



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ – ΕΡΓ. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Παραμετρικός σχεδιασμός και αριθμητική
ανάλυση της ροής υδροστροβίλου τύπου Deriaz**

Γαλανόπουλος Ιωάννης

Επιβλέπων καθηγητής: Αναγνωστόπουλος Ιωάννης

Αθήνα, Απρίλιος 2014

Να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Αναγνωστόπουλο Ιωάννη που μου ανέθεσε την παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και τον Υ.Δ. Κασάνο Ιωάννη για όλη την πολύτιμη βοήθειά του.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και έχει ως θέμα την αριθμητική επίλυση και την διερεύνηση της ροής σε δρομέα υδροστροβίλου αντίδρασης τύπου Deriaz. Με την βοήθεια εμπορικού προγράμματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) έγινε δυνατή η χάραξη των χαρακτηριστικών καμπύλων λειτουργίας και του διαγράμματος του υδραυλικού βαθμού απόδοσης ενός συγκεκριμένου υδροστροβίλου Deriaz.

Ξεκινώντας από την αριθμητική επίλυση του μεσημβρινού διδιάστατου καναλιού, χαράσσεται ο δρομέας με μία συγκεκριμένη μέθοδο παραμετρικού σχεδιασμού, που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών του Ε.Μ.Π. στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής. Μετά την χάραξη του δρομέα επιλύεται η ροή στο τριδιάστατο πλέον μοντέλο, που είναι ένα περιοδικά συμμετρικό τμήμα του δρομέα. Στόχος είναι η διερεύνηση του βαθμού υδραυλικής απόδοσης για συγκεκριμένες γωνίες των ρυθμιστικών πτερυγίων και για συγκεκριμένες κλίσεις των πτερυγίων του δρομέα, διατηρώντας τις στροφές λειτουργίας της μηχανής σταθερές. Ακολουθεί έλεγχος για τη σπηλαίωση στις περιπτώσεις των μέγιστων βαθμών απόδοσης. Παρουσιάζονται και ελέγχονται τα πεδία ροής που δημιουργούνται στο δρομέα και τα πτερύγια. Κατασκευάζονται επίσης διαγράμματα πίεσης και πραγματοποιείται έλεγχος της κινητικής ενέργειας του ρευστού στην έξοδό του από τον δρομέα.

Τέλος ελέγχεται η λειτουργία και η απόδοση του υδροστροβίλου μεταβάλλοντας τον αριθμό των πτερυγίων από έντεκα σε δεκατρία και εννέα. Η διαδικασία αυτή οδήγησε στην εύρεση των καταλληλότερων συνθηκών λειτουργίας του υδροστροβίλου.

Διαπιστώθηκε ότι ο υδροστροβίλος έχει καλή συμπεριφορά σε μεταβλητό φορτίο, λόγω της διπλής του ρύθμισης. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης φτάνει το 90% ενώ το εύρος παροχών λειτουργίας με καλή απόδοση (άνω του 85%) είναι αρκετά μεγάλο. Ο βέλτιστος αριθμός πτερυγίων του συγκεκριμένου δρομέα είναι έντεκα.

Abstract

The present Diploma Thesis was carried out at the School of Mechanical Engineering of the National Technical University of Athens and its objectives are the parametric design and the numerical analysis of the flow in a Deriaz diagonal turbine. With the use of a commercial software package, the characteristic operation curves of the hydro turbine and the map of the hydraulic efficiency were obtained.

Through the numerical analysis of the meridional two dimensional channel it was feasible to design the blades of the runner using a parametric design procedure developed previously at the Lab of Hydraulic Turbomachines, N.T.U.A. The flow in a three dimensional periodical symmetric part of the runner is simulated with different blade angle each time and different angle of adjustment of the guide vanes. The cavitation conditions are also tested and the flow in the blade runner is analyzed and discussed. Notifications were made as far as they concern the operation and hydraulic efficiency of the runner.

The operation of the runner was also tested with thirteen and nine blades instead of eleven, on the point of the maximum hydraulic efficiency.

The hydro turbine has determined to have highly contented operation for a various amount of water flow due to its double adjustment. The maximum hydraulic efficiency reaches 90% and

has a large discharge range which the hydro turbine is working adequately (over 85%). The best number of blades for this particular runner is eleven.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος.....	9
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	11
1.1 Γενικά Στοιχεία Υδροστροβίλων	11
1.1.1 Εισαγωγή στους Υδροστροβίλους.....	11
1.1.2 Περιγραφή και Τύποι Υδροστροβίλων.....	12
1.1.3 Μέρη Υδροστροβίλων.....	16
1.1.4 Ενεργειακός Ισολογισμός – Γενικές Εξισώσεις	20
1.1.5 Τρίγωνα Ταχυτήτων	22
1.1.6 Ειδικός αριθμός στροφών.....	24
1.1.7 Βαθμός Απόδοσης.....	24
1.1.8 Το φαινόμενο της σπηλαίωσης.....	26
1.2 Σχεδίαση Υδροστροβίλου	28
1.2.1 Γενικά στοιχεία σχεδίασης	28
1.2.2 Κύριες διαστάσεις	28
1.3 Μοντελοποίηση.....	30
1.3.1 Η υπολογιστική ρευστομηχανική	30
1.3.2 Μεθοδολογία	31
1.3.3 Παρουσίαση δεδομένων	31
1.3.4 Κατασκευή γεωμετρίας και υπολογιστικού πλέγματος.....	32
1.3.5 Μοντέλα τύρβης.....	36
1.3.6 Αλγόριθμος Simple	38
1.3.7 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	39
Κεφάλαιο 2 Αριθμητική Επίλυση και χάραξη του δρομέα	41
2.1 Επίλυση μεσημβρινού καναλιού	41
2.1.1 Οριακές Συνθήκες	41
2.1.2 Ανεξαρτησία διδιάστατου πλέγματος.....	41
2.1.3 Υπολογισμός στοιχείων ροής.....	42
2.2 Χάραξη του πτερυγίου	48
2.2.1 Μέθοδοι απεικόνισης του πτερυγίου.....	48
2.2.2 Γεωμετρικά στοιχεία για τον σχεδιασμό των πτερυγίων.....	50
2.2.3 Παραμετρική χάραξη του δρομέα	54
2.3 Επίλυση τριδιάστατου μοντέλου	56
2.3.1 Κατασκευή γεωμετρίας	57

2.3.2 Τριδιάστατο πλέγμα	61
2.3.3 Μοντελοποίηση MRF (moving reference frames)	62
2.3.4 Ανεξαρτησία πλέγματος	64
2.3.5 Παραμετροποίηση	66
2.3.6 Οριακές Συνθήκες	70
2.3.7 Έλεγχος της επίλυσης.....	70
Κεφάλαιο 3 Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων.....	73
3.1 Υδραυλικός βαθμός απόδοσης.....	73
3.1.1 Τύποι που χρησιμοποιήθηκαν	73
3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	74
3.2 Παρουσίαση ελέγχων	80
3.2.1 Έλεγχος για σπηλαίωση	80
3.2.2 Έλεγχος των πεδίων ροής.....	86
3.2.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες υδροστροβίλου	101
3.2.5 Έλεγχος λειτουργίας υδροστροβίλου με διαφορετικό αριθμό πτερυγίων	108
Κεφάλαιο 4 Συμπεράσματα και προτάσεις	111
Βιβλιογραφία.....	113

Πρόλογος

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της ροής σε υδροστροβίλο τύπου Deriaz. Για την επίτευξη του στόχου αυτού κατασκευάστηκε μοντέλο του υδροστροβίλου σε εμπορικό πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής όπου μελετήθηκαν διάφορες περιπτώσεις. Κριτήριο για την βέλτιστη λειτουργία υπήρξε ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης.

Η διάρθρωση της εργασίας έχει ως εξής:

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται εισαγωγικά στοιχεία για τους υδροστροβίλους, οι κατηγορίες τους, οι βασικές εξισώσεις, οι αρχές λειτουργίας, τα τρίγωνα ταχυτήτων και στοιχεία για την σπηλαίωση. Παραθέτονται μελέτες για τον σχεδιασμό υδροστροβίλων αντιδράσεως τύπου Francis. Γίνεται αναφορά στη διαδικασία επίλυσης του αντικειμένου μελέτης με χρήση προγράμματος CFD. Παρουσιάζονται τα στάδια της διαδικασίας επίλυσης, το μοντέλο τύρβης που επιλέχθηκε, η ανεξαρτησία της λύσης από το υπολογιστικό πλέγμα και οι οριακές συνθήκες.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται περιγραφή της επίλυσης του μεσημβρινού καναλιού λεπτομερώς. Υπολογίζεται το πεδίο ροής, οι πιέσεις και οι γωνίες ροής που οδηγούν στην χάραξη του πτερυγίου. Παρουσιάζονται παράμετροι σχεδιασμού του πτερυγίου. Ακολουθεί η περιγραφή της αριθμητικής τρισδιάστατης επίλυσης της ροής.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα. Γίνεται αξιολόγηση των διαγραμμάτων, έλεγχος για σπηλαίωση, σύγκριση των πεδίων ροής, έλεγχος της παραμένουσας συστροφής και του υδραυλικού βαθμού απόδοσης. Χαράσσονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας του δρομέα και ελέγχεται η συμπεριφορά του υδραυλικού βαθμού απόδοσης για διαφορετικό αριθμό πτερυγίων.

Τα τελικά συμπεράσματα συγκεντρώνονται στο κεφάλαιο 4, όπου γίνονται και προτάσεις για συνέχιση της έρευνας στην περιοχή αυτή.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά Στοιχεία Υδροστροβίλων

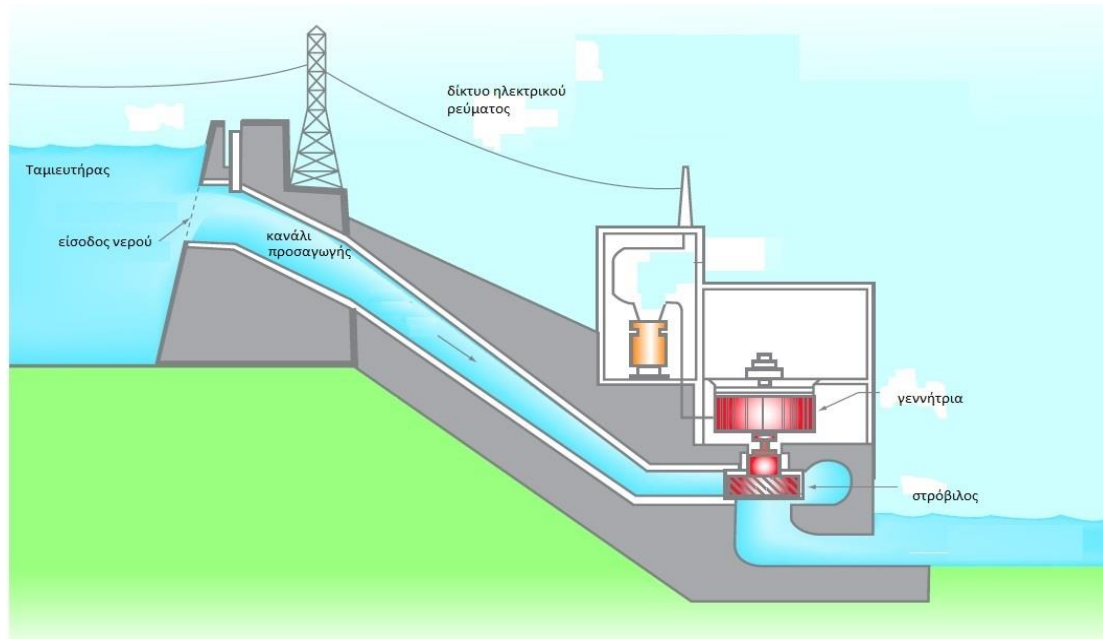
1.1.1 Εισαγωγή στους Υδροστροβίλους

Οι στροβιλομηχανές, είναι οι μηχανές στις οποίες πραγματοποιείται εναλλαγή ενέργειας, από μηχανική ενέργεια σε ενέργεια ρευστού και αντίστροφα, μέσω σταθερής ροής και περιστροφικής κίνησης.

Κατάταξη των στροβιλομηχανών γίνεται βάση το εργαζόμενο μέσο. Το εργαζόμενο μέσο μπορεί να είναι καυσάερα, αέρας ή νερό. Για κάθε περίπτωση ξεχωριστά η στροβιλομηχανή ονομάζεται είτε αεριοστρόβιλος είτε υδροστρόβιλος είτε αντλία. Ανάλογα με τη ροή ισχύος στις στροβιλομηχανές, εάν δηλαδή καταναλώνει ενέργεια ή παράγει μηχανικό έργο, χωρίζονται σε εργοστροβιλομηχανές και αντλίες ή υδροστροβίλους. Οι υδροστρόβιλοι είναι οι υδροδυναμικές μηχανές που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς μέσω της σύζευξης του υδροστροβίλου με ηλεκτρογεννήτρια.

Η υδραυλική ενέργεια του νερού είναι αυτή που είναι αποθηκευμένη σε κάποιο ύψος, σε έναν ταμιευτήρα. Αυτό είναι νερό βρόχινο ή νερό που αποθηκεύεται από ανάστροφα υδροηλεκτρικά έργα είτε ανεμογεννήτριες από αντλιοσταμίες. Η διαθέσιμη υδατική πτώση λοιπόν συμβολίζεται με $h = z_e - z_a$ όπου z_e το ύψος του άνω ταμιευτήρα και z_a το ύψος του κάτω ταμιευτήρα. Οι βαρυτικές δυνάμεις μαζί με την στατική πίεση συμβάλουν στην παραγωγή μηχανικού έργου. Η ολική ενέργεια στην είσοδο του υδροστροβίλου είναι συνάρτηση της υδραυλικής πτώσης μείον τις υδραυλικές απώλειες στον αγωγό προσαγωγής. Στην υπολογιζόμενη ενέργεια όμως πρέπει αφαιρούνται οι υδραυλικές απώλειες του αγωγού προσαγωγής του νερού στο κομμάτι του υδροστροβίλου. Άρα η διαθέσιμη υδραυλική ενέργεια είναι $H = h - \delta f$. Οι απώλειες δf είναι γραμμικές και είναι ανάλογες του τετραγώνου της παροχής $\delta f = kQ^2$. Η διαθέσιμη υδραυλική ισχύς υπολογίζεται από τον τύπο $N = \rho g Q H$, και είναι η ισχύς που δεν έχει αξιοποιηθεί ακόμα από τον υδροστρόβιλο. Υπεισέρχεται μετά ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου ο οποίος κυμαίνεται στο εύρος από 83% έως 94% για υδροστρόβιλο αντιδράσεως και από 82% έως 91% για υδροστρόβιλο δράσεως. Ο βαθμός απόδοσης και τα είδη των υδροστροβίλων αναλύονται παρακάτω.

Οι υδροστρόβιλοι είναι ένα μόνο κομμάτι ενός υδροηλεκτρικού έργου. Τα υδροηλεκτρικά έργα αποτελούνται από τα εξής μέρη. Το φράγμα που συγκεντρώνει το νερό, τον αγωγό προσαγωγής, τον σταθμό παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, τον αγωγό απαγωγής καθώς και μέρη που εξασφαλίζουν την καλή λειτουργία όπως υπερχειλιστη που ελέγχει την στάθμη του ταμιευτήρα, σήραγγα εκτροπής και εγκαταστάσεις συντήρησης.

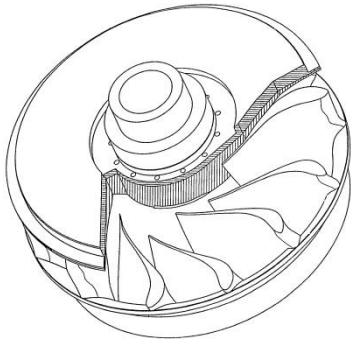


Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση υδροηλεκτρικού έργου.
(πηγή: <http://etrical.wordpress.com/power-generation/>)

Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται μία υδροηλεκτρική εγκατάσταση. Απεικονίζεται ο άνω και ο κάτω ταμιευτήρας καθώς και το κανάλι προσαγωγής του νερού. Το κανάλι προσαγωγής οδηγεί το νερό στο δρομέα και μέσω της ηλεκτρογεννήτριας παράγεται ηλεκτρικό έργο που παραλαμβάνεται από το τοπικό δίκτυο.

1.1.2 Περιγραφή και Τύποι Υδροστροβίλων

Για την παραγωγή μηχανικού έργου στον υδροστρόβιλο χρειάζεται η συμμετοχή του δρομέα. Ο δρομέας είναι το περιστρεφόμενο τμήμα της μηχανής που πραγματοποιείται η μετατροπή της ενέργειας του ρευστού σε μηχανική. Ανάλογα με την συμμετοχή του δρομέα, εάν είναι ολική η προσβολή του ή μερική, οι υδροστρόβιλοι κατατάσσονται σε αντιδράσεως και δράσεως. Οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως είναι ολικής προσβολής και η στατική πίεση της ροής μεταβάλλεται δια μέσου του δρομέα. Κατά την μετατροπή της ενέργειας συμμετέχει ολόκληρος ο δρομέας και κατά την διέλευση του ρευστού από αυτόν γίνεται εκμετάλλευση της πίεσης και της κινητικής ενέργειας του ρευστού. Στην περίπτωση των υδροστροβίλων δράσεως ο δρομέας λειτουργεί ισόθλιπτα και η μετατροπή της ενέργειας γίνεται υπό ατμοσφαιρική πίεση. Η συμμετοχή του δρομέα είναι μερική. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια στην έξοδο του ακροφυσίου.



Εικόνα 2. Δρομέας υδροστροβίλου αντιδράσεως Francis.

Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται ένας δρομέας υδροστροβίλου τύπου Francis. Στην τομή απεικονίζεται πως είναι διαμορφωμένα τα περύγια. Ο δρομέας είναι πακτωμένος στην πλήμνη και στην στεφάνη. Η εισροή του ρευστού γίνεται στην πλάγια ανοιχτή επιφάνεια.

Ο πιο γνωστός υδροστρόβιλος δράσεως είναι ο Pelton και χρησιμοποιείται συνήθως για μεγάλα υδραυλικά ύψη.

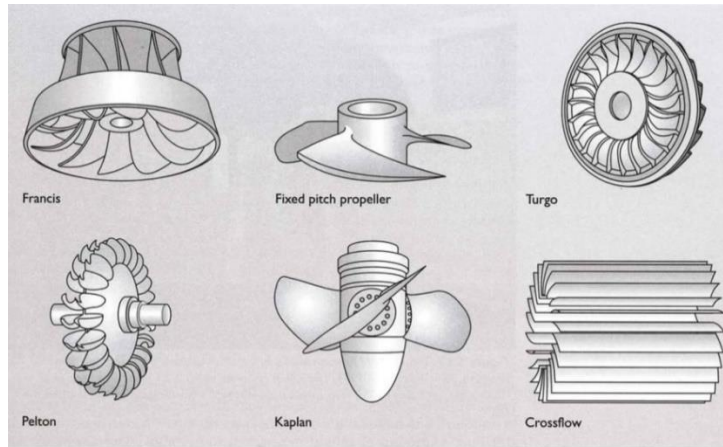
Υδροστρόβιλοι δράσεως

- Υδροστρόβιλος Pelton
- Υδροστρόβιλος Turgo
- Υδροστρόβιλος Banki ή Cross flow

Ο Pelton παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά. Δεσμεύει πλήρως την κινητική ενέργεια του ρευστού λόγω της διαμόρφωσης των σκαφιδίων ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες. Όσο μεγαλύτερη είναι η δέσμευση της ενέργειας τόσο αυξάνεται η απόδοση και αυτό σχετίζεται με τον αριθμό των σκαφιδίων. Πεδίο λειτουργίας του είναι το υδραυλικό ύψος από 30m έως 1500 m και παροχή από 0,01 m³/s έως 5 m³/s.

Ο Turgo είναι μία παραλλαγή του υδροστρόβιλου Pelton. Λειτουργεί σε υψηλότερες παροχές και σε χαμηλότερα υδραυλικά ύψη. Παρουσιάζει ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση. Στην πραγματικότητα ένας δρομέας Turgo είναι ένας δρομέας Pelton κομμένος στη μέση. Ο Turgo παρουσιάζει σταθερό υψηλό βαθμό απόδοσης σε όλο το εύρος λειτουργίας. Έχει υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής συνεπώς δεν χρειάζεται κιβώτιο ταχυτήτων για την σύζευξή του με την ηλεκτρογεννήτρια. Πεδίο λειτουργίας του είναι το υδραυλικό ύψος από 30 m έως 400 m και η παροχή από 0,02 m³/s έως 8 m³/s.

Ο Banki χρησιμοποιείται για μικρές υδραυλικές πτώσεις κάτω των 100m και παροχές από 0,04 m³/s έως 10 m³/s. Κατασκευάζεται για μικρές ισχύεις. Είναι απλός και οικονομικός και έχει σταθερή απόδοση σε όλο το εύρος λειτουργίας. Γενικότερα έχει χαμηλότερη απόδοση από τους υπόλοιπους υδροστρόβιλους της ίδιας κατηγορίας.



Εικόνα 3. Δρομείς υδροστροβίλων.

Στην εικόνα 3 απεικονίζονται δρομείς υδροστροβίλων διάφορων τύπων.

Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

- Υδροστρόβιλος Francis
- Υδροστρόβιλος Kaplan
- Υδροστρόβιλος Deriaz

Ο Francis έχει τις περισσότερες εγκαταστάσεις στον κόσμο. Περίπου το 70% με 80% των υδροηλεκτρικών έργων παγκοσμίως λειτουργούν με στρόβιλο Francis. Έχει υψηλή απόδοση η οποία όμως δεν διατηρείται σταθερή σε μεγάλο εύρος λειτουργίας παρά μόνο κοντά στο ονομαστικό σημείο σχεδίασης. Πεδίο λειτουργίας του είναι το υδραυλικό ύψος από 20 m έως 300 m και η παροχή από 0,15 m³/s έως 10 m³/s.

Ο Kaplan είναι μία εξέλιξη του Francis προκειμένου να γίνει δυνατή η παραγωγή ισχύος σε μεγάλες παροχές και μικρά μανομετρικά. Παρουσιάζει σταθερή απόδοση σε μεγάλο εύρος λειτουργίας. Πεδίο λειτουργίας του είναι το υδραυλικό ύψος μικρότερο από 50m και η παροχή από 0,5 m³/s έως 50 m³/s.

Ένας υδροστρόβιλος ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, που είναι το θέμα της διπλωματικής αυτής, είναι ο υδροστρόβιλος διαγώνιας ροής Deriaz. Ο Deriaz κατασκευάστηκε για πρώτη φορά το 1900. Το μεγάλο προτέρημά του είναι ότι μπορεί να έχει ρυθμιζόμενα πτερύγια δρομέα. Συνεπώς επιτρέπει στον στρόβιλο να εργάζεται με καλή απόδοση σε διαφορετικά φορτία και υδραυλικά ύψη. Ο Deriaz ενδείκνυται να λειτουργεί σε σταθμό με υδραυλικότητα που ποικίλει.

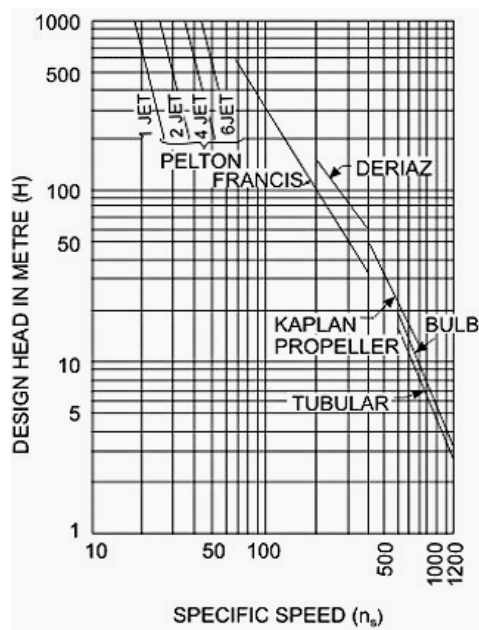


Εικόνα 4. Δρομέας στροβίλου Deriaz.
(πηγή: http://www.omos.cz/_de/turbinenmodelle/)

Στην εικόνα 4 παρουσιάζεται ο δρομέας ενός υδροστροβίλου Deriaz. Στην πλευρά της πλήμνης φαίνεται ο τρόπος ρύθμισης της γωνίας δρομέα.

Ο Deriaz μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ανάστροφα υδροηλεκτρικά έργα για υδραυλικά ύψη άνω των 90 μέτρων. Λειτουργεί ικανοποιητικά και ως αντλία. Υπάρχει σερβομηχανισμός που ρυθμίζει την γωνία του δρομέα. Γενικά είναι μια παραλλαγή του Kaplan που έχει ως σκοπό την λειτουργία σε μεγαλύτερα υδραυλικά ύψη από αυτόν. Η σπηλαιώση αποφεύγεται πιο εύκολα λόγω της προσαρμοσμένης κλίσης των πτερυγίων του δρομέα.

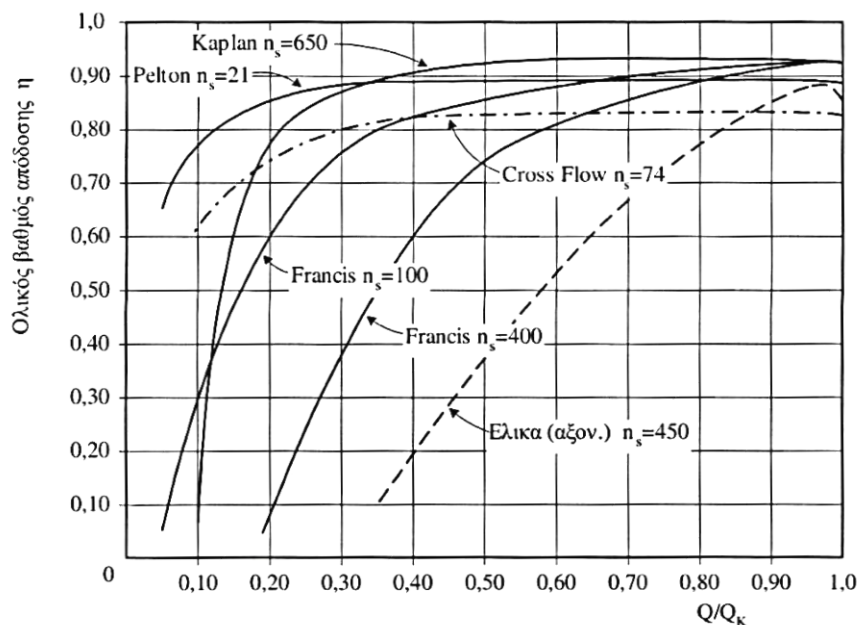
Η διαθέσιμη υδραυλική πτώση είναι κριτήριο για την επιλογή του υδροστροβίλου καθώς και εάν θα είναι ακτινικής και μεικτής ροής ή αξονικής ροής. Βλέπουμε παρακάτω τους χάρτες επιλογής υδροστροβίλων ανάλογα με το διαθέσιμο ύψος καθώς και έναν χάρτη για το πώς ποικίλει η απόδοση του στροβίλου σε σχέση με την παροχή.



Εικόνα 5. Χάρτης επιλογής υδροστροβίλου σύμφωνα με τον ειδικό αριθμό στροφών και το διαθέσιμο ύψος.

(πηγή: electrical-engineering-portal.com/)

Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται χάρτης επιλογής υδροστροβίλου με βάση το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος. Στον συγκεκριμένο χάρτη ο Deriaz προτείνεται για υδραυλικό ύψος από 60 μέτρα έως 150 μέτρα. Ο ειδικός αριθμός στροφών στο εν λόγω εύρος λειτουργίας είναι από 200 έως 400.



Εικόνα 6. Χάρτης διακύμανσης απόδοσης στροβίλων σε σχέση με την παροχή λειτουργίας. (πηγή: «Μικρά υδροηλεκτρικά έργα», (2008) Παπαντώνης Δ.Ε.)

Στην εικόνα 6 παρουσιάζεται ο ολικός βαθμός απόδοσης των υδροστροβίλων. Παρατηρείται ότι σε μεγάλες παροχές ο βαθμός απόδοσης σε όλους του υδροστροβίλους δεν έχει τόσο μεγάλη διακύμανση όπως σε μικρότερες.

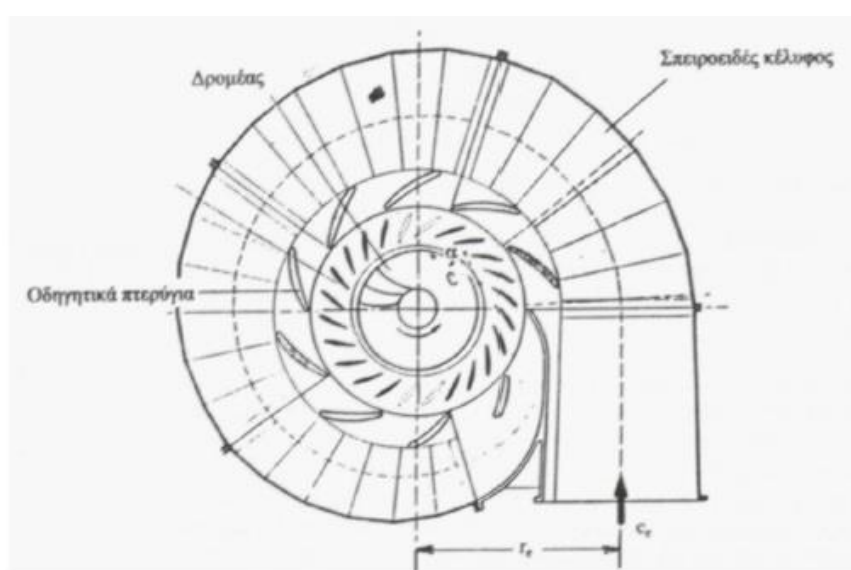
Σημαντικά πλεονεκτήματα του Deriaz είναι ότι στην περίπτωση αναστρέψιμης μονάδας έχει πλεονέκτημα ως αντλία σε σχέση με τον Francis, ιδιαίτερα όταν η υψομετρική διαφορά μεταβάλλεται και όταν το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος δεν ξεπερνά τα 150m. Η τιμή παραμέτρου σπηλαίωσης είναι έως και 20% μικρότερη από αυτήν του Kaplan καθώς στο ίδιο ποσοστό κυμαίνεται και η ταχύτητα φυγής με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη δέσμευση ενέργειας στον Deriaz, άρα και μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Λόγω της κωνικής πλήμνης είναι απλούστερη η ρύθμιση των περυγίων. Συμπέρασμα είναι ότι ο στροβίλος Deriaz έχει πλεονεκτήματα απέναντι στους άλλους υδροστροβίλους. Δεν βρίσκει όμως τόσο μεγάλη εφαρμογή εφόσον στις μεγάλες υδραυλικές πτώσεις προτιμάται ο υδροστροβίλος Francis.

1.1.3 Μέρη Υδροστροβίλων

Τα μέρη που αποτελείται ένας υδροστροβίλος είναι τα εξής[2]: τμήμα εισόδου, δρομέας, τμήμα εξόδου. Γίνεται αναφορά ποια είναι η λειτουργία στο κάθε ένα από αυτά.

Το τμήμα εισόδου όπως απεικονίζεται στην εικόνα 7, είναι ένας αγωγός κυκλικής διατομής ο οποίος έχει ως σκοπό να εξασφαλίζει ομοιόμορφες συνθήκες ροής και ομοιόμορφη τροφοδοσία δρομέα και ένα σπειροειδές κέλυφος με διατομή που μειώνεται κατά την περιφερειακή διεύθυνση. Επίσης προσδίδει στο υγρό την αρχική συστροφή του. Είναι το μεγαλύτερο τμήμα ενός υδροστροβίλου, επίσης είναι στιβαρή κατασκευή για να αντέχει την στατική πίεση που είναι μεγαλύτερη από όλα τα υπόλοιπα μέρη.

Στο τμήμα εισόδου περιλαμβάνεται η στεφάνη των οδηγητικών πτερυγίων και των ρυθμιστικών πτερυγίων. Τα οδηγητικά πτερύγια συμβάλλουν στο να μειώνονται οι διαστάσεις του αγωγού ο οποίος κατασκευάζεται με μεγαλύτερη γωνία σπείρας ώστε να συνεισφέρει μεγαλύτερη συστροφή στο υγρό. Η στεφάνη των οδηγητικών πτερυγίων αφαιρεί την επιπλέον τιμή συστροφής χωρίς τον κίνδυνο της αποκόλλησης της ροής. Κατασκευάζεται συνήθως ενιαία.

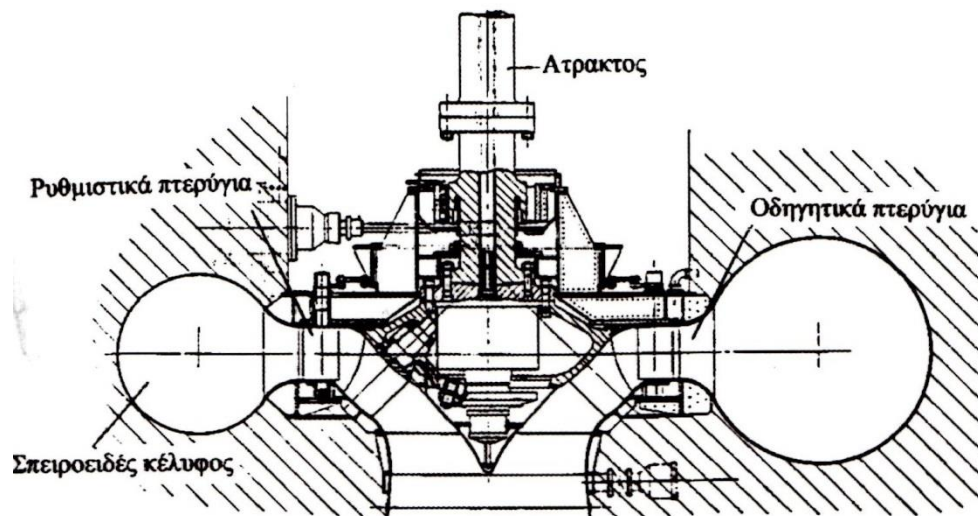


Εικόνα 7. Το σπειροειδές κέλυφος με τα οδηγητικά πτερύγια.

(πηγή: «Υδροδυναμικές μηχανές, αντλίες –υδροστρόβιλοι»,(2009) Παπαντώνης Δ.Ε.)

Τα ρυθμιστικά πτερύγια μπορούν να αλλάξουν γωνία μέσω της ρυθμιστικής στεφάνης που τα συγκρατεί. Μέσω της περιστροφής των ρυθμιστικών πτερυγίων ρυθμίζεται, εκτός από την γωνία της απόλυτης ταχύτητας και η παροχή άρα και η ισχύς για σταθερή ταχύτητα περιστροφής και υδραυλικό ύψος. Συνεπώς η ρυθμιστική στεφάνη είναι όργανο ρύθμισης του υδροστροβίλου. Τα ρυθμιστικά πτερύγια επίσης έχουν ζυγό αριθμό έτσι ώστε να υπάρχει άξονας συμμετρίας κατά ένα μεσημβρινό επίπεδο. Σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε αν υπάρχει ανάγκη μηδενισμού της παροχής για παύση της λειτουργίας της μονάδας, να μπορούν να εφάπτονται μεταξύ τους σε κλειστή θέση.

Ο δρομέας, είναι το τμήμα που εναλλάσσεται η ενέργεια, από ενέργεια ρευστού σε μηχανική περιστρεφόμενη ενέργεια. Τα πτερύγια είναι πακτωμένα στην στεφάνη του υδροστροβίλου και στην πλήμνη. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην στήριξη του δίσκου της στεφάνης διότι αναπτύσσονται ιδιαίτερα μεγάλες δυνάμεις από την ροή στα πτερύγια. Παρουσιάζονται στην εικόνα 8 τα τμήματα ενός στροβίλου τύπου Deriaz. Ο αριθμός των πτερυγίων είναι περιττός για την αποφυγή συντονισμού και ταλαντώσεων.



Εικόνα 8. Απεικόνιση των στοιχείων του υδροστρόβιλου.
(πηγή: «Υδροδυναμικές μηχανές, αντλίες –υδροστρόβιλοι»,(2009) Παπαντώνης Δ.Ε.)

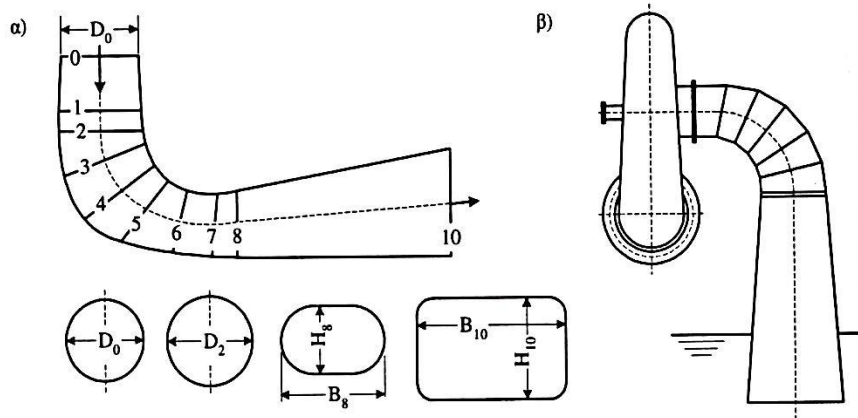
Το τμήμα εξόδου, ή αγωγός απαγωγής οδηγεί το ρευστό στον τελικό του προορισμό, τον κάτω ταμιευτήρα. Στην διατομή εξόδου το ενεργειακό περιεχόμενο που φεύγει αναξιοποίητο είναι η απόλυτη ταχύτητα και είναι της τάξης των 6 έως 10 m/s. Αυξάνοντας όμως σταδιακά την διατομή του αγωγού απαγωγής το ρευστό επιβραδύνει. Επιθυμητή ταχύτητα εξόδου είναι της τάξης του 1 έως 2,5 m/s. Η αύξηση της διατομής γίνεται με προσοχή για την αποφυγή της αποκόλλησης της ροής στο αποκλίνων τμήμα καθώς και την αποφυγή σπηλαιώσης.

Υπάρχουν κωνικού τύπου, απλού γωνιακού τύπου και γωνιακού τύπου τετραγωνικής διατομής αγωγοί απαγωγής του ρευστού. Στην εικόνα 9 απεικονίζονται δύο διαφορετικοί τύποι αγωγού απαγωγής.

Οι κωνικού τύπου αγωγοί απαγωγής έχουν γωνία κώνου μέχρι 7° για την αποφυγή της αποκόλλησης της ροής. Κυρίως χρησιμοποιούνται για στρόβιλο τύπου Francis και για χαμηλή σχετική ταχύτητα.

Οι γωνιακοί αγωγοί απλού τύπου χρησιμοποιούνται όταν ο στρόβιλος τοποθετείται πολύ κοντά στο κανάλι που οδηγεί τον υγρό στον κάτω ταμιευτήρα. Βοηθά στο να μειώνεται το κόστος εξακαψής και διαθέτει μεγάλη διάμετρο στην έξοδο του για τους λόγους που έχουμε προαναφέρει.

Οι γωνιακοί αγωγοί τετραγωνικής διατομής πέραν της τετραγωνικής διατομής δεν διαφέρουν από την παραπάνω περίπτωση του απλού τύπου.



Εικόνα 9. Αγωγοί απαγωγής για υδροστρόβιλο κατακόρυφου άξονα αριστερά και οριζοντίου άξονα δεξιά.

(πηγή: «Υδροδυναμικές μηχανές, αντλίες –υδροστρόβιλοι»,(2009) Παπαντώνης Δ.Ε.)

Η σπηλαιώση που μπορεί να παρουσιαστεί είναι σημαντικό να ελεγχθεί και στον αγωγό απαγωγής. Η σπηλαιώση συμβαίνει όταν η τοπική στατική πίεση μειώνεται πιο κάτω από την πίεση κορεσμού του νερού στην συγκεκριμένη θερμοκρασία. Εφαρμόζοντας την εξίσωση Bernoulli από την έξοδο του δρομέα ως την έξοδο του αγωγού αποφυγής έχουμε την παρακάτω σχέση.

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} + z_3 \quad 1.1$$

Η παραπάνω σχέση μετασχηματίζεται όπως παρακάτω.

$$\frac{P_2}{\rho g} = - \left[\Delta z + \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} \right] \quad 1.2$$

Αγνοώντας τις υδραυλικές απώλειες που υπάρχουν στον αγωγό απαγωγής, με z_2 στάθμη της εξόδου του δρομέα, με z_3 το ύψος του αγωγού απαγωγής και τις πιέσεις και τις ταχύτητες στα ίδια σημεία βλέπουμε ότι εφόσον η ταχύτητα V_3 είναι πάντα μικρότερη από την V_2 βλέπουμε ότι η πίεση P_2 είναι πάντα αρνητική. Άρα το ύψος τοποθέτησης του αγωγού αποφυγής παίζει σημαντικό ρόλο στην αποφυγή της σπηλαιώσης.

Τα τμήματα λοιπόν που παίζουν σημαντικό ρόλο στην μετατροπή της ενέργειας ήταν τα παραπάνω. Κατασκευαστικά στοιχεία όπως κελύφη και στυπιοθλίπτες προσφέρουν την στεγανότητα της κατασκευής. Η ισχύς μεταφέρεται μέσω της ατράκτου και την παραλαβή των δυνάμεων την κάνουν ωστικά έδρανα.

1.1.4 Ενεργειακός Ισολογισμός – Γενικές Εξισώσεις

Η ολική ενέργεια του ρευστού που εισέρχεται στον υδροστρόβιλο από την εξίσωση που διατύπωσε ο Bernoulli δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$E = \frac{c^2}{2} + \frac{P}{\rho} + U + gz. \quad 1.3$$

Η συγκεκριμένη εξίσωση συμπεριλαμβάνει την ενεργειακή στάθμη του ρευστού λόγω της κινητικής του ενέργειας, λόγω της εντατικής του κατάστασης, λόγω της εσωτερικής του ενέργειας και λόγω των βαρυτικών δυνάμεων. Συμπεραίνουμε ότι η συναλλαγή της ενέργειας πριν και μετά την διατομή του δρομέα είναι η διαφορά των ολικών ενεργειών του ρευστού.

$$E_e - E_a \pm \delta E = \left(\frac{c_e^2}{2} + \frac{P_e}{\rho} + U_e + gz_e \right) - \left(\frac{c_a^2}{2} + \frac{P_a}{\rho} + U_a + gz_a \right) \quad 1.4$$

(με **e** θα συμβολίζουμε μία κατάσταση πριν την στροβιλομηχανή με **a** μετά από αυτήν)

Στους υδροστροβίλους όμως και γενικότερα στις υδροδυναμικές μηχανές δεν υπάρχει έντονη συναλλαγή θερμότητας όπως π.χ. στους αεροστροβίλους, άρα ο όρος της δE παραλείπεται διότι συμβολίζει την μεταφορά της ενέργειας μέσω ακτινοβολίας και μέσω αγωγιμότητας ή συναγωγιμότητας. Επίσης εφόσον η θερμοκρασία είναι σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της διεργασίας ο όρος της εσωτερικής ενέργειας από την παραπάνω εξίσωση πάντα θα φεύγει.

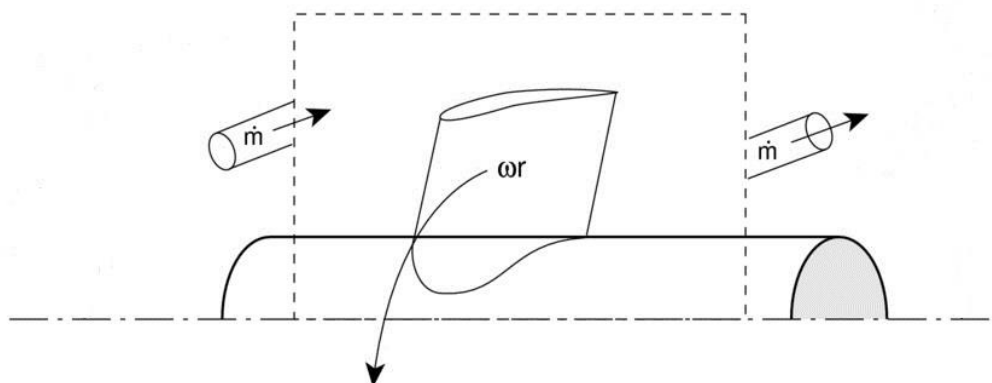
Η θεωρητική ισχύς του στροβίλου δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$N = \dot{m}(E_e - E_a) \quad 1.5$$

$$\text{ή} \quad N = \rho g Q (H_{oe} - H_{oa}) = Q (P_{oe} - P_{oa}) \quad 1.6$$

Σαφώς η πραγματική ισχύς του στροβίλου μειώνεται σύμφωνα με τις ενεργειακές απώλειες που οφείλονται κατά κύριο λόγο σε μηχανικές τριβές στα έδρανα και στις απώλειες τριβών της ροής δια μέσω του υδροστροβίλου.

Πρώτος διατύπωσε την θεμελιώδη εξίσωση των στροβιλομηχανών ο Leonard Euler το 1754 και βασιζόμενος σε αυτήν έφτιαξε τον πρώτο υδροστρόβιλο αντιδράσεως.



Εικόνα 10. Απεικόνιση του συστήματος ρευστό – στρόβιλος.

Με την εφαρμογή της αρχής της διατήρησης της στροφορμής βλέπουμε ότι η ροπή M που εμφανίζεται στον στρόβιλο ανηγμένη στην μονάδα της μάζας του ρευστού που εργάζεται ανά δευτερόλεπτο είναι ίση με την μεταβολή της συστροφής του εργαζόμενου μέσου στην είσοδο και στην έξοδο του δρομέα.

$$M_u = cu_e r_e - cu_a r_a \quad 1.7$$

Η εξίσωση αυτή συνδέει την συναλλασσόμενη ενέργεια στον όγκο ελέγχου με τα χαρακτηριστικά στοιχεία ενός περιστρεφόμενου δρομέα.

Η εξίσωση ισχύει είτε περιστρέφεται ο δρομέας είτε όχι. Δηλαδή σε μία ρυθμιστική στεφάνη υπάρχει άεργη μεταβολή της συστροφής. Η μεταβολή της συστροφής του εργαζόμενου μέσου από την άλλη, γίνεται μέσω των διαμορφωμένων διόδων ανάμεσα σε δύο πτερύγια. Εάν η ροπή λοιπόν είναι θετική τότε έχουμε υδροστρόβιλο, εάν η ροπή είναι αρνητική έχουμε περίπτωση αντλίας.

Η ισχύς που αναπτύσσεται στην άτρακτο η οποία εκφράζει τον ρυθμό μετατροπής της ενέργειας σε μηχανικό έργο είναι η ροπή πολλαπλασιασμένη με την περιστροφική ταχύτητα της ατράκτου. Ο όρος N_u ονομάζεται περιφερειακή ισχύς.

$$N_u = M_u \omega \quad 1.8$$

Αυτός ο τύπος στην ουσία έχει προκύψει από το θεώρημα της διατήρησης της ροπής της ορμής. Ο ισολογισμός δηλαδή των ροπών των δυνάμεων και των ροπών της ορμής. Στον δρομέα καθώς και στην πλήμνη που είναι πακτωμένα τα πτερύγια δημιουργείται κινητήρια ροπή στρέψεως στην περίπτωση του υδροστρόβιλου. Τα πεδία ταχυτήτων που σχηματίζονται από την ροή του ρευστού δια μέσω του δρομέα σχηματίζουν επίσης διανομές στατικών πιέσεων οι οποίες εφαρμόζουν στοιχειώδεις δυνάμεις σε σημεία του δρομέα άρα ροπές στον άξονα περιστροφής της μηχανής. Η ολοκλήρωση τους λοιπόν μας δίνει την αναπτυσσόμενη ροπή.

Σημαντικές παρατηρήσεις είναι ότι δεν χρειάζεται να είναι γνωστό το πεδίο ροής μέσα στον δρομέα φτάνει να είναι γνωστή η συστροφή του ρευστού στην είσοδο και την έξοδο. Επίσης ισχύουν οι εξισώσεις είτε για ιδεατό ρευστό είτε για συνεκτικό.

Σε αυτήν την αρχή βασίστηκε ο πρώτος υδροστρόβιλος αντίδρασης, στις θεμελιώδεις αρχές που έθεσε ο Euler. Ο παραπάνω τύπος εκφράζεται και με τον παρακάτω τρόπο.

$$N_u = \rho g Q_u H_u \quad 1.9$$

Συνδυάζοντας την εξίσωση της περιφερειακής ροπής με τον παραπάνω τύπο έχουμε την εξίσωση H_u που μας εκφράζει το θεωρητικό ύψος όπου ο δρομέας μπορεί να μετατρέψει σε μηχανική ενέργεια.

$$H_u = cu_e u_e - cu_a u_a \quad 1.10$$

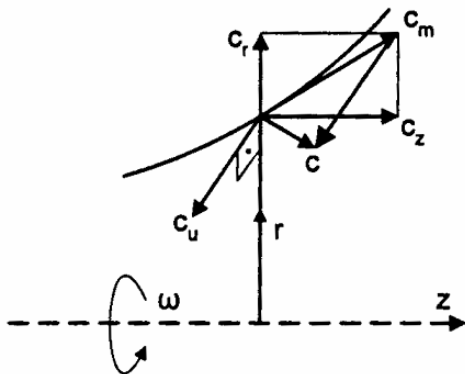
Σημαντική παρατήρηση είναι ότι από την εξίσωση βλέπουμε καθαρά ότι εάν μηδενίσουμε την συστροφή στην διατομή εξόδου του υδροστρόβιλου προβαίνουμε σε μείωση της απόλυτης ταχύτητας στην έξοδο με σκοπό την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών λόγω της κινητικής ενέργειας του ρευστού, άρα ο παρακάτω τύπος:

$$H_{ud} = cu_e u_e \quad 1.11$$

Είναι το σημείο σχεδίασης που βρίσκεται στη γειτονιά του μέγιστου βαθμού απόδοσης.

1.1.5 Τρίγωνα Ταχυτήτων

Αρχικά για την επεξήγηση ενός τριγώνου ταχύτητας ορίζεται ένα πολικό σύστημα συντεταγμένων όπως στην εικόνα 11. Παρατηρώντας το μεσημβρινό κανάλι ροής, όπως παρακάτω, ορίζονται σε ένα στοιχείο του ρευστού τρεις συνιστώσες. Η ακτινική c_r , η αξονική c_z και η περιφερειακή συνιστώσα c_u όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 11. Επίσης η εφαπτόμενη ταχύτητα στην μεσημβρινή τομή του καναλιού συμβολίζεται με c_m και είναι η μεσημβρινή συνιστώσα.



Εικόνα 11. Συνιστώσες των ταχυτήτων.

(πηγή: «Υδροδυναμικές μηχανές, αντλίες –υδροστρόβιλοι»,(2009) Παπαντώνης Δ.Ε.)

Το διάνυσμα της ταχύτητας θα είναι:

$$\vec{c} = \vec{i}_r c_r + \vec{i}_z c_z + \vec{i}_u c_u \quad 1.12$$

Οι ακτινικές και αξονικές συνιστώσες εκφράζουν την c_m όπως φαίνεται στον παραπάνω σχήμα και να σχηματίζουν τον παρακάτω τύπο.

$$c_m = \vec{i}_r c_r + \vec{i}_z c_z \quad 1.13$$

Οπότε το διάνυσμα της ταχύτητας μπορεί να αναλυθεί επίσης όπως παρακάτω.

$$c = \vec{i}_m c_m + \vec{i}_u c_u \quad 1.14$$

Η ταχύτητα του ρευστού εκφράζεται και μέσω του σχετικού διανύσματος \vec{w} , αναφερόμενη σε ένα σύστημα συντεταγμένων που περιστρέφεται μαζί με το δρομέα. Η γωνιακή ταχύτητα της μηχανής $\vec{\omega} = \vec{\omega} * \vec{i}$ οπότε η σύνθεση των ταχυτήτων δίνουν την απόλυτη ταχύτητα της ροής $\vec{c} = \vec{w} + \vec{u}$. Συνεπώς το τρίγωνο ταχύτητας είναι ένα διανυσματικό τρίγωνο, που στην ουσία δίνει πληροφορίες ουσιαστικές για την ροή του ρευστού.

Η μελέτη των τριγώνων έχει πρακτικό ενδιαφέρον κατά την σχεδίαση των πτερυγίων του δρομέα. Γίνεται χρήση των τριγώνων εισόδου και εξόδου, πριν την είσοδο του ρευστού στο δρομέα καθώς και κατά την έξοδο του από αυτόν.

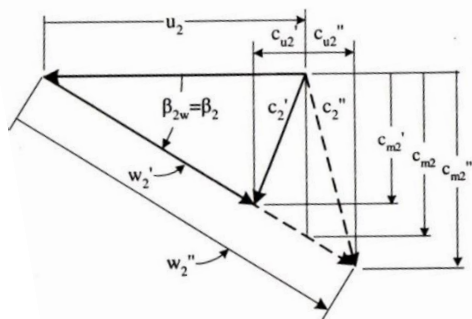
Επίσης οι κλίσεις των ταχυτήτων \vec{c} και \vec{w} χαρακτηρίζονται με α και β αντίστοιχα και υπολογίζονται από την αντίστοιχη περιφερειακή συνιστώσα \vec{u} . Η γωνία α είναι στην ουσία η γωνία που επιβάλλουν στην ροή τα ρυθμιστικά πτερύγια, δηλαδή η κλίση των πτερυγίων. Η γωνία β_w είναι η γωνία που έχει η ροή όταν εισρέει στον δρομέα και β η γωνία του πτερυγίου. Η ελάχιστη διαφορά σε αυτές τις γωνίες μειώνει τις απώλειες κρούσης.

Για κάθε τιμή παροχής είναι δυνατόν να χαραχθεί ένα ξεχωριστό τρίγωνο ταχυτήτων εφόσον ισχύει ο παρακάτω τύπος.

$$c_{m1} = \frac{Q_u}{\pi D_1 b_1} \quad 1.15$$

Για δεδομένη δηλαδή ταχύτητα περιστροφής παρατηρείται ότι η μεσημβρινή ταχύτητα εξαρτάται από την παροχή του καναλιού.

Στο τρίγωνο εξόδου ισχύει το ίδιο. Επίσης η γωνία εξόδου της ροής από το δρομέα β_{2w} είναι ίση με την β_2 γωνία των πτερυγίων. Εφόσον υπάρχει σταθερή ταχύτητα περιστροφής παρατηρείται ότι η παροχή πλέον καθορίζει τις ταχύτητες.



Εικόνα 12. Τρίγωνο εξόδου.
(πηγή: «Υδροδυναμικές μηχανές, αντλίες –υδροστρόβιλοι»,(2009) Παπαντώνης Δ.Ε.)

Από τον παρακάτω τύπο της περιφερειακής συνιστώσας της ταχύτητας στην έξοδο προκύπτει το τρίγωνο εξόδου για διάφορες τιμές παροχής και τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Εάν η παροχή Q_u είναι ίση με την παροχή Q_{ud} τότε η παροχή Q_u είναι στο σημείο σχεδίασης με μηδενική συστροφή του ρευστού κατά την έξοδο και ελάχιστη κινητική ενέργεια.

Εάν ισχύει για τις παροχές $Q_u > Q_{ud}$ η συστροφή του ρευστού θα είναι αρνητική και θα βγει το ρευστό με ταχύτητα αντίθετης φοράς από αυτής του δρομέα.

Εάν ισχύει για τις παροχές $Q_u < Q_{ud}$ το ρευστό να μην θα βγει με φορά περιστροφής ίδια με

αυτήν του δρομέα αλλά και η διαφορά των παροχών θα διαφέρει ανάλογα με το πόσο διαφέρει το μέτρο της συστροφής.

1.1.6 Ειδικός αριθμός στροφών

Για συγκεκριμένη παροχή Q_k και συγκεκριμένο ύψος διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H_k εκτιμάται ο ειδικός αριθμός στροφών. Ο ειδικός αριθμός στροφών n_s εκφρασμένος ως προς την ισχύ είναι συναρτήσεως μόνο του H_k . Τα διαγράμματα που με αναλυτικές μεθόδους έχουν δημιουργηθεί δίνουν μια πρώτη εκτίμηση, όμως η συγκεκριμένη τιμή διαφέρει εφόσον ο αριθμός των στροφών του στροβίλου εξαρτάται και από τις σύγχρονες στροφές της ηλεκτρογεννήτριας.

Επίδραση ειδικού αριθμού στροφών σε χαρακτηριστική του υδροστροβίλου.

Επίδραση στις διαστάσεις. Σε συγκεκριμένο υδραυλικό ύψος η τιμή της περιφερειακής συνιστώσας της ταχύτητας U εξαρτάται λίγο από τον ειδικό αριθμό στροφών. Άρα η ταχύτητα U μένει σταθερή, δηλαδή οι στροφές του υδροστροβίλου είναι προσεγγιστικά αντιστρόφως ανάλογες του δρομέα του υδροστροβίλου. Συνεπώς ο μικρός ειδικός αριθμός στροφών σημαίνει μικρότερος δρομέας, μικρότερο έργο άρα μικρότερο κόστος.

Επίδραση στον βαθμό απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης αυξάνει όσο αυξάνει ο ειδικός αριθμός στροφών. Στην αρχή είναι μειωμένος λόγω των ογκομετρικών απωλειών λαβυρίνθου και απώλειες στρεφόμενου δίσκου. Όταν φτάσει στο μεγαλύτερο σημείο του μετά μειώνει αυξανόμενου του n_s για τις υδραυλικές απώλειες στον δρομέα και τον αγωγό απαγωγής.

Επίδραση στο ύψος τοποθέτησης. Αυξανόμενου του ειδικού αριθμού στροφών για υδροστροβίλους αντίδρασης αυξάνει το βάθος τοποθέτησης προς αποφυγή της σπηλαίωσης.

Επίδραση στην ταχύτητα φυγής. Η επίδραση του ειδικού αριθμού στροφών στην ταχύτητα φυγής είναι πολύ μεγάλη ειδικά στο στροβίλο ενδιαφέροντος. Μεγάλος n_s σημαίνει μεγάλη ταχύτητα φυγής n_e οπότε έχουμε αυξημένη τάση στον ρότορα της γεννήτριας άρα αυξημένο κόστος για την εξασφάλιση μηχανικής αντοχής.

Επίδραση στο εύρος λειτουργίας. Ο ειδικός αριθμός στροφών εκφράζει επίσης και την δυνατότητα προσαρμογής του στροβίλου σε μεταβολές παροχής και υδραυλικού ύψους.

1.1.7 Βαθμός Απόδοσης

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης ενός υδροστροβίλου έχει τρεις συνιστώσες. Όπου και εφαρμόζονται στην θεωρητική σχέση ισχύος και δίνουν την πραγματική. Ο όρος $N=M\omega$ είναι η πραγματική ισχύς της μηχανής στον άξονα. Η θεωρητική ισχύς είναι η $N_i=ρgQH$ που προκύπτει από την διαθέσιμη υδραυλική πτώση όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Οι βαθμοί απόδοσης είναι οι παρακάτω

- Μηχανικός βαθμός απόδοσης
- Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης
- Υδραυλικός βαθμός απόδοσης

Μηχανικός βαθμός απόδοσης

Όπως σε κάθε στρεφόμενη μηχανή οι τριβές που πρέπει να υπερνικηθούν για να περιστραφεί ο άξονας καταναλώνουν συγκεκριμένη ισχύ όπου εκφράζονται με τον όρο Nm. Αυτός ο όρος περιλαμβάνει τις απώλειες στις εδράσεις και τις απώλειες στρεφόμενου δίσκου. Οι απώλειες στα έδρανα συμβολίζονται N_E και οι απώλειες στρεφόμενου δίσκου με N_S . Οι N_S είναι οι απώλειες που αναπτύσσονται στο εξωτερικό μέρος της πλήμνης και της στεφάνης του υδροστροβίλου λόγω της συνεκτικότητας του υγρού.

Η καθαρή μηχανική ισχύς λοιπόν που αποδίδεται στον άξονα είναι:

$$N = N_u - N_m \quad 1.16$$

και ο n_m είναι

$$n_m = \frac{N}{N_u} \quad 1.17$$

Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης

Οι ογκομετρικές απώλειες ενός υδροστροβίλου οφείλονται στο ότι μέρος της παροχής δQ λόγω της διαμόρφωσης του υδροστροβίλου δεν καταφέρνει να περάσει μέσω του δρομέα και διαρρέει από τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες γύρω του, τον λαβύρινθο. Ουσιαστικά ο λαβύρινθος είναι μία εντοπισμένη αντίσταση που καταναλώνει ωφέλιμη ισχύ. Ο λαβύρινθος σχεδιάζεται με βάση τον επιθυμητό ογκομετρικό βαθμό απόδοσης και οικονομοτεχνικά κριτήρια.

$$n_Q = \frac{Q_u}{Q} \quad 1.18$$

Υδραυλικός βαθμός απόδοσης

Το H_u είναι το θεωρητικό ύψος του δρομέα δηλαδή η ανά μονάδα μάζας ενέργεια του ρευστού που μετατρέπεται σε μηχανικό έργο εκφρασμένο σε μέτρα στήλης νερού. Το H είναι η ανα μονάδα μάζας ενέργεια της υδραυλικής πτώσεως συν την κινητική ενέργεια $\frac{C_a^2}{2g}$ που διαφεύγει. Από την εξίσωση Bernoulli παρατηρείτε ότι μεταξύ της διατομής εισόδου και εξόδου του δρομέα ισχύει η σχέση $H_u = H - \frac{C_a^2}{2g} - \delta h_{fea}$ δηλαδή ο τύπος αυτός εκφράζει την υδραυλική ενέργεια που μετατρέπεται σε μηχανική μόνο χωρίς τις απώλειες της κινητικής ενέργειας στην έξοδο του αγωγού διαφυγής και τις τριβές στο εσωτερικό του δρομέα.

Οι υδραυλικές απώλειες δh_{fea} χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στις υδραυλικές απώλειες ροής δh_τ και τις υδραυλικές απώλειες κρούσης δh_α . Επίσης εξαρτώνται από το σημείο λειτουργίας.

Οι απώλειες τριβής είναι οι εντοπισμένες και οι γραμμικές απώλειες κατά μήκος των γραμμών ροής του ρευστού που διαρρέει τον δρομέα. Ισχύει ο τύπος $\delta h_\tau = \zeta_\tau Q^2$ και εφόσον ο ζ_τ όρος είναι σταθερός στην τυρβώδη περιοχή και μειώνεται όσο μειώνεται η τιμή της

αδιάστατης παραμέτρου Re , εξαρτάται από το τετράγωνο της παροχής. Αυτό συμβαίνει όταν αυξάνει το μέγεθος της μηχανής άρα και ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης αυξάνει αντίστοιχα.

Οι απώλειες κρούσεως είναι αυτές που οφείλονται στην διαφορά της γωνίας πρόσπτωσης της ροής στα πτερύγια του υδροστροβίλου σε σχέση με την γωνία πτερυγίων. Οι απώλειες κρούσεως είναι σημαντικές μόνο στα πτερύγια του δρομέα και όχι στα ρυθμιστικά πτερύγια διότι εκεί η ροή είναι επιταχυνόμενη. Γενικά για κάθε γωνία πτερυγίων υπάρχει μία παροχή Q_{opt} για την οποία η ροή γίνεται χωρίς κρούση. Για διαφορετικές τιμές της παροχής από αυτήν υπάρχουν απώλειες κρούσης και υπάρχει ενδεχόμενο αποκόλλησης της ροής.

Εκφράζονται δε από τον τύπο $\delta h_a = k \left(\frac{W_c^2}{2g} \right)$ όπου ο συντελεστής k παίρνει τις τιμές από 0,50 έως 0,90 και W_c είναι η διαφορά της σχετικής συνιστώσας της ταχύτητας με την σχετική ταχύτητα με κλίση ίση με την γωνία πτερυγίων.

Συνοψίζοντας ο συνολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου είναι το γινόμενο όλων των παραπάνω βαθμών απόδοσης και αναλυτικά γράφεται όπως παρακάτω.

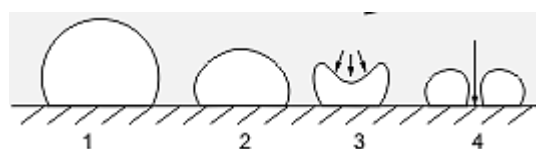
$$n = n_m n_q n_h \quad 1.19$$

και ισχύει για την ισχύ

$$N = n_m N_u = n_m \rho g (n_q Q) (n_h H) = n_m n_q n_h N_i \quad 1.20$$

1.1.8 Το φαινόμενο της σπηλαιώσης

Το φαινόμενο της σπηλαιώσης εμφανίζεται συνήθως στα πτερύγια του δρομέα στην πλευρά της χαμηλής πίεσης, αφού εκεί η πίεση έχει μικρότερες τιμές. Μπορεί όμως να δημιουργηθεί και στην είσοδο του δρομέα εκεί όπου η στατική πίεση μπορεί να πέσει κάτω από την p_s πίεση ατμοποίησης. Κατά την σπηλαιώση δύναται να αναπτυχθεί θύλακας ατμού. Στον θύλακα ατμού λοιπόν διατηρείται η πίεση ατμοποίησης και εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία του υγρού. Κατάντι του θύλακα ατμού η στατική πίεση είναι μεγαλύτερη οπότε ο ατμός τείνει να επαναυγροποιηθεί. Μετά από μία μεταβατική διαφασική περιοχή όπου συνυπάρχει ο ατμός με το υγρό, και περιοχή του ατμού καλείται να καλυφθεί. Λόγω όμως της σημαντικότητας διαφοράς πυκνοτήτων ατμού και υγρού και τον μικρό όγκο ατμού κατά την επαναυγροποίηση της φυσαλίδας σχηματίζεται ένα κενό που καλύπτεται πολύ γρήγορα από το περιβάλλον υγρό. Επίσης πολύ γρήγορα καλύπτεται ο όγκος ατμού από την υγροποίηση. Οι ταχύτητες που αναπτύσσονται επιβραδύνουν απότομα στην επιφάνεια του δρομέα με αποτέλεσμα την εμφάνιση υπερπίεσεων.



Εικόνα 13. Φυσαλίδα που χωρίζει και εισβάλλει το περιβάλλον υγρό ανάμεσα

Ο συγκεκριμένος μηχανισμός φθοράς καταπονεί κρουστικά την επιφάνεια της υποπίεσης του υδροστροβίλου.



Εικόνα 14. Υδροστρόβιλος Francis με εμφάνιση σπηλαιώσης.
(πηγή: khia.belzona.com/)

Στην εικόνα 14 παρατηρείται υδροστρόβιλος Francis με εμφάνιση σπηλαιώσης.

Η συνθήκη μη ανάπτυξης σπηλαιώσης είναι η παρακάτω.

$$H_{\theta} = H_B - H_{\Pi} - H_s > H_{\kappa\rho} \quad 1.21$$

Όπου H_{θ} είναι το καθαρό ύψος τοποθέτησης του υδροστροβίλου και διαμορφώνει την στατική πίεση κατά κύριο λόγο την τιμή της μέσης στατικής πίεσης στην διατομή εξόδου του δρομέα. H_B είναι η ατμοσφαιρική πίεση, H_{Π} η στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου ως προς την στάθμη του κάτω ταμιευτήρα ή της διώρυγας απαγωγής. $H_s = \frac{P_s}{\rho g}$ είναι η τάση ατμοποίησης εκφρασμένη σε μέτρα στήλης νερού. $H_{\kappa\rho}$ είναι το κρίσιμο ύψος σπηλαιώσης και χαρακτηρίζεται από την λειτουργία του υδροστροβίλου.

Για την αποφυγή της σπηλαιώσης πρέπει να ισχύει η παραπάνω ανισότητα.

Η παράμετρος Thoma ή παράμετρος σπηλαιώσης ορίζεται ως παρακάτω.

$$\sigma = \frac{H_{\theta}}{H} = \frac{H_B - H_{\Pi} - H_s}{H} \quad 1.22$$

Όπου H το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος.

$$\sigma = \frac{H_{\theta}}{H} > \sigma_{\kappa\rho} = \frac{H_{\kappa\rho}}{H} \quad 1.23$$

Η παράμετρος σπηλαιώσης $\sigma_{\kappa\rho}$ εμφανίζεται όπου $H_{\theta} = H_{\kappa\rho}$. Βάση στοιχείων που δίνουν την τιμή $\sigma_{\kappa\rho}$ συναρτήσεως του ειδικού αριθμού στροφών n_s το ύψος τοποθέτησης του στροβίλου σχεδιάζεται ανάλογα για την αποφυγή της σπηλαιώσης.

1.2 Σχεδίαση Υδροστροβίλου

1.2.1 Γενικά στοιχεία σχεδίασης

Ο σχεδιασμός ενός υδροστροβίλου αντιδράσεως όπως ο Francis, που είναι επικρατέστερος, απαιτεί την επίτευξη πολλών στόχων και περιορισμών. Απαιτείται υψηλός βαθμός απόδοσης και ροή χωρίς σπηλαίωση όσο αυτό είναι δυνατό. Η περιστροφική κίνηση της μηχανής μοντελοποιείται και επιλύεται η ροή από υπολογιστικά πακέτα ρευστομηχανικής για την εύρεση αποτελεσματικής λύσης.

Η χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής παρέχει καλύτερη κατανόηση της ροής και της φυσικής. Όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία. Χρησιμοποιώντας ως εργαλείο προγράμματα CFD, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι σχεδιασμού του δρομέα που βασίζονται σε εμπειρικά μοντέλα, σε βελτίωση του δρομέα με την δοκιμές ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός στόχος.

Μία κλασσική προσέγγιση για τον σχεδιασμό υδροστροβίλου είναι η εξής:

- Ειδικός αριθμός στροφών
- Διαστάσεις υδροστροβίλου
- Αριθμός ζεύγους πόλων ηλεκτρογεννήτριας
- Γωνίες ροής στην είσοδο και την έξοδο του πτερυγίου

Πολλές μελέτες έχουν ασχοληθεί με στόχο να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός του δρομέα. Ο παραμετρικός σχεδιασμός είναι αντικείμενο που απασχολεί τους ερευνητές και υπάρχει πληθώρα μεθόδων.

1.2.2 Κύριες διαστάσεις

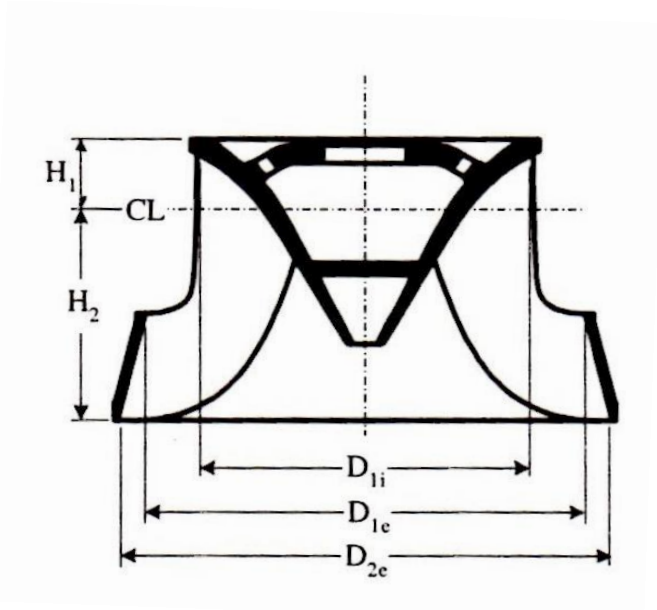
Οι κύριες διαστάσεις ενός υδροστροβίλου καθορίζονται κυρίως με την διαθέσιμη υδραυλική πτώση Ηκ. Βάση της υδραυλικής πτώσης επιλέγεται ο ειδικός αριθμός στροφών όπως παρουσιάστηκε στην εικόνα 5. Για την ίδια υδραυλική πτώση επιλέγεται μεγαλύτερος αριθμός στροφών που αντιστοιχεί σε υψηλότερες ταχύτητες άρα μικρότερες ολικές διαστάσεις[1].

Οι κύριες διαστάσεις του υδροστροβίλου Francis αδιαστατοποιούνται ως προς την διάμετρο τη στεφάνης του δρομέα στην έξοδο. Ο de Servio και ο de Leva προτείνουν τον παρακάτω τύπο για την συσχέτιση του ειδικού αριθμού στροφών με την περιφερειακή ταχύτητα.

$$U_{2e} = 0,31 + 25 * 10^{-3} n_s \quad 1.24$$

Με γνωστή την περιφερειακή ταχύτητα γίνεται δυνατός ο υπολογισμός της διαμέτρου αναφοράς από τον τύπο 1.25.

$$U_{2e} = \frac{u_{2e}}{\sqrt{2gH}} = \frac{\pi D_{2e} n}{\sqrt{2gH}} \quad 1.25$$



Εικόνα 15. Διαστάσεις δρομέα.

(πηγή: «Υδροδυναμικές μηχανές, αντλίες –υδροστρόβιλοι»,(2009) Παπαντώνης Δ.Ε.)

Ακολουθούν οι συσχετίσεις των διαστάσεων του δρομέα

$$\frac{D_{1i}}{D_{2e}} = 0,40 + \frac{94,5}{n_s} \quad 1.26$$

$$\frac{D_{1e}}{D_{2e}} = \frac{1}{0,96 + 0,38 \cdot 10^{-3} n_s} \quad 1.27$$

$$\frac{H_1}{D_{2e}} = 0,094 + 0,25 \cdot 10^{-3} n_s \quad 1.28$$

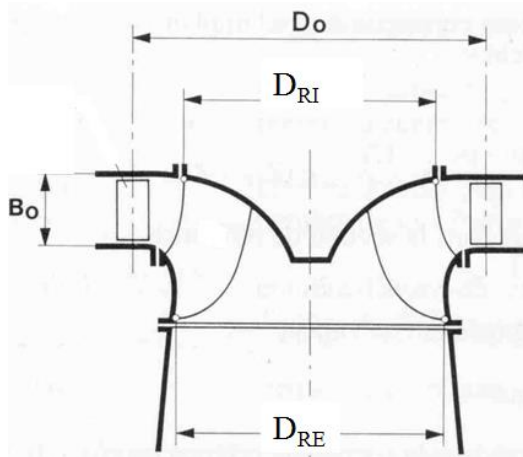
$$\frac{H_2}{D_{2e}} = -0,05 + \frac{42}{n_s} \quad \text{για } 50 < n_s < 110 \quad 1.29$$

$$\frac{H_2}{D_{2e}} = \frac{1}{3,16 - 1,3 \cdot 10^{-3} n_s} \quad \text{για } 110 < n_s < 350 \quad 1.30$$

Οι παραπάνω τύποι για το σχεδιασμό του δρομέα προτείνονται στο βιβλίο «Υδροδυναμικές μηχανές, αντλίες –υδροστρόβιλοι» του κ. Παπαντώνη Δ.

Στην συνέχεια παρατίθενται τύποι για τον σχεδιασμό του δρομέα από το πανεπιστήμιο του Δελχί στο μάθημα «Design Analysis of Francis Turbine Runner»[9] από τον κ. P. M. V. Subbarao.

Η εικόνα 16 απεικονίζει το μεσημβρινό κανάλι και τις διαστάσεις που ορίζονται από τους τύπους 1.31 και 1.32.



Εικόνα 16. Μεσημβρινό κανάλι.

$$D_{re} = 2 \left(\frac{Q}{\pi \varphi_{2e} \omega} \right)^{1/3} \quad 1.31$$

$$D_{rl} = 2 \left(\frac{2gH}{h_i \omega^2} \right)^{1/3} \quad 1.32$$

Οι όροι φ_{2e} h_i επιλέγονται ανάμεσα στις παρακάτω τιμές.

$$0.24 \leq \varphi_{2e} \leq 0.28$$

$$1.65 \leq h_i \leq 1.8$$

1.3 Μοντελοποίηση

1.3.1 Η υπολογιστική ρευστομηχανική

Η υπολογιστική ρευστομηχανική χρησιμοποιείται στην αριθμητική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν τις ροές των ρευστών. Έκανε την εμφάνισή της πρώτη φορά το 1960 και έκτοτε είναι εργαλείο τόσο σε ακαδημαϊκά πλαίσια όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Η συνεχής εξέλιξη των υπολογιστών δίνει τελευταία την δυνατότητα για αναλύσεις που παλαιότερα δεν θα ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθούν. Σήμερα επιστημονικές μελέτες και έρευνες είναι αποτελέσματα χρήσης προγραμμάτων CFD (computational fluid dynamics) [5] ειδικά θέματα σχετικά με αεροδυναμικό σχεδιασμό, ροή σε μηχανές, αερισμός και πολλά άλλα.

Η προσομοίωση των διαφόρων αντικειμένων μελέτης αντικαθιστά τα πειραματικά μοντέλα, καθώς συμβάλλει στην πρόβλεψη πλήθους ιδιοτήτων σε μικρό χρονικό διάστημα και με

μικρό κόστος. Επίσης με τη διεξοδική διερεύνηση σε διαφορετικές συνθήκες και με μεταβαλλόμενες παραμέτρους καθίσταται πιο εύκολη η βελτιστοποίηση.

1.3.2 Μεθοδολογία

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό πρόγραμμα Ansys Fluent. Ένα πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής που χρησιμοποιείται ευρέως για μοντελοποίηση. Κατασκευάστηκαν τα γεωμετρικά μοντέλα στο Ansys Design Modeler, όπως επίσης και τα υπολογιστικά πλέγματα στο Ansys Mesh. Η διαδρομή που ακολουθήθηκε είναι η παρακάτω.

- Κατασκευή γεωμετρίας
- Κατασκευή πλέγματος
- Επίλυση της ροής
- Έλεγχος ανεξαρτησίας πλέγματος
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Αρχικά κατασκευάστηκε το γεωμετρικό μοντέλο του μεσημβρινού καναλιού. Το μεσημβρινό κανάλι αποτελεί το υπολογιστικό χωρίο που πρέπει να διακριτοποιηθεί ώστε να επιλυθούν οι εξισώσεις μεταφοράς. Επίσης το μεσημβρινό κανάλι παρουσιάζει συμμετρία, αυτό είναι σημαντικό στοιχείο στην ανάλυση γιατί το fluent δίνει την δυνατότητα για αξονοσυμμετρική επίλυση. Το υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από ένα μη ομοιογενές πλέγμα καθώς είναι πιο πυκνό κοντά στο στερεό όριο. Το πλέγμα στην ουσία υποδιαιρεί τον χώρο σε έναν αριθμό μικρότερων στοιχείων.

Με την εισαγωγή των οριακών συνθηκών στην είσοδο του καναλιού πραγματοποιείται ο επιθυμητός αριθμός επαναλήψεων. Οι επαναλήψεις σταματούν εάν επιτευχθεί το κριτήριο σύγκλισης που έχει ορισθεί.

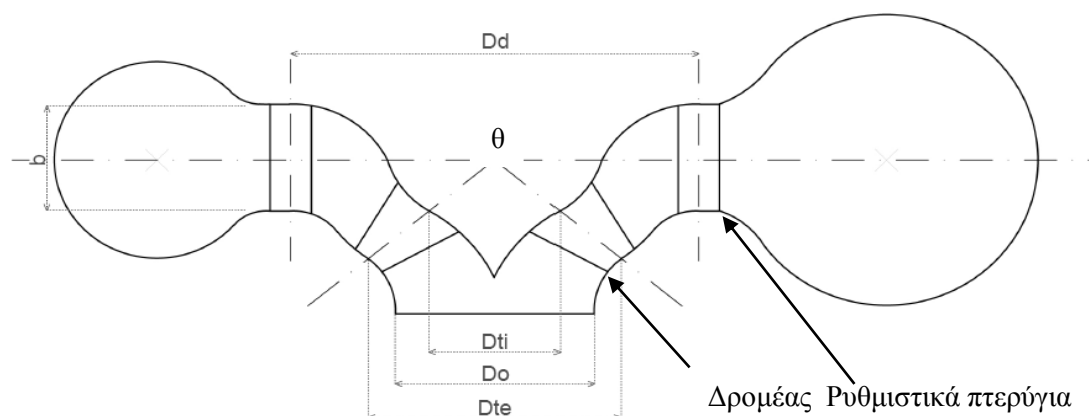
1.3.3 Παρουσίαση δεδομένων

Ο υδροστρόβιλος υπό μελέτη είναι ένας θεωρητικός υδροστρόβιλος Deriaz, διαγώνιας ροής, που φέρει τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

- Ειδικός αριθμός στροφών $n_s = 370$
- Στροφές λειτουργίας $n = 56,23$ rps
- Ύψος λειτουργίας $H = 10$ m
- Παροχή λειτουργίας $Q = 1,702$ m³

Η εικόνα 17 απεικονίζει τον υδροστροβίλο με τις διαστάσεις του.

Dd=	979,79	mm
Dti=	518,402	mm
Do=	608	mm
Dte	744,848	mm
b=	247	mm
θ =	61,5	degrees



Εικόνα 17. Σχέδιο του υδροστροβίλου Deriaz.

Ο υδροστροβίλος έχει 11 πτερύγια. Η επιλογή του περιττού αριθμού πτερυγίων γίνεται για την αποφυγή συντονισμού και ταλαντώσεων λόγω του αναγκαστικά άρτιου αριθμού των ρυθμιστικών πτερυγίων.

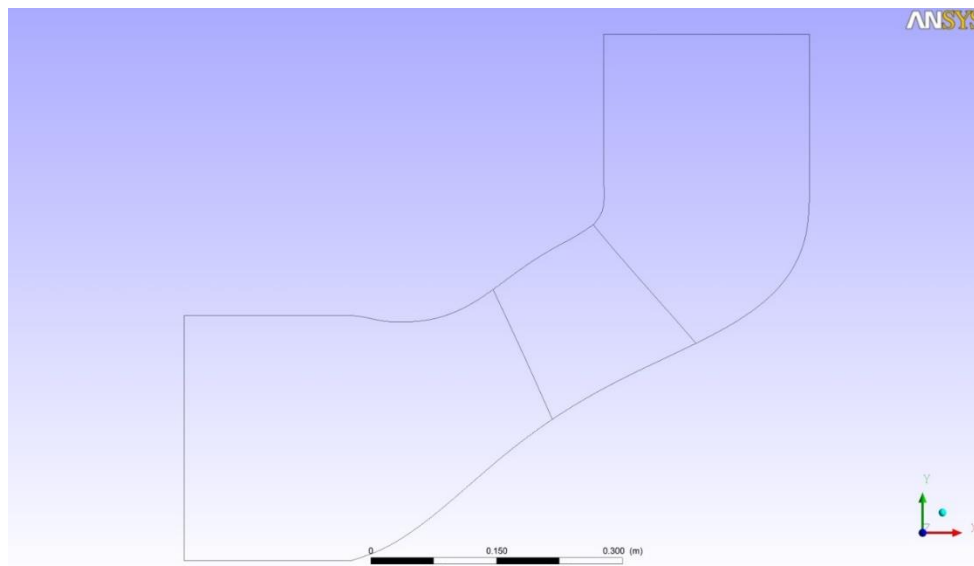
1.3.4 Κατασκευή γεωμετρίας και υπολογιστικού πλέγματος

Το μεσημβρινό κανάλι απαρτίζεται από το τμήμα που συνορεύει με την πλήμνη και το τμήμα που συνορεύει με την στεφάνη. Στο μεσαίο τμήμα του καναλιού, όπως φαίνεται στην εικόνα 18, υπάρχει η ακμή εισόδου και εξόδου. Εκεί τοποθετείται ο δρομέας, το περιστρεφόμενο κομμάτι της μηχανής. Μετά περιλαμβάνεται το κομμάτι που οδηγεί το υγρό μακριά από τον δρομέα χωρίς όμως να υπάρχει αγωγός απαγωγής.

Όλη η γεωμετρία σχεδιάστηκε στο Design Modeler. Όλα τα κομμάτια που είναι τμήματα της μηχανής ορίζονται ως «στερεά» στοιχεία και όλα τα υπόλοιπα ως «φρευστά». Συγκεκριμένα τονίζεται ότι η είσοδος ορίστηκε ως velocity-inlet και αυτόματα είναι και είσοδος οριακής

συνθήκης της ταχύτητας. Η έξοδος pressure-outlet και όλα τα εσωτερικά μέρη interior όπου τοποθετείται το πλέγμα στο επόμενο βήμα.

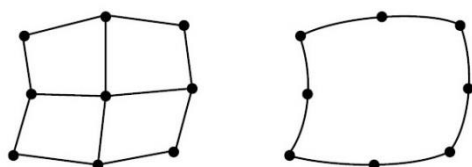
Η συμμετρία της γεωμετρίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 18, συμβάλλει στο να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος. Ορίζοντας ένα τμήμα από την πλήρη ως άξονα συμμετρίας, πράγμα που ισχύει κατασκευαστικά, δηλώνεται η αξονοσυμμετρική επίλυση του προβλήματος .



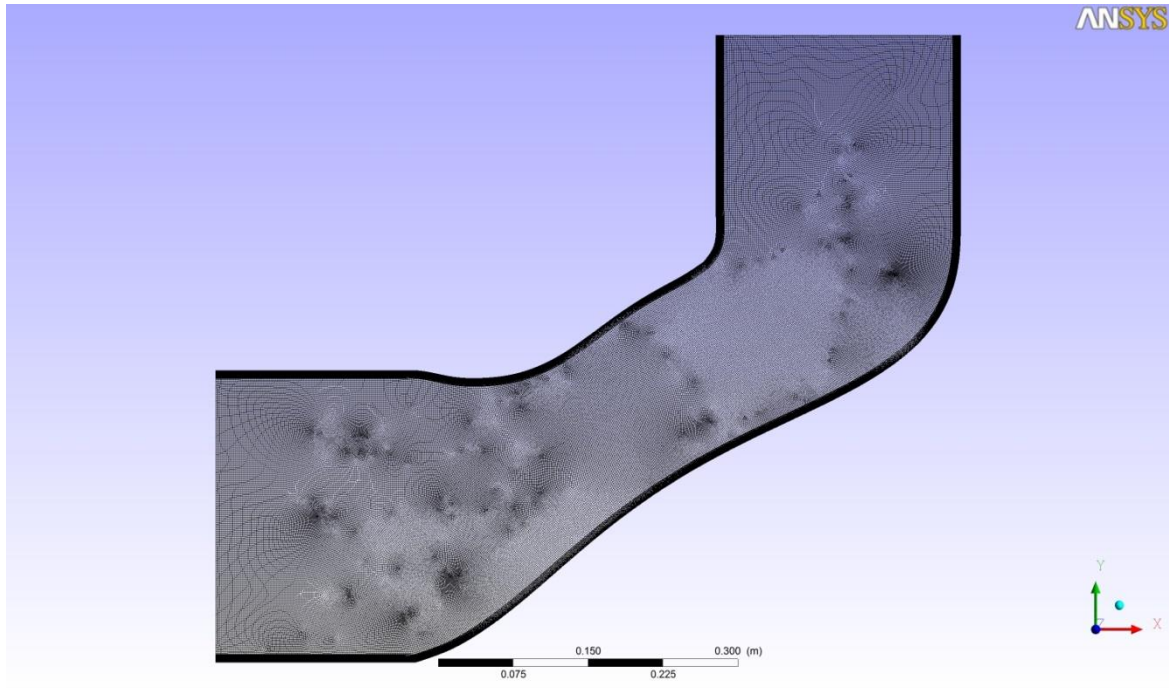
Εικόνα 18. Σχήμα μεσημβρινού καναλιού.

Το επόμενο βήμα μετά την κατασκευή της γεωμετρίας του διδιάστατου μεσημβρινού καναλιού είναι η κατασκευή του πλέγματος. Η διακριτοποίηση του χώρου δηλαδή που αντλείται κάθε πληροφορία π.χ. πίεση (ολική, στατική), ταχύτητα (μέτρο, γωνία, γραμμές ροής).

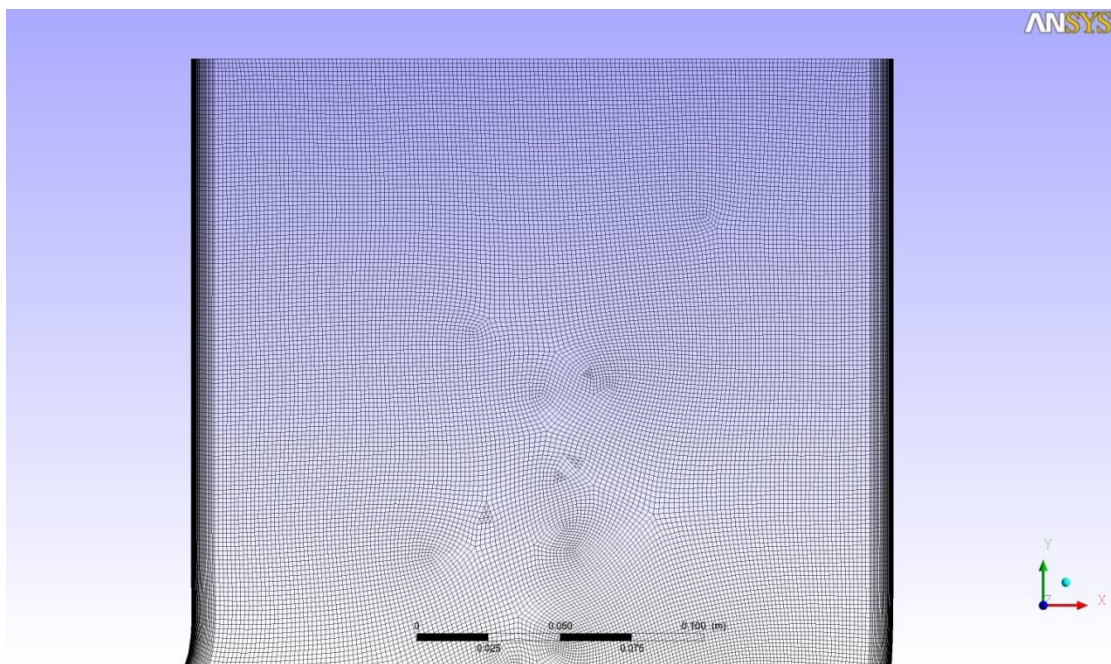
Εφόσον έχει ορισθεί το κανάλι εισάγεται το αρχικό πλέγμα. Τοποθετούνται τετραγωνικά στοιχεία στο διδιάστατο κανάλι όπως αυτά που φαίνονται παρακάτω.



Για διδιάστατα κανάλια με όρια καμπύλες προτείνεται η παραπάνω μέθοδος πλεγματοποίησης από το manual του προγράμματος fluent για σωστά αποτελέσματα σε λογικό υπολογιστικό χρόνο. Για την αποφυγή δημιουργίας ενδιάμεσων κόμβων χρησιμοποιούνται τριγωνικά στοιχεία από το πρόγραμμα αυτόματα όπως φαίνονται στην εικόνα 19 και την εικόνα 20 στην μεγέθυνση.

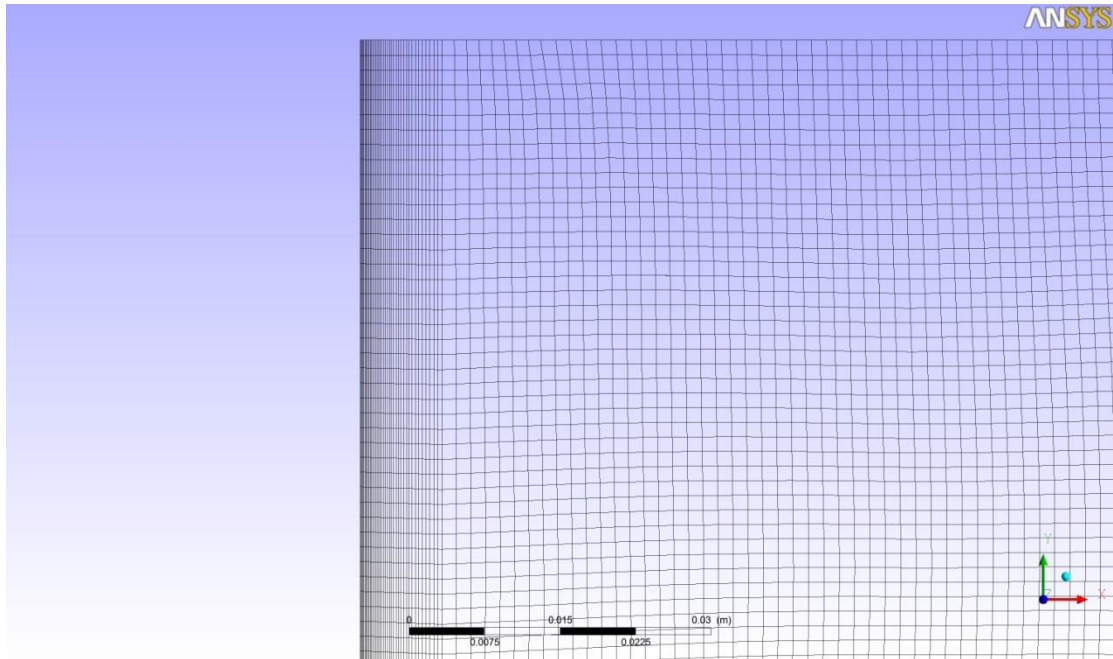


Εικόνα 19. Υπολογιστικό πλέγμα στο μεσημβρινό κανάλι.



Εικόνα 20. Μεγέθυνση του υπολογιστικού πλέγματος.

Επειδή οι ιδιότητες του ρευστού αλλάζουν πιο έντονα κοντά στο στερεό όριο, το πλέγμα εκεί παρουσιάζει πυκνώση. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή inflation επιλέγοντας τα όρια της πλήμνης και της στεφάνης και ορίζοντας τον επιθυμητό αριθμό στρωμάτων κοντά στο στερεό όριο καθώς και το βήμα τους. Στην εικόνα 21 παρατηρείται πως είναι το πλέγμα κοντά στο όριο της στεφάνης.



Εικόνα 21. Μεγέθυνση του υπολογιστικού πλέγματος, πύκνωση κοντά στην στεφάνη.

Κάθε επιφάνεια ονομάστηκε αναλόγως, έτσι ώστε το πρόγραμμά Ansys Fluent να αντιλαμβάνεται τις ιδιότητες κάθε επιφάνειας από την ονομασία της. Η ονομασία καθώς και ο ορισμός των ορίων παρουσιάζεται παρακάτω.

- Inlet (είσοδος του υγρού), (ρευστό)
- Hub_in (πλήμνη που ορίζεται από την είσοδο), (στερεό)
- Hub_blade (πλήμνη στην περιοχή του δρομέα) , (στερεό)
- Hub_out (πλήμνη κατά την έξοδο) , (στερεό)
- Axis (άξονας συμμετρίας), (στερεό)
- Shroud_in (στεφάνη στην είσοδο), (στερεό)
- Shroud_blade (στεφάνη στην περιοχή του δρομέα), (στερεό)
- Shroud_out (στεφάνη στην έξοδο , (στερεό)
- Blade_interior_a (είσοδος της ροής στον δρομέα), (ρευστό)
- Blade_interior_b (έξοδος της ροής από τον δρομέα), (ρευστό)
- Outlet (έξοδος της ροής), (ρευστό)

Τονίζεται ότι οι επιφάνειες ομαδοποιήθηκαν για καλύτερη κατανόηση στην εικόνα 22.

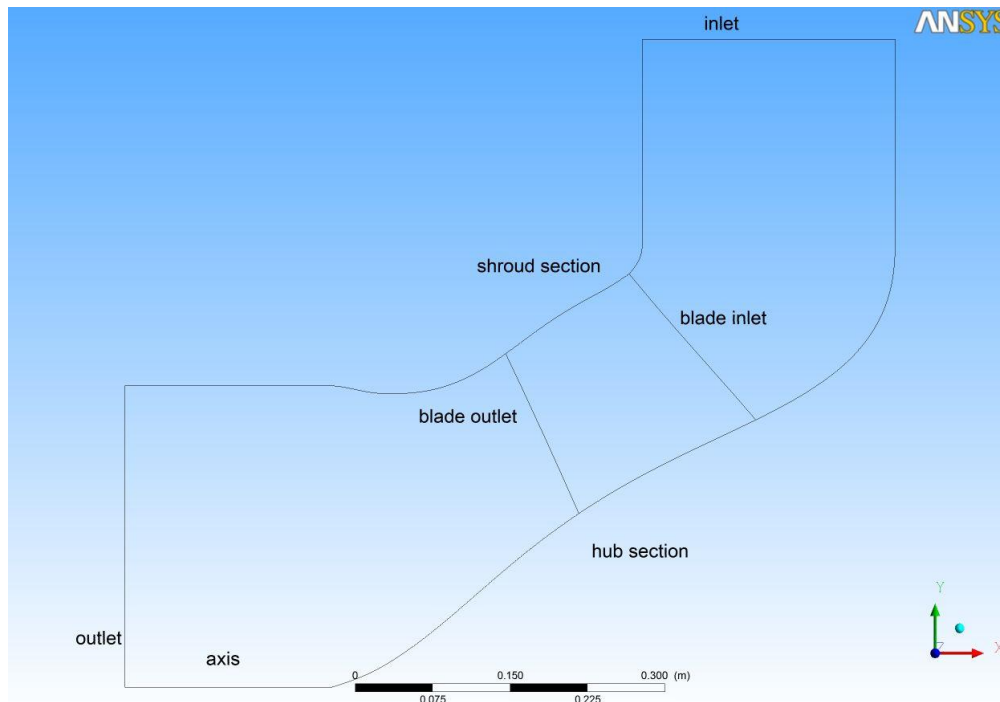
Το shroud section απαρτίζεται από τα μέρη:

shroud_in
shroud_blade
shroud_out

Το hub section απαρτίζεται από τα μέρη:

Hub_in
Hub_blade
Hub_out

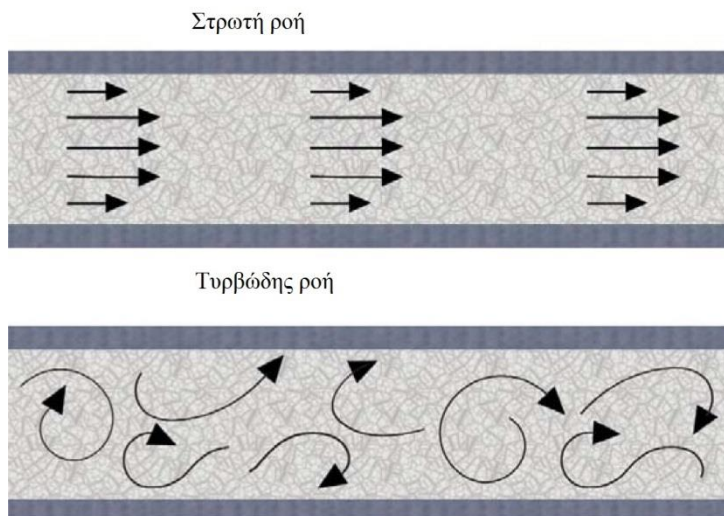
Το blade_interior_a ονομάζεται blade inlet και το blade_interior_b ονομάζεται blade outlet.



Εικόνα 22. Μέρη του μεσημβρινού καναλιού.

1.3.5 Μοντέλα τύρβης

Η ροή στο κανάλι είναι μια πλήρως διαμορφωμένη τυρβώδης ροή. Προτού τοποθετηθεί ο υδροστρόβιλος στο κανάλι σημαντικό είναι να πραγματοποιούνται μελέτες για τις επιπτώσεις των εξισώσεων της ροής, όπως την κατανομή της πίεσης στο κανάλι, την κατανομή των ταχυτήτων και τις γωνίες ροής στα σημεία ενδιαφέροντος. Για να την επίτευξη αυτή πρέπει γίνει κατανοητός ο μηχανισμός της τύρβης και η επιλογή κατάλληλου υπολογιστικού μοντέλου.



Εικόνα 23. Στρωτή ροή και τυρβώδη ροή.

Με τον όρο τυρβώδη ροή εννοείται η ακανόνιστη κίνηση του ρευστού στο χώρο. Οι ιδιότητες του ρευστού αλλάζουν μέγεθος με μεγάλη συχνότητα και δημιουργούνται δίνες σε αρκετές περιοχές. Στις περιοχές που υπάρχει διαφορά των ιδιοτήτων του ρευστού υπάρχει έντονη συναλλαγή μάζας, ορμής και θερμότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αξιωσημείωτη ενεργειακή απώλεια του ρευστού. Η μοντελοποίηση της τύρβης ξεκινάει από την εξισώσεις μεταφοράς του ρευστού.

Οι εξισώσεις που διέπουν τη ροή είναι οι παρακάτω[4].

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\theta u_i}{\theta x_i} = 0 \quad 1.33$$

Εξίσωση διατήρησης της ορμής Navier-Stokes:

$$\frac{\theta}{\theta t} (\rho u_i) + \frac{\theta}{\theta x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\theta P}{\theta x_i} + \frac{\theta}{\theta x_i} \left[\mu \left(\frac{\theta u_i}{\theta x_j} + \frac{\theta u_j}{\theta x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu (\delta_{ij} \frac{\theta u_k}{\theta x_k}) \right] \quad 1.34$$

Όπου: ρ η πυκνότητα του ρευστού

u οι συνιστώσες τις ταχύτητας

P η στατική πίεση

μ το μοριακό ιξώδες

δ το δέλτα του Kronecker

Με τα μοντέλα τύρβης, Reynolds Averaging Navier Stokes (RANS) προσεγγίζεται το θέμα αυτής της μελέτης. Μία άλλη κατηγορία μοντέλων είναι το μοντέλο δίνης ιξώδους (eddy-viscosity) που δέχεται ότι η τύρβη αποτελείται από μικρές δίνες οι οποίες σχηματίζονται και διαχέονται συνεχώς. Επιλέχθηκε το παρακάτω μοντέλο τύρβης, δύο εξισώσεων.

Μοντέλο K- ω

Το μοντέλο K- ω sst (shear stress transfer)[6] είναι ένα από τα πλέον ολοκληρωμένα μοντέλα και καλύπτει τις αδυναμίες του απλού μοντέλου K- ω . Συνίσταται για υψηλής ακρίβειας προβλέψεις του οριακού στρώματος. Το πρόβλημα του μοντέλου που βασίζεται στον ρυθμό διασκόρπισης των δινών είναι ότι υπερεκτιμάται ο χρόνος έναρξης της αποκόλλησης της ροής. Το K- ω χρησιμοποιεί την συχνότητα των δινών. Πολύ κοντά στο τοίχωμα επιλύεται το πρόβλημα με προσέγγιση K- ω και στο κύριο σώμα της ροής χρησιμοποιείται K- ϵ .

Το μοντέλο K- ω συνδέει την τυρβώδη κινητική ενέργεια με την συχνότητα δινών όπως παρακάτω.

$$\mu_t = \rho k / \omega \quad 1.35$$

Οι εξισώσεις μεταφοράς που επιλύονται είναι οι:

Εξίσωση για το K

$$\frac{\theta(\rho k)}{\theta t} + \nabla(\rho U k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad 1.36$$

Εξίσωση για το ω

$$\frac{\theta(\rho \omega)}{\theta t} + \nabla(\rho U \omega) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \frac{\alpha \omega P_k}{k} - \beta \rho \omega^2 \quad 1.37$$

1.3.6 Αλγόριθμος Simple

Κατά την επίλυση της ροής χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SIMPLE από το υπολογιστικό πακέτο Ansys. Για τον υπολογισμό της πίεσης στο πεδίο ροής πραγματοποιείται αποσύζευξη της πίεσης από τις εξισώσεις ορμής ώστε να επιλυθούν ξεχωριστά. Γίνεται υπόθεση ενός αρχικού πεδίου πίεσης που συμβολίζεται με P^* και επιλύονται οι εξισώσεις ορμής. Έτσι προκύπτει ένα πεδίο ταχυτήτων u_j^* που ικανοποιεί τις εξισώσεις ορμής αλλά όχι την εξίσωση συνέχειας. Η εξίσωση συνέχειας μετέπειτα χρησιμοποιείται για την διόρθωση του αρχικού υποθετικού πεδίου πίεσης P^* . Η διόρθωση γίνεται σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους.

$$P = P^* + P' \quad 1.38$$

$$u_j = u_j^* - Du_j \frac{\theta P'}{\theta x_j} \quad 1.39$$

Όπου $Du_j = \frac{\Delta x_{ew} \Delta y_{ns} \Delta z_{ud}}{A_p^{u_j} - S_p^{u_j}}$ και ο όρος $\frac{\theta P'}{\theta x_j}$ εκφράζεται στις τρεις διευθύνσεις όπως παρακάτω.

$$\frac{\theta P'}{\theta x} = \frac{P'_{E} - P'_{W}}{\Delta x_{ew}} \quad 1.40$$

$$\frac{\theta P'}{\theta y} = \frac{P'_{N} - P'_{S}}{\Delta y_{ns}} \quad 1.41$$

$$\frac{\theta P'}{\theta z} = \frac{P'_{U} - P'_{D}}{\Delta z_{ud}} \quad 1.42$$

1.3.7 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στην παρούσα διπλωματική η μεθοδολογία περιγράφεται αναλυτικά, όλες οι λύσεις είναι δευτέρας τάξης ακρίβειας και γίνεται αναφορά στην ανεξαρτησία του εκάστοτε πλέγματος. Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με την κλασική προσέγγιση της ρευστομηχανικής, δηλαδή επίλυση με πρώτης τάξης ακρίβειας και μετά μετάβαση σε δευτέρας τάξης, με 5000 επαναλήψεις η κάθε περίπτωση.

Το μοντέλο τύρβης που επιλέχθηκε ήταν το $K-\omega$ (sst). Η επίλυση ξεκινάει πάντα με πρώτης τάξης ακρίβεια με σκοπό την απαλοιφή των μεταβατικών φαινομένων που υπάρχουν. Μετά από 1000 επαναλήψεις γίνεται αλλαγή σε δευτέρας τάξης ακρίβειας επίλυση.

Σε ταλαντωτικές συμπεριφορές την λύσης μειώνονται οι συντελεστές υποχαλάρωσης σύμφωνα πάντα με το ansys fluent manual για την επίτευξη καλύτερης σύγκλισης. Γίνεται έλεγχος για τι τιμές του y^+ .

Κεφάλαιο 2

Αριθμητική Επίλυση και χάραξη του δρομέα

2.1 Επίλυση μεσημβρινού καναλιού

2.1.1 Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές τιμές του προβλήματος θέλουν εξαιρετική προσοχή γιατί από αυτές καθορίζεται η λύση. Επιλέγεται ως εργαζόμενο μέσο νερό σε υγρή φάση 100%. Πυκνότητας $998,2 \text{ kg/m}^3$ και μοριακού ιξώδους $\mu=0,001003 \text{ kg/ms}$. Όλες οι ζώνες υπολογισμού έχουν μόνο αυτό το συστατικό. Υπολογίζεται τώρα η ταχύτητα εισόδου.

Η διάμετρος του καναλιού είναι $D=1,255 \text{ m}$.

Το πλάτος εισόδου είναι $b=0,248 \text{ m}$

Το εμβαδόν υπολογίζεται ως εξής.

$$A = \pi D b \quad 2.1$$

Η παροχή είναι $Q=1,702 \text{ m}^3/\text{s}$

Άρα από την σχέση της συνέχειας καταλήγουμε στον παρακάτω τύπο.

$$Q = UA, U = \frac{Q}{A} = 1,7451 \text{ m/s} \quad 2.2$$

Η ταχύτητα αυτή είναι κάθετη στην επιφάνεια εισόδου και θεωρείται σε όλη την επιφάνεια της ομοιόμορφη.

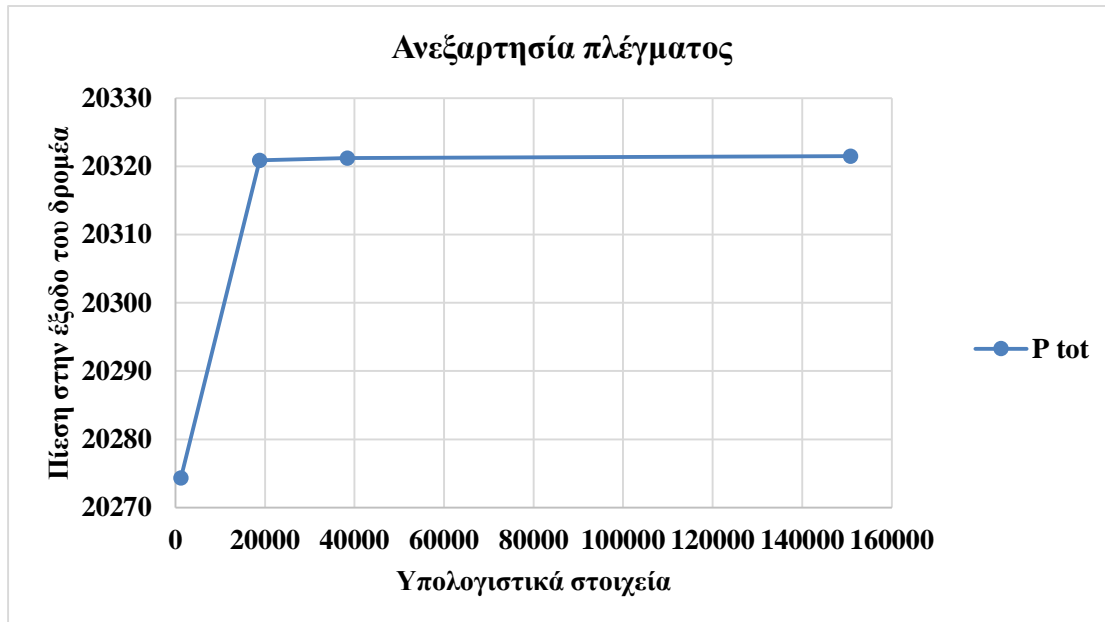
Υπολογίζονται όλα τα στοιχεία με την παραπάνω οριακή συνθήκη..

2.1.2 Ανεξαρτησία διδιάστατου πλέγματος

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για τους υπολογισμούς πρέπει παρουσιαστεί η ανεξαρτησία της λύση από το υπολογιστικό πλέγμα.

Επιλέγεται ως παράμετρος ελέγχου η πίεση στην ακμή εκφυγής τοποθέτησης του δρομέα. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Υπολογιστικά στοιχεία	Πίεση στην ακμή εξόδου τοποθέτησης του δρομέα Pa
1229	20274,373
18809	20320,9
38397	20321,23
150824	20321,514



Παρατηρείται η ανεξαρτησία της λύσης και επιλέγεται τον πλέγμα με τους 150824 κόμβους για την αριθμητική επίλυση του μεσημβρινού διδιάστατου καναλιού.

2.1.3 Υπολογισμός στοιχείων ροής

Σε αυτό το σημείο έχει αναλυθεί η ροή και έχουν υπολογισθεί οι τιμές για τις πιέσεις και τις ταχύτητες σε όλο το μεσημβρινό κανάλι. Για τον σκοπό της ομοιόμορφης πρόσδοσης του υγρού, της συστροφής και την ρύθμιση της παροχής τοποθετούνται τα ρυθμιστικά πτερύγια πριν τον δρομέα. Τα ρυθμιστικά πτερύγια αποτελούν όργανο ρύθμισης του σημείου λειτουργίας του υδροστροβίλου. Το ύψος τοποθέτησης τώρα των πτερυγίων R_d είναι κοντά στον δρομέα. Στην συγκεκριμένη γεωμετρία το R_d τοποθετείται η ρυθμιστική στεφάνη στο ύψος $R_d=0,42$ m.

Η κλίση των πτερυγίων μία τιμή που προκύπτει από τα στοιχεία που υπάρχουν για την μέση γραμμική ροής. Ακολουθείται μεθοδολογία για τον υπολογισμό της κλίσης των πτερυγίων σύμφωνα με την διδακτορική διατριβή του Υ.Δ. Κασσάνου Ιωάννη με τελικό σκοπό τον υπολογισμό των γωνιών ροής στην ακμή εισόδου του δρομέα και της ακμή εξόδου.

Με δείκτη m συμβολίζεται όποιο στοιχείο αναφέρεται στην μέση γραμμική ροής. Με τον δείκτη $2d$ συμβολίζεται όποιο στοιχείο είναι τοποθετημένο στο ύψος των ρυθμιστικών πτερυγίων. Η τιμή της μεσημβρινής ταχύτητας της μέσης ροής στο ύψος των ρυθμιστικών πτερυγίων είναι $C_{m2d}(m) = 2,965$ m/s. Χρησιμοποιείται η αδιάστατη έκφραση της ταχύτητας.

$$c_{m2d}(m) = \frac{C_{m2d}(m)}{\sqrt{2gH_0}} \quad 2.3$$

Άρα

$$c_{m2d}(m) = 0,212 \text{ m/s} \quad 2.4$$

Ο παρακάτω τύπος δίνει την γωνία της κλίσης των ρυθμιστικών πτερυγίων. Πως σχηματίστηκε παρουσιάζεται παρακάτω.

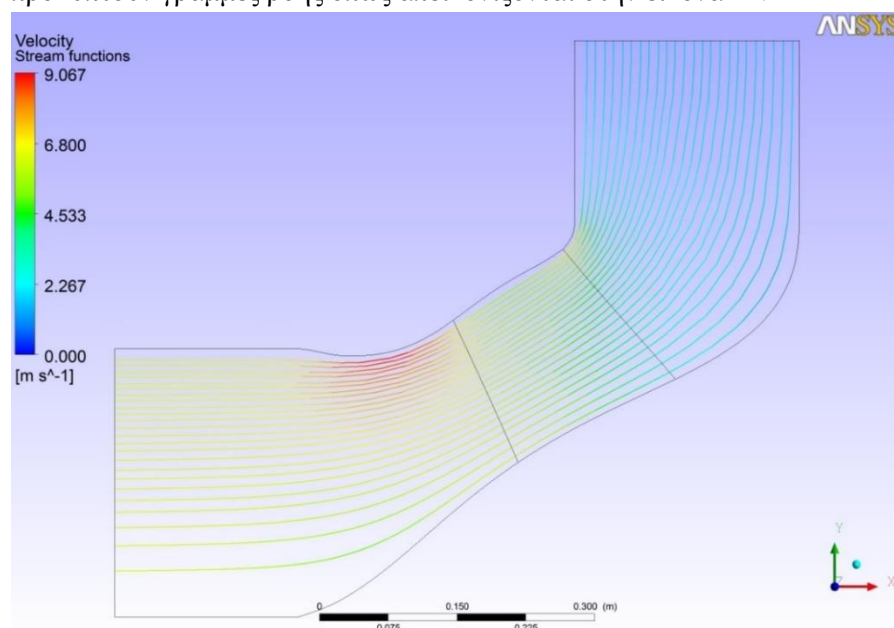
$$\tan a_{2d} = \frac{2\omega R_{2d}}{n_i \sqrt{2gH_0}} c_{m2d}(m) \cos \gamma_{2d}(m) \quad 2.5$$

Το τόξο εφαπτομένης του παραπάνω τύπου αντιστοιχεί σε αυτήν την τιμή.

$$a_{2d} = 37,77^\circ$$

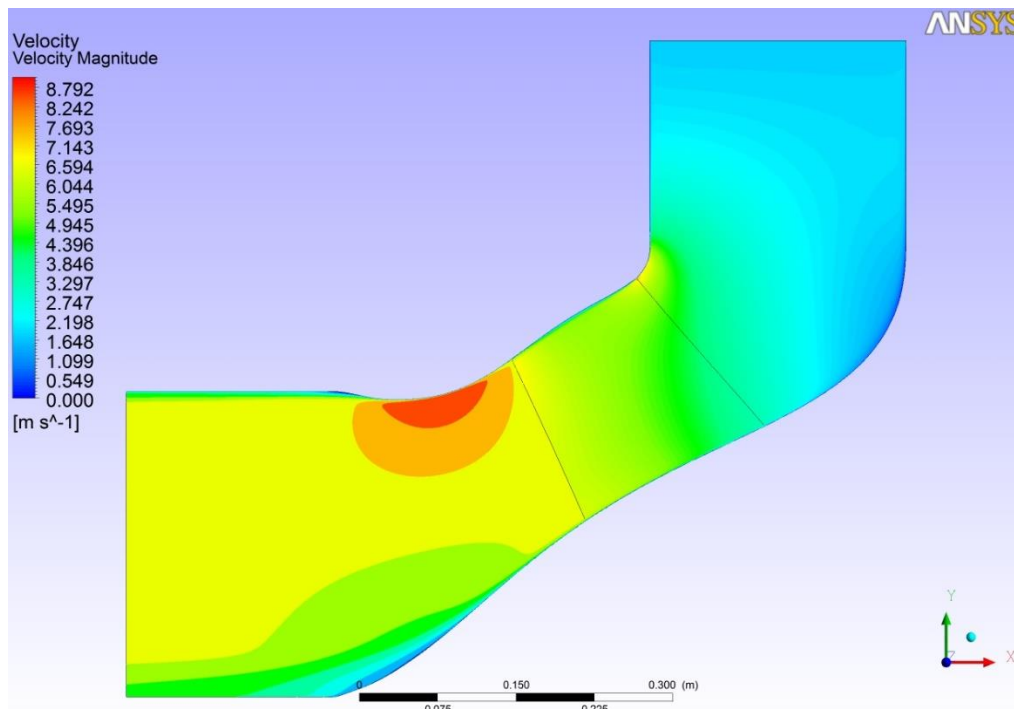
Αυτή η τιμή θα μείνει σταθερή καθ' όλη την διάρκεια των υπόλοιπων υπολογισμών.

Αναλύοντας την ροή λοιπόν από το πλέγμα του αξονοσυμμετρικού μεσημβρινού καναλιού προκύπτουν γραμμές ροής όπως απεικονίζονται στην εικόνα 24.



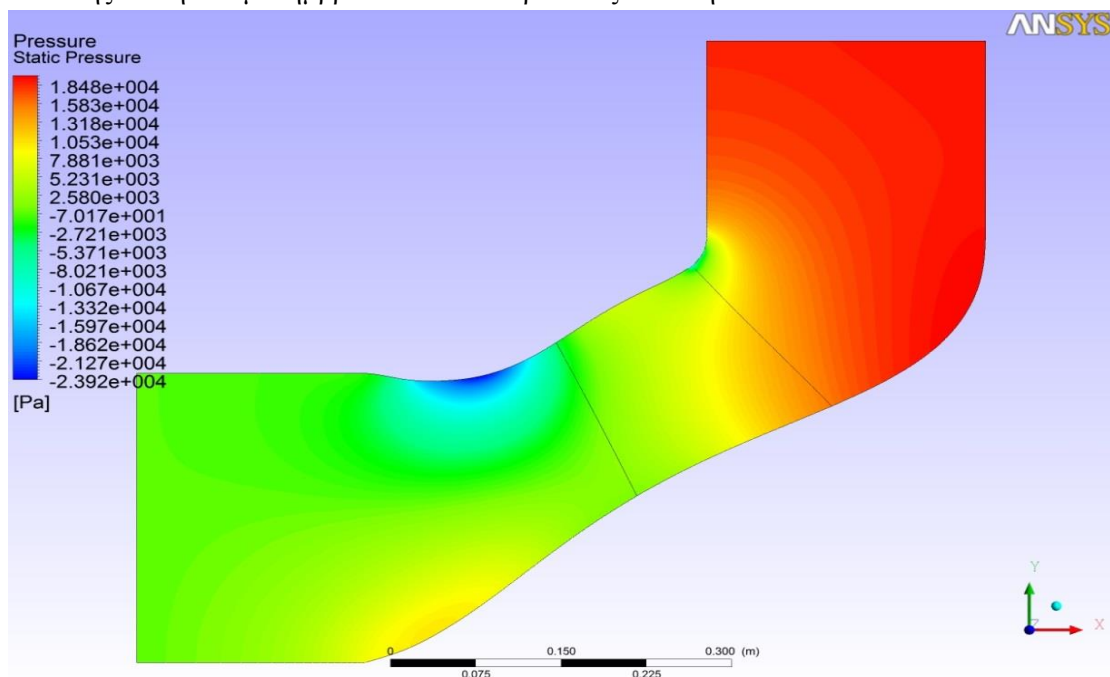
Εικόνα 24. Γραμμές ροής στο μεσημβρινό κανάλι.

Τα μέτρα των ταχυτήτων ανάλογα με το σημείο που βρίσκονται στο κανάλι απεικονίζονται στην εικόνα 25.



Εικόνα 25. Διακύμανση του μέτρου της ταχύτητας στο μεσημβρινό κανάλι.

Χρήσιμη πληροφορία για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι η διακύμανση της στατικής πίεσης στο μεσημβρινό κανάλι. Παρουσιάζεται στην εικόνα 26.



Εικόνα 26. Διακύμανση της στατικής πίεσης στο μεσημβρινό κανάλι.

Υπολογίστηκαν οι απαραίτητες τιμές στο σημείο τοποθέτησης των ρυθμιστικών περυγίων, στο σημείο της εισόδου του δρομέα και εξόδου.

Θεωρείται ότι στην έξοδο του δρομέα υπάρχει μία μικρή τιμή συστροφής στην μέση γραμμική ροής $Cu_2(m)$ για την καλύτερη εκμετάλλευση της συστροφής από την εξίσωση του Euler, και την καλύτερη ανάκτηση της πίεσης στον αγωγό απαγωγής. Αυτή η τιμή επιβάλλει συγκεκριμένη κλίση στα ρυθμιστικά περύγια τα οποία με την σειρά τους μία τιμή Cu_2 για το σύνολο της ροής.

Σημειώνεται ότι οι μεταβλητές των ταχυτήτων εκφράζουν τα παρακάτω μεγέθη.

U : περιφερειακή συνιστώσα

u_1 : περιφερειακή ταχύτητα στην είσοδο του δρομέα

u_2 : περιφερειακή ταχύτητα στην έξοδο του δρομέα

c_{u1} : εφαπτόμενη συνιστώσα στην είσοδο του δρομέα

c_{u2} : : εφαπτόμενη συνιστώσα στην έξοδο του δρομέα

w_1 : σχετική ταχύτητα στην είσοδο του δρομέα

w_2 : σχετική ταχύτητα στην έξοδο του δρομέα

u_{2d} : περιφερειακή ταχύτητα στο ύψος των ρυθμιστικών περυγίων

c_{u2d} : εφαπτόμενη συνιστώσα στο ύψος των ρυθμιστικών περυγίων

Cm_{2d} : μεσημβρινή συνιστώσα στο ύψος των ρυθμιστικών περυγίων

Χρησιμοποιούνται αδιάστατες εκφράσεις ταχυτήτων και αδιαστατοποιούνται όπως παρακάτω.

$$v = \frac{U}{\sqrt{2gH_0}} \quad 2.6$$

Άρα η εξίσωση Euler μετασχηματίζεται έτσι.

$$\frac{H}{2H_0} = (u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}) = \frac{n_h}{2} \quad 2.7$$

Σημειώνεται ότι με μικρά γράμματα είναι οι αδιάστατες εκφράσεις.

Από τα ρυθμιστικά περύγια έως τον δρομέα θεωρείται αμελητέα την επίδραση της συνεκτικότητας οπότε $u_c = ct$. Οπότε αντικαθιστούνται οι τιμές στην είσοδο του δρομέα με τις τιμές στο ύψος των ρυθμιστικών περυγίων.

Άρα προκύπτει ο τύπος.

$$n_h = 2(u_{2d} c_{u2d} - u_2 c_{u2}) \quad 2.8$$

Η ταχύτητα $u_{2d} = \frac{U_{2d}}{\sqrt{2gH_0}} = \frac{\omega R_{2d}}{\sqrt{2gH_0}}$ είναι η περιφερειακή ταχύτητα που έχει το υγρό στην θέση 2d.

Εφαρμόζοντας τον νόμο των συνημιτόνων στο τρίγωνο ταχυτήτων εξόδου προκύπτει ο παρακάτω τύπος.

$$-2u_2c_{u2} = w_2^2 - u_2^2 - c_2^2 \quad 2.9$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 2.8 προκύπτει.

$$n_h = 2u_{2d}c_{u2d} - w_2^2 - u_2^2 - c_2^2 \quad 2.10$$

Αντικαθιστώντας τον υδραυλικό βαθμό απόδοσης με τον ιδεατό.

$$n_i = 2u_{2d}c_{u2d} + w_2^2 - u_2^2 \quad 2.11$$

Όπου στις υδραυλικές απώλειες συμπεριλαμβάνεται η απώλεια κινητικής ενέργειας αφού το νερό στην έξοδο του δρομέα εξέρχεται με ταχύτητα C_2 που δεν μπορεί να ανακτηθεί.

$$n_h = 1 - \text{απώλειες κρούσεις} - \text{απώλειες τριβής} + \text{ανάκτηση ενέργειας διαχύτη}.$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για το κανονικό σημείο λειτουργίας (θεωρούνται μηδενικές οι απώλειες κρούσης) και για οποιαδήποτε γραμμή ροής.

Η ταχύτητα c_{u2d} υπολογίζεται από τον τύπο.

$$c_{u2d} = \frac{cm_{2d}\cos\gamma_{2d}}{\tan\alpha_{2d}} \quad 2.12$$

Όπου η γ_{2d} είναι η γωνία που σχηματίζει η γραμμή ροής με την ακτινική διεύθυνση και α_{2d} είναι η κλίση των ρυθμιστικών πτερυγίων.

Αντικαθιστώντας στην σχέση 2.11 και 2.23 προκύπτει για κάθε γραμμή ροής x:

$$n_i = \frac{\omega R_{2d}}{\sqrt{2gH_0}} \frac{cm_{2d}(x)\cos\gamma_{2d}(x)}{\tan\alpha_{2d}} + w_{2(x)}^2 - u_{2(x)}^2 \quad 2.13$$

Για να προσδιοριστεί η περιφερειακή ταχύτητα στην έξοδο του δρομέα για την μέση γραμμή ροής θεωρείται ότι το τρίγωνο εξόδου είναι ισοσκελές και ισχύει $w_{2m}=u_{2m}$.

Όπου γ είναι η γωνία ροής δηλαδή η γωνία που σχηματίζει η ακτινική συνιστώσα με την μεσημβρινή.

Για τον προσδιορισμό της περιφερειακής ταχύτητας στην έξοδο του δρομέα για την μέση γραμμή ροής θεωρείται το τρίγωνο εξόδου ισοσκελές ($w_{2m} = u_{2m}$).

Άρα από το τρίγωνο ταχυτήτων για την μέση γραμμή ροής ισχύει.

$$c_{u2(m)} = u_{2(m)} - \sqrt{u_{2(m)}^2 - c_{m2}^2} \quad 2.14$$

Η προηγούμενη σχέση μετασχηματίζεται για τον υπολογισμό της γωνίας των ρυθμιστικών πτερυγίων στο κανονικό σημείο λειτουργίας, χρησιμοποιώντας την υπολογισμένη τιμή της περιφερειακής συνιστώσας της ταχύτητας για την μέση γραμμή ροής στην εξίσωση 2.5.

Από τα παραπάνω φαίνεται το γεγονός που αναφέρθηκε προηγουμένως, ότι η περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας για την μέση γραμμή ροής επιβάλλει στις υπόλοιπες γραμμές ροής συγκεκριμένη τιμή η οποία υπολογίζεται ακολουθώντας τα εξής:

Συνδυάζοντας τις προηγούμενες εξισώσεις μπορεί να υπολογιστεί η σχετική ταχύτητα w_{2x} για κάθε γραμμή ροής:

$$\tan b_2(\chi) = \frac{cm_2(x)}{u_2 - cu_2(x)} \quad 2.15$$

$$w_2(\chi) = \sqrt{u_2^2 + n_i \left(1 - \frac{cm_2d(x)\cos\gamma_2d(x)}{cm_2d(m)\cos\gamma_2d(m)}\right)} \quad 2.16$$

$$Cu_2(\chi) = u_2 - \sqrt{u_2^2 - Cm_2(m)^2 + n_i \left(1 - \frac{cm_2d(x)\cos\gamma_2d(x)}{cm_2d(m)\cos\gamma_2d(m)}\right)} \quad 2.17$$

Η γωνία εισόδου υπολογίζεται από το παρακάτω τύπο χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις.

$$\tan b_1(\chi) = \frac{cm_1(x)}{u_1 - \frac{n_i cm_2d(x)\cos\gamma_2d(x)}{2u_1 cm_2d\cos\gamma_2d}} \quad 2.18$$

Συνοψίζοντας για τον υπολογισμό των γωνιών εισόδου και εξόδου του δρομέα χρησιμοποιούνται οι προηγούμενες σχέσεις θεωρώντας μία τιμή για τον ιδεατό βαθμό απόδοσης $\eta_i=0,9$, αφού έχει προηγηθεί ο υπολογισμός της ροής του μεσημβρινού καναλιού και προσδιοριστούν οι μεσημβρινές ταχύτητες cm και οι γωνίες γ στις θέσεις ενδιαφέροντος.

Δεδομένα

Μανομετρικό ύψος	H=	10m
Παροχή	Q=	1,702m ³ /s
Ιδεατός β.α.	η_i =	0,9
Γωνιακή ταχύτητα	ω =	56,23r/s
Ύψος ρυθμιστικών πτερυγίων	R _{2d} =	0,42m
Θεωρητικό ύψος δρομέα	H _u =	9,3

Τα συγκεκριμένα δεδομένα είναι τα σημεία αναφοράς για να σχεδιαστεί ο υδροστρόβιλος βάση των γωνιών ροής β_1 και β_2 .

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα.

Επίλυση Ροής								
	Γωνία εισόδου β_1 (Μοίρες)	Γωνία εξόδου β_2 (Μοίρες)	Cu1 (m/s)	Cu2 (m/s)	U1 (m/s)	U2 (m/s)	W1 (m/s)	W2 (m/s)
Γραμμή ροής 1	44,879	23,246	7,360	1,953	22,389	17,935	16,524	17,227
Γραμμή ροής 2	47,935	23,246	4,711	1,709	21,221	16,458	17,286	16,090
Γραμμή ροής 3 - Μέση γραμμή	47,154	47,154	3,438	1,487	19,605	14,654	16,737	14,654
Γραμμή ροής 4	45,374	28,285	2,844	1,534	18,203	13,149	15,958	13,277
Γραμμή ροής 5	40,206	39,248	2,199	2,770	15,486	10,352	13,712	9,942

Ο παραπάνω πίνακας δίνει όλα τα στοιχεία που χρειάζονται για να κατανοηθούν τα τρίγωνα ταχυτήτων και τα μέτρα των διαφόρων συνιστωσών της ταχύτητας για κάθε γραμμή ροής. Οι γωνίες εισόδου και εξόδου της ροής γίνονται η αρχή του σχεδιασμού του δρομέα.

Παρατηρήσεις συμπεράσματα:

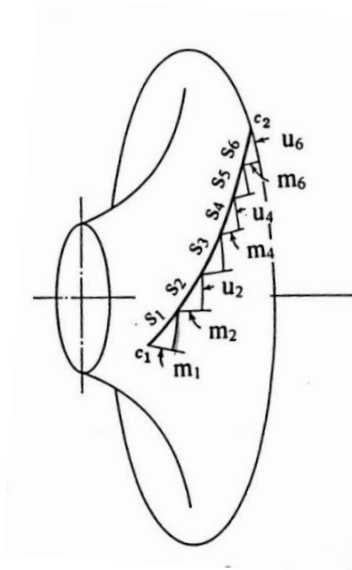
Ξεκινώντας από τα αποτελέσματα του πεδίου ροής των ταχυτήτων παρατηρείται ότι το ρευστό επιταχύνει καθώς προχωράει μέσα στο κανάλι. Η μεγαλύτερη ταχύτητα μέσα στο κανάλι έχει μέτρο 8,79 m/s. Παρατηρείται αύξηση του μέτρου της ταχύτητας προς την μεριά της στεφάνης. Όπως είναι γνωστό και από την ενεργειακή εξίσωση Bernoulli παρατηρείται ότι όπου αυξάνει η ταχύτητα η στατική πίεση μειώνεται.

2.2 Χάραξη του πτερυγίου

2.2.1 Μέθοδοι απεικόνισης του πτερυγίου

Εφόσον έχει αναλυθεί η ροή και υπάρχουν οι απαραίτητες πληροφορίες μπορεί να συνεχισθεί η χάραξη του πτερυγίου. Η μέθοδος που ακολουθείται βασίζεται στους κανόνες τις σύμμορφης απεικόνισης[3].

Η σύμμορφη απεικόνιση έχει αρκετά πλεονεκτήματα για την κατασκευή του δρομέα.



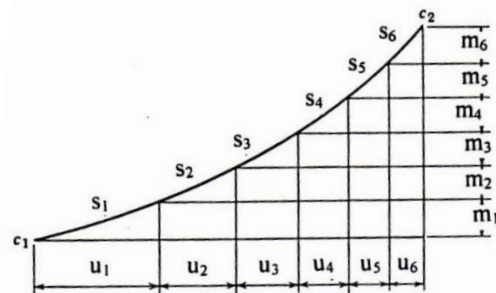
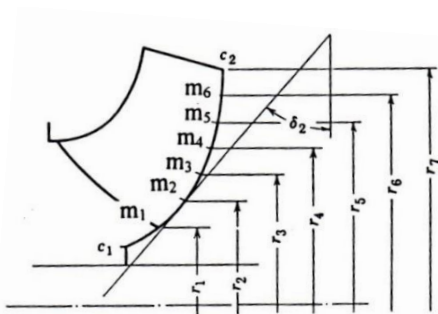
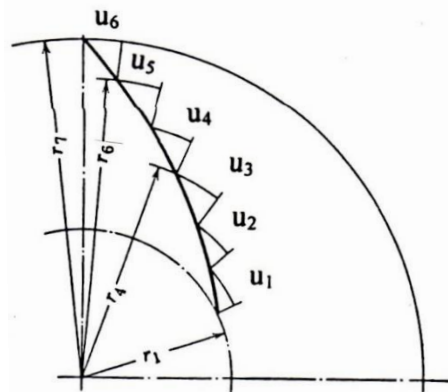
Μία χοανοειδής επιφάνεια όπως φαίνεται στην εικόνα 27 τέμνει το πτερύγιο της μηχανής. Τα σημεία τομής έχουν τις εξής ιδιότητες. Η καμπύλη όλη κατασκευάζεται από ένα πολυώνυμο Bezier. Στα άκρα της από την άλλη είναι γνωστά τα στοιχεία της ροής, οι κινηματικές συνθήκες και οι γωνίες της ροής.

Εικόνα 27. Τομή χοανοειδούς επιφάνειες με το πτερύγιο.

Παρατηρούνται ορθογώνια τρίγωνα που σχηματίζονται από τρεις πλευρές. Το ίχνος m , u και την υποτείνουσα s . Το ίχνος s είναι τα διαδοχικά τμήματα που έχει χωριστεί η καμπύλη $c1c2$. Το περιφερειακό ίχνος m είναι η μεσημβρινή προβολή του τμήματος s . Το ίχνος u ορίζεται από την τομή του μεσημβρινού επίπεδου με το κυκλικό τόξο το οποίο αποτελεί τμήμα κύκλου που ξεκινάει από τον άξονα της μηχανής. Οι ομόκεντροι κύκλοι φαίνονται καθαρά στο παρακάτω σχήμα 28.

Κοιτάζοντας την μηχανή από πλάγια όψη παρατηρείται ότι σχηματίζονται ομόκεντροι κύκλοι που ξεκινούν από το κέντρο του άξονα και σχηματίζουν τις αντίστοιχες ακτίνες και το ίχνος u .

Στα σχήματα 29 και 30 βλέπουμε το μεσημβρινό κανάλι. Στα δεξιά την καμπύλη $c1c2$ και αριστερά πως φαίνεται το ίχνος m .



Εικόνες 28, 29, 30. Πλάγια όψη, απεικόνιση ίχνους m και καμπύλη $c1c2$.

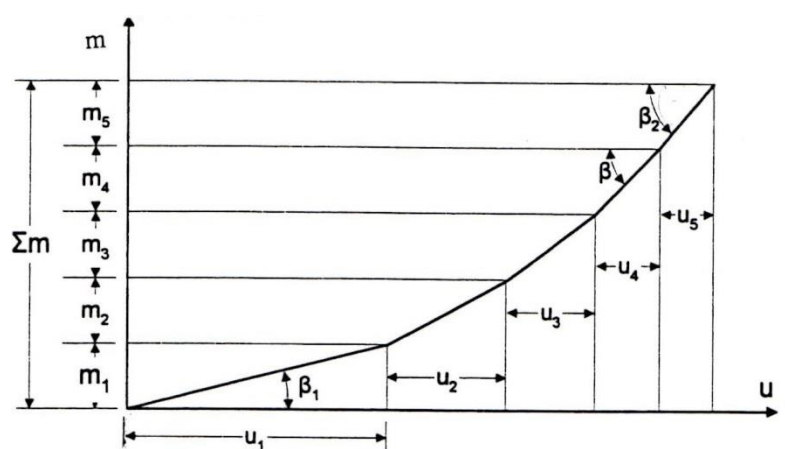
Παρατηρείται ότι η κλίση του περυγίου σε κάθε τμήμα είναι.

$$\tan\beta_i = \frac{m}{u} \quad 2.19$$

Ίση δηλαδή με την κλίση των ορθογώνιων που έχουν σχηματιστεί από τα αντίστοιχα στοιχεία. Συνεπώς στις άκρες της η καμπύλη $c1c2$ συμβολίζεται από τις γωνίες τις ροής β_1 και β_2 .

Σε αυτές τις αρχές βασίζεται η μέθοδος της σύμμορφης απεικόνισης.

Στο σχήμα 29 φαίνεται το ανάπτυγμα των ορθογώνιων που απεικονίζονται στο σχήμα 31, δηλαδή στη σύμμορφη παράσταση του περυγίου.



Εικόνα 31. Σύμμορφη παράσταση του περυγίου.

Στο παραπάνω ανάπτυγμα απεικονίζονται α) το πραγματικό μήκος του περυγίου, β) το μήκος της μεσημβρινής προβολής του περυγίου από το άθροισμα των στοιχείων m , γ) γνώση της κλίσης του περυγίου σε κάθε θέση του.

2.2.2 Γεωμετρικά στοιχεία για τον σχεδιασμό των περυγίων

Για να γίνει κατανοητός καλύτερα ο τρόπος που κατασκευάζεται ο δρομέας αναφέρονται λίγα λόγια για τα γεωμετρικά στοιχεία που συμβάλλουν στην σύνθεση του περυγίου[7]. Γίνεται μια σύντομη αναφορά στα παρακάτω στοιχεία.

- Καμπύλες Bezier
- Καμπύλες B-splines

Καμπύλες Bezier

Οι καμπύλες Bezier είναι παραμετρικές καμπύλες, βασική καμπύλη είναι αυτή που ξεκινάει από τρίτου βαθμού (κυβικές καμπύλες Bezier) και αυξάνει βαθμό διατηρώντας τις ιδιότητές τους. Μία κυβική καμπύλη Bezier έχει την παρακάτω μορφή.

$$B(t) = (1 - t)^3 b_0 + 3(1 - t)^2 b_1 + 3(1 - t) b_2 + t^3 b_3 \quad 2.20$$

Τα σημεία b_i , ονομάζονται σημεία ελέγχου και στην ουσία δείχνουν ξεκινώντας η καμπύλη από το b_0 που κατευθύνεται στο b_3 και ποια πορεία ακολουθεί μέσω των σημείων b_1 και b_2 . Συγκεκριμένα το αρχικό σημείο ονομάζεται start point και το τελικό σημείο end point.

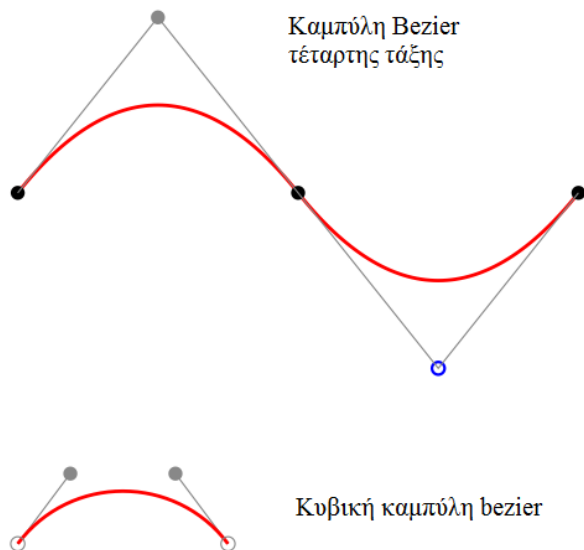
Είθισται να γράφεται:

$$B(t) = B_0^3 b_0 + B_1^3 b_1 + B_2^2 b_2 + B_3^3 b_3 \quad 2.21$$

Όπου τα B_i αποτελούν τα πολυώνυμα Bernstein και δίνουν στην ουσία την μορφή της καμπύλης.

Τα παραπάνω στοιχεία δίνουν ένα σύνολο σημείων που σχηματίζουν την καμπύλη. Τα control points είναι σταθερά σημεία και ορίζονται αναλόγως των συνθηκών. Έπειτα η καμπύλη ακολουθεί συγκεκριμένη πορεία. Τα σημεία αυτά δημιουργούν στο γράφημα ένα πολύγωνο, το πολύγωνο Bezier.

Φυσικά υπάρχουν και τέταρτης τάξης καμπύλες Bezier που ακολουθούν τους ίδιους κανόνες. Παρουσιάζονται διάφορες καμπύλες Bezier στην εικόνα 32 τρίτης και τετάρτης τάξης.



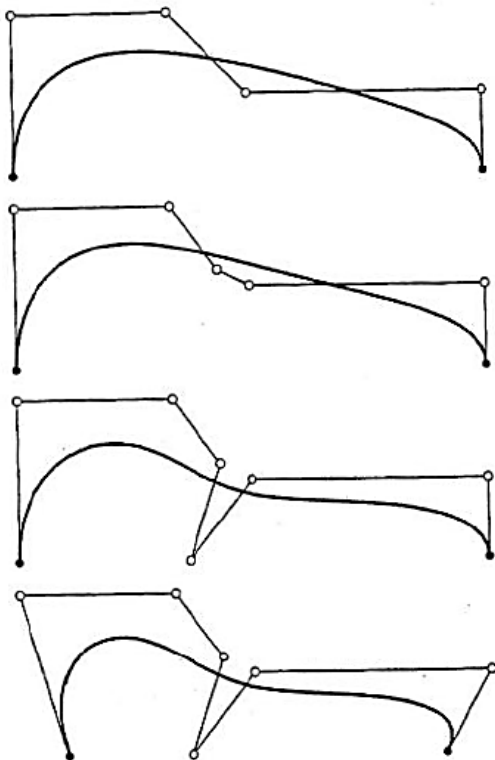
Εικόνα 32. Καμπύλες Bezier

Οι ιδιότητες των κυβικών καμπύλων Bezier τώρα είναι οι εξής:

- Η καμπύλη διέρχεται από τα άκρα τους, το start point και το end point όπου είναι τα ακραία σημεία ενός πολυγώνου που το ονομάζουμε πολύγωνο ελέγχου.
- Η καμπύλη μένει ανεπηρέαστη από στροφές, δηλαδή εάν στραφεί το πολύγωνο ελέγχου τότε η καμπύλη ακολουθεί.
- Συμμετρία, δηλαδή η καμπύλη ορισμένη από το πολύγωνο που ορίζουν τα σημεία b_0, b_1, b_2, b_3 και από τα σημεία b_3, b_2, b_1, b_0 είναι ίδια, απλά αλλάζει η φορά με την οποία διατρέχει το παραμετρικό διάστημα η παράμετρος t .
- Γραμμική ακρίβεια, δηλαδή εάν τα ενδιάμεσα σημεία είναι τοποθετημένα σε ίση απόσταση μεταξύ τους, και συνευθειακά με το αρχικό και τελικό σημείο τότε η καμπύλη Bezier είναι μία ευθεία που τα συνδέει.
- Ιδιότητα convex hull, όπου κάθε σημείο της καμπύλης ανήκει μέσα στο πολύγωνο ελέγχου που δημιουργείται από τα control points.

Οι ιδιότητες των καμπύλων Bezier στην γενική τους μορφή, n βαθμού είναι ίδιες με αυτές που αναφέραμε. Φυσικά αλλάζει η μορφή της καμπύλης.

Στην εικόνα 33 παρουσιάζεται πως αλλάζει η καμπύλη προσθέτοντας και τοποθετώντας περισσότερα ενδιάμεσα σημεία.



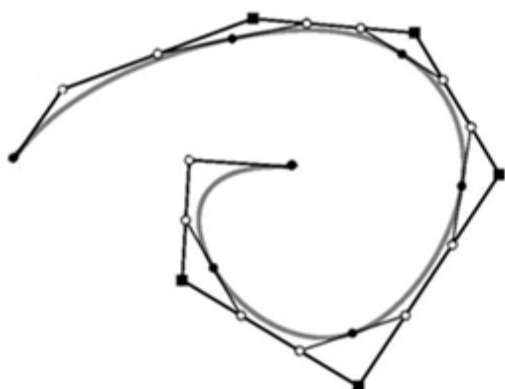
Εικόνα 33. Καμπύλες Bezier με ενδιάμεσα σημεία.

Χρήσιμο εργαλείο έχει αποδειχθεί η σύνθετη καμπύλη Bezier που είναι γνωστή και ως spline. Μια σύνθετη καμπύλη είναι ένα σύνολο που περιλαμβάνει άλλες καμπύλες Bezier που ενώνονται. Για αυτόν τον λόγο ονομάζεται και τμηματική καμπύλη επειδή διαθέτει τμήματα

καμπυλών. Οι splines καμπύλες έχουν σημεία σύνδεσης (junction points) τους κόμβους knots και οι κόμβοι είναι ένα παραμετρικό διάστημα το οποίο ορίζεται από την παράμετρο t .

Στις καμπύλες splines εξετάζεται η λειότητα των καμπύλων στο junction point. Η σύνθετη καμπύλη πρέπει να είναι παραγωγίσιμη άρα και συνεχής στο διάστημα που ορίζεται. Εάν οι καμπύλες λοιπόν συντίθενται από τα σημεία b_0, b_1, b_2, b_3 και αντίστοιχα b_3, b_4, b_5, b_6 τότε πρέπει τα b_2, b_3, b_4 να είναι συνευθειακά. Αυτό σημαίνει ότι οι εφαπτόμενες των καμπύλων συμπίπτουν μεταξύ τους.

Στην εικόνα 34 παρουσιάζεται μία σύνθετη καμπύλη που αποτελείται από κυβικές καμπύλες Bezier.



Εικόνα 34. Σύνθετη καμπύλη Bezier.

Υπάρχουν έξι τμήματα και έξι καμπύλες. Τα μαύρα στίγματα είναι τα σημεία έναρξης και λήξης της καμπύλης και τα λευκά είναι τα ενδιάμεσα σημεία που όλα μαζί απαρτίζουν το πολύγωνο ελέγχου. Τα μαύρα τετράγωνα είναι τα σημεία που ενώνονται οι ευθείες των ενδιάμεσων σημείων ελέγχου στις προεκτάσεις τους. Το σημείο αυτό αποτελεί τον βαρυκεντρικό συνδυασμό των σημείων που ορίζεται από τις δεύτερες παραγώγους.

Καμπύλες B-Spline

Οι καμπύλες B-spline είναι ακριβώς το ίδιο με τις σύνθετες καμπύλες Bezier. Είναι και αυτές σύνθετες καμπύλες που φέρουν τις ίδιες ιδιότητες και είναι n βαθμού. Η διαφορά είναι ότι σε υψηλής τάξης εξισώσεις που περιγράφουν τις καμπύλες δεν είναι εύχρηστη η ίδια μέθοδος για τις συνθήκες λειότητας. Αυτό μας έκανε να αναπτύξουμε την θεωρία των B-spline.

Σημαντική ιδιότητα των b spline είναι ότι οι καμπύλες βρίσκονται μέσα στο κυρτό περίβλημα ενός συνόλου σημείων που τις προσδιορίζουν.

Οι καμπύλες B-spline γράφονται με διαφορετικούς παραμέτρους από ότι οι καμπύλες Bezier. Στις καμπύλες Bezier υπάρχουν συνάρτησες βάσεις τα πολώνυμα Bernstein, εδώ χρησιμοποιούνται κάποιες ευέλικτες τμηματικές πολυωνυμικές συναρτήσεις. Παρακάτω παρουσιάζεται την μορφή τους.

$$B(u) = d_0 N_0^n(u) + d_1 N_1^n(u) + \dots + d_{p-1} N_{p-1}^n(u) \quad 2.22$$

Ο όρος N_i^n είναι η τάξη της καμπύλης B-spline. Τα σημεία d_i είναι τα αντίστοιχα σημεία ελέγχου που εδώ ονομάζονται σημεία de boor. Αυτά τα σημεία ορίζουν και πάλι το πολύγωνο ελέγχου.

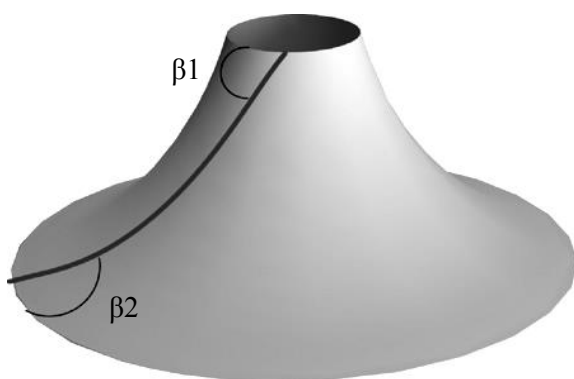
2.2.3 Παραμετρική χάραξη του δρομέα

Στο συγκεκριμένο σημείο έχουν αναλυθεί όλες οι παράμετροι της ροής στο διδιάστατο μεσημβρινό κανάλι. Στην συνέχεια γίνεται χρήση της μεθόδου παραμετρικού σχεδιασμού του δρομέα που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο υδροδυναμικών μηχανών από τον Υ.Δ. Κασσάνο Ιωάννη[8] που απαιτεί τον ελάχιστο αριθμό σχεδιαστικών παραμέτρων για την χάραξη του δρομέα.

Η μέθοδος βασίζεται στην εφαρμογή των καμπύλων b-spline για τον ορισμό της κατανομής της γωνίας της κλίσης του πτερυγίου (theta) κατά μήκος της ροής και έπειτα της προσαρμογής των σημείων των καμπύλων αυτών για την κατασκευή επιφάνειας είτε της πλευράς υψηλής πίεσης (pressure side) είτε για την πλευρά χαμηλής πίεσης (suction side).

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα ορίζεται ο δρομέας του υδροστροβίλου για το συγκεκριμένο μεσημβρινό κανάλι χρησιμοποιώντας την σύμμορφη απεικόνιση και την παραμετροποίηση της κατανομής της γωνίας της κλίσης του δρομέα. Ύστερα εισάγεται και ο παράγοντας του πάχους του δρομέα.

Η μέθοδος της σύμμορφης απεικόνισης διατηρεί τις γωνίες ακέραιες και τα ανεπτυγμένα μήκη. Συνεπώς οι γωνίες ροής β_1 και β_2 , δηλαδή οι γωνίες εισόδου και εξόδου της ροής ορίζουν τα αρχικά και τελικά σημεία κάθε καμπύλης.



Εικόνα 35. Παράσταση μιας χοανοειδούς επιφάνειας με τις γωνίες εισόδου και εξόδου.

Παρατηρείτε μία κωνική τομή του πτερυγίου στην εικόνα 35 και πως φαίνονται οι γωνίες ροής σε αυτό.

Υπενθυμίζεται ο πίνακας των γωνιών β_1 και β_2 .

Επίλυση Ροής	Γωνία εισόδου β_1 (Μοίρες)	Γωνία εξόδου β_2 (Μοίρες)
Γραμμή ροής 1	44,879	23,246
Γραμμή ροής 2	47,935	23,246
Γραμμή ροής 3 - Μέση γραμμή	47,154	47,154
Γραμμή ροής 4	45,374	28,285
Γραμμή ροής 5	40,206	39,248

Μέση γωνία β_1 μοίρες	Μέση γωνία β_2 μοίρες
45,110	32,236

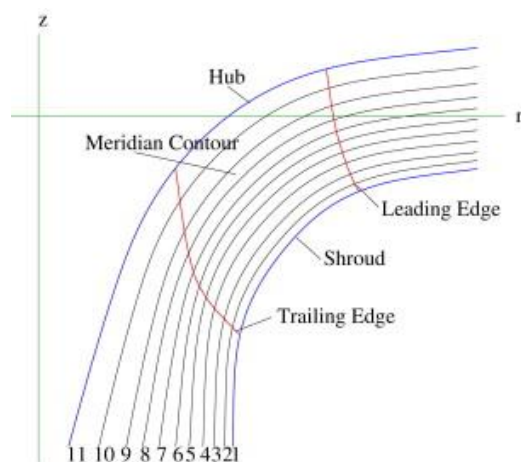
Η εξίσωση 2.23 ορίζει μια παραμετρική επιφάνεια που ανήκει στο περύγιο. Έτσι η μεσημβρινή προβολή του δρομέα ορίζεται από άπειρες καμπύλες Bezier κατά μήκος των γραμμών ροής και κατά πλάτος του καναλιού. Στις επόμενες εξισώσεις εισάγεται και οι όροι της κλίσης του περυγίου όπως και το πάχος.

$$C(u, v) = (r(u, v), \theta(u, v), z(u, v)) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n C p_{ij} B_i^m B_j^n \quad 2.23$$

Όπου r είναι η ακτίνα, θ είναι η γωνία που σχηματίζει η γωνία εκφυγής με το εκάστοτε σημείο επάνω στο περύγιο που ορίζει την γωνία β . Το z είναι το ύψος αναφοράς κάθε φορά, τα $B_i^m B_j^n$ είναι πολυώνυμα Bernstein και τα $C p_{ij}$ ορίζουν τα σημεία ελέγχου της καμπύλης.

Για κάθε καμπύλη υπολογίζεται το μεσημβρινό μήκος χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.24, με την οποία γίνεται ο μετασχηματισμός από το μεσημβρινό στο βοηθητικό επίπεδο.

$$m(u, v) = \int_0^1 \sqrt{(r(u, v))^2 + (z(u, v))^2} du \quad 2.24$$



Εικόνα 36. Το επίπεδο rz

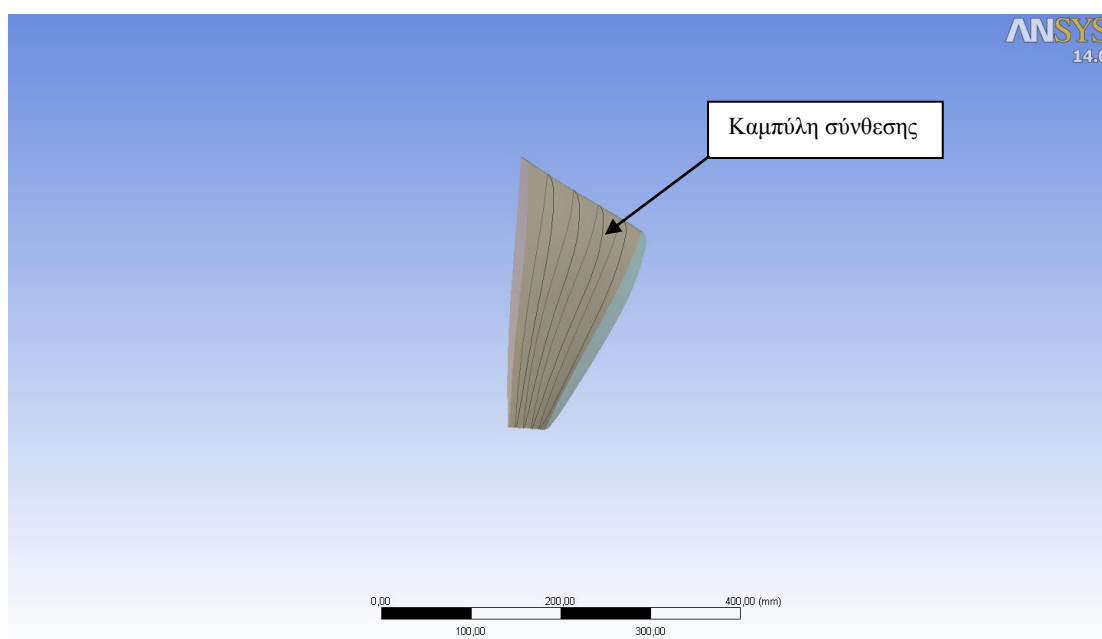
Η κλίση του πτερυγίου ορίζεται από την εξίσωση 2.25 που εκφράζει μία παραμετρική επιφάνεια με συντεταγμένες το μεσημβρινό μήκος και την γωνία θ συναρτήσει του αριθμού των καμπύλων που τοποθετήσαμε κατά μήκος του πτερυγίου.

$$\theta(u, v) = (m(u, v), \theta(u, v), sp(u, v)) \quad 2.25$$

Τα σημεία ελέγχου της επιφάνειας ορίζουν τις γωνίες β στην είσοδο και στην έξοδο της ροής, την σχετική θέση των ενδιάμεσων σημείων ελέγχου καθώς και την σχετική θέση κάθε καμπύλης που συντελεί στην κατασκευή του πτερυγίου στην εφαπτομενική διεύθυνση.

$$d\theta = \frac{1}{r(u,v)\tan\beta(u,v)} dm. \quad 2.26$$

Η τελική μορφή του πτερυγίου προκύπτει επιβάλλοντας το πάχος κατά μήκος των γραμμών.



Εικόνα 37. Σύνθεση πτερυγίου.

Στην εικόνα 37 παρατηρούνται οι καμπύλες σύνθεσης που παρήχθησαν από τις παραπάνω εξισώσεις.

Σύμφωνα με την εξίσωση 2.24 τα σημεία για τα οποία ισχύει $m(0,v)=0$ ορίζουν την ακμή εισόδου ενώ $m(1,v)=1$ η ακμή εξόδου του δρομέα. Το m είναι η μεταφορά του μεσημβρινού μήκους

2.3 Επίλυση τριδιάστατου μοντέλου

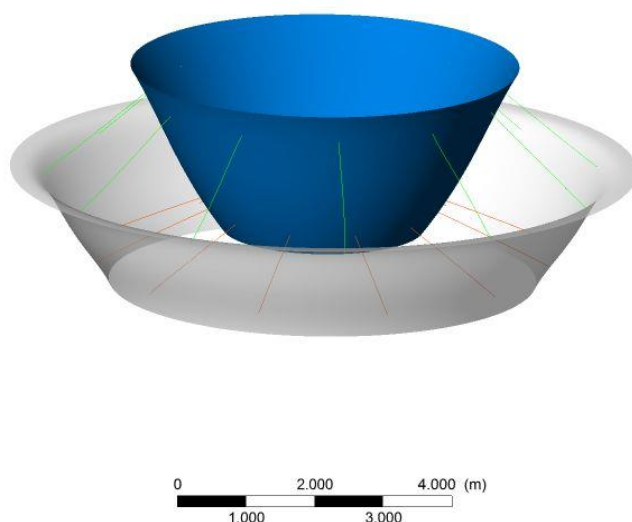
2.3.1 Κατασκευή γεωμετρίας

Εφόσον το προφίλ του δρομέα κατασκευάστηκε, τα δεδομένα προσαρμόζονται στο τριδιάστατο επίπεδο. Η κατασκευή της γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε από το πρόγραμμα Ansys Turbogrid, ένα ειδικά σχεδιασμένο εργαλείο για στροβιλομηχανές. Ο επικείμενος υδροστρόβιλος Deriaz διαθέτει 11 πτερύγια, συνεπώς ο χώρος των 360° υποδιαιρείται σε 11 μέρη δημιουργώντας έτσι ένα περιοδικό σύστημα ελέγχου γωνίας $32,727^{\circ}$. Ο συγκεκριμένος όγκος ελέγχου γίνεται το υπολογιστικό χωρίο που θα επιλύσουμε στην συνέχεια.

Ως άξονας περιστροφής ορίζεται ο άξονας Y, αυτό έχει σχέση με τις συντεταγμένες που χαραχθηκε ο δρομέας.

Εισάγοντας τα δεδομένα στο πρόγραμμα turbogrid, αυτό κατασκευάζει καμπύλες για την πλήμνη και την στεφάνη. Οι καμπύλες είναι b-spline που ορίζονται από δεδομένα σημεία.

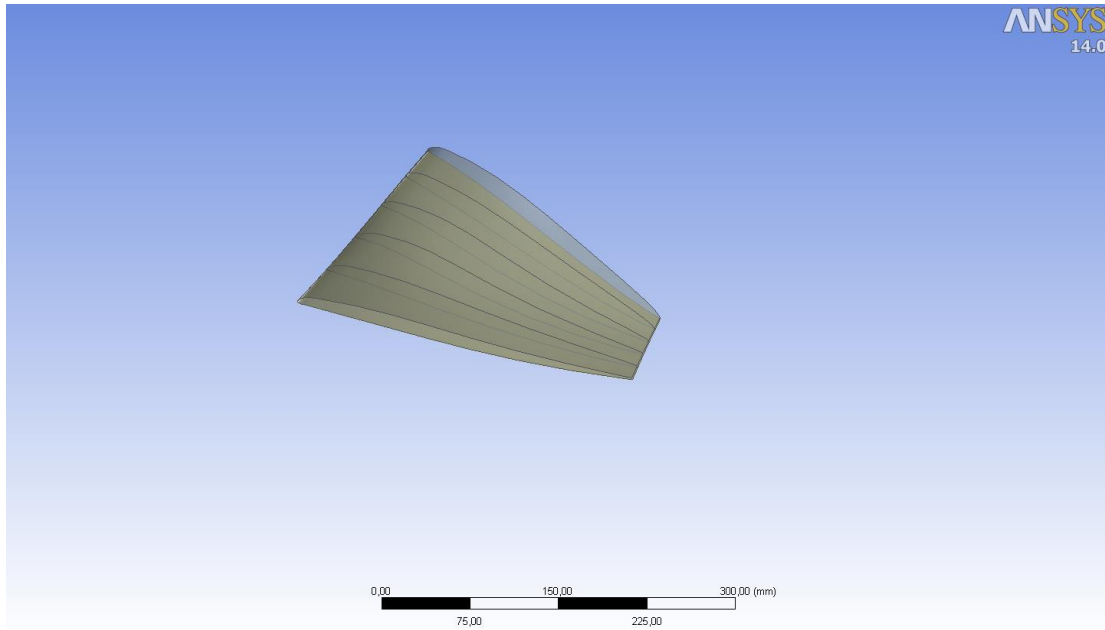
Η διάταξη της στεφάνης και της πλήμνης φαίνεται στην εικόνα 38.



Εικόνα 38. Παράσταση της πλήμνης και της στεφάνης.

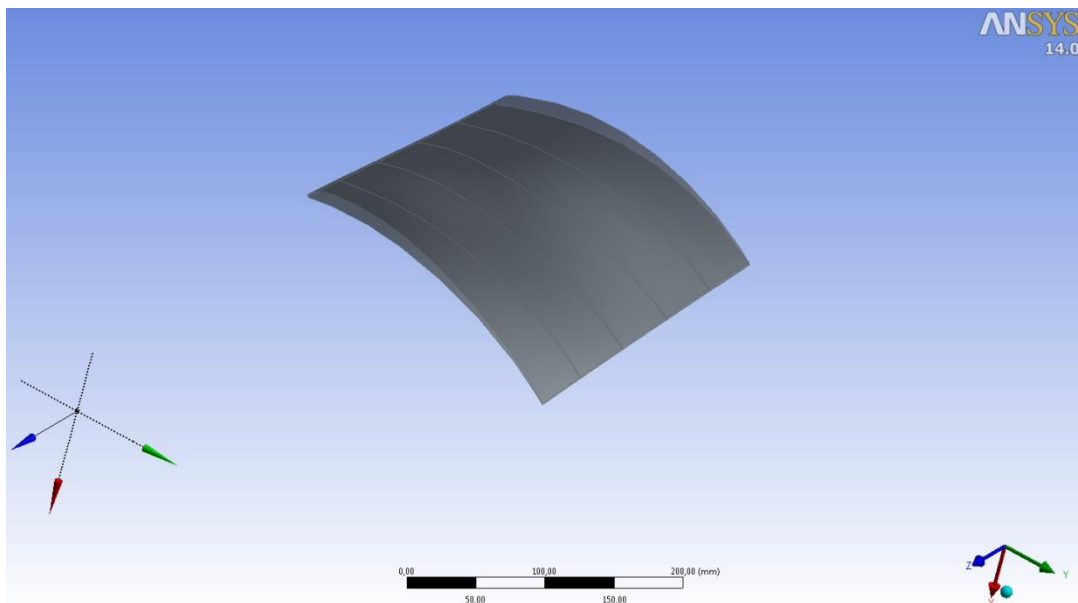
Στην συνέχεια δίνονται τα στοιχεία για την κατασκευή του πτερυγίου.

Όσον αφορά το πτερύγιο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχουν συντεταγμένες που δίνουν έξι καμπύλες οι οποίες συνθέτουν το προφίλ του στην πλευρά της υψηλής πίεσης και έξι για την πλευρά της χαμηλής πίεσης.

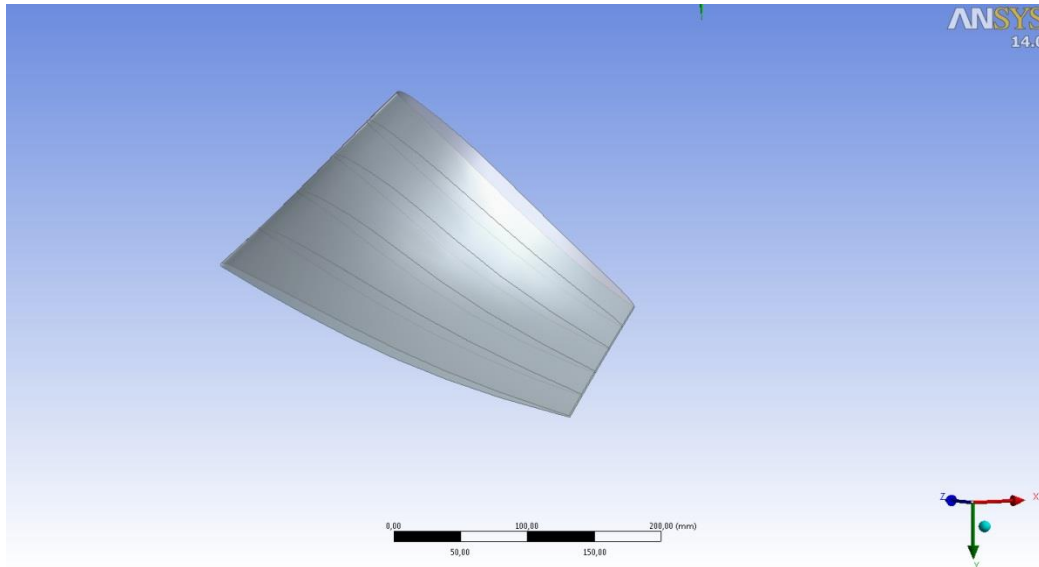


Εικόνα 39. Απεικόνιση του πτερυγίου.

Στην εικόνα 39 παρουσιάζεται η επιφάνεια που κατασκευάστηκε από τις δεδομένες καμπύλες και στις δύο πλευρές. Συγκεκριμένα το blademodeler που χρησιμοποιείται από το turbogrid χρησιμοποιεί τακτική κάλυψη των καμπύλων από άκρο σε άκρο. Κατασκευάζει την επιφάνεια ξεκινώντας από την πλήμνη και καταλήγει στην στεφάνη και όχι την ακμή εισόδου της ροής προς την ακμή εξόδου κατά μήκος των γραμμών ροής προσαρμόζοντας ένα στερεό όριο σύμφωνα με τις καμπύλες b spline σύνθεσης.



Εικόνα 40. Απεικόνιση του πτερυγίου από την πλευρά της χαμηλής πίεσης.

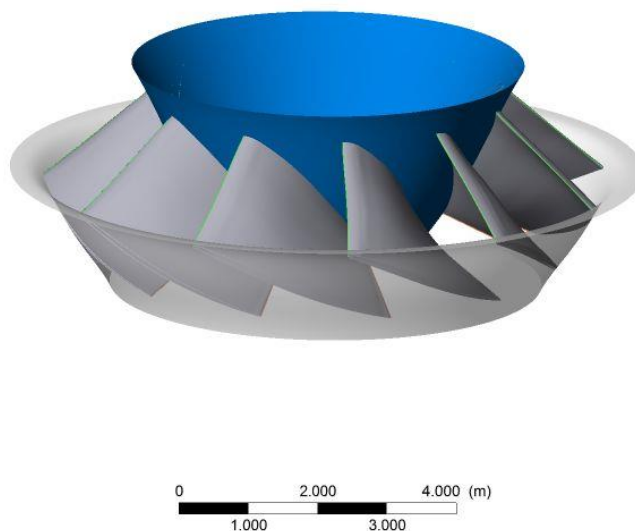


Εικόνα 41. Απεικόνιση του πτερυγίου από την πλευρά της υψηλής πίεσης.

Οι εικόνες 40 και 41 παρουσιάζουν την πλευρά υπερπίεσης και υποπίεσης του πτερυγίου.

Το turbogrid στην συνέχεια κατασκευάζει το υπολογιστικό χωρίο το οποίο γίνεται το πεδίο υπολογισμού. Το υπολογιστικό χωρίο που έχει δημιουργηθεί περιλαμβάνει το πτερύγιο σε έναν όγκο ίσα κατανεμημένο γύρω από το πτερύγιο.

Ολόκληρη η μηχανή παρουσιάζεται στην εικόνα 42.



Εικόνα 42. Απεικόνιση όλης της μηχανής.

Το υπολογιστικό χωρίο το οποίο χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί διαθέτει τρεις υπολογιστικούς όγκους που συνδέονται μεταξύ τους. Το κομμάτι που εισάγεται

η ροή στην είσοδο της μηχανής, το κομμάτι που διέρχεται από τον δρομέα και το κομμάτι που οδηγείται η ροή στην έξοδο της.

Αυτοί οι υπολογιστικοί όγκοι αποτελούνται από επιφάνειες που φέρουν συγκεκριμένες ιδιότητες ώστε να ικανοποιούνται ορθώς οι οριακές συνθήκες αργότερα στην επίλυση του προβλήματος. Οι όγκοι αυτοί τονίζονται ότι χωρίζονται σε κινούμενοι όγκοι αναφοράς και σε ακίνητοι και παρουσιάζονται στην εικόνα 43.

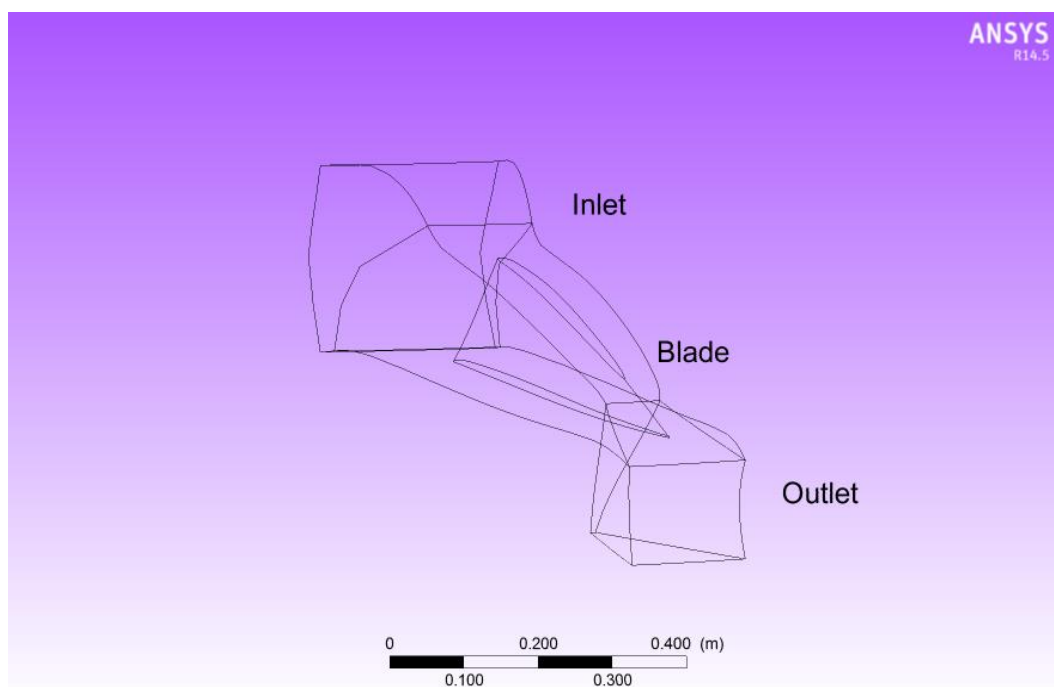
Ακίνητοι όγκοι αναφοράς

Το κομμάτι εισαγωγής της ροής (inlet) έως ότου η ροή να φτάσει στο δρομέα. Είναι σταθερές επιφάνειες που η ροή εισέρχεται με την αρχική συστροφή της που έχει λάβει από τα ρυθμιστικά πτερύγια.

Το κομμάτι που οδηγείται η ροή στον αγωγό φυγής (outlet section) μετά από τον δρομέα και στην έξοδο της μηχανής. Είναι το κομμάτι που αναμένεται να υπάρχουν μικρές τιμές συστροφής για την καλύτερη απόδοση της μηχανής.

Κινούμενος όγκος αναφοράς

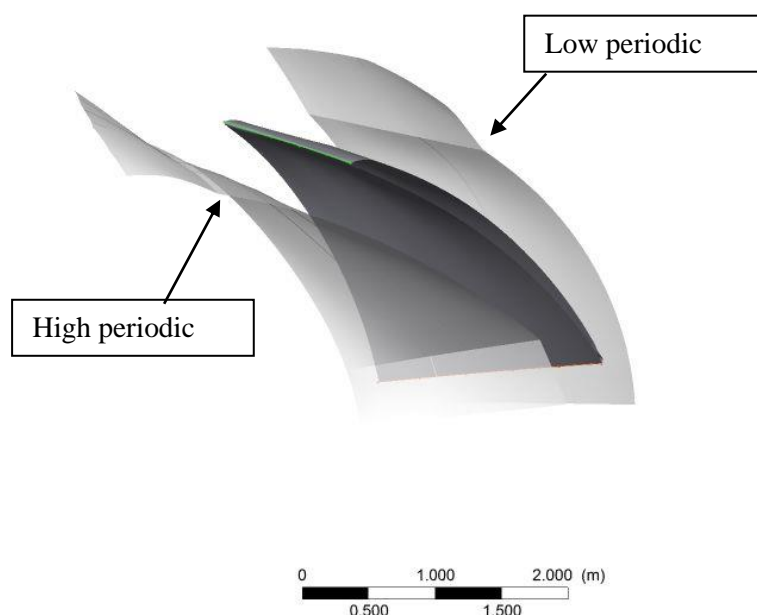
Ο κινούμενος όγκος αναφοράς περιλαμβάνει το πτερύγιο του δρομέα (blade) και του όγκου που το περιβάλλει ο οποίος περιστρέφεται με ορισμένη και σταθερή ταχύτητα στη μελέτη καθώς και τις επιφάνειες της πλήμνης και της στεφάνης.



Εικόνα 43. Απεικόνιση του όγκου ελέγχου.

2.3.2 Τριδιάστατο πλέγμα

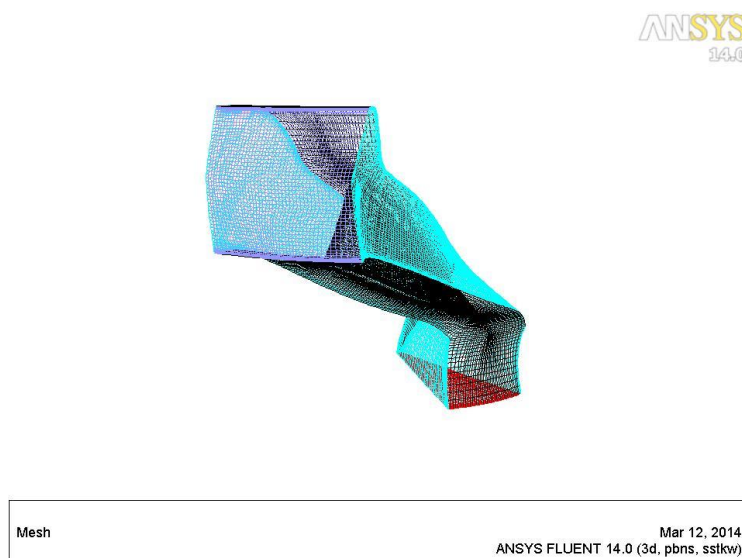
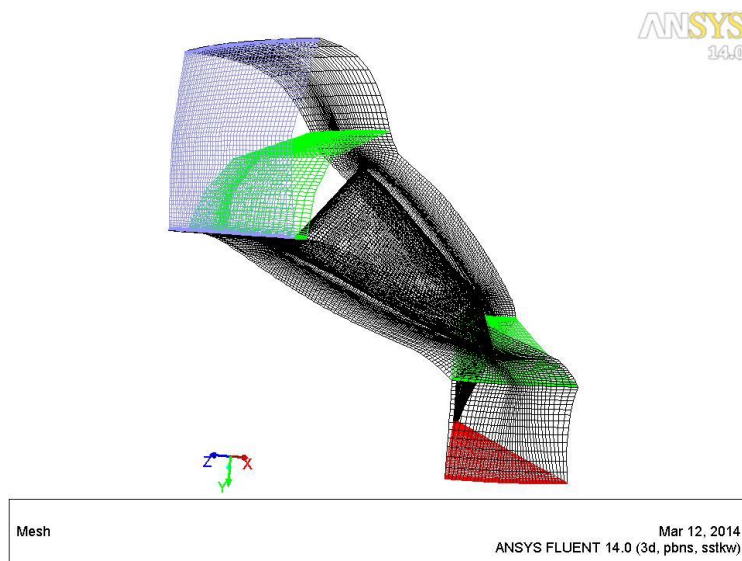
Αρχικά ορίζεται το υπολογιστικό χωρίο. Ξεκινά από την είσοδο της ροής στον υδροστρόβιλο, περιλαμβάνει τον δρομέα και συνεχίζει έως την έξοδο. Ένας ίσος όγκος ελέγχου περιλαμβάνει το πτερύγιο. Οι άκρες του όγκου αυτού σχηματίζουν δύο επιφάνειες. Την high periodic και την low periodic. Η επιφάνεια low periodic επεκτείνεται από την είσοδο έως την έξοδο και από την πλήμνη έως την στεφάνη στην πλευρά του πτερυγίου που έχει χαμηλές τιμές το Θ . Η επιφάνεια high periodic είναι στην αντίθετη πλευρά, στην πλευρά με τις υψηλές τιμές του Θ . Οι επιφάνειες αυτές απεικονίζονται στην εικόνα 44.



Εικόνα 44. Απεικόνιση της επιφάνειας low periodic και high periodic.

Στην συνέχεια εφόσον ορίστηκε ο υπολογιστικός χώρος, πρέπει να κατασκευαστεί το υπολογιστικό πλέγμα. Αυτό γίνεται αυτόματα στο πρόγραμμα turbogrid από την στιγμή που εισάγονται συγκεκριμένα στοιχεία.

Συγκεκριμένα ορίστηκε ο αριθμός των υπολογιστικών στοιχείων στο πλέγμα. Επιλέχθηκε παράγοντας πύκνωσης του πλέγματος κοντά στο πτερύγιο. Στην συνέχεια επιλέχθηκε πλέγμα της τάξης των 250000 υπολογιστικών στοιχείων, για την πρώτη επίλυση και στην συνέχεια αυξάνονται τα υπολογιστικά στοιχεία ώστε να επιτευχθεί η ανεξαρτησία της λύσης. Στις εικόνες 45 και 46 παρουσιάζεται το υπολογιστικό πλέγμα.



Εικόνα 45,46. Το τριδιάστατο πλέγμα.

2.3.3 Μοντελοποίηση MRF (moving reference frames)

Το ansys fluent επιλύει όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο εξισώσεις μεταφοράς και ενέργειας και για κινούμενες επιφάνειες και όγκους ελέγχου. Στη συγκεκριμένη μελέτη υπάρχουν κινούμενα μέρη, ο δρομέας του στροβίλου, ο όγκος του ρευστού που περιβάλλει την πτερωτή και το κομμάτι της πλήμνης και της στεφάνης που είναι πακτωμένος ο δρομέας. Το πρόβλημα μοντελοποιείται θεωρώντας, σταθερή τη ροή (steady state).

Τα συγκεκριμένα μέλη του στροβίλου που αναφέρθηκαν εκτελούν περιστροφική κίνηση. Η ταχύτητα είναι ορισμένη και σταθερή στις 400 rpm. Ορίζεται ο όγκος ελέγχου με το όνομα passage-main και ότι περιστρέφεται με αυτήν την ταχύτητα και όλα τα υπόλοιπα μέλη να εκτελούν σχετική κίνηση σε σχέση με αυτόν, με άξονα περιστροφής τον Y. Στις ζώνες

ελέγχου που ορίστηκε περιστροφική κίνηση ενεργοποιούνται οι παρακάτω τροποποιημένες εξισώσεις μεταφοράς .

Διατήρηση μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{v}_r = 0 \quad 2.27$$

Διατήρηση ορμής

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \rho \vec{v} + \nabla ((\rho \vec{v}_r \vec{v})) + \rho [\vec{\omega} \times (\vec{v} - \vec{v}_r)] = -\nabla p + \nabla \vec{\tau} + \vec{F} \quad 2.28$$

Η ταχύτητα με δείκτη r είναι η μετασχηματισμένη ταχύτητα από το σταθερό πεδίο αναφοράς στο κινούμενο με τον παρακάτω τρόπο.

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \vec{u}_r \quad 2.29$$

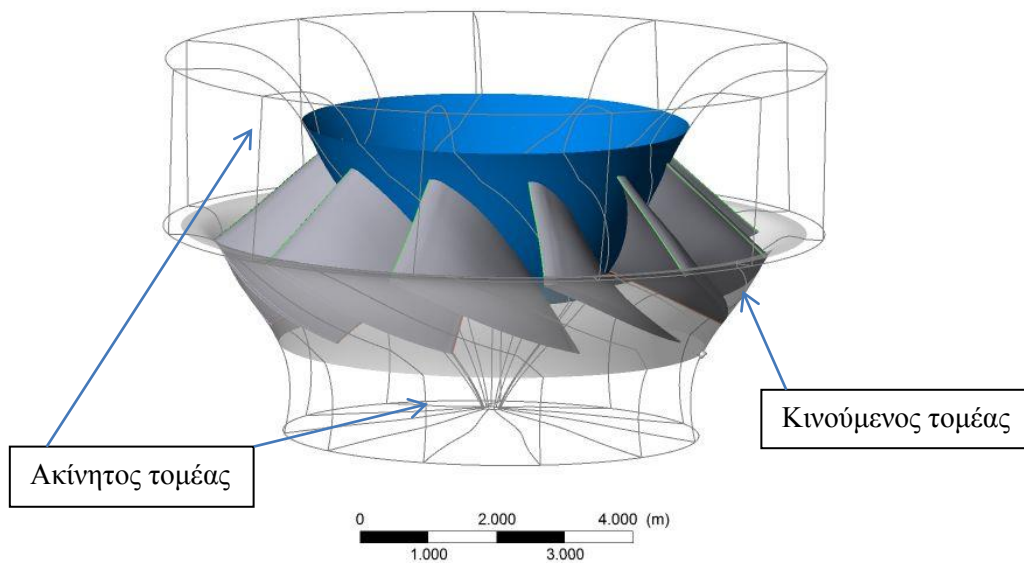
Όπου

$$\vec{u}_r = \vec{v}_t + \vec{\omega} \times \vec{r} \quad 2.30$$

Με \vec{v}_r συμβολίζεται η σχετική ταχύτητα που την αντιλαμβάνεται κάποιος εάν τοποθετηθεί επάνω στο περιστρεφόμενο πεδίο. Η \vec{v} είναι η απόλυτη ταχύτητα με αναφορά το σταθερό πεδίο. Η \vec{u}_r είναι η ταχύτητα του περιστρεφόμενου πεδίου, σχετικά με το αδρανειακό πεδίο αναφοράς. Τέλος ο όρος $\vec{v}_t + \vec{\omega} \times \vec{r}$ είναι η μεταφορική κίνηση συν την περιφερειακή ταχύτητα.

Η διεπιφάνεια που χωρίζει τις δύο καταστάσεις στους περιστρεφόμενους και τους ακίνητους όγκους αναφοράς όταν χρησιμοποιείται το απόλυτο σύστημα αναφοράς δεν χρησιμοποιεί κάποιον ειδικό μετασχηματισμό.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν πολλές επιφάνειες που περιστρέφονται και πολλές που μένουν ακίνητες. Το Ansys Fluent δημιουργεί διεπιφάνειες που συνδέουν τα κινητά μέρη με τα ακίνητα. Εφόσον η ταχύτητα περιστροφής είναι σταθερή στα κινούμενα μέρη προστίθεται η γωνιακή συχνότητα του στροβίλου. Στην εικόνα 47 παρουσιάζονται τα κινούμενα και τα ακίνητα μέρη.



Εικόνα 47. Απεικόνιση των κινούμενων και ακίνητων τομέων.

Το Ansys Fluent χρησιμοποιεί τις τροποποιημένες εξισώσεις μεταφοράς που παρουσιάστηκαν ως εξής. Θεωρείται ένα σύστημα συντεταγμένων το οποίο εκτελεί μεταφορική κίνηση αλλά επίσης περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα γύρω από ένα άλλο σύστημα συντεταγμένων που μένει σταθερό. Το σταθερό σύστημα συντεταγμένων αποτελεί σύστημα αναφοράς για το περιστρεφόμενο.

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε απόλυτο σύστημα αναφοράς. Η διαφορά του με το σχετικό μοντέλο αναφοράς είναι ότι το περιβάλλον ρευστό γύρω από το περιστρεφόμενο όγκο κινείται σχετικά με αυτόν ενώ στο απόλυτο σύστημα όχι. Υπάρχει επίσης μία διεπιφάνεια (interface) που γίνεται η μετάβαση των εξισώσεων ανάμεσα στα κινούμενα και ακίνητα πεδία. Στο απόλυτο σύστημα αναφοράς δεν υπάρχει η συγκεκριμένη διεπιφάνεια.

2.3.4 Ανεξαρτησία πλέγματος

Όπως και προηγουμένως στο διδιάστατο πλέγμα έτσι και τώρα πρέπει να πραγματοποιηθεί έλεγχος της ανεξαρτησίας της λύσης από το υπολογιστικό πλέγμα

Επιλέγεται μία παράμετρος και πραγματοποιείται έλεγχος της συμπεριφοράς της για διαφορετικά υπολογιστικά πλέγματα.

Η παράμετρος που επιλέχθηκε είναι ο υδραυλικός βαθμός απόδοση και υπολογίζεται ως παρακάτω.

$$n_h = \frac{M\omega}{Q(H_{01}-H_{02})} \quad 2.31$$

Όπου M η ροπή στο δρομέα

Q η παροχή

H_{01} και H_{02} οι ολικές πιέσεις στην είσοδο και την έξοδο του δρομέα

. Εξετάζονται πέντε περιπτώσεις για το αρχικό σημείο λειτουργίας.

- Παροχή $Q=1,702 \text{ m}^3/\text{s}$
- $\Omega=40 \text{ r/s}$

Εφόσον το εμβαδόν είναι.

$$A = 0,826$$

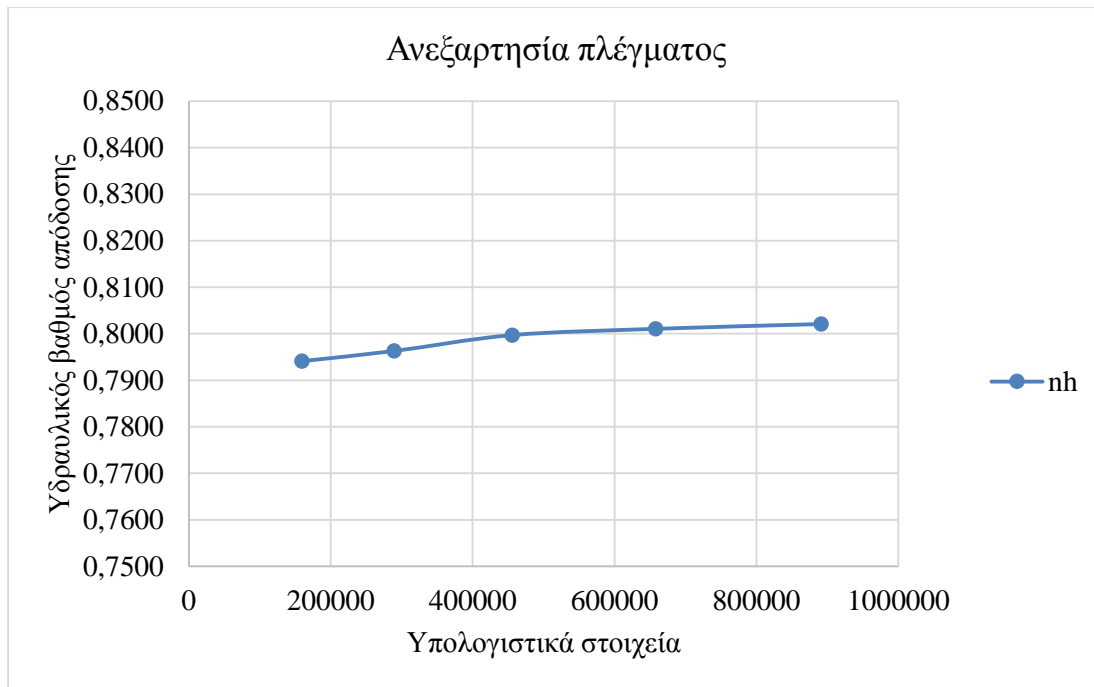
Τότε η ακτινική ταχύτητα θα είναι $C_r = \frac{Q}{A} = 2,06 \text{ m/s}$

Έχοντας υπολογίσει και την αρχική γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $a_{2d} = 37,77$ μοίρες εισάγεται η εφαιπτομενική ταχύτητα.

$$C_u = \frac{C_r}{\tan a_{2d}} = 6,66 \text{ m/s}$$

Η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου θα είναι η παραπάνω και θα μείνει σταθερή για όλους τους υπολογισμούς.

Υπολογιστικά στοιχεία	Υδραυλικός βαθμός απόδοσης
159596	0,7941
289408	0,7963
456008	0,7997
657832	0,8011
891140	0,8021



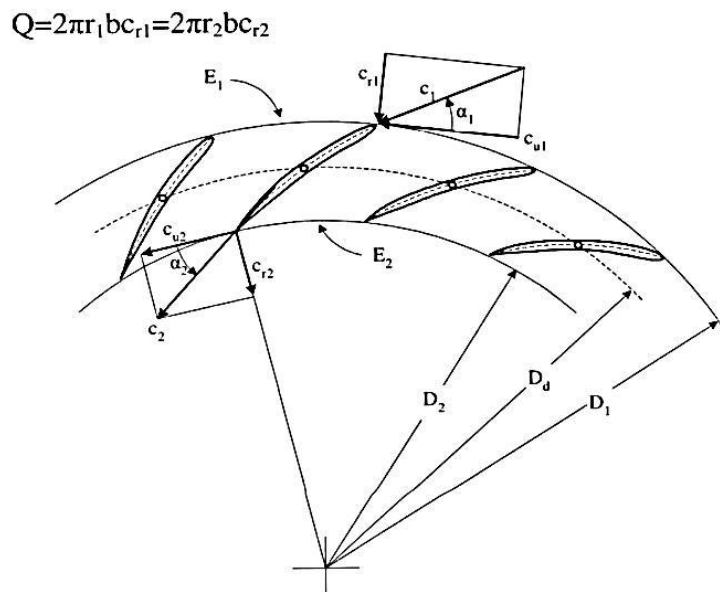
Παρατηρείται ότι με την επιλογή του υπολογιστικού πλέγματος με τα 450.000 υπολογιστικά στοιχεία περίπου υπάρχει ανεξαρτησία της λύσης. Επίσης ο υπολογιστικός χρόνος είναι μικρότερος με κάποιο πλέγμα με περισσότερα στοιχεία.

Στο συγκεκριμένο πλέγμα πραγματοποιούνται όλοι οι υπολογισμοί και ο παραμετρικός έλεγχος.

2.3.5 Παραμετροποίηση

Σε αυτήν την ενότητα αναλύεται η παραμετροποίηση του υδροστροβίλου. Έχει ήδη επιλεγθεί το υπολογιστικό πλέγμα οπότε στην συνέχεια επιλύεται η ροή για διάφορες περιπτώσεις έτσι ώστε να κατασκευαστεί το διάγραμμα διπλής ρύθμισης υδραυλικού βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου, για τρεις γωνίες δρομέα και τρεις γωνίες ρυθμιστικών πτερυγίων.

Το διάγραμμα διπλής ρύθμισης υδραυλικού βαθμού απόδοσης δείχνει την συμπεριφορά του υδροστροβίλου σε μεταβλητό φορτίο. Κρατώντας σταθερές τις στροφές περιστροφής λειτουργίας μεταβάλλεται η γωνία των ρυθμιστικών πτερυγίων.



Εικόνα 48. Απεικόνιση των ρυθμιστικών περυγίων.
(πηγή: «Υδροδυναμικές μηχανές, αντλίες –υδροστρόβιλοι»,(2009) Παπαντώνης Δ.Ε.)

Το άνοιγμα των ρυθμιστικών περυγίων απεικονίζεται στην εικόνα 48. Αυξάνει και μειώνει αντίστοιχα την παροχή μέσω της στεφάνης ρύθμισης. Η παροχή που διέρχεται μέσω των περυγίων βάση της εξίσωσης της συνέχειας είναι.

$$Q = 2\pi r b c_r$$

Η διατομή εισόδου είναι σταθερή. Δοκιμάζονται παροχές στην συνέχεια μέχρι να βρεθεί ο μέγιστος βαθμός υδραυλικής απόδοσης για τρεις διαφορετικές ρυθμίσεις. Η γωνία δρομέα διατηρείται σταθερή και αρχικά βρίσκονται οι μέγιστοι υδραυλικού βαθμοί απόδοσης κάθε γωνίας ρυθμιστικών περυγίων. Στην συνέχεια επαναλαμβάνεται η διαδικασία για άλλες δύο γωνίες δρομέα. Η περιβάλλουσα των τιμών ενώνει τους μέγιστους βαθμούς και εκφράζει το βέλτιστο συνδυασμό γωνίας δρομέα και γωνίας ρυθμιστικών περυγίων.

Τα ρυθμιστικά περύγια δίνουν την τελική τιμή της συστροφής πριν μπει το νερό στον δρομέα. Αυτό το δεδομένο το εισάγεται ως εξής.

Ισχύει:

$$c_{u1} = \frac{c_{r1}}{\tan \alpha_{2d}} \quad 2.32$$

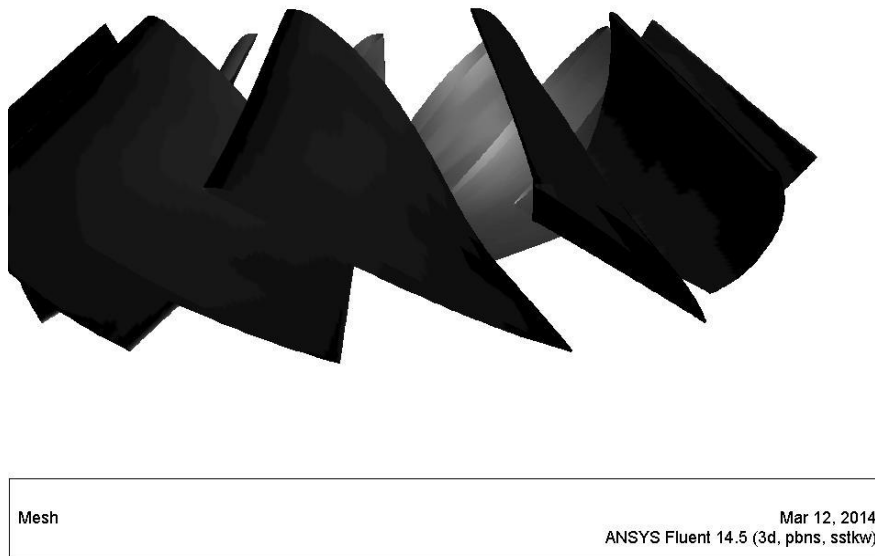
Η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας είναι γνωστή εφόσον ορίζεται από την παροχή.

$$c_{r1} = \frac{Q}{A_{tot}} \quad 2.33$$

Το A_{tot} είναι το συνολικό εμβαδό της μηχανής.

Ο δρομέας μεταβάλλει την γωνία του σύμφωνα με απαραίτητες ρυθμίσεις που έχουν γίνει στο turbogrid. Περιστρέφεται το περύγιο του δρομέα και όπως είναι φυσικό επόμενο η παροχή αυξάνει ή μειώνει. Αναμένεται μειώνοντας τις γωνίες να διέρχονται μικρότερες παροχές και αυξάνοντας τις γωνίες μεγαλύτερες.

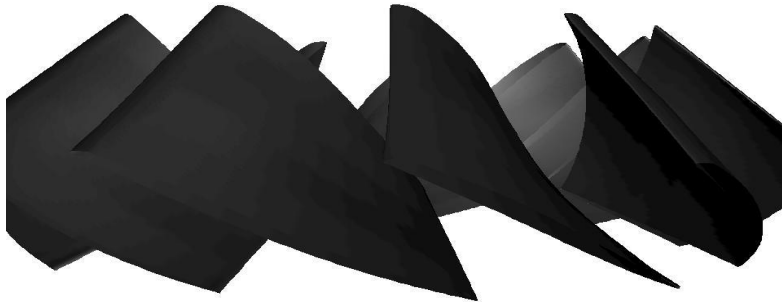
Δρομέας $\gamma=+5$ μοίρες



Εικόνα 49. Δρομέας με κλίση πτερυγίων $\gamma=+5$ μοίρες .

Παρατηρούμε στην εικόνα 49 ότι το άνοιγμα του δρομέα είναι αρκετά μεγάλο, πράγμα που σημαίνει ότι αντίστοιχα οι παροχές είναι μεγάλες και οι γωνίες των ρυθμιστικών πτερυγίων είναι επίσης και αυτές στα μέγιστα όρια σχεδιασμού.

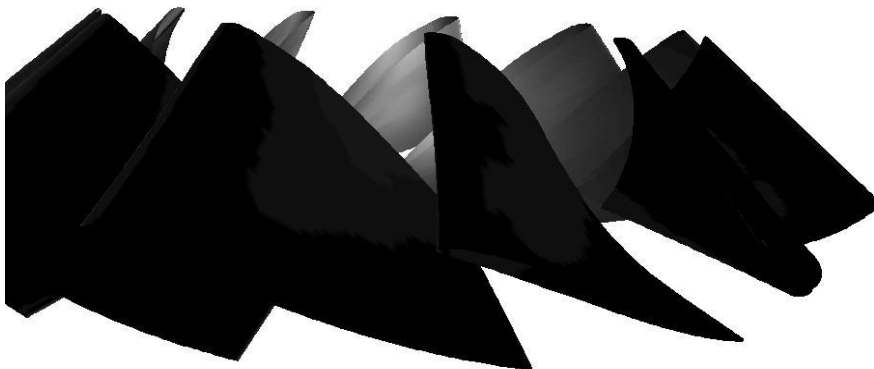
Δρομέας $\gamma=0$ μοίρες



Εικόνα 50. Δρομέας με κλίση πτερυγίων $\gamma=+0$ μοίρες .

Παρατηρούμε στην εικόνα 50 ότι το άνοιγμα του δρομέα βάση της αρχικής σχεδίασης. Οι παροχές είναι κοντά στο σημείο σχεδιασμού του πτερυγίου του υδροστροβίλου. Παράλληλα ελέγχονται και άλλες γωνίες των ρυθμιστικών πτερυγίων..

Δρομέας $\gamma= -5$ μοίρες



Εικόνα 51. Δρομέας με κλίση πτερυγίων $\gamma=-5$ μοίρες .

Στην εικόνα 51 παρατηρείται ότι η γωνία του δρομέα έχει μειωθεί άρα η διερχόμενη παροχή είναι σχετικά μικρότερη των προηγούμενων.

2.3.6 Οριακές Συνθήκες

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται οι οριακές συνθήκες. Οι διαφορετικές παροχές ορίζουν κάθε φορά από τον γνωστό τύπο $Q=UA$ την ακτινική συνιστώσα. Ύστερα από τον τύπο $Cu=Cr/\tan\alpha_{2d}$ ορίζεται η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας.

Παράδειγμα υπολογισμού ταχυτήτων.

Για την περίπτωση γωνίας δρομέα $\gamma=0$ μοίρες και ρυθμιστικά πτερύγια $\alpha=30$ μοίρες ορίζεται για την προσομοίωση παροχή:

$$Q = 1,80 \text{ m}^3/\text{s}$$

Η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητα υπολογίζεται:

$$Cr = \frac{Q}{A} = 2,180 \text{ m/s}$$

Η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας που επιβάλλουν τα ρυθμιστικά πτερύγια $\alpha=40^\circ$:

$$Cm = \frac{Cr}{\tan 40} = 3,776 \text{ m/s}$$

Η πίεση αναφοράς στην έξοδο του δρομέα που απαιτείται ορίζεται $P_{\text{reff}}=0$ Pa.

Η ταχύτητα περιστροφής είναι $\omega=400$ r/s.

Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με το μοντέλο $k-\omega$ sst (shear stress transfer), με δευτέρας τάξης εξισώσεις. Σε κάθε προσομοίωση όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας αρχικώς χρησιμοποιήθηκαν πρώτης τάξης ακρίβειας για να απαλειφθούν οι μεταβατικές καταστάσεις και μετά δευτέρας τάξης. Οι επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν 5000 σε κάθε προσομοίωση επιτυγχάνοντας σύγκλιση.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα και η αξιολόγησή τους.

2.3.7 Έλεγχος της επίλυσης

Ένας επιμέρους έλεγχος που πραγματοποιείται για την εξέταση της ποιότητας της λύσης είναι ο έλεγχος της διακύμανσης της τιμής του y^+ στις επιφάνειες των στερεών ορίων του υδροστροβίλου για τις διάφορες περιπτώσεις.

Εξετάζονται οι περιπτώσεις των μέγιστων βαθμών υδραυλικής απόδοσης.

Το y^+ (y plus) είναι η αδιάστατη απόσταση από στερεό όριο και έχει τον παρακάτω τύπο.

$$y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \tag{2.34}$$

Όπου u_* είναι η ταχύτητα τύρβης στον τοίχο, y είναι η απόσταση από τον τοίχο και ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Η ταχύτητα τύρβης από διαστατική ανάλυση προκύπτει ως εξής.

$$u_* = \sqrt{\frac{t_w}{\rho}} \quad 2.35$$

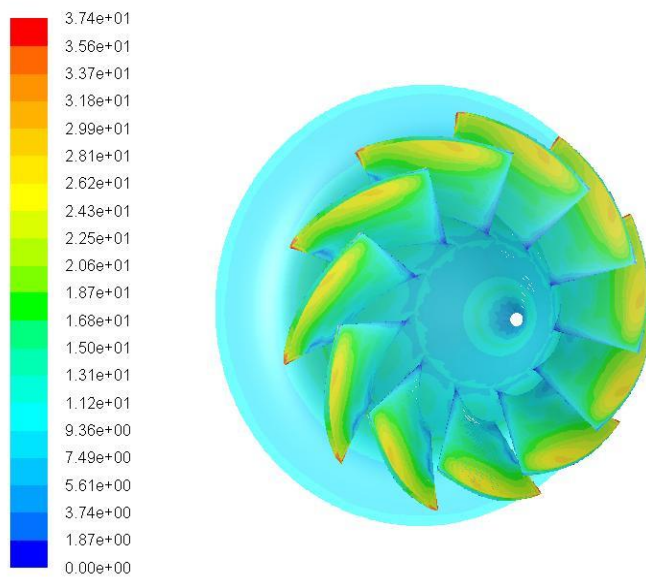
Ο όρος t_w είναι κατά τα γνωστά η διατμητική τάση ρευστού και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$t_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \quad 2.36$$

Οι τιμές του y^+ εξαρτώνται από την πυκνότητα του πλέγματος και του αριθμού Reynolds της ροής. Από τον οδηγό του fluent για μόνιμη ροή το y^+ οφείλει να βρίσκεται στην λογαριθμική περιοχή οριακού στρώματος μεταξύ των τιμών $30 < y^+ < 300$ με προτίμηση στις χαμηλές τιμές.

Παρουσιάζεται για κάθε περίπτωση που αναφέρθηκε τις τιμές του y^+ .

Δρομέας $y^+=5$ μοιρών

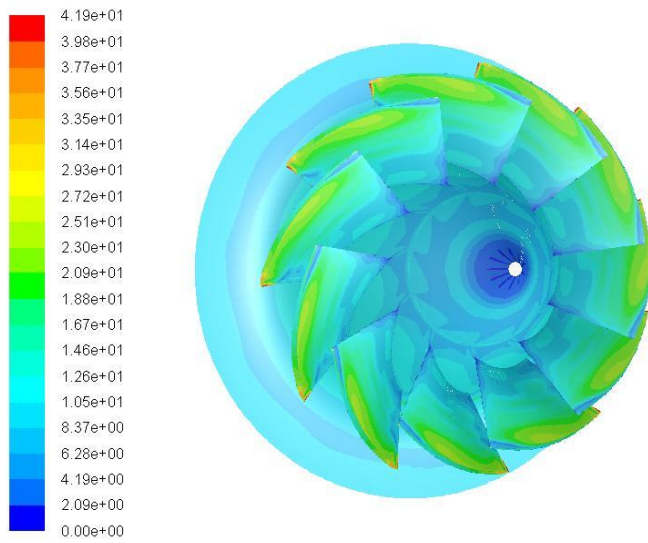


Contours of Wall Yplus Apr 10, 2014
ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, sstk)

Εικόνα 52. Το y^+ από την μεριά των πτερυγίων και της πλήμνης.

Παρατηρείται στην εικόνα 52 ότι η τιμή του y^+ φτάνει στο $y^+=37,4$ στη μέγιστη τιμή ενώ ο μέσος όρος του είναι αρκετό χαμηλότερος. Με βάση την ανάλυση που αναφέρθηκε η λύση είναι αποδεκτή.

Δρομέας $\gamma=0$ μοιρών



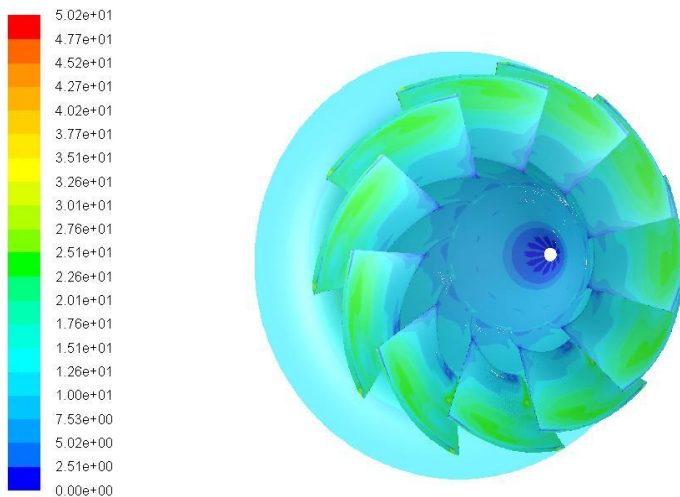
Contours of Wall Yplus

Apr 10, 2014
ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, sstk)

Εικόνα 53. Το y^+ από την μεριά των πτερυγίων και της πλήμνης.

Παρατηρείται στην εικόνα 53 ότι η τιμή του y^+ φτάνει στο $y^+=41,9$ στη μέγιστη τιμή. Η λύση είναι αποδεκτή.

Δρομέας $\gamma=-5$ μοιρών



Contours of Wall Yplus

Apr 10, 2014
ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, sstk)

Εικόνα 54. Το y^+ από την μεριά των πτερυγίων και της πλήμνης.

Παρατηρείται στην εικόνα 54 ότι η τιμή του y^+ φτάνει στο $y^+=50,2$ στη μέγιστη τιμή. Η λύση είναι αποδεκτή.

Κεφάλαιο 3

Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων

3.1 Υδραυλικός βαθμός απόδοσης

3.1.1 Τύποι που χρησιμοποιήθηκαν

Σε αυτό το σημείο περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας για τον υπολογισμό αποτελεσμάτων. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για την κατασκευή της καμπύλης διπλής ρύθμισης του υδραυλικού βαθμού απόδοσης επιλύεται η ροή με το πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής ansys fluent.

Σε όλες τις περιπτώσεις υπολογίστηκε ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης και επιλέχθηκε να κρατηθεί ο μέγιστος για κάθε γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων και για τρεις γωνίες δρομέα. Υπολογίστηκε επίσης η ροπή στον δρομέα, το υδραυλικό ύψος λειτουργίας και η ισχύ που αποδίδει ο υδροστρόβιλος.

Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής.

Υδραυλικός βαθμός απόδοσης:

$$n_h = \frac{M\omega}{(H_{in,tot} - H_{out,tot})Q} \quad 3.1$$

Η ροπή υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση από το πρόγραμμα, όπως και οι ολικές πιέσεις στην είσοδο και την έξοδο του δρομέα. Οι στροφές του δρομέα είναι σταθερές και ίσες με 40 r/s.

Η ισχύς στον δρομέα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$N = M\omega \quad 3.2$$

Υδραυλικό ύψος λειτουργίας:

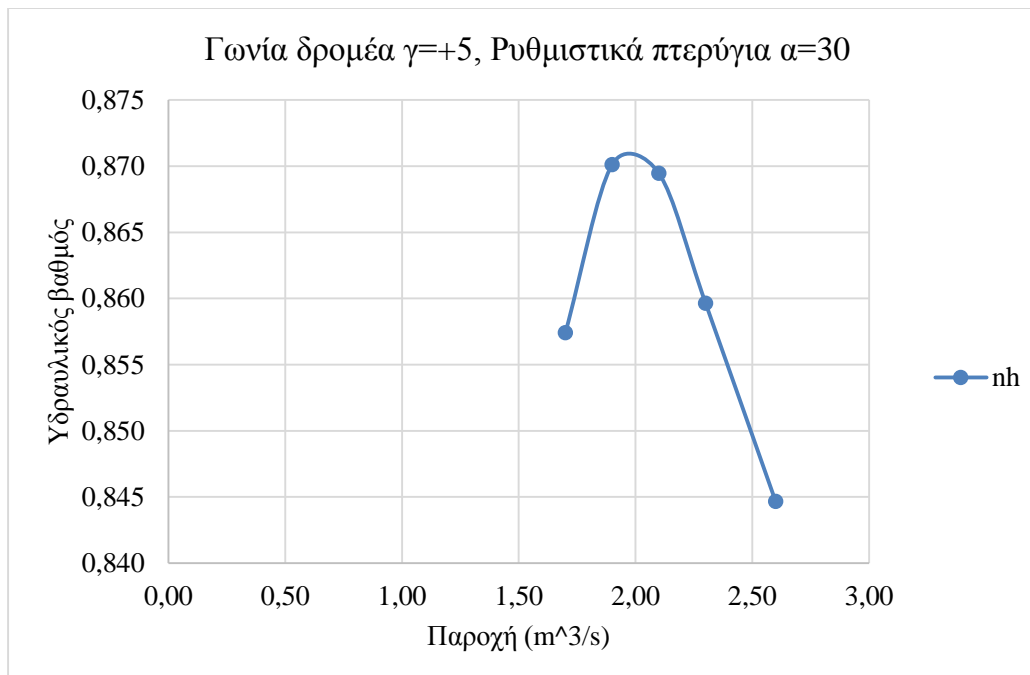
$$H_{in,tot} - H_{out,tot} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad 3.3$$

3.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

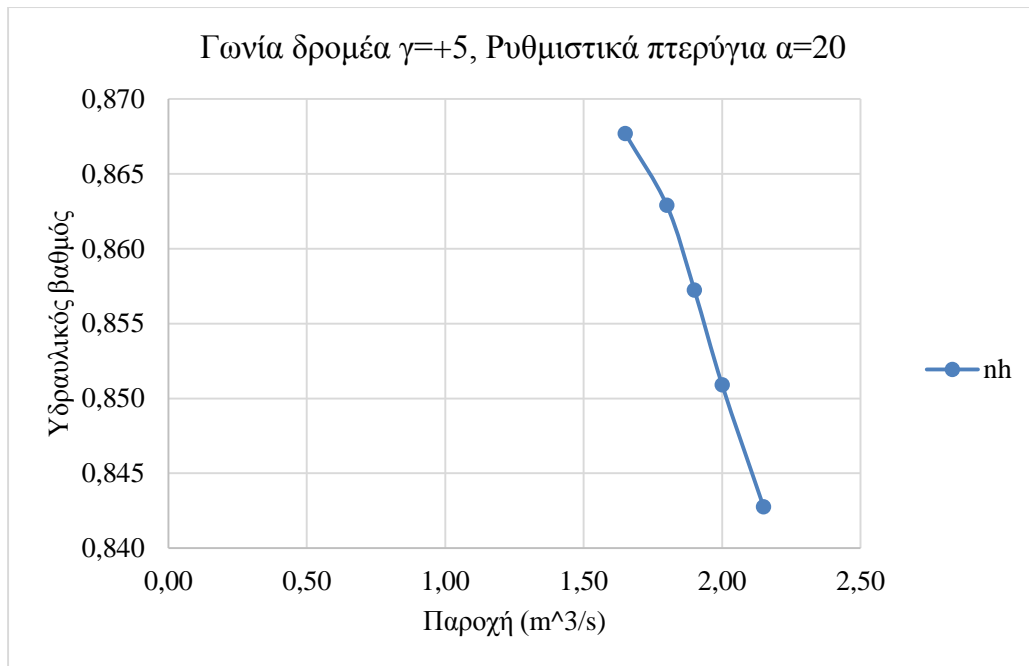
Παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος εύρεσης των μέγιστων σημείων για κάθε γωνία δρομέα και γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων. Ελέγχονται διαφορετικές παροχές και υπολογίζεται ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης.



Στο παραπάνω διάγραμμα ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι $nh=0,865$



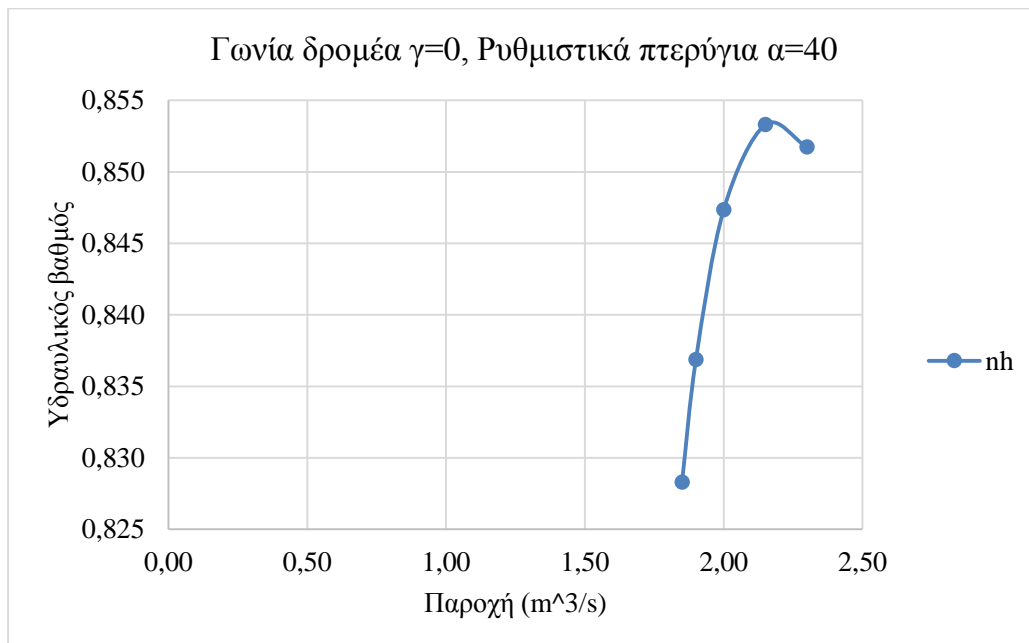
Στο παραπάνω διάγραμμα ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι $nh=0,870$



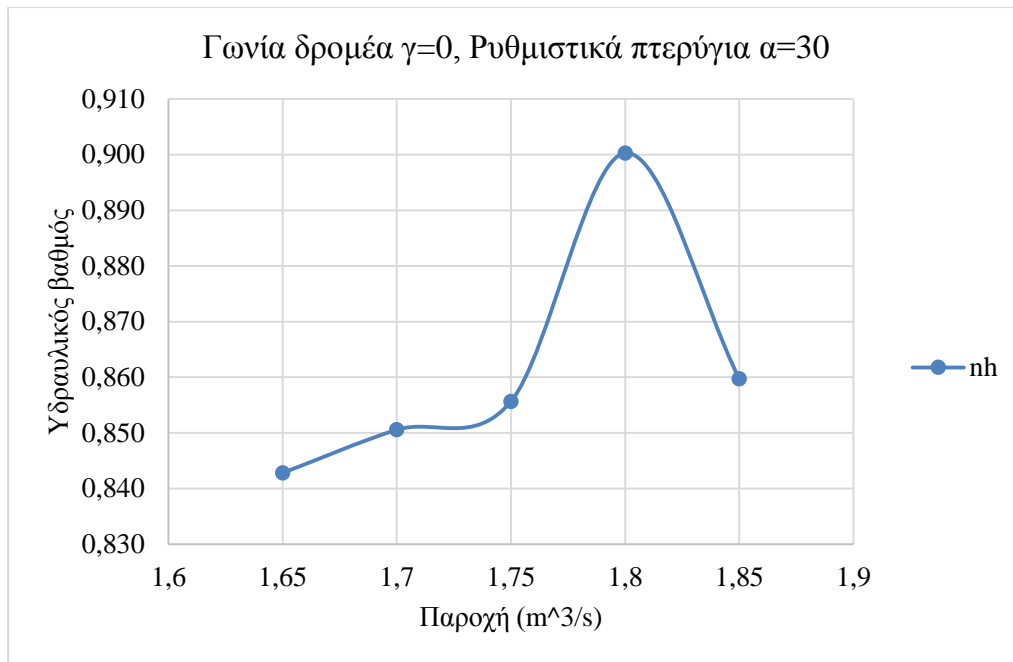
Στο παραπάνω διάγραμμα ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι $nh=0,868$

Διαπιστώνεται ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης για κλίση δρομέα $\gamma=+5$ μοίρες επιτυγχάνεται για κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha= 20$ μοίρες και έχει την τιμή $nh=0,870$.

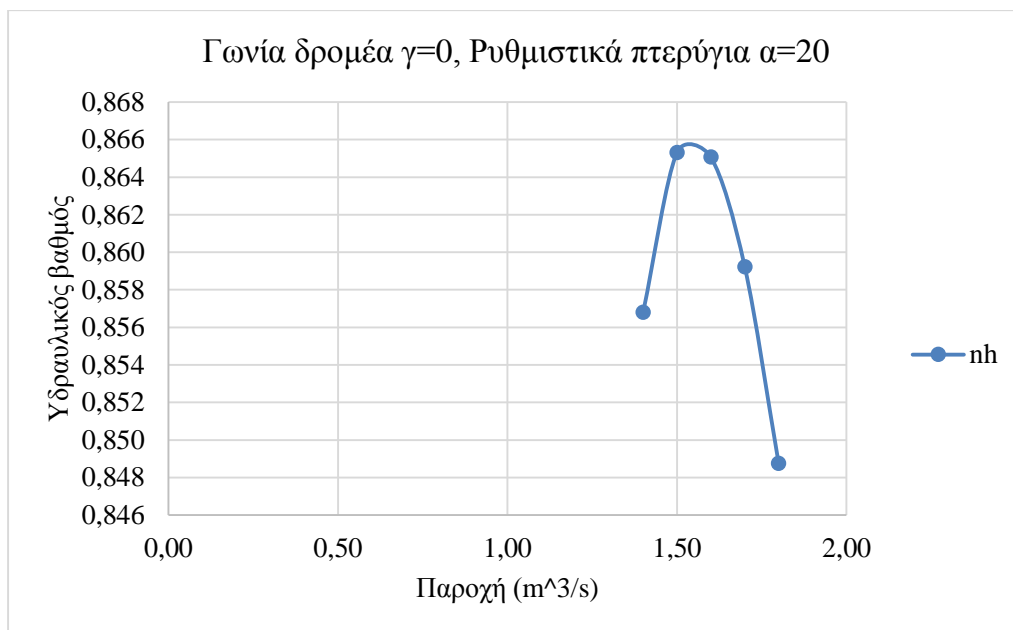
Στην συνέχεια ακολουθούν όμοια διαγράμματα για γωνία δρομέα $\gamma=0$ μοίρες.



Στο παραπάνω διάγραμμα ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι $nh=0,853$



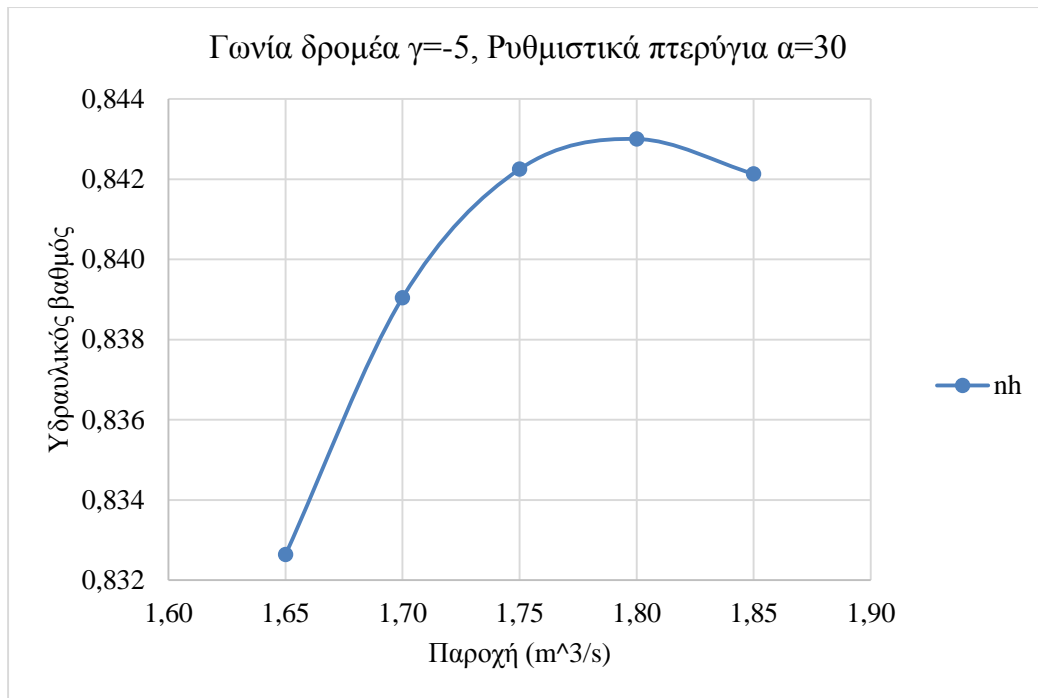
Στο παραπάνω διάγραμμα ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι $nh=0,900$



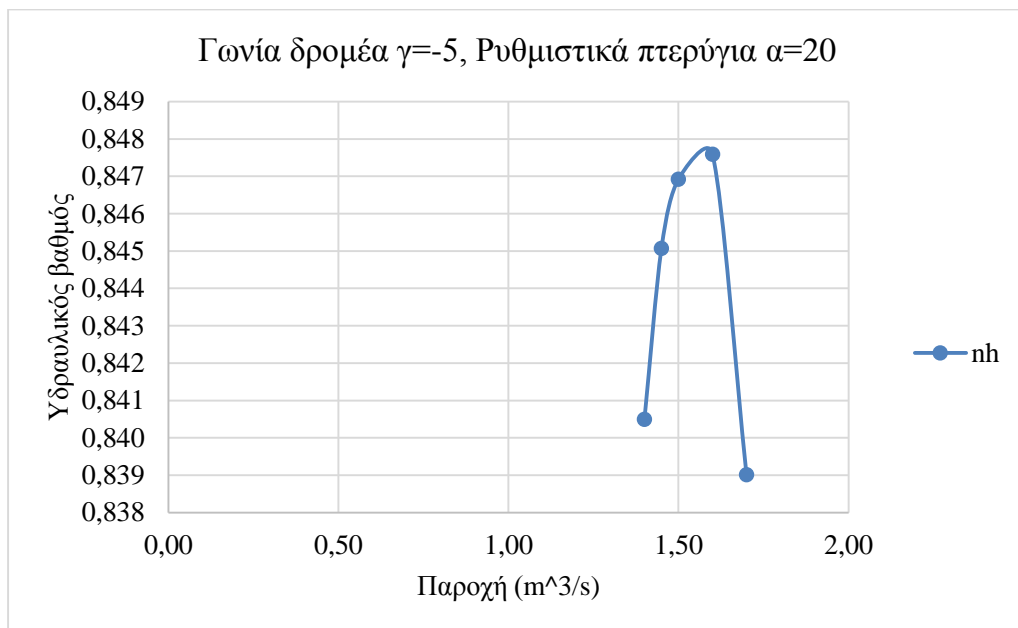
Στο παραπάνω διάγραμμα ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι $nh=0,865$

Διαπιστώνεται ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης για κλίση δρομέα $\gamma=0$ μοίρες επιτυγχάνεται για κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha= 30$ μοίρες και έχει την τιμή $nh=0,900$.

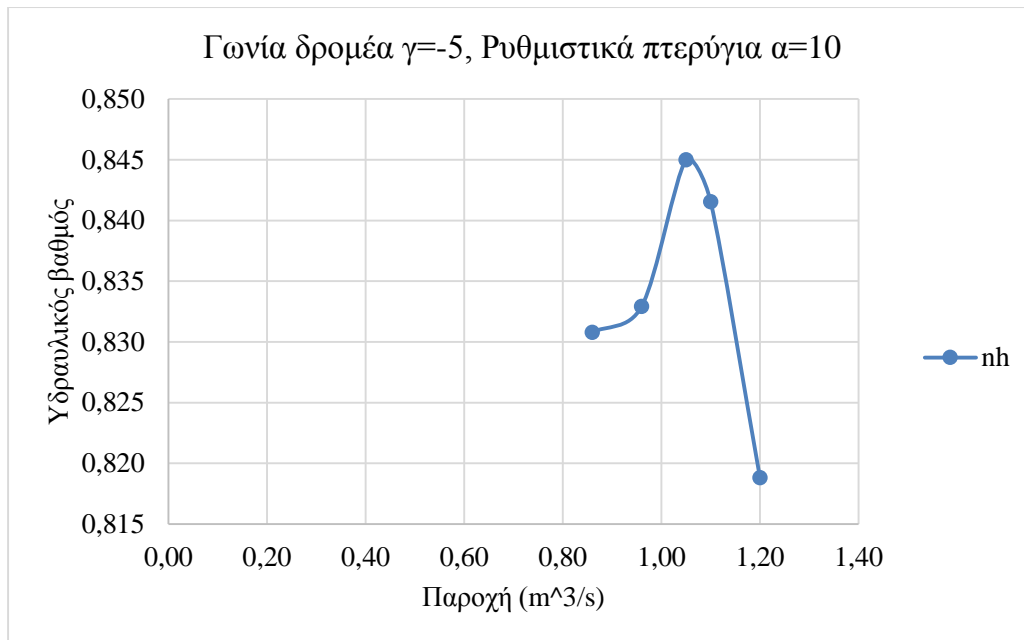
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα για γωνία δρομέα $\gamma=-5$ μοίρες.



Στο παραπάνω διάγραμμα ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι $nh=0,843$



Στο παραπάνω διάγραμμα ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι $nh=0,848$

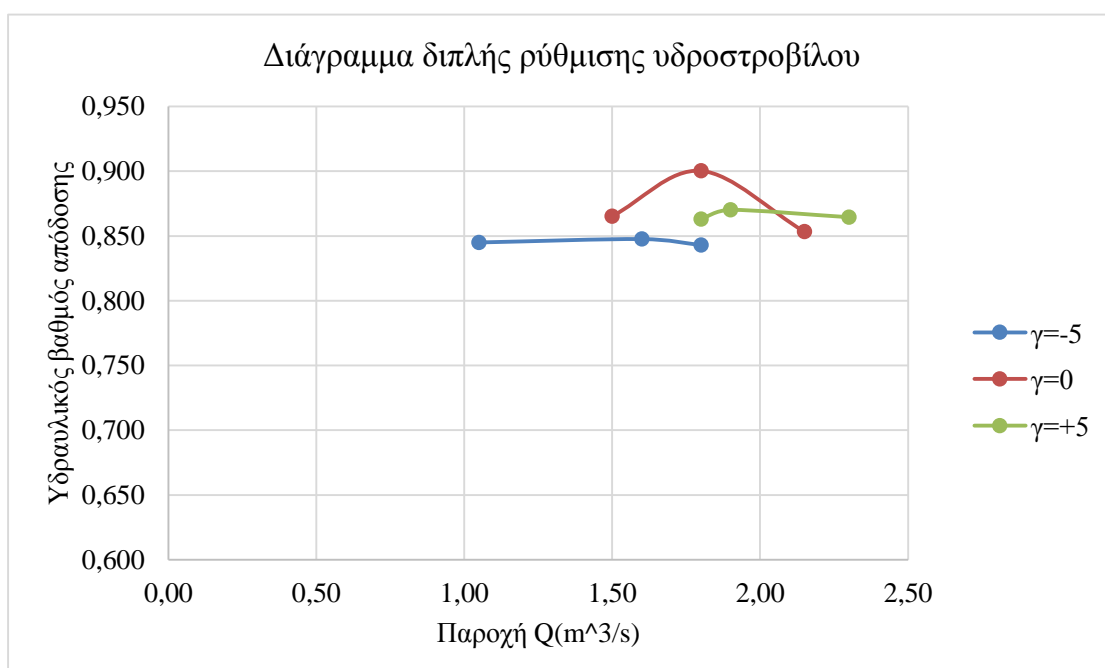


Στο παραπάνω διάγραμμα ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι $nh=0,845$

Διαπιστώνεται ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης για κλίση δρομέα $\gamma=-5$ μοίρες επιτυγχάνεται για κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha= 20$ μοίρες και έχει την τιμή $nh=0,848$.

Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος σε σχέση με βιβλιογραφικές μελέτες [1]. Βασικός λόγος είναι ότι στην συγκεκριμένη μοντελοποίηση δεν χρησιμοποιήθηκε αγωγός απαγωγής του ρευστού.

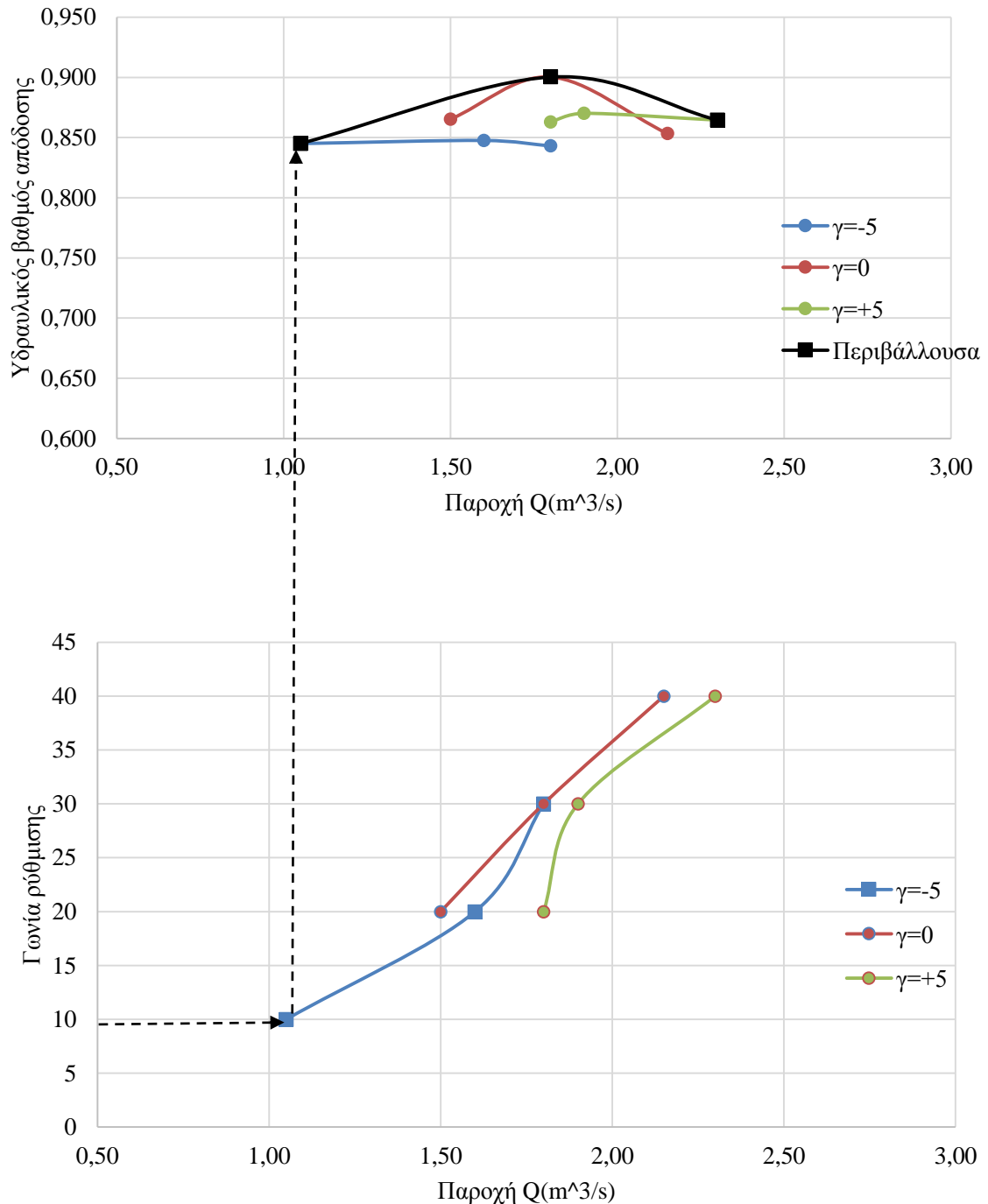
Ακολουθεί το διάγραμμα διπλής ρύθμισης του υδροστροβίλου υδραυλικού βαθμού απόδοσης.



Ενώνοντας τον μέγιστο υδραυλικό βαθμό απόδοσης με την υδραυλική απόδοση στις ακραίες παροχές κατασκευάζεται η περιβάλλουσα των τιμών και εκφράζει την ποιοτική συμπεριφορά του υδραυλικού βαθμού απόδοσης.

Παρουσιάζεται το ίδιο διάγραμμα με την περιβάλλουσα.

Διάγραμμα διπλής ρύθμισης υδροστροβίλου



Η φορά του βέλους δείχνει πως η γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων αντιστοιχεί στον κάθε βαθμό υδραυλικής απόδοσης, σε σχέση με την αντίστοιχη γωνία δρομέα.

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει πως μεταβάλλεται ποιοτικά ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει του συνδυασμού της κλίσης του δρομέα και του ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων. Διαπιστώνεται ότι έχει καλή προσαρμογή σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος παροχών που επιτυγχάνεται η καλή απόδοση του υδροστροβίλου.

Παρατηρείται ότι για γωνία δρομέα $\gamma=0^0$ και γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=30^0$ επιτυγχάνεται ο μέγιστο βαθμό υδραυλικής απόδοσης $\eta_h = 0,90$. Συμπέρασμα είναι ότι στην γειτονική περιοχή ο υδροστρόβιλος παρουσιάζει την βέλτιστη λειτουργία.

Στην περίπτωση της κλίσης γωνίας πτερυγίων δρομέα $\gamma=-5$ μοίρες μειώθηκε η διερχόμενη παροχή, μεταβαίνοντας και σε μικρότερες κλίσεις ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=10$ μοιρών. Ο λόγος είναι ότι η διερχόμενη παροχή μέσω του δρομέα είναι σταθερή άρα εφόσον μειώνεται η διατομή του οι ταχύτητες μικραίνουν. Η καλύτερη συμπεριφορά του άρα εξασφαλίζεται σε μικρότερες τιμές παροχής για να αντισταθμιστεί η μείωση της παροχής.

Η δυνατότητα διπλής ρύθμισης δίνει στον υδροστρόβιλο *DeGiaz* συγκριτικό πλεονέκτημα. Για σταθμό με υδραυλικότητα που ποικίλει είναι κατάλληλος καθώς η διπλή ρύθμιση, δίνει τη δυνατότητα για βέλτιστη λειτουργία σε διάφορα φορτία.

3.2 Παρουσίαση ελέγχων

3.2.1 Έλεγχος για σπηλαίωση

Όπως αναφέρθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο η σπηλαίωση είναι ένα φαινόμενο που απειλεί την καλή λειτουργία του υδροστροβίλου. Η πιθανή ανάπτυξη του φαινομένου της σπηλαίωσης γίνεται στα σημεία όπου η στατική πίεση είναι χαμηλή. Συμπέρασμα είναι ότι η πλευρά του πτερυγίου χαμηλής πίεσης είναι μια από τις περιοχές ενδιαφέροντος.

Για την αποφυγή της συστηματικής σπηλαίωσης πρέπει να ισχύει η συνθήκη:

$$P_M > P_S \quad 3.4$$

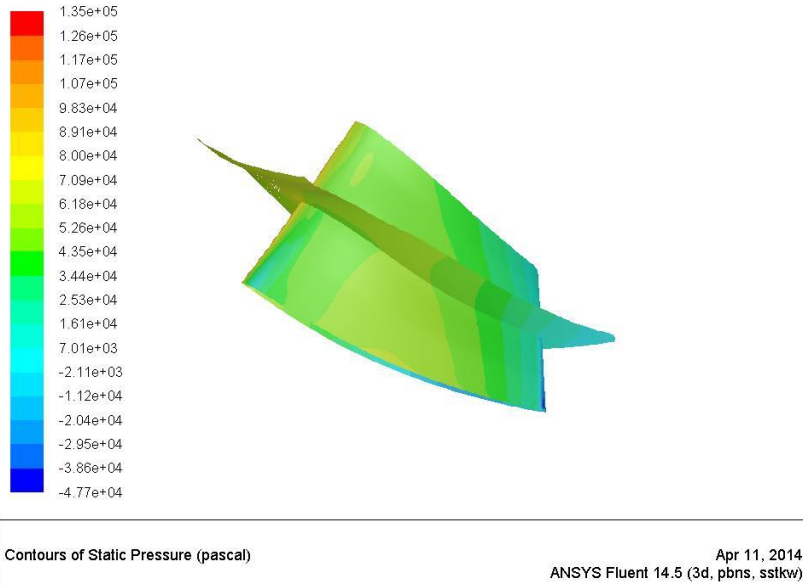
Όπου P_M το σημείο στην πλευρά του πτερυγίου με την χαμηλότερη πίεση.

Η p_s είναι η πίεση ατμοποίησης του υγρού. Για νερό θερμοκρασίας 20 βαθμών κελσίου από πίνακα βλέπουμε ότι η $p_s=0,023368$ bar

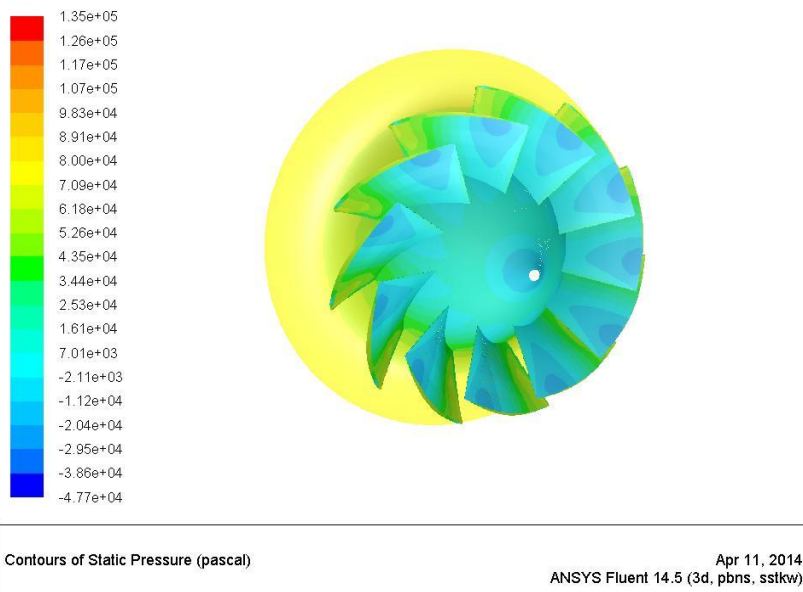
Για κάθε περίπτωση ξεχωριστά παρατηρείτε:

Γωνία δρομέα $\gamma=+5$

Γωνία ρυθμιστικών περυγίων $\alpha=30$ μοίρες



Εικόνα 55 Η κατανομή της στατικής πίεσης στο περύγιο και στο κέντρο της ροής.

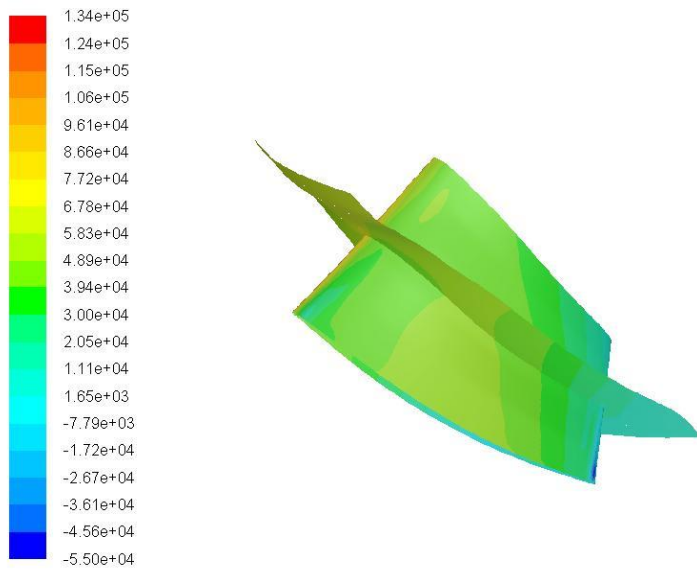


Εικόνα 56. Η στατική πίεση στα περύγια και στην πλήμνη.

Στην εικόνα 55 απεικονίζεται η διακύμανση της στατικής πίεσης στο περύγιο και στο κέντρο της ροής. Σύμφωνα με το manual του fluent σε όποιο σημείο παρουσιάζεται στατική πίεση κάτω της ατμοσφαιρικής και εφόσον η πίεση λειτουργίας είναι $P_{operation}=0$ Pa τότε υπάρχει σπηλαιώση. Στην εικόνα 56 εντοπίζεται μία μικρή περιοχή στην πλευρά της υποπίεσης του περυγίου με χαμηλή στατική πίεση.

Γωνία δρομέα $\gamma=0$

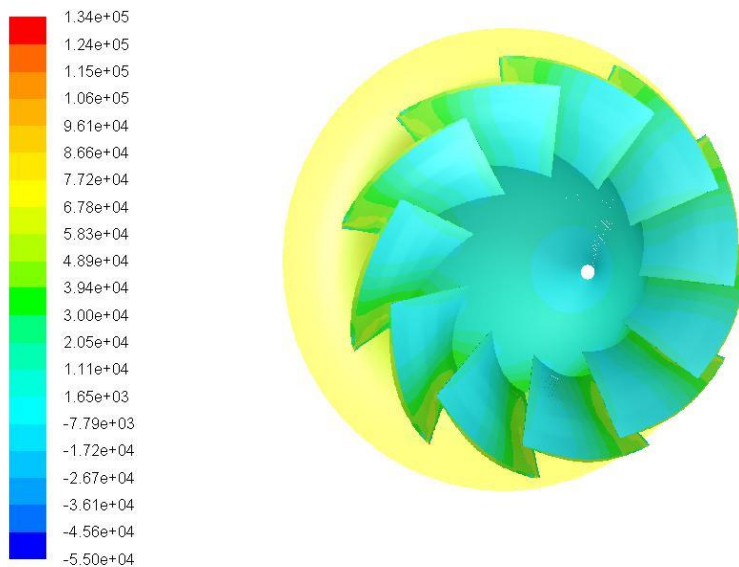
Γωνία ρυθμιστικών περυγίων $\alpha=30$ μοίρες



Contours of Static Pressure (pascal)

Apr 11, 2014
ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, sstkww)

Εικόνα 57. Η κατανομή της στατικής πίεσης στο περύγιο και στο κέντρο της ροής.



Contours of Static Pressure (pascal)

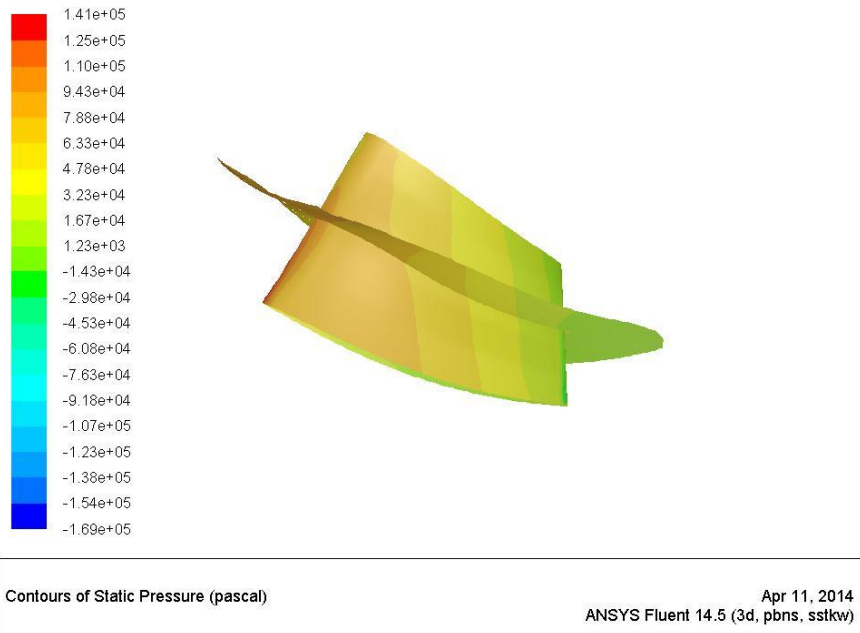
Apr 11, 2014
ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, sstkww)

Εικόνα 58. Η στατική πίεση στα περύγια και στην πλήμνη.

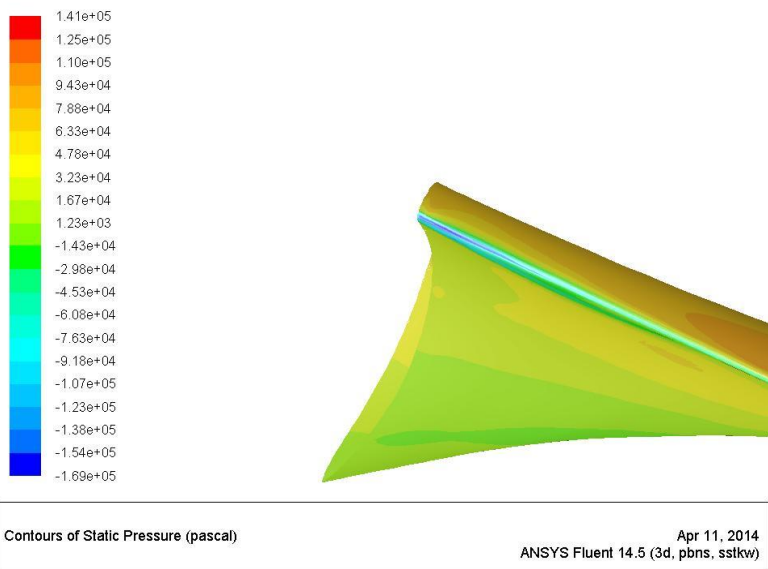
Ομοίως στην εικόνα 57 εντοπίζεται μια μικρή περιοχή που υπάρχει το φαινόμενο της σπηλαιώσης. Η πλευρά που κινδυνεύει από το φαινόμενο της σπηλαιώσης είναι η πλευρά της υποπίεσης του περυγίου όπως δείχνει η εικόνα 58.

Γωνία δρομέα $\gamma = -5$

Γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha = 20$ μοίρες



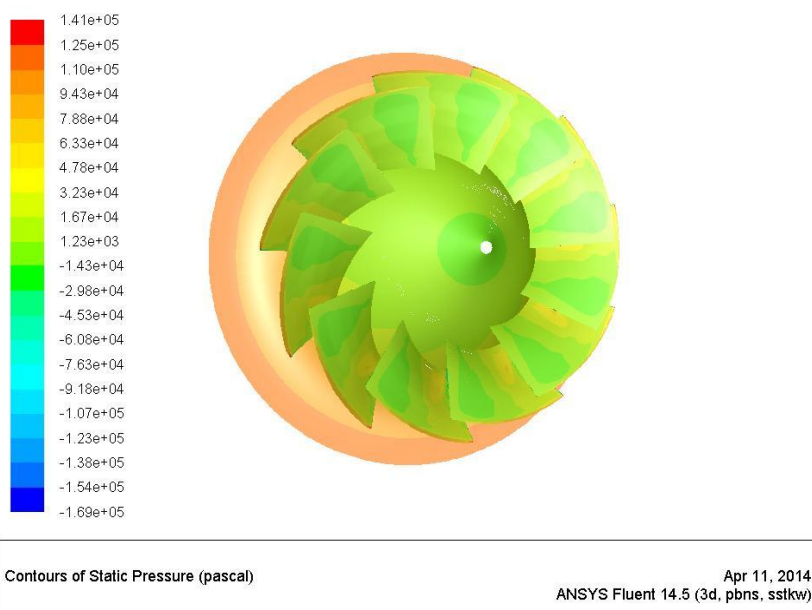
Εικόνα 59. Η κατανομή της στατικής πίεσης στο πτερύγιο και στο κέντρο της ροής.



Εικόνα 60. Η στατική πίεση ακμή προσβολής του πτερυγίου.

Στην εικόνα 59 παρουσιάζεται η διακύμανση της στατικής πίεσης του πτερυγίου. Όπως διαπιστώνεται δεν υπάρχει κίνδυνος σπηλαιώσης. Στην εικόνα 60 παρατηρείται μία μικρή περιοχή στην ακμή προσβολής του πτερυγίου προς την μεριά της πλήμνης. Αυτή η μορφή

σπηλαιώσης δεν αποτελεί κίνδυνο στην λειτουργία του υδροστροβίλου και δεν είναι επικίνδυνο φαινόμενο από πλευρά φθοράς του περυγίου.



Εικόνα 61. Η στατική πίεση στα περύγια και στην πλήμνη.

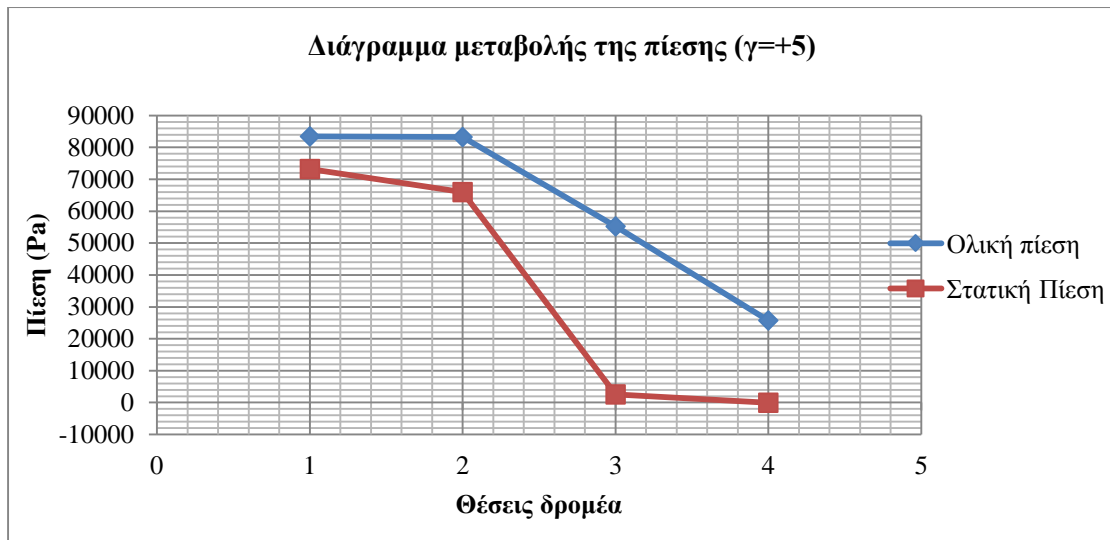
Η διακύμανση της ολικής πίεσης και της στατικής κατά μήκος του άξονα παρουσιάζεται για κάθε περίπτωση του μέγιστου βαθμού υδραυλικής απόδοσης. Από τα συγκεκριμένα διαγράμματα είναι δυνατόν να εντοπισθεί πως κυμαίνεται και η κινητική ενέργεια σε κάθε σημείο του άξονα.

Επιλέγονται τέσσερις θέσεις για την παρουσίαση της πίεσης.

- Θέση 1 επιφάνεια εισόδου του ρευστού στον υδροστρόβιλο.
- Θέση 2 επιφάνεια εισόδου του ρευστού στο δρομέα.
- Θέση 3 επιφάνεια εξόδου του ρευστού στο δρομέα.
- Θέση 4 επιφάνεια εξόδου του ρευστού από τον υδροστρόβιλο.

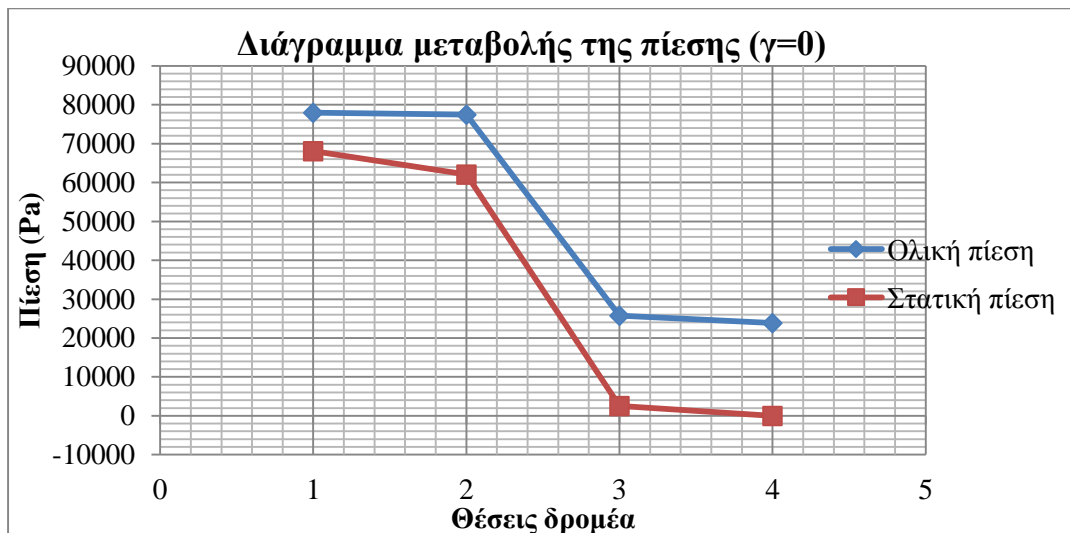
$$\gamma=+5^{\circ}, \alpha=30^{\circ}$$

	Total Pressure (Pa)	Static Pressure (Pa)
Είσοδος (1)	83419,555	73250,313
Πριν το δρομέα (2)	83208,258	65945,273
Μετά το δρομέα (3)	55218,16	2543,7
Έξοδος (4)	25777,494	-57,451



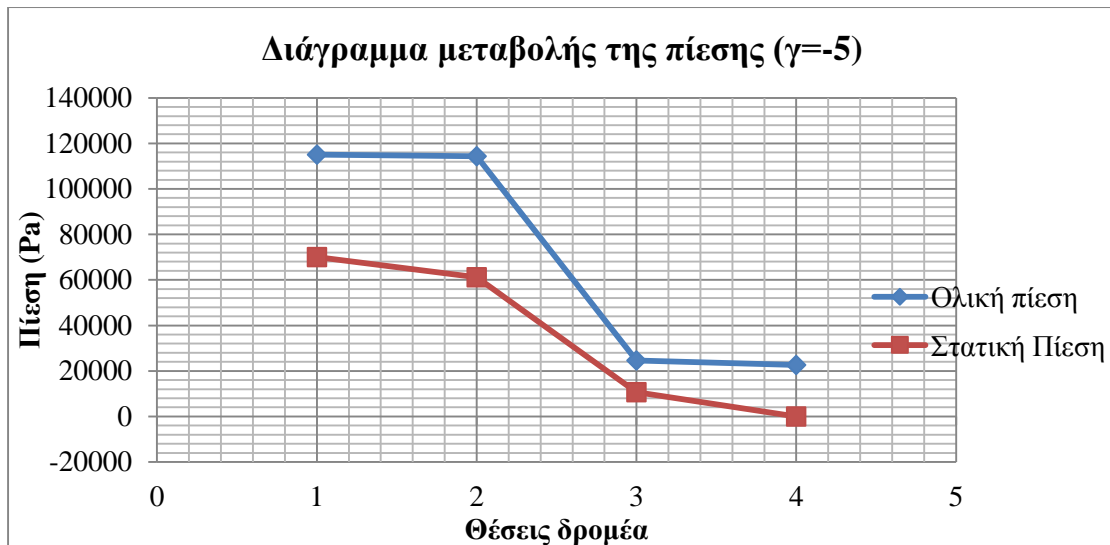
$\gamma=0^{\circ}, \alpha=30^{\circ}$

	Total Pressure (Pa)	Static Pressure (Pa)
Είσοδος (1)	77981,195	68063,82
Πριν το δρομέα (2)	77470,055	62107,098
Μετά το δρομέα (3)	25722,3	2551,349
Έξοδος (4)	23850,172	-17,78



$\gamma=-5^{\circ}, \alpha=20^{\circ}$

	Total Pressure (Pa)	Static Pressure (Pa)
Είσοδος (1)	115108,83	70049,98
Πριν το δρομέα (2)	114410,75	61214,98
Μετά το δρομέα (3)	24653,711	10684,48
Έξοδος (4)	22691,486	-19,728



Παρατηρείται ότι η διαφορά της ολικής από την στατική πίεση είναι μεγάλη στην έξοδο του ρευστού από τον υδροστρόβιλο. Αυτό οφείλεται στην κινητική ενέργεια που διαφεύγει στην έξοδο της μηχανής. Αυτή είναι μία αναμενόμενη διαφυγή ενέργειας ανεκμετάλλευτης που μπορεί να ανακτηθεί στον αγωγό φυγής, στο επόμενο στάδιο. Με την επιβράδυνση του νερού πραγματοποιείται ανάκτηση της πίεσης και βελτίωση του υδραυλικού βαθμού απόδοσης.

3.2.2 Έλεγχος των πεδίων ροής

Στην ενότητα αυτή αναλύεται και παρουσιάζεται το πεδίο ροής που σχηματίζεται στον δρομέα. Ελέγχεται η εξέλιξη της ροής κατά μήκος του πτερυγίου. Επιλέχθηκε ως επιφάνεια παρουσίασης της ροής το μισό μήκος του πλάτους του υπολογιστικού χωρίου.

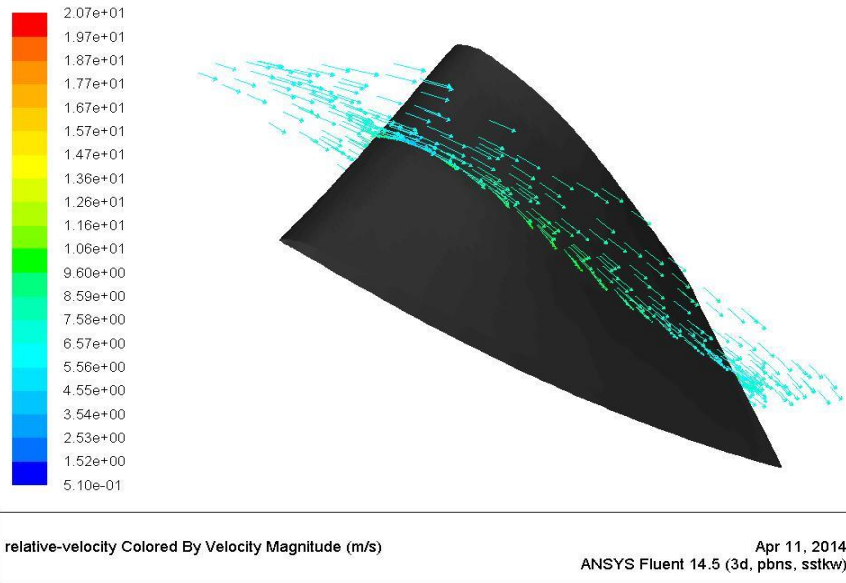
Ελέγχεται η περίπτωση των μέγιστων βαθμών απόδοσης που έχουν επιτευχθεί στους παρακάτω συνδυασμούς γωνίας δρομέα και ρυθμιστικών πτερυγίων.

$$\underline{\gamma=+5^{\circ}, \alpha=30^{\circ}}$$

$$\underline{\gamma=0^{\circ}, \alpha=30^{\circ}}$$

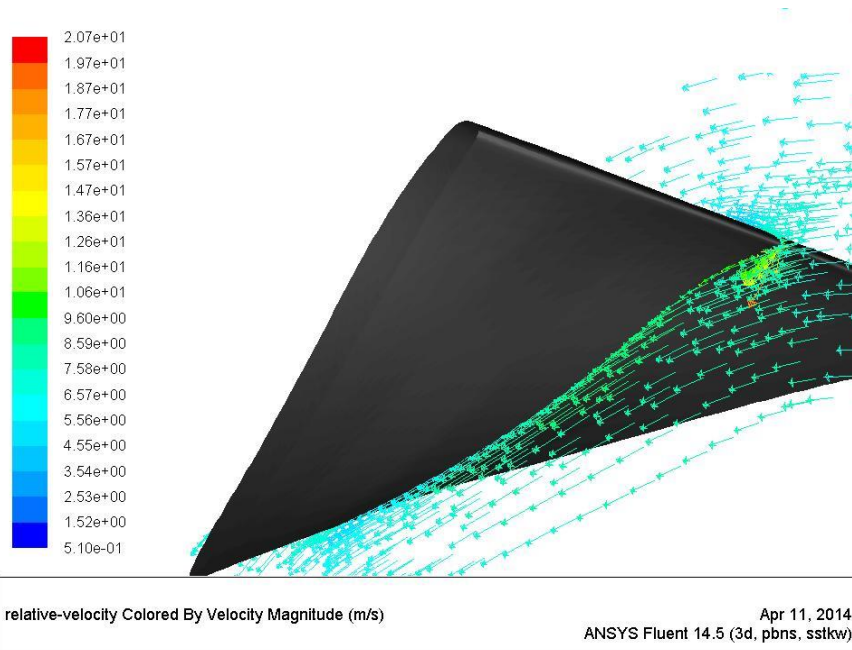
$$\underline{\gamma=-5^{\circ}, \alpha=20^{\circ}}$$

Στην πρώτη περίπτωση παρουσιάζεται ο δρομέας +5 μοιρών με κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων 30 μοιρών που παρουσιάζει βαθμό υδραυλικής απόδοσης $\eta_h=0,870$



Εικόνα 62. Εποπτικά εικόνα της ροής. Γωνία δρομέα $\gamma=+5$, γωνία ρυθμιστικών περυγίων $\alpha=30$.

Παρατηρείται στην εικόνα 62 η διαμόρφωση της ροής κατά μήκος του περυγίου. Η ταχύτητα παρουσιάζει μία μικρή επιτάχυνση στο κέντρο του περυγίου και μετά επιβραδύνει.



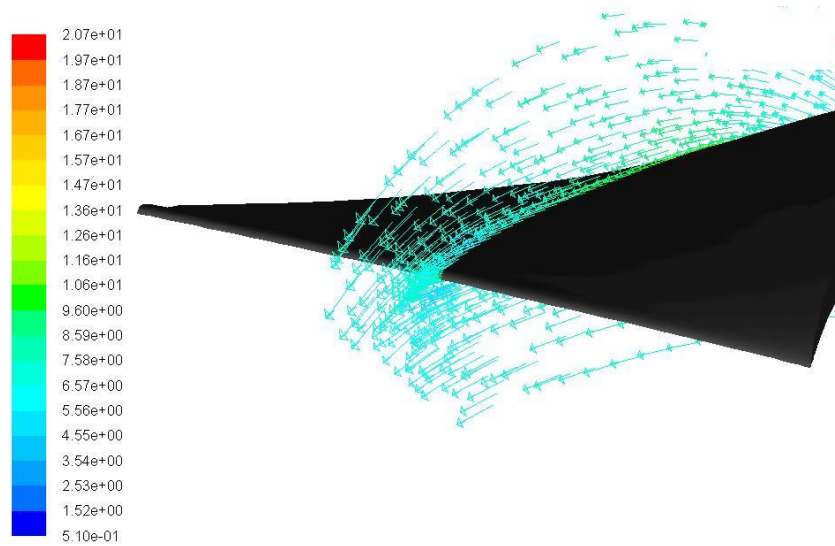
Εικόνα 63. Ακμή προσβολής του περυγίου. Γωνία δρομέα $\gamma=+5$, γωνία ρυθμιστικών περυγίων $\alpha=30$.

Στην εικόνα 63 παρατηρείται η ροή καθώς προσπίπτει στην ακμή προσβολής του δρομέα. Το μέγιστο μέτρο της ταχύτητας εντοπίζεται ακριβώς πάνω στην ακμή προσβολής και είναι αποτέλεσμα της πτώσης της πίεσης που συμβαίνει καθώς το νερό συναντά το περυγίο.

Διαπιστώνεται ότι η πτώση πίεσης είναι ένδειξη της ροής με κρούση. Παρόλο που η παροχή αποδίδει μέγιστο βαθμό υδραυλικής απόδοσης, οι απώλειες της ροής με κρούση έχουν

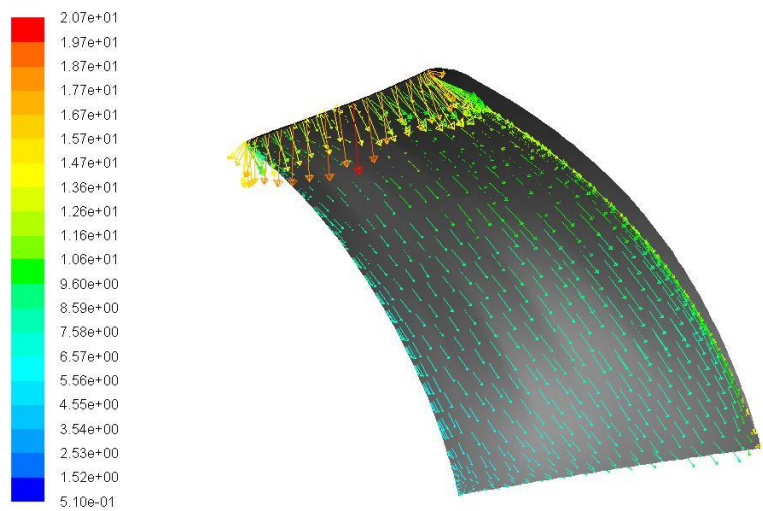
ελαχιστοποιηθεί αλλά δεν έχουν μηδενιστεί. Επίσης ακριβώς πάνω από την ακμή προσβολής η ταχύτητα μειώνεται άρα έχουμε αυξημένη πίεση σε αυτό το σημείο.

Η ροή δείχνει ότι ακολουθεί την κλίση του πτερυγίου. Δεν παρουσιάζεται ανακυκλοφορία και στο μεγαλύτερο μέρος της πλευράς της υποπίεσης του πτερυγίου η ταχύτητα είναι αυξημένη.



relative-velocity Colored By Velocity Magnitude (m/s) Apr 11, 2014 ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, sstk)

Εικόνα 64. Ακμή εκφυγής του πτερυγίου. Γωνία δρομέα $\gamma=+5$, γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=30$.



relative-velocity Colored By Velocity Magnitude (m/s) Apr 11, 2014 ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, sstk)

Εικόνα 65. Πλευρά υποπίεσης. Γωνία δρομέα $\gamma=+5$, γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=30$.

Στην εικόνα 64 παρουσιάζεται η ακμή εκφυγής του πτερυγίου. Η ταχύτητα είναι μειωμένη και δεν παρουσιάζεται ανακυκλοφορία. Επίσης και η εικόνα 65 απεικονίζει ξεκάθαρα ότι δεν υπάρχουν δίνες ανακυκλοφορίας. Παρατηρείται όπως και στην εικόνα 63 ότι η μεγαλύτερη ταχύτητα είναι στην ακμή προσβολής του πτερυγίου σημειώνεται τάξη μεγέθους 20 m/s κυρίως στο κέντρο της ακμής προσβολής του πτερυγίου.

Για την καλύτερη κατανόηση της εκμετάλλευσης της κινητικής ενέργειας του ρευστού παρουσιάζεται η σύγκριση της αξονικής, ακτινικής και εφαπτομενικής ταχύτητας πριν και μετά το δρομέα.

Επιλέγονται τρία σημεία στην επιφάνεια εισόδου της ροής στο δρομέα όπως φαίνονται στην εικόνα 66 και βρίσκονται σε απόσταση του πλάτους του υπολογιστικού χωρίου 25%, 50% και 75%.

Ομοίως επιλέγονται και για την επιφάνεια εξόδου του ρευστού από το δρομέα.

ANSYS
14.0



Εικόνα 66. Σημεία που έγινε ο έλεγχος των ταχυτήτων.

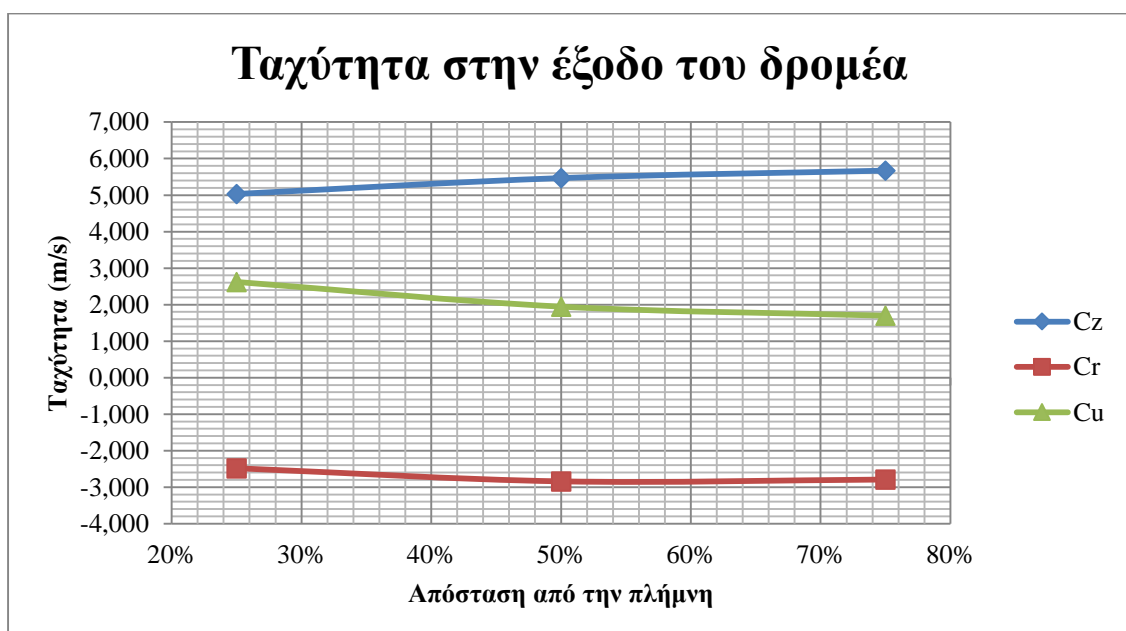
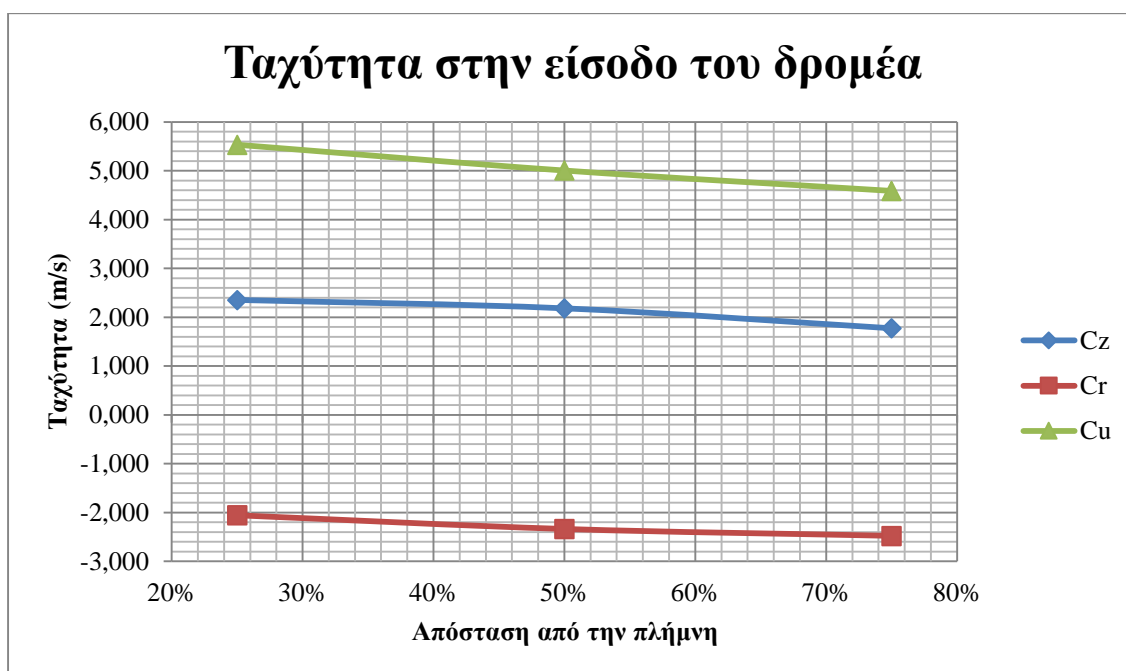
$$\gamma=+5^{\circ}, \alpha=30^{\circ}$$

Ταχύτητα πριν την είσοδο της ροής στο δρομέα

Απόσταση από την πλήμνη	25%	50%	75%
Αξονική ταχύτητα	2,354	2,182	1,774
Ακτινική ταχύτητα	-2,056	-2,336	-2,477
Εφαπτομενική ταχύτητα	5,533	5,005	4,587

Ταχύτητα μετά την έξοδο της ροής από το δρομέα

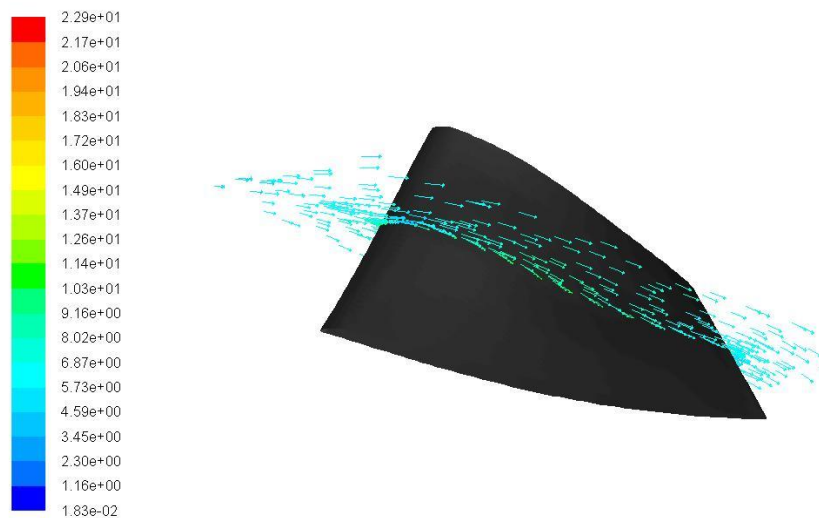
Απόσταση από την πλήμνη	25%	50%	75%
Αξονική ταχύτητα	5,032	5,467	5,671
Ακτινική ταχύτητα	-2,481	-2,840	-2,791
Εφαπτομενική ταχύτητα	2,622	1,945	1,697



Παρατηρείται αρκετά μεγάλη πτώση της συστροφής. Από 5 m/s πριν το δρομέα στο κέντρο ακριβώς της ροής μετά το δρομέα έχει την τιμή 1,945. Η πτώση της συστροφής του ρευστού στην έξοδο, βάση την εξίσωση Euler, εκφράζει το θεωρητικό υδραυλικό ύψος προς εκμετάλλευση του υδροστροβίλου.

Η κινητική ενέργεια που διαφεύγει από το δρομέα είναι αναμενόμενη και είναι αντικείμενο μελέτης του σχεδιασμού του αγωγού απαγωγής.

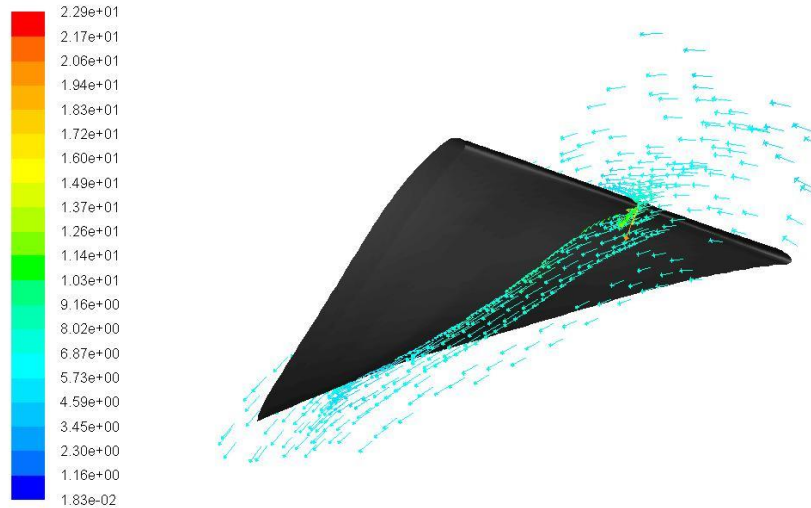
Για την περίπτωση του δρομέα 0 μοιρών και ρυθμιστικών πτερυγίων 30 μοιρών όπου επιτεύχθηκε και ο μέγιστος βαθμός απόδοσης $\eta_h=0,900$ παρουσιάζονται τα πεδία ροής παρακάτω.



relative-velocity Colored By Velocity Magnitude (m/s) Apr 11, 2014
ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, sstk)

Εικόνα 67. Εποπτική εικόνα της ροής. Γωνία δρομέα $\gamma=0$, γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=30$.

Στην εικόνα 67 παρουσιάζεται παρόμοιο πεδίο ροής με την εποπτική εικόνα 61 με αυξημένα μέτρα ταχύτητας.

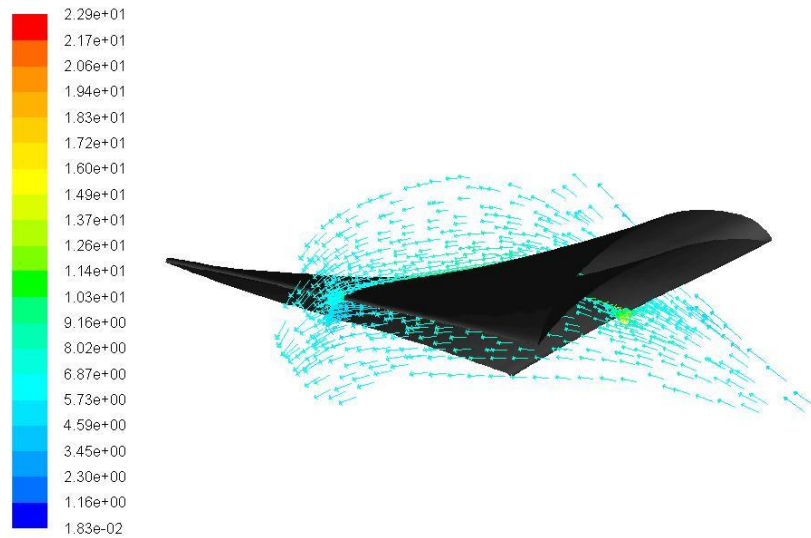


relative-velocity Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Apr 11, 2014
ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, sstk)

Εικόνα 68. Ακμή προσβολής του πτερυγίου. Γωνία δρομέα $\gamma=0$, γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=30$.

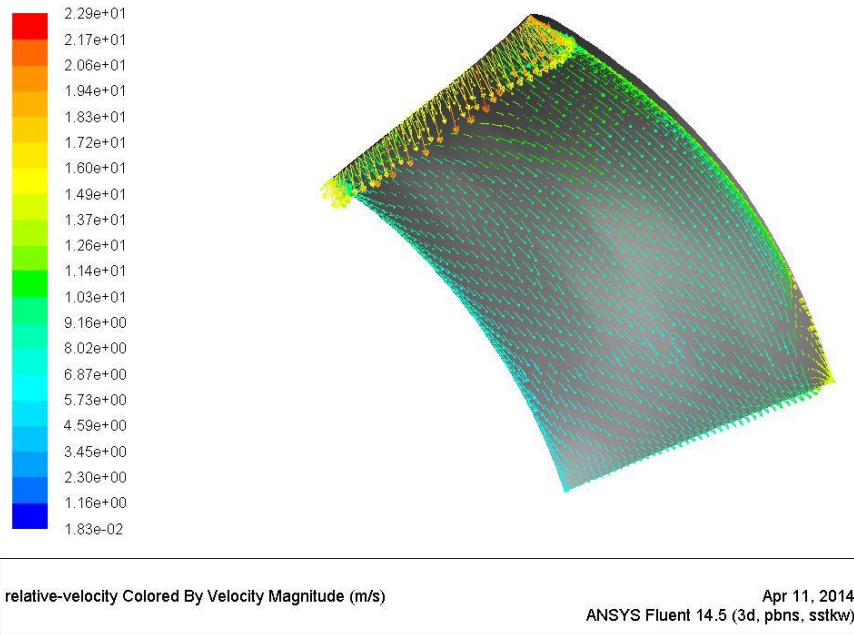
Στην εικόνα 68 απεικονίζεται η ροή όπως ακολουθεί την κλίση του πτερυγίου. Δεν υπάρχει ανακυκλοφορία.



relative-velocity Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Apr 11, 2014
ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, sstk)

Εικόνα 69. Ακμή εκφυγής του πτερυγίου. Γωνία δρομέα $\gamma=0$, γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=30$.



Εικόνα 70. Πλευρά του πτερυγίου. Γωνία δρομέα $\gamma=0$, γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=30$.

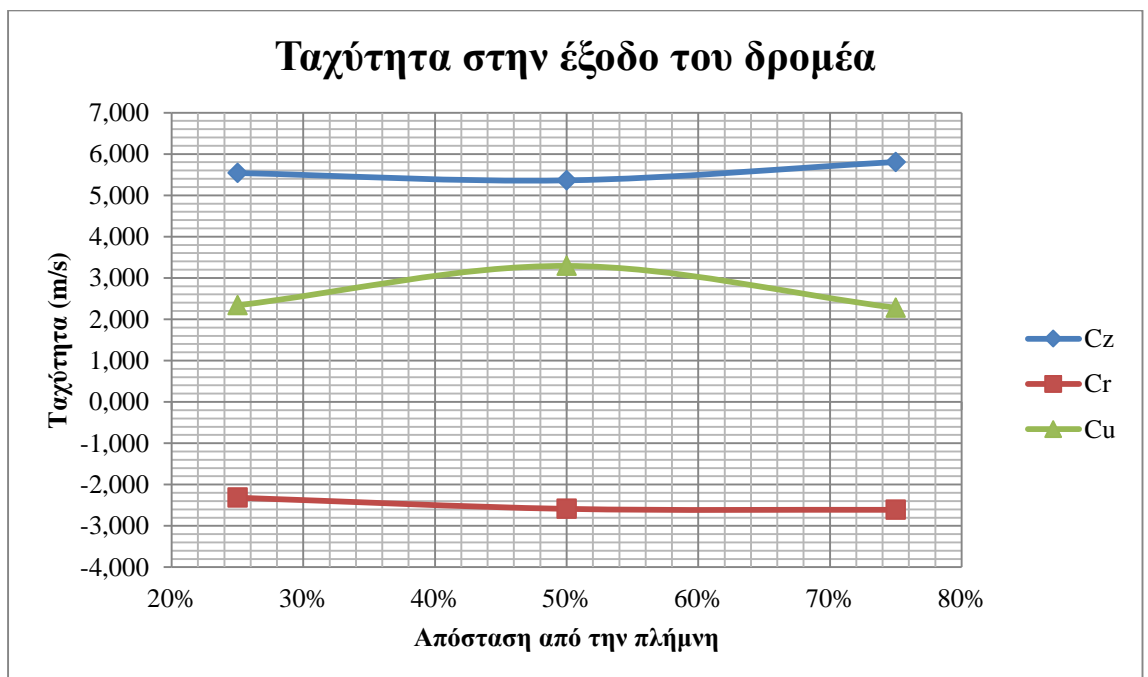
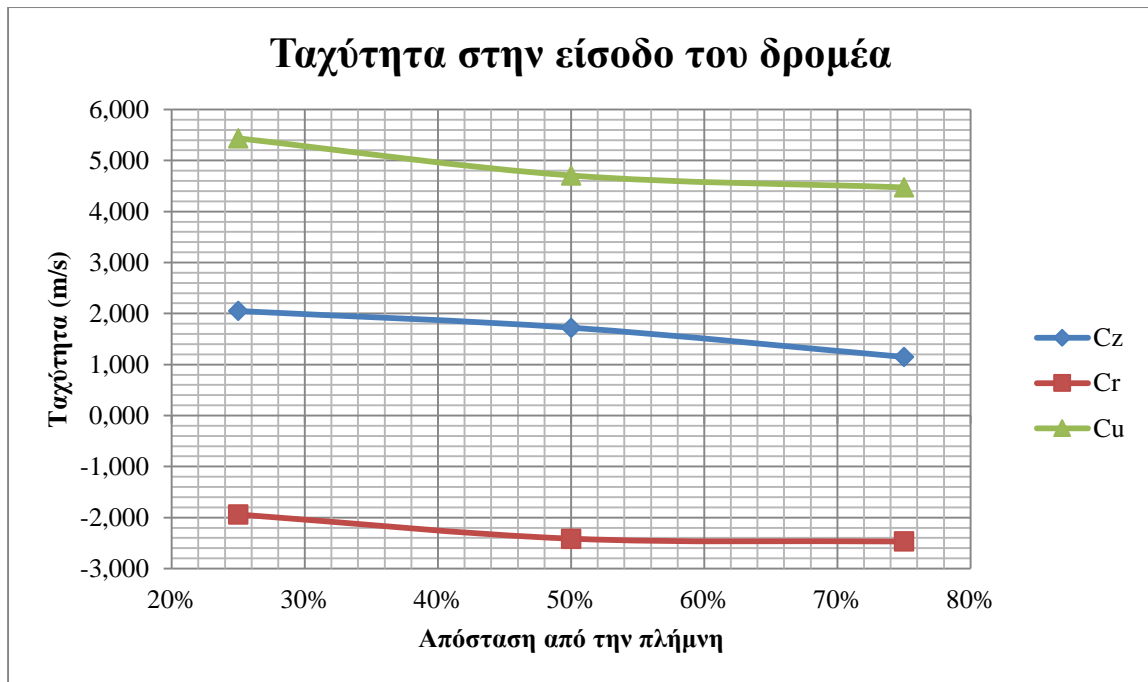
Η εικόνα 69 απεικονίζει την ακμή εκφυγής του πτερυγίου. Η ροή έχει επιβραδύνει στο συγκεκριμένο σημείο. Στην εικόνα 70 απεικονίζεται η πλευρά υποπίεσης του πτερυγίου. Η ροή επιταχύνει προς την στεφάνη του υδροστροβίλου και δείχνει να έχει ομοιόμορφη κατανομή.

Ομοίως εξετάζονται οι ταχύτητες πριν και μετά το δρομέα

Απόσταση από την πλήμνη	25%	50%	75%
Αξονική ταχύτητα	2,050	1,722	1,149
Ακτινική ταχύτητα	-1,939	-2,413	-2,469
Εφαπτομενική ταχύτητα	5,435	4,706	4,473

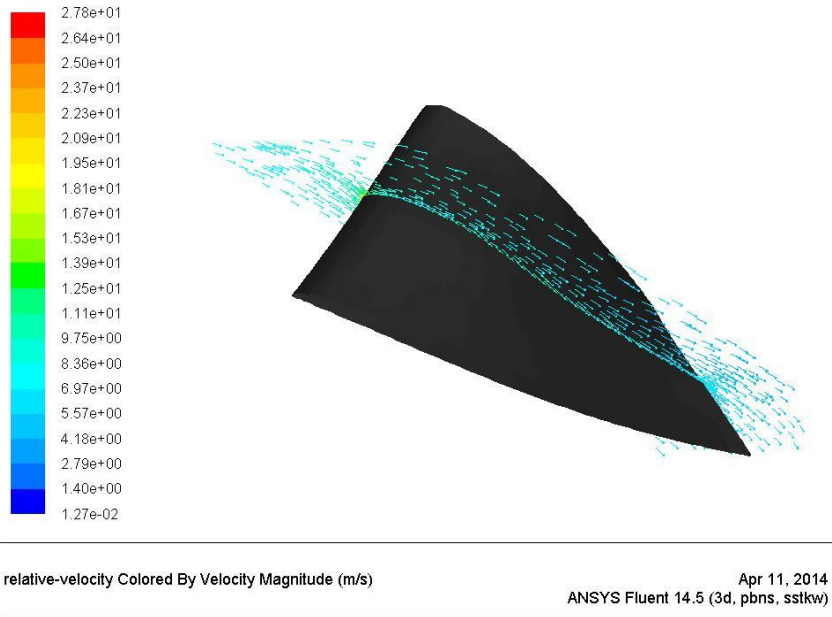
Ταχύτητα μετά την έξοδο της ροής από το δρομέα

Απόσταση από την πλήμνη	25%	50%	75%
Αξονική ταχύτητα	5,539	5,362	5,807
Ακτινική ταχύτητα	-2,318	-2,588	-2,611
Εφαπτομενική ταχύτητα	2,338	3,291	2,278



Παρατηρείται επίσης μείωση της συστροφής του ρευστού. Πριν το δρομέα η εφαπτομενική ταχύτητα έχει μέτρο 4,7 m/s και μετά το δρομέα έχει μέτρο 3,3 m/s. Η ταχύτητα φυγής είναι αντικείμενο μελέτης αγωγού απαγωγής.

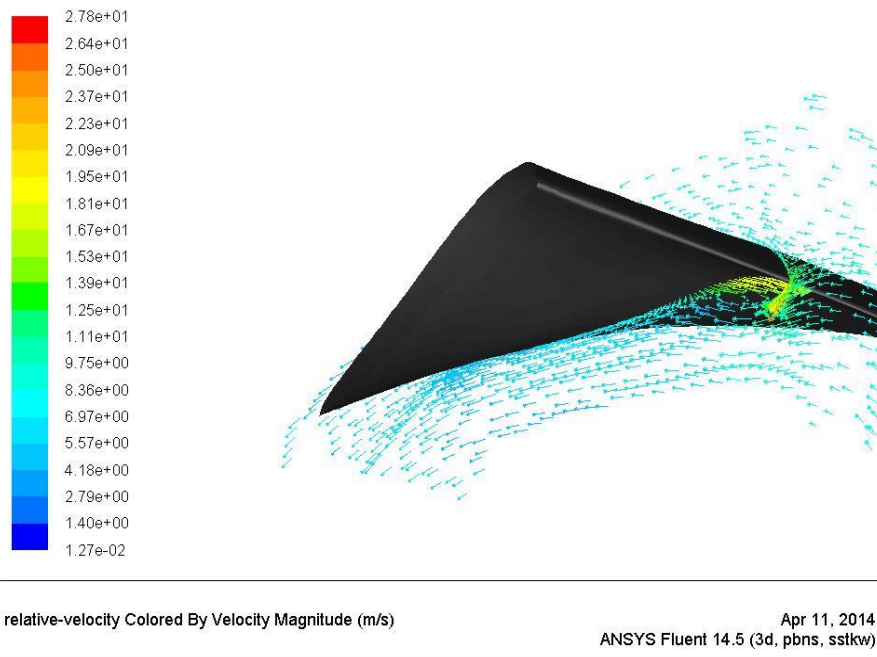
Για την περίπτωση του δρομέα -5 μοιρών και ρυθμιστικών περυγίων 20 μοιρών όπου επιτεύχθηκε και ο μέγιστος βαθμός απόδοσης $\eta_h=0,848$ παρουσιάζονται τα πεδία ροής παρακάτω.



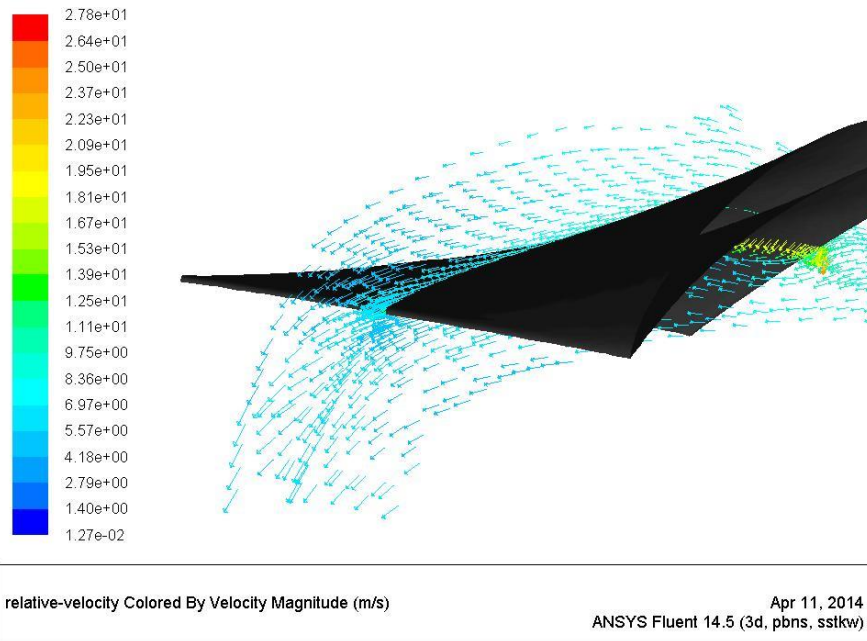
Εικόνα 71. Εποπτική εικόνα της ροής. Γωνία δρομέα $\gamma=-5$, γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=20$.

Στην εικόνα 71 παρατηρείται η εποπτική εικόνα της ροής. Η ροή συμπεραίνεται ότι είναι παρόμοια και στα τρία εποπτικά πεδία. Το μέτρο της ταχύτητας είναι μεγαλύτερο στην γωνία δρομέα -5 μοίρες από τις άλλες δύο περιπτώσεις.

Στην εικόνα 72 που απεικονίζεται παρακάτω, παρουσιάζεται η ροή καθώς συναντά την ακμή προσβολής. Σε σχέση και με την εικόνα 73 παρατηρείται το μέγιστο μέτρο της ταχύτητας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο της σπηλαιώσης, υπάρχει ένδειξη εμφάνισης σπηλαιώσης στην ακμή προσβολής του πτερυγίου στην πλευρά της πλήμνης. Παρατηρείται αυξημένη ταχύτητα στην πλευρά της πλήμνης στην εικόνα 73 σε αυτό το σημείο.

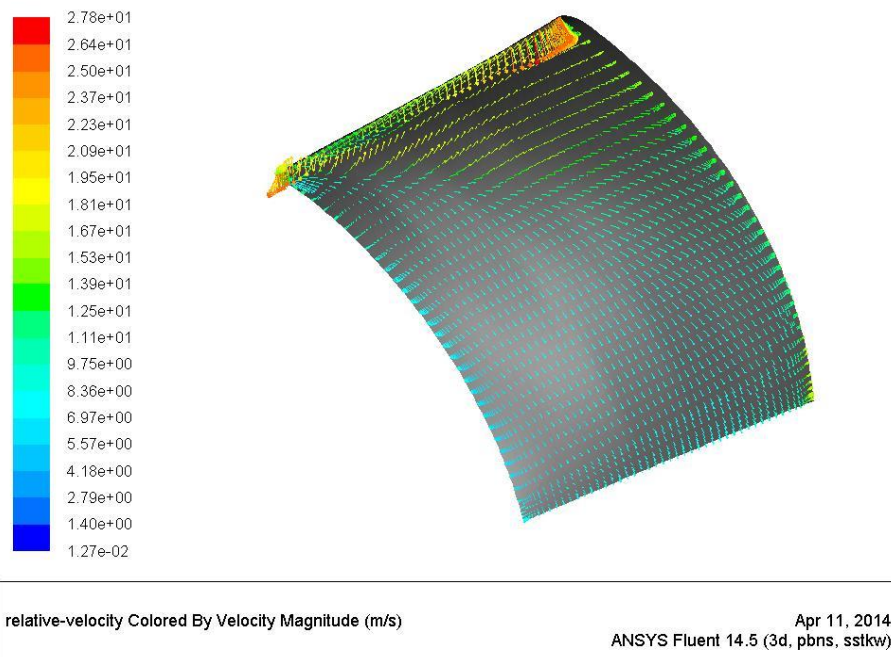


Εικόνα 72. Ακμή προσβολής του πτερυγίου. Γωνία δρομέα $\gamma=-5$, γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=20$.



Εικόνα 73. Ακμή εκφυγής του πτερυγίου. Γωνία δρομέα $\gamma=-5$, γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=20$.

Στην εικόνα 73 παρουσιάζεται η ταχύτητα στην ακμή εκφυγής του πτερυγίου και όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις το μέτρο που εμφανίζεται είναι μικρό.



Εικόνα 74. Πλευρά υποπίεσης του πτερυγίου. Γωνία δρομέα $\gamma=-5$, γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=20$.

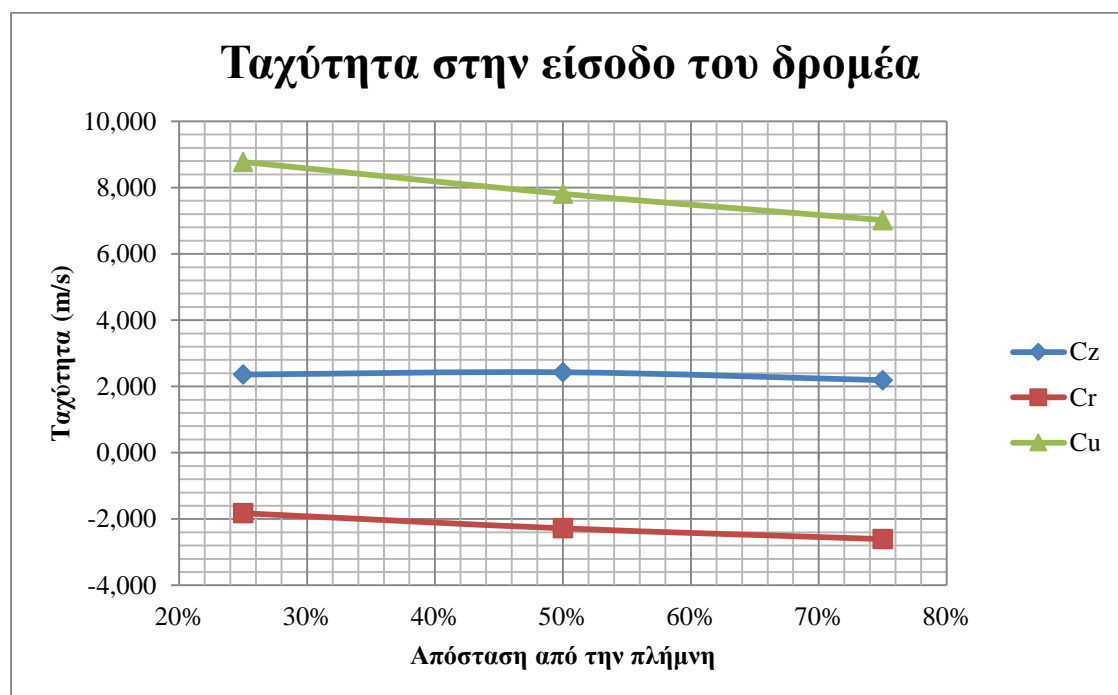
Στην εικόνα 74 επίσης παρατηρείται το μέγιστο μέτρο της ταχύτητας που βρίσκεται κατά πλάτος της ακμής προσβολής του πτερυγίου. Τα μέγιστα εμφανίζονται στην πλευρά της πλήμνης και της στεφάνης. Η ροή δείχνει ομοιόμορφη και επιταχυνόμενη προς την στεφάνη.

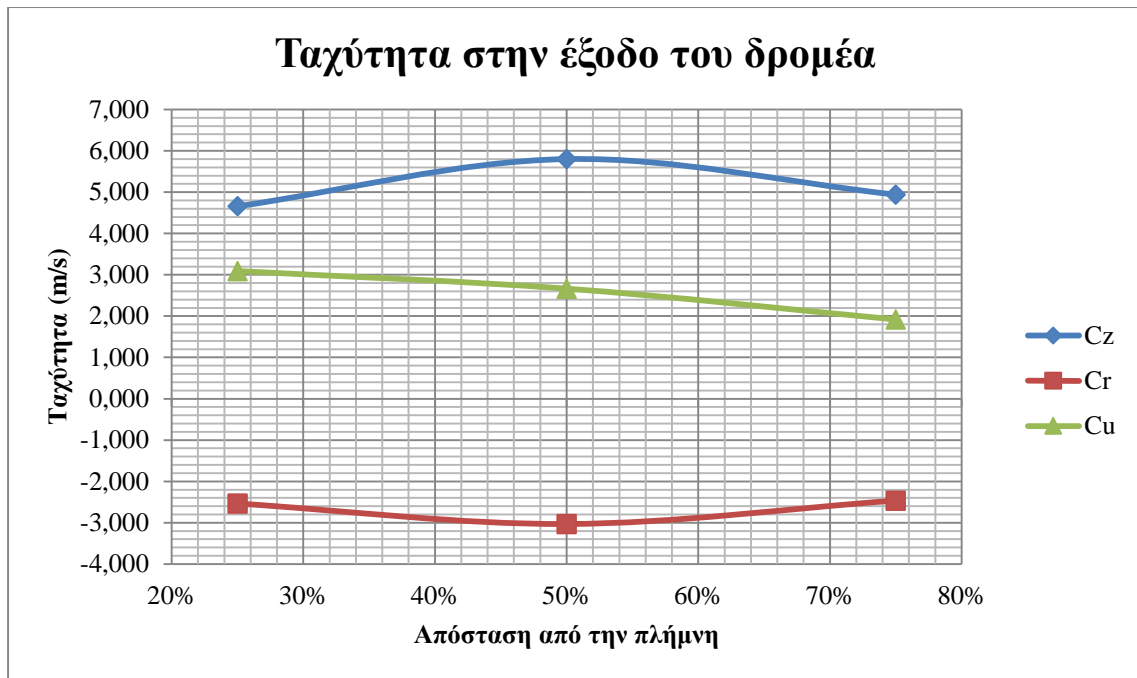
Ταχύτητα πριν την είσοδο της ροής στο δρομέα

Απόσταση από την πλήμνη	25%	50%	75%
Αξονική ταχύτητα	2,360	2,428	2,190
Ακτινική ταχύτητα	-1,825	-2,281	-2,606
Εφαπτομενική ταχύτητα	8,774	7,813	7,019

Ταχύτητα μετά την έξοδο της ροής από το δρομέα

Απόσταση από την πλήμνη	25%	50%	75%
Αξονική ταχύτητα	4,657	5,800	4,940
Ακτινική ταχύτητα	-2,536	-3,031	-2,464
Εφαπτομενική ταχύτητα	3,091	2,665	1,918



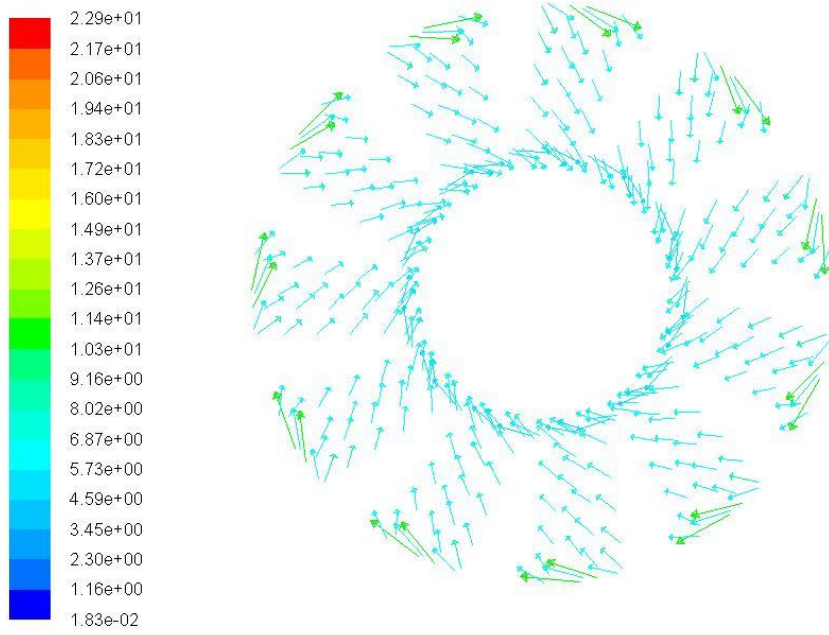


Από τα διαγράμματα μέτρου των ταχυτήτων διαπιστώνεται ότι και στην περίπτωση του δρομέα -5 μοιρών υπάρχει αρκετή μείωση της συστροφής.

Γενικά συμπεράσματα.

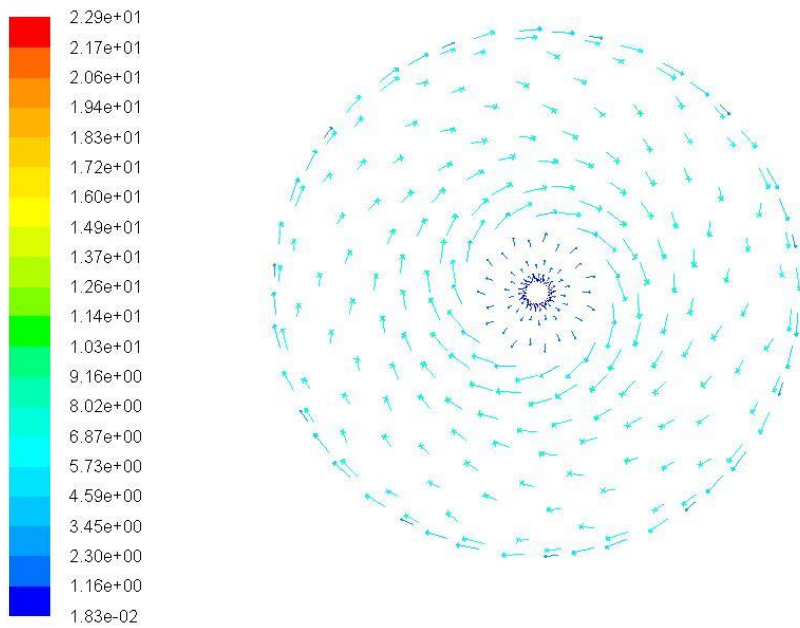
Διαπιστώθηκε ότι και στις τρεις περιπτώσεις η ροή είναι ομοιόμορφη χωρίς ανακυκλοφορία. Αυτό σημαίνει ότι η κλίση του περυγίου είναι βέλτιστη για τις παροχές που επιτεύχθηκε ο μέγιστος υδραυλικός βαθμός απόδοσης. Υπάρχει εκμετάλλευση της συστροφής του ρευστού σε μεγάλο βαθμό. Η ροή τείνει να επιταχύνει στο κέντρο του περυγίου της πλευράς υπερπίεσης και προς την μεριά της στεφάνης. Στην ακμή εκφυγής παρουσιάζονται τα ελάχιστα μέτρα ταχύτητας.

Στην συνέχεια εξετάζεται η διατομή εξόδου του δρομέα και η διατομή εξόδου του υπολογιστικού χωρίου. Στις εικόνες 75 και 76 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες διατομές και πως είναι διαμορφωμένες οι ταχύτητες στο κανονικό σημείο λειτουργίας. Η αξονική ταχύτητα είναι κάθετη στο επίπεδο και δεν απεικονίζεται.



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) Apr 25, 2014
ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, sstk)

Εικόνα 75. Διατομή εξόδου του δρομέα.



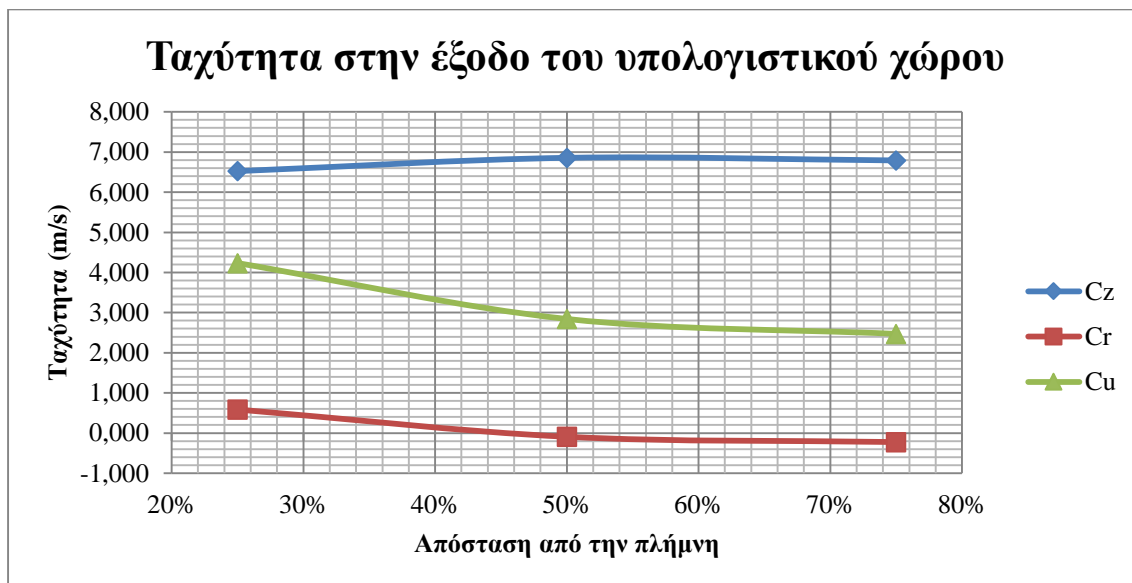
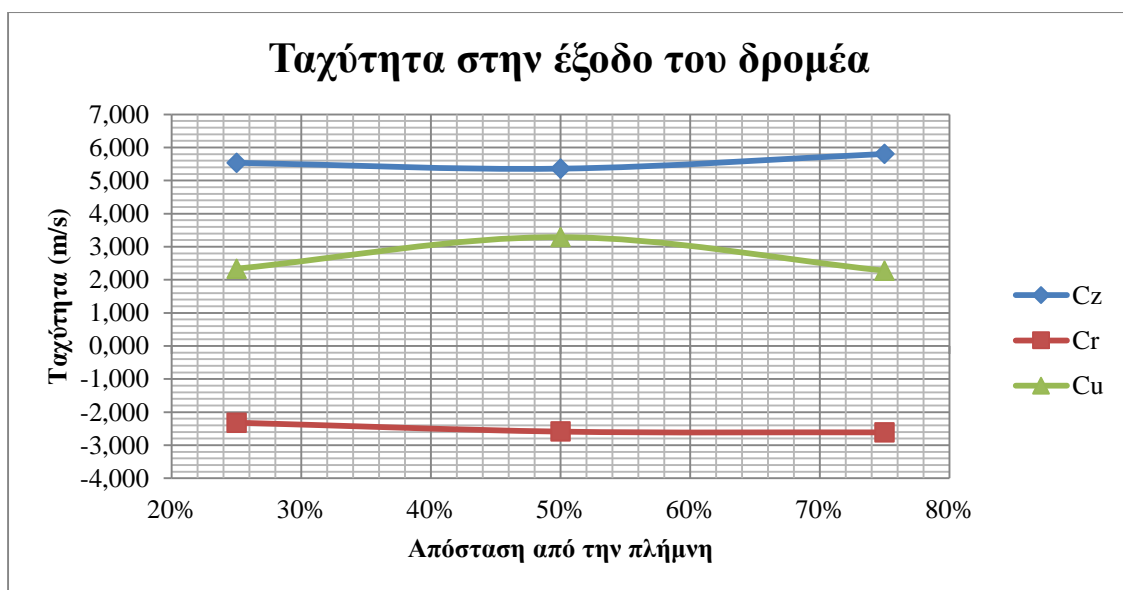
Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s) Apr 25, 2014
ANSYS Fluent 14.5 (3d, pbns, sstk)

Εικόνα 76. Διατομή εξόδου του υπολογιστικού χωρίου.

Παρατηρείται στην εικόνα 75 μεγάλη περιφερειακή ταχύτητα κοντά στη στεφάνη. Η ακτινική συνιστώσα είναι αρνητική καθώς έχει φορά προς το κέντρο. Στην εικόνα 76 παρατηρείται ότι τα μέτρα των ταχυτήτων είναι ελάχιστα στο στερεό όριο της πλήμνης και της στεφάνης. Διαπιστώνεται ότι στην έξοδο του υπολογιστικού χωρίου η ακτινική ταχύτητα είναι ελάχιστη και υπάρχει παραμένουσα συστροφή.

Ταχύτητα στην έξοδο της ροής από τον υπολογιστικό χώρο

Απόσταση από την πλήμνη	25%	50%	75%
Αξονική ταχύτητα	6,524	6,856	6,791
Ακτινική ταχύτητα	0,586	-0,093	-0,224
Εφαπτομενική ταχύτητα	4,234	2,842	2,470



Για την περαιτέρω βελτίωση του υδραυλικού βαθμού απόδοσης προτείνεται τοποθέτηση αγωγού απαγωγής του ρευστού με σκοπό την ανάκτηση της πίεσης με την επιβράδυνση της απόλυτης ταχύτητας του ρευστού.

3.2.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες υδροτροβίλου

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες του υδροτροβίλου χαράζονται ως εξής. Κρατώντας σταθερή την γωνία κλίσης του δρομέα και την γωνία των ρυθμιστικών πτερυγίων και μεταβάλλοντας την παροχή.

Η ισχύς στο δρομέα υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο (3.1):

$$N = M\omega$$

Το υδραυλικό ύψος λειτουργίας όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της σπηλαιώσης υπολογίζεται από τον τύπο (3.3):

$$H = H_{01} - H_{02}$$

Τα διαγράμματα που χαράσσονται είναι τα εξής.

Ισχύς στο δρομέα σε σχέση με την παροχή.

Υδραυλικό ύψος λειτουργίας σε σχέση με την παροχή.

Ακολουθεί πίνακας με τα αριθμητικά δεδομένα.

Γωνία δρομέα $\gamma=+5$

Ρυθμιστικά πτερύγια
 $\alpha=40$

Q m ³ /s	Ισχύς στο δρομέα
2,10	92245,120
2,30	130962,92
2,50	174828,280
2,60	198437,360
2,70	223534,520

Ρυθμιστικά πτερύγια
 $\alpha=30$

Q m ³ /s	Ισχύς στο δρομέα
1,70	61464,48
1,90	98656,360
2,10	141569,120
2,30	189566,080
2,60	275580,800

Ρυθμιστικά πτερύγια
 $\alpha=30$

Q m ³ /s	Ισχύς στο δρομέα
1,65	110313,72
1,80	146997,840
1,90	174119,44
2,00	203837,92
2,15	253455,40

Γωνία δρομέα $\gamma=0$

Ρυθμιστικά πτερύγια $\alpha=40$

Q m ³ /s	Ισχύς στο
---------------------	-----------

Ρυθμιστικά πτερύγια
 $\alpha=30$

Q m ³ /s	Ισχύς στο
---------------------	-----------

Ρυθμιστικά πτερύγια
 $\alpha=20$

Q m ³ /s	Ισχύς στο
---------------------	-----------

	δρομέα
1,85	51241,520
1,90	59689,080
2,00	77564,520
2,15	106675,800
2,30	139252,960

	δρομέα
1,65	51697,360
1,70	60897,760
1,75	70499,440
1,80	83857,840
1,85	90073,720

	δρομέα
1,40	54909,36
1,50	75430,960
1,60	98956,000
1,70	123875,840
1,80	149887,76

Γωνία δρομέα $\gamma=-5$

Ρυθμιστικά πτερύγια $\alpha=30$

Q m ³ /s	Ισχύς στο δρομέα
1,65	56042,800
1,70	65650,200
1,75	75540,520
1,80	85737,520
1,85	96481,440

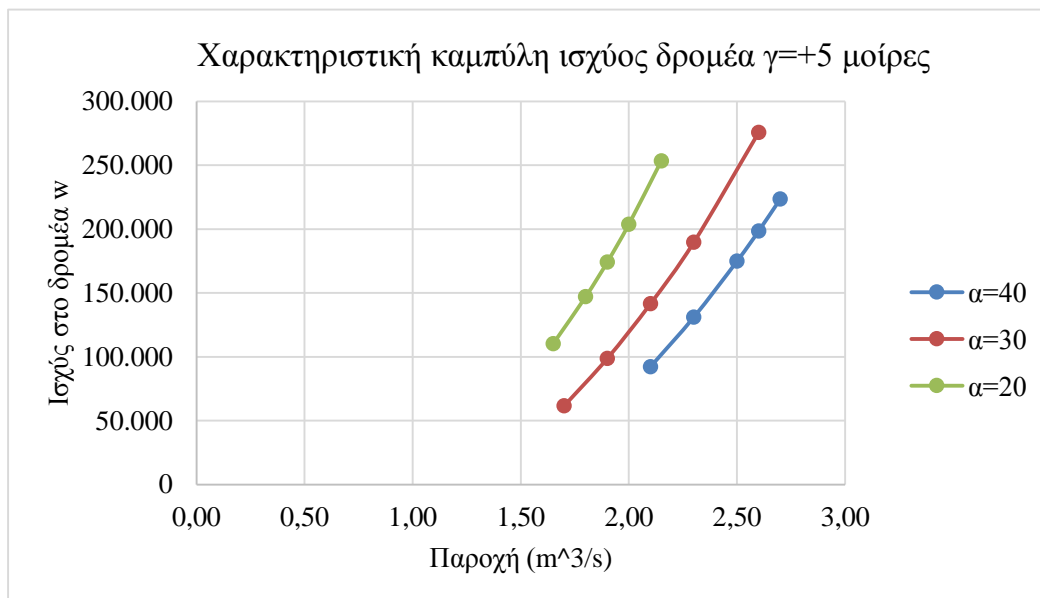
Ρυθμιστικά πτερύγια $\alpha=20$

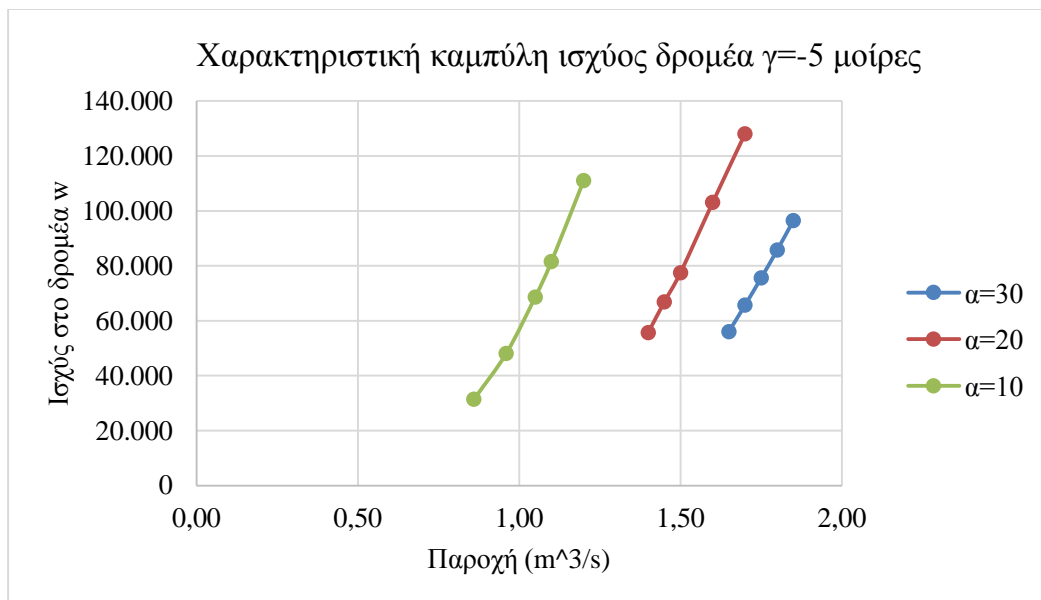
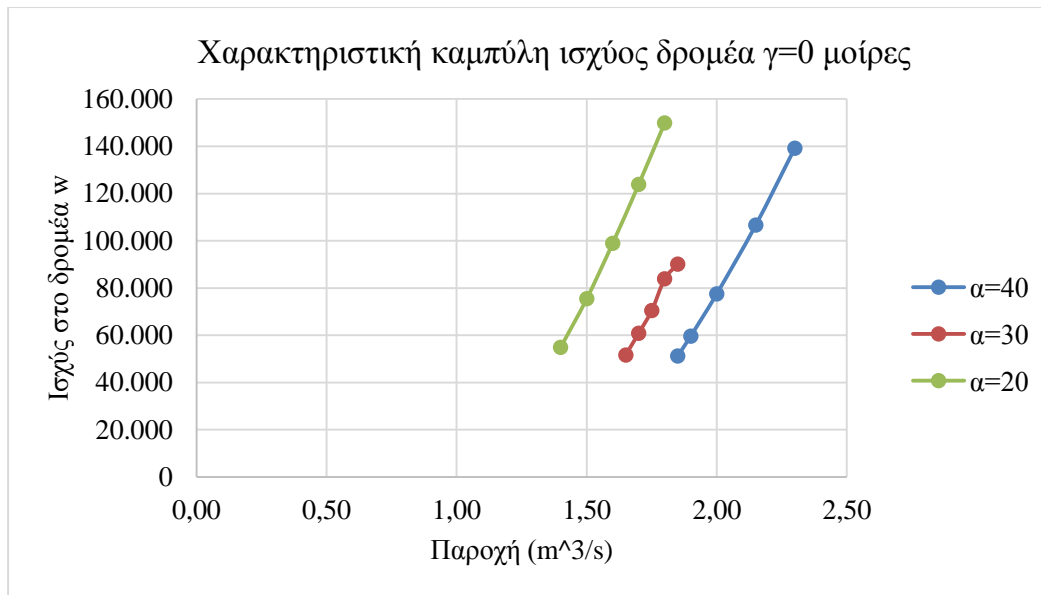
Q m ³ /s	Ισχύς στο δρομέα
1,40	55661,320
1,45	66849,200
1,50	77474,760
1,60	103048,000
1,70	128023,720

Ρυθμιστικά πτερύγια $\alpha=10$

Q m ³ /s	Ισχύς στο δρομέα
0,86	31411,16
0,96	48090,24
1,05	68644,40
1,10	81474,360
1,20	110981,200

Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα.





Ακολουθεί πίνακας με τα αριθμητικά δεδομένα για τον υπολογισμό του υδραυλικού ύψους κάθε περίπτωσης.

Γωνία δρομέα $\gamma=+5$

Ρυθμιστικά πτερύγια
 $\alpha=40$

Q m ³ /s	Υδραυλικό ύψος
2,10	5,217
2,30	6,726
2,50	8,287
2,60	9,082
2,70	9,897

Ρυθμιστικά πτερύγια
 $\alpha=30$

Q m ³ /s	Υδραυλικό ύψος
1,70	4,306
1,90	6,094
2,10	7,918
2,30	9,791
2,60	12,815

Ρυθμιστικά πτερύγια
 $\alpha=20$

Q m ³ /s	Υδραυλικό ύψος
1,65	7,825
1,80	9,665
1,90	10,917
2,00	12,232
2,15	14,285

Γωνία δρομέα $\gamma=0$

Ρυθμιστικά πετερύγια
 $\alpha=40$

Q m ³ /s	Υδραυλικό ύψος
1,85	3,415
1,90	3,834
2,00	4,674
2,15	5,938
2,30	7,259

Ρυθμιστικά πετερύγια
 $\alpha=30$

Q m ³ /s	Υδραυλικό ύψος
1,65	3,796
1,70	4,301
1,75	4,808
1,80	5,285
1,85	5,783

Ρυθμιστικά πετερύγια
 $\alpha=20$

Q m ³ /s	Υδραυλικό ύψος
1,40	4,675
1,50	5,935
1,60	7,301
1,70	8,661
1,80	10,02

Γωνία δρομέα $\gamma=-5$

Ρυθμιστικά πετερύγια
 $\alpha=30$

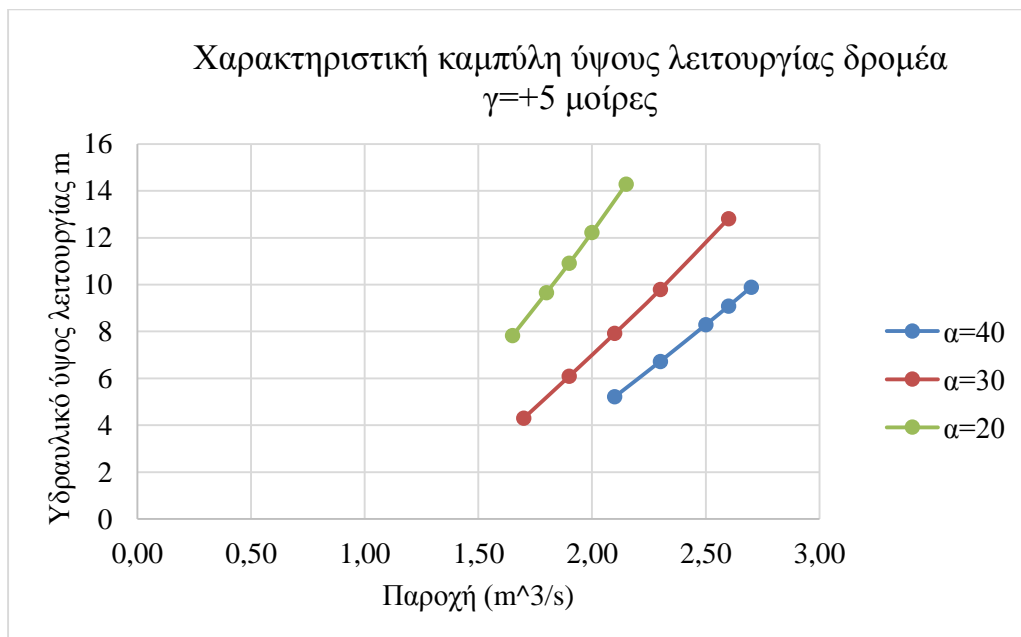
Q m ³ /s	Υδραυλικό ύψος
1,65	4,166
1,70	4,700
1,75	5,234
1,80	5,770
1,85	6,324

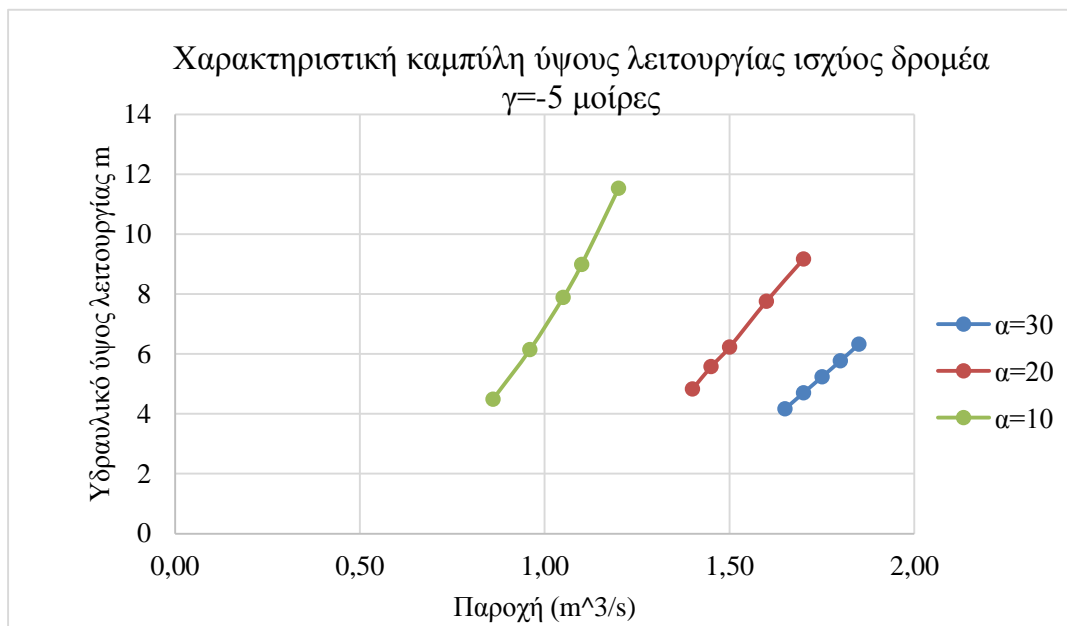
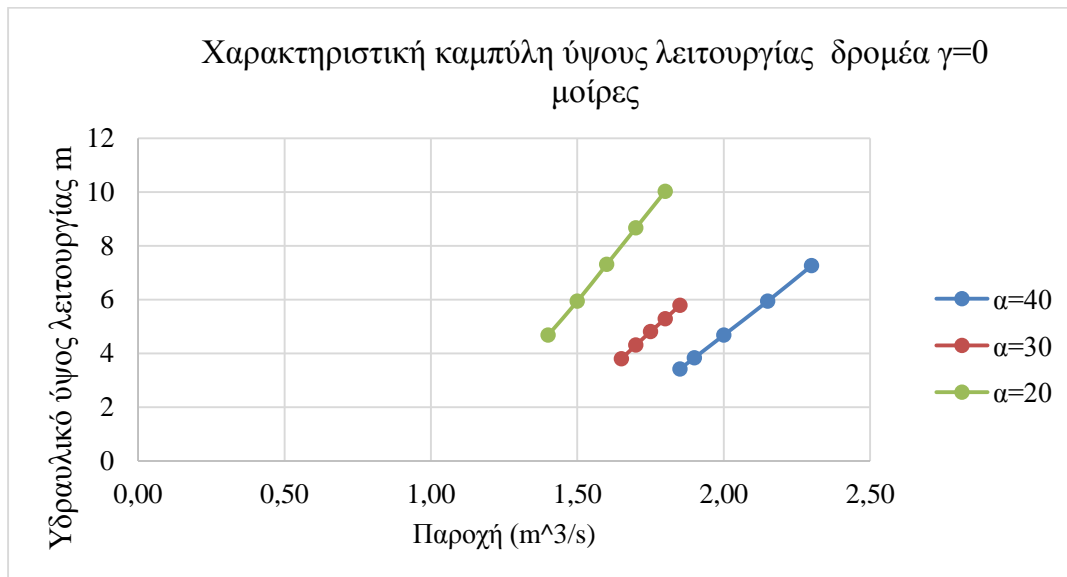
Ρυθμιστικά πετερύγια
 $\alpha=20$

Q m ³ /s	Υδραυλικό ύψος
1,40	4,831
1,45	5,571
1,50	6,228
1,60	7,760
1,70	9,166

Ρυθμιστικά πετερύγια
 $\alpha=10$

Q m ³ /s	Υδραυλικό ύψος
0,86	4,490
0,96	6,142
1,05	7,884
1,10	8,988
1,20	11,534





Από τα παραπάνω διαγράμματα ορίζονται τα σημεία λειτουργίας. Αναφέρεται ότι το βέλτιστο σημείο λειτουργίας είναι αυτό όπου εμφανίζει τον μέγιστο βαθμό απόδοσης όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3.2.1.

Για κάθε γωνία δρομέα υπάρχουν τρία βέλτιστα σημεία λειτουργίας. Ένα για κάθε γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων όπως έχει αναφερθεί παραπάνω.

Επίσης παρουσιάζεται η ισχύς του δρομέα.

Γωνία δρομέα +5⁰

Κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων 40⁰

Παροχή λειτουργίας: $Q_k=2,30 \text{ m}^3/\text{s}$

Υδραυλικό ύψος: $H_k=6,726 \text{ m}$

Ισχύς στο δρομέα: $N= 130962,92 \text{ w}$

Υδραυλικός βαθμός απόδοσης: $\eta_h=0,865$

Κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων 30⁰

Παροχή λειτουργίας: $Q_k=1,90 \text{ m}^3/\text{s}$

Υδραυλικό ύψος: $H_k=6,094 \text{ m}$

Ισχύς στο δρομέα: $N= 98656,36 \text{ w}$

Υδραυλικός βαθμός απόδοσης: $\eta_h=0,870$

Κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων 20⁰

Παροχή λειτουργίας: $Q_k=1,80 \text{ m}^3/\text{s}$

Υδραυλικό ύψος: $H_k=9,664 \text{ m}$

Ισχύς στο δρομέα: $N= 146997,84 \text{ w}$

Υδραυλικός βαθμός απόδοσης: $\eta_h=0,863$

Γωνία δρομέα 0⁰

Κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων 40⁰

Παροχή λειτουργίας: $Q_k=2,15 \text{ m}^3/\text{s}$

Υδραυλικό ύψος: $H_k=5,938 \text{ m}$

Ισχύς στο δρομέα: $N= 106675,8 \text{ w}$

Υδραυλικός βαθμός απόδοσης: $\eta_h=0,853$

Κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων 30⁰

Παροχή λειτουργίας: $Q_k=1,80 \text{ m}^3/\text{s}$

Υδραυλικό ύψος: $H_k= 5,284 \text{ m}$

Ισχύς στο δρομέα: $N= 83857,84 \text{ w}$

Υδραυλικός βαθμός απόδοσης: $nh=0,900$

Κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων 20°

Παροχή λειτουργίας: $Q_k=1,50 \text{ m}^3/\text{s}$

Υδραυλικό ύψος: $H_k= 5,934\text{m}$

Ισχύς στο δρομέα: $N= 75430,96\text{w}$

Υδραυλικός βαθμός απόδοσης: $nh=0,865$

Γωνία δρομέα -5°

Κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων 30°

Παροχή λειτουργίας: $Q_k=1,80 \text{ m}^3/\text{s}$

Υδραυλικό ύψος: $H_k= 5,770 \text{ m}$

Ισχύς στο δρομέα: $N= 85737,52 \text{ w}$

Υδραυλικός βαθμός απόδοσης: $nh=0,843$

Κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων 20°

Παροχή λειτουργίας: $Q_k=1,60 \text{ m}^3/\text{s}$

Υδραυλικό ύψος: $H_k= 7,759 \text{ m}$

Ισχύς στο δρομέα: $N= 103048 \text{ w}$

Υδραυλικός βαθμός απόδοσης: $nh=0,848$

Κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων 10°

Παροχή λειτουργίας: $Q_k=1,05 \text{ m}^3/\text{s}$

Υδραυλικό ύψος: $H_k= 7,883 \text{ m}$

Ισχύς στο δρομέα: $N= 68644,4 \text{ w}$

Υδραυλικός βαθμός απόδοσης: $nh=0,845$

Συμπεράσματα:

Παρατηρείται ότι υπάρχει καλή συμπεριφορά του υδροστροβίλου σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Καλύπτεται ένα εύρος παροχών από $1,05 \text{ m}^3/\text{s}$ έως $2,30$. Βάση της διπλής ρύθμισης του υδροστροβίλου είναι δυνατή η λειτουργία του σε υψηλούς βαθμούς απόδοσης σε αυτό το εύρος. Η ισχύς του υδροστροβίλου κυμαίνεται από 50 kw έως 250 kw σε κάποιες ακραίες περιπτώσεις. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης $nh=0,900$ αποδίδει 80 kw περίπου.

Το υδραυλικό ύψος λειτουργίας κυμαίνεται από 4 m έως 14 m .

3.2.5 Έλεγχος λειτουργίας υδροστροβίλου με διαφορετικό αριθμό πτερυγίων

Πραγματοποιείται έλεγχος για την λειτουργία του υδροστροβίλου με δεκατρία πτερύγια.

Για την πραγματοποίηση της προσημείωσης σχεδιάστηκε από την αρχή ένας δρομέας που φέρει δεκατρία πτερύγια. Ο σχεδιασμός του έγινε στο πρόγραμμα turbogrid αλλάζοντας τον αριθμό των πτερυγίων και κατασκευάζονται το υπολογιστικό χωρίο από την αρχή.

Η γωνία ελέγχου σε αυτή την περίπτωση είναι:

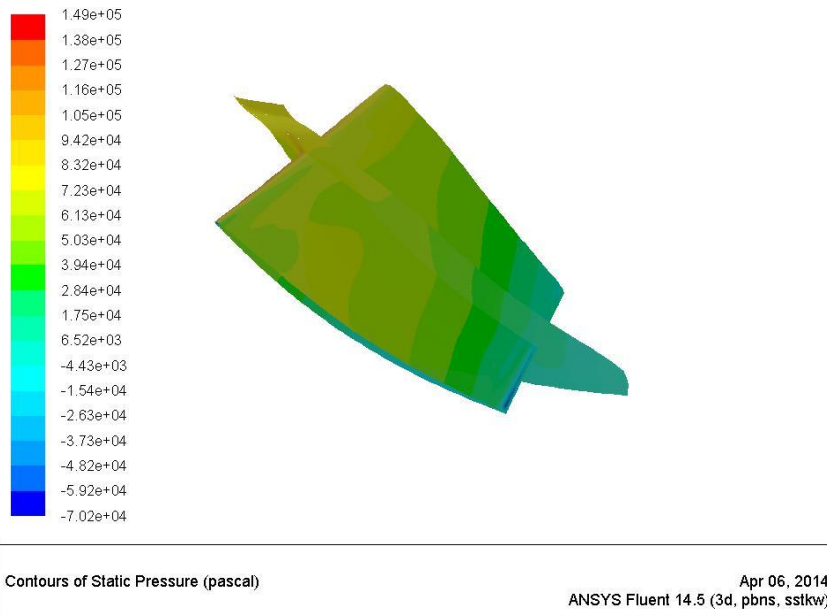
$$360/13 = 27,69$$

Οι οριακές συνθήκες όμως αλλάζουν. Εφόσον είναι αυξημένος αριθμός των πτερυγίων το εμβαδόν της διερχόμενης παροχής του δρομέα είναι μικρότερο. Για την σύγκριση με την περίπτωση του μέγιστου βαθμού απόδοσης γωνίας δρομέα 0 μοιρών και ρυθμιστικών πτερυγίων 30 μοιρών που επιτεύχθηκε υδραυλικός βαθμός απόδοσης $\eta_h=0,900$ πρέπει να αλλαχθούν οι οριακές συνθήκες.

Για τον υπολογισμό του νέου εμβαδού υπολογίστηκε το επιφανειακό ολοκλήρωμα στο Ansys Fluent. Στην συνέχεια διατηρώντας την παροχή σταθερή προέκυψαν οι παρακάτω οριακές συνθήκες και αποτελέσματα.

Παροχή	Ακτινική συνιστώσα ταχύτητας	Εφαπτομενική συνιστώσα ταχύτητας	Ροπή	Ολική πίεση στην είσοδο του δρομέα	Ολική πίεση στην έξοδο του δρομέα
(m ³ /s)	(m/s)	(m/s)	(nm)	(Pa)	(Pa)
1,80	2,400	4,156	247,600	100302,390	24307,598
Παροχή	Ροπή στον δρομέα	Ισχύς δρομέα	Ισχύς ρευστού	Υδραυλικός β.α.	Υδραυλικό ύψος
(m ³ /s)	(nm)	(w)	(w)		(m)
1,80	2723,600	108944,000	136790,626	0,796	7,761

Διαπιστώνεται ότι ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης είναι μειωμένος κατά πολύ. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς ο μεγαλύτερος αριθμός πτερυγίων αυξάνει τις υδραυλικές απώλειες τριβής.



Εικόνα 77. Η στατική πίεση του περυγίου και στο κέντρο της ροής.

Στην εικόνα 77 παρουσιάζεται η στατική πίεση η οποία κυμαίνεται σε ελάχιστο μεγαλύτερο επίπεδο. Διαπιστώνεται ότι υπάρχει μικρή περιοχή εμφάνισης σπηλαιώσης.

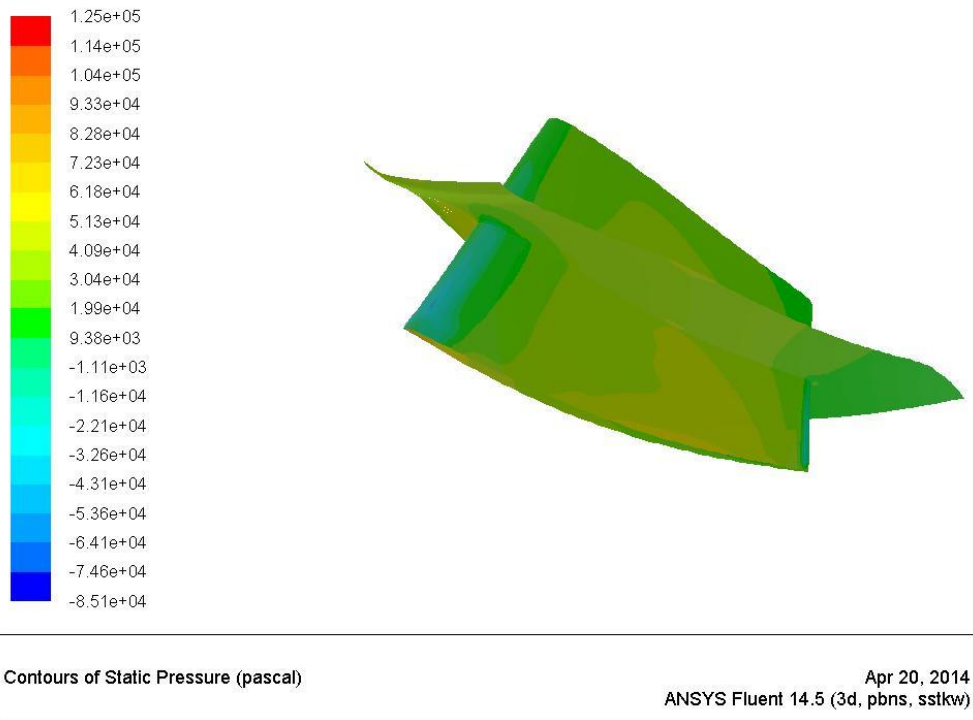
Η λειτουργία του υδροστροβίλου δεν ενδείκνυται με δεκατρία περύγια.

Πραγματοποιείται έλεγχος για την λειτουργία του υδροστροβίλου με εννέα περύγια.

Ομοίως οι οριακές συνθήκες είναι διαφορετικές στην είσοδο.

Παροχή	Ακτινική συνιστώσα ταχύτητας	Εφαπτομενική συνιστώσα ταχύτητας	Ροπή	Ολική πίεση στην είσοδο του δρομέα	Ολική πίεση στην έξοδο του δρομέα
(m ³ /s)	(m/s)	(m/s)	(nm)	(Pa)	(Pa)
1,80	1,660	2,875	11,876	48410,000	40373,766
Παροχή	Ροπή στον δρομέα	Ισχύς δρομέα	Ισχύς ρευστού	Υδραυλικός β.α.	Ύψος δρομέα
(m ³ /s)	(nm)	(w)	(w)		(m)
1,80	130,636	5225,440	14465,221	0,361	0,821

Διαπιστώνεται ότι ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης είναι μειωμένος, πιο πολύ ακόμα και από την περίπτωση των δεκατριών περυγίων.



Εικόνα 78. Η στατική πίεση του πτερυγίου και στο κέντρο της ροής.

Στην εικόνα 78 παρατηρείται η στατική πίεση στο πτερύγιο. Ελάχιστη πίεση εντοπίζεται στην ακμή εισόδου του πτερυγίου στην πλευρά της στεφάνης. Η συγκεκριμένη μορφή σπηλαιώσης είναι επικίνδυνη για την καλή λειτουργία του υδροστροβίλου.

Ως συμπέρασμα διαπιστώνεται ότι στο συγκεκριμένο θέμα μελέτης, η ιδανική λειτουργία του υδροστροβίλου επιτυγχάνεται με έντεκα πτερύγια.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα και προτάσεις

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε αριθμητική ανάλυση της ροής σε δρομέα υδροστροβίλου τύπου Deriaz, με στόχο τη διερεύνηση της λειτουργίας και της ενεργειακής του απόδοσης. Υπολογίστηκαν οι γωνίες ροής στα σημεία που προορίζονται να είναι οι ακμές εισόδου και εξόδου της ροής από το δρομέα. Οι συγκεκριμένοι υπολογισμοί έγιναν με σκοπό την χάραξη του δρομέα με ίδιες γωνίες εισόδου και εξόδου με τις γωνίες ροής ώστε να επιτευχθεί ροή χωρίς κρούση στην είσοδο και ελάχιστη δυνατή συστροφή στην έξοδο του δρομέα.

Στην συνέχεια μέσω ειδικού λογισμικού που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο των υδροδυναμικών μηχανών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. χαράχθηκε παραμετρικά ο δρομέας διπλής καμπυλότητας. Ο υδροστρόβιλος διαθέτει αρχικώς έντεκα πτερύγια και περιστροφική ταχύτητα $\omega=40$ r/s. Ακολουθεί η τριδιάστατη επίλυση της ροής.

Το τριδιάστατο μοντέλο περιλαμβάνει έναν τμηματικά περιοδικό συμμετρικό όγκο ελέγχου που περιέχει το πτερύγιο. Επίσης περιλαμβάνει το αντίστοιχο τμήμα εισόδου και εξόδου της ροής. Κατασκευάστηκε η καμπύλη λειτουργίας διπλής ρύθμισης του υδροστροβίλου η οποία δείχνει τον βέλτιστο συνδυασμό γωνίας κλίσης του δρομέα και γωνίας ρυθμιστικών πτερυγίων για τον οποίο ο υδροστρόβιλος αποδίδει τον μέγιστο υδραυλικό βαθμό απόδοσης. Ως συμπέρασμα διαπιστώθηκε από την συγκεκριμένη καμπύλη ότι ο υδροστρόβιλος έχει καλή λειτουργία σε μεταβλητό φορτίο λόγω της διπλής του ρύθμισης. Υπάρχει εύρος παροχών λειτουργίας του υδροστροβίλου με αρκετά καλή απόδοση. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης φτάνει το 90%.

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος για τη σπηλαιώση του συγκεκριμένου δρομέα. Ο έλεγχος έγινε στα τρία μέγιστα σημεία υδραυλικού βαθμού απόδοσης. Για γωνία δρομέα $\gamma=+5^\circ$ και γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων $\alpha=30^\circ$, για $\gamma=0^\circ$ και $\alpha=30^\circ$ και για $\gamma=-5^\circ$ και $\alpha=20^\circ$. Υπάρχει το ενδεχόμενη σπηλαιώση στην πλευρά της υποπίεσης του πτερυγίου. Παρατηρήθηκε επίσης μία μικρή περιοχή πιθανής εμφάνισης σπηλαιώσης στην ακμή προσβολής του πτερυγίου στην γωνία δρομέα -5 μοιρών και γωνία ρυθμιστικών 20 και κοντά στην πλήμνη. Αυτή η μορφή σπηλαιώσης δεν αποτελεί κίνδυνο για την καλή λειτουργία του υδροστροβίλου. Επίσης παρουσιάστηκε η διακύμανση της στατικής πίεσης. Μία μικρή πτώση της πίεσης στην είσοδο οφείλεται στο γεγονός ότι δεν μπορεί να αποφευχθεί πλήρως η ροή χωρίς κρούση. Ελέγχθηκε η πτώση της πίεσης κατά μήκος του άξονα της μηχανής και διαπιστώθηκε ότι η στατική πίεση στην έξοδο του δρομέα είναι κοντά στην ατμοσφαιρική. Αυτό οφείλεται στο ότι το μοντέλο του υδροστροβίλου που προσομοιώθηκε δεν περιλάμβανε αγωγό φυγής.

Στην συνέχεια ελέγχθηκαν τα πεδία ροής. Στην έξοδο του πτερυγίου υπάρχει παραμένουσα συστροφή η οποία έχει μικρό μέτρο. Δεν παρατηρήθηκε κατά μήκος του πτερυγίου ανακυκλοφορία του ρευστού.

Χαράχθηκαν χαρακτηριστικά διαγράμματα ισχύος και υδραυλικού ύψους λειτουργίας. Για κάθε κλίση δρομέα διατηρώντας σταθερή κλίση ρυθμιστικών πτερυγίων, εξετάστηκε η συμπεριφορά των παραπάνω παραμέτρων σε μεταβαλλόμενη παροχή. Ως συμπέρασμα διαπιστώνεται ότι υπάρχει μεγάλο εύρος λειτουργίας με καλή υδραυλική απόδοση ανάλογα το συνδυασμό γωνίας πτερυγίων δρομέα και ρυθμιστικών πτερυγίων.

Τέλος, ελέγχθηκε η λειτουργία του υδροστροβίλου στο κανονικό σημείο λειτουργίας με δεκατρία και με εννέα πτερύγια αντί για έντεκα. Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης μειώνεται σημαντικά.

Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του συγκεκριμένου υδροστροβίλου Deriaz.

1. Τοποθέτηση αγωγού φυγής του ρευστού μετά το δρομέα για περαιτέρω αύξηση του υδραυλικού βαθμού απόδοσης.
2. Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των πτερυγίων με πολυπαραμετρικές μεθόδους και ειδικό λογισμικό βελτιστοποίησης.
3. Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού με περισσότερους ταυτόχρονους στόχους όπως βελτιστοποίηση απόδοσης και ελαχιστοποίηση σπηλαίωσης, καθώς και για περισσότερα σημεία λειτουργίας.
4. Σύγκριση ενεργειακής απόδοσης με αντίστοιχο υδροστρόβιλο Francis για ένα εύρος ειδικού αριθμού στροφών.
5. Διερεύνηση δυνατότητας χρήσης και κατασκευής πτερυγίων του δρομέα με προσαρμοζόμενη γεωμετρία (shape adaptation) αντί για μηχανισμό περιστροφής τους.

Βιβλιογραφία

1. Παπαντώνης Δ.Ε.(2009) «Υδροδυναμικές μηχανές, αντλίες –υδροστρόβιλοι», εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
2. Παπαντώνης Δ.Ε. (2008), «Μικρά υδροηλεκτρικά έργα», εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
3. Παπαντώνης Δ.Ε. (2004), «Μελέτη και χάραξη φυγοκεντρικών αντλιών», Αθήνα.
4. Τσαγγάρης Σωκράτης (2005), «Μηχανική των ρευστών», εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
5. Μπεργελές Γ. (2006), «Υπολογιστική ρευστομηχανική», εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
6. Σκλαβούνος Σ. (2006), «Διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από ατυχήματα μεγάλης έκτασης σε χημικές εγκαταστάσεις», Διδακτορική διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα
7. Τσιρίγκας Π., (2011), «Ανάλυση φορέων με την ισογεωμετρική μέθοδο», Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα
8. Ioannis Kassanos, John Anagnostopoulos and Dimitris Papantonis (2013), «Development of a Hydraulic Turbine Design Method», 11th international conference of numerical analysis and applied mathematics 2013, Rhodes, Greece, 2301-2304.
9. P. M. V. Subbarao Professor, ««Design Analysis of Francis Turbine Runner» (2013), Lecture Presentation, Indian Institute of Technology, Delhi.