



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου • ΤΗΛ.: 7723572, FAX: 7723571

Αρ.Πρωτ.: 9967

Αθήνα, 14-12-2015

Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του **Παναγιωτόπουλου Αλεξάνδρου**, Διπλωματούχου Μηχανολόγος Μηχανικός του ΕΜΠ, που θα πραγματοποιηθεί τη Δευτέρα 11 Ιανουαρίου 2015, ώρα 10:00π.μ. στην Αίθουσα Τηλεκπαίδευσης του κτιρίου της Κεντρικής Βιβλιοθήκης του ΕΜΠ Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Το Θέμα της Διδακτορικής Διατριβής είναι:

«Αριθμητική μεθοδολογία προσομοίωσης της ροής και εναλλαγής ενέργειας σε υδροστροβίλους δράσης με πειραματική διερεύνηση και πιστοποίηση»

Επισυνάπτεται περίληψη της παραπάνω Διδακτορικής Διατριβής

Ο ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ



Η. ΤΑΤΣΙΟΠΟΥΛΟΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

Αριθμητική μεθοδολογία προσομοίωσης της ροής και εναλλαγής ενέργειας σε υδροστροβίλους δράσης, με πειραματική διερεύνηση και πιστοποίηση

Υ.Δ. Παναγιωτόπουλος Αλέξανδρος

Αθήνα, 2015

Το αυξανόμενο διεθνές ενδιαφέρον για ενίσχυση της συμμετοχής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην παραγωγή ενέργειας, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής από υδροηλεκτρικούς σταθμούς και σταθμούς αποθήκευσης ενέργειας μέσω άντλησης. Η ανάπτυξη του τομέα αυτού οδηγεί στην αύξηση της ανταγωνιστικότητας μεταξύ των κατασκευαστών, και η ανάγκη βελτίωσης της σχέσης κόστους-ενεργειακής απόδοσης των υδροστροβίλων γίνεται όλο και πιο επιτακτική. Ταυτόχρονα, η βελτίωση των υπολογιστικών συστημάτων και των μεθόδων μοντελοποίησης της ροής επέτρεψαν την λεπτομερή αριθμητική ανάλυση και διερεύνηση της ροής στους υδροστροβίλους. Οι αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να παρέχουν γρήγορη και οικονομική πρόβλεψη της διαμόρφωσης της ροής, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση του σχεδιασμού και του βαθμού απόδοσης των μηχανών αυτών, σε αντίθεση με τις πειραματικές διαδικασίες, που έχουν μεγάλο κόστος τόσο από οικονομικής όσο και από χρονικής άποψης.

Στόχος της Διατριβής είναι η ανάπτυξη μεθόδων και εργαλείων για τη μελέτη της ροής και της λειτουργίας υδροστροβίλου δράσης τύπου Pelton και η διερεύνηση των δυνατοτήτων περαιτέρω βελτίωσης της ενεργειακής του απόδοσης. Το κυριότερο αντικείμενο μελέτης αποτελεί η περίπτωση του στρεφόμενου δρομέα, που είναι το πιο περίπλοκο σχεδιαστικά μέρος του υδροστροβίλου και στο οποίο σημειώνονται οι μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας. Η μελέτη του δρομέα Pelton έγινε αρχικά με αριθμητικές μεθόδους, καταλήγοντας σε συμπεράσματα τα οποία στη συνέχεια διερευνήθηκαν και επαληθεύτηκαν πειραματικά στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Υδροδυναμικών Μηχανών (ΕΥΜ) του ΕΜΠ. Επιπρόσθετα, σε μικρότερη έκταση και μόνο αριθμητικά, μοντελοποιήθηκε και διερευνήθηκε ο σχεδιασμός του εγχυτήρα του υδροστροβίλου Pelton.

Η ροή στον δρομέα του υδροστροβίλου αρχικά διερευνήθηκε αριθμητικά με την Eulerian πλεγματική μέθοδο Volume of Fluent (VOF), χρησιμοποιώντας το εμπορικό λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Ansys-Fluent. Η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν μελετήθηκαν εκτενώς με στόχο τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους. Επίσης, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μίας γεωμετρίας αναφοράς συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα μιας εναλλακτικής Eulerian πλεγματικής μεθόδου, της Homogeneous, δείχνοντας πολύ καλή συμφωνία και ενισχύοντας την αξιοπιστία τους. Όπως προέκυψε, η επίλυση της πολύπλοκης μη-μόνιμης, διφασικής ροής με ελεύθερη επιφάνεια που διαμορφώνεται στο εσωτερικό του δρομέα μπορεί να επιτευχθεί με ικανοποιητική ακρίβεια. Όμως, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται είναι μεγάλος και

απαγορευτικός για τη διενέργεια πλήρους πολυπαραμετρικής διαδικασίας βελτιστοποίησης, κατά την οποία απαιτείται πολύ μεγάλος αριθμός επιλύσεων.

Η δραστική μείωση του υπολογιστικού χρόνου προσομοίωσης της ροής επιτεύχθηκε με την εφαρμογή και βελτίωση της καινοτόμου αριθμητικής μεθόδου, Fast Lagrangian Simulation (FLS), η οποία βασίζεται στην παρακολούθηση των τροχιών αντιπροσωπευτικών σωματιδίων ρευστού, χωρίς να απαιτείται η επίλυση των πλήρων εξισώσεων Navier-Stokes (N-S). Το μοντέλο αυτό έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο του ΕΥΜ, αποτελεί μη-πλεγματική Lagrangian μέθοδο και στο πλαίσιο της παρούσας Διατριβής αναπτύχθηκε περαιτέρω, με σκοπό την αύξηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Η διερεύνηση της μεθόδου βασίστηκε κυρίως στη σύγκριση με άλλες ακριβέστερες αριθμητικές μεθόδους και οδήγησε σε μια σειρά τροποποιήσεις, που βελτίωσαν σημαντικά την ακρίβειά της, αναφορικά με την πρόληξη του υδραυλικού βαθμού απόδοσης του δρομέα.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε μια διαδικασία αριθμητικής βελτιστοποίησης της γεωμετρίας ενός δρομέα υδροστροβίλου Pelton, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά εργαλεία που προαναφέρθηκαν, με στόχο τη μεγιστοποίηση του υδραυλικού βαθμού απόδοσης. Η γεωμετρία αναφοράς του δρομέα που χρησιμοποιήθηκε προέκυψε από την διαθέσιμη βιβλιογραφία και συνεπώς διέφερε σημαντικά από τη βέλτιστη. Έτσι, σε πρώτο στάδιο χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο FLS και εφαρμόστηκε πολυπαραμετρική βελτιστοποίηση της γεωμετρίας με τη βοήθεια του γενικού λογισμικού βελτιστοποίησης EASY, που έχει αναπτυχθεί από τη μονάδα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και βελτιστοποίησης του εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ. Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής απαιτείται η επίλυση της ροής σε χιλιάδες διαφορετικές γεωμετρίες δρομέων, που επιτυγχάνεται χάρη στην ταχύτητα της μεθόδου FLS, η οποία επιλύει τη ροή σε λίγα μόνο δευτερόλεπτα σε έναν σύγχρονο προσωπικό υπολογιστή. Σε δεύτερο στάδιο χρησιμοποιήθηκε η ακριβέστερη μέθοδος VOF, με αρχική γεωμετρία αναφοράς αυτή που προέκυψε από τη βελτιστοποίηση με τη μέθοδο FLS. Η γεωμετρία του δρομέα παραμετροποιήθηκε κατάλληλα και βελτιστοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μέθοδο σχεδιασμού αριθμητικών πειραμάτων, ενώ μελετήθηκε ξεχωριστά και η επίδραση κάθε γεωμετρικής παραμέτρου στον βαθμό απόδοσης του δρομέα.

Ο δρομέας βελτιωμένου σχεδιασμού που προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία κατασκευάστηκε και τοποθετήθηκε σε πειραματική εγκατάσταση του ΕΥΜ. Με στόχο την ακριβέστερη και πιο αξιόπιστη μέτρηση του βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου έγινε αναβάθμιση της εργαστηριακής εγκατάστασης και τα μετρητικά όργανα βαθμονομήθηκαν σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα. Αρχικά, μετρήθηκε ο ολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου σε όλο το εύρος λειτουργίας ενός παλαιού δρομέα του οποίου η γεωμετρία ήταν όμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά στην αριθμητική βελτιστοποίηση. Στη συνέχεια, οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν για την περίπτωση του νέου δρομέα, τα αποτελέσματα του οποίου έδειξαν μια πολύ σημαντική αύξηση του βαθμού απόδοσης, της τάξης του 6%, σε συμφωνία με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Επίσης, σε πειραματικό επίπεδο διερευνήθηκαν διάφορες τροποποιήσεις της εσωτερικής γεωμετρίας του κελύφους του υδροστροβίλου, με στόχο τη μείωση των απωλειών που οφείλονται στην ανακυκλοφορία της ανακλώμενης ροής στα τοιχώματα, μετά την έξοδο από τον δρομέα.

Τέλος, διερευνήθηκε η περίπτωση του εγχυτήρα του υδροστροβίλου Pelton, ο σχεδιασμός και κατασκευή του οποίου είναι παρόμοια και σε υδροστροβίλους δράσης τύπου Turgo. Η μελέτη της ροής έγινε με την Eulerian πλεγματική μέθοδο VOF, μοντελοποιώντας κατ' αρχάς το τελευταίο τμήμα του εγχυτήρα, όπου παρατηρείται σχεδόν το σύνολο των

υδραυλικών απωλειών. Η γεωμετρία του τμήματος αυτού παραμετροποιήθηκε και βελτιστοποιήθηκε για διάφορες συνθήκες λειτουργίας, χρησιμοποιώντας μέθοδο σχεδιασμού αριθμητικών πειραμάτων. Όπως προέκυψε, ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται έντονα από το σημείο λειτουργίας και μπορεί με κατάλληλο σχεδιασμό να περιοριστεί από 2% για πολύ μικρές παροχές ως 0.5% για πλήρες άνοιγμα. Στη συνέχεια, διερευνήθηκε η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού προσαγωγής ανάντη του εγχυτήρα, και πιο συγκεκριμένα, της τελικής γωνίας στροφής του και των πτερυγίων στήριξης της βελόνης του στομίου. Όπως προέκυψε, με κατάλληλο σχεδιασμό του εγχυτήρα, ο σχηματισμός των δευτερευουσών ροών δεν αυξάνει ιδιαίτερα τις απώλειες του εγχυτήρα.

Μέρος της παρούσας Διατριβής (περίπου ένα έτος) εκπονήθηκε στο Πανεπιστήμιο του Lancaster, στο πλαίσιο του προγράμματος Erasmus και της ερευνητικής συνεργασίας που έχει το ΕΥΜ του ΕΜΠ με το Renewable Energy Group στο Engineering Department.