

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΡΟΜΕΑ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΡLΑΝ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Α. ΜΥΛΩΝΑ

Επιβλέπων: Ιωάννης Αναγνωστόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγη
τής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΡΟΜΕΑ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΡLΑΝ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Διπλωματική Εργασία

του

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Α. ΜΥΛΩΝΑ

Επιβλέπων: Ιωάννης Αναγνωστόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Α. ΜΥΛΩΝΑΣ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π. Copyright © Μυλωνάς Κωνσταντίνος 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΡΟΜΕΑ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΡLΑΝ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως σκοπό την ανάπτυξη ενός αναλυτικού υδροδυναμικού μοντέλου, για την σχεδίαση δρομέων υδροστροβίλων Kaplan. Η υδροδυναμική ανάλυση ενός δρομέα υδροστροβίλου είναι απαραίτητη για την αποδοτική σχεδίαση και λειτουργία του στον Υδροηλεκτρικό Σταθμό παραγωγής ενέργειας που πρόκειται να εγκατασταθεί. Ωστόσο, ο καθορισμοός της τελικής γεωμετρίας του δρομέα, απαιτεί προσεκτική μελέτη των παραμέτρων που την καθορίζουν. Το μοντέλο στοχεύει στην μελέτη των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών λειτουργίας της παραγόμενης μηχανής.

Η διαδικασία μελέτης περιλαμβάνει κατ' αρχήν την ανάλυση των χαρακτηριστικών της ροής διαμέσου του δρομέα και τον τρόπο με τον οποίο η ροή επιδρά στα πτερύγια του δρομέα, δημιουργώνας ροπή στρέψης στον άξονά του. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται το υδροδυναμικό μοντέλο σχεδίασης όπου επιλέγονται οι καθοριστικές παράμετροι σχεδίασης και παράγεται η γεωμετρία του δρομέα. Το μοντέλο που αναπύχθηκε, βασίζεται στη θεωρία ανάλυσης των στροβιλομηχανών και τη ροή διαμέσου πτερυγώσεων για την δημιουργία ωφέλιμου έργου. Με τη χρήση αυτών των παραμέτρων, επιτυγχάνεται η σχεδίαση του δρομέα με στόχο την αποδοτικότερη μετατροπή υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική. Για την επαλήθευση της αποδοτικής σχεδίασης του δρομέα, μελετώνται επίσης τα ποιοτικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του σχεδιαζόμενου υδροστροβίλου μέσω των βασικών διαγραμμάτων υδραυλικού ύψους – παροχής και ανηγμένης παροχής – ανηγμένου αριθμού στροφών.

Από την εφαρμογή του μοντέλου, διαπιστώνεται ότι υπάρχει μεγάλη συνάφεια μεταξύ του σχεδιασμένου δρομέα και ενός πραγματικού δρομέα υδροστροβίλου Kaplan που επιλέχθηκε για σύγκριση. Η συνάφεια αυτή παρατηρείται τόσο στη διαμόρφωση των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών, όσο και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του. Στην πρώτη περίπτωση, το μοντέλο είναι ικανό να παράγει επιτυχώς την γεωμετρία του δρομέα, έχοντας ως οδηγό τις βασικές παραμέτρους σχεδίασης. Στην δεύτερη περίπτωση, η παραγόμενη γεωμετρία του δρομέα εξετάζεται ως προς τον ενεργειακό βαθμό απόδοσής της και το μοντέλο παρέχει πλήρη και ρεαλιστική εικόνα σε όλο το εύρος των συνθηκών λειτουργίας του υδροστροβίλου.

STUDY AND PARAMETRIC DESIGN OF A KAPLAN TURBINE ROTOR WITH AN ANALYTICAL HYDRODYNAMIC MODEL

Abstract

The present Diploma Thesis intends to present the development of an analytical hydrodynamic model for the design of Kaplan turbine rotors. The hydrodynamic analysis or a hydro turbine rotor is necessary for its efficient design and operation at the Hydroelectric Power Plant, where it is to be installed. However, the determination of the final rotor geometry demands careful study of the determinant parameters. This model aims to study the hydrodynamic characteristics of the hydro turbine, the selection of the proper design parameters and the presentation of the qualitative operation characteristics of the detrived turbine.

First of all, the study process consists of the analysis of the flow characteristics through the rotor and the way that the flow effects on the rotor blades in order to create turning moment on its shaft. Then, the hydrodynamic design model moves on to the selection of the determinant design parameters and produces the rotor geometry. The developed model is based on the theory of turbomachinery analysis and the flow through individual stages in order for it to create useful work. By using these parameters and aiming at the most efficient energy conversion, from hydraulic to mechanical, the rotor design is achieved. To verify the efficient rotor design, the qualitative operation characteristics of the designed turbine are also studied through plotting the basic head versus discharge and specific discharge versus specific rotational speed diagrams.

Following the application of the model, it is observed that there is significant relevance between the designed rotor and a real Kaplan turbine rotor that was selected for comparison. This relevance can be observed both on the formation of its geometric and qualitative operating characteristics. In the first case, the model is capable of successfully producing the rotor geometry by using as a guide the basic design parameters. In the second case, the derived rotor geometry is studied for its energy efficiency and the model provided a full and realistic view of the whole range of the turbine's operating conditions.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αποτέλεσμα συνεχόμενης και εντατικής προσπάθειας μου για την περαιτέρω μόρφωση και ανάδειξή μου σε ικανό επιστήμονα και μηχανικό. Ωστόσο, η βοήθεια και παρουσία ορισμένων ανθρώπων αποδείχθηκε καταλυτική για την επιτυχημένη ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθητητή μου, κ. Ιωάννη Αναγνωστόπουλο για την συνεχή και πολύτιμη βοήθειά του σε όλα τα στάδια της εργασίας, από την ανάθεση του θέματος ως και την ολοκλήρωση του τελικού κειμένου. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου Υδροδυναμικών Μηχανών ΕΜΠ για την βοήθεια και καθοδήγησή τους σε όλες τις απορίες και δυσκολίες που συνάντησα και ειδικότερα τον Δημήτρη Νάκο, υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, με τον οποίο συνεργάστηκα αρμονικά και αποτελεσματικά από την πρώτη μέρα της ανάληψης της εργασίας.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω από καρδιάς τους φίλους μου από την Ομάδα Αεροναυπηγικής του ΕΜΠ «ΕΡΜΗΣ» με τους οποίους ζήσαμε μια εμπειρία ζωής συμμετέχοντας στον παγκόσμιο αεροναυπηγικό διαγωνισμό "Air Cargo Challenge 2013" στην Λισαβόνα της Πορτογαλίας. Αυτοί είναι οι Κωνσταντίνος Δαλάκας, Πέτρος Γαρυφαλάκης, Άγγελος Εζνεπίδης και Ανδρέας Αθανασούλας. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τους Δημήτρη Γούσκο και Γιάννη Τσαγκαρλιώτη από τον Σύλλογο Φοιτητών Αεροδιαστημικής του ΕΜΠ, EUROAVIA Athens, που με βοήθησαν να τολμήσω να ανοίξω τα φτερά μου, να επεκτείνω τους ορίζοντες και τις γνώσεις μου και να ζήσω καινούργιες εμπειρίες συμμετέχοντας σε διεθνείς συναντήσεις φοιτητών αεροδιαστημικής.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω έναν προς έναν τους πολύ σημαντικούς ευρωπαίους φίλους που απέκτησα μέσα από την διεθνή ενασχόλησή μου με την EUROAVIA τα τελευταία χρόνια, οι οποίοι μου έδωσαν δύναμη και εφόδια να γίνω καλύτερος επιστήμονας, μηχανικός και άνθρωπος. Αυτοί είναι οι Pia Becker, Elif Ece Erdoğdu, Nicola Cimmino, Andreea Popescu, Patrick Lorrig, Gregorio Spinelli, Marco Marino, Andrada Jecu, και Türküler Seferbeyoğlu. Ειδική μνεία θέλω να δώσω στους νέους και πολύτιμους φίλους μου από την Σερβία, που με βοήθησαν να γνωρίσω ένα νέο κόσμο και να αισθανθώ σαν το σπίτι μου σε μια άγνωστη αλλά πολύ φιλόξενη και ζεστή χώρα. Hvala vam puno Bogdan Novaković, Aleksandra Ćirković, Dmitar Popović, Nikola Marjanović, Dušan Pavlović και Srđan Kostić.

Ευχαριστώ επίσης, τους φίλους και συναδέλφους μου Γιώργο Κουτσούπη, Σεραφείμ Ζορμπά και Κατερίνα Πελέκη για όλες τις όμορφες στιγμές που περάσαμε μαζί και την αμέριστη βοήθεια και υποστηριξή τους σε όλα τα στάδια της ακαδημαϊκής μου πορείας. Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά ευγνωμοσύνη μου στους αγαπημένους μου γονείς Ανδρέα Μυλωνά και Φωτεινή Χαραλαμποπούλου, στις αδερφές μου Αιμιλία και Μυρτώ Μυλωνά και σε όλα τα μέλη της ευρύτερης οικογένειάς μου για όλη την υλική και άυλη υποστήριξη και βοήθεια που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Όλοι στάθηκαν στο πλευρό μου όταν χρειάστηκε και τους ευχαριστώ βαθιά για αυτό.

Αφιερώνεται στην οικογένεια και τους,φίλους μου

<u>Περιεχόμενα</u>

1. K	ΈΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ	1
1.1.	Εισαγωγή	1
1.2.	Ιστορική αναδρομή	3
1.3.	Αρχή Λειτουργίας	6
1.4.	Τρίγωνα Ταχυτήτων	9
1.5.	Ειδικός αριθμός στροφών	12
1.6.	Βαθμός Απόδοσης	14
1.6.1.	Μηχανικός βαθμός απόδοσης	14
1.6.2.	Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης	14
1.6.3.	Υδραυλικός βαθμός απόδοσης	15
1.6.4.	Συνολικός βαθμός απόδοσης	16
1.7.	Ομοιότητα	17
1.8.	Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας	18
2. K	ΈΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ	23
2.1.	Γενική περιγραφή του υδροστροβίλου Kaplan	23
2.2.	Τύποι υδροστροβίλου Kaplan	25
2.3.	Υπάρχουσες μέθοδοι σχεδίασης υδροστροβίλων Kaplan	31
2.3.1.	Θεωρία Υδροδυναμικής Σχεδίασης	32
2.3.2.	Ανοιχτά θέματα σχεδίασης σε υδροστρόβιλο Kaplan	35
3. K	ΣΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ	37
3.1.	Τοποθέτηση του προβλήματος	37
3.2.	Φάση 1: Εισαγωγή των δεδομένων λειτουργίας του υδροστροβίλου	37
3.3.	Φάση 2: Ορισμός των γραμμών ροής δια μέσου του δρομέα	41
3.4.	Φάση 3: Υπολογισμός των τριγώνων ταχυτήτων	43
3.4.1.	Τρίγωνο Ταχυτήτων Εισόδου	43
3.4.2.	Τρίγωνο Ταχυτήτων Εζόδου	45
3.5.	Φάση 3: Εύρεση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της υδροτομής _	48
3.6.	Φάση 5: Επιλογή Υδροτομής των πτερυγίων του δρομέα	54
3.6.1.	Σειρά αεροτομών NACA 65 (έζι ψηφίων)	54

3.6.2.	Σειρά αεροτομών NACA 44 (τεσσάρων ψηφίων)	57
3.6.3.	Σειρά αεροτομών GOE	59
3.6.4.	Αζιολόγηση και επιλογή καταλληλότερης υδροτομής	60
3.7.	Φάση 4: Γέννεση της γεωμετρίας του δρομέα	69
4. K	ΈΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ	73
4.1.	Διάγραμμα λειτουργίας του υδροστροβίλου	73
4.2.	Διάγραμματα Ύψους – Παροχής	77
4.3.	Διάγραμματα Ανηγμένης Παροχής – Ανηγμένου Αριθμού Στροφών	79
4.4.	Διάγραμμα ισοϋψων καμπύλων του βαθμού απόδοσης	81
5. K	ΈΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ	83
5.1.	Συμπεράσματα	83
5.2.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	84
ΒΙΒΛ	ΙΟΓΡΑΦΙΑ	87

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Διάγραμμα Ύψους - Παροχής1	9
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα Ύψους - Παροχής με ισοϋψείς καμπύλες ισχύος, βαθμού	
απόδοσης και ανοίγματος ρυθμιστικών πτερυγίων2	0
Διάγραμμα 3: Χάρτης Υδροστροβίλου Sulzer2	1
Διάγραμμα 4: Στατιστικό διάγραμμα επιλογής διαμέτρου Υδροστροβίλου3	3
Διάγραμμα 5: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού συντελεστή άνωσης αεροτομής	
3	5
Διάγραμμα 6: Χάρτης Υδροστροβίλου Andritz3	8
Διάγραμμα 7: Ετήσιες μεταβολές χαρακτηριστικών λειτουργίας του Swansea Tidal	
Barrage3	9
Διάγραμμα 8: Συντελεστής διόρθωσης του συντελεστή άνωσης επίπεδης πλάκας κατα	ά
Weinig6	2
Διάγραμμα 9: Ψηφιοποιμένο διάγραμμα αποτελεσμάτων επίπεδης πλάκας κατά	
Weinig6	3
Διάγραμμα 10: Μεταβολή του συντελεστή ως προς την στερεότητα στην ακτινική	
διεύθυνση64	4
Διάγραμμα 11: Συντελεστής άνωσης υδροτομών ΝΑCA6	5
Διάγραμμα 12: Συντελεστής άνωσης υδροτομών GOE6	б
Διάγραμμα 13: Συντελεστής οπισθέλκουσας υδροτομών ΝΑCA6	7
Διάγραμμα 14: Συντελεστής οπισθέλκουσας υδροτομών GOE6	7
Διάγραμμα 15: Ύψος και βαθμός απόδοσης συνερτήσει της παροχής με παράμετρο τ	0
άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων7'	7
Διάγραμμα 16: Ύψος και βαθμός απόδοσης συνερτήσει της παροχής με παράμετρο	
την γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα7	8
Διάγραμμα 17: Ανηγμένη παροχή και βαθμός απόδοσης συνερτήσει του ανηγμένου	
αριθμού στροφών με παράμετρο το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων8	0
Διάγραμμα 18: Ανηγμένη παροχή και βαθμός απόδοσης συναρτήσει του ανηγμένου	
αριθμού στροφών με παράμετρο την γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα8	1
Διάγραμμα 19: Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας ανηγμένης παροχής –	
ανηγμένου αριθμού Στροφών82	2

<u>Κατάλογος Εικόνων</u>

Εικόνα 1: Σχέδιο προβιομηχανικού νερόμυλου	3
Εικόνα 2 : Υδροστρόβιλος Francis σε μεσημβρινή τομή	4
Εικόνα 3: Υδροστρόβιλος Kaplan σε μεσημβρινή τομή	5
Εικόνα 4: Υδροστρόβιλος Pelton	6
Εικόνα 5: 3διάστατο πεδίο ταχυτήτων	9
Εικόνα 6: Τμήματα Υδροστροβίλου Kaplan	23
Εικόνα 7 : Κατακόρυφος Υδροστρόβιλος Kaplan	26
Εικόνα 8: Βολβοειδής Υδροστρόβιλος (Bulb)	27
Εικόνα 9: Υδροστρόβιλος Kaplan S-type οριζόντιας ατράκτου	28
Εικόνα 10: Υδροστρόβιλος Kaplan S-type κατακόρυφης ατράκτου	29
Εικόνα 11: Υδροστρόβιλος Kaplan S-type κεκλιμένης ατράκτου	30
Εικόνα 12: Βολβοειδής Υδροστρόβιλος με ιμάντα	30
Εικόνα 13: Βολβοειδής Υδροστρόβιλος με γρανάζια Bevel	31
Εικόνα 14: Ακτινικό Διάκενο	42
Εικόνα 15: Τρίγωνο Ταχυτήτων της εισόδου	43
Εικόνα 16: Τρίγωνο Ταχυτήτων της εξόδου για διαφορετικές τιμές της παροχής_	46
Εικόνα 17: Τρίγωνα Ταχυτήτων	48
Εικόνα 18: Αναπτυσσόμενες δυνάμεις σε τομή του μερικού δρομέα	49
Εικόνα 19 : Ορισμός της γωνίας προσανατολισμού πτερύγωσης (γ) και της γωνία	ς
πρόσπτωσης (i)	53
Εικόνα 20 : Ορισμός γεωμετρίας αεροτομής ΝΑCA 65	55
Εικόνα 21: Ορισμός της γεωμετρίας αεροτομής ΝΑCA 44	59
Εικόνα 22: Υδροτομή GOE 682	69
Εικόνα 23: Μεσημβρινή όψη υδροστροβίλου με υδροτομή GOE 682	71
Εικόνα 24: Ισομετρική όψη υδροστροβίλου με υδροτομή GOE 682	71

<u>Κατάλογος Πινάκων</u>

Πίνακας 1: Στατιστικά στοιχεία επιλογής γεωμετρικών στοιχείων υδροστροβίλου _	_33
Πίνακας 2: Συντεταγμένες σημείων υδροτομής 65-10-10	_55
Πίνακας 3: Σχετική απόκλιση αεροδυναμικών συντελεστών από την ιδεατή τιμή	_68
Πίνακας 4: Εύρη ελεύθερων παραμέτρων	_76

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

1.1.Εισαγωγή

Οι υδροστρόβιλοι, ως υδροδυναμικές μηχανές, είναι οι μηχανές μέσω των οποίων η ενέργεια του διακινούμενου ρευστού μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια στην στρεφόμενη άτρακτο του δρομέα. Η ενέργεια του ρευστού δημιουργείται από το γεγονός ότι αυτό βρίσκεται σε υψηλότερη στάθμη από τον υδροστρόβιλο και στόχος είναι ο υδροστρόβιλος να μετατρέψει όσο το δυνατόν αποδοτικότερα την δυνητική αυτή ενέργεια του ρευστού σε κινητήρια ροπή στην στρεφόμενη άτρακτό του.

Στην συντριπτική πλειοψηφία τους, οι μηχανές αυτές λειτουργούν με νερό, το οποίο έχει την δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας., χάρις στην υψηλή πυκνότητά του, η οποία επιτρέπει σε μια μικρή σχετικά ποσότητα νερού τοποθετημένη σε υψηλότερη στάθμη, να αποκτά μια σημαντική ποσότητα ενέργειας προς εκμετάλλευση. Επίσης, λόγω του γεωγραφικού και εδαφικού αναγλύφου είναι δυνατό να δημιουργηθούν μεγάλες λεκάνες συσσώρευσης νερού στις οποίες αποθηκεύονται σημαντικές ποσότητες ενέργειας. Η ενέργεια αυτή του νερού αποτελεί την μεγαλύτερη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας αυτή την στιγμή στον κόσμο και είναι εμφανής η ανάγκη για την αξιοποίησή του μεγαλύτερου δυνατού ποσοστού της για την κάλυψη μεγάλου μέρους των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας (GSR, 2014).

Η ενέργεια αυτή, μέσω του υδροστροβίλου, μετατρέπεται σε μηγανική και στην συνέχεια σε ηλεκτρική, μέσω της σύνδεσης της ατράκτου της μηχανής με μια γεννήτρια. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε την πρώτη περίπτωση της παραγωγής ηλεκτρισμού μέσω μιας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας στην ιστορία. Το ζεύγος υδροστροβίλου-γεννήτριας επιλέγεται προσεκτικά για κάθε περίπτωση υδροηλεκτρικού έργου με στόχο την καλύτερη αξιοποίηση της ενέργειας του νερού σε μεγάλος εύρος λειτουργίας. Το εύρος αυτό καθορίζεται από την στάθμη του νερού στο έργο, το οποίο με την σειρά του εξαρτάται από τον υδρολογικό κύκλο (βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις, κλπ). Αυτά τα φαινόμενα καθορίζουν το διαθέσιμο ύψος και την παροχή του νερού στην μηχανή. Με τα δεδομένα αυτά κατά νου, γίνεται η επιλογή του καταλληλότερου τύπου υδροστροβίλου για την δεδομένη περίπτωση.

Τα υδροηλεκτρικά έργα παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα που τα καθιστούν ένα σημαντικό ενεργειακό κεφάλαιο προς αξιοποίηση. Ενδεικτικά, αυτά είναι η ανανεώσιμη φύση της παραγόμενης ενέργειας η οποία προέρχεται από φυσικές βροχοπτώσεις και υδατοπτώσεις, η δυνατότητα άμεσης χρησιμοποίησης της αποθηκευμένης ενέργειας και παροχής της στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και η μικρή συντήρηση και επίβλεψη που απαιτείται για τις μηχανές αυτές που οδηγεί στην

μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Ωστόσο υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία είναι αναγκαίο να αναφερθούν. Αυτά είναι το υψηλό κόστος της επένδυσης για την κατασκευή του έργου και του μηχανολογικού-ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, η μεγάλη διάρκεια κατασκευής του έργου και η συχνά απομακρυσμένη τοποθεσία τους από περιοχές μεγάλης ενεργειακής ζήτησης που δημιουργεί πρόσθετες ανάγκες κατασκευής έργων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μειονεκτήματα αυτά μπορούν να αντισταθμιστούν με μια ολοκληρωμένη μελέτη για το έργο αυτό ώστε να γίνει το έργο βιώσιμο και αποδοτικό σε βάθος χρόνου.

Είναι σημαντικό για κάθε υδροηλεκτρικό έργο, ο υδροστρόβιλος που θα επιλεγεί να ανταποκρίνεται και να αποδίδει καλύτερα στα χαρακτηριστικά του έργου αυτού. Το γεγονός αυτό καθορίζει εν πολλοίς την βιωσιμότητα και την απόδοση του έργου, όπως προαναφέρθηκε. Οι δύο επικρατέστεροι τύποι υδροστροβίλων που έχουν αναπτυχθεί για αυτό τον σκοπό είναι ο υδροστρόβιλος δράσης και ο υδροστρόβιλος αντίδρασης. Ο πρώτος, αφορά στην μετατροπή της πίεσης του νερού σε κινητική ενέργεια και την πρόσδοσή της στην άτρακτο της μηχανής μέσω ενός ή περισσότερων ακροφυσίων δέσμης νερού υψηλής ταχύτητας. Ο δεύτερος, αφορά την εκμετάλλευση της πίεσης του νερού για την δημιουργία περιστροφικής δύναμης στα πτερύγια της μηχανής. Περισσότερες λεπτομέρειες για τους παραπάνω τύπους θα δοθούν σε επόμενη παράγραφο.

Ο στόχος της σχεδίασης υδροδυναμικών μηχανών αυτού του τύπου είναι η επίτευξη του μεγαλύτερου δυνατού βαθμού απόδοσης και προσπάθειες γίνονται να επιτευχθεί αυτό με το μικρότερο δυνατό κόστος. Τα σχεδιαστικά εργαλεία που απαντώνται σήμερα παρουσιάζουν μεγάλο υπολογιστικό και χρηματικό κόστος για την ανάπτυξη και χρήση τους οπότε προσπάθειες πρέπει να γίνουν να αναζητηθεί ένα εργαλείο σχεδίασης που θα συνδυάζει την απλότητα στην χρήση, την αποτελεσματικότητα στην σχεδίαση και με μικρό κόστος. Το αναλυτικό υδροδυναμικό μοντέλο που παρουσιάζεται σε αυτή τη διπλωματική εργασία, προσπαθεί να συνδυάσει τα παραπάνω χαρακτηριστικά με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας και τα βασικά χαρακτηριστικά των υδροστροβίλων ως υδροδυναμικές μηχανές. Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται πιο αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των υδροστροβίλων Kaplan καθώς και οι βασικές σχεδιαστικές φιλοσοφίες που απαντώνται σήμερα. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του αναλυτικού υδροδυναμικού μοντέλου σχεδίασης με την ανάλυσης της ροής, την επιλογή υδροτομής και την γέννεση της γεωμετρίας του δρομέα. Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης της λειτουργίας του σχεδιασμένου υδροστροβίλου σε διαφορετικές συνθήκες. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της σχεδίασης και μελέτης ενός υδροστροβίλου με χρήση του μοντέλου αυτού και γίνονται προτάσεις για συνέχιση της ερευνητικής διαδικασίας που διεκπεραιώθηκε σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία.

1.2.Ιστορική αναδρομή

Οι αρχαιότερες πηγές τοποθετούν την κατασκευή υδροστροβίλων στον 2° αιώνα π.Χ από τους Αρχαίους Έλληνες και τους Ρωμαίους. Ο υδροστρόβιλος που είχε αναπτυχθεί ήταν ένας νερόμυλος με 2 ομόκεντρες κυκλικές στεφάνες και σειρές πτερυγίων ανάμεσά του. Αυτός ο πρώτος τύπος υδροστροβίλου δράσεως, τοποθετούνταν σε ποτάμια με ρεύμα υψηλής ταχύτητας και χρησιμοποιούνταν για καθημερινές εργασίες που μέχρι πρότεινος γίνονταν με χειρωνακτική εργασία, όπως η άλεση σιταριού για την παραγωγή αλευριού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο νερόμυλος του Μιθριδάτη ΣΤ' Ευπάτορα, βασιλιά του Πόντου, που όπως αναφέρει ο Στράβωνας στο έργο του «Γεωγραφικά», βρισκόταν στο παλάτι του όπου οι Ρωμαίοι είδαν το σχέδιο, το μετέφεραν και το χρησιμοποίησαν ευρέως σε όλη την Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία. Το σχέδιο αυτό, που έχει την μορφή ενός σημερινού νερόμυλου, εξελίχθηκε και επεκτάθηκε σε όλο τον γνωστό κόσμο όπου καθ' όλη την περίοδο της προβιομηχανικής ιστορίας χρησιμοποιούνταν σε πολλές εφαρμογές της καθημερινής ζωής (Εικ. 1).



Εικόνα 1: Σχέδιο προβιομηχανικού νερόμυλου

Το καθοριστικό βήμα για στην εξέλιξή τους έγινε από τον Ελβετό μαθηματικό Leonhard Euler, ο οποίος διατύπωσε την θεμελιώδη εξίσωση των στροβιλομηχανών

στα μισά του 18° αιώνα μ.Χ. Με βάση αυτή την θεωρητική προσέγγιση, προχώρησε στην σχεδίαση ενός υδροστροβίλου αντιδράσεως, ο οποίος ωστόσο δεν χρησιμοποιήθηκε σε πρακτική εφαρμογή. Περίπου 80 χρόνια αργότερα, αναπτύχθηκαν οι πρώτες πρακτικές εφαρμογές υδροστροβίλων, σχεδιασμένων με βάση την λογική και τα μαθηματικά, από τους Γάλλους μηχανικούς Β. Fourneyron και C. Burdin. Ο υδροστρόβιλος φυγοκεντρικής ροής που σχεδίασαν, γρήγορα επεκτάθηκε και βρήκε εφαρμογή σε πολλά μέρη της Ευρώπης, λόγω της απλής του κατασκευής και του ικανοποιητικού βαθμού απόδοσης του (80% περίπου). Ωστόσο, η λειτουργία αυτής της μηχανής σε μεταβατικές καταστάσεις και σε συνθήκες διαφορετικού ύψους και παροχής, μείωνε σημαντικά τον βαθμό απόδοσής του και οδήγησε στην αναζήτηση και ανάπτυξη διαφορετικών σχεδίων στα επόμενα χρόνια.

Το επόμενο βήμα έγινε από τον Βρετανό μηχανικό James B. Francis, ο οποίος βασίστηκε στο υπάρχον σχέδιο του υδροστροβίλου φυγοκεντρικής ροής, στον οποίο πρόσθεσε μια στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων για την καλύτερη ρύθμιση της παροχής. Ο σχεδιασμός της μηχανής έγινε με βάση επιστημονικές αρχές και πειράματα που οδήγησαν στον βέλτιστο δυνατό σχεδιασμό της με τον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό απόδοσης. Οι επιστημονικές του μέθοδοι βοήθησαν στον σχεδιασμό μεγάλων μηχανών με μεγάλο βαθμό απόδοσης, άνω του 90%. Ο πρώτος υδροστροβίλου ξιατιστο δυνατό σχεδιασμός της μηχανώς με μεγάλο βαθμό απόδοσης, άνω του 90%. Ο πρώτος υδροστρόβιλος Francis χρησιμοποιήθηκε στο Lowell της Μασσαχουσέτης στις ΗΠΑ, για παραγωγή ενέργειας σε εργοστάσιο υφασμάτων (Εικ. 2). Σήμερα, αυτός ο τύπος υδροστροβίλου αποτελεί τον πιο ευρέως διαδεδομένο τύπο υδροστροβίλου παγκοσμίως σε υδροηλεκτρικά έργα λόγω του μεγάλου εύρους υδραυλικής πτώσης στο οποίο λειτουργεί [50, 500 mΣΥ] (Παπαντώνης, 2009).



Εικόνα 2 : Υδροστρόβιλος Francis σε μεσημβρινή τομή

Ένα μεταγενέστερο σχέδιο υδροστροβίλου αντίδρασης, είναι ο υδροστρόβιλος Kaplan, ο οποίος αναπτύχθηκε από τον Αυστριακό μηχανικό Viktor Kaplan (Εικ. 3). Παρουσιάστηκε το 1912 και αποτελεί σταθμό την εξέλιξη των υδροστροβίλων καθώς τα πτερύγια του δρομέα έγουν την δυνατότητα περιστροφής, που του επιτρέπει την βέλτιστη διπλή ρύθμιση των πτερυγίων του (ρυθμιστικά πτερύγια της στεφάνης και πτερύγια του δρομέα) για την επίτευξη συνθηκών λειτουργίας με τον υψηλότερο δυνατό βαθμό απόδοσης. Είναι υδροστρόβιλος τύπου έλικας του οποίου τα πτερύγια έχουν μεγάλη επιφάνεια για την μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας του νερού μέσω της πίεσης που αυτό ασκεί στα πτερύγιά του. Αυτό το χαρακτηριστικό, του επιτρέπει την εκμετάλλευση της ενέργειας του νερού στην περιοχή υδραυλικής πτώσης κάτω των 50μΣΥ, περιοχή στην οποία υπερτερεί σε απόδοση έναντι του υδροστροβίλου Francis. Η ευρεία εφαρμογή του, είχε προβλήματα στην αποδοχή από το κοινό καθώς είγε αρχικά προβλήματα σπηλαίωσης, στα οποία ο ίδιος ο Kaplan δεν είχε καταφέρει να δώσει ικανοποιητική λύση. Η κατασκευή μιας σειράς μηχανών μικρού μεγέθους μεταξύ του 1919 και 1924 σε Ιταλία και Τσεγοσλοβακία οδήγησε στην προώθηση και βελτίωση του σχεδίου, όταν μεγαλύτερες κατασκευαστικές εταιρίες ανέλαβαν την κατασκευή μεγάλων μηχανών, διαδίδοντας ευρύτερα την χρήση του (Hydro Review, Volume 8, No. 6, 1989).



Εικόνα 3: Υδροστρόβιλος Kaplan σε μεσημβρινή τομή

Το επικρατέστερο σχέδιο των υδροστροβίλων δράσης είναι ο υδροστρόβιλος Pelton (Εικ. 4). Αναπτύχθηκε από τον Αμερικανό μηχανικό και εφευρέτη Lester Allan Pelton και αποτελεί μια εξέλιξη του σχεδίου του νερόμυλου που χρησιμοποιούταν από την αρχαιότητα. Η διαφοροποίηση που εισήγαγε ο Pelton στο σχέδιό του ήταν η

αντικατάσταση των οριζόντιων πτερυγίων με διάταξη διπλού σκαφιδίου και η κατασκευή ακροφυσίων δέσμης υψηλής ταχύτητας νερού περιφερειακά του δρομέα. Η κινητήρια ροπή στην άτρακτο του υδροστροβίλου Pelton δημιουργείται από την προσβολή των δέσμεων νερού στα οριζόνται πτερύγια του δρομέα. Το χαρακτηριστικό αυτό σημαίνει πως ο υδροστρόβιλος αυτός επιτυγχάνει υψηλή παραγωγή ενέργειας και βαθμού απόδοσης μέσω της εκμετάλλευσης της κινητικής ενέργειας του νερού. Συνεπώς, συναντάνται συχνά σε περιοχές πολύ μεγάλης υδραυλικής πτώσης και σχετικά μικρών παροχών που επιτρέπουν την επίτευξη τέτοιων συνθηκών λειτουργίας. Η πρώτη του εφαρμογή παρουσιάστηκε στα μεταλλεία χρυσού της Καλιφόρνια των ΗΠΑ, στα μισά του 19^{ου} αιώνα μ.Χ., όπου η μορφολογία του εδάφους ευνοούσε την δημιουργία μεγάλων υδραυλικών πτώσεων. Χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή συμπιεσμένου αέρα για την συντήρηση μεταλλείων χρυσού στις περιοχές των μεταλλείων χρυσού και λίγο καιρό μετά την πρακτική εφαρμογή του, κατοχυρώθηκε ως ευρεσιτεχνία.



Εικόνα 4: Υδροστρόβιλος Pelton

1.3.Αρχή Λειτουργίας

Οι υδροστρόβιλοι, όλων των τύπων όπως προαναφέρθηκαν παραπάνω, αναλύονται με βάση την ίδια αρχή λειτουργίας.

Αρχικά πρέπει να οριστεί η ποσότητα ενέργειας μιας ποσότητας νερού που βρίσκεται σε υψηλότερη στάθμη από την στάθμη αναφοράς. Αυτή ορίζεται με βάση την εξίσωση Bernoulli για ασυμπίεστα ρευστά κατά μήκος μιας γραμμής ροής:

$$E = \frac{C^2}{2} + \frac{P}{\rho} + U + gz$$
 (1)

, όπου:

- Ε η μηχανική ενέργεια του ρευστού
- C είναι το μέτρο της ταχύτητας του ρευστού
- Ρ η στατική πίεση του ρευστού
- ρ η πυκνότητα του ρευστού
- U η εσωτερική ενέργεια του ρευστού που χαρακτηρίζεται από την θερμοκρασία του
- z το γεωδαιτικό ύψος ως προς την στάθμη αναφοράς
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας

Εφαρμόζοντας την παραπάνω εξίσωση στις διατομές εισόδου (e) και εξόδου (α) της μηχανής λαμβάνουμε το συνολικό ποσό ενέργειας ανά μονάδα όγκου που συναλλάχθηκε μεταξύ του ρευστού και του στροβίλου. Οπότε προκύπτει ότι:

$$E_{e} - E_{a} = \left(\frac{C_{e}^{2}}{2} + \frac{P_{e}}{\rho} + gz_{e}\right) - \left(\frac{C_{a}^{2}}{2} + \frac{P_{a}}{\rho} + gz_{a}\right)$$
(2)

Στον παραπάνω τύπο δεν έχει ληφθεί υπόψη η εσωτερική ενέργεια U, διότι σε περιπτώσεις ασυμπίεστων ρευστών, που μελετώνται στην παρούσα εργασία, δεν είναι δυνατή η αποτελεσματική συναλλαγή θερμότητας με σκοπό την παραγωγή έργου, χωρίς ταυτόχρονη μεταβολή της πυκνότητάς τους λόγω θερμοδυναμικής. Επομένως, ο όρος της εσωτερική ενέργειας U, παραλείπεται από αυτόν τον ορισμό.

Με αυτή την εξίσωση ορίζουμε το 1 μέτρο Στήλης Υγρού ως μια ποσότητα ρευστού που φτάνει στην στάθμη αναφοράς από την στάθμη z = 1m με μηδενική ταχύτητα. Αυτή η σχέση δίνεται από τον μετασχηματισμένο τύπο, που εκφράζει ενέργεια ανά μονάδα βάρους του ρευστού:

$$H = \frac{C^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z = \frac{E}{g}$$
(3)

Στην περίπτωση που το εργαζόμενο μέσο είναι νερό, ο ορισμός αυτός αντιστοιχεί σε μέτρα Στήλης Ύδατος (1mΣY). Επίσης η ολική ενέργεια του ρευστού για την παρούσα μελέτη ονομάζεται ολικό ύψος.

Έχοντας υπόψη την ενεργειακή αυτή μετατροπή για τις ανάγκες της μελέτης των υδροστροβίλων, η θεωρητική παραγόμενη ισχύς δίνεται από τον τύπο:

$$P_i = \dot{m}(E_e - E_\alpha) = \rho g H Q \tag{4}$$

, όπου:

- Q είναι η παροχή όγκου ρευστού διαμέσου της μηχανής (m^3/s)
- η ο βαθμός απόδοσης της μηχανής

Η μηχανική ισχύς μεταφέρεται στην άτρακτο του υδροστροβίλου και υπό σταθερή ταχύτητα περιστροφής, εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P = M\omega \tag{5}$$

, όπου:

- Μ είναι η ροπή που αναπτύσσεται στην άτρακτο
- ω η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

Για τις ανάγκες του ενεργειακού ισολογισμού, η ισχύς P_i είναι μεγαλύτερη της P λόγω ενεργειακών απωλειών που παρουσιάζονται κατά την λειτουργία της μηχανής, όπως τριβές, στροβιλισμοί του ρευστού, κλπ. Ο βαθμός απόδοσης της μηχανής ορίζεται ως το κλάσμα μεταξύ αυτών των δύο τιμών και εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\eta = \frac{P}{P_i} \tag{6}$$

1.4. Τρίγωνα Ταχυτήτων

Αρχικά για την επεξήγηση ενός τρίγωνου ταχύτητας ορίζεται ένα πολικό σύστημα συντεταγμένων. 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 . Επίσης η εφαπτόμενη ταχύτητα στην μεσημβρινή τομή του καναλιού συμβολίζεται με C_m και είναι η μεσημβρινή συνιστώσα (Εικ. 5).



Εικόνα 5: 3διάστατο πεδίο ταχυτήτων

Το διάνυσμα της ταχύτητας θα είναι:

$$\vec{C} = \vec{\iota}_r C_r + \vec{\iota}_z C_z + \vec{\iota}_u C_u \tag{7}$$

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

$$\overrightarrow{C_m} = \overrightarrow{\iota_r} C_r + \overrightarrow{\iota_z} C_z \tag{8}$$

Οπότε το διάνυσμα της ταχύτητας μπορεί να αναλυθεί επίσης με τον ακόλουθο ορισμό:

$$\vec{C} = \overrightarrow{\iota_m} C_m + \overrightarrow{\iota_u} C_u \tag{9}$$

Η ταχύτητα του ρευστού εκφράζεται και μέσω του διανύσματος της σχετικής ταχύτητας \vec{W} , αναφερόμενη σε ένα σύστημα συντεταγμένων που περιστρέφεται μαζί με το δρομέα. Η γωνιακή ταχύτητα \vec{U} της μηχανής σε συνδυασμό με την σχετική ταχύτητα δίνουν την απόλυτη ταχύτητα της ροής με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$\vec{C} = \vec{W} + \vec{U} = \vec{W} + \vec{\omega} r \tag{10}$$

Επίσης, οι κλίσεις των ταχυτήτων \vec{C} και \vec{W} προκύπτουν από τις γωνίες α και β αντίστοιχα και υπολογίζονται από την αντίστοιχη περιφερειακή συνιστώσα \vec{U} . Η γωνία α είναι η απόλυτη γωνία της ροής, την οποία επιβάλλει η κλίση των ρυθμιστικών πτερυγίων της μηχανής. Η γωνία β_w είναι η σχετική γωνία της ροής στην είσοδο του δρομέα και β η γωνία μετάλλου του πτερυγίου. Οι δύο αυτές γωνίες ταυτίζονται αν η ροή του ρευστού στην ακμή εκφυγής του πτερυγίου δεν παρουσιάζει ολίσθηση, που οφείλεται στην αδυναμία της ροής να ακολουθήσει ομαλά την γεωμετρία του πτερυγίου.

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

$$C_m = \frac{Q}{\pi D b} \tag{11}$$

, όπου:

- Q είναι η παροχή όγκου του ρευστού που διέρχεται από τον δρομέα,
- *D* είναι η διάμετρος του αγωγού
- b είναι το πλάτος του αγωγού

Δηλαδή, για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής παρατηρείται ότι η μεσημβρινή ταχύτητα εξαρτάται από την παροχή του καναλιού. Στο τρίγωνο ταχυτήτων της εξόδου ισχύει το ίδιο. Εφόσον υπάρχει σταθερή ταχύτητα περιστροφής παρατηρείται ότι η παροχή πλέον καθορίζει τις ταχύτητες.

Για τον συνδυασμό της υδραυλικής πτώσης του υδροστροβίλου με τις συνθήκες ταχύτητας της ροής ανάντι και κατάντι του δρομέα, χρησιμοποιείται η βασική εξίσωση του L. Euler για τις στροβιλομηχανές

$$H_u = \frac{1}{g} (U_1 C_{u1} - U_2 C_{u2}) \tag{12}$$

, όπου:

- H_u είναι η θεωρητική υδραυλική πτώση
- U_1 είναι η περιφερειακή ταχύτητα του ρευστού ανάντι του δρομέα
- C_{u1} είναι η περιφερειακή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας του ρευστού ανάντι του δρομέα
- U_2 είναι η περιφερειακή ταχύτητα του ρευστού κατάντι του δρομέα
- C_{u2} είναι η περιφερειακή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας του ρευστού κατάντι του δρομέα

Από την Εξίσωση (12), γίνεται προφανές ότι το θεωρητικό ύψος μεγιστοποιείται όταν η η περιφερειακή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας του ρευστού κατάντι του δρομέα μηδενίζεται. Αυτό σημαίνει πως το τρίγωνο ταχυτήτων σε αυτή την θέση είναι ορθογώνιο με την απόλυτη ταχύτητα και την μεσημβρινή της συνιστώσα να ταυτίζονται. Αυτός ο συνδυασμός του θεωρητικού ύψους και της παροχής ορίζει το Κανονικό Σημείο Λειτουργίας ή Σημείο Σχεδιασμού, στο οποίο ο υδροστρόβιλος λειτουργεί με τον μέγιστο βαθμό απόδοσης. Τα μεγέθη τα οποία έχουν τον δείκτη d (design point) αναφέρονται στην περίπτωση του κανονικού σημείου λειτουργίας.

Ορίζεται Q_{ud} ως η παροχή όγκου ρευστού που διέρχεται από τον δρομέα όταν αυτός λειτουργεί με την μέγιστη απόδοση, δηλαδή στο κανονικό σημείο λειτουργίας. Από τον παραπάνω τύπο της περιφερειακής συνιστώσας της ταχύτητας στην έξοδο προκύπτει το τρίγωνο εξόδου για διάφορες τιμές παροχής και τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Εάν ισχύει $Q_u = Q_{ud}$, τότε η παροχή Q_u είναι στο σημείο σχεδίασης με μηδενική συστροφή του ρευστού κατά την έξοδο και ελάχιστη κινητική ενέργεια.
- Εάν ισχύει $Q_u > Q_{ud}$, τότε η συστροφή του ρευστού θα είναι αρνητική και το ρευστό θα εξέρχεται του δρομέα με ταχύτητα αντίθετης φοράς.
- Εάν ισχύει για τις παροχές $Q_u < Q_{ud}$, τότε το ρευστό θα εξέρχεται με φορά περιστροφής ίδια με αυτήν του δρομέα αλλά η διαφορά των παροχών θα διαφέρει ανάλογα με το πόσο διαφέρει το μέτρο της συστροφής.

1.5.Ειδικός αριθμός στροφών

Με σκοπό τη διαμόρφωση μιας παραμέτρου που να είναι ενδεικτική της μορφής της μεσημβρινής τομής της πτερωτής εισάγεται ο όρος του ανηγμένου αριθμού στροφών σύμφωνα με την ακόλουθη ανάλυση: έστω μια υδροδυναμική μηχανή, διαμέτρου πτερωτής D της οποίας το κανονικό σημείο λειτουργίας είναι (H_k , Q_k) υπό την ταχύτητα περιστροφής N. Θα υπάρχει μια υδροδυναμική μηχανή γεωμετρικά όμοια προς την εξεταζόμενη (δείκτης q), διαμέτρου πτερωτής D_q και της οποίας το κανονικό σημείο λειτουργίας παροχής και ύψους, δηλαδή $Q_q = 1$, $H_q = 1$ αντίστοιχα, και η οποία θα πρέπει να στρέφεται με ταχύτητα περιστροφής N_q . Στα κανονικά σημεία ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις ομοιότητας:

$$\frac{Q_k}{Q_q} = \left(\frac{D}{D_q}\right)^3 \left(\frac{N}{N_q}\right) \tag{13}$$

$$\frac{H_k}{H_q} = \left(\frac{D}{D_q}\right)^2 \left(\frac{N}{N_q}\right) \tag{14}$$

Στις δύο παραπάνω εξισώσεις υπάρχουν δύο άγνωστοι, η διάμετρος D_q του γεωμετρικά όμοιου υδροστροβίλου και η ταχύτητα περιστροφής N_q . Από την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων, απλοποιούνται οι άγνωστοι όροι και προκύπτει:

$$N_q = N \, \frac{Q_k^{1/2}}{H_k^{3/4}} \tag{15}$$

, όπου

- Q: [m³/s]
- H: [mΣY]
- N: [RPM]

Έτσι η ταχύτητα περιστροφής N_q του γεωμετρικά όμοιου υδροστροβίλου που έχει κανονικό σημείο λειτουργίας $Q_q = 1 \ m^3/s$ και $H_q = 1 \ m\Sigma Y$ ονομάζεται ειδικός αριθμός στροφών της μηχανής ως προς την παροχή και εξαρτάται από τα κύρια χαρακτηριστικά του στο κανονικό σημείο λειτουργίας, δηλαδή την παροχή Q_k , το ύψος H_k και την ταχύτητα περιστροφής N_κ . Μια οικογένεια γεωμετρικά όμοιων υδροστροβίλων, χαρακτηρίζονται από τον ίδιο ειδικό αριθμό στροφών.

Για συγκεκριμένη παροχή Q_k και συγκεκριμένο ύψος διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H_k εκτιμάται ο ανηγμένος αριθμός στροφών N_q , ως προς την παροχή. 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. Σε αυτή την περίπτωση, στο κανονικό σημείο λειτουργίας παρουσιάζεται υδραυλική πτώση $H_s = 1 m\Sigma Y$ και ισχύς $P_s = 1 kW$. Ο αριθμός των ειδικών στροφών N_s , ως προς την ισχύ, δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$N_s = N_k \frac{P_k^{1/2}}{H_k^{5/4}} \tag{16}$$

, όπου:

- P: [kW]
- Η: [mΣY]
- N: [RPM]

Ο ειδικός αριθμός στροφών επηρεάζει πολλαπλά χαρακτηριστικά του υδροστροβίλου, μερικά εκ των οποίων είναι:

- Επίδραση στις διαστάσεις: σε συγκεκριμένο υδραυλικό ύψος η τιμή της περιφερειακής συνιστώσας της ταχύτητας U εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Άρα, εφόσον η ταχύτητα U παραμένει σταθερή, ο ανηγμένος αριθμός στροφών είναι αντιστρόφως ανάλογος της διαμέτρου του δρομέα του υδροστροβίλου. Συνεπώς, μεγάλος ανηγμένος αριθμός στροφών σημαίνει μικρότερος δρομέας, μικρότερο έργο άρα και μικρότερο κόστος.
- Επίδραση στον βαθμό απόδοσης: ο βαθμός απόδοσης αυξάνει όσο αυξάνει ο ανηγμένος αριθμός στροφών. Στην αρχή είναι μειωμένος λόγω των ογκομετρικών απωλειών λαβυρίνθου και των απωλειών στρεφόμενου δίσκου. Όταν φτάσει στο μεγαλύτερο σημείο του μετά μειώνει αυξανομένου του N_s εξ' αιτίας της αυξημένης διαφυγούσας κινητικής ενέργειας του ρευστού στον αγωγό απαγωγής της μηχανής.
- Επίδραση στο ύψος τοποθέτησης: αυξανομένου του ανηγμένου αριθμού στροφών για υδροστροβίλους αντίδρασης, πρέπει να αυξηθεί το βάθος τοποθέτησης τους προς αποφυγή της σπηλαίωσης. Αυτό προκαλεί αύξηση τους κόστους λόγω πρόσθετων εκσκαφών στην περιοχή του ΥΗΣ.

1.6. Βαθμός Απόδοσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο όρος της ισχύος από την εξίσωση (**5**) είναι η πραγματική ισχύς της μηχανής στον άξονα ενώ η θεωρητική ισχύς της εξίσωσης (**6**), προκύπτει από την διαθέσιμη υδραυλική πτώση. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης ενός υδροστροβίλου έχει τρεις συνιστώσες:

- Τον μηχανικό βαθμό απόδοσης
- Τον ογκομετρικό βαθμό απόδοσης
- Τον υδραυλικό βαθμό απόδοσης

1.6.1. 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 ισχύος N_m . 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 απώλειες N_s 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:

$$N = N_u + N_m \tag{17}$$

και ο μηχανικός βαθμός απόδοσης η_m ορίζεται ως:

$$\eta_m = \frac{N}{N_u} \tag{18}$$

1.6.2. 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. Αυτό συμβαίνει διότι δεν είναι δυνατόν η στεφάνη και το εξωτερικό κέλυφος της μηχανής να έχουν τις ίδιες διαστάσεις για λόγους μηχανικής αντοχής, συνεπώς μια ποσότητα ρευστού δQ διαφεύγει από το σώμα του δρομέα και ρέει ανάμεσα σε αυτόν και το εξωτερικό κέλυφος.

Η συνολική παροχή που διαρρέει την μηχανή είναι:

$$Q = Q_u + \delta Q \tag{19}$$

και ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως:

$$\eta_q = \frac{Q_u}{Q} = 1 - \frac{\delta Q}{Q} \tag{20}$$

1.6.3. Υδραυλικός βαθμός απόδοσης

Το θεωρητικό ύψος H_u του δρομέα είναι η ανά μονάδα μάζας ενέργεια του ρευστού που μετατρέπεται σε μηχανικό έργο εκφρασμένο σε μέτρα στήλης νερού. Η συνολική ανά μονάδα μάζας ενέργεια της υδραυλικής πτώσεως H περιλαμβάνει το θεωρητικό ύψος H_u , την διαφεύγουσα κινητική ενέργεια του ρευστού και τις πάσης φύσεως απώλειες που παρουσιάζονται. Από την εξίσωση Bernoulli παρατηρείται ότι μεταξύ της διατομής εισόδου και εξόδου του δρομέα ισχύει η σχέση:

$$H = H_u + \frac{c_a^2}{2g} + \delta h_{fea} \tag{21}$$

Οι υδραυλικές απώλειες δh_{fea} εξαρτώνται από το σημείο λειτουργίας και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Στις υδραυλικές απώλειες ροής δh_τ και
- στις υδραυλικές απώλειες κρούσης δh_a

Οι υδραυλικές απώλειες τριβής αποτελούνται από τις εντοπισμένες και τις γραμμικές απώλειες κατά μήκος των γραμμών ροής του ρευστού που διαρρέει τον δρομέα. Ο συντελεστής γραμμικών απωλειών ζ_τ είναι σταθερός στην τυρβώδη περιοχή και

μειώνεται όσο αυξάνεται η τιμή του αριθμού Reynolds για την μεταβατική και στρωτή περιοχή της ροής. Αυτό συμβαίνει όταν αυξάνει το μέγεθος της μηχανής άρα και ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται αντίστοιχα. Οι υδραυλικές απώλειες τριβής εκφράζονται από τον τύπο:

$$\delta h_{\tau} = \zeta_{\tau} Q^2 \tag{22}$$

Οι υδραυλικές 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 μηκρουστική. Όταν η μηχανή λειτουργεί με την βέλτιστη παροχή τότε, οι υδραυλικές απώλειες κρούσης μηδενίζονται και η μηχανή θεωρείται ότι λειτουργεί στο κανονικό σημείο λειτουργίας. Για διαφορετικές τιμές της παροχής, υπάρχουν απώλειες κρούσης και υπάρχει ενδεχόμενο αποκόλλησης της ροής. Εκφράζονται δε από τον τύπο:

$$\delta h_a = k \frac{W_c^2}{2g} \tag{23}$$

, όπου ο συντελεστής k παίρνει τις τιμές από 0,50 έως 0,90 και W_c είναι η διαφορά της σχετικής ταχύτητας της ροής από την σχετική ταχύτητα κλίσης ίσης με την γωνία πτερυγίων β_{1w} .

Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης ορίζεται τελικά ως εξής:

$$\eta_h = \frac{H_u}{H} = \frac{H - \frac{C_a^2}{2g} - (\delta h_a + \delta h_\tau)}{H}$$
(24)

1.6.4. Συνολικός βαθμός απόδοσης

Συνοψίζοντας, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου είναι το γινόμενο όλων των παραπάνω βαθμών απόδοσης και παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση.

$$\eta = \eta_m \, \eta_q \, \eta_h \tag{25}$$

Για την ισχύ ισχύει:

$$P = \eta_m P_u = \eta_m (n_q Q)(n_h H g) = \rho g H Q \eta \qquad (26)$$

1.7. Ομοιότητα

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, είναι δυνατό να κατασκευαστούν γεωμετρικά όμοιες μηχανές με τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά παροχής, υδραυλικής πτώσης και ισχύος. Μηχανές που έχουν ταυτόσημο ανηγμένο αριθμό στροφών τους $(N_q \, \eta \, N_S)$, θεωρούνται όμοιες. Η έννοια της ομοιότητας στις στροβιλομηχανές επεκτείνεται και στα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, πέραν των συνθηκών λειτουργίας. Αυτές οι μηχανές είναι γεωμετρικά όμοιες και παρουσιάζουν αλλαγές στις τελικές διαστάσεις τους και στις συνθήκες λειτουργίας τους, αλλά ο συνδυασμός των δύο αυτών χαρακτηριστικών δίνει ίδιο ανηγμένο αριθμό στροφών. Ως αποτέλεσμα, είναι δυνατόν να κατασκευαστούν όμοια μοντέλα των ζητούμενων μηχανών για λιγότερο κοστοβόρα και ευκολότερη μελέτη των χαρακτηριστικών τους. Αυτές οι αλλαγές εκφράζονται με τους αδιάστατες παραμέτρους ομοιότητας για την ταχύτητα περιστροφής (N), την παροχή (Q), την ισχύ (P) και το ύψος της υδραυλικής πτώσης (H) :

$$N_{11} = N \frac{D}{\sqrt{H}}$$
, $Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}}$, $P_{11} = \frac{P}{D^2 H^{3/2}}$ (27)

Στις παραπάνω σχέσεις, είναι χρήσιμο να δοθούν οι απαραίτητες διευκρινήσεις. Τα ανηγμένα μεγέθη με τον δείκτη 11 αναφέρονται στον όμοιο υδροστρόβιλο ενώ τα αντίστοιχα μεγέθη άνευ δείκτη αναφέρονται στον αρχικό δεδομένο υδροστρόβιλο προς μελέτη. Η ανάλυση αυτή δίνεται για όμοιο υδροστρόβιλο διαμέτρου $D_{11} = 1m$ διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης $H_{11} = 1 m \Sigma Y$.

Από αυτή την ανάλυση προκύπτει ότι αν δύο υδροστρόβιλοι που λειτουργούν στο αντίστοιχο σημείο λειτουργίας (ύψους, παροχής, ισχύος και ταχύτητας περιστροφής) και ισχύουν οι παραπάνω σχέσεις, τότε αυτοί είναι όμοιοι. Το αντίστροφο

συμπέρασμα ισχύει επίσης, δηλαδή για δύο όμοιους υδροστροβίλους των οποίων τα μεγέθη λειτουργίας συνδέονται με τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτει ότι βρίσκονται στο ίδιο σημείο λειτουργίας.

1.8.Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας

Για την γραφική απεικόνηση των χαρακτηριστικών λειτουργίας των υδροστροβίλων, χαράσσονται οι καμπύλες των αντίστοιχων μεγεθών. Οι πιο σημαντικές καμπύλες λειτουργίας των υδροστροβίλων είναι αυτές της θεωρητικής υδραυλικής πτώσης συναρτήσει της παροχής (H_u, Q_u) και της συνολικής υδραυλικής πτώσης συναρτήσει της παροχής (H, Q).

Για την πρώτη, χρησιμοποιούμε την βασική εξίσωση των στροβιλομηχανών του Leonhard Euler, εκφρασμένη για την περίπτωση των υδροστροβίλων με τις κατάλληλες μετατροπές λόγω των τριγώνων ταχυτήτων. Στο τρίγωνο της εισόδου ισχύει ότι:

$$C_{u1} = U_1 + \frac{C_{m1}}{\tan\beta_1} = \frac{D_1}{D_2}U_1 + \frac{Q_u}{S_1 \tan\beta_1}$$
(28)

Αντίστοιχα, για το τρίγωνο της εξόδου ισχύει ότι:

$$C_{u2} = U_2 - \frac{Q_u}{S_2 \tan\beta_2} \tag{29}$$

Επομένως η Εξίσωση (12) γράφεται ως εξής:

$$H_{u} = \frac{U_{2}}{g} \left[U_{2} \left(\left(\frac{D_{1}}{D_{2}} \right)^{2} - 1 \right) + Q_{u} \left(\frac{D_{1}/D_{2}}{S_{1} \tan\beta_{1}} + \frac{1}{S_{2} \tan\beta_{2}} \right) \right]$$
(30)

Έχοντας υπολογίσει το θεωρητικό ύψος, το επόμενο βήμα είναι να χαραχθεί η δεύτερη καμπύλη. Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι η αρχή διατήρησης της ενέργειας για τους υδροστροβίλους που εκφράζεται με την εξίσωση (**21**), με το θεωρητικό ύψος να λαμβάνει τιμές σύμφωνα με την εξίσωση (**30**)Επίσης η παροχή

διορθώνεται στην συνολική της τιμή προσθέτοντας τις ογκομετρικές απώλειες δQ , σύμφωνα με την εξίσωση (19).

Επομένως, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων και κλίσης των πτερυγίων του δρομέα, οι χαρακτηριστικές καμπύλες (H_u, Q_u) και (H, Q) έχουν την μορφή του Διαγράμματος (1):



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα Ύψους - Παροχής

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση με πολλαπλές παραμέτρους που οδηγούν σε πληθώρα σημείων λειτουργίας. Οι παράμετροι αυτοί είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων και η κλίση των πτερυγίων του δρομέα. Αυτό οδηγεί στην κατασκευή πολύπλοκων διαγραμμάτων που απεικονίζουν με μεγάλη ακρίβεια ολόκληρο τον φάκελο λειτουργίας του υδροστροβίλου. Η πιο συνηθισμένη μορφή αυτού του τύπου διαγραμμάτων είναι αυτή που φαίνεται στο Διάγραμμα (2):



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα Ύψους - Παροχής με ισοϋψείς καμπύλες ισχύος, βαθμού απόδοσης και ανοίγματος ρυθμιστικών πτερυγίων

Σε αυτό το διάγραμμα διακρίνονται οι καμπύλες ίσης ισχύος και ίσου βαθμού απόδοσης. Ο στόχος είναι η λειτουργία της μηχανής στο κανονικό σημείο λειτουργίας ή τουλάχιστον στην περιοχή του με ταυτόχρονη επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής παραγόμενης ισχύος. Ο καλύτερος συνδυασμός αυτών των δύο παραγόντων συμβάλλει στην επίτευξη μεγάλης απόδοσης του υδροστροβίλου καθώς και την επιτυχία και μακρά βιωσιμότητα του υδροηλεκτρικού έργου που θα εγκατασταθεί η εν λόγω μηχανή.

Μία ακόμα σημαντική καμπύλη λειτουργίας είναι εκείνη που χαράσσεται για όμοιους υδροστροβίλους. Το παραγόμενο διάγραμμα για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας επιτρέπει τον σχεδιασμό υδροστροβίλων υπό κλίμακα, την κατασκευή τους και την πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών τους χωρίς δαπανηρές κατασκευές μεγάλου μεγέθους. Αυτό χαράσσεται με βάση τις εξισώσεις ομοιότητας που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Η μορφή του διαγράμματος είναι αυτή της ανηγμένης παροχής Q_{11} συναρτήσει της ανηγμένης ταχύτητας περιστροφής N_{11} , δηλαδή (N_{11}, Q_{11}).

Για την κατασκευή αυτού του διαγράμματος, είναι απαραίτητο να προηγηθεί η κατασκευή του διαγράμματος (*H*, *Q*). Με δεδομένα το ύψος της υδραυλικής πτώσης

και την παροχή και αντικαθιστώντας τα στις εξισώσεις ομοιότητας, προκύπτουν οι τιμές των ζητούμενων ανηγμένων μεγεθών.

Η πολυπαραμετρική ανάλυση που γίνεται στο διάγραμμα (H, Q) έχει εφαρμογή και σε στην περίπτωση του διαγράμματος (N_{11}, Q_{11}) , παρέχοντας εκτενείς πληροφορίες για την λειτουργία του υδροστροβίλου σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών.

Ένα ενδεικτικό διάγραμμα της μορφής αυτής φαίνεται στο Διάγραμμα (3) για ένα υδροστρόβιλο Sulzer:



Διάγραμμα 3: Χάρτης Υδροστροβίλου Sulzer

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

2.1. Γενική περιγραφή του υδροστροβίλου Kaplan

Οι υδροστρόβιλοι Kaplan, και οι λοιποί υδροστρόβιλοι αντιδράσης που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελούνται από τα ίδια κύρια τμήματα. Τα διαφορετικά τμήματα έχουν κύριο σκοπό την διαμόρφωση της ροής ανάντι και κατάντι του δρομέα για την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής απόδοσης αλλά και την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών της ροής του νερού διαμέσου αυτών των τμημάτων (Εικ. 6). Αυτά τα τμήματα είναι συνολικά τέσσερα και φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 6: Τμήματα Υδροστροβίλου Kaplan

Το πρώτο τμήμα του υδροστροβίλου είναι το τμήμα εισόδου. Το τμήμα αυτό έχει την διαμόρφωση είτε σπειροειδούς περιβλήματος είτε αγωγού ομοαξονικού με τον δρομέα της μηχανής.

Στην πρώτη περίπτωση, η διαμόρφωση του τμήματος εισόδου αποτελείται από ένα σπειροειδές κέλυφος που εγκαθίσταται περιμετρικά του δρομέα. Το κέλυφος αυτό
είναι κυκλικής διατομής, συνεχώς μειούμενης ακτίνας για την επίτευξη κατά το δυνατόν, ομοιόμορφων συνθηκών εισόδου της ροής στον δρομέα λόγω των γραμμικών απωλειών και της επακόλουθης μείωσης της ταχύτητας της ροής. Ταυτόχρονα με την ανάκτηση της ταχύτητας της ροής μέσω της διαμόρφωσης αυτής, δίνεται μια αρχική συστροφή στο ρευστό πριν την είσοδό του στον δρομέα.

Στην δεύτερη περίπτωση, η διαμόρφωση του τμήματος εισόδου αποτελείται από έναν αγωγό κυκλικής διατομής, ομοαξονικό με τον δρομέα. Με αυτόν τον τρόπο, η ροή οδηγείται κατευθείαν στον δρομέα, με το μειονέκτημα ότι δεν προσδίδεται μια αρχική συστροφή όπως την προηγούμενη περίπτωση.

Το δεύτερο τμήμα είναι η στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων. Τα ρυθμιστικά πτερύγια είναι η διάταξη που διαμορφώνει την τελική τιμή της συστροφής της ροής πριν την είσοδό της στον δρομέα. Πρόκειται για μια σειρά πτερυγίων τοποθετημένα περιμετρικά της διατομής εισόδου του δρομέα, τα οποία βρίσκονται υπό γωνία σε σχέση με την αξονική διεύθυνση της μηχανής και ρυθμίζουν την γωνία της απόλυτης ταχύτητας της ροής καθώς και την τελική παροχή.

Η διάταξη αυτή είναι η πλέον σημαντική για την επίτευξη των καλύτερων συνθηκών λειτουργίας του υδροστροβίλου, λόγω του μεγάλου εύρους συνθηκών που μπορεί να επιτύχει. Το διάκενο μεταξύ των πτερυγίων ορίζει την παροχή που είναι διαθέσιμη προς εκμετάλλευση και η γεωμετρία των πτερυγίων την γωνία πρόσπτωσης της ροής στα πτερύγια του υδροστροβίλου. Το διάκενο αυτό μεταβάλλεται μέσω ενός μηχανισμού διωστήρων που μεταβάλλει την θέση των πτερυγίων συνολικά και έχει εύρος από την πλήρως κλειστή θέση (τα πτερύγια εφάπτονται μεταξύ τους) έως την πλήρως ανοιχτή θέση (πτερύγια σχεδόν παράλληλα προς την ροή).

Για τιμές της υδραυλικής πτώσης μεγαλύτερες από 10 mΣY, η στεφάνη αυτή τοποθετείται εντός του σπειροειδούς περιβλήματος, όπου στην συνέχεια οδηγείται στον δρομέα με ταυτόχρονη μεταβολή της διεύθυνσης της ροής από ακτινική σε αξονική. Για τιμές μικρότερες από 10μΣY, η είσοδος στον δρομέα γίνεται αξονικά και όχι ακτινικά, οπότε τα πτερύγια τοποθετούντε ανάντι του δρομέα.

Το τρίτο τμήμα είναι ο δρομέας. Ο δρομέας είναι το εξάρτημα εκείνο που εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια του ρευστού και την μετατρέπει σε μηχανική ενέργεια στην άτρακτό του και είναι συνδεδεμένος συνήθως με γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Τα πτερύγια ενός υδροστροβίλου Kaplan έχουν την μορφή προβόλου και εκτείνονται από την πλήμνη έως την στεφάνη του δρομέα. Σχεδιάζονται έτσι ώστε να έχουν την μικρότερη δυνατή επιφάνεια για την μείωση των απωλειών τριβής αλλά ταυτόχρονα να εξάγουν την κινητική ενέργεια του ρευστού με τον πιο αποδοτικό τρόπο.

Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα περιστροφής των πτερυγίων του δρομέα επί της πλήμνης. Αυτό είναι η βασική σχεδιαστική καινοτομία που εισήγαγε ο V. Kaplan, η οποία επιτρέπει στην μηχανή να είναι ευπροσάρμοστη σε διαφορετικές συνθήκες υδραυλικής πτώσης και παροχής, διατηρώντας υψηλή απόδοση καθ' όλη την

λειτουργία της. Ωστόσο, αυτό συνεπάγεται μία πιο σύνθετη κατασκευή με μηχανισμούς περιστροφής των πτερυγίων εντός της πλήμνης, που ανεβάζει σημαντικά το κόστος της. Ο μηχανικός και ο μελετητής του υδροηλεκτρικού έργου καλούνται να επιλέξουν την πιο συμφέρουσα λύση σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα, η οποία θα καθορίσει την επιτυχία και βιωσιμότητα του έργου.

Το τέταρτο τμήμα είναι ο αγωγός εξόδου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το ρευστό κατάντι του δρομέα, έχει μεγάλη ταχύτητα η οποία δηλώνει ότι υπάρχει μια σημαντική ποσότητα ενέργειας που διαφεύγει αναξιοποίητη από την μηχανή. Ειδικά σε μηχανές που λειτουργούν σε μικρές υδραυλικές πτώσεις, αυτό συνεπάγεται μια μεγάλη μείωση του βαθμού απόδοσης. Γι' αυτό τον λόγο, ο αγωγός εξόδου επιτρέπει την οδήγηση του ρευστού στην έξοδο της μηχανής και στον επόμενο ταμιευτήρα ή στο περιβάλλον με ταυτόχρονη επιβράδυνσή του. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται ανάκτηση της στατικής πίεσης του ρευστού και επιβράδυνσης του ρευστού σε χαμηλές ταχύτητες, τέτοιες ώστε να εξασφαλίζεται η ελαχιστοποίηση των απωλείων λόγω χαμηλής στατικής πίεσης του ρευστού.

Για τους υδροστροβίλους Kaplan, ο αγωγός εξόδου έχει κυκλική διατομή συνεχούς αυξανόμενης διαμέτρου. Ανάλογα την τοποθέτηση του υδροστροβίλου, κατακόρυφα ή οριζόντια, ο αγωγός εξόδου παρουσιάζει μια αλλαγή κατεύθυνσης της ροής κατά 90°, η οποία επιτρέπει στο ρευστό να εξέλθει της μηχανής παράλληλα με το έδαφος.

2.2.Τύποι υδροστροβίλου Kaplan

Από τα προαναφερθέντα, γίνεται εμφανές ότι συναντάται μια ποικιλία στην διαμόρφωση και τοποθέτηση των υδροστροβίλων Kaplan αλλά και στην συνολική διαμόρφωση του υδροηλεκτρικού έργου. Ο παράγοντας που συμβάλλει καθοριστικά στην τελική επιλογή της διαμόρφωσης του υδροστροβίλου είναι η διαθέσιμη υδραυλική πτώση.

Στις περιπτώσεις υψηλής υδραυλικής πτώσης (10-50 mΣY) η διαμόρφωση του υδροστροβίλου είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα παρακάτω (Εικ. 7):



Εικόνα 7 : Κατακόρυφος Υδροστρόβιλος Kaplan

Αποτελείται από σπειροειδές κέλυφος για τον αγωγό εισόδου, το οποίο περιβάλλει τον θάλαμο του δρομέα, ρυθμιστικά πτερύγια περιμετρικά του κελύφους που οδηγούν την ροή με μια μικρή πτώση στον δρομέα, τον δρομέα σε κατακόρυφη θέση και τον αγωγό εξόδου που έχει μια αλλαγή κατεύθυνσης 90° που οδηγεί το νερό στην έξοδο της μηχανής και στο περιβάλλον. Η διαμόρφωση αυτή είναι η πλέον διαδεδομένη για τέτοιες τιμές της υδραυλικής πτώσης καθώς επιτρέπει την δημιουργία ομοιόμορφων συνθηκών εισόδου της ροής στον δρομέα, χωρίς τις μεγάλες υδραυλικές απώλειες που δημιουργούνται σε μεγάλου μήκους εγκαταστάσεις.

Για τις περιπτώσεις χαμηλής υδραυλικής πτώσης (< 10 mΣY) η διαμόρφωση του υδροστροβίλου αλλάζει σε ομοαξονική με την ροή. Αυτό γίνεται για την καλύτερη εκμετάλλευση του ενεργειακού δυναμικού του υδροηλεκτρικού έργου χωρίς μεγάλες εκσκαφές για την τοποθέτηση του υδροστροβίλου σε χαμηλότερη στάθμη με στόχο την μείωση του συνολικού κόστους του έργου.

Οι δύο βασικοί τύποι ομοαξονικών υδροστροβίλων Kaplan που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι βολβοειδείς (bulb) και οι σωληνωτοί.

Ο βολβοειδής τύπος ομοαξονικού υδροστροβίλου Kaplan αποτελείται από ένα ή περισσότερους βολβούς που παρεμβάλλονται της ροής, όπου τοποθετούνται όλα τα αναγκαία εξαρτήματα για την λειτουργία της μηχανής και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά περιλαμβάνουν την γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος, τον μηχανισμό κίνησης της στεφάνης ρυθμιστικών πτερυγίων, αγωγούς για καλώδια τροφοδοσίας

και ρεύματος κλπ. Η διαμόρφωση αυτή παρουσιάζει το πλεονέκτημα μιας συμπαγούς διάταξης όλων των απαραίτητων εξαρτημάτων, τα οποία είναι τοποθετημένα σε μία μόνο υπερκατασκευή. Η μόνη ανάγκη για πρόσβαση στην μονάδαα προκύπτει από την τακτική συντήρηση των μηχανικών και ηλεκτρικών μερών της. Επίσης, τοποθετώντας όλα τα εξαρτήματα σε μία υπερκατασκευή μειώνεται το κόστος της μονάδας, διότι δεν υπάρχει ανάγκη για αυξημένες εκσκαφές, πέραν μόνο εκείνων για την θεμελίωση της.

Το πιο διαδεδομένο σχέδιο βοβλοειδούς υδροστροβίλου είναι εκείνο με ένα βοβλό ανάντι του δρομέα (Εικ. 8). Η διαμόρφωση αυτή παρεμβάλλει ένα βολβό μεγάλου μεγέθους μαζί με φρεάτια καλωδίων και πρόσβασης στο εσωτερικό της ροής. Το σχήμα του είναι υδροδυναμικά σχεδιασμένο για να διασφαλίζει την σταδιακή προσαρμογή της ροής χωρίς μεγάλες απώλειες, η οποία στην συνέχεια οδηγείται στον δρομέα για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας στην άτρακτό του. Το μέγεθος και η παραγόμενη μηχανική ενέργεια του υδροστροβίλου καθορίζει και τις τελικές διαστάσεις του βολβού, καθώς οι διαστάσεις της γεννήτριας επηρεάζονται άμεσα από την διαθέσιμη μηχανική ενέργεια αλλά και τις ανάγκες παραγωγής ηλεκτρική ισχύος.



Εικόνα 8: Βολβοειδής Υδροστρόβιλος (Bulb)

Επίσης, έχει παρουσιαστεί ένα ακόμη σχέδιο βοβλοειδούς υδροστροβίλου, με διπλό βολβό ανάντι-κατάντι του δρομέα. Η μορφή του ανάντι-κατάντι βολβού συνίσταται από δύο θαλάμους βολβοειδούς σχήματος τοποθετημένοι ανάντι και κατάντι του δρομέα. Συνηθέστερα, ο πρώτος θάλαμος στεγάζει το υδραυλικό σύστημα κίνησης των ρυθμιστικών πτερυγίων και των πτερυγίων του δρομέα και ο δεύτερος θάλαμος στεγάζει την γεννήτρια και τα υπόλοιπα ηλεκτρολογικά συστήματα.

Οι δύο παραπάνω διαμορφώσεις έχουν την δυνατότητα της ανθρώπινης πρόσβασης μέσω σωλήνων κατάβασης για λόγους συντήρησης και παρακολούθησης της καλής υγείας της. Ωστόσο, αυτοί οι σωλήνες βρίσκονται εντός του πεδίου ροής του νερού και δημιουργούν πρόσθετες απώλειες. Η επιλογή να μην υπάρχουν αυτοί οι σωλήνες κατάβασης δεν είναι ρεαλιστικοί, καθώς επιτρέπουν την παρακολούθηση και συντήρηση της μηχανής ενώ βρίσκεται σε λειτουργία, πράγμα που σημαίνει ότι η μηχανή λειτουργεί απρόσκοπτα για περισσότερο χρόνο.

Για τους σωληνωτούς υδροστροβίλους Kaplan, ή S-type στην διεθνή ορολογία, η κινητήρια άτρακτος εξέρχεται ομοαξονικά του δρομέα και παρεμβάλλεται της ροής είτε ανάντι είτε κατάντι του δρομέα. Η διαμόρφωση αυτή επιτρέπει την μεταφορά της γεννήτριας εκτός του αγωγού της ροής σε μηχανοστάσιο, όπου είναι ευκολότερη η πρόσβαση και λειτουργία όλης της εγκατάστασης. Ωστόσο η διαμόρφωση αυτή δεν επιτρέπει την λειτουργία μονάδων υψηλής ισχύος λόγω των αλλαγών κατεύθυνσης που πρέπει να υποστεί η ροή πριν τον δρομέα. Έτσι, τυποποιούνται σε ισχύ μικρότερων των 10 MW και διακρίνονται σε 3 βασικούς τύπους:

- Οριζοντίας ατράκτου
- Κατακόρυφης ατράκτου
- Κεκλιμένης ατράκτου

Για τον πρώτο τύπο (Εικ. 9), ο δρομέας τοποθετείται σε οριζόντια διάταξη και η άτρακτός του εκτείνεται περαιτέρω και οδηγείται σε μηχανοστάσιο ανάντι ή κατάντι του δρομέα, προς σύνδεσή της με την γεννήτρια.



Εικόνα 9: Υδροστρόβιλος Kaplan S-type οριζόντιας ατράκτου

Για τον δεύτερο τύπο (Εικ. 10), ο δρομέας τοποθετείται σε οριζόντια διάταξη και η άτρακτός του εκτείνεται περαιτέρω και οδηγείται σε μηχανοστάσιο άνω του δρομέα, προς σύνδεσή της με την γεννήτρια. Η κατακόρυφη τοποθέτηση του δρομέα δεν προτιμάται καθώς δημιουργεί πρόσθετο κόστος για εκσκαφές του αγωγού διαφυγής ώστε να γίνεται αποτελεσματική επιβράδυνση του ρευστού χωρίς απότομες αλλαγές γεωμετρίας του αγωγού αυτού.



Εικόνα 10: Υδροστρόβιλος Kaplan S-type κατακόρυφης ατράκτου

Για τον τρίτο τύπο (Εικ. 11), ο δρομέας τοποθετείται με κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο και η άτρακτός του εξέρχεται με την ίδια κλίση για την σύνδεσή της με την γεννήτρια. Η λύση αυτή δεν απαντάται σε πολλές περιπτώσεις σήμερα, λόγω των συμπληρωματικών φορτίων στήριξης όλων των εξαρτημάτων που αυξάνουν το κόστος της εγκατάστασης.



Εικόνα 11: Υδροστρόβιλος Kaplan S-type κεκλιμένης ατράκτου

Σε μικρές μονάδες υδροστροβίλων αυτού του τύπου όπου είναι ζητούμενο η μείωση του κόστους, συχνά παρατηρείται η τοποθέτηση της γεννήτριας εκτός του βολβού σε μηχανοστάσιο εκτός της ροής και του ρευστού και την κίνηση της μέσω μεθόδων μετάδοσης κίνησης. Η παρουσία κιβωτίου ταχυτήτων δίνει την δυνατότητα για την περαιτέρω μείωση του κόστους μέσω της μείωσης του μέγεθους της γεννήτριας λόγω της υψηλότερης ταχύτητας περιστροφής του άξονά της. Οι δύο πιο διαδεδομένοι τύποι αυτής της διαμόρφωσης είναι οι:

• Βολβοειδής με ιμάντα (Εικ. 12)



Εικόνα 12: Βολβοειδής Υδροστρόβιλος με ιμάντα

• Βολβοειδής με γρανάζια Bevel (κωνικά γρανάζια, Εικ. 13)



Εικόνα 13: Βολβοειδής Υδροστρόβιλος με γρανάζια Bevel

2.3. Υπάρχουσες μέθοδοι σχεδίασης υδροστροβίλων Kaplan

Στην σύγχρονη εποχή, έχουν αναπτυχθεί διάφορα εργαλεία για την αποτελεσματική και αποδοτική σχεδίαση υδροστροβίλων Kaplan. Χρησιμοποιούνται από πολλούς κατασκευαστές ανά τον κόσμο με τις κατάλληλες προσαρμογές για την εκάστοτε περίπτωση και την εμπειρία του κατασκευαστή. Επίσης, η πολυπλοκότητα του χρησιμοποιούμενου μοντέλου ή εργαλείου σχεδίασης εξαρτάται από τις οικονομικές δυνατότητες του κατασκευαστή για επενδύσεις μακροχρόνιας χρήσης ενός τέτοιου εργαλείου επειδή αυτό θα παρέχει αυξημένη ακρίβεια και απόδοση στην σχεδίαση αλλά παρουσιάζει αυξημένο κόστος απόκτησης και μακροχρόνιας χρήσης του.

Υπάρχουν μεγάλοι κατασκευαστές των οποίων η μακροχρόνια εμπειρία τούς έχει επιτρέψει να αναπτύξουν εξελιγμένα και αποδοτικά εργαλεία σχεδίασης, όπως η Andritz στην Αυστρία, η Voith στην Γερμανία, η General Electric στις ΗΠΑ κ.α. Αυτά τα εργαλεία αποτελούν πνευματική ιδιοκτησία τους και χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για εμπορική χρήση, σχεδιάζοντας υδροστροβίλους για τους πελάτες τους και δεν είναι συχνά προσβάσιμα σε πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα.για ερευνητική χρήση. Οι κατασκευαστές της εμβέλειας αυτής, αναλαμβάνουν τον σχεδιασμό και κατασκευή μεγάλου μεγέθους μηχανών, ονομαστικής ισχύος μεγαλύτερης των 20 MW, οι οποίες τοποθετούνται σε μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα. Το κύριο και πλέον σύγχρονο εργαλείο σχεδίασης τέτοιων μηχανών είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι.

Ωστόσο υπάρχουν και μικρότεροι κατασκευαστές, οι οποίοι αναλαμβάνουν να σχεδιάσουν μηχανές μικρότερου μεγέθους και ισχύος σε μικρότερης κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα. Οι κατασκευαζόμενες μονάδες στην περίπτωση αυτή, λειτουργούν συμπληρωματικά στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και συχνά

προσφέρουν ενέργεια στις τοπικές κοινωνίες για κάλυψη των αναγκών τους μειώνοντας έτσι την εξάρτησή τους για ηλεκτρική ενέργεια από τον κεντρικό εγχώριο πάροχο. Οι δυνατότητες επέκτασης τέτοιων μικρών κατασκευαστών είναι μεγάλες αν ληφθεί υπόψη ότι σε πολλές περιοχές του κόσμου υπάρχει ανεκμετάλλευτο υδραυλικό δυναμικό από ποταμούς, λίμνες κλπ. Αυτοί οι κατασκευαστές προσφέρουν μια σχεδιαστική προσέγγιση ηπιότερης πολυπλοκότητας και ταυτόχρονα γρηγορότερης κατασκευής, εγκατάστασης και παράδοσης της μονάδας. Ωστόσο, το γεγονός αυτό συνεπάγεται μικρότερη απόδοση της μονάδας που μεταφράζεται σε μια πιο μακροπρόθεσμη απόσβεση της αρχικής επένδυσης. Η μικρότερη απόδοση της σχεδιαζόμενης μηχανής οφείλεται σε δύο λόγους:

- Στην εγγενή αδυναμία των μικρών κατασκευαστών να χρησιμοποιήσουν πολύπλοκα εργαλεία σχεδίασης ώστε να έχουν την απαραίτητη ακρίβεια στους υπολογισμούς
- Στο γεγονός ότι οι υδροστρόβιλοι μικρότερου μεγέθους και ισχύος έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης επειδή σε μια τέτοια μηχανή, οι υδραυλικές απώλειες απορροφούν μεγαλύτερο ποσοστό της διαθέσιμης υδραυλικής ισχύος σε σύγκριση με μια μηχανή μεγάλου μεγέθους

Αυτοί οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν λιγότερο εξελιγμένα εργαλεία τα οποία βασίζονται στην αιτιοκρατική θεωρία υδροδυναμικής ανάλυσης των υδροστροβίλων και στην θεωρία των πτερυγώσεων. Αυτά τα εργαλεία είναι σύνηθες να έχουν αναπτυχθεί σε συνεργασία με πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα, συνδυάζοντάς τα με εμπειρικά δεδομένα κατασκευής και στην συνέχεια να απέκτησαν εμπορική χρήση.

2.3.1. Θεωρία Υδροδυναμικής Σχεδίασης

Το βασικό χαρακτηριστικό των εργαλειών αυτών είναι ο σειριακός υπολογισμός όλων των ζητούμενων μεγεθών μέσω επίλυσης των συστημάτων εξισώσεων με αναλυτικό ή αριθμητικό τρόπο. Ωστόσο είναι αδύνατο να υπολογιστούν όλα τα ζητούμενα μεγέθη χωρίς την εισαγωγή κάποιων γνωστών παραμέτρων, που προέρχονται είτε από την διεθνή βιβλιογραφία και είναι ευρέως αποδεκτές είτε από την συνολική εμπειρία του κατασκευαστή (Nechleba, 1957).

Με την γνώση του υδραυλικού δυναμικού επιλέγεται αρχικά, σύμφωνα με πίνακες που προκύπτουν από την κατασκευαστική εμπειρία, ο αριθμός των πτερυγίων, ο λόγος των διαμέτρων του πόδα και της στεφάνης των πτερυγίων και η περιοχή του ανηγμένου αριθμού στροφών. Ένας ενδεικτικός πίνακας σύνδεσης των παραπάνω μεγεθών είναι ο Πίνακας 1:

Υδραυλικό Ύψος (mΣY)	5	20	40	50	60	70
Αριθμός πτερυγίων	3	4	5	6	8	10
d/D	0.30	0.40	0.50	0.55	0.60	0.70
Ειδικός αριθμός στροφών (Ισχύς)	1000	800	600	400	350	300

Πίνακας 1: Στατιστικά στοιχεία επιλογής γεωμετρικών στοιχείων υδροστροβίλου

Επίσης, γίνεται μία πρώτη εκτίμηση της διαμέτρου του υδροστροβίλου. Η εκτίμηση αυτή προκύπτει από στατιστικά διαγράμματα, όπως στο Διάγραμμα (**4**), που συνδέουν την παροχή, τον αριθμό ανηγμένοων στροφών ως προς την ισχύ και ως προς την παροχή αντίστοιχα. Αυτή η αρχική εκτίμηση είναι πολύ πιθανό να αλλάξει εφόσον η διάμετρος της μηχανής και κατ' επέκτασιν η παραγόμενη ισχύ της δεν καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες του υδροηλεκτρικού έργου.



Διάγραμμα 4: Στατιστικό διάγραμμα επιλογής διαμέτρου Υδροστροβίλου

Έχοντας αυτές τις αρχικές διαστάσεις, είναι δυνατόν να γίνει μία αρχική διαστασιολόγηση του αγωγού είσοδου του υδροστροβίλου, όπως και της παροχής. Με τον υπολογισμό της παροχής, υπολογίζεται η μεσημβρινή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας της ροής και εν συνεχεία υπολογίζεται και η περιφερειακή ταχύτητα του δρομέα, αφού είναι γνωστή η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Η επόμενη ενέργεια είναι η κατασκευή του τριγώνου ταχυτήτων της εισόδου, γνωρίζοντας βεβαίως την γωνία κλίσης των ρυθμιστικών πτερυγίων ανάντι του δρομέα.

Έπειτα, με βάση τη βασική εξίσωση των στροβιλομηχανών του L. Euler, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά του τριγώνου ταχυτήτων της εξόδου, κατάντι του δρομέα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για ομοκεντρικές κυλινδρικές επιφάνειες του δρομέα και με αυτόν τον τρόπο παράγεται η κατανομή των ταχυτήτων στην είσοδο και την έξοδο του δρομέα. Το πλήθος αυτών των επιφανειών, όπου γίνεται ο υπολογισμός των τριγώνων ταχυτήτων, διαφέρει ανάλογα με την ζητούμενη ακρίβεια των υπολογισμών. Μεγαλύτερο πλήθος τέτοιων επιφανειών σημαίνει μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό των ταχυτήτων κατά μήκος της ακτίνας του δρομέα, αλλά παρουσιάζει μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος και χρόνο.

Στην συνέχεια, επιλέγεται η χορδή της υδροτομής που αντιστοιχεί σε κάθε γραμμή ροής. Ο μηχανισμός επιλογής συνδέεται με το ποσό της απαιτούμενης δύναμης άνωσης που πρέπει να παράγει η υδροτομή και της απαίτησης για μηχανική αντοχή του δρομέα κατά την λειτουργία του. Η επιλογή αυτή έχει άμεσο αποτέλεσμα στην επιλογή υδροτομής με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των συντελεστών άνωσης και οπισθέλκουσας. Επίσης οι τιμές αυτών των συντελεστών, υφίστανται μια διόρθωση διότι αναλύονται ως μια σειρά αεροτομών σε πλέγμα παρά η κάθε μία ξεχωριστά.

Αρχικά να επισημάνουμε ότι οι συντελεστές k_L , k_D είναι οι αεροδυναμικοί συντελεστές άνωσης και αντίστασης και αφορούν προφίλ αεροτομών με άπειρο μήκος κατανεμημένα σε πλέγμα. Αυτό σημαίνει ότι αλληλοεπηρεάζονται οι αεροτομές μεταξύ τους και οι αεροδυναμικοί συντελεστές τους.

Οπότε για το μεμονωμένο προφίλ υδροτομής σε πλέγμα υδροτομών ισχύουν οι σχέσεις μετασχηματισμού:

$$k_L = M c_L \tag{31}$$

$$k_D = c_D - \frac{c_L^2}{6\pi}$$
 (32)

, όπου η σταθερά Μ προκύπτει από πειραματικά δεδομένα για μεμονωμένες αεροτομές με δεδομένα την γωνία β του πτερυγίου, την γωνία γ του

προσανατολισμού της ροής, και τον λόγο $\frac{c}{l}$. Η μορφή των πειραματικών δεδομένων για την εύρεση της σταθεράς Μ μιας αεροτομής φαίνεται στο Διάγραμμα (**5**):



Διάγραμμα 5: Πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού συντελεστή άνωσης αεροτομής

2.3.2. Ανοιχτά θέματα σχεδίασης σε υδροστρόβιλο Kaplan

Οι μέθοδοι και τα εργαλεία σχεδίασης που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο αποτελούν σε μεγάλο ποσοστό τις σημερινές χρησιμοποιούμενες τεχνικές για την σχεδίαση υδροστροβίλων Kaplan ανά τον κόσμο. Ανεξάρτητα από την εμπειρία και την ειδίκευση του κάθε κατασκευαστή, η σημερινή τάση είναι η χρησιμοποίηση μιας απλής αναλυτικής θεωρίας και ανάλογα την περίπτωση, τον συνδυασμό της με παραδοχές από την κατασκευαστική εμπειρία που ήδη υπάρχει.

Οι μεγάλοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν λογισμικά αριθμητικής επίλυσης της ροής και βελτιστοποίησης σχεδιασμού. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μεθόδοι βελτιστοποίησης των οποίων στόχος είναι η εύρεση βέλτιστων λύσεων σε συστήματα που μπορούν να περιγραφούν ως μαθηματικό πρόβλημα. Βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε προβλήματα που περιέχουν πολλές παραμέτρους τα οποία είναι δύσκολο να λυθούν με αιτιοκρατικές και συμβατικές τεχνικές βελτιστοποίησης. Ωστόσο τέτοια εργαλεία είναι υπολογιστικά κοστοβόρα και απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς

που απαιτεί την επένδυση σε υπολογιστικά συστήματα παράλληλου προγραμματισμού, τμήματα υποδομών, συντήρηση κλπ.

Κάθε κατασκευαστής χρησιμοποιεί εμπορικά λογισμικά και εργαλεία σχεδιαστικά και υπολογιστικά για να επιτύχει τον βέλτιστο σχεδιασμό υδροδυναμικών μηχανών. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα από την χρήση των εργαλείων αυτών εξασφαλίζουν την εύρεση του βέλτιστου αποτελέσματος σε ένα μεγάλο εύρος πιθανών λύσεων οι οποίες εξετάζονται και υπολογιστικά και πειραματικά πριν την τελική κατασκευή της εκάστοτε μηχανής.

Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι υπάρχει ευρύ πεδίο για την ανάπτυξη εργαλείων για τον σχεδιασμό υδροστροβίλων κάθε μεγέθους με βάση την αναλυτική υδροδυναμική ανάλυση. Αυτό επίσης προκύπτει από το γεγονός ότι τα ήδη διαθέσιμα λογισμικά προς χρήση αναλύουν κάθε περίπτωση και επιλέγουν γεωμετρία με βάση κάποιες ήδη υπάρχουσες λύσεις, με ορισμένες μετατροπές. Υπάρχει επομένως μία ανακύκλωση των ήδη υπάρχοντων σχεδιαστικών επιλογών χωρίς παράλληλα να εξασφαλίζεται η αναζήτηση και εύρεση δυνητικά καλύτερων σχεδιαστικών λύσεων. Ωστόσο αυτό δεν σημαίνει πως οι παραγόμενες γεωμετρίες υστερούν σημαντικά σε απόδοση έναντι των βέλτιστων δυνατών. Οι σχεδιαζόμενες μηχανές έχουν ήδη μεγάλο βαθμό απόδοσης, αναλόγως του μεγέθους τους αλλά είναι διαρκής η ανάγκη αύξησης της απόδοσης σε όλα τα πεδία που υπάρχει τέτοια δυνατότητα.

Η εύρεση της κατάλληλης γεωμετρίας του ζητούμενου υδροστροβίλου προς χρήση του σε ένα δεδομένο υδροηλεκτρικό έργο είναι το πρόβλημα που παρουσιάζεται εν προκειμένω. Συνεπώς, ο σχεδιασμός ενός προγραμματιστικού εργαλείου για την υδροδυναμική ανάλυση και σχεδίαση είναι το επόμενο βήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το προγραμματιστικό περιβάλλον δίνει την ευχέρεια στον χρήστη για αλλαγές του πηγαίου κώδικα με προσθήκη νέων χαρακτηριστικών και εξασφαλίζει μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα των υπολογισμών. Δεδομένου ότι η υδροδυναμική θεωρία δεν καλύπτει όλο το φάσμα της ανάλυσης και μελέτης της λειτουργίας ενός υδροστροβίλου, περισσότερα εργαλεία και λογισμικά θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια για την καλύτερη παρουσίαση και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

3.1. Τοποθέτηση του προβλήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί μια αναλυτική μέθοδος σχεδιασμού και υπολογισμού των γεωμετρικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών ενός υδροστροβίλου Kaplan. Κάθε υδροϋλεκτρικό έργο είναι μοναδικό καθώς η χωρητικότητα και το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος είναι ικανά να παράγουν συγκεκριμένες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως ζητούμενο είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός του υδροστροβίλου με στόχο την μεγαλύτερη εκμετάλλευση της διαθέσιμης υδραυλικής ενέργειας. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στην ταχύτερη και αποτελεσματικότερη εύρεση των χαρακτηριστικών του υδροστροβίλου, καθώς αυτός σχεδιάζεται για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

Στην παρούσα ανάλυση, ο σχεδιασμός του υδροστροβίλου θα βασιστεί στις συνθήκες λειτουργίας του παλοιρροϊκού φράγματος στο Swansea της Μεγάλης Βρετανίας. Αυτό το υδροϋλεκτρικό έργο έχει σχεδιαστεί με σκοπό την εκμετάλλευση του υδραυλικού δυναμικού μέσω της διαφοράς της στάθμης του νερού μεταξύ των φάσεων της πλημμυρίδας και της άμπωτης στην συγκεκριμένη περιοχή (Petley-Aggidis, 2015)

Στην συνέχεια αυτού του κεφαλαίου, τα βήματα των υπολογισμών χωρίζονται σε ξεχωριστές φάσεις υπολογισμών, ώστε να γίνει ευκολότερα κατανοητή και αντιληπτή η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος και τα αποτελέσματά τους.

3.2. Φάση 1: Εισαγωγή των δεδομένων λειτουργίας του υδροστροβίλου

Σύμφωνα με τα δεδομένα του παλιρροϊκού φράγματος στο Swansea, ο υδροστρόβιλος έχει τα ακόλουθα ποιοτικά χαρακτηριστικά:

- $D_{sh} = 7m$
- Z = 3 πτερύγια
- $P_{nom} = 20 MW$

Προκειμένου να συνεχιστεί η ανάλυση για το σημείο σχεδίασης, πρέπει να είναι γνωστός ο χάρτης του υδροστροβίλου. Αυτός ο χάρτης αφορά ένα μοντέλο του

εξεταζόμενου υδροστροβίλου, γεωμετρικά όμοιο με το αρχικό, όμως σε μικρότερη κλίμακα στον οποίο παρουσιάζεται το διάγραμμα της ανηγμένης παροχής Q_{11} συναρτήσει της ανηγμένης ταχήτητας περιστροφής N_{11} . Έχοντας αυτόν τον χάρτη ως οδηγό, επόμενο βήμα είναι η αναγωγή των συνθηκών λειτουργίας στον κανονικό υδροστρόβιλο, με χρήση των κατάλληλων σχέσεων.

Το Κανονικό Σημείο Λειτουργίας εντοπίζεται στην περιοχή του χάρτη του υδροστροβίλου με το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Ύστερα, αναγνωρίζονται η ανηγμένη παροχή, οι ανηγμένες στροφές, η γωνία ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων και η γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα φέρνοντας ευθείες που τέμνουν τους κάθετους, οριζόντιους άξονες και τις καμπύλες των παραμέτρων λειτουργίας στην περιοχή του Κανονικού Σημείου Λειτουργίας.



Διάγραμμα 6: Χάρτης Υδροστροβίλου Andritz

Από το διάγραμμα λειτουργίας του Διαγράμματος (**6**), προκύπτει το Κανονικό Σημείο Λειτουργίας έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- *n* = 0.917
- $N_{11} = 180 RPM$
- $Q_{11} = 1.95 \ m^3/sec$
- $\alpha = 55 \ grad = 49.5^{\circ}$

• $\beta = 22 \ grad = 19.8^{\circ}$

Ο βαθμός (grad) είναι μονάδα μέτρησης μίας επίπεδης γωνίας. Ένα βαθμός είναι ίσος με το 1/400 μίας πλήρους γωνίας. Ισοδύναμα, ένας βαθμός είναι τα 9/10 μίας μοίρας ή τα π/200 ενός ακτινίου. Στη βιβλιογραφία συνήθως χρησιμοποιείται ο συμβολισμός "grad".

Για την λειτουργία του υδροστροβίλου πρέπει να οριστεί το υδραυλικό ύψος του στο κανονικό σημείο λειτουργίας. Αυτό γίνεται μελετώντας τα διαγράμματα της μεταβολής του ύψους του ταμιευτήρα στο Swansea κατά την διάρκεια του έτους, τα οποία φαίνονται στο Διάγραμμα (7). Σε αυτή την ανάλυση, θα χρησιμοποιηθεί μία τιμή του ύψους λειτουργίας για την εύρεση των χαρακτηριστιών του υδροστροβίλου στο Κανονικό Σημείο Λειτουργίας, παρά μία λεπτομερής ανάλυση της ετήσιας λειτουργίας της μηχανής σε διαφορετικά και μεταβατικά σημεία λειτουργίας. Η μέση τιμή του ύψους ορίζεται ως $H_{\kappa} = 3 m\Sigma Y$.



Διάγραμμα 7: Ετήσιες μεταβολές χαρακτηριστικών λειτουργίας του Swansea Tidal Barrage

Οι σχέσεις αναγωγής από το μοντέλο στον κανονικό υδροστρόβιλο είναι οι εξής:

$$N_{\kappa} = N_{11} \frac{\sqrt{H_{\kappa}}}{D_{sh}} \tag{33}$$

$$Q_{\kappa} = Q_{11} D_{sh}^2 \sqrt{H_{\kappa}} \tag{34}$$

$$P_{\kappa} = P_{11} D_{sh}^2 H_{\kappa}^{3/2} \tag{35}$$

Ενδεχομένως να χρειαστεί να αλλάξει ο αριθμός των στροφών, άρα και το σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου γιατί θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι είναι συνδεδεμένος με μια σύγχρονη γεννήτρια οπότε η ταχύτητα περιστροφής είναι συγκεκριμένη και εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων της γεννήτριας και το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένη.

Όλα τα παραπάνω είναι τα ποιοτικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του υδροστροβίλου. Για τον σχεδιασμό των πτερυγίων χρειάζεται να αναλυθεί η ροή διαμέσου του δρομέα με ακρίβεια. Οπότε είναι αναγκαίο να υπολογιστούν τα τρίγωνα ταχυτήτων ανάντι και κατάντι του δρομέα για να υπολογίσουμε τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων.

Ο ειδικός αριθμός στροφών του υδροστροβίλου με παράμετρο την ισχύ ορίζεται ως εξής:

$$N_s = N_{\kappa} \frac{P_{\kappa}^{1/2}}{H_{\kappa}^{5/4}} \tag{36}$$

Στον παραπάνω τύπο τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη είναι οι στροφές N, η ονομαστική ισχύς του υδροστροβίλου P και το ύψος H, όλα αναφερόμενα στο κανονικό σημείο λειτουργίας. Για την δεδομένη εξεταζόμενη περίπτωση, υπολογίζονται στην τιμή: 1595 RPM. Η τιμή αυτή δεν ανταποκρίνεται σε σύγχρονες στροφές γεννήτριας καθώς δεν υπάρχουν πληροφορίες για την γεννήτρια που συνδέεται με τον υδροστρόβιλο, συνεπώς η ανάλυση συνεχίζεται με δεδομένο τον παραπάνω υπολογισμό για τις ειδικές στροφές με παράμετρο την ισχύ.

Για να υπολογιστεί η βρεχόμενη επιφάνεια του δρομέα, πρέπει να είναι γνωστή η διάμετρος της πλήμνης. Υπολογίζοντας παραπάνω τον ανηγμένο αριθμό στροφών του υδροστροβίλου με παράμετρο την ισχύ μπορούμε να ανατρέξουμε σε στατιστικά στοιχεία και να επιλέξουμε την κατάλληλη διάμετρο της πλήμνης. Δεν υπάρχει κάποιος αναλυτικός τρόπος υπολογισμού της διαμέτρου της πλήμνης, συνεπώς θα

πρέπει να χρησιμοποιηθούν στατιστικά δεδομένα για την επιλογή της. Έχοντας ως δεδομένα τον ανηγμένο αριθμό στροφών ως προς την ισχύ και τον αριθμό των πτερυγίων, διαπιστώνεται ότι η κατάλληλη διάμετρος της πλήμνης ισούται με το 35% της διαμέτρου στης στεφάνης και δίνεται από την σχέση (Sedille, 1967):

$$D_{hub} = 0.35 \, D_{sh}$$
 (37)

Έτσι η βρεχόμενη επιφάνεια του δρομέα είναι:

$$S_{w} = \frac{\pi}{4} (D_{sh}^{2} - D_{hub}^{2})$$
 (38)

Οι συνθήκες περιβάλλοντος στις οποίες λειτουργεί ο υδροστρόβιλος στο παλοιρροϊκό φράγμα του Swansea είναι οι εξής:

- Μέση θερμοκρασία θαλασσινού νερού: $\overline{T} = 10^o C$
- Πυκνότητα του θαλασσινού νερού για \bar{T} : $ρ = 1027 \frac{kg}{m^3}$
- Κινηματική συνεκτικότητα του θαλασσινού νερού για \bar{T} :
 ν = 1.3604 $10^{-6} m^2/s$

3.3. Φάση 2: Ορισμός των γραμμών ροής δια μέσου του δρομέα

Οι γραμμές ροής είναι πολύ σημαντικές για την μελέτη της ροής του δρομέα κατά την ακτινική κατεύθυνση. Στην μεσημβρινή τομή, οι γραμμές ροής είναι παράλληλες με τον άξονα της μηχανής και καλύπτουν τον χώρο μεταξύ της πλήμνης και της στεφάνης, τοποθετημένες σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Επομένως, κάθε γραμμή ροής ορίζει μια κυλινδρική επιφάνεια, ομόκεντρη με το κέντρο του υδροστροβίλου και συνεπώς σε αυτό το επίπεδο θα οριστούν τα τρίγωνα ταχυτήτων αργότερα. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται μία διακριτοποίηση του χώρου μεταξύ της πλήμνης και της στεφάνης όπου το πλήθος των γραμμών ροής ορίζει το πλήθος των ομόκεντρων κυλινδρικών επιφανειών που θα εξεταστούν.

Η ύπαρξη επιλογής ανάλυσης με ή χωρίς ακτινικό διάκενο παρέχει την δυνατότητα να εξεταστούν διαφορετικές περιπτώσεις, όπου ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι του διακένου και το μέγεθός του, μπορούν να παραχθούν διαφορετικά αποτελέσματα και διαφορετικές σχεδιάσεις (Εικ. 14). Στην περίπτωση με ακτινικό διάκενο, ο χρήστης καλείται να δώσει την τιμή του και στην συνέχεια οι υπολογισμοί γίνονται κανονικά με τις αρχικά δοσμένες διαστάσεις. Μια διαφοροποίηση με την προαναφερθείσα περίπτωση, είναι ότι η πρώτη γραμμή ροής είναι σε μεγαλύτερη ακτίνα κατά 1mm από την υπολογισθείσα ακτίνα της πλήμνης για να μην υπάρξει μεγάλη απόκλιση από την προσομοίωση της ροής σε αυτή την περιοχή, λόγω οριακών στρωμάτων. Η τελευταία γραμμή ροής, βρίσκεται στο άκρο του δρομέα, στην διάμετρο της στεφάνης και στην συνέχεια προστίθεται το ακτινικό διάκενο, οπότε προκύπτουν οι τελικές διαστάσεις του όγκου ελέγχου του δρομέα. Αυτή η διαφοροποίηση έχει άμεση επίδραση στον ογκομετρικό βαθμό απόδοσης, επειδή η παροχή που διαφεύγει μέσω του ακτινικού διάκενου δεν δημιουργεί ροπή στρέψης στον άξονα της μηχανής, μειώνοντας έτσι τον συνολικό βαθμό απόδοσης. Στην περίπτωση ανάλυσης χωρίς ακτινικό διάκενο, ο υδροστρόβιλος αναλύεται με βάση τις πραγματικές του διαστάσεις και το ακτινικό διάκενο δεν λαμβάνεται υπόψη. Ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης προκύπτει από στατιστικά δεδομένα που βασίζονται στο μέγεθος και την ονομαστική ισχύ της μηχανής.



Εικόνα 14: Ακτινικό Διάκενο

Θεωρώντας ότι η ροή είναι αξονοσυμμετρική, οι γραμμές ροής κατά την μεσημβρινή τομή είναι παράλληλες μεταξύ τους. Στην περίπτωση διαμόρφωσης του αγωγού εισόδου με βολβό ή οδηγητικά πτερύγια θα πρέπει να γίνει μια ρευστομηχανική ανάλυση της ροής ανάντι του δρομέα για να βρεθεί το πεδίο ροής και στην συνέχεια να εισαχθεί η διαμόρφωση του προφίλ ταχύτητας της ροής ανάντι του δρομέα.

3.4. Φάση 3: Υπολογισμός των τριγώνων ταχυτήτων

3.4.1. Τρίγωνο Ταχυτήτων Εισόδου

Για την είσοδο του εργαζόμενου μέσου στον δρομέα, πρέπει να γίνουν οι εξής παραδοχές. Για αρχή, θεωρείται πως ανάντι του υδροστροβίλου, η ταχύτητα του ρευστού είναι αξονοσυμμετρική και παράλληλη με τον άξονα της μηχανής. Η βασική θεώρηση για την εύρεση του τριγώνου ταχυτήτων της εισόδου είναι η συνθήκη της σταθερής παροχής και η συνθήκη της ελεύθερης δίνης σε κάθε γραμμή ροής.

Στο τρισδιάστατο σύστημα αξόνων της εισόδου της μηχανής ορίζονται τα διανύσματα των ταχυτήτων στους 3 άξονες, η αξονική στον άξονα z, η περιφερειακή στον άξονα x και η ακτινική στον άξονα y (Εικ. 15). Γίνεται η παραδοχή ότι η ακτινική συνιστώσα είναι αμελητέα άρα ισχύει:

$$C_{r1,i} = 0$$
 (39)



Εικόνα 15: Τρίγωνο Ταχυτήτων της εισόδου

Έτσι, η μεσημβρινή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας στην είσοδο της μηχανής για κάθε γραμμή ροής υπολογίζεται με τον τύπο:

$$C_{z1,i} = \frac{Q_k}{S_w} \tag{40}$$

Στην συνέχεια, η περιφερειακή ταχύτητα υπολογίζεται σε κάθε θέση με βάση την ακτίνα κάθε γραμμής ροής και την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής.

$$U_{1,i} = \frac{2\pi N_{\kappa}}{60} R_i$$
 (41)

Για τον υπολογισμό της περιφερειακής συνιστώσας της απόλυτης ταχύτητας είναι απαραίτητη η παραδοχή της ροής ελεύθερης δίνης στην είσοδο του δρομέα. Αυτή η παραδοχή εξασφαλίζει την διατήρηση του ίδιου υδραυλικού ύψους σε κάθε γραμμή ροής, άρα και την ομοιόμορφή φόρτιση των πτερυγίων του δρομέα. Επίσης, το γεγονός ότι εξετάζεται το Κανονικό Σημείο Λειτουργίας συνεπάγεται ότι η περιφερειακή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας στην έξοδο του δρομέα είναι μηδενική. Επομένως, η περιφερειακή συνιστώσα της περιφερειακής ταχύτητας υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{H_k g}{U_{1,i}} = C_{u1,i} - C_{u2,i} = C_{u1,i}$$
(42)

Έχοντας υπολογίσει όλες τις συνιστώσες της απόλυτης ταχύτητας, υπολογίζεται ακολούθως η συνισταμένη απόλυτη ταχύτητα της ροής:

$$C_{1,i} = \sqrt{C_{z1,i}^2 + C_{u1,i}^2}$$
(43)

Η γωνία πρόσπτωσης της ροής στο πτερύγιο του δρομέα υπολογίζεται έχοντας ως δεδομένα τις δύο συνιστώσες της απόλυτης ταχύτητας με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$a_{1,i} = \operatorname{asin}\left(\frac{c_{z_{1,i}}}{c_{1,i}}\right) \tag{44}$$

Στο τρίγωνο ταχυτήτων ισχύει ότι οι μεσημβρινές συνιστώσες είναι ίσες καθώς το ύψος του τριγώνου είναι σταθερό, άρα:

$$W_{z1,i} = C_{z1,i}$$
 (45)

Και επίσης υπολογίζεται ότι η περιφερειακή συνιστώσα της σχετικής ταχύτητας είναι:

$$W_{u1,i} = U_{1,i} - C_{u1,i} \tag{46}$$

Τελικά ισχύει ότι η σχετική ταχύτητα είναι:

$$W_{1,i} = \sqrt{W_{u1,i}^2 + W_{z1,i}^2}$$
(47)

Η γωνία της σχετικής ροής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\beta_{1,i} = \operatorname{asin}\left(\frac{W_{Z1,i}}{W_{1,i}}\right) \tag{48}$$

3.4.2. Τρίγωνο Ταχυτήτων Εξόδου

Για το τρίγωνο ταχυτήτων κατάντι του δρομέα, οι υπολογισμοί βασίζονται στα αποτελέσματα του τριγώνου ταχυτήτων της εισόδου, με την προσθήκη κάποιων σημαντικών σχέσεων (Εικ. 16).



Εικόνα 16: Τρίγωνο Ταχυτήτων της εξόδου για διαφορετικές τιμές της παροχής

Αρχικά όπως προαναφέρθηκε, ισχύει ότι:

$$C_{u2,i} = 0 \tag{49}$$

Επίσης τα τρίγωνα ταχυτήτων έχουν το ίδιο ύψος οπότε:

$$W_{z2,i} = C_{z2,i} = W_{z1,i} = C_{z1,i}$$
(50)

Άρα προκύπτει ότι:

$$C_{2,i} = C_{z2,i} \tag{51}$$

Λόγω της αρχής της συνέχειας, ισχύει ότι:

$$U_{2,i} = U_{1,i} \tag{52}$$

Οπότε η περιφερειακή συνιστώσα της σχετικής ταχύτητας υπολογίζεται ως εξής:

$$W_{u2,i} = U_{2,i} - C_{u2,i} \tag{53}$$

Τέλος η συνισταμένη σχετική ταχύτητα βρίσκεται με τον τύπο:

$$W_{2,i} = \sqrt{W_{u2,i}^2 + W_{z2,i}^2} \tag{54}$$

Η απόλυτη γωνία της ροής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\alpha_{2,i} = \operatorname{asin}\left(\frac{c_{z2,i}}{c_{2,i}}\right) \tag{55}$$

Η σχετική γωνία της ροής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\beta_{2,i} = \operatorname{asin}\left(\frac{W_{22,i}}{W_{2,i}}\right) \tag{56}$$

Οι παραπάνω υπολογισμοί παρέχουν εικόνα για την είσοδο και έξοδο της ροής από το πτερύγιο του υδροστροβίλου σε κάθε γραμμή ροής, όπως ορίστηκαν προηγουμένως. Οι ταχύτητες της ροής στις ενδιάμεσες θέσεις του πτερυγίου κατά την μεσημβρινή διεύθυνση, παραμένουν άγνωστες καθώς δεν υπάρχει ακόμα πληροφορία για την γεωμετρία της υδροτομής των πτερυγίων. Η συνδυασμένη ποιοτική μορφή των τριγώνων ταχυτήτων για την είσοδο και την έξοδο του δρομέα φαίνεται στην Εικόνα 17:



Εικόνα 17: Τρίγωνα Ταχυτήτων

3.5. Φάση **3**: Εύρεση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της υδροτομής

Για να βρεθούν τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της υδροτομής πρέπει να υπολογιστούν οι ασκούμενες δυνάμεις πάνω στην στοιχειώδη υδροτομή και στην συνέχεια να υπολογιστούν όλα τα ζητούμενα μεγέθη απόδοσης της στοιχειώδους υδροτομής και του δρομέα συνολικά.

Με βάση την θεωρία των πτερυγώσεων, σε κάθε υδροτομή ασκούνται 2 δυνάμεις, η δύναμη της άνωσης και η δύναμη της οπισθέλκουσας. Η διεύθυνση των δυνάμεων αυτών, ορίζεται στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων της υδροτομής και όχι στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων του δρομέα, οπότε είναι απαραίτητη η έκφρασή τους σε αυτό.

Παρακάτω δίνεται και σχηματική εξήγηση για τις παραπάνω εκφράσεις και την μετατροπή του συστήματος συντεταγμένων:



Εικόνα 18: Αναπτυσσόμενες δυνάμεις σε τομή του μερικού δρομέα

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται:

- η δύναμη της άνωσης L,
- η οπισθέλκουσα D,
- η αξονική δύναμη Τ,
- η περιφερειακή δύναμη Ν,
- η συνισταμένη δύναμη R των T και N,
- η γωνία β_m της διεύθυνσης της μέσης σχετικής ταχύτητας W_{md} πάνω στην υδροτομή,
- και η γωνία λ μεταξύ των L και R.

Οι εξισώσεις των αναπτυσσόμενων δυνάμεων είναι οι εξής:

$$L = \frac{\rho}{2} c_L t \, dr \, W_{md}^2 \tag{57}$$

$$D = \frac{\rho}{2} c_D t \, dr \, W_{md}^2 \tag{58}$$

$$T = L\sin(\beta_m) + D\cos(\beta_m)$$
 (59)

$$N = \frac{T}{\tan(\beta_m + \lambda)} \tag{60}$$

Η ύπαρξη της γωνίας λ οφείλεται στο γεγονός ότι το ρευστό που εξετάζεται είναι συνεκτικό οπότε η δύναμη της άνωσης L δεν ταυτίζεται με την συνισταμένη δύναμη R. Η δύναμη της άνωσης L παρεκλίνει από την συνισταμένη δύναμη R κατά γωνία λ που οφείλεται στην αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις λόγω του ιξώδους του ρευστού, που συνεπάγεται την δημιουργία της δύναμης της οπισθέλκουσας D. Όταν η εξεταζόμενη υδροτομή λειτουργεί σε κανονικές συνθήκες η γωνία λ είναι πολύ μικρή, στο εύρος [1°, 3°] (Παπαντώνης, 2009). Η γωνία αυτή είναι σημαντικός παράγοντας για τον σχεδιασμό και την επιλογή της τελικής υδροτομής καθώς είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη για να μειωθεί η επαγόμενη οπισθέλκουσας με την Εξίσωση (**61**):

$$\lambda = \operatorname{atan}\left(\frac{L}{D}\right) = \operatorname{atan}\left(\frac{c_L}{c_D}\right)$$
 (61)

Για την συνέχεια των υπολογισμών, επιλέγεται η γωνία λ στην τιμή: $\lambda = 2^{o}$

Αρχικά, υπολογίζονται η μέση σχετική ταχύτητα και η μέση γωνία της σχετικής ταχύτητας, μεγέθη τα οποία είναι χρήσιμα για τους επόμενους υπολογισμούς.

$$\beta_{m,i} = \frac{\beta_{1,i} + \beta_{2,i}}{2}$$
 (62)

$$W_{md,i} = \frac{W_{1,i} + W_{2,i}}{2} \tag{63}$$

Επίσης ορίζεται και η περιφερειακή απόσταση των πτερυγίων ως εξής:

$$t_i = \frac{2\pi R_i}{z} \tag{64}$$

Η στερεότητα (solidity) των πτερυγίων, δηλαδή ο λόγος της χορδής **c** της υδροτομής προς την περιφερειακή απόσταση των πτερυγίων **t**, αποτελεί το μέτρο της πυκνότητας της πτερύγωσης κατά την ακτινική κατεύθυνση. Ο λόγος αυτός μεταβάλλεται από την πλήμνη προς την στεφάνη του δρομέα για κάθε γραμμή ροής και δικαιολογείται από το γεγονός ότι απαιτείται μεγαλύτερη μηχανική αντοχή του πτερυγίου λόγω των μεγάλων γωνιών πρόσπτωσης της ροής στην περιοχή κοντά στην πλήμνη που δημιουργούν μεγαλύτερες δυνάμεις σε σχέση με την στεφάνη. Έτσι με ανάλογο τρόπο μεταβάλλεται και η στερεότητα των πτερυγίων, ώστε το πτερύγιο να αντέχει ισχυρότερες τάσεις κοντά στην πλήμνη και ασθενέστερες κοντά στην στεφάνη (Παπαντώνης, 2009). Μικρές τιμές της στερεότητας συνεπάγονται βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας της μηχανής αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερο κίνδυνο σπηλαίωσης, ωστόσο παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες τριβής και απώλειες στο ακτινικό διάκενο λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας των πτερυγίων. Η στερεότητα του στοιχειώδους πτερυγίου δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_i = \frac{c_i}{t_i} \tag{65}$$

Η μέθοδος για τον υπολογισμό της μεταβολής της στερεότητας του πτερυγίου επιβάλλει την γνώση της επίκεντρης γωνίας του πτερυγίου, **φ.** Η γωνία αυτή σχηματίζεται σε τόξου κύκλου του οποίου το κέντρο κινείται επί της αξονικής γραμμής του δρομέα και τα άκρα του εκτείνονται από την αξονική γραμμή μέχρι την στεφάνη. Το σχηματιζόμενο τόξο περικλείει τον χώρο που καλύπτει το πτερύγιο, από την ακμή προσβολής ως την ακμή εκφυγής στην μεσημβρινή όψη και καθορίζει την πυκνότητα της πτερύγωσης και τον αριθμό των πτερυγίων, συνδέοντάς τα με την σχέση:

$$\varphi = 360 \frac{\sigma_m}{z} \tag{66}$$

Αναλύοντας στην παραπάνω σχέση τον τύπο της στερεότητας όπως προαναφέρθηκε, η έκφραση της επίκεντρης γωνίας του πτερυγίου απλοποιείται στην παρακάτω μορφή της:

$$\varphi = \frac{c_m}{R_m} \frac{180}{\pi} \tag{67}$$

Οι τυπικές τιμές για την γωνία αυτή βρίσκονται εντός του εύρους [70°, 90°] (Radha Krishna, 1997). Γνωρίζοντας την ακτίνα του δρομέα από την φάση 1 και επιλέγοντας την τιμή 70° για την επίκεντρη γωνία **φ**, υπολογίζεται η χορδή του τμήματος του πτερυγίου στην θέση όπου βρίσκεται η μέση ακτίνα του πτερυγίου του δρομέα. Συνδυάζοντας το αποτέλεσμα αυτό με την Εξίσωση, υπολογίζεται η στερεότητα στην μέση ακτίνα του πτερυγίου του δρομέα.

Έχοντας την στερεότητα του πτερυγίου στην μέση ακτίνα, είναι δυνατό να υπολογιστεί η στερεότητα στην πλήμνη και την στεφάνη ακολουθώντας στατιστικά στοιχεία που προκύπτουν από κατασκευαστική και υπολογιστική εμπειρία στην λειτουργία παρόμοιων μηχανών. Για τους υπολογισμούς αυτούς, απαραίρητη είναι η γνώση της στερεότητας του πτερυγίου στην μέση ακτίνα καθώς η στερεότητα στις δύο ακραίες θέσεις του πτερυγίου δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_t = (0.85 \sim 0.95)\sigma_m \quad (\sigma \tau \varepsilon \varphi \dot{\alpha} v \eta - tip) \tag{68}$$

$$\sigma_h = (1.1 \sim 1.2)\sigma_m \qquad (\pi \lambda \dot{\eta} \mu \nu \eta - hub) \tag{69}$$

Για την παρούσα ανάλυση επιλέγονται οι κάτω ακραίες τιμές για την στερεότητα της πλήμνης και της στεφάνης, στις τιμές 0,85 και 1,1 αντίστοιχα.

Από την εφαρμογή του θεωρήματος της διατήρησης της ορμής κατά την περιφερειακή διεύθυνση προκύπτει μία ακόμη έκφραση για την περιφερειακή δύναμη:

$$T = \rho t \, dr \, W_z \, (W_{u2} - W_{u1}) \tag{70}$$

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (57), (58), (59), (61) και (70), υπολογίζεται ο συντελεστής άνωσης της κάθε εξεταζόμενης υδροτομής.

$$c_{L,i} = \frac{2(W_{u2,i} - W_{u1,i})}{W_{md,i}\sigma_i} \frac{\sin\beta_{m,i}}{\sin(\beta_{m,i} + \lambda)}$$
(71)

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής άνωσης είναι μεγαλύτερος στην πλήμνη και μικρότερος στην στεφάνη. Αυτό συνεπάγεται ανάπτυξη μεγαλύτερων δυνάμεων

άνωσης, το οποίο επαληθεύει την διαβάθμιση της στερεότητας των πτερυγίων για την ομαλοποίηση της φόρτισης του πτερυγίου κατά την ακτινική διεύθυνση.

Έχοντας υπολογίσει τον συντελεστή άνωσης για κάθε υδροτομή, υπολογίζονται τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη της υδροτομής. Αρχικά πρέπει να υπολογιστούν οι γωνίες προσανατολισμού γ και πρόσπτωσης **i**, οι οποίες δίνονται από τους τύπους:

$$\gamma_i = \beta_{1,i} \tag{72}$$

$$i_i = \gamma_i - \beta_{m,i} \tag{73}$$

Γίνεται ευκολότερα αντιληπτή η σύνδεση της γωνίας πρόσπτωσης i και της γωνίες προσανατολισμού γ λαμβάνοντας υπόψη το σχήμα της Εικόνας 17:



Εικόνα 19 : Ορισμός της γωνίας προσανατολισμού πτερύγωσης (γ) και της γωνίας πρόσπτωσης (i)

Συνεπώς, με τις Εξισώσεις (**61**) και (**71**) υπολογίζεται ο συντελεστής οπισθέλκουσας για κάθε εξεταζόμενη υδροτομή ως εξής:

$$c_{D,i} = \left(\frac{2(W_{u2,i} - W_{u1,i})}{W_{md,i}\sigma_i} - c_{L,i}\right) tan\beta_{m,i}$$
(74)

3.6. Φάση 5: Επιλογή Υδροτομής των πτερυγίων του δρομέα

Έχοντας υπολογίσει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του δρομέα, η επόμενη ενέργεια είναι η μοντελοποίησή του με τα κατάλληλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Το βασικό χαρακτηριστικό της γεωμετρίας του δρομέα που θα καθορίσει εν πολλοίς κατά πόσο ανταποκρίνονται τα υπολογισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υδροστροβίλου με τα πραγματικά, είναι η υδροτομή.

Ο καθορισμός ενός μοντέλου για την αξιολόγηση και επιλογή της καταλληλότερης υδροτομής, βάσει των αεροδυναμικών της συντελεστών είναι το επόμενο βήμα για την ολοκλήρωση της σχεδίασης του δρομέα του υδροστροβίλου. Η μέθοδος αυτή συνδυάζει την παραγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της εξεταζόμενης αεροτομής και της αξιολόγησης των αεροδυναμικών της χαρακτηριστικών ως προς τα ιδεατά χαρακτηριστικά που προκύπτουν από την ανάλυση των τριγώνων ταχυτήτων.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, οι αεροτομές της σειράς NACA 65 των έξι ψηφίων, NACA 44 τεσσάρων ψηφίων και GOE έχουν ευρεία εφαρμογή σε περιστροφικές μηχανές αξονικής ροής και έχουν γίνει συστηματικές μετρήσεις για την εύρεση των αεροδυναμικών τους χαρακτηριστικών (Παπαντώνης, 2004).

3.6.1. Σειρά αεροτομών ΝΑCA 65 (έξι ψηφίων)

Το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της σειράς αεροτομών NACA 65 είναι το γεγονός ότι με την εισαγωγή 2 παραμέτρων μπορεί να παραχθεί μεγάλος αριθμός υδροτομών με διαφορετικά γεωμετρικά και υδροδυναμικά χαρακτηριστικά (Εικ. 20). Κάθε υδροτομή αυτής της σειράς αναγράφεται ως εξής:

NACA
$$65 - XX - YY$$

, όπου (XX) εκφράζει την μέγιστη καμπυλότητα % της χορδής και (YY) εκφράζει το μέγιστο σχετικό πάχος % της χορδής ως προς την μέση γραμμή (NACA TN 3916, 1957).



Εικόνα 20 : Ορισμός γεωμετρίας αεροτομής NACA 65

Η βασική υδροτομή που χρησιμοποιείται ως βάση για την παραγωγή όλων των υδροτομών της σειράς αυτής, είναι η NACA 65-10-10. Η υδροτομή αυτή έχει μέγιστη καμπυλότητα 10% της χορδής και μέγιστο πάχος επίσης 10% της χορδής. Οι συντεταγμένες της υδροτομής αυτής δίνονται στον Πίνακα (**2**):

X% of c	Y2% of c	Y1% of c	dY1/dX1% of c
0,00	0,000	0,000	0,421200
0,50	0,772	0,250	0,388750
0,75	0,932	0,350	0,347700
1,25	1,169	0,535	0,291550
2,50	1,574	0,930	0,234300
5,00	2,177	1,580	0,234300
7,50	2,647	2,120	0,199950
10,00	3,040	2,585	0,174580
15,00	3,666	3,365	0,138050
20,00	4,143	3,980	0,110300
25,00	4,503	4,475	0,087450
30,00	4,760	4,860	0,067450
35,00	4,924	5,150	0,049250
40,00	4,996	5,355	0,032250
45,00	4,963	5,475	0,015950
50,00	4,812	5,515	0,000000
55,00	4,530	5,475	-0,015950
60,00	4,146	5,355	-0,032250
65,00	3,682	5,150	-0,049250
70,00	3,156	4,860	-0,067450
75,00	2,584	4,475	-0,087450
80,00	1,987	3,980	-0,110300
85,00	1,385	3,365	-0,380500
90,00	0,810	2,585	-0,174850
95,00	0,306	1,580	-0,234300
100,00	0,000	0,000	0,000000

Πίνακας 2: Συντεταγμένες σημείων υδροτομής 65-10-10

Οι παραπάνω συντεταγμένες αφορούν τις συντεταγμένες τις υδροτομής ως συνάρτηση επί τις % της μοναδιαίας χορδής **c** και φαίνονται στην Εικόνα 15:

- Η μεταβλητή Χ εκφράζει την τεταγμένη κάθε σημείου της μέσης γραμμής της υδροτομής.
- Η μεταβλητή Υ1 εκφράζει την τετμημένη κάθε σημείου της μέσης γραμμής της υδροτομής.
- Η μεταβλητή Υ2 εκφράζει την κατανομή του σχετικού πάχους της υδροτομής ως προς την μέση γραμμή.
- Η μεταβλητή dY1/dX1 εκφράζει την καμπυλότητα της μέσης γραμμής.

Περισσότερες υδροτομές αυτής της σειράς παράγονται με αλλαγή των αριθμών XX και YY που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για παράδειγμα, η υδροτομή NACA 65-18-12 έχει μέγιστη καμπυλότητα 18% της χορδής και μέγιστο πάχος 12% της χορδής.

Οι συντεταγμένες της τελικής υδροτομής παραράγονται πολλαπλασιάζοντας κατάλληλα τους παράγοντες XX και YY με τις αντίστοιχες μεταβλητές του παραπάνω πίνακα. Για την εύρεση των τελικών συντεταγμένων της κατανομής της μέσης γραμμής και την καμπυλότητά της, ισχύει:

$$X_a = X \frac{(XX)}{10} 100\%$$
 (75)

$$Y_{1a} = Y_1 \frac{XX}{10} \, 100\% \tag{76}$$

$$\left[\frac{dY_1}{dX}\right]_a = \frac{dY_1}{dX}\frac{(XX)}{10} \ 100\%$$
 (77)

Για την εύρεση της κατανομής του πάχους της ζητούμενης αεροτομής ισχύει:

$$Y_{2\alpha} = Y_2 \frac{(\gamma \gamma)}{10} \ 100\%$$
 (78)

Για την εύρεση των συντεταγμένων κάθε παραγόμενης υδροτομής, είναι απαραίτητη η αντιστοίχη των τετμημένων X_a και των τεταγμένων Y_{1a} της μέσης γραμμής με την πρόσθεση της κατατανομής του πάχους Y_{2a} για την άνω πλευρά (**xU,yU**) και την αφαίρεση του πάχους Y_{2a} για την κάτω πλευρά (**xL,yL**). Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η κατανομή του πάχους είναι κάθετη στην μέση γραμμή, συνεπώς

είναι απαραίτητη η γνώση της κλίσης της σε κάθε σημείο. Οι συντεταγμένες υπολογίζονται τελικώς με τους παρακάτω τύπους.

$$x_U = X_a \tag{79}$$

$$y_U = Y_{1a} + \frac{Y_{2a}}{\cos\left(\operatorname{atan}\left(\frac{dy_c}{dx}\right)\right)}$$
(80)

$$x_L = X_a \tag{81}$$

$$y_L = Y_{1a} - \frac{Y_{2a}}{\cos\left(\operatorname{atan}\left(\frac{dy_c}{dx}\right)\right)}$$
(82)

3.6.2. Σειρά αεροτομών NACA 44 (τεσσάρων ψηφίων)

Το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της σειράς υδροτομών NACA 44 είναι το γεγονός ότι με την εισαγωγή μίας παράμετρου μπορούμε να παράγουμε μεγάλο αριθμό υδροτομών με διαφορετικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά (Εικ. 21). Κάθε υδροτομή αυτής της σειράς αναγράφεται ως εξής:

NACA 44 XX

, όπου (XX) εκφράζει το μέγιστο σχετικό πάχος % της χορδής ως προς την μέση γραμμή (NACA Re. 460, 1938). Ο αριθμός (4) στην αρχή εκφράζει την μέγιστη καμπυλότητα της μέσης γραμμής ως ποσοστό % της χορδής (**M**) ενώ ο δεύτερος αριθμός (4) εκφράζει την θέση της μέγιστης καμπυλότητας σε δέκατα της χορδής (**P**). Για παράδειγμα, η υδροτομή 4412 έχει μέγιστη καμπυλότητα 4% της χορδής στην θέση του 40% της χορδής με μέγιστο πάχος 12% της χορδής.

Για να παραχθούν τα σημεία αυτής της οικογένειας υδροτομών, πρέπει να σχεδιαστεί η μέση γραμμή και η κατανομή του πάχους της, των οποίων ο συνδυασμός θα δώσει τα τελικά σημεία της υδροτομής. Για την κατανομή του πάχους, χρησιμοποιείται πολυώνυμο προσέγγισης της ακόλουθης μορφής:

$$y_t = \frac{xx}{c^{*0.2}} \left(a_0 \sqrt{\frac{x}{c}} + a_1 \frac{x}{c} + a_2 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + a_3 \left(\frac{x}{c}\right)^3 + a_4 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right)$$
(83)

Οι συντελεστές α0, α1, α2, α3, α4 προκύπτουν από πολύχρονες μελέτες και αντιστοιχούν στις τιμές:

 $\alpha_0 = 0.29690$ $\alpha_1 = -0.12600$ $\alpha_2 = -0.35160$ $\alpha_3 = 0.28430$ $\alpha_4 = -0.10360$

Η μεταβλητή x/c αφορά στην τετμημένη της υδροτομής, ωστόσο δεν ακολουθεί γραμμική μεταβολή αλλά συνημιτονοειδή, καθώς απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια με την παρουσία περισσότερων σημείων στις ακμές προσβολής και εκφυγής. Έτσι, η τετμημένη δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{x}{c} = \frac{1 - \cos(\varphi)}{2}$$
 , $0 \le \varphi \le 180^{\circ}$ (84)

Για την μέση γραμμή χρησιμοποιούμε 2 εξισώσεις παραβολικού τόξου, μία για το τμήμα της υδροτομής ανάντι της θέσης μέγιστης καμπυλότητας και μία για το τμήμα κατάντι της θέσης μέγιστης καμπυλότητας.

$$y_c = \frac{M}{P^2} \left(2P \frac{x}{c} - \left(\frac{x}{c}\right)^2 \right) , \quad 0 \le \frac{x}{c} < P$$
 (85)

$$y_c = \frac{M}{1 - P^2} \left(1 - 2P + 2P \frac{x}{c} - \left(\frac{x}{c}\right)^2 \right) , \quad P \le \frac{x}{c} \le 1$$
 (86)

Έχοντας αυτές τις 2 εκφράσεις για την μέση γραμμή και την κατανομή του πάχους της υδροτομής, είναι δυνατό να υπολογιστούν οι τελικές συντεταγμένες. Συνδυάζοντας τες, υπολογίζονται οι συντεταγμένες για την άνω και την κάτω πλευρά της υδροτομής των οποίων ο συνδυασμός μας δίνει το τελικό σχήμα της, που φαίνεται στην Εικόνα 16. Αυτό γίνεται εισάγοντας τις συντεταγμένες (**xU**,**yU**) για την άνω πλευρά και τις συντενταγμένες (**xL**,**yL**) για την κάτω πλευρά, οι οποίες δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$x_U = \frac{x}{c} - y_t \sin\left(\frac{dy_c}{dx}\right) \tag{87}$$

$$y_U = y_c + y_t \cos\left(\frac{dy_c}{dx}\right) \tag{88}$$

$$x_L = \frac{x}{c} + y_t \sin\left(\frac{dy_c}{dx}\right) \tag{89}$$

$$y_L = y_c - y_t \cos\left(\frac{dy_c}{dx}\right) \tag{90}$$



Εικόνα 21: Ορισμός της γεωμετρίας αεροτομής ΝΑCA 44

3.6.3. Σειρά αεροτομών GOE

Η σειρά αεροτομών GOE έχει ευρεία χρήση σε στροβιλομηχανές αξονικής ροής και για τον λόγο αυτό, έχουν γίνει εκτεταμένες μελέτες για την εύρεση των αεροδυναμικών τους χαρακτηριστικών μέσω εμπειρικών σχέσεων (Radha Krishna, 1997). Οι σχέσεις αυτές προκύπτουν από την μελέτη και την χρήση μεθόδων αριθμητικής προσέγγισης για την εύρεση μιας εξίσωσης, που προσεγγίζει με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια τις καμπύλες των αεροδυναμικών συντελεστών συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της ροής (i) και της στερεότητας του πτερυγίου (σ).

Οι προαναφερθείσες εμπειρικές σχέσεις αναφέρονται σε συγκεκριμένες ομάδες αεροτομών της σειράς GOE, για τις οποίες υπολογίστηκε ότι μία σχέση προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια μεγαλύτερο πλήθος αεροτομών.

Για τις αεροτομές GOE 428, 682 364 και 480 ο συντελεστής άνωσης δίνεται από την Εξίσωση:

$$c_{Lp} = 4.8 \,\sigma + 0.092 \,i \tag{91}$$
Για τις αεροτομές GOE 622, 623, 624 και 384 ο συντελεστής άνωσης δίνεται από την Εξίσωση:

$$c_{Lp} = 4 \sigma + 0.092 i$$
 (92)

Για τις αεροτομές GOE 408, 400, 436 και 387 ο συντελεστής άνωσης δίνεται από την Εξίσωση:

$$c_{Lp} = 1.3 \sigma + 0.092 i$$
 (93)

3.6.4. Αξιολόγηση και επιλογή καταλληλότερης υδροτομής

Η αξιολόγηση και επιλογή της καταλληλότερης υδροτομής για τον εξεταζόμενο υδροστρόβιλο προκύπτει από την σύγκριση των διαγραμμάτων των αεροδυναμικών συντελεστών του ιδεατού υδροστροβίλου, όπως αυτά προκύπτουν από την ανάλυση των τριγώνων ταχυτήτων και των αντίστοιχων διαγραμμάτων της εκάστοτε υδροτομής. Πιο αναλυτικά, οι αεροδυναμικοί συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας κάθε εξεταζόμενης υδροτομής που υπολογίζονται μέσω διδιάστατης αεροδυναμικής ανάλυσης, συγκρίνονται ως προς τον βαθμό εγγύτητάς τους στο ιδεατό διάγραμμα των δύο αυτών συντελεστών, που υπολογίστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο.

Το πρώτο βήμα για την αξιολόγηση των υδροτομών είναι η αεροδυναμική ανάλυση για την εύρεση των αεροδυναμικών συντελεστών της μεμονωμένης υδροτομής στο διδιάστατο επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση του ελεύθερου λογισμικού XFLR5, το οποίο αποτελεί την απόδοση του προγράμματος XFOIL για διδιάστατη αεροδυναμική ανάλυση σε γραφικό περιβάλλον. Το πρόγραμμα XFOIL αναπτύχθηκε από τον καθηγητή Mark Drela του Τεχνολογικού Ινστιτούτου της Μασσαχουσέτης (MIT) των ΗΠΑ. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα που υπολογίζει τους αεροδυναμικούς συντελεστές, την κατανομή πίεσης της αεροτομής με παραμέτρους την γωνία πρόσπτωσης, τον αριθμό Reynolds και τον αριθμό Mach.

Η επιλογή των αεροτομών από κάθε μία σειρά είναι τυχαία και σκοπό έχει να αναδείξει την μέθοδο αξιολόγησης και επιλογής της καταλληλότερης υδροτομής από ένα συγκεκριμένο πλήθος διαθέσιμων υδροτομών. Στην παρούσα ανάλυση, επιλέγονται δύο αεροτομές από την σειρά αεροτομών NACA 44, δύο αεροτομές από την σειρά αεροτομές από την σειρά αεροτομές από την σειρά αεροτομών GOE,

μία για κάθε ομάδα, όπως αναφέρεται στην προηγούμενη παράγραφο. Συνεπώς οι εξεταζόμενες αεροτομές είναι οι:

- 1. NACA 4407
- 2. NACA 4410
- 3. NACA 65-210 (65-(02)-10)
- 4. NACA 65-210 (65-(04)-10)
- 5. GOE 682
- 6. GOE 622
- 7. GOE 436

Αφού εισαχθούν οι συντεταγμένες των παραπάνω αεροτομών στο πρόγραμμα XFLR5, επόμενο βήμα είναι η εύρεση του αριθμού Reynolds της ροής διαμέσου του δρομέα. Ο αριθμός Reynolds της ροής υπολογίζεται με βάση την μέση τιμή της μεσημβρινής ταχύτητας με την οποία διέρχεται το ρευστό από τον υδροστρόβιλο στην μέση ακτίνα του, ως εξής:

$$Re_{c} = \frac{\overline{C_{z}}\left(\frac{D_{Sh}}{4} + \frac{D_{hub}}{4}\right)}{v}$$
(94)

Στην συνέχεια, υπολογίζονται οι αεροδυναμικοί συντελεστές στο εύρος γωνιών πρόσπτωσης [0,20°] με βήμα 0,5°. Τα εύρος αυτό επιλέχθηκε με βάση τα αποτελέσματα των γωνιών πρόσπτωσης (i). Ωστόσο οι γωνίες στις οποίες υπολογίστηκαν οι αεροδυναμικοί συντελεστές δεν συμπίπτουν με τις υπολογισμένες γωνίες πρόσπτωσης (i), άρα είναι απαραίτητη η εύρεση των τιμών των αεροδυναμικών συντελεστών στις δεδομένες γωνίες πρόσπτωσης (i). Αυτό επιτυγχάνεται με την γραμμική παρεμβολή των τιμών που υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα XFLR5 στις ζητούμενες γωνίες πρόσπτωσης (i). Η διαδικασία αυτή γίνεται για τους αεροδυναμικούς συντελεστές της άνωσης και της οπισθέλκουσας.

Μια σημαντική διαφοροποίηση που παρατηρείται στην μελέτη των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών του πτερυγίου του υδροστροβίλου αφορά το γεγονός ότι μοντελοποιείται ως μια σειρά μεμονωμένων αεροτομών τοποθετημένες σε πλέγμα παρά με την μελέτη ξεχωριστών υδροτομών μία προς μία στο ίδιο πλέγμα. Αυτή η διαφοροποίηση δημιουργεί αλληλεπίδραση μεταξύ των μεμονωμένων υδροτομών επηρεάζοντας τους αεροδυναμικούς συντελεστές της διδιάστατης ανάλυσης που προηγήθηκε.

Συνεπώς, απαιτείται μία προσαρμογή των αποτελεσμάτων για τους αεροδυναμικούς συντελεστές προτού συγκριθούν με αυτούς που υπολογίστηκαν από την ανάλυση των τριγώνων ταχυτήτων. Μια θεωρητική προσέγγιση για την προσαρμογή έχει προταθεί από τον Fritz Weinig, ο οποίος μοντελοποιεί μια εξεταζόμενη αεροτομή,

τοποθετημένη σε πλέγμα, ως μία επίπεδη πλάκα και αφού μελετά την συμπεριφορά των αεροδυναμικών συντελεστών της πλάκας αυτής, παρουσιάζει ένα συντελεστή διόρθωσης του διδιάστατου αεροδυναμικού συντελεστή της άνωσης μιας μεμονωμένης αεροτομής ως προς τον συντελεστή άνωσης ενός πλήθους αεροτομών τοποθετημένες σε πλέγμα. Ο συντελεστής διόρθωσης **k** εξαρτάται από την γωνία προσανατολισμού του πτερυγίου και την στερεότητά του και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$k = \frac{c_{Lp}}{c_L} \tag{95}$$

Στην ανάλυσή του, ο Weinig, χρησιμοποιεί την συμπληρωματική γωνία της γωνίας προσανατολισμού γ, αναγράφοντάς την ως γ_{eff} και επίσης χρησιμοποιεί τον λόγο της ακτινικής απόστασης των πτερυγίων προς την χορδή της υδροτομής στην συγκεκριμένη θέση, δηλαδή το αντίστροφο της στερεότητας **σ**. Τα αποτελέσματα της ανάλυσής του Weinig συνοψίζονται στο Διάγραμμα (**8**):



Διάγραμμα 8: Συντελεστής διόρθωσης του συντελεστή άνωσης επίπεδης πλάκας κατά Weinig

Τα αποτελέσματα του παραπάνω διαγράμματος μπορούν να ψηφιοποιηθούν για να απλουστευθούν οι επόμενοι υπολογισμοί και παρουσιάζονται στην παρακάτω μορφή:



Διάγραμμα 9: Ψηφιοποιμένο διάγραμμα αποτελεσμάτων επίπεδης πλάκας κατά Weinig

Με αυτή την μορφή, είναι δυνατό να επεξεργαστούν τα αποτελέσματα των πειραμάτων του Weinig και να χρησιμοποιηθούν για την παρούσα ανάλυση, όπου δεδομένα είναι η στερεότητα και η γωνία προσανατολισμού του μερικού πτερυγίου. Παρεμβάλοντας τις τιμές της στερεότητας των πτερυγίων, που υπολογίστηκαν στην Φάση 3 και αντιστοιχίζοντάς τες με τις τιμές των μεμονωμένων γωνιών προσανατολισμού που βρίσκονται στο Διάγραμμα (9), παράγεται η καμπύλη "Interp. Values" του συντελεστή διόρθωσης **k** συναρτήσει της στερεότητας **σ**. Για την προσέγγιση αυτή, χρησιμοποιήθηκε πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού, το οποίο προσδιορίστηκε με χρήση του λογισμικού Microsoft Excel, και η μορφή του παρουσιάζεται στο Διάγραμμα (10):



Διάγραμμα 10: Μεταβολή του συντελεστή ως προς την στερεότητα στην ακτινική διεύθυνση

Η καμπύλη "Correction factor" προκύπτει από την χρήση του πολυωνύμου προσέγγισης των τιμών της στερεότητας των πτερυγίων του προηγούμενου βήματος, για το σύνολο του εύρους μεταβολής των γωνιών προσανατολισμού. Είναι η καμπύλη υπολογισμού του συντελεστή διόρθωσης k και δίνεται από την εξίσωση (**95**):

$$k = 7.0233 \left(\frac{1}{\sigma}\right)^3 - 41.161 \left(\frac{1}{\sigma}\right)^2 + 80.57 \left(\frac{1}{\sigma}\right) - 51.5$$
 (96)

Χρησιμοποιώντας τις Εξίσωση (94) και (95), υπολογίζεται ο διορθωμένος συντελεστής άνωσης του μερικού δρομέα λόγω της αλληλεπίδρασης που προκαλείται από την γειτνίαση των μερικών δρομέων. Τα αποτελέσματα του συντελεστή άνωσης των τεσσάρων υδροτομών NACA παρουσιάζονται στο Διάγραμμα (11):



Διάγραμμα 11: Συντελεστής άνωσης υδροτομών ΝΑCA

Για τις υδροτομές GOE, οι εμπειρικές εξισώσεις (91), (92) και (93) που παρατέθηκαν αφορούν τον διορθωμένο συντελεστή άνωσης άρα είναι δυνατό να υπολογιστεί άμεσα ο συντελεστής άνωσης της υδροτομής σε κάθε μερικό δρομέα από την πλήμνη έως την στεφάνη. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών βρίσκονται Διάγραμμα (12):



Διάγραμμα 12: Συντελεστής άνωσης υδροτομών GOE

Για τον υδροδυναμικό συντελεστή της οπισθέλκουσας, η αλληλεπίδραση των μερικών δρομέων δεν προκαλεί σημαντική αλλαγή στην τιμή του και συνεπώς οι τιμές που υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού XFLR5 παραμένουν ως έχουν. Οι τιμές του συντελεστή οπισθέλκουσας για τις αεροτομές NACA και GOE παρουσιάζονται στα Διαγράμματα (13) και (14):



Διάγραμμα 13: Συντελεστής οπισθέλκουσας υδροτομών NACA



Διάγραμμα 14: Συντελεστής οπισθέλκουσας υδροτομών GOE

Από τα ανωτέρω τέσσερα διαγράμματα είναι δυνατό να διακρίνει κανείς το επίπεδο σύγκλισης των καμπύλων των υδροδυναμικών συντελεστών των επιμέρους υδροτομών με τις καμπύλες του ιδεατού δρομέα που προέκυψαν από την ανάλυση των τριγώνων ταχυτήτων. Η σύγκλιση κάθε μιας διαφέρει καθώς διαφέρουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους τα οποία επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τους αεροδυναμικούς συντελεστές. Για την επιλογή της καταλληλότερης υδροτομής πρέπει να υπολογιστεί ο βαθμός σύγκλισης κάθε εξεταζόμενης υδροτομής ως προς την ιδεατή.

Για τον λόγο αυτό επιλέγεται το κριτήριο του τετραγώνου της διαφοράς των υδροδυναμικών συντελεστών κάθε υδροτομής με την ιδεατή. Το κριτήριο αυτό δίνεται από την Εξίσωση:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{I_{STR}} (x_i - x_t)^2$$
(97)

, όπου:

- x_i είναι ο εξεταζόμενος υδροδυναμικός συντελεστής της εκάστοτε υδροτομής
- x_t είναι ο εξεταζόμενος υδροδυναμικός συντελεστής της ιδεατής υδροτομής

Οι διαφορές για τους δύο υδροδυναμικούς συντελεστές κάθε υδροτομής παρατίθενται στον Πίνακα ($\mathbf{3}$):

Υδροτομές	Δ (cL)	Δ (cD)	
GOE 682	4,2835	0,1434	
GOE 622	15,0353	0,0673	
GOE 436	43,8882	0,1143	
NACA 4407	43,2685	0,1935	
NACA 4410	36,0742	0,2172	
NACA 65-02-10	61,6246	0,1517	
NACA 65-04-10	70,9561	0,4957	

Πίνα
κας 3: Σχετική απόκλιση αεροδυναμικών συντελεστών από την ιδε
ατή τιμή

Η επιλογή για την καταλληλότερη αεροτομή βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του τετραγώνου της διαφοράς των υδροδυναμικών συντελεστών, που συνεπάγεται ότι η εξεταζόμενη υδροτομή προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια την ιδεατή υδροτομή. Ως αποτέλεσμα της παραπάνω ανάλυσης, προκύπτει ότι η υδροτομή GOE 682 είναι η καταλληλότερη καθώς ο συνδυασμός των διαφορών δίνει το ελάχιστο αποτέλεσμα (Εικ. 22).



Εικόνα 22: Υδροτομή GOE 682

3.7.Φάση 4: Γέννεση της γεωμετρίας του δρομέα

Με την επιλογή της καταλληλότερης αεροτομής είναι πλέον δυνατόν, να παραχθεί η πλήρης γεωμετρία του εξεταζόμενου υδροστροβίλου. Όλα τα δεδομένα που χρειάζονται για την χάραξη της γεωμετρίας είναι διαθέσιμα ως αποτέλεσμα των υπολογισμών που έγιναν στα προηγούμενα βήματα.

Οι αρχικές προδιαγραφές που δόθηκαν στην αρχή αφορούν έναν υδροστρόβιλο 3 πτερυγίων και διαμέτρου 7 μέτρων. Με την επιλογή της στερεότητας των πτερυγίων, υπολογίζεται η χορδή της υδροτομής σε κάθε γραμμής ροής, σύμφωνα με την Εξίσωση (65). Επίσης στην φάση 3, υπολογίσθηκαν οι γωνίες προσανατολισμού της υδροτομής σε κάθε γραμμή ροής, που αφορούν την γωνία της υδροτομής ως προς την αξονική διεύθυνση. Ζητούμενο είναι ο συνδυασμός αυτών των αποτελεσμάτων και μετατροπή τους σε σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων για την σωστή απεικόνιση του υδροστροβίλου.

Ο μετασχηματισμός του συστήματος συντεταγμένων από καρτεσιανές σε κυλινδρικές συντεταγμένες σε 2διάστατο χώρο αφορά την μετατροπή των (x,y) συντεταγμένων σε συντεταγμένες (r,θ), ακτίνας και γωνίας. Η ακτίνα αφορά την απόσταση του σημείου M(x,y) από το κέντρο των αξόνων στο επίπεδο xy και η γωνία θ είναι η σχηματιζόμενη γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της απόστασης του σημείου αυτού με τον άξονα των τετμημένων x. Συνεπώς για ένα διάνυσμα $\vec{a} = (x, y)$ η μετατροπή του σε κυλινδρικές συντεταγμένες για γωνία προσανατολισμού γ, παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$r = x\cos(\gamma) + y\sin(\gamma) \tag{98}$$

$$\theta = -x\sin(\gamma) + y\cos(\gamma) \tag{99}$$

Στην παρούσα ανάλυση, το διάνυσμα \vec{a} είναι το διάνυσμα κάθε σημείου της επιλεγμένης υδροτομής, του οποίου οι συντεταγμένες μετασχηματίζονται σε κυλινδρικές, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις. Αφού ολοκληρωθεί αυτός ο μετασχηματισμός, οι συντεταγμένες κάθε αεροτομής τοποθετούνται στην ακτίνα κάθε γραμμής ροής του 3διάστατου επιπέδου έτσι ώστε να σχηματιστεί συνολικά το πτερύγιο κατά την ακτινική διεύθυνση. Η τοποθέτηση αυτή γίνεται με την εισαγωγή της συντεταγμένης z_{cyl} ως την 3^η διάσταση και τον υπολογισμό των συντεταγμένων της αεροτομής στο επίπεδο xz, χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις:

$$x_{cyl} = R\sin\left(\frac{r}{R}\right)\cos\left(\frac{2\pi Z_i}{Z}\right) + R\cos\left(\frac{r}{R}\right)\sin\left(\frac{2\pi Z_i}{Z}\right)$$
(100)

$$y_{cyl} = \theta \tag{101}$$

$$z_{cyl} = -R\sin\left(\frac{r}{R}\right)\sin\left(\frac{2\pi Z_i}{Z}\right) + R\cos\left(\frac{r}{R}\right)\cos\left(\frac{2\pi Z_i}{Z}\right)$$
(102)

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε γραμμή ροής, καθ' ενός από τα 3 πτερύγια και τελικά, προκύπτει η γέννεση των συντεταγμένων των πτερυγίων του υδροστροβίλου.

Μετά την γέννεση της γεωμετρίας των πτερυγίων του δρομέα, επόμενο βήμα είναι η γέννεση της γεωμετρίας της πλήμνης. Η πλήμνη χαρακτηρίζεται από την διαμόρφωση σταδιακής ομαλής μείωσης της διαμέτρου της, κατάντι των πτερυγίων, με σκοπό την μείωση των απωλειών τριβής της ροής και της ανάκτησης πίεσης μέσω της αύξησης της βρεχόμενης επιφάνειας του αγωγού εξόδου. Η μείωση της διαμέτρου γίνεται χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό των κυλινδρικών συντεταγμένων. Η παράμετρος που χρειάζεται να επιλεγεί είναι η τελική διάμετρος του δρομέα, στην οποία θα συγκλίνει η πλήμνη από την αρχική D_{hub} .

Συνδυάζοντας τις παραπάνω μεθόδους με τα αποτελέσματα των προηγούμενων φάσεων του δρομέα, προκύπτει η συνολική γεωμετρία του δρομέα στο 3διάστατο επίπεδο για την υδροτομή που επιλέχθηκε με την μέθοδο που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο (Εικ. 23 και 24).



Εικόνα 24: Ισομετρική όψη υδροστροβίλου με υδροτομή GOE 682

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

4.1.Διάγραμμα λειτουργίας του υδροστροβίλου

Βασική προϋπόθεση για την επιλογή οποιουδήποτε υδροστροβίλου προς εγκατάσταση σε ΥΗΣ είναι το Διάγραμμα Λειτουργίας του. Αυτό δίνει πληροφορίες για τον βαθμό απόδοσης που θα έχει για δεδομένες συνθήκες παροχής, ύψους και στροφών, καθιστώντας τον καταλληλότερο ή όχι για την εγκατάστασή του στον ΥΗΣ.

Τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση του χάρτη είναι τα διαγράμματα του ύψους και του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της παροχής, σε σταθερές στροφές. Επίσης, χρησιμοποιείται το διάγραμμα ομοιότητας του υδροστροβίλου με ένα μοντέλο σε μικρότερη κλίμακα, όπου χαράσσεται η καμπύλη της ανηγμένης παροχής του μοντέλου του υδροστροβίλου συναρτήσει του ανηγμένου αριθμού στροφών του, με παράμετρο τον βαθμό απόδοσης. Από αυτό το διάγραμμα και με τους κατάλληλους τύπους ομοιότητας, σε σταθερό ύψος εξάγονται πληροφορίες για την παροχή, τις στροφές του κανονικού υδροστροβίλου για δεδομένο ύψος και τον βαθμό απόδοσής του.

Η βασική αρχή για την χάραξη του διαγράμματος αυτού είναι η αρχή διατήρηρης της ενέργειας για τους υδροστρόβιλους που εκφράζεται από την εξίσωση του Euler για τις εργοστροβιλομηχανές, η οποία στην περίπτωση υδροστροβίλου έχει την μορφή της Εξίσωσης (12):

$$H_u = \frac{1}{g} (U_1 C_{u1} - U_2 C_{u2})$$

Με βάση τα τρίγωνα ταχυτήτων της εισόδου και της εξόδου, η περιφερειακή και αξονική συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας αποτυπώνονται με διαφορετικό τρόπο, ώστε να εισαχθούν τα ζητούμενα μεγέθη. Αυτό γίνεται ως εξής:

$$C_{u1} = \frac{C_{z1}}{tana_1'} = \frac{Q}{S_w tana_1'}$$
(103)

$$C_{u2} = U_2 - \frac{c_{z1}}{\tan\beta_2'} = U_2 - \frac{Q}{S_w \tan\beta_2'}$$
(104)

Επομένως, για την επίλυση της παραπάνω εξίσωσης ως προς την θεωρητική παροχή Q_u , είναι απαραίτητη η εισαγωγή 4 ελεύθερων παραμέτρων στον αλγόριθμο επίλυσης, οι οποίες είναι:

- Η ταχύτητα περιστροφής Ν
- Η γωνία της απόλυτης ταχύτητας της ροής στην είσοδο του δρομέ
α a_1^\prime
- Η γωνία της σχετικής ταχύτητας της ροής στην έξοδο του δρομέ
α β_2'
- Την πραγματική παροχή Q

Οι γωνίες των σχετικών και απόλυτων ταχυτήτων της ροής είναι ο συνδυασμός των πραγματικών γωνιών του μερικού δρομέα και των γωνιών στροφής των πτερυγίων του δρομέα και των ρυθμιστικών πτερυγίων. Η θεώρηση αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι σε διαφορετικές γωνίες λειτουργίας των δύο ομάδων πτερυγίων διαφοροποιούνται τα χαρακτηριστικά των τριγώνων ταχυτήτων και κατ' επέκτασιν της ροής.

Η γωνία της απόλυτης ταχύτητας της ροής στην είσοδο του δρομέα ορίζεται ως το άθροισμα της γωνίας της απόλυτης ταχύτητας της ροής στον μερικό δρομέα $\alpha_{1,i}$ και του όρου περιστροφής της γωνίας των ρυθμιστικών πτερυγίων. Άρα η γωνία της απόλυτης ταχύτητας της ροής a'_1 για τον μερικό δρομέα δίνεται από τον τύπο:

$$a_{1,l}' = \alpha_{1,l} + \delta \alpha_1$$
 (105)

Με τον ίδιο τρόπο, η γωνία της σχετικής ταχύτητας της ροής στην έξοδο του δρομέα είναι το άθροισμα της γωνίας της σχετικής ταχύτητας της ροής στην έξοδο του δρομέα $\beta_{2,\iota}$ και του όρου περιστροφής της γωνίας των πτερυγίων του δρομέα. Θεωρώντας ότι η ροή εξέρχεται από την ακμή εκφυγής του πτερυγίου με την γωνία μετάλλου του πτερυγίου στο σημείο αυτό, είναι δυνατόν να γίνει ανάλυση της διαφοροποίησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υδροστροβίλου για διαφορετικές γωνίες β'_2 στην έξοδο του δρομέα. Οπότε η γωνία της σχετικής ταχύτητας της ροής β'_2 για τον μερικό δρομέα δίνεται από τον τύπο:

$$\beta_2' = \beta_{2,i} + \delta\beta_2 \tag{106}$$

Συνεπώς η τελική εξίσωση για την εύρεση του θεωρητικού υδραυλικού ύψους σε κάθε γραμμή ροής είναι:

$$H_{u,i} = \frac{Q_i U_{2,i}}{g S_w} \left(\frac{1}{\tan(\alpha_{1,i} + \delta \alpha_1)} - U_{2,i} + \frac{1}{\tan(\beta_{2,i} + \delta \beta_2)} \right)$$
(107)

Για να υπολογιστεί το συνολικό θεωρητικό ύψος του δρομέα, πρέπει να αθροιστούν όλα τα ύψη για τις επιμέρους γραμμές ροής. Το ολικό θεωρητικό ύψος του δρομέα υπολογίζεται ως το άθροισμα του γινομένου του ύψους και της παροχής κάθε γραμμής ροής διαιρεμένο με την συνολική παροχή, και δίνεται από την παρακάτω Εξίσωση:

$$H_{u} = \sum_{i=1}^{I_{STR}} \frac{H_{u,i}(r_{i})Q_{i}(r_{i})}{Q_{k}} = \sum_{i=1}^{I_{STR}} \frac{H_{u,i}(r_{i})2\pi R_{i} C_{m1,i}(R_{i}-R_{i-1})}{Q_{k}}$$
(108)

Το πραγματικό υδραυλικό ύψος του υδροστροβίλου είναι το υδραυλικό ύψος στην είσοδο του δρομέα, το οποίο συνιστά την συνολική διαθέσιμη υδραυλική ενέργεια του νερού του ταμιευτήρα και μπορεί να το εκμεταλλευτεί ο δρομέας για την δημιουργία ροπής στρέψης στον άξονά του. Σύμφωνα με την εξίσωση του Euler για τις στροβιλομηχανές, που αναλύθηκε παραπάνω, το πραγματικό υδραυλικό ύψος σε κάθε γραμμή ροής είναι:

$$H_i = \frac{Q_{u,i}U_{2,i}}{gS_w} \left(\frac{1}{\tan(\alpha_{1,i} + \delta\alpha_1)}\right)$$
(109)

Παρομοίως με την Εξίσωση (**108**), το συνολικό πραγματικό ύψος του υδροστροβίλου υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους υψών σε κάθε γραμμής ροής και δίνεται από την Εξίσωση:

$$H = \sum_{i=1}^{I_{STR}} \frac{H_i(r_i)Q_i(r_i)}{Q_k} = \sum_{i=1}^{I_{STR}} \frac{H_i(r_i)2\pi R_i C_{m1,i}(R_i - R_{i-1})}{Q_k}$$
(110)

Η θεωρητική παροχή υπολογίζεται δίνοντας τιμές για κάθε μία από τις παραπάνω παράμετρους και χρησιμοποιώντας την υδροδυναμική θεωρία ανάλυσης υδροστροβίλων που αναπτύχθηκε παραπάνω. Αυτές οι τέσσερις μεταβλητές μεταβάλλονται ανεξάρτητα σε τέσσερις εμφωλευμένους βρόχους σε συγκεκριμένα εύρη που φαίνονται στον Πίνακα 4, ξεκινώντας από τον εξώτερο καταλήγοντας στον εσώτερο:

Σειρά	Μέγεθος	Εύρος	Βήμα
1	Ταχύτητα περιστροφής	[30,300] RPM	27 RPM
2	Γωνία ανοίγματος ρυθμ. πτερυγίων	[-5,22] degrees	9 degrees
3	Γωνία στροφής πτερυγίων δρομέα	[-7,14] degrees	7 degrees
4	Πραγματική Παροχή	[1, 465] m3/s	5,8 m3/s

Πίνακας 4: Εύρη ελεύθερων παραμέτρων

Τα παραπάνω εύρη επιλέχθηκαν με βάση το Διάγραμμα (6), στο οποίο βρίσκονται όλα τα εξεταζόμενα μεγέθη καθώς και οι τιμές τους. Τα μέγιστα και τα ελάχιστα αυτών των τιμών, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ευρών κάθε εξεταζόμενου μεγέθους.

Αφού υπολογιστεί το θεωρητικό και πραγματικό ύψος υδροστροβίλου, σύμφωνα τις Εξισώσεις (108) και (110), υπολογίζεται η ολική παροχή, ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης και ο ολικός βαθμός απόδοσης, οι οποίοι δίνονται από τις παρακάτω Εξισώσεις:

$$Q_u = Q\eta_q \tag{111}$$

$$\eta_h = \frac{H_u}{H} \tag{112}$$

$$\eta = \eta_h \, \eta_q \, \eta_m \tag{113}$$

Ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης η_q είναι πολύ δύσκολο να υπολογισθεί αναλυτικά λόγω των πολύπλοκων μεταβατικών φαινομένων που επικρατούν σε αυτή την περιοχή και προτιμούνται αριθμητικές μέθοδοι με την χρήση υπολογιστή ή διεξαγωγή πειράματος χρησιμοποιώντας μοντέλο της εξεταζόμενης μηχανής. Στην περίπτωση αυτή, ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης για μηχανή μεσαίου μεγέθους (10-50 MW ονομαστική ισχύς) λαμβάνεται στην τιμή **0.97.**

Επίσης, για τον υπολογισμό του συνολικού βαθμού απόδοσης, είναι απαραίτητος ο ορισμός του μηχανικού βαθμού απόδοσης. Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης περιλαμβάνει τις πάσης φύσεως απώλειες τριβής εδράνων και στρεφόμενου δίσκου και στην περίπτωση μιας μηχανής μεσαίου μεγέθους, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ορίζεται στην τιμή **0.985**.

4.2. Διάγραμματα Ύψους - Παροχής

Για την απεικόνηση του χάρτη του υδροστροβίλου συναρτήσει του υδραυλικού ύψους, της παροχής και του ολικού βαθμού απόδοσης διακρίνονται δύο περιπτώσεις, εκείνη με σταθερή γωνία ρυθμιστικών πτερυγίων και εκείνη με σταθερή γωνία των πτερυγίων του δρομέα.

Στην πρώτη περίπτωση κατασκευάζεται το διάγραμμα του πραγματικού ύψους, της πραγματικής παροχής και του ολικού βαθμού απόδοσης με τις ισοϋψεις καμπύλες που έχουν την ίδια γωνία ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων ως παράμετρο. Τα αποτελέσματα του παρακάτω διαγράμματος έχουν παραχθεί για δεδομένη γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα καθώς σε αντίθετη περίπτωση θα ήταν αδύνατο να απεικονιστούν τα αποτελέσματα στο διδιάστατο επίπεδο xy με 2 ελεύθερες παραμέτρους. Στην παρούσα ανάλυση, η σταθερή γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα καθώς διαθερή γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα καθώς διαθερή γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα καθές διαθερή γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα καθές διαθερή γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα καθώς διαθερή γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα καθές διαθερή γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα καθές διαθερή γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα καθερή γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα είναι +5° από το Κανονικό Σημείο Λειτουργίας, δηλαδή στις 24,8°.

Συνεπώς το διάγραμμα του ύψους και του βαθμού απόδοσης της μηχανής συναρτήσει της παροχής με παράμετρο το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων παίρνει την μορφή του Διαγράμματος (15):



Διάγραμμα 15: Ύψος και βαθμός απόδοσης συνερτήσει της παροχής με παράμετρο το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων

Για την δεύτερη περίπτωση, κατασκευάζεται το διάγραμμα του ολικού ύψους συναρτήσει της πραγματικής παροχής και του ολικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της πραγματικής παροχής με παράμετρο την γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, τα αποτελέσματα αφορούν μια σταθερή γωνία ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων, η οποία είναι στις +4° από την γωνία ανοίγματος του Κανονικού Σημείου Λειτουργίας, δηλαδή στις +53,5°.

Συνεπώς το διάγραμμα του ύψους και του βαθμού απόδοσης της μηχανής συναρτήσει της παροχής με παράμετρο την γωνία στροφής των ρυθμιστικών πτερυγίων παίρνει την μορφή του Διαγράμματος (**16**):



Διάγραμμα 16: Ύψος και βαθμός απόδοσης συνερτήσει της παροχής με παράμετρο την γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα

4.3. Διάγραμματα Ανηγμένης Παροχής – Ανηγμένου Αριθμού Στροφών

Με αυτό το διάγραμμα αποκτούμε μια ολοκληρωμένη εικόνα για την λειτουργία του υδροστροβίλου και σε μεταβλητό φορτίο, όπως είναι η πλειονότητα των περιπτώσεων σε παλιρροϊκούς ΥΗΣ.

Μπορούμε με βάση το παραπάνω διάγραμμα, να χαράξουμε το διάγραμμα παροχήςστροφών για δεδομένο ύψος χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους τύπους μετασχηματισμού. Οι τύποι μετασχηματισμού είναι οι ίδιοι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν στην φάση 0 για την εύρεση της παροχής, των στροφών και της ισχύος του πραγματικού υδροστροβίλου, έχοντας ως βάση τα δεδομένα του όμοιου μοντέλου του.

Το υδραυλικό ύψος που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα θα χρησιμοποιηθεί στην θέση του ύψους που ορίστηκε στην φάση 0 και έτσι οι τύποι γίνονται ως εξής:

$$N_{11} = N \frac{D_{sh}}{\sqrt{H}} \tag{114}$$

$$Q_{11} = \frac{Q}{D_{sh}^2 \sqrt{H}}$$
 (115)

$$P_{11} = \frac{P}{D_{sh}^2 H^{\frac{3}{2}}}$$
(116)

Ο βαθμός απόδοσης είναι ίσος με αυτόν που υπολογίστηκε προηγουμένως για το διάγραμμα (H,Q) και αποτελεί επίσης παράμετρο του παρόντος διαγράμματος.

Για την χάραξη των διαγραμμάτων αυτών είναι απαραίτητο να δοθούν τα απαραίτητα μεγέθη ως είσοδοι στο πρόγραμμα. Αυτά τα μεγέθη στην περίπτωσή μας είναι, όπως και στην διαδικασία χάραξης των προηγούμενων διαγραμμάτων:

- Η ταχύτητα περιστροφής Ν
- Η γωνία ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων a_1
- Η γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα β2
- Η πραγματική παροχή Q

Αυτά τα μεγέθη μεταβάλλονται γραμμικά σε ξεχωριστό εμφωλευμένο βρόχο το καθένα. Αυτό σημαίνει ότι ο εσωτερικός βρόχος αφορά το μέγεθος που μεταβάλλεται γρηγορότερα, όσον αφορά τις επαναλήψεις, ενώ ο εξωτερικός αυτό που μεταβάλλεται αργότερα. Το εύρος και το βήμα του κάθε μεγέθους είναι το ίδιο που

χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση. Εισάγοντας αυτές τις τιμές, λαμβάνουμε τα διαγράμματα της ανηγμένης παροχής και του βαθμού απόδοσης συναρτήσει του ανηγμένου αριθμού στροφών με παράμετρο την γωνία ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων και την γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα, που φαίνονται στα Διαγράμματα (**17**) και (**18**):





Διάγραμμα 17: Ανηγμένη παροχή και βαθμός απόδοσης συνερτήσει του ανηγμένου αριθμού στροφών με παράμετρο το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων



Specific Discharge ~ Specific Speed (+4 degrees Guidance blade angle / 50 RPM Rotational Speed)

Διάγραμμα 18: Ανηγμένη παροχή και βαθμός απόδοσης συναρτήσει του ανηγμένου αριθμού στροφών με παράμετρο την γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα

4.4. Διάγραμμα ισοϋψων καμπύλων του βαθμού απόδοσης

Το πιο χρήσιμο χαρακτηριστικό του χάρτη ενός υδροστροβίλου είναι η δυνατότητα αναγνώρισης του Κανονικού Σημείου Λειτουργίας και όλων των μεγεθών που το χαρακτηρίζουν. Αυτά είναι ο βαθμός απόδοσης, η ταχύτητα περιστροφής, η γωνία ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων, η γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα και η παροχή. Μέχρι τώρα, ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται αναλυτικά με βάση τις σχέσεις που αναλύθηκαν παραπάνω και τις τιμές των παραμέτρων. Ωστόσο για την αποτελεσματικότερη χρήση αυτών των χαρτών, είναι αναγκαίο να αναγνωρίζεται εξ' αρχής ο βαθμός απόδοσης κάθε καμπύλης που φαίνεται στο διάγραμμα. Ο υπολογισμός καμπυλών ίσου βαθμού απόδοσης είναι η πιο αποτελεσματική λύση για το ζήτημα αυτό.

Η μέθοδος για την εξαγωγή των ισοϋψών καμπύλων του βαθμού απόδοσης είναι η παρεμβολή ισοϋψών καμπύλων στο σύνολο των σημείων, που σχεδιάστηκαν στο

παραπάνω διάγραμμα. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας εργαλεία παρεμβολής της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB μέσω της οποίας δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα.

Η μέθοδος παρεμβολής βασίστηκε στο γεγονός ότι κάθε συνδυασμός σημείων έχει έναν μοναδικό βαθμό απόδοσης και συνδυασμοί σημείων των οποίων οι βαθμοί απόδοσης βρίσκονται κοντά μεταξύ τους είναι δυνατόν να ενωθούν σε μια καμπύλη γραμμή με τον ίδιο βαθμό απόδοσης. Ορίζοντας το εύρος των σημείων της παρεμβολής και αντιστοιχώντας κάθε συνδυασμό σημείων με τον βαθμό απόδοσής τους, και την εντολή griddata της MATLAB, επιτυγχάνεται η παρεμβολή των σημείων με ίδιο βαθμό απόδοσης.

Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα (**19**) της ανηγμένης παροχής συναρτήσει του ανηγμένου αριθμού στροφών με παράμετρο τις ισοϋψείς καμπύλες του βαθμού απόδοσης.



Διάγραμμα 19: Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας ανηγμένης παροχής – ανηγμένου αριθμού Στροφών

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

5.1.Συμπεράσματα

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, παρουσιάστηκε και αναλύθηκε η μελέτη και η παραμετρική σχεδίαση του υδροστροβίλου που χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση του παλιρροϊκού φράγματος του Swansea. Αναλυτικότερα, αναπτύχθηκε ένα υδροδυναμικό μοντέλο υπολογισμού των γεωμετρικών στοιχείων των πτερυγίων του δρομέα βάσει της μελέτης των τριγώνων ταχυτήτων της ροής στην είσοδο και στην έξοδο του, μία μέθοδος επιλογής της καταλληλότερης υδροτομής για την επίτευξη των ιδεατών χαρακτηριστικών άνωσης και οπισθέλκουσας και η ανάλυση των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας του.

Αρχικά, το υδροδυναμικό μοντέλο μελέτης και σχεδίασης αφορά στην ιδεατή κατάσταση λειτουργίας του υδροστροβίλου χωρίς απώλειες τριβής κάθε είδους (γραμμικές απώλειες, απώλειες αγωγών εισόδου και εξόδου, απώλειες οπισθέλκουσας στα πτερύγια, κλπ). Με αυτή την παραδοχή, το μοντέλο είναι ικανό να υπολογίσει επιτυχώς όλα τα στοιχεία της ροής του ρευστού στην είσοδο και την έξοδο του δρομέα και στην συνέχεια, την γεωμετρία των πτερυγίων του. Οι απαιτούμενοι υπολογισμοί για την εύρεση όλων των ανωτέρω αποτελεσμάτων υλοποιήθηκαν με την χρήση πρωτότυπου προγράμματος FORTRAN.

Για το δεύτερο τμήμα, η μέθοδος επιλογής της υδροτομής του υδροστοβίλου βασίζεται την σύγκλιση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της εκάστοτε εξεταζόμενης υδροτομής με την ιδεατή καμπύλη μεταβολής των αεροδυναμικών συντελεστών. Οι καμπύλες αυτές είναι αποτέλεσμα της ανάλυσης που προηγήθηκε και η μεταβολή τους οφείλεται στην εφαρμογή της συνθήκης ελεύθερης δίνης στην είσοδο του δρομέα για τη επίτευξη του ίδιου υδραυλικού ύψους σε κάθε γραμμή ροής. Με την βοήθεια του λογισμικού αεροδυναμικής ανάλυσης XFLR5, βρέθηκαν οι αεροδυναμικοί συντελεστές κάθε υδροτομής και τα αποτελέσματά τους συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα των ιδεατών καμπυλών μεταβολής των αεροδυναμικών συντελεστών συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.

Για το τρίτο τμήμα, αναλύονται τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας του σχεδιαζόμενου υδροστροβίλου με την βοήθεια των διαγραμμάτων υδραυλικού ύψους – παροχής και ανηγμένης παροχής – ανηγμένου αριθμού στροφών. Οι παράμετροι που καθορίζουν τα μεγέθη λειτουργίας είναι η παροχή, η γωνία στροφής των πτερυγίων του δρομέα, η γωνία ανοίγματος των ρυθμιστικών πτευργίων και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Ορισμένοι συνδυασμοί τιμών των ανωτέρω παραμέτρων, οδηγούν σε λειτουργία της μηχανής ως αντλία ή υδροδυναμική πέδη, τα οποία δεν συμβαδίζουν με την επιθυμητή λειγουργία της μηχανής ως υδροστρόβιλος, με αποτέλεσμα να μην ληφθούν υπόψη. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, προκύπτουν από το βασικό πρόγραμμα FORTRAN του υδροδυναμικού μοντέλου και επεξεργάζονται περαιτέρω με πρόγραμμα MATLAB για τον χειρισμό και την σωστή απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα. Τα παραγόμενα διαγράμματα δείχνουν το εύρος της λειτουργίας της μηχανής καθώς τις αποδοτικότερες περιοχές λειτουργίας της μυψηλό βαθμό απόδοσης.

Για το διάγραμμα της ανηγμένης παροχής συναρτήσει του ανηγμένου αριθμού στροφών με παράμετρο τις ισοϋψείς καμπύλες του βαθμού απόδοσης παρουσιάζεται μια απόκλιση σε σχέση με το αρχικό διάγραμμα του μελετούμενου υδροστροβίλου Andritz. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στην ανάλυση των χαρακτηριστικών λειτουργίας μελετάται η ιδεατή κατάσταση λειτουργίας άνευ απωλειών. Οι σημαντικότερες πηγές ενεργειακών απωλειών της ροής του ρευστού διαμέσου ενός υδροστροβίλου είναι γραμμικές απώλειες στον αγωγό, ογκομετρικές απώλειες λόγω ακτινικού διακένου, απώλειες συνεκτικότητας στα ρυθμιστικά πτερύγια και πτερύγια του δρομέα και διαφεύγουσα κινητική ενέργεια του ρευστού στον αγωγό εξόδου. Η απουσία αυτών των όρων από την ενεργειακή μελέτη του δρομέα οδηγεί στην παρουσία πολλών τοπικών μέγιστων του βαθμού απόδοσης στο διάγραμμα λειτουργίας του. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να συνυπολογίζονται όλες οι ενεργειακές απώλειες που δημιουργούνται κατά την λειτουργίας ενός υδροστροβίλου με στόχο την αποτελεσματική μελέτη και σχεδίασή του.

5.2.Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, αναδείχθηκαν ορισμένα μειονεκτήματα της παρούσας ανάλυσης, για την βελτίωση και περαιτέρω ανάπτυξη της οποίας προτείνεται να γίνουν τα παρακάτω βήματα:

- Η ενσωμάτωση της διαδικασίας επιλογής της καταλληλότερης υδροτομής στο κύριο πρόγραμμα FORTRAN του υδροδυναμικού μοντέλου. Η ενέργεια αυτή θα βοηθήσει τον μελετητή να αποκομίσει συνολικά αποτελέσματα από το κυρίως πρόγραμμα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δρομέα, την υδροτομή του και το διάγραμμα λειτουργίας του, ταυτόχρονα με την μετέπειτα επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα MATLAB.
- 2. Η μετατροπή της παραγόμενης γεωμετρίας του δρομέα σε ψηφιακό σχέδιο CAD και η μελέτη της μηχανής σε λογισμικό CFD για την ακριβή εύρεση των χαρακτηριστικών της ροής. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η σύνδεση του θεωρητικού μοντέλου με τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του υδροστροβίλου. Η ανάλυση αυτή θα πρέπει να έχει στόχο την εύρεση των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας σε συνθήκες αντίστοιχες του μοντέλου

και την αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων με στόχο τον υπολογισμό συντελεστών αναγωγής από το θεωρητικό στο πραγματικό μοντέλο. Αυτοί οι συντελεστές μπορούν να ενσωματωθούν στο κύριο πρόγραμμα του μοντέλου με στόχο να αποτελέσουν ένα ολοκληρωμένο εργαλείο σχεδίασης υδροστροβίλου με πραγματική εφαρμογή και επαληθευμένα αποτελέσματα.

- 3. Η εύρεση της κατάλληλης γεωμετρίας του υδροστροβίλου με χρήση μεθόδου σχεδίασης με αριθμητική βελτιστοποίηση. Για παράδειγμα, οι γεννετικοί αλγόριθμοι είναι ένα σύγχρονο και αποτελεσματικό εργαλείο για την εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού γεωμετρικών παραμέτρων για την βέλτιστη σχεδίαση ενός υδροστροβίλου σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Η χρήση περισσότερων σχεδιαστικών παραμέτρων από αυτές που αναφέρθηκαν στην παρούσα εργασία είναι δυνατόν να οδηγήσουν στην εύρεση μιας γεωμετρίας με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, αυξάνοντας έτσι την απόδοση και το μακροπρόθεσμο ενεργειακό και οικονομικό όφελος από την λειτουργία της μηχανής.
- 4. Η επέκταση της μοντέλου μελέτης και παραμετρικής σχεδίασης του δρομέα υδροστροβίλου σε ένα ολοκληρωμένο εργαλείο του σγεδίασης υδροστροβίλων Bulb με υπολογισμό των συνολικών διαστάσεων της εγκατάστασης. Το επόμενο βήμα από την εύρεση της γεωμετρίας του δρομέα του υδροστροβίλου είναι η εύρεση των συνολικών διαστάσεων της εγκατάστασης, στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί ο σχεδιασμένος υδροστρόβιλος. Θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατασκευαστικές πρακτικές από την διεθνή βιβλιογραφία και την βιομηχανία για τον υπολογισμό των βασικών διαστάσεων όλων των τμημάτων της εγκατάστασης. Η επέκταση αυτή πρέπει να κινηθεί στα πλαίσια του υπολογισμού συντελεστών αναγωγής των διαστάσεων όλων των τμημάτων της εγκατάστασης συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας της στο Κανονικό Σημείο Λειτουργίας και των διαστάσεων του δρομέα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μελέτη και Χάραξη Φυγοκεντρικών και Αξονικών Αντλιών Δημήτριος Ε. Παπαντώνης - Αθήνα 2004
- [2] Μηχανική των Ρευστών Σωκράτης Τσαγγάρης Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2005 - ISBN: 960-7888-55-3
- [3] Hydraulic Turbines, Their Design and Equipment Miroslav Nechleba -Prague 1957
- [4] Aerothermodynamics of Gas Turbine and Rocket Propulsion, Third Edition - Gordon C. Oates - AIAA 1997 - ISBN: 1563472414
- [5] Mathematical Methods of Airfoil Design A. M. Elizarov, N. B. Il'iskiy, A. V. Potashev First Edition, Berlin Akademie Verlag 1997 ISBN: 3-05-501701-3
- [6] The Design of High-Efficiency Turbomachinery and Gas Turbines David Gordon Wilson - Cambridge MA, MIT Press - 1984
- [7] Turbo-Machines Hydrauliques et Thermiques, Tome II, Pompes Centrifuges et Axiales, Turbines Hydrauliques - Marcel Sedille - Masson et Cie Editeurs, 1967 - ISBN: TJ 267.S42 1967 v.2
- [8] Περιληπτικές Σημειώσεις του μαθήματος Θερμικών Στροβιλομηχανών ΙΙ Κ. Δ. Παπαηλίου Αθήνα, 1985
- [9] Υδροδυναμικές Μηχανές, Αντλίες-Υδροστρόβιλοι-Υδροδυναμικές Μεταδόσεις - Δημήτριος Ε. Παπαντώνης - Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2009 -ISBN: 978-960-9400-13-8
- [10] Theory of Wing Sections, Including a Summary of Airfoil Data Ira H. Abbott, Albert E. von Doenhoff - Dover Publications, 1959 - ISBN: 0486605868

- [11] Hydraulic Design of Hydraulic Machinery H.C. Radha Krishna Avebury, 1997 ISBN: 0291398510
- [12] Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery S.L Dixon and C.A Hall - Butterworth-Heinemann (7th edition), 2013 - ISBN: 0124159540
- [13] National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 3916 L. Joseph Herrig, James C. Emery, John R. Erwin - NACA, Washington, February 1957
- [14] National Advisory Committee for Aeronautics, Report 460 Eastman N. Jacobs, Kenneth E. Ward, Robert M. Pinkerton - NACA, Washighton, January 1938
- [15] Final Thesis, Design of the Runner of a Kaplan Turbine for small Hydroelectric Power Plants - Timo Flaspöhler - Tampere University of Applied Sciences, 2007
- [16] Renewables 2014, Global Status Report Renewable Energy Policy Network of the 21st Century - REN21, 2014 - ISBN: 978-3-9815934-2-6
- [17] Viktor Kaplan and the Adjustable-Blade Propeller Turbine Hydro Review, Volume 8, No. 6 - December 1989
- [18] Swansea Bay Tidal Lagoon Annual Energy Estimation Sean Petley, George Aggidis – Ocean Engineering 111 – 2016