσι οι άγνωστοι γίνονται περισσότεροι. Η παρουσία αυτών των τάσεων στις εξισώσεις υποδηλώνει ότι το σύστημα των εξισώσεων δεν είναι κλειστό (closure problem) και για να μπορέσει να επιλυθεί θα πρέπει να γίνουν ορισμένες προσεγγίσεις.

Οι τάσεις Reynolds πρέπει να υπολογιστούν μέσω πρόσθετων εξισώσεων γνωστών ποσοτήτων προκειμένου να επιτευχθεί «κλείσιμο», δηλαδή ότι υπάρχει επαρκής αριθμός εξισώσεων για όλους τους αγνώστους, συμπεριλαμβανομένου του τανυστή Reynolds-Stress, που προκύπτει από τη διαδικασία υπολογισμού του μέσου όρου. Οι εξισώσεις που απαιτούνται για το κλείσιμο του συστήματος καθορίζουν το είδος του μοντέλου τύρβης.

### 3.2.2 Εξισώσεις RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα μοντέλα τύρβης προσπαθούν να λύσουν ένα τροποποιημένο σύνολο εξισώσεων μεταφοράς εισάγοντας μέσες και κυμαινόμενες συνιστώσες. Για παράδειγμα, μια ταχύτητα  $V_i$  μπορεί να διαιρεθεί σε μια μέση συνιστώσα  $\bar{V}$  και σε μια συνιστώσα  $v_i$  χρονικά μεταβαλλόμενη

$$V_i = \bar{V} + v_i \quad (3.13)$$

Η μέση συνιστώσα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{V} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} V_i dt \quad (3.14)$$

Όπου  $\Delta t$  είναι μια χρονική διαβάθμιση, η οποία είναι εκτεταμένη σε σχέση με τις αλλαγές της τύρβης, αλλά μικρή όσον αφορά τη χρονική κλίμακα στην οποία λύνονται οι εξισώσεις. Στις συμπιεστές ροές, ο υπολογισμός του μέσου όρου είναι πραγματικά εξαρτημένο από την πυκνότητα, ωστόσο όμως για ευκολία και για λόγους απλότητας θα θεωρείται ότι η μεταβολή της πυκνότητας είναι αμελητέα.

Στην παρούσα διπλωματική, προκειμένου να μπορέσουμε να «κλείσουμε» το σύνολο των εξισώσεων, δεδομένου ότι κάθε στατιστικό μοντέλο τύρβης χρησιμοποιεί διαφορετικό τύπο, θα περιγράψουμε το μοντέλο  $k - \varepsilon$  όπως επίσης και το μοντέλο SST, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

### 3.2.3 Μοντέλο $k - \varepsilon$

Το  $k - \varepsilon$  ορίζει την κλίμακα ταχύτητας και μήκους στην περιοχή ολοκλήρωσης του ενεργειακού φάσματος.

Το  $k$  είναι η κινητική ενέργεια της τύρβης και ορίζεται ως η μεταβολή των αυξομειώσεων της ταχύτητας. Έχει διαστάσεις ( $L^2 T^{-2}$ ), για παράδειγμα,  $m^2/s^2$  είναι η στροβιλώδης διάλυση της τύρβης (ο ρυθμός με τον οποίο διαλύονται οι μεταβολές της ταχύτητας) και έχει διαστάσεις ανά μονάδα χρόνου ( $L^2 T^{-3}$ ), για παράδειγμα,  $m^2/s^3$ . Το μοντέλο - εισάγει δύο νέες μεταβλητές στο σύστημα εξισώσεων.

$$\text{Η εξίσωση συνέχειας είναι τότε: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho V_j) = 0 \quad (3.15)$$

Και η εξίσωση της ορμής γράφεται:

$$\frac{\partial \rho V_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho V_i V_j) = - \frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (3.16)$$

Όπου  $S_M$  είναι το άθροισμα των δυνάμεων του σώματος,  $\mu_{eff}$  είναι το δραστικό ιξώδες που λαμβάνει υπόψη την τύρβη και  $p'$  είναι η τροποποιημένη πίεση όπως ορίζεται από την εξίσωση

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \quad (3.17)$$

Το μοντέλο  $k - \varepsilon$ , βασίζεται στην έννοια του στροβιλώδους ιξώδους έτσι ώστε

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.18)$$

όπου το  $\mu_t$  είναι ιξώδες της τύρβης. Το μοντέλο  $k - \varepsilon$  υποθέτει ότι το ιξώδες της τύρβης συνδέεται με την κινητική ενέργεια της τύρβης και τη διάχυση μέσω της σχέσης:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.19)$$

όπου  $C_\mu$  είναι σταθερά του  $k - \varepsilon$  μοντέλου τύρβης και ίση με 0,09.

Οι τιμές των  $k$  και  $\varepsilon$  προκύπτουν απευθείας από τις διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς για την κινητική ενέργεια της τύρβης και τον ρυθμό διάχυσης της τύρβης και είναι

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho V_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \left( \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right) + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho V_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (3.21)$$

Όπου  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$  και  $\sigma_\varepsilon$  είναι σταθερές και ίσες με 1.44, 1.92, 1.45 και 1.9 αντίστοιχα για το  $k$ - $\varepsilon$  μοντέλο τύρβης. Η επίδραση των δυνάμεων άνωσης  $P_{kb}$  και  $P_{\varepsilon b}$  περιγράφεται παρακάτω. Η παραγωγή τύρβης  $P_k$  λόγω δυνάμεων ιξώδους μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας:

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \left( 3\mu_t \frac{\partial V_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (3.22)$$

Για ασυμπίεστη ροή, η ποσότητα  $\frac{\partial V_k}{\partial x_k}$  είναι μικρή και ο δεύτερος όρος στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης

δεν συμβάλλει σημαντικά στην παραγωγή. Για συμπιεστή ροή, η ποσότητα  $\frac{\partial V_k}{\partial x_k}$  είναι μεγάλη μόνο σε

περιοχές με μεγάλη απόκλιση ταχύτητας, όπως σε κρουστικά κύματα. Ο όρος  $3\mu_t$  στην εξίσωση (3.22) στηρίχτηκε στην υπόθεση της «παγωμένης τάσης». Αυτό εμποδίζει τις τιμές των  $k$  και  $\varepsilon$  να γίνουν πολύ μεγάλες μέσω των κρούσεων, μια κατάσταση που χειροτερεύει προοδευτικά καθώς το πλέγμα βελτιώνεται στις κρούσεις.

### 3.2.4 Μοντέλο $k$ - $\omega$

Το μοντέλο  $k$ - $\omega$  είναι ένα μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων, το οποίο πλεονεκτεί από το αντίστοιχο μοντέλο  $k$ - $\varepsilon$ , σε τμήματα του οριακού στρώματος, όπου έχουμε ροή χαμηλού αριθμού Reynolds κοντά στα στερεά τοιχώματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιεί την παράμετρο της συχνότητας τύρβης  $\omega$ , αντί του ρυθμού σκέδασης της τυρβώδους ενέργειας  $\varepsilon$ . Δηλαδή το μοντέλο στηρίζεται στην υπόθεση ότι το τυρβώδες δυναμικό ιξώδες εξαρτάται με την κινητική ενέργεια της τύρβης και την συχνότητα της τύρβης  $\omega = \varepsilon/k$ . Σε διαφορετική περίπτωση, όπου τα τμήματα είναι εκτός οριακού στρώματος, το μοντέλο εμφανίζεται να είναι ασταθές. Ειδικότερα όταν έχουμε περιστρεφόμενες ροές τα αποτελέσματα που προκύπτουν ποικίλουν ανάλογα με την προσδιοριζόμενη γωνιακή ταχύτητα του ρευστού.

### 3.2.5 Μοντέλο SST (Shear Stress Transport)

Το μοντέλο SST είναι μια από τις πιο διαδεδομένες και σύγχρονες εκδοχές του μοντέλου  $k$ - $\omega$ . Τα δύο προηγούμενα μοντέλα αδυνατούν να προβλέψουν κατάλληλα την έναρξη και την ποσοτικοποίηση της αποκόλλησης της ροής από λείες επιφάνειες, διότι υπερεκτιμούν το τυρβώδες ιξώδες (μοντέλο  $k$ - $\omega$ ) και αγνοούν τη μεταφορά διατμητικών τάσεων (μοντέλο  $k$ - $\varepsilon$ ). Προκειμένου να μπορέσουμε να μελετήσουμε φαινόμενα όπως αυτά που περιγράψαμε χρησιμοποιούμε το μοντέλο SST, το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων και μπορεί ταυτόχρονα να προβλέψει με μεγάλη

ακρίβεια την έναρξη και την ποσοτικοποίηση της αποκόλλησης αλλά και να λαμβάνει υπόψη τη μεταφορά των διατμητικών τάσεων. Επιπλέον εκμεταλλεύεται έναν περιοριστή του τυρβώδους ιξώδους και εξαφανίζει τα αδύνατα σημεία του μοντέλου k- $\omega$ . Η μαθηματική διατύπωση του περιοριστή τυρβώδους ιξώδους είναι:

$$V_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} = \frac{\mu_t}{\rho} \quad (3.23)$$

Η  $F_2$  είναι μια συνάρτηση ανάμειξης, η οποία περιορίζει τον περιοριστή στο οριακό στρώμα του τοιχώματος, καθώς οι υποκειμένες παραδοχές δεν είναι σωστές για ροές ελεύθερης διάτμησης, ενώ το  $S$  είναι ένα αναλλοίωτο μέτρο του ρυθμού παραμόρφωσης. Η  $F_2$  υπολογίζεται από τη σχέση

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y'}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (3.24)$$

Οι δύο εξισώσεις του μοντέλου SST είναι:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{V}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \sigma_k \mu_t) \left( \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right) + P_k - \beta' \bar{\rho} k \omega \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{V}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \left( \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right) + 2(1-F_1) \frac{2\bar{\rho}\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha \bar{\rho} S^2 - \beta' \bar{\rho} \omega^2 \quad (3.26)$$

όπου

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{k2}}} \quad (3.27), \quad \sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega 1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{\omega 2}}} \quad (3.28)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y'}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (3.29)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( \frac{2\bar{\rho}}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 1.0 \cdot 10^{-10} \right) \quad (3.30)$$

$$\text{και } P_k = \min(P_k, 10\beta' \bar{\rho} k \omega) \quad (3.31), \quad \text{όπου } P_k = \mu_t \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \quad (3.32)$$

### 3.3 Πολυφασική ροή

Τα μοντέλα πολυφασικής ροής που είναι διαθέσιμα στο ANSYS CFX είναι δύο. Το πρώτο πολυφασικό μοντέλο είναι το Eulerian-Eulerian και το δεύτερο το πολυφασικό μοντέλο παρακολούθησης σωματιδίων Lagrangian. Για τη μελέτη της διπλωματικής εργασίας θα επιλέξουμε το πολυφασικό



μοντέλο Eulerian-Eulerian και ειδικότερα το μοντέλο με την ομοιογενή ροή. Οι φάσεις που θα χρησιμοποιήσουμε είναι δύο, το υγρό νερό και τον ατμό.

### 3.3.1 Μοντέλο σπηλαιώσης (Cavitation)

Η προδιάθεση μιας ροής για σπηλαιώση προσδιορίζεται από τον αριθμό σπηλαιώσης, ο οποίος ορίζεται ως:

$$C_a = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (3.33)$$

όπου  $p$  είναι μια πίεση αναφοράς για τη ροή (για παράδειγμα, η πίεση εισόδου),  $p_v$  είναι η πίεση ατμών για το υγρό και ο παρονομαστής αναπαριστά τη δυναμική πίεση. Είναι φανερό ότι η τάση για σπηλαιώση μιας ροής ενισχύεται όσο ελαττώνεται ο αριθμός σπηλαιώσης.

Η σπηλαιώση εξετάζεται μεμονωμένα από τη μεταβολή της θερμικής φάσης, καθώς η διαδικασία σχηματισμού της σπηλαιώσης είναι συνήθως πολύ γρήγορη για να θεωρηθεί σωστή η παραδοχή της θερμικής ισορροπίας στη διεπιφάνεια. Στα απλούστερα μοντέλα σπηλαιώσης, η μεταφορά μάζας βασίζεται κυρίως σε μηχανικά φαινόμενα, ήτοι σε διαφορές πίεσης υγρού-ατμού και όχι από θερμικές συνέπειες. Η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται σε μοντέλα τα οποία θα συνεκτιμούν και τα δύο φαινόμενα.

Το μοντέλο Rayleigh Plesset εφαρμόζεται στο CFX στο πλαίσιο πολυφασικών συστημάτων ως μοντέλο μεταφοράς μάζας ανάμεσα στις φάσεις. Είναι επίσης δυνατό να εκτελεστούν μοντέλα που προσδιορίζονται από τον χρήστη. Σε περιπτώσεις ροής με σπηλαιώση, χρησιμοποιείται συνήθως το ομογενές πολυφασικό μοντέλο.

### 3.3.2 Το μοντέλο Rayleigh-Plesset

Η σχέση Rayleigh-Plesset προσφέρει την κατάλληλη συνθήκη για την εξίσωση του ρυθμού που ρυθμίζει την δημιουργία και την συμπύκνωση των υδρατμών. Η εξίσωση Rayleigh-Plesset με την οποία περιγράφεται η εξάπλωση μιας φυσαλίδας αερίου σε ένα υγρό προκύπτει ως εξής:

$$R_B \frac{d^2 RB}{dt} + \frac{3}{2} \left( \frac{dRB}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f RB} = \frac{p - p_v}{\rho_f} \quad (3.34)$$

όπου  $R_B$  συμβολίζει την ακτίνα της φυσαλίδας,  $p_v$  είναι η εσωτερική πίεση στη φυσαλίδα (υποτίθεται ότι είναι η πίεση των ατμών στη θερμοκρασία του ρευστού),  $p$  είναι η πίεση στο ρευστό που περικλείει τη φυσαλίδα,  $\rho_f$  είναι η πυκνότητα του ρευστού και  $\sigma$  είναι ο επιφανειακός συντελεστής τάσης μεταξύ του ρευστού και των ατμών. Επισημαίνεται ότι αυτό απορρέει από το μηχανικό ισοζύγιο, με την προϋπόθεση ότι δεν υφίστανται θερμικά κωλύματα για την εξάπλωση της φυσαλίδας. Εάν αμελήσουμε

τους όρους δεύτερης τάξης (που είναι χρήσιμοι για μικρές συχνότητες ταλάντωσης) και την επιφανειακή τάση, η εξίσωση αυτή ανάγεται σε:

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_f}} \quad (3.35)$$

Επομένως, ο ρυθμός της μεταβολής του όγκου της φυσαλίδας έχει ως εξής:

$$\frac{dV_B}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{4}{3} \pi R_B^3 \right) = \frac{4}{3} \pi R_B^2 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_f}} \quad (3.36)$$

ενώ ο ολικός ρυθμός μεταφοράς μάζας μεταξύ των φάσεων ανά μονάδα όγκου είναι:

$$\frac{dm_B}{dt} = \rho_g \frac{dV_B}{dt} = 4\pi R_B^2 \rho_g \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}} \quad (3.37)$$

Σε περίπτωση που αντιστοιχούν  $N_B$  φυσαλίδες ανά μονάδα όγκου, το κλάσμα όγκου  $r_g$  δύναται να υπολογιστεί ως εξής:

$$r_g = V_B N_B = \frac{4}{3} \pi R_B^3 N_B \quad (3.38)$$

και ο ολικός ρυθμός μεταφοράς μάζας μεταξύ των φάσεων ανά μονάδα όγκου είναι:

$$\dot{m}_{fg} = N_B \frac{dm_B}{dt} = \frac{3\rho_g r_g}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}} \quad (3.39)$$

Η εν λόγω έκφραση έχει εξαχθεί με την παραδοχή της παραγωγής φυσαλίδων (εξάτμιση). Δύναται να διαμορφωθεί ώστε να περιλαμβάνει τη συμπύκνωση ως εξής:

$$\dot{m}_{fg} = F \frac{3\rho_g r_g}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_f}} \operatorname{sgn}(p_v - p) \quad (3.40)$$

όπου  $F$  είναι ένας εμπειρικός συντελεστής που μπορεί να διαφοροποιείται για τη συμπύκνωση και την εξάτμιση, με στόχο να υπολογιστεί το γεγονός ότι ενδέχεται να πραγματοποιούνται με διαφορετικούς ρυθμούς (η συμπύκνωση είναι συνήθως πολύ πιο αργή από την εξάτμιση). Για σκοπούς μοντελοποίησης η ακτίνα φυσαλίδας  $R_B$  θα αντικατασταθεί από την ακτίνα της θέσης δημιουργίας πυρήνων  $R_{nuc}$ .

Μολονότι η Εξίσωση έχει γενικευθεί για την εξάτμιση και τη συμπύκνωση, απαιτείται περαιτέρω τροποποίηση στην περίπτωση της εξάτμισης.

Η εξάτμιση ξεκινά σε θέσεις σχηματισμού πυρήνων (συνήθως σε μη συμπυκνούμενα αέρια). Όσο αυξάνεται το κλάσμα όγκου των ατμών, η πυκνότητα των σημείων δημιουργίας πυρήνων οφείλει να μειώνεται αντίστοιχα, καθώς υπάρχει όλο και λιγότερο υγρό. Για την εξάτμιση, το  $r_g$  στην εξίσωση αντικαθίσταται από το  $r_{nuc}(1-r_g)$  με αποτέλεσμα την ακόλουθη τιμή:

$$\dot{m}_{fg} = F \frac{3\rho_g r_{nuc} (1-r_g)}{R_{nuc}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_f}} \text{sgn}(p_v - p) \quad (3.41)$$

όπου  $r_{nuc}$  είναι το κλάσμα όγκου των περιοχών δημιουργίας πυρήνων. Η εξίσωση εξακολουθεί να ισχύει στην περίπτωση της συμπίκνωσης. Για να προκύψει ένας ρυθμός μεταφοράς μάζας μεταξύ φάσεων, είναι αναγκαίο να γίνουν περαιτέρω παραδοχές σχετικά με τη συγκέντρωση και την ακτίνα των φυσαλίδων. Το μοντέλο σπηλαίωσης Rayleigh-Plesset που εφαρμόζεται στο CFX χρησιμοποιεί τις ακόλουθες προεπιλογές για τις παραμέτρους του μοντέλου

- $R_{nuc}=1 \mu\text{m}$
- $r_{nuc}=5\text{e-}4$
- $F_{vap}=50$
- $F_{cond}=0.01$

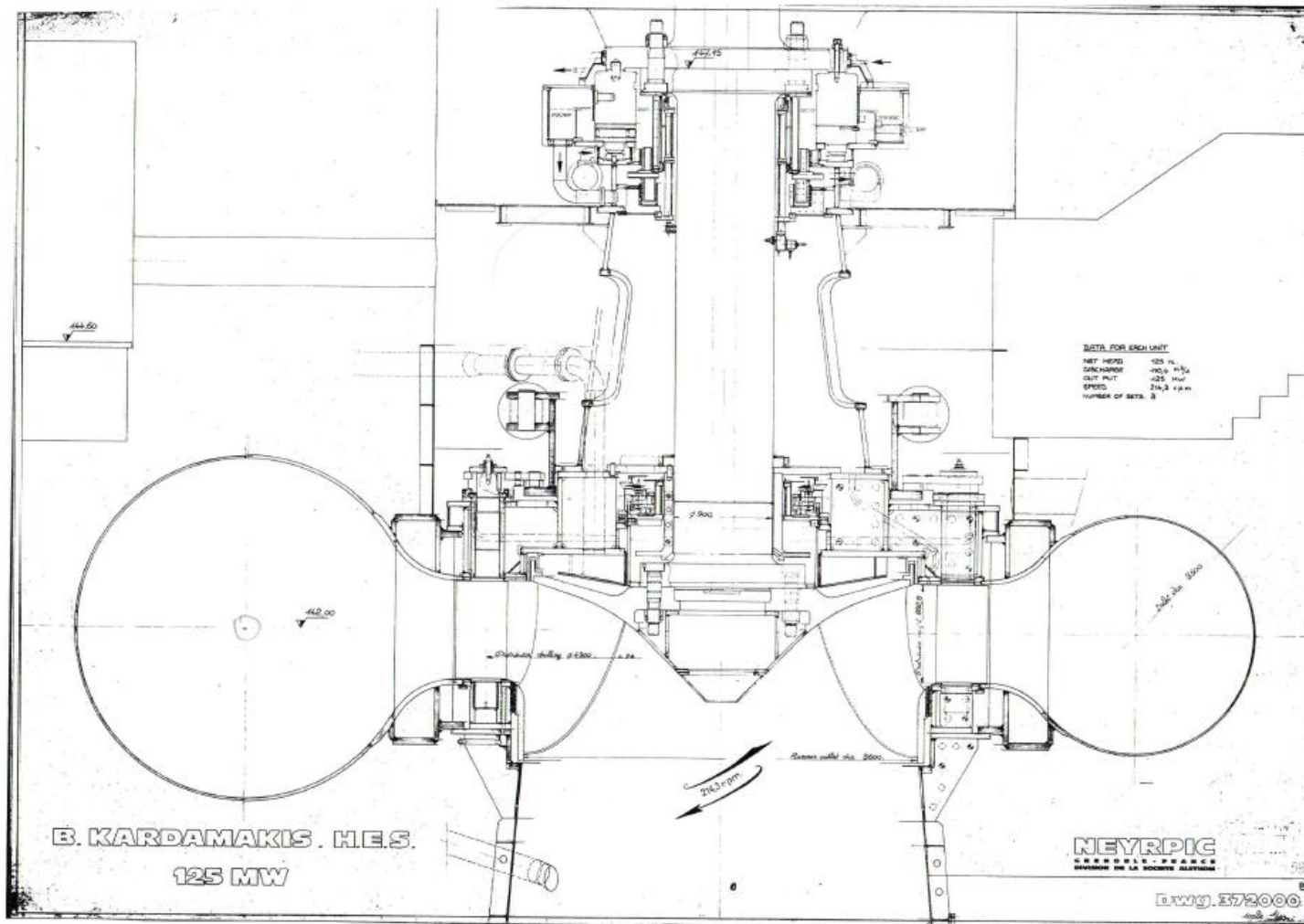
### 3.4 Υπολογιστική Προσομοίωση του φαινομένου της σπηλαίωσης σε υδροστρόβιλο Francis

#### 3.4.1 Χαρακτηριστικά υδροστροβίλου πραγματικού μοντέλου

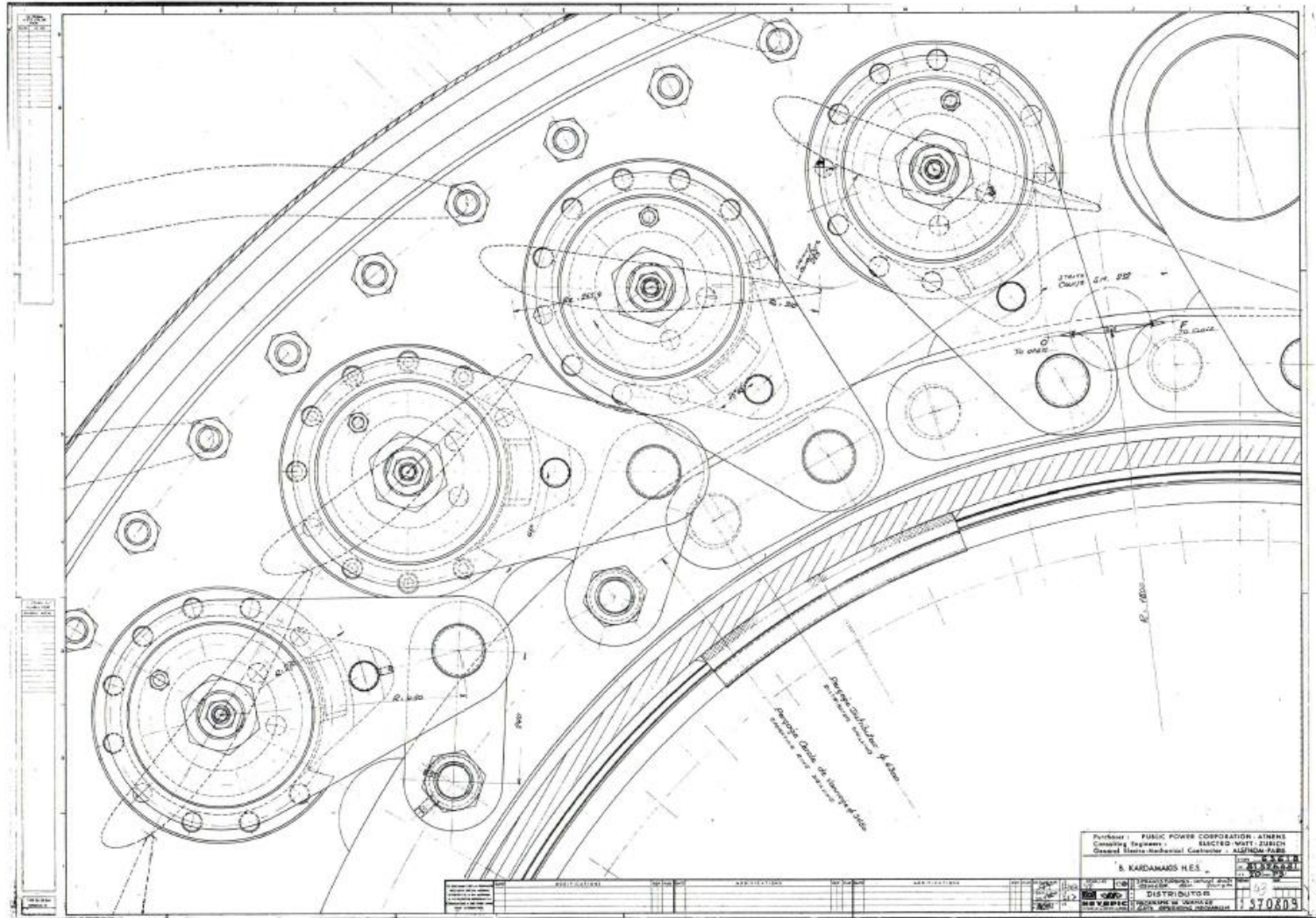
Όπως αναφέρθηκε στην Περίληψη η υπόψη διπλωματική εργασία αφορά τη διερεύνηση του φαινομένου της σπηλαίωσης στον υδροστρόβιλο Francis του Υδροηλεκτρικού Σταθμού Πολυφήτου στην Κοζάνη. Ο εξεταζόμενος στρόβιλος είναι τύπου Francis με δρομέα 15 πτερυγίων, έχει ειδική ταχύτητα  $N=214,3 \text{ rpm}$ , ονομαστικό ύψος  $H=125 \text{ m}$  και εκροή ίση με  $110,4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Επιπλέον διαθέτει 18 περιστρεφόμενα πτερύγια, ενώ τα σταθερά είναι 12. Η διάμετρος του δρομέα είναι  $3600 \text{ mm}$  και η ισχύς του υδροστροβίλου είναι  $125\text{MW}$ . Οι τεχνικές προδιαγραφές του υπό εξεταζόμενου υδροστροβίλου παρατίθενται συγκεντρωτικά παρακάτω.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ FRANCIS ΥΨΗΣ ΠΟΛΥΦΥΤΟΥ**

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΤΙΜΗ
1	ΙΣΧΥΣ (MW)	125
2	ΕΚΡΟΗ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	110,4
3	ΥΨΟΣ ΥΔΑΤΟΠΤΩΣΗΣ (m)	125
4	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ (rpm)	214,3
5	ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΔΡΟΜΕΑ	15
6	ΣΤΑΘΕΡΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ	12
7	ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ	18
8	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΡΟΜΕΑ (mm)	3600



Εικόνα 23-Τομή υδροστροβίλου Francis ΥΗΣ Πολυφύτου. ΠΗΓΗ: "Αρχείο ΥΗΣ Πολυφύτου"

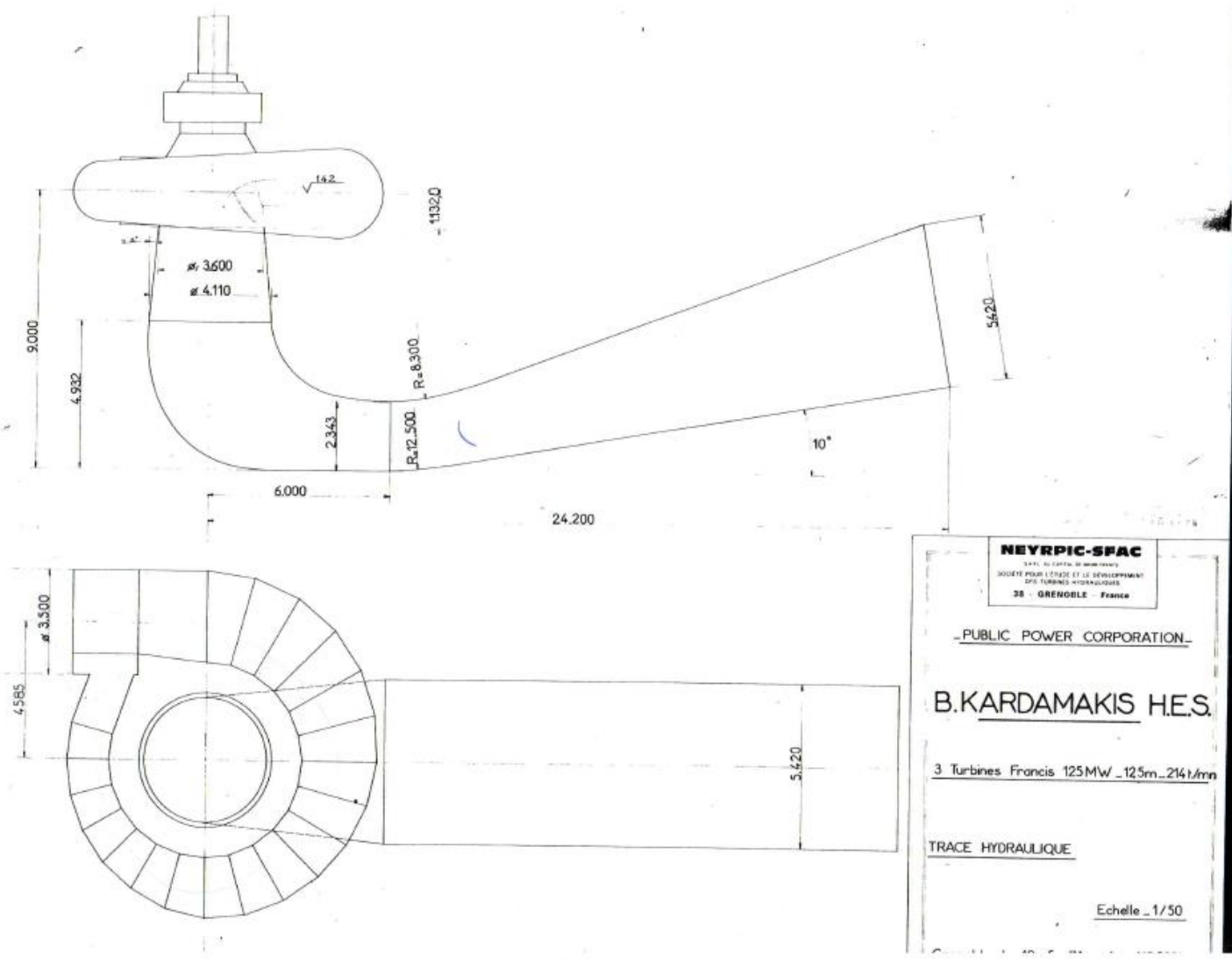


Εικόνα 24-Απεικόνιση σταθερών & περιστρεφόμενων πτερυγίων. ΠΗΓΗ: "Αρχείο ΥΗΣ Πολυφύτου"







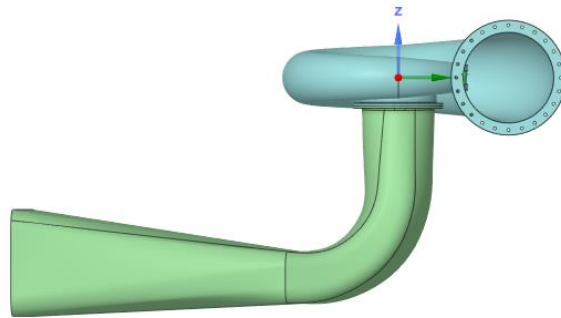


Εικόνα 27-Υδροσπρόβιλος Francis. ΠΗΓΗ: "Αρχείο ΥΗΣ Πολυφύτου"

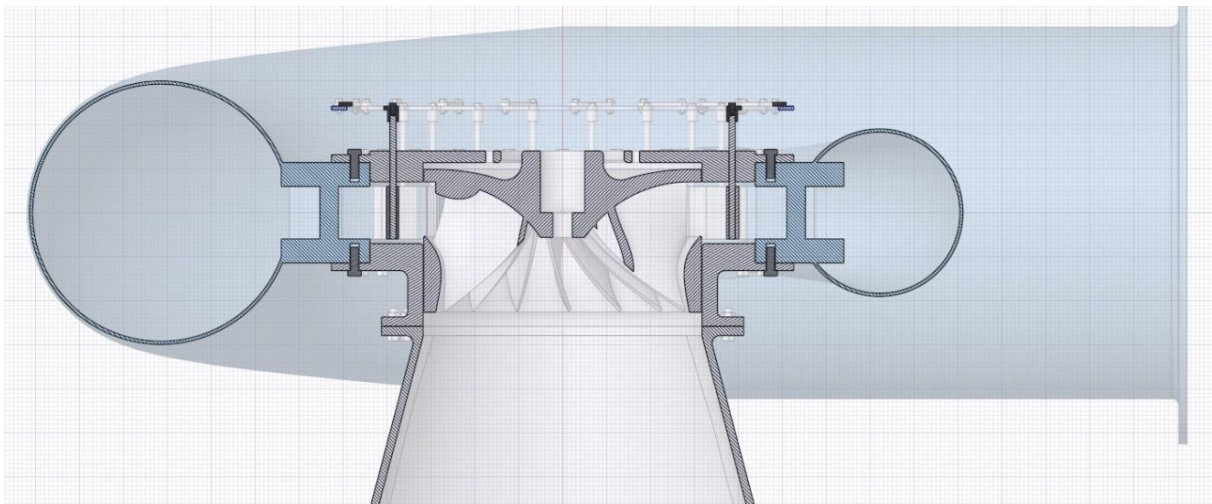


### 3.4.2 Χαρακτηριστικά υδροστροβίλου υπολογιστικού μοντέλου

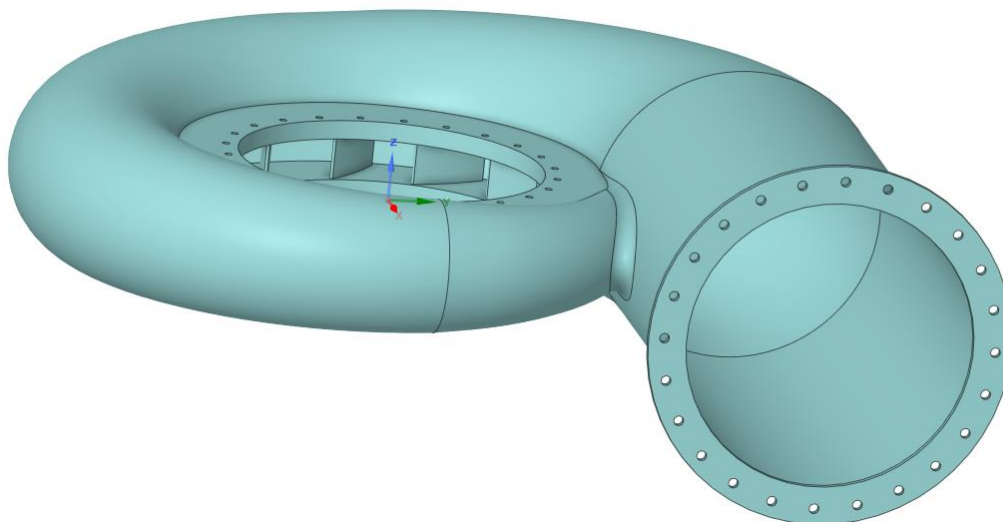
Το σχεδιαστικό μοντέλο του υδροστροβίλου λήφθηκε από την ιστοσελίδα GrabCad από τον Ulaş Baha Çinar. Ο υδροστρόβιλος που μελετάμε στη παρούσα διπλωματική δεν είναι ίδιος με τον πραγματικό υδροστρόβιλο που υπάρχει στον ΥΗΣ Πολυφύτου αλλά έχει κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις, οι οποίες εστιάζονται κυρίως στον αγωγό απαγωγής. Το σχεδιαστικό μοντέλο μας έχει μεγαλύτερες διαστάσεις από τον πραγματικό. Παρόλα αυτά έχει τον ίδιο αριθμό σταθερών και περιστρεφόμενων πτερυγίων αλλά και δρομέα. Επίσης η διάμετρος του δρομέα είναι ίδια και στα δύο μοντέλα και ίση με  $D=3600$  mm.



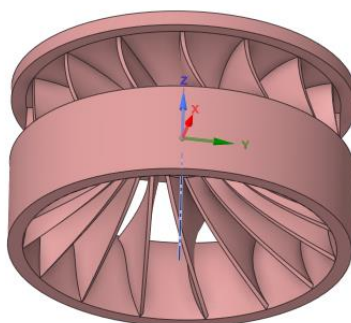
Εικόνα 28- Πειραματικός Υδροστρόβιλος Francis Ansys



Εικόνα 29- Τομή πειραματικού υδροστροβίλου Francis



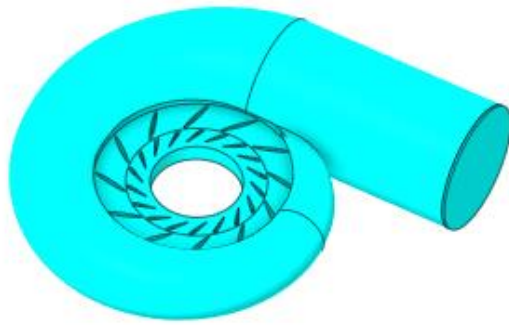
*Εικόνα 30- Σπειροειδές κέλυφος υδροστροβίλου. Εσωτερικά διακρίνονται τα σταθερά πτερύγια*



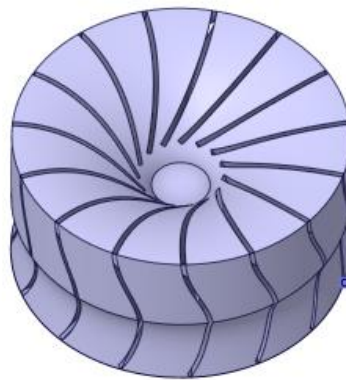
*Εικόνα 31- Δρομέας υδροστροβίλου ο οποίος διαθέτει 15 πτερύγια*

### 3.4.3 Σχεδίαση υπολογιστικών όγκων

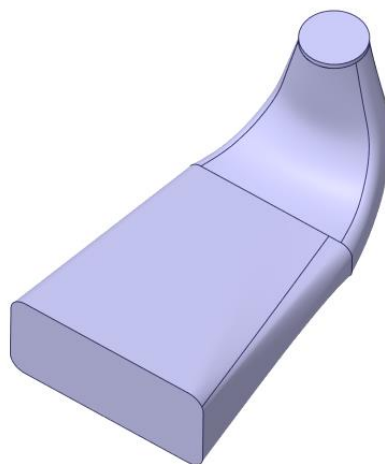
Η τελική γεωμετρία του υδροστροβίλου λήφθηκε με το λογισμικό Ansys-SpaceClaim προκειμένου να δημιουργήσουμε τους περιβάλλοντες όγκους για την υπολογιστική ανάλυση. Έτσι κατασκευάσαμε τρεις (3) όγκους με την εντολή Volume\_Extract του SpaceClaim. Οι όγκοι περιλαμβάνουν α) το σπειροειδές κέλυφος μαζί με τα σταθερά και περιστρεφόμενα πτερύγια, β) το δρομέα (στρόβιλο) και γ) τον αγωγό απαγωγής.



*Εικόνα 32-Περιβάλλοντα όγκος σπειροειδούς κελύφους μαζί με τα σταθερά και περιστρεφόμενα πτερύγια*



*Εικόνα 33- Περιβάλλοντα όγκος δρομέα υδροστροβίλου*



*Εικόνα 34-Περιβάλλοντα όγκος αγωγού απαγωγής*

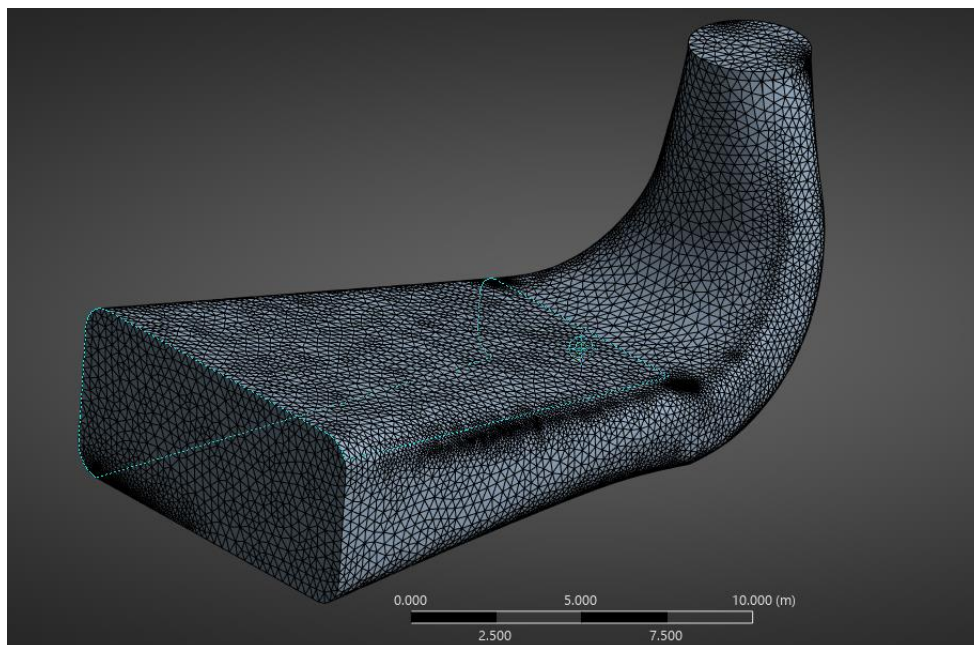
### 3.4.4 Διακριτοποίηση πλέγματος

Με την ολοκλήρωση της σχεδίασης των υπολογιστικών όγκων, το αρχείο εισήχθη στο λογισμικό Ansys-Mesh προκειμένου να δημιουργηθεί το πλέγμα. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι πρισματικό. Επίσης το μέγεθος του πλέγματος επηρεάζει και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν. Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε ένα μεσαίο πλέγμα προκειμένου να πάρουμε πιο γρήγορα αποτελέσματα και με ικανοποιητική ακρίβεια. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με το μέγεθος των στοιχείων και τους κόμβους και τα στοιχεία που προκύπτουν.

#### ΠΙΝΑΚΑΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

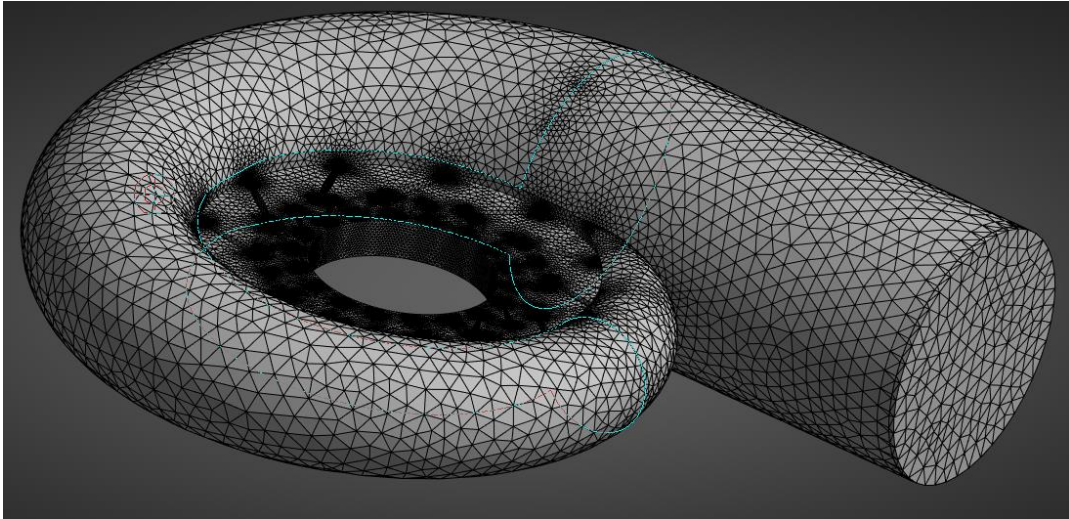
A/A	Περιγραφή	Μέγεθος σε m	Αριθμός nodes	Αριθμός element
1	Element Size	0.05	4,031,747	22,123,233
2	Element Size	0.2	878,601	4,708,041
3	Element Size	0.35	811,113	4,351,291
4	Element Size	0.5	770,220	4,131,295
5	Element Size	1	474,809	2,517,750

Όπως προκύπτει από τον πίνακα για element size από 0,2 έως 0,5 ο αριθμός των στοιχείων είναι σχετικά κοντά. Οι αναλύσεις θα γίνουν για πλέγμα με element size 0,35 m, καθώς παρέχει ικανοποιητικά και σχετικά γρήγορα αποτελέσματα.

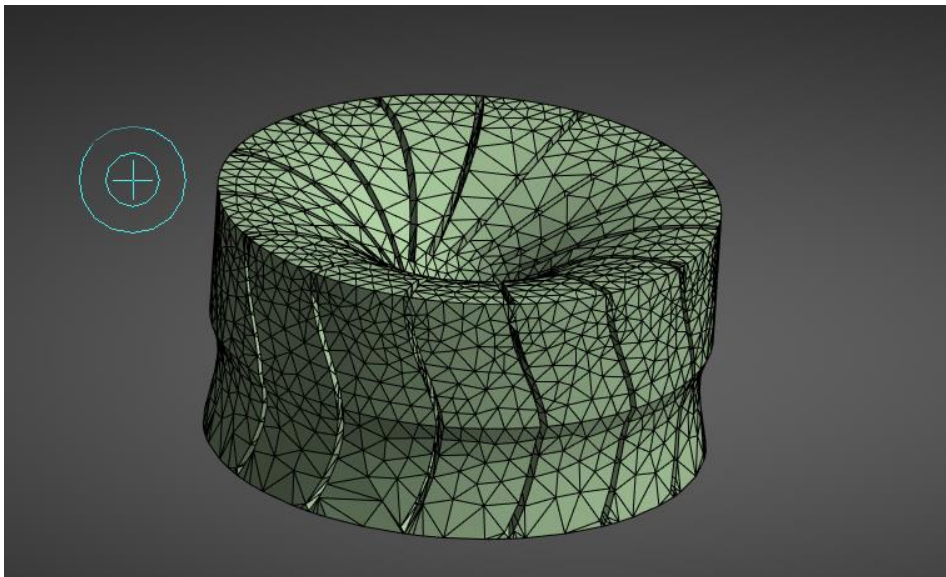


Εικόνα 35-Διακριτοποίηση πλέγματος draft tube για element size 0,35 m

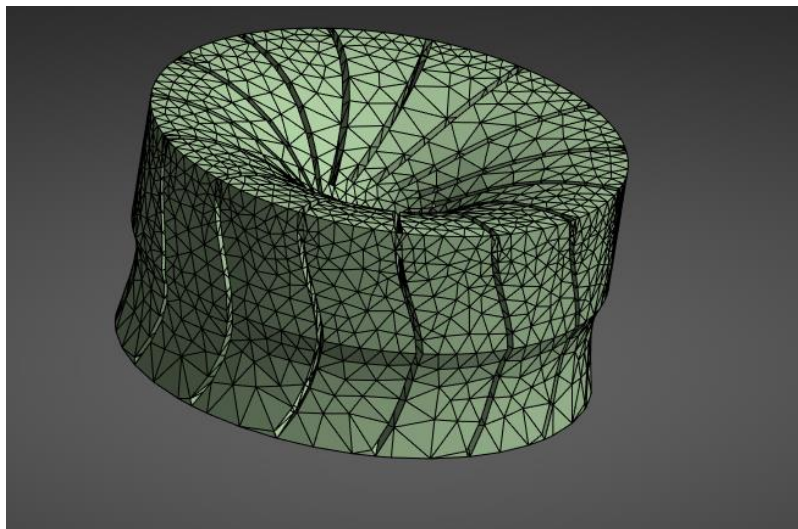




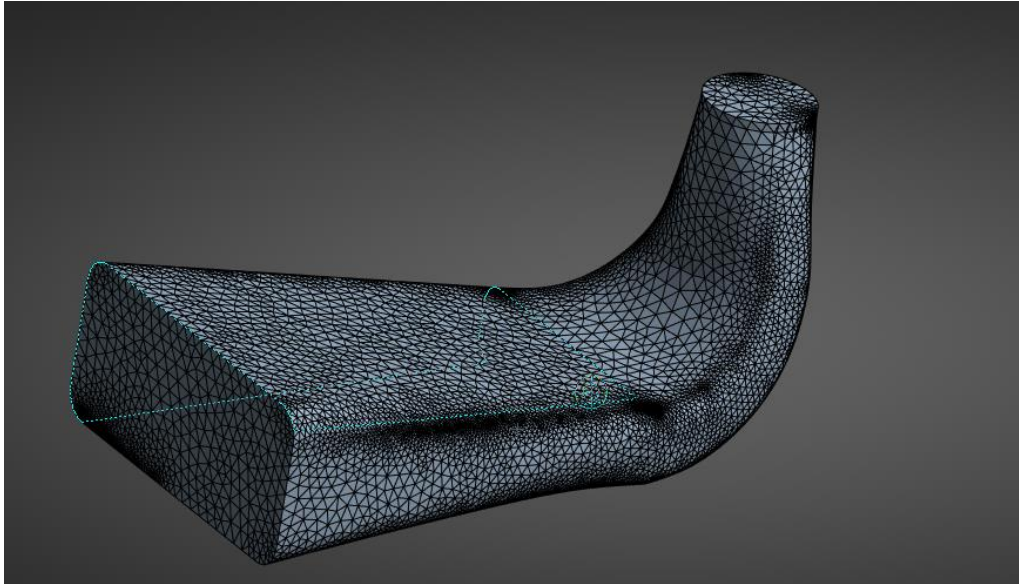
Εικόνα 36- Διακριτοποίηση πλέγματος σπειροειδούς κελύφους με *element size* 0,35m



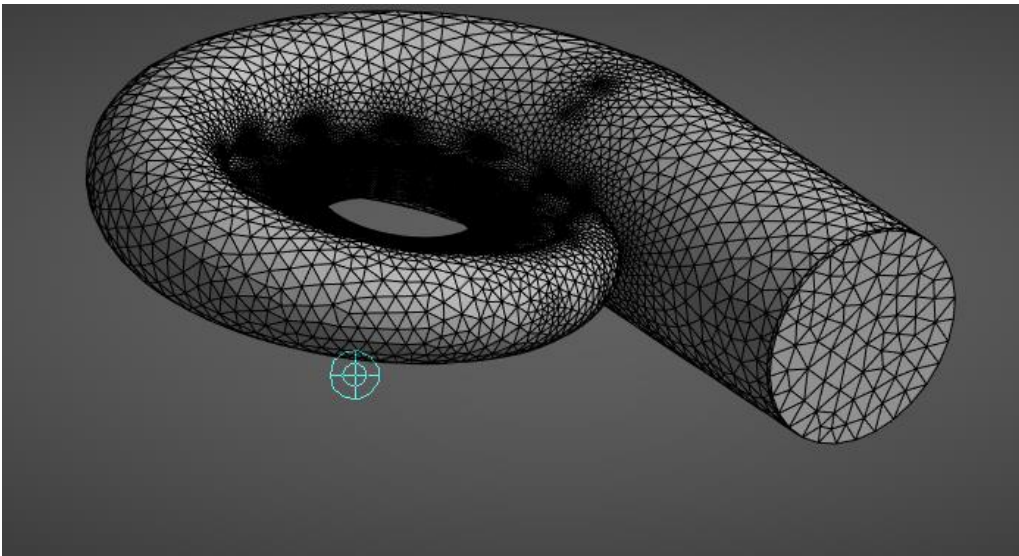
Εικόνα 37- Διακριτοποίηση πλέγματος δρομέα για *element size* 0,35m



Εικόνα 38- Διακριτοποίηση πλέγματος δρομέα για *element size* 0,5m



Εικόνα 39- Διακριτοποίηση πλέγματος αγωγού απαγωγής για *element size 0,5m*



Εικόνα 40- Διακριτοποίηση πλέγματος σπειροειδούς κελύφους για *element size 0,5m*

### 3.4.5 Οριακές συνθήκες

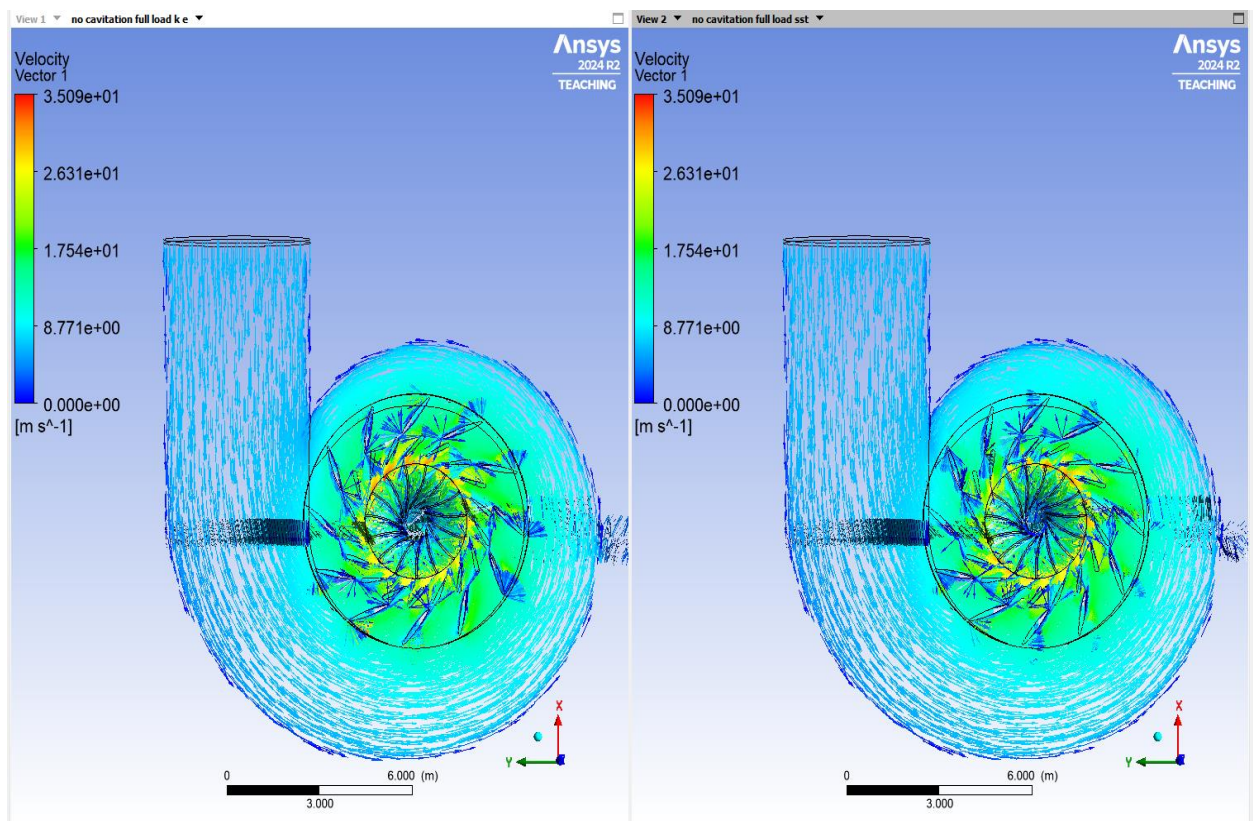
Ο ορισμός των οριακών συνθηκών και η μελέτη της ανάλυσης έγινε με το λογισμικό ANSYS-CFX. Αρχικά ορίστηκε η είσοδος, η οποία είναι η είσοδος του νερού στο σπειροειδές κέλυφος και η έξοδος, η οποία είναι η έξοδος του ρευστού από τον αγωγό απαγωγής. Στη συνέχεια καθορίστηκαν τα τμήματα όπου έχουμε διεπαφή και αυτά είναι: πρώτον στην έξοδο του ρευστού από το σπειροειδές κέλυφος και καθώς εισέρχεται στο δρομέα και δεύτερον όπως εξέρχεται το ρευστό από το δρομέα και εισέρχεται στον αγωγό απαγωγής. Λόγω του ότι ο δρομέας περιστρέφεται επιλέξαμε την εντολή Frozen Rotor, προκειμένου να το θεωρήσουμε σταθερό και ότι το ρευστό είναι αυτό που περιστρέφεται. Όλα τα υπόλοιπα τμήματα θεωρήθηκαν ως τοίχοι (WALLS) με μηδενική τριβή ολίσθησης έτσι ώστε να μην επηρεάζουν την ροή.



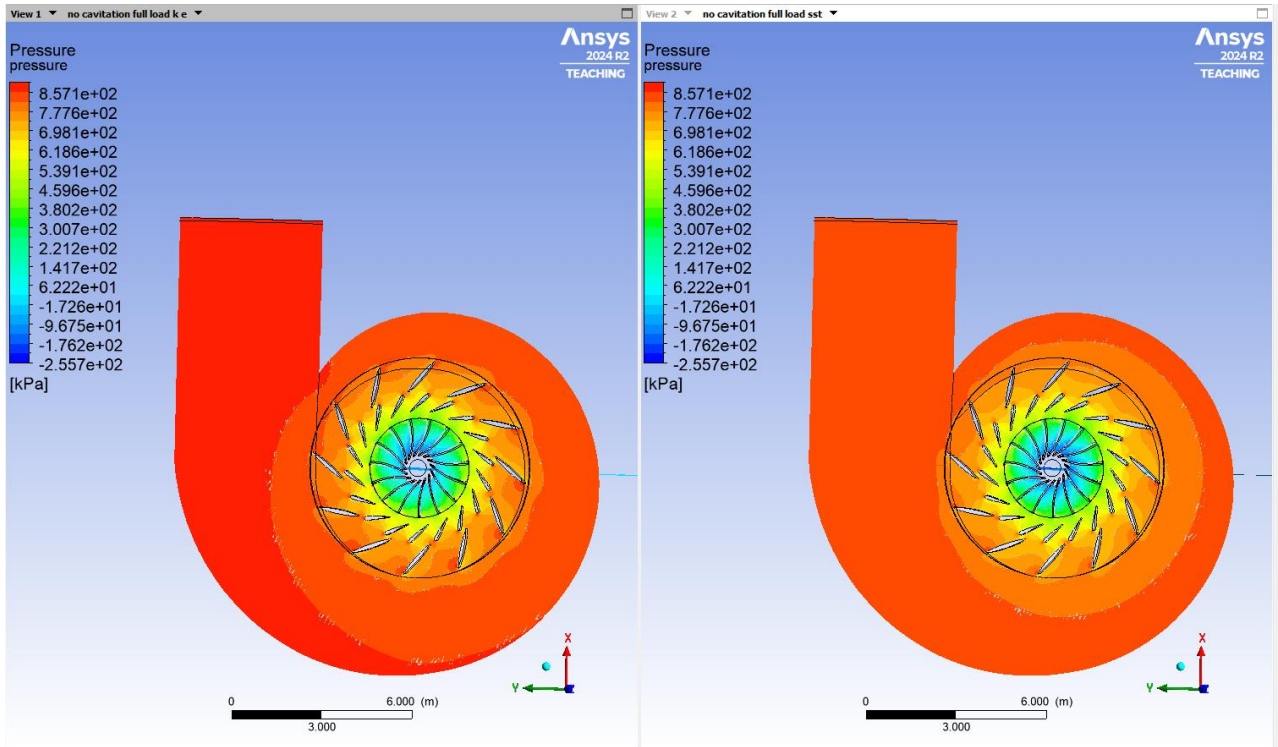
Για το ρευστό (νερό) θεωρήθηκε ότι έχει θερμοκρασία  $T=25^{\circ}\text{C}$ , η πίεση αναφοράς του είναι  $P=1\text{ atm}$ , έχει πυκνότητα  $\rho=1000\text{ kg/m}^3$  και ότι η βαρυτική δύναμη του ρευστού δεν το επηρεάζει (non buoyant). Η παροχή μάζας του ρευστού τέθηκε ίση με την πραγματική παροχή μάζας, ήτοι  $m=110400\text{ kg/s}$  σε συνθήκες πλήρους φορτίου. Για τις περιπτώσεις μερικού φορτίου επιλέχθηκε παροχή μάζας  $m_1=44320\text{ kg/s}$ , ήτοι 50MW και  $m_2=75345\text{ kg/s}$ , ήτοι 85MW. Τα φορτία αυτά επιλέχθηκαν κατά τέτοιο τρόπο, λόγω του ότι όταν το πραγματικό μοντέλο λειτουργεί σε συνθήκες μερικού φορτίου, δηλαδή από διάστημα 43MW έως 95MW εμφανίζει φαινόμενα σπηλαιώσης, όπως επίσης και όταν η γωνία των περιστρεφόμενων πτερυγίων κυμαίνεται από 40% έως 55% σε σχέση με τη γωνία των πτερυγίων σε συνθήκες πλήρους λειτουργίας. Στη μελέτη που ακολουθεί τα περιστρεφόμενα πτερύγια έχουν μία σταθερή γωνία, η οποία είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις που μελετάμε. Επιπροσθέτως έχουμε ορίσει 1000 επαναλήψεις, αλλά επειδή η ροή είναι περιστρεφόμενη είναι σχετικά δύσκολο να έχουμε σύγκλιση.

### 3.5 Συνθήκες πλήρους φορτίου

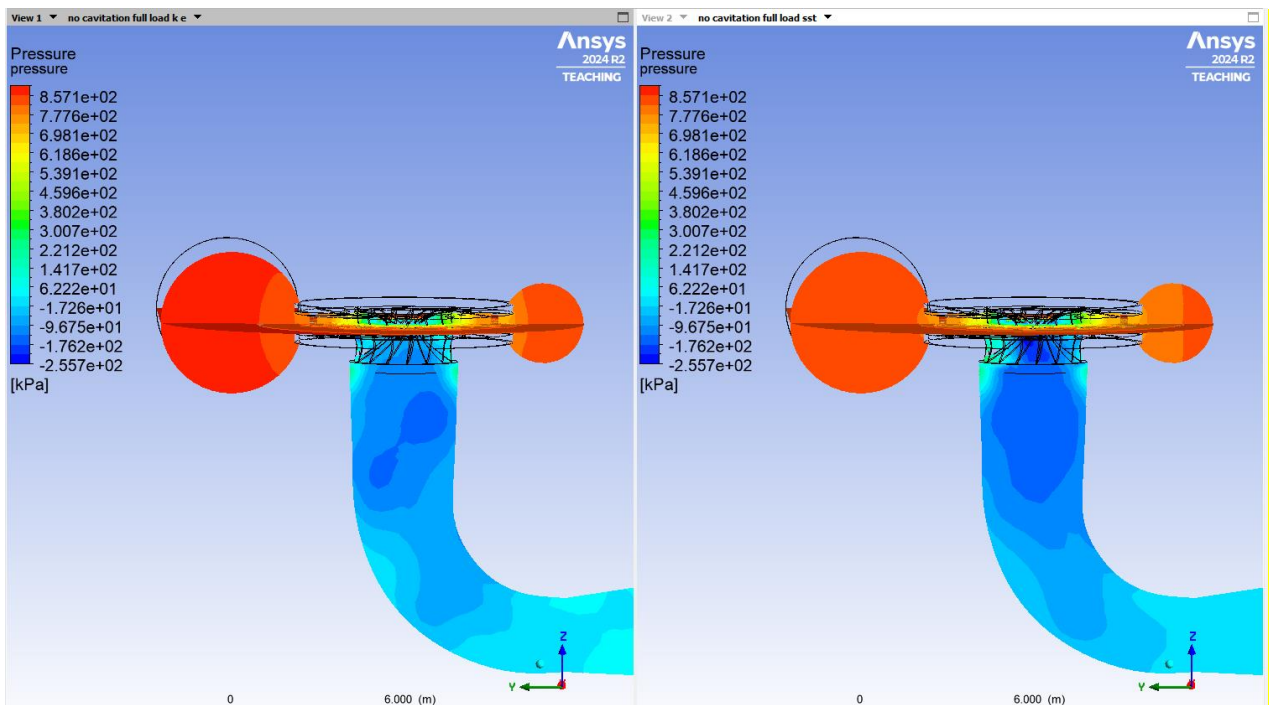
Το πραγματικό μοντέλο όταν λειτουργεί σε συνθήκες πλήρους φορτίου δεν εμφανίζει φαινόμενα σπηλαιώσης, οπότε δεν θα γίνει ανάλυση του φαινομένου. Για το σχεδιαστικό μας μοντέλο το πλέγμα μας έχει element size 0,35m και επιλέξαμε το μοντέλο k-ε, καθώς το μοντέλο SST είναι πιο απαιτητικό στη σύγκλιση και περισσότερο χρονοβόρο, ενώ και τα δύο παρέχουν παρόμοια αποτελέσματα.



Εικόνα 41- Διάνυσμα ταχύτητας ροής για το μοντέλο k-ε και το SST



Εικόνα 42- Πίεση ροής αριστερά με το μοντέλο  $k-\epsilon$  και δεξιά με το μοντέλο SST

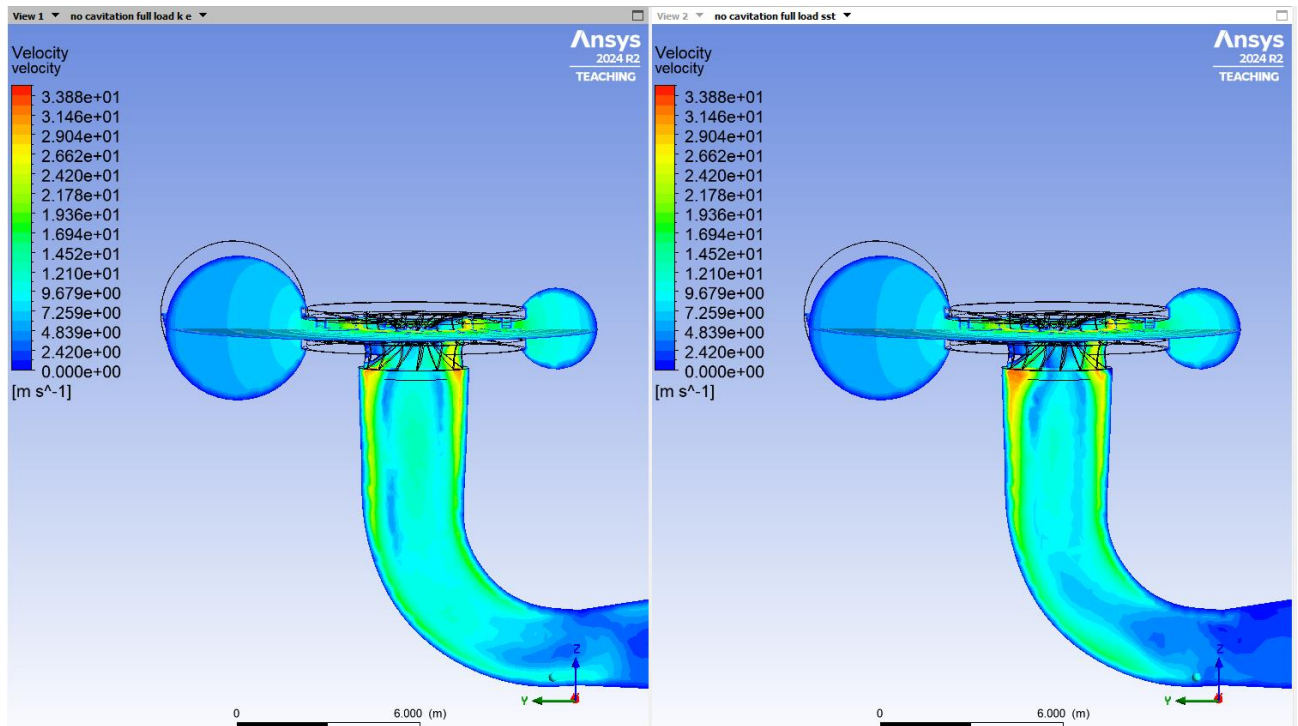


Εικόνα 43- Πίεση ροής στον αγωγό απαγωγής αριστερά με το μοντέλο  $k-\epsilon$  και δεξιά με το μοντέλο SST

Από τις εικόνες 42 και 43 παρατηρείται ότι η ροή πριν την είσοδο στο δρομέα του στροβίλου έχει μεγάλη πίεση, ενώ στην έξοδο η πίεση πέφτει όπως είναι αναμενόμενο. Παρόλα αυτά είναι ξεκάθαρο



ότι δεν είναι μικρότερη από την πίεση ατμών του νερού για τους 25°C, η οποία είναι 3,169 kPa, οπότε δεν υπάρχει σπηλαιώση κάτι που επαληθεύεται και από το πραγματικό μοντέλο.



Εικόνα 44- Ταχύτητα ροής στην έξοδο του δρομέα με το μοντέλο k-ε και το μοντέλο SST

Αυτό που γίνεται άμεσα αντιληπτό είναι ότι και τα δύο μοντέλα παρέχουν εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα με μικρές διαφορές και για το λόγο αυτό η ανάλυση θα συνεχιστεί με το μοντέλο k-ε.

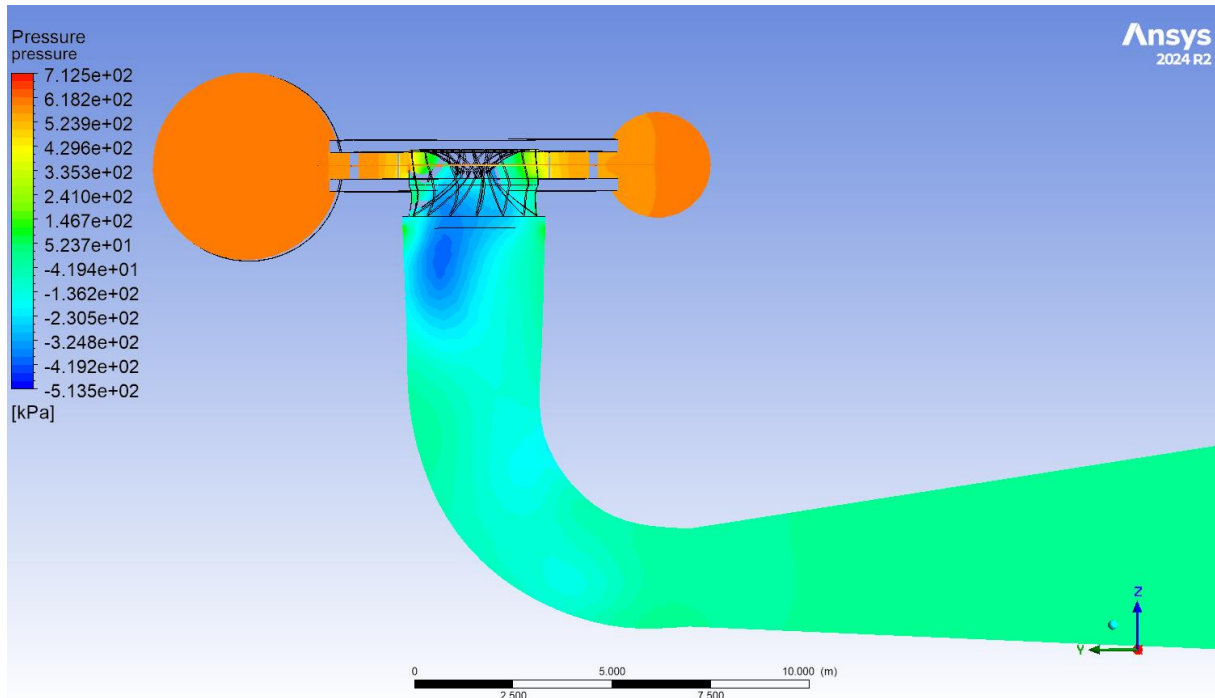
### 3.6 Πραγματικές Συνθήκες Μερικού Φορτίου

Το πραγματικό μοντέλο όταν λειτουργεί υπό το καθεστώς μερικού φορτίου εμφανίζει έντονη σπηλαιώση. Η περιοχή λειτουργίας εμφάνισης του φαινομένου είναι στο διάστημα ισχύος από 43MW έως 95MW, οπότε και αποφεύγεται η λειτουργία του σε αυτό το διάστημα. Με το σχεδιαστικό μας μοντέλο θα προσπαθήσουμε να επαληθεύσουμε αν όντως συμβαίνει αυτό.

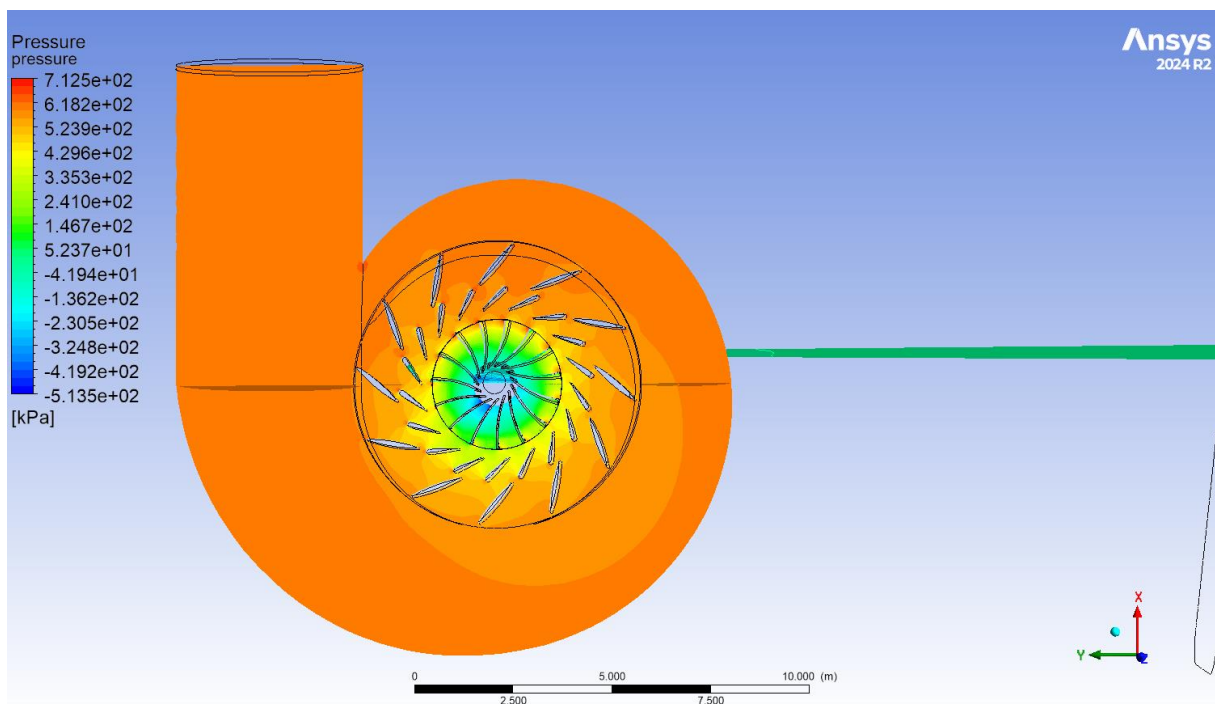
### 3.7 Υπολογιστικές μετρήσεις για μερικό φορτίο.

Όπως ειπώθηκε παραπάνω το πραγματικό μοντέλο εμφανίζει σπηλαιώση ανάμεσα σε ένα εύρος ισχύος. Με το πειραματικό μας μοντέλο θα προσπαθήσουμε να επιβεβαιώσουμε αν όντως συμβαίνει αυτό. Οι μετρήσεις θα γίνουν για δύο μερικά φορτία το πρώτο για ισχύ 85 MW και παροχή μάζας  $m_1=75344$  kg/s και το δεύτερο για φορτίο 50MW και παροχή μάζας  $m_2=44320$  kg/s. Με το λογισμικό ANSYS-CFX θα προσομοιώσουμε το μοντέλο της σπηλαιώσης και θα ελεγχθεί αν απεικονίζεται με το κλάσμα ατμού (volume of fraction) αλλά και την πίεση. Τα πειραματικά αποτελέσματα που θα προκύψουν θα παρουσιαστούν τόσο για ροή χωρίς σπηλαιώση όσο και για ροή με σπηλαιώση.

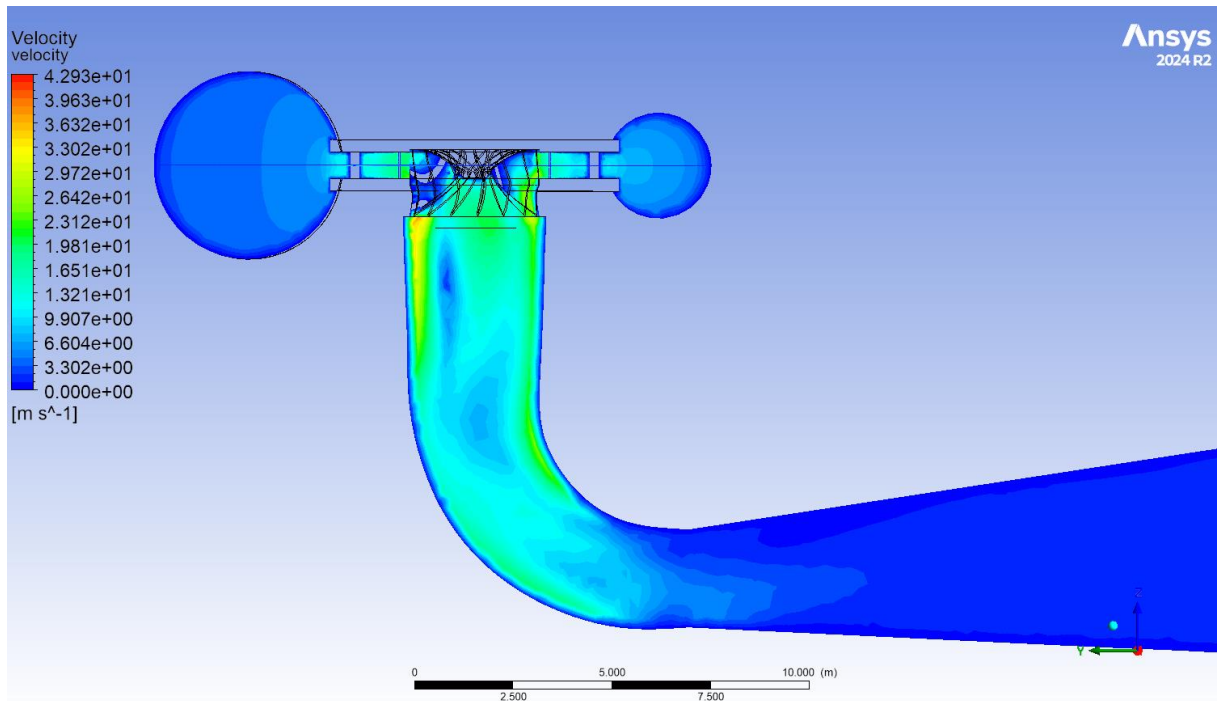
### 3.7.1 Περιγράμματα Μερικού Φορτίου 85MW



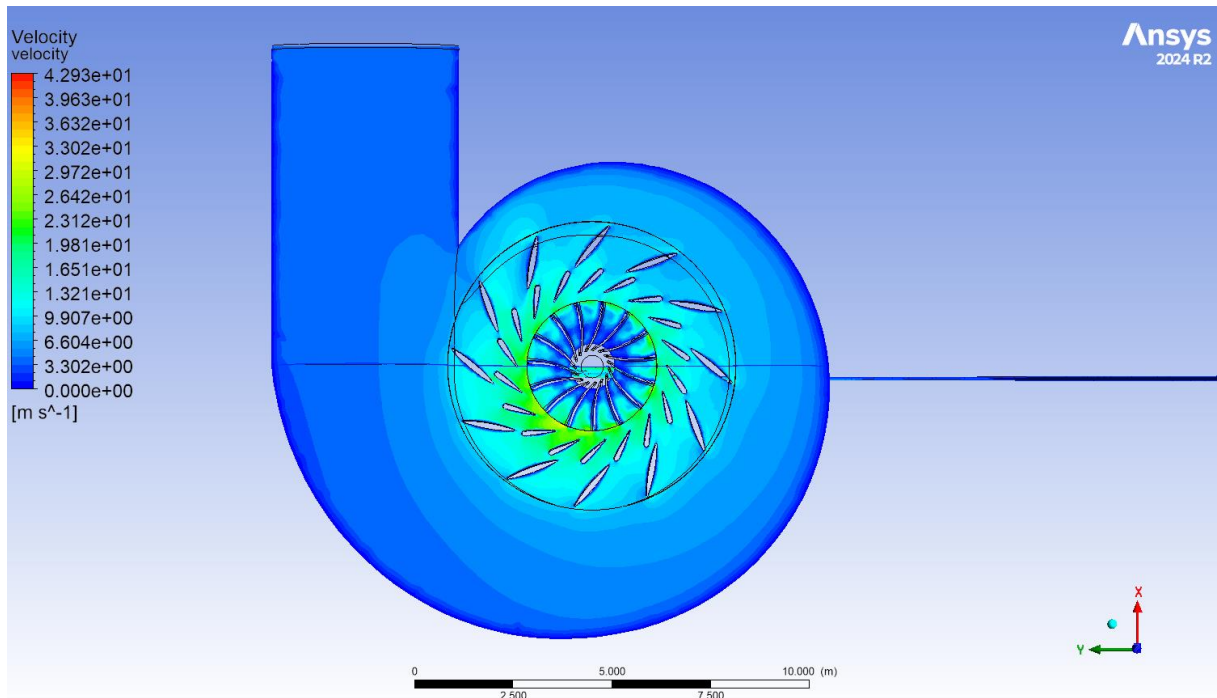
Εικόνα 45 Περιγράμμα πίεσης στον αγωγό απαγωγής χωρίς σπηλαίωση



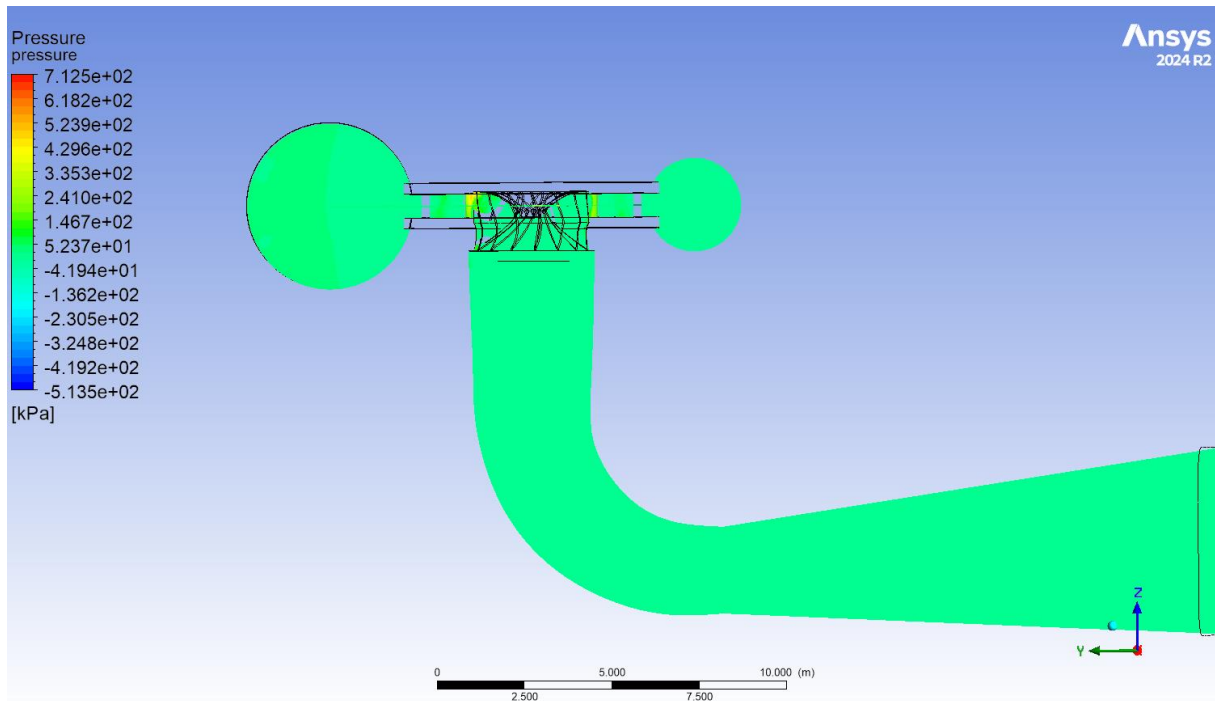
Εικόνα 46- Περιγράμμα πίεσης στο σπειροειδές κέλυφος χωρίς σπηλαίωση



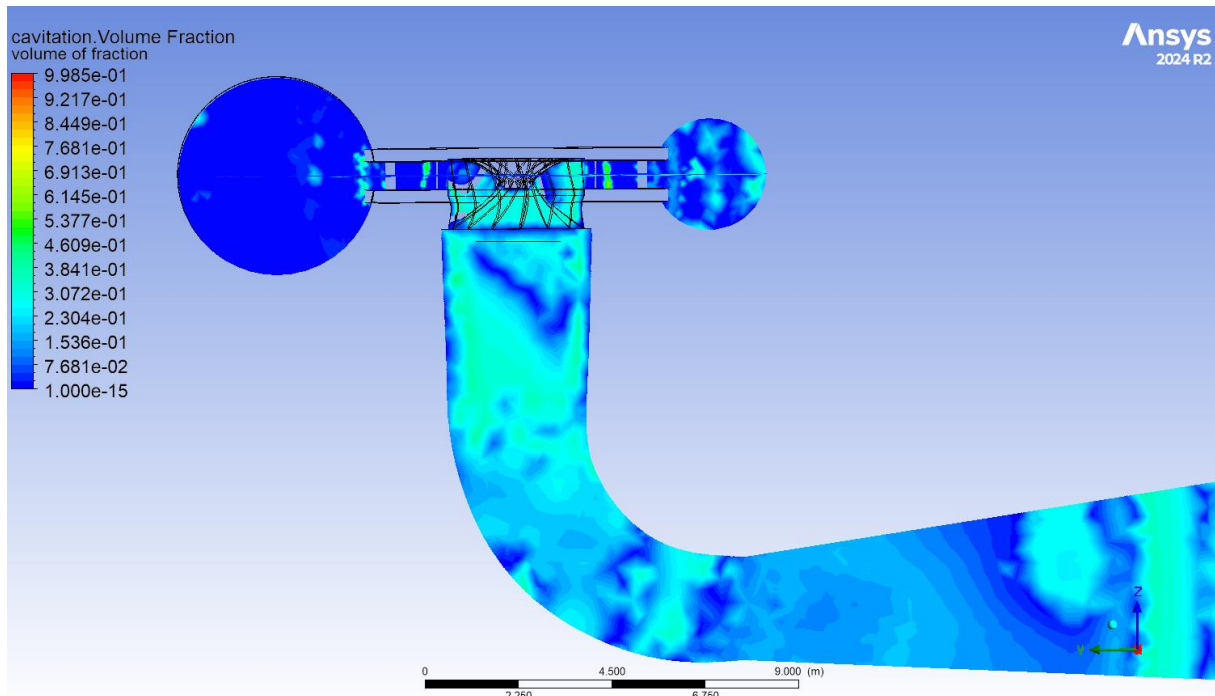
Εικόνα 47-Περίγραμμα ταχύτητας ροής στον αγωγό απαγωγής χωρίς σπηλαίωση



Εικόνα 48- Περίγραμμα ταχύτητας στο σπειροειδές κέλυφος χωρίς σπηλαίωση

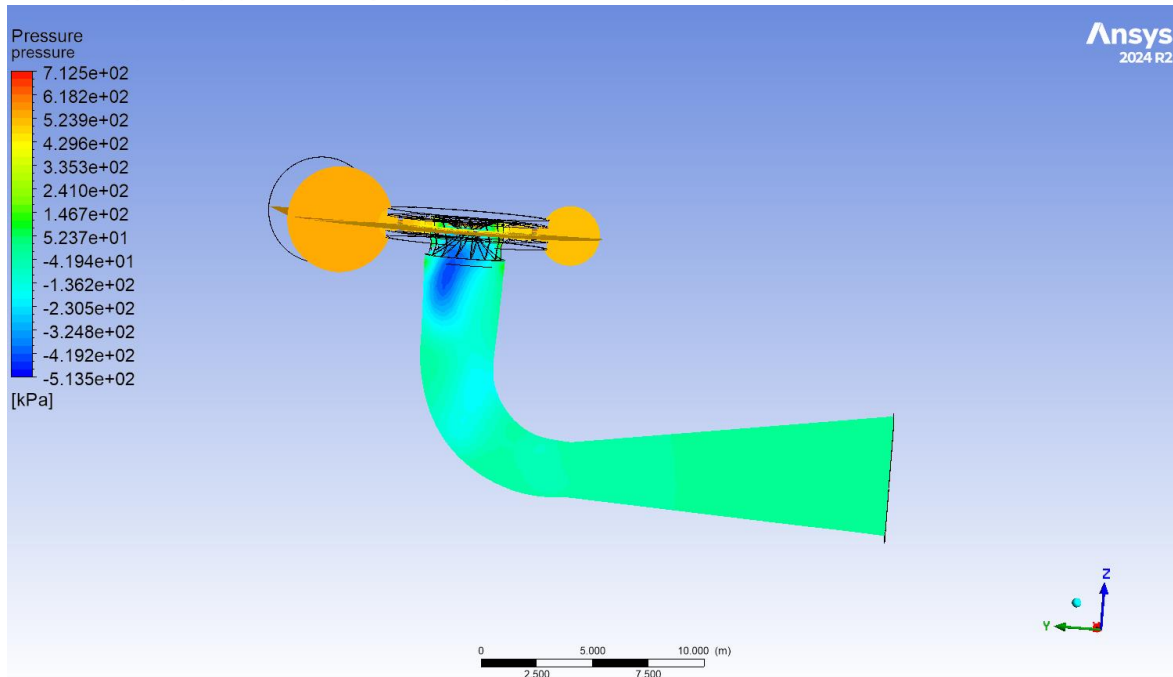


Εικόνα 49- Περίγραμμα πίεσης στον αγωγό απαγωγής και το σπειροειδές κέλυφος με σπηλαιώση

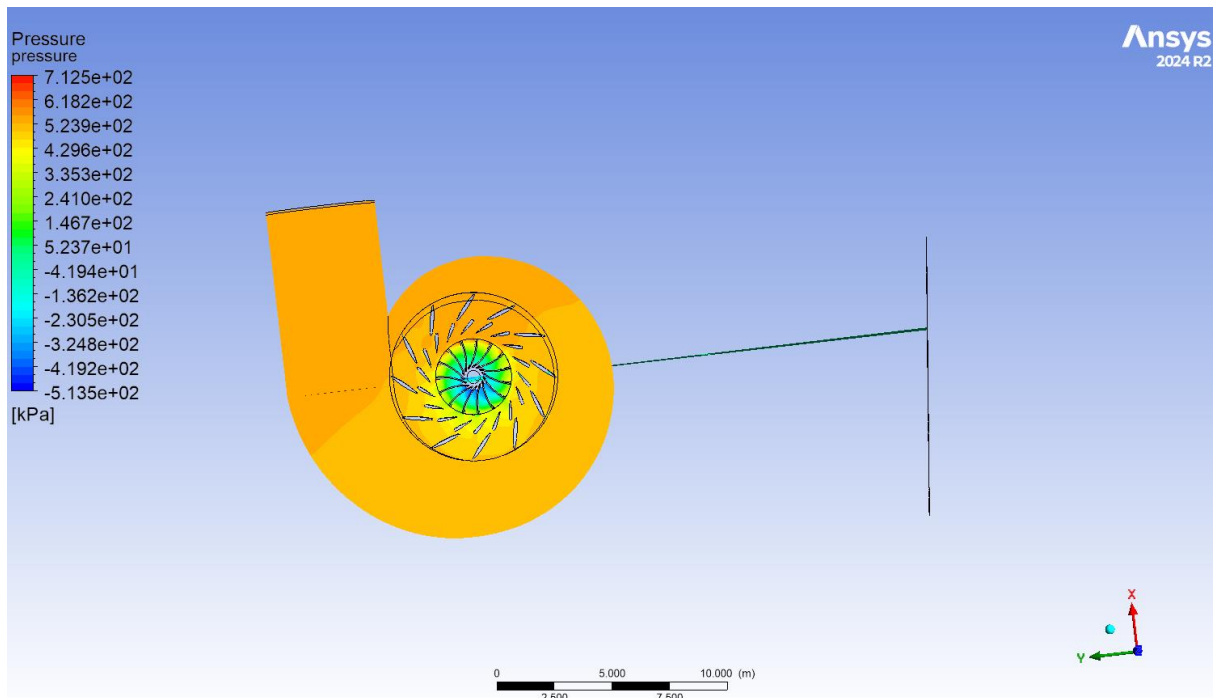


Εικόνα 50- Περίγραμμα κλάσμα όγκου ατμών στη σπηλαιώση

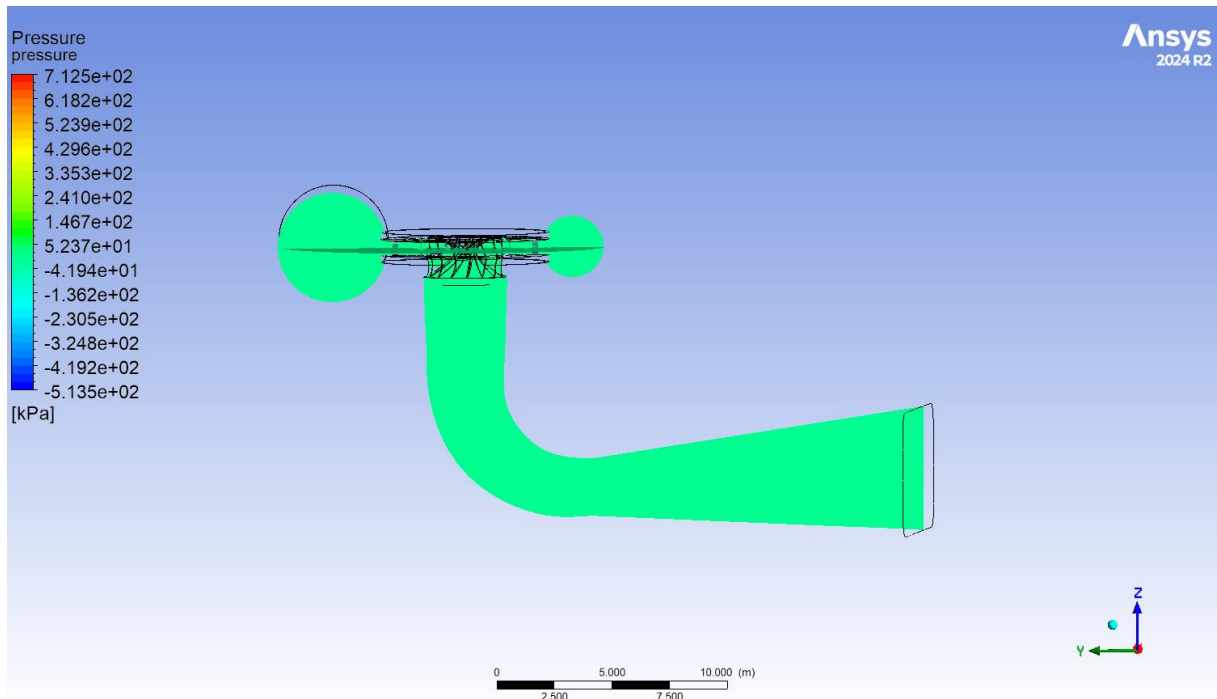
### 3.7.2 Περιγράμματα Μερικού φορτίου 50MW



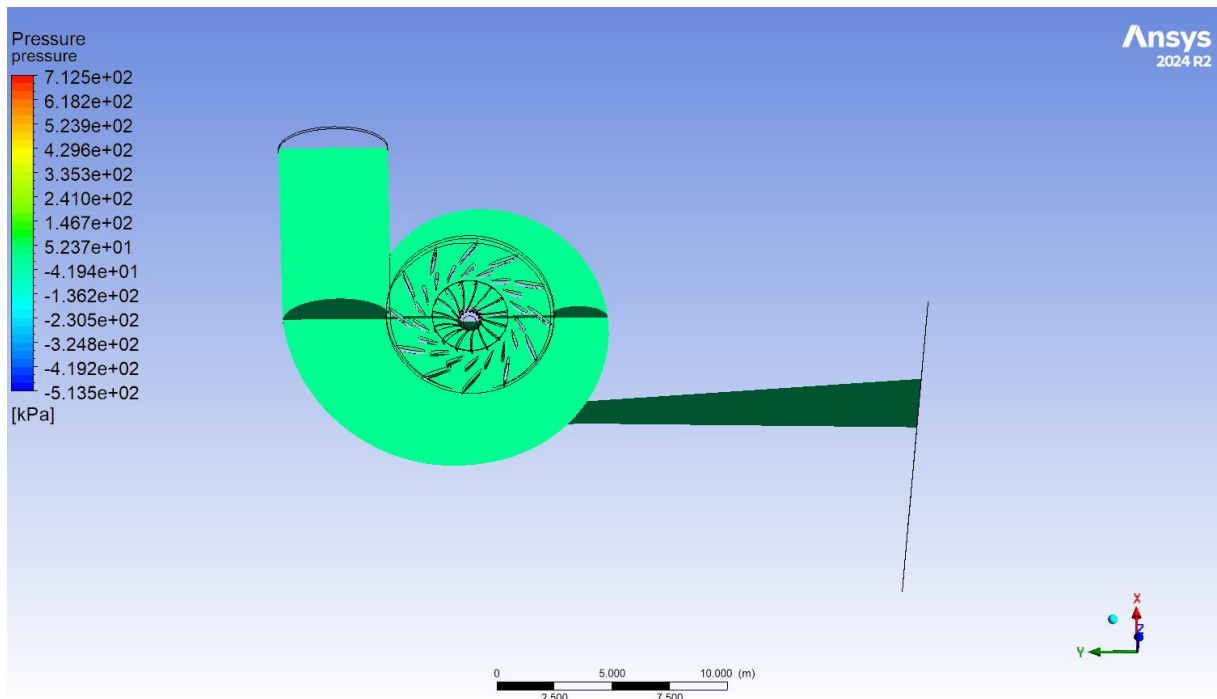
Εικόνα 51-Περίγραμμα πίεσης ροής στον αγωγό απαγωγής χωρίς σπηλαιώση



Εικόνα 52- Περίγραμμα πίεσης στο σπειροειδές κέλυφος χωρίς σπηλαιώση

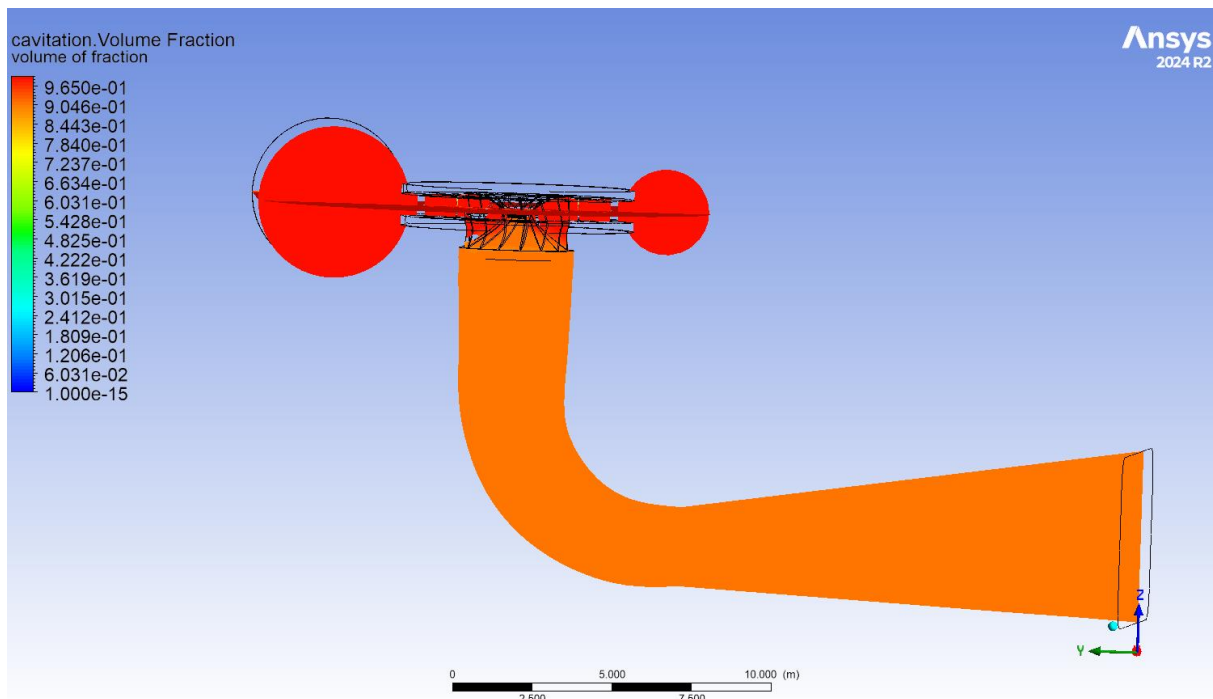


Εικόνα 53- Περίγραμμα πίεσης στον αγωγό απαγωγής με σπηλαίωση



Εικόνα 54-Περίγραμμα πίεσης στο σπειροειδές κέλυφος με σπηλαίωση





Εικόνα 55- Περίγραμμα κλάσμα όγκου ατμών (volume of fraction)

Από τις εικόνες 46, έως 55 γίνεται αντιληπτό ότι σε συνθήκες λειτουργίας με μερικό φορτίο, το υπολογιστικό μοντέλο έδειξε ότι εμφανίζεται σπηλαιώση στην έξοδο του στρόβιλου και στην είσοδο του αγωγού απαγωγής. Η πίεση, όπως είναι αναμενόμενο στην είσοδο της ροής, είναι υψηλή και στην έξοδο του δρομέα μειώνεται για την περίπτωση όπου δεν έχουμε σπηλαιώση. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εικόνα 55, η οποία δείχνει ότι το φαινόμενο της σπηλαιώσης ξεκινάει ήδη από το σπειροειδές κέλυφος και συνεχίζει σε όλο τον υδροστρόβιλο. Η περίπτωση αυτή μπορεί να υφίσταται λόγω της χαμηλής παροχής νερού και της σταθερής περιστροφής του δρομέα, ο στρόβιλος δημιουργεί υποπίεση, οπότε και εμφανίζεται αυτό το φαινόμενο. Σε διαφορετική περίπτωση το υπολογιστικό μοντέλο με αυτό το πλέγμα και μοντέλο τύρβης δεν μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

## 4 Συμπεράσματα και περαιτέρω βελτιώσεις

Η σπηλαιώση είναι ίσως το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι υδροστρόβιλοι Francis, καθώς είναι ακτινικής ροής (έχουν ακτινική είσοδο και αξονική έξοδο). Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου, πρέπει να λειτουργούν σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, δηλαδή για το ύψος υδατόπτωσης και την παροχή που έχουν σχεδιαστεί. Αποκλίσεις από αυτά τα δύο χαρακτηριστικά μεγέθη προκαλεί, αναπόφευκτα, την εμφάνιση σπηλαιώσης με αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης αρχικά και σε μεγαλύτερο βαθμό την καταστροφή του στροβίλου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάστηκε η υπολογιστική διερεύνηση της σπηλαιώσης σε συγκεκριμένο υδροστρόβιλο Francis, ο οποίος υπάρχει στον Υδροηλεκτρικό Σταθμό Πολυφήτου στο Νομό Κοζάνης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πρωταρχικός στόχος των προσομοιώσεων, δεν είναι η άμεση σύγκριση με τον πραγματικό στρόβιλο, αλλά το γεγονός το κατά πόσο είναι εφικτό μέσω των υπολογιστικών μοντέλων να μελετηθεί το φαινόμενο της σπηλαιώσης. Αυτό ως ένα βαθμό επιτυγχάνεται, ιδιαίτερα όταν η μελέτη αφορά τη συμπεριφορά του υδροστροβίλου σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή πλήρες φορτίο και σχεδιαστικό ύψος υδατόπτωσης. Στις περιπτώσεις, όπου η μελέτη αφορούσε συνθήκες λειτουργίας με μερικό φορτίο και σπηλαιώση, το υπολογιστικό μοντέλο να μην εντόπισε την σπηλαιώση, ωστόσο δεν μπόρεσε να δώσει ακριβή αποτελέσματα.

Η αδυναμία αυτή, να μελετηθεί το φαινόμενο σωστά, οφείλεται στο γεγονός επιλέχθηκε ένα πλέγμα μεσαίο και όχι πολύ πυκνό, διότι θα υπήρχαν πολλά elements, και θα ήταν δύσκολο για το λογισμικό να κάνει υπολογισμούς (απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δύναμη το πυκνό πλέγμα). Όπως επίσης η διερεύνηση έγινε με το μοντέλο k-ε, το οποίο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά θα έπρεπε να επιλεγεί το μοντέλο SST, το οποίο είναι πιο απαιτητικό, αλλά υπολογίζει με καλύτερη ακρίβεια ροές όπως αυτή που διερευνήθηκε στην υπόψη διπλωματική εργασία. Επιπλέον η γεωμετρία που επιλέχθηκε δεν είναι ίδια με του πραγματικού υδροστροβίλου (έχει διαφορετικό αγωγό απαγωγής), τα περιστρεφόμενα πτερύγια, τα οποία σε συνθήκες μερικού φορτίου μεταβάλλονται, στην περίπτωση μας ήταν σταθερά, οπότε είναι λογικό να προκύψουν και διαφοροποιημένα αποτελέσματα.

Τέλος αποκτά μεγάλο ενδιαφέρον η μελλοντική μελέτη της πραγματικής γεωμετρίας του υδροστροβίλου Francis του ΥΗΣ Πολυφήτου και η ανάλυση του φαινομένου της σπηλαιώσης σε βάθος.



## Βιβλιογραφία

- [1] S. D. / C. HALL, Στροβιλομηχανές Ρευστομηχανική και Θερμοδυναμική Στροβιλομηχανών - Θεωρία και Ασκήσεις.
- [2] MUNSON, YOUNG & OKIISHI'S, ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ, ΤΖΙΟΛΑΣ.
- [3] YUNUS A. CENGEL, JOHN M. CIMBALA, Μηχανική Ρευστών Θεωρία και εφαρμογές.
- [4] Α. Τουρλιδάκης, «Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ/Σημειώσεις “Υδροστρόβιλοι- Υδροηλεκτρικά έργα” »».
- [5] H.K.Versteeg , W. Malalasekera, Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική "Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων", ΤΖΙΟΛΑ.
- [6] Κ.Βαφειάδης, *Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος "Υπολογιστική Ρευστοδυναμική"*.
- [7] Ranjeet Twayna, Ram Manandhar, Bikash Singh, Dadiram Dahal, Atmaram Kayastha, Biraj Singh Thapa, «Numerical investigation of Cavitation in Francis Turbine,» *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, June 2022.
- [8] Marija sisko kulis, Nikola Mijalic, Senad Hidzic, «Cavitation Detection on Hydraulic Machines,» *Journal of Energy-Energija 70(3):25-32*, August 2022.
- [9] Adnan Aslam Noon, Aamer Sharif, Melkamu Tadesse Getachew Riaz Mahammad, «Experimental and Numerical Investigation of Cavitation Assessment for Runner Blades in a Francis Turbine,» *Advances in Tribology*, January 2024.
- [10] Yunhua Jiang, Siyao Shao, Jiarong Hong, «Experimental investigation of ventilated supercavitation with gas jet cavitator,» *Physics of fluid*, December 2017.
- [11] Nirajan Khakurel, «Cavitation in Francis turbines,» *FH Aachen University of Applied Sciences*, December 2015.
- [12] Pardeep Kumar, R.P. Saini, «Study of cavitation in hydro turbines—A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, April 2009.
- [13] Chirag Trivedi, Igor Iliev, Ole Gunnar, Dahlhaug, Zoran Markov, Fredrik Engstrom, Henning Lysaker, «Investigation of a Francis turbine during speed variation: Inception of,» *Renewable Energy*, April 2020.
- [14] ANSYS, «Ansys CFX-Solver Theory Guide,» 2021.

- [15] worldenergynews.gr, «www.worldenergynews.gr,» 10 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.worldenergynews.gr/index.php?id=560250>.
- [16] Ι. Αργυράκης. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.ypethe.gr/sites/default/files/basicpagefiles/2013\\_argyakis\\_-\\_oi\\_ydroelektrikoi\\_stathmoi\\_tis\\_dei\\_a.e.\\_kai\\_i\\_symvoli\\_toy.pdf](https://www.ypethe.gr/sites/default/files/basicpagefiles/2013_argyakis_-_oi_ydroelektrikoi_stathmoi_tis_dei_a.e._kai_i_symvoli_toy.pdf).
- [17] E. Ayli, «Cavitation in Hydraulic Turbines,» *International Journal of Heat and Technology*, March 2019.
- [18] P. P. Gohil, R. P. Saini, «Numerical Study of Cavitation in Francis Turbine of a Small Hydro Power Plant,» *Journal of Applied Fluid Mechanics*, January 2015.
- [19] S. Khurana, Navtejb, Hardeep Singh, «Effect of Cavitation on Hydraulic Turbines- A Review,» *International Journal of Current Engineering and Technology*, March 2012.
- [20] Johnson Nchege, Chijindu Okpalaoka, «Hydroelectric production and energy consumption in Nigeria: Problems and solutions,» *Renewable Energy*, December 2023.

