

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ WELLS**

Κρίκας Αχιλλέας Α.Ε.Μ.: 1286

Επιβλέπων: Καθηγητής Τουρλιδάκης Αντώνιος

Κοζάνη, Μάρτιος 2016

I. Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο 'Υπολογιστική και Πειραματική Μελέτη στροβίλου Wells' εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016, από τον Κρίκα Αχιλλέα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινά τον υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, Βαφειάδη Κυριάκο, για την πολύτιμη βοήθεια, υποστήριξη και υπομονή του σε κάθε δυσκολία που παρουσιάστηκε κατά την πειραματική και υπολογιστική διαδικασία τους μήνες αυτούς. Επιπλέον, ευχαριστώ τον καθηγητή Γιαγκόπουλο Δημήτριο για τις συμβουλές του κατά τον σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης και για τη βοήθεια του κατά τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου, για την αμέριστη και ανιδιοτελή συμπαράσταση τους. Ειδικές ευχαριστίες στο φίλο Κελίδη Παναγιώτη που με βοήθησε στην καταγραφή των δεδομένων κατά τον πειραματικό έλεγχο. Επίσης, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για τη συνεχή υποστήριξη της όλα αυτά τα χρόνια.

Κλείνοντας, ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή Τουρλιδάκη Αντώνιο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για την καθοδήγηση και τις καθόλα εύστοχες συμβουλές του, από την αρχή μέχρι το πέρας της εν λόγω μελέτης. Χάρη στις γνώσεις του κατάφερα να γνωρίσω βαθύτερα το κομμάτι των στροβιλομηχανών, να επιλύσω διάφορα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την πορεία και τελικά, να προχωρήσω στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Κρίκας Αχιλλέας

II. Περίληψη

Από τις υψηλότερου δυναμικού ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι σαφώς η κυματική ενέργεια. Μια από τις πιο υποσχόμενες συσκευές για την αξιοποίηση της είναι βασισμένη στην αρχή της ταλαντευόμενης στήλης ύδατος (Oscillating Water Column, OWC). Αποτελεσματική μετατροπή της έχει επιτευχθεί με τη χρήση αεροστροβίλων οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να δέχονται τη ροή του αέρα είτε από ανάντη είτε από κατόντη του ρότορα (self-rectifying). Στη βιβλιογραφία εμφανίζονται διάφοροι τέτοιοι τύποι αεροστροβίλων, με τον self-rectifying στρόβιλο Wells να θεωρείται ο πιο κατάλληλος.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον υπολογιστικό αλλά και τον πειραματικό έλεγχο της συμπεριφοράς του στρόβιλου Wells, τόσο για μόνιμες όσο και για μη μόνιμες συνθήκες ροής. Ο υπολογιστικός έλεγχος πραγματοποιείται για δύο διαφορετικές γεωμετρίες ενώ, η μία απ' αυτές τις γεωμετρίες ελέγχεται πειραματικά. Οι εν λόγω γεωμετρίες αποτελούν την πιο απλή εκδοχή του στρόβιλου Wells. Κάθε ρότορας έχει τέσσερα πτερύγια, τα οποία είναι δομημένα με την αεροτομή NACA 0021.

Όσον αφορά την υπολογιστική μοντελοποίηση του στρόβιλου κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής, η ανάλυση πραγματοποιείται με τον παραμετρικό έλεγχο αυτού για περιστροφικές ταχύτητες στρόβιλου ισοδύναμες με 2000, 3000 και 4000 rpm, μελετώντας τα χαρακτηριστικά του για οχτώ διαφορετικές ταχύτητες εισαγωγής του αέρα σε κάθε περίπτωση. Με αντίστοιχο τρόπο γίνεται και ο αρχικός πειραματικός έλεγχος του στρόβιλου, κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής, με τη δοκιμή του σε αεροσήραγγα. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τον έλεγχο της μιας γεωμετρίας, για περιστροφική ταχύτητα στρόβιλου ισοδύναμη με 4500 rpm, με τα υπολογιστικά και τα πειραματικά αποτελέσματα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, προκειμένου να γίνει μια αξιολόγηση και των υπόλοιπων αποτελεσμάτων που εξάγονται στην παρούσα εργασία. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα εν τέλει χαρακτηρίζονται από μια σχετική αξιοπιστία, με το στρόβιλο Wells να παρουσιάζει μέγιστη παραγόμενη ισχύ περίπου ίση με 225 W και μέγιστο βαθμό απόδοσης περίπου ίσο με 51% ενώ, τα πειραματικά αποτελέσματα κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής έδειξαν πως, η λειτουργία του στρόβιλου είναι πολύ αποδοτική, με τη μέγιστη απόδοση αυτού να ισούται περίπου με 70%, απόδοση ισάξια αυτών που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία.

Ο υπολογιστικός έλεγχος της συμπεριφοράς του στρόβιλου Wells κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής αφορά την εξαγωγή των χαρακτηριστικών εκκίνησης του για διάφορες ταχύτητες εισαγωγής του αέρα καθώς και των χαρακτηριστικών του κάτω από την ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισαγωγής, για οχτώ διαφορετικές συχνότητες ταλάντωσης, μικρότερες από 1 Hz. Με αντίστοιχο τρόπο γίνεται και ο πειραματικός

έλεγχος της συμπεριφοράς του στροβίλου κάτω από την ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισαγωγής, σχεδιάζοντας και κατασκευάζοντας ένα σύστημα που προσομοιώνει την επιθυμητή παλινδρομική κίνηση του αέρα. Οι εν λόγω υπολογιστικοί και πειραματικοί έλεγχοι απέδειξαν την ικανότητα του στροβίλου Wells να παράγει μια χρονικά μέση θετική ροπή κάτω από συνθήκες αντιστρεπτής ροής του αέρα.

Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού ANSYS CFX μοντελοποιώντας την τύρβη με το μοντέλο low-Re $k-\omega$ SST. Η σχεδίαση των γεωμετριών για την υπολογιστική μοντελοποίηση του στροβίλου αλλά και για την ανάπτυξη της πρότυπης συσκευής με σκοπό την πειραματική διερεύνηση, έγινε με τη χρήση του λογισμικού Solidworks. Κατά την εξέλιξη της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε και το λογισμικό Matlab.

III Σκοπός και δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό τον υπολογιστικό αλλά και τον πειραματικό έλεγχο της συμπεριφοράς του στροβίλου Wells, τόσο για μόνιμες όσο και για μη μόνιμες συνθήκες ροής, καθώς και τη σύγκριση μεταξύ των υπολογιστικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τους παραπάνω ελέγχους. Η υπολογιστική ανάλυση πραγματοποιείται για δύο διαφορετικές γεωμετρίες ενώ, η μία απ' αυτές τις γεωμετρίες ελέγχεται πειραματικά. Οι εν λόγω γεωμετρίες αποτελούν την πιο απλή εκδοχή του στροβίλου Wells, χωρίς οδηγητικά πτερύγια και με τα τέσσερα πτερύγια του κάθε στροβίλου, τα οποία είναι δομημένα με την αεροτομή NACA 0021, να είναι τοποθετημένα κάθετα στον ρότορα, χωρίς να έχει οριστεί κάποια γωνία διάταξης και με την ακμή προσβολής και φυγής να έχουν την ίδια γωνία συστροφής.

Πρίν παρουσιαστεί η παραπάνω ανάλυση του στροβίλου Wells, γίνεται μια εισαγωγή στις τεχνολογίες OWC στο Κεφάλαιο 1, πραγματοποιώντας μια ιστορική αναδρομή στις διάφορες εξελίξεις. Στη συνέχεια του ίδιου κεφαλαίου, θα παρουσιαστεί το θεωρητικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τον στροβίλο Wells, αναπτύσσοντας τις διάφορες μαθηματικές σχέσεις για την πρόβλεψη της απόδοσης και των χαρακτηριστικών του. Αμέσως μετά, θα ακολουθήσει ο καθορισμός των παραμέτρων που επηρεάζουν την εν λόγω απόδοση και τη λειτουργία του. Στο τέλος του κεφαλαίου 1, γίνεται μια αναδρομή στη βιβλιογραφία, παρουσιάζοντας μερικές από τις μελέτες που έχουν γίνει αναφορικά με τον στροβίλο Wells.

Στην συνέχεια, στο Κεφάλαιο 2, γίνεται μια εισαγωγή στην υπολογιστική μοντελοποίηση με τη χρήση του λογισμικού ANSYS CFX, παρουσιάζοντας αρχικά τις βασικές εξισώσεις που διέπουν το πεδίο ροής. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν μερικά από τα μοντέλα τύρβης (μοντελοποίηση της τύρβης) τα οποία παρέχει το ANSYS CFX και τα οποία ήταν υποψήφια προς χρήση στη συγκεκριμένη εργασία. Σε επιλεγμένα μοντέλα τύρβης, παρουσιάζονται οι επιπλέον εξισώσεις που καθορίζονται απ' αυτά ενώ, σχολιάζεται και ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιούν τις περιοχές κοντά σε τοίχωμα. Ακολούθως, καθορίζεται το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε τελικά, σχολιάζοντας με επιχειρήματα την επιλογή αυτή μέσω της σύγκρισης μεταξύ των μοντέλων που παρουσιάστηκαν. Το εν λόγω μοντέλο τύρβης είναι το low-Re $k-\omega$ SST. Τέλος, κατά την πορεία της ανάλυσης αυτής στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται και κάποιοι διορθωτικοί παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν στις υπολογιστικές προσομοιώσεις ενώ, γίνεται αναφορά καθόλη τη διάρκεια στις επιλογές που έγιναν στην παρούσα εργασία.

Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται αρχικά, οι γεωμετρίες που ελέγχθηκαν στην παρούσα εργασία και ο τρόπος με τον οποίο επιλέχθηκαν, ο σχεδιασμός τους, ο οποίος αφορά

μόνο τις υπολογιστικές προσομοιώσεις και ο οποίος έγινε με τη χρήση του Solidworks, και η εισαγωγή τους στο περιβάλλον του ANSYS CFX. Τέλος, πραγματοποιείται η δημιουργία των υπολογιστικών πλεγμάτων και ο ορισμός του προβλήματος, εντός του λογισμικού ANSYS CFX. Στην παρούσα εργασία ελέγχθηκαν υπολογιστικά δύο γεωμετρίες, η μια αναπαράχθηκε από τη βιβλιογραφία, με σκοπό την επιπλέον αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και η άλλη αφορά τη γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε ώστε να μελετηθεί περαιτέρω με την εγκατάσταση μιας πειραματικής διάταξης. Τα κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ των δύο γεωμετριών είναι, η χρήση της αεροτομής NACA 0021 με μήκος χορδής 100 mm και η διάμετρος του ρότορα, 163 mm.

Στο κεφάλαιο 4, γίνεται η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων των υπολογιστικών προσομοιώσεων. Στην παρούσα εργασία ολοκληρώθηκαν αρκετές υπολογιστικές προσομοιώσεις οι οποίες αφορούν τη μελέτη του πεδίου ροής διαμέσου του στροβίλου Wells κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής. Οι εν λόγω υπολογιστικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν παραμετρικά, αλλάζοντας την περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου και ορίζοντας, για κάθε μία απ' αυτές τις τρεις ταχύτητες περιστροφής, οχτώ διαφορετικές ταχύτητες εισαγωγής. Οι περιστροφικές ταχύτητες που ελέγχτηκαν είναι ισοδύναμες με 2000 rpm, 3000 rpm και 4000 rpm. Οι προσομοιώσεις ολοκληρώθηκαν στο σύνολο τους και για τις δύο γεωμετρίες που επιλέχτηκαν. Στην παρούσα εργασία ωστόσο, θα παρουσιαστούν και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων πριν καταλήξουμε στο βέλτιστο πλέγμα που μπορούσε να γίνει κατά τη φάση αυτή. Αυτά τα αποτελέσματα αφορούν τη γεωμετρία που επιλέχτηκε από τη βιβλιογραφία, για την οποία στο κεφάλαιο 3 θα παρουσιαστούν δύο διαφορετικά πλέγματα με σκοπό την ανάδειξη της σημασίας της δημιουργίας του υπολογιστικού πλέγματος, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν με της βιβλιογραφίας. Η σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας ακολουθεί της παρουσίασης των αποτελεσμάτων των υπολογιστικών προσομοιώσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω ενώ, προκειμένου να γίνει εφικτή η εν λόγω σύγκριση, σημειώνεται πως έπρεπε να ολοκληρωθεί άλλο ένα πακέτο προσομοιώσεων για περιστροφική ταχύτητα στροβίλου ισοδύναμη με 4500 rpm. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται και οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη γεωμετρία του πειράματος, κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής. Από τη μία, οι εν λόγω προσομοιώσεις αφορούν την ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισαγωγής για διαφορετικές συχνότητες και πλάτη ταλάντωσης, προκειμένου να εξαχθεί η μέση τιμή της παραγόμενης ροπής. Λόγω του ότι ο χρόνος που απαιτούνταν ώστε να ολοκληρωθούν οι προσομοιώσεις αυτές, ήταν περίπου ίσος με πέντε ημέρες, έπρεπε να επιλεχτεί μια ταχύτητα περιστροφής για την πραγματοποίηση των εν λόγω προσομοιώσεων, λόγω της ανάγκης για εξοικονόμηση χρόνου. Η αυτή ταχύτητα περιστροφής είναι ισοδύναμη με

2000 rpm. Από την άλλη, μελετήθηκαν και τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου Wells, με την ολοκλήρωση προσομοιώσεων κάτω από συνθήκες μη μόνιμης ροής. Τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου, όπως θα γίνει αντιληπτό στο κεφάλαιο 5, είναι πολύ σημαντικά για την μετέπειτα εξήγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Η εργασία κλείνει με το Κεφάλαιο 5, όπου παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και οι μετρήσεις που εξάχθηκαν κατά τον πειραματικό έλεγχο ενώ, ακολουθούν τα ανάλογα συμπεράσματα για τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας και προτείνονται μελλοντικές επεμβάσεις για τους επόμενους μελετητές. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την πειραματική διάταξη, θα παρουσιαστεί ο βιομηχανικός σχεδιασμός που έγινε με τη χρήση του λογισμικού Solidworks, προκειμένου να γίνει εφικτή η υλοποίηση και η εγκατάσταση της. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιπλέον σκοπός ήταν να κατασκευαστεί μια πειραματική διάταξη η οποία θα παρέχει τη δυνατότητα μελέτης της συμπεριφοράς του στροβίλου Wells κάτω από μια σχεδόν ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισαγωγής, προσομοιώνοντας έτσι την παλινδρομική κίνηση του αέρα λόγω της κίνησης των κυμάτων της θάλασσας. Αφού παρουσιαστεί λοιπόν, ο εν λόγω σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης, θα ακολουθήσει η απεικόνιση των μετρήσεων που εξάχθηκαν και οι οποίες αφορούν τόσο τον έλεγχο του στροβίλου Wells κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής, με τη δοκιμή του σε αεροσήραγγα, όσο και τον έλεγχο του κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής με τον τρόπο που σχολιάστηκαν προηγουμένως. Σκοπός της εργασίας ήταν να συγκριθούν τα υπολογιστικά με τα πειραματικά αποτελέσματα, προκειμένου να βγούν συμπεράσματα για την αξιοπιστία και την ακρίβεια των υπολογιστικών προσομοιώσεων.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή	1
1.1 Τεχνολογίες OWC	2
1.1.1 Οι εξελίξεις μέχρι το 1990.....	2
1.1.2 Οι εξελίξεις από τις αρχές του 1990 και μετά.....	6
1.1.2.1 Συσκευές OWC σταθερής κατασκευής	6
1.1.2.2 Ενσωμάτωση συσκευών OWC σε κυματοθραύστες	8
1.1.2.3 Συσκευές OWC πλεούμενης κατασκευής.....	9
1.1.2.4 Πλεούμενες κατασκευές κυματικής ενέργειας με εσώκλειστη συσκευή OWC	11
1.1.2.5 Πολλαπλές συσκευές OWC	12
1.2 Αεροστρόβιλοι συσκευών OWC	13
1.3 Στρόβιλος Wells	16
1.3.1 Τρίγωνα ταχυτήτων στροβίλου Wells	17
1.3.2 Μέθοδοι πρόβλεψης	17
1.3.2.1 Αεροτομές σε σειρά cascade με γωνία διάταξης 90°	17
1.3.2.2 Θεωρία ακτινικής ισορροπίας	21
1.3.2.2.1 Ακτινική ισορροπία στην είσοδο του ρότορα	22
1.3.2.3 Θεωρητικοί υπολογισμοί για την απόδοση του στροβίλου Wells.....	22
1.3.2.4 Ακτινική ισορροπία στην έξοδο του ρότορα	24
1.3.2.5 Θεωρία δίσκου ενέργειας.....	25
1.3.3 Παράμετροι που επιδρούν στην απόδοση ενός μονοβάθμιου στροβίλου Wells.....	26
1.3.3.1 Στρερότητα ρότορα	27
1.3.3.2 Λόγος της διαμέτρου της βάσης προς τη διάμετρο της κορυφής του πτερυγίου	28
1.3.3.3 Λόγος του ύψους του πτερυγίου προς το μήκος χορδής.....	29
1.3.3.4 Μέγεθος διακένου-Tip clearance	29

1.3.3.5 Κατανομή πάχους πτερυγίου.....	29
1.3.3.6 Τοποθέτηση πτερυγίου στον ρότορα.....	29
1.3.3.7 Επίπεδα τύρβης στην είσοδο του ρότορα.....	30
1.3.3.8 Επίδραση της δύο κατευθύνσεων ροής αέρα.....	31
1.3.3.9 Κρίσιμος αριθμός Mach.....	31
1.3.3.10 Επιπτώσεις λόγω υπό κλίμακας σχεδιασμού του στροβίλου.....	32
1.3.3.11 Χαρακτηριστικά εκκίνησης στροβίλου Wells.....	33
1.4 Αναδρομή στη βιβλιογραφία.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
Υπολογιστική Μοντελοποίηση.....	37
2.1 Διέπουσες Εξισώσεις.....	37
2.1.1 Εξίσωση διατήρησης της μάζας.....	38
2.1.2 Εξίσωση Navier-Stokes.....	39
2.1.3 Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας.....	43
2.2 Μοντελοποίηση της τύρβης.....	44
2.2.1 Στατιστικά μοντέλα τύρβης.....	45
2.2.1.1 Εξισώσεις Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS).....	46
2.2.2 Μοντέλα τυρβώδεις ιξώδους (Eddy Viscosity Turbulence Models).....	48
2.2.2.1 Μοντέλα τύρβης μηδέν εξισώσεων.....	51
2.2.2.2 Μοντέλα τύρβης μίας εξίσωσης.....	51
2.2.2.3 Μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων.....	51
2.2.2.3.1 Μοντέλο τύρβης k-ε.....	52
2.2.2.3.1.1 Μοντέλο τύρβης RNG k-ε.....	52
2.2.2.3.2 Μοντέλο τύρβης k-ω.....	52
2.2.2.3.2.1 Μοντέλο k-ω BSL (Baseline).....	55
2.2.2.3.2.2 Μοντέλο μεταφοράς διαμηθικών τάσεων (SST).....	57
2.2.2.3.3.3 Συναρτήσεις ανάμιξης.....	58
2.2.2.3.3 Μοντελοποίηση της ροής κοντά στο τοίχωμα.....	59

2.2.2.3.3.1 Κλιμακούμενες εξισώσεις τοιχώματος.....	60
2.2.2.3.3.2 Αδιάστατη απόσταση από το τοίχωμα	62
2.2.2.3.3.3 Προσέγγιση αυτοματοποιημένης μεταχείρισης τοιχώματος.....	63
2.2.2.3.4 Επιλογή μοντέλου low-Re k- ω SST.....	65
2.2.2.3.5 Διορθωτικοί παράγοντες Production Limiters και Curvature Correction	69
2.2.2.3.5.1 Διορθωτικοί παράγοντας Production Limiters	69
2.2.2.3.5.2 Διορθωτικός παράγοντας Curvature Correction.....	70
2.2.2.4 Μοντέλα Reynolds Stresses	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Επιλογή, Σχεδιασμός και Εισαγωγή Γεωμετριών - Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος-Ορισμός του προβλήματος.....	73
3.1 Επιλογή γεωμετριών	74
3.2 Σχεδιασμός γεωμετριών με τη χρήση του λογισμικού Solidworks- Εισαγωγή γεωμετριών στο λογισμικό ANSYS CFX.....	79
3.3 Υπολογιστικό πλέγμα	83
3.3.1 Γεωμετρία A1	85
3.3.2 Γεωμετρία A2.....	90
3.3.3 Γεωμετρία B.....	99
3.4 Ορισμός προβλήματος	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
Παρουσίαση αποτελεσμάτων υπολογιστικών προσομοιώσεων	112
4.1 Αποτελέσματα για τη Γεωμετρία A2 κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής	119
4.1.1 Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισοδύναμη με 2000 rpm	119
4.1.2 Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισοδύναμη με 3000 rpm	135
4.1.3 Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισοδύναμη με 4000 rpm	146
4.2 Αποτελέσματα για τη Γεωμετρία B κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής	155
4.2.1 Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισοδύναμη με 2000 rpm	155
4.2.2 Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισοδύναμη με 3000 rpm	163

4.2.2 Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισοδύναμη με 4000 rpm	172
4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων γεωμετριών A1 και A2 με βιβλιογραφίας [5,7] κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής	180
4.4 Υπολογιστικές προσομοιώσεις για τη Γεωμετρία B κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής	181
4.4.1 Χαρακτηριστικά εκκίνησης στροβίλου.....	182
4.4.2 Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα	185
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
Ανάπτυξη πρότυπης συσκευής και πειραματική διερεύνηση.....	193
5.1 Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης.....	194
5.1.1 Σχεδιασμός κελύφους	194
5.1.2 Σχεδιασμός ρότορα και πτερυγίων	196
5.1.3 Σχεδιασμός αεροδυναμικών κώνων	203
5.1.4 Σχεδιασμός βάσεων στήριξης άξονα	207
5.1.5 Συναρμολόγηση βάσεων στήριξης και αεροδυναμικών κώνων	212
5.1.6 Σχεδιασμός διαχύτη	213
5.1.7 Σχεδιασμός για προσομοίωση κυμάτων.....	215
5.1.8 Εγκατάσταση πειραματικής διάταξης	225
5.2 Πειραματικές μετρήσεις με τη δοκιμή του στροβίλου σε αεροσήραγγα.....	228
Συμπεράσματα.....	239
Περαιτέρω εργασία και μελέτη.....	241
Βιβλιογραφία	243

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Το αυξανόμενο κόστος των ορυκτών καυσίμων και η ανησυχία που επικρατεί όσον αφορά την επίδραση τους στο περιβάλλον, στρέφει το ανθρώπινο και μηχανικό ενδιαφέρον προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα κύματα των θαλασσών είναι μια σημαντική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία εάν εκμεταλλευτεί κατάλληλα μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην προμήθευση με ηλεκτρική ενέργεια χωρών που περιβάλλονται από θάλασσα. Πληθώρα τεχνολογιών έχουν ήδη προταθεί, μελετηθεί και σε κάποιες περιπτώσεις δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες, προκειμένου να γίνει εφικτή η εκμετάλλευση της. Η μηχανική διαδικασία απορρόφησης της κυματικής ενέργειας απαιτεί μια διεπιφάνεια εν κινήσει, συμπεριλαμβάνοντας (α) ένα τμηματικά ή ολικά βυθισμένο κινούμενο σώμα και/ή (β) μια κινούμενη διεπιφάνεια αέρα-νερού που υπόκεινται σε μια χρονικά μεταβαλλόμενη πίεση. Όσον αφορά την τελευταία περίπτωση, υπάρχει μια σταθερή ή ταλαντούμενη κατασκευή ανοιχτά της θάλασσας και κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της, η οποία παγιδεύει τον αέρα στο εσωτερικό της κατασκευής και πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Η περιοδική κίνηση του κύματος συμπιέζει και αποσυμπιέζει τον παγιδευμένο αέρα, ο οποίος οδηγείται με ορμή να περάσει μέσω ενός στροβίλου, ο οποίος με τη σειρά του είναι συνδεδεμένος με μια γεννήτρια. Μια τέτοια συσκευή ονομάζεται OWC (Oscillating Water Column-Ταλαντούμενη στήλη ύδατος). Παρόλο που η ιδέα αυτής της συσκευής είναι γνωστή ήδη από το 1940, αυτή η περιγραφή φαίνεται να εμφανίστηκε για πρώτη φορά σε δημοσιευμένη μελέτη το 1978 και από τότε έχει γίνει εκτεταμένη χρήση της, ακόμα κι αν το κινούμενο κύμα εντός της κατασκευής είναι σχηματικά μακριά απ' αυτό της στήλης. Πριν απ' αυτή την ονομασία, αυτός ο τύπος μετατροπής της κυματικής ενέργειας (WEC-Wave Energy Converter) ήταν γνωστός ως συσκευή Masuda. Το κύριο πλεονέκτημα των συσκευών OWC έναντι των περισσότερων άλλων συσκευών WEC είναι η απλότητα λειτουργίας τους καθώς, το μόνο κινούμενο μέρος του συνολικού μηχανισμού μετατροπής της κυματικής ενέργειας είναι ο ρότορας του στροβίλου, ο οποίος είναι τοποθετημένος πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, περιστρέφεται με μια σχετικά υψηλή ταχύτητα και είναι άμεσα συνδεδεμένος με μια συμβατική ηλεκτρική γεννήτρια. Τα συστήματα OWC είναι οι κυρίαρχοι μετατροπείς της κυματικής ενέργειας. Είναι η κατηγορία η οποία πιθανόν έχει μελετηθεί περισσότερο και η οποία έχει τον μεγαλύτερο αριθμό από πρωτότυπα τα οποία έχουν αναπτυχθεί σε πραγματικές συνθήκες.

Σχεδόν σ' όλες τις συσκευές OWC, η ροή του αέρα αλλάζει κατεύθυνση από το θάλαμο όπου βρίσκεται ο παγιδευμένος αέρας προς την ατμόσφαιρα και αντίστροφα, αν και σε

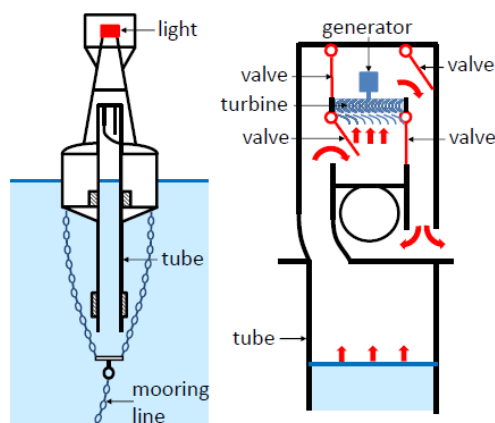
μερικές η ροή του αέρα εκτελεί κλειστή διαδρομή. Εάν δεν γίνεται χρήση διορθωτικών βαλβίδων της ροής του αέρα, οι οποίες είναι ευρέως αποδεκτό πως είναι μη πρακτικές, εκτός από συσκευές μικρής κλίμακας όπως τα navigation buoys, οι στρόβιλοι είναι γνωστοί ως self-rectifying δηλαδή, είναι στρόβιλοι των οποίων η φορά περιστροφής παραμένει η ίδια ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της ροής του αέρα. Αρκετοί τύποι τέτοιων στρόβιλων έχουν αναπτυχθεί. Ο αξονικής ροής στρόβιλος Wells, ο οποίος εφευρέθηκε περίπου στα μέσα του 1970, είναι από τους πιο γνωστούς στρόβιλους με το παραπάνω χαρακτηριστικό. Ωστόσο, άλλοι τύποι στρόβιλων, γνωστοί ως στρόβιλοι δράσης, οι οποίοι επίσης δεν έχουν την ανάγκη διορθωτικών βαλβίδων, έχουν μελετηθεί και χρησιμοποιηθεί.

Στην παρούσα ενότητα, της εισαγωγής, θα σχολιαστούν αρχικά οι μετατροπείς της κυματικής ενέργειας OWC και οι έρευνες που έχουν γίνει σχετικά μ' αυτούς ενώ, στη συνέχεια θα γίνει η αναλυτική παρουσίαση του στρόβιλου Wells, με θέματα που αφορούν τα γενικά χαρακτηριστικά του και τις συγκεκριμένες παραμέτρους που επηρεάζουν την λειτουργία του. Στο τέλος της ενότητας θα γίνει μια αναφορά σε μελέτες που έχουν γίνει μέχρι στιγμής, αναφορικά με τον έλεγχο της συμπεριφοράς του στρόβιλου Wells.

1.1 Τεχνολογίες OWC

1.1.1 Οι εξελίξεις μέχρι το 1990

Ο Yoshio Masuda (1925-2009), ένας Ιάπωνας αξιωματικός του πολεμικού ναυτικού, θεωρείται ο πατέρας της σύγχρονης τεχνολογίας που σχετίζεται με την κυματική ενέργεια, πραγματοποιώντας μελέτες στην Ιαπωνία από το δεύτερο μισό της δεκαετίας του 40. Ανέπτυξε ένα navigation buoy το οποίο παρήγαγε ενέργεια με έναν αεροστρόβιλο, εκμεταλλευόμενο την κυματική ενέργεια και το οποίο ήταν στην πραγματικότητα αυτό που έδωσε το όνομα του στις μετέπειτα επιπλέουσες συσκευές OWC. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.1) απεικονίζεται η διάταξη του Masuda.



Σχήμα 1.1: Διάταξη Masuda-Navigation buoy

Τετοιου τύπου buoys εμπορευματοποιήθηκαν σε μεγάλες ποσότητες στην Ιαπωνία από το 1965 (και αργότερα στις ΗΠΑ) και ήταν οι πρώτες συσκευές που επιτυχημένα αξιοποιούσαν την κυματική ενέργεια. Τα navigation buoys του Masuda εξοπλίστηκαν με ένα συμβατικό, μιας κατεύθυνσης περιστροφής, αεροστρόβιλο, ο οποίος απαιτούσε ένα σύστημα διορθωτικών βαλβίδων. Οι λεπτομέρειες που αφορούν τη ροή του αέρα διαμέσου του στροβίλου και των σιορθωτικών βαλβίδων φαίνονται επίσης στο Σχήμα 1.1, στα δεξιά.

Η πρώτη μεγάλης κλίμακας WEC που αναπτύχθηκε στη θάλασσα, ήταν το Kaimei, μια ακόμη δημιουργία του Yoshio Masuda, η οποία κατασκευάστηκε για το Κέντρο τεχνολογίας και επιστήμης της Ιαπωνικής ναυσιπλοΐας (Japan Marine Science and Technology Centre (JAMSTEC)). Το Kaimei ήταν ένα μεγάλο φορτηγό πλοίο (80m x 12m, 820 ton) το οποίο είχε δεκατρείς OWC θαλάμους στον ανοιχτό πυθμένα του πλοίου, με τον καθένα να έχει μια επιφάνεια, που καλύπτεται από νερό, 42-50 m² (Σχήμα 1.2).

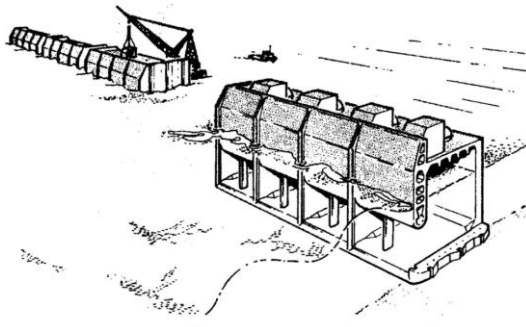


Σχήμα 1.2: Kaimei

Αναπτύχθηκε στα ανοιχτά των δυτικών ακτών της Ιαπωνίας το 1978-80 και ξανά το 1985-86. Οχτώ διαφορετικοί αεροστρόβιλοι δοκιμάστηκαν στο διάστημα 1978-80, με ποικίλες διατάξεις διορθωτικών βαλβίδων. Το 1985-86 δοκιμάστηκαν τρεις μονής κατεύθυνσης περιστροφής αεροστρόβιλοι μαζί με δύο άλλους στροβίλους που δεν είχαν την ανάγκη για διορθωτικές βαλβίδες.

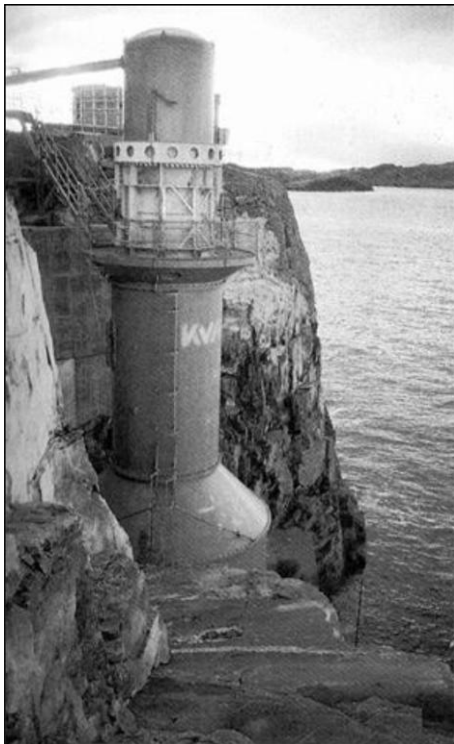
Στην Ευρώπη, οι μελέτες για την ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας συσκευών WEC ξεκίνησαν περίπου το 1973, σχεδόν κοντά με την πετρελαϊκή κρίση. Ένα φιλόδοξο πρόγραμμα της κυβέρνησης ξεκίνησε στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1975, με σκοπό τη δημιουργία δύο μεγάλων εγκαταστάσεων κυματικής ενέργειας, 2 GW. Επιχορηγήθηκαν μελέτες που αφορούσαν αρκετούς τύπους συσκευών WEC, συμπεριλαμβανομένου και των συσκευών OWC. Το National Engineering Laboratory (NEL) στη Σκωτία, μελέτησε διάφορες ιδέες για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων OWC. Αυτές οι μελέτες κατέληξαν σε ένα σχέδιο που αποτελούταν από έναν αριθμό σταθερών στο έδαφος κατασκευών, κάθε μία εκ των οποίων φιλοξενούσε μια σειρά από συσκευές OWC (Σχήμα 1.3) (μέχρι τότε ο στρόβιλος Wells, ο οποίος δεν είχε την απαίτηση για διορθωτικές βαλβίδες, είχε εφευρεθεί). Το Βρετανικό

πρόγραμμα διακόπηκε αιφνίδια το 1982, με αποτέλεσμα το προτότυπο να μην μπορέσει να κατασκευαστεί σε πλήρη κλίμακα.



Σχήμα 1.3: Τα σχέδια του NEL για κυματοθραύστη με ενσωματωμένες συσκευές OWC

Το λιγότερο φιλόδοξο Νορβηγικό πρόγραμμα είχε ως αποτέλεσμα την εγκατάσταση μιας μεγάλης κλίμακας συσκευής OWC ενσωματωμένης σ' έναν βράχο στο Toftestallen, κοντά στο Bergen, το 1985 (Σχήμα 1.4). Η εγκατάσταση εξοπλίστηκε με κατακόρυφου άξονα στροβίλους Wells και είχε ονομαστική ισχύ 500 kW. Τίποτα δεν δημοσιεύτηκε σχετικά με την απόδοση της εγκατάστασης αλλά ήταν ανεπίσημα γνωστό πως ήταν αρκετά χαμηλότερη απ' αυτήν που περίμεναν. Η κατασκευή καταστράφηκε το 1988 κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας, εξαιτίας της αποτυχημένης σύνδεσης της ασαλένιας κατασκευής με τη βάση από σκυρόδεμα. Στα ακόλουθα χρόνια, μέχρι το 1990, η δραστηριότητα της Ευρώπης περιορίστηκε μόνο σε ακαδημαϊκό επίπεδο, με την μεγαλύτερη επιτυχία να είναι μιας μικρής ισχύος (75 kW) προτότυπης συσκευής OWC, εξοπλισμένης με έναν στρόβιλο Wells, στο Islay της Σκωτίας (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.4: Συσκευή OWC στο Toftestallen



Σχήμα 1.5: Συσκευή OWC στο Islay

Πρίν απ' αυτό, το 1983, εγκαταστάθηκε στη θάλασσα της Ιαπωνίας μια συσκευή OWC τοποθετημένη στην ακτή, με επιφάνεια θαλάμου 45 m^2 , εξοπλισμένη με μια τουρμπίνα Wells ισχύος 40 kW, η οποία είχε δοκιμαστεί στο Kaimeι. Ακολούθησε η Ασία, περίπου το 1990, με την εγκατάσταση δύο μεγαλύτερων προτότυπων συσκευών OWC: ένας μετατροπέας ισχύος 60 kW ενσωματώθηκε μέσα σ' έναν κυματοθραύστη στο λιμάνι της Sakata (Σχήμα 1.6), της Ιαπωνίας και μια στηριζόμενη στο έδαφος εγκατάσταση ισχύος 125 kW στο Trivandrum, της Ινδίας (Σχήμα 1.7). Και οι δύο εγκαταστάσεις εξοπλήστηκαν με τον στρόβιλο Wells.



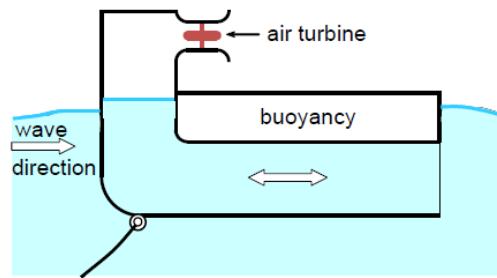
Σχήμα 1.6: Συσσκευή OWC στο λιμάνι της Sakata



Σχήμα 1.7: Συσσκευή OWC στο Trivandrum

Αργότερα, η εγκατάσταση της Ινδίας χρησιμοποιήθηκε για την δοκιμή διαφορετικών τύπων αεροστροβίλων, συμπεριλαμβανομένου και στροβίλων δράσης. Η συσκευή OWC στην Sakata ήταν η πρώτη, μάλιστα για πολλά χρόνια, περίπτωση ενσωμάτωσης ενός μετατροπέα σε έναν κυματοθραύστη. Αυτή η ιδέα επίσης, υιοθετήθηκε πρόσφατα στην Ισπανία και στην Ιταλία.

Οι δοκιμές στο Kaimeι έδειξαν ότι, παρόλο που η απόδοση της τουρμπίνας δεν απήχε πολύ απ' αυτή που αναμενόταν, η υδροδυναμική απόδοση απορρόφησης της κυματικής ενέργειας ήταν αρκετά απογοητευτική. Ο Yoshio Masuda και η ομάδα του επινόησαν άλλες ιδέες για επιπλέουσες συσκευές OWC. Το βασικό αποτέλεσμα των ιδεών αυτών ήταν το Backward Bent Duct Buoy (BBDB). Το BBDB είναι μια επιπλέουσα συσκευή με σχήμα "L". Εφόσον δεν υπάρχει κάθετος κεντρικός αγωγός, ο μετατροπέας δεν χρειάζεται βαθύ νερό για την λειτουργία του. Οι συσκευές όπου το βυθισμένο άνοιγμα του αγωγού (κάθετος αγωγός) αντιμετωπίζει το προσπίπτον κύμα ήταν οι πρώτες μελετημένες συσκευές. Καμιά μελέτη, μέχρι τότε, δεν είχε γίνει για την δοκιμή ενός αγωγού που θα δέχεται το προσπίπτον κύμα απευθείας μέσα σ' αυτόν. Έπειτα, με αρκετή έκπληξη, βρέθηκε ότι μπορούσε να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση με την τοποθέτηση του αγωγού ώστε η πίσω πλευρά του να δέχεται τα προσπίπτοντα κύματα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.8. Δοκιμές σε εργαστήριο με ένα τέτοιο μοντέλο μήκους 2.41 m, πραγματοποιήθηκαν στην Ιαπωνία το 1986.

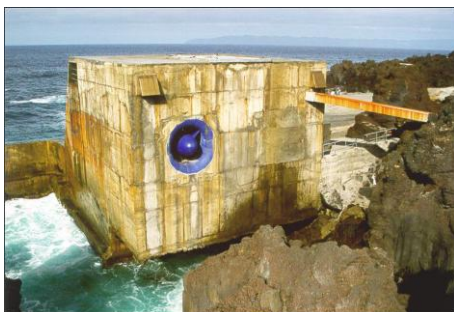


Σχήμα 1.8: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης BBDB

1.1.2 Οι εξελίξεις από τις αρχές του 1990 και μετά

1.1.2.1 Συσσκευές OWC σταθερής κατασκευής

Η κατάσταση στην Ευρώπη άλλαξε ριζικά μετά την απόφαση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής το 1991 να συμπεριλάβει την κυματική ενέργεια στο πρόγραμμα έρευνας και ανάπτυξης (R&D), σε ό,τι αφορά τις ανανεώσιμες ενέργειες. Αυτό αρχικά οδήγησε στην πραγματοποίηση βασικών μελετών ενώ στη συνέχεια, ακολούθησε ο σχεδιασμός και η κατασκευή δύο εγκαταστάσεων OWC μεγάλης κλίμακας και σταθερής δομής (γνωστές ως European pilot plants). Η μία είναι στο νησί Pico που ανήκει στην Πορτογαλία και συγκεκριμένα στο νησιώτικο σύμπλεγμα των Αζορών και η άλλη στο νησί Islay του Ηνωμένου Βασιλείου που συγκεκριμένα είναι το τέταρτο μεγαλύτερο νησί του νησιώτικου συμπλέγματος των Εβρίδων, το πέμπτο μεγαλύτερο νησί της Σκωτίας και το όγδοο μεγαλύτερο του Ηνωμένου Βασιλείου σε έκταση. Και οι δύο εγκαταστάσεις εξοπλίστηκαν με έναν στρόβιλο Wells. Η εγκατάσταση στο Pico είναι ισχύος 400 kW και η κατασκευή της ολοκληρώθηκε το 1999 ενώ, λειτουργεί ακόμα (Σχήμα 1.9) . Χτίστηκε με σταθερή βάση πάνω στη θάλασσα, δίπλα σε έναν βράχο. Η εγκατάσταση στο Islay, ολοκληρώθηκε το 2000, είναι ισχύος 500 kW και χτίστηκε σε μια εσοχή ενός βραχώδη λόφου (Σχήμα 1.10) .



Σχήμα 1.9: Εγκατάσταση στο νησί Pico



Σχήμα 1.10: Εγκατάσταση στο νησί Islay

Άλλη εγκατάσταση συσκευής OWC, ισχύος 100 kW, χτίστηκε το 2001 στο Guangdong Province, της Κίνας (Σχήμα 1.11).



Σχήμα 1.11: Εγκατάσταση συσκευής OWC στην Κίνα

Λίγα χρόνια νωρίτερα, μια μεγάλη συσκευή OWC, η οποία προορίζονταν για την εγκατάσταση της κοντά στην ακτή (γνωστή ως OSPREY), ισχύος 1 MW, καταστράφηκε από τη θάλασσα σχεδόν αμέσως αφού είχε ολοκληρωθεί η τοποθέτησή της κοντά στις ακτές της Σκωτίας το 1995. Μια αντίστοιχα μεγάλη συσκευή OWC, η greenWAVE, ισχύος 1MW, κατασκευάστηκε πρόσφατα από μια Αυστραλιανή εταιρεία, την Oceanlinx

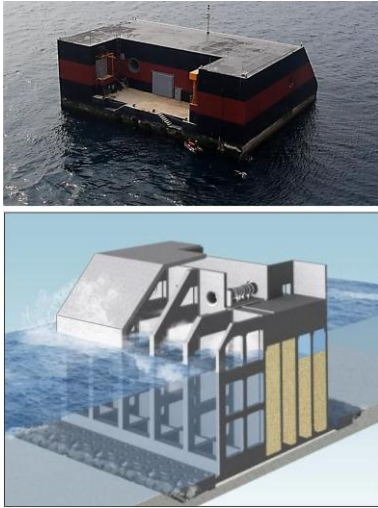


Σχήμα 1.12: greenWave ισχύος 1 MW

Ένα ατύχημα στο σύστημα υποστήριξης των 3000 τόνων της κατασκευής συνέβη το Μάρτιο του 2014, όταν η κατασκευή μεταφερόταν από το λιμάνι Adelaide στο λιμάνι MacDonnell της δυτικής Αυστραλίας, αναγκάζοντας έτσι την εγκατάσταση να μείνει προσαραγμένη.

Μια πρόσφατα ολοκληρωμένη κατασκευή OWC, ισχύος 500 kW, εγκαταστάθηκε στο Yongsoo, περίπου 1 χιλιόμετρο από τις ακτές του νησιού Jeju, της νότιας Κορέας ([Σχήμα 1.13](#)). Η εγκατάσταση έχει 37 m μήκος και 31.2 πλάτος.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 80, έχει βρεθεί πως η διαδικασία εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας μπορεί να βελτιωθεί με τη επέκταση του θαλάμου της κατασκευής, προεκτείνοντας τους τοίχους στην κατεύθυνση των κυμάτων. Αυτή η ιδέα τέθηκε σε εφαρμογή σε κάποιο από τα ήδη υπάρχουσα πρωτότυπα OWC, τα οποία είναι τοποθετημένα κοντά στην ακτή και των οποίων η κατασκευή έγινε με ασφάλι. Ολοκληρώθηκε το 2005 και δοκιμάστηκε στο λιμάνι Kemplia, στην Αυστραλία ([Σχήμα 1.14](#)).



Σχήμα 1.13: Εγκατάσταση OWC στο Yongsoo

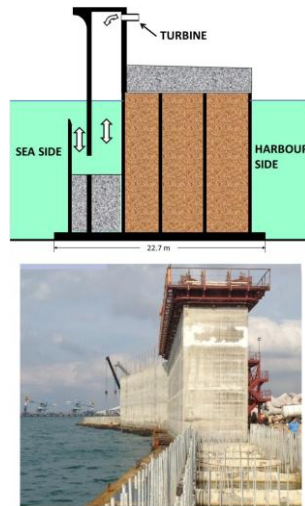


Σχήμα 1.14: Προέκταση τοιχωμάτων συσκευής OWC στην Αυστραλία

1.1.2.2 Ενσωμάτωση συσκευών OWC σε κυματοθραύστες

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή είναι τα πιο κρίσιμα ζητήματα σε μια εγκατάσταση OWC τεχνολογίας και έχουν το μεγαλύτερο αντίκτυπο στα οικονομικά της παραγόμενης ενέργειας από τα κύματα. Η ενσωμάτωση εγκαταστάσεων OWC σε κυματοθραύστες, προστατεύοντας παράλληλα τις παράκτιες περιοχές και τα λιμάνια έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Τα κόστη της κατασκευής είναι τα ίδια ωστόσο, η προσβασιμότητα στην περιοχή για την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση της εγκατάστασης εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας κάνει την όλη διαδικασία πιο πρακτική. Η εγκατάσταση μιας τέτοιας κατασκευής έγινε για πρώτη φορά στο λιμάνι Sakata της Ιαπωνίας το 1990 (Σχήμα 1.6), όπου ένας από τους υδατοστεγείς θαλάμους που απαρτίζουν τον κυματοθραύστη είχε ειδικό σχήμα για να φιλοξενήσει το μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Η ιδέα του κυματοθραύστη που εσωκλείει μια συσκευή OWC υιοθετήθηκε στην κατασκευή που έγινε στο λιμάνι Mutriku της βόρειας Ισπανίας, με 16 θαλάμους και 16 στροβίλους Wells ισχύος 18.5 kW η κάθε μία.

Μια διαφορετική γεωμετρία για μια συσκευή OWC, ενσωματωμένη μέσα σε κυματοθραύστη, προτάθηκε από τον Boccotti, με τη συσκευή OWC να είναι μεγάλη στην περιοχή που προσκρούει το κύμα και στενή (μικρό άνοιγμα) στο μπροστά και πίσω μέρος. Μια τομή της παραπάνω συσκευής OWC δείχνει πως έχει σχήμα "U", με το εξωτερικό άνοιγμα της στραμμένο προς τα πάνω (Σχήμα 1.15). Ένα πλεονέκτημα αυτής της συσκευής OWC είναι, ότι επιτρέπει να αυξηθεί το συνολικό ύψος της στήλης ύδατος χωρίς το άνοιγμα της να τοποθετηθεί πολύ κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτός ο τύπος OWC-κυματοθραύστη έχει κατασκευαστεί στο λιμάνι Civitavecchia της Ιταλίας (κοντά στη Ρώμη) (Σχήμα 1.15), με 17 εισόδους και 136 OWC συσκευές κυματικής ενέργειας ενώ, σχεδιάζεται να υιοθετηθεί για καινούργιους κυματοθραύστες στην Ιταλία.



Σχήμα 1.15: Συσσκευή OWC σχήματος U ενσωματωμένη σε κυματοθραύστη

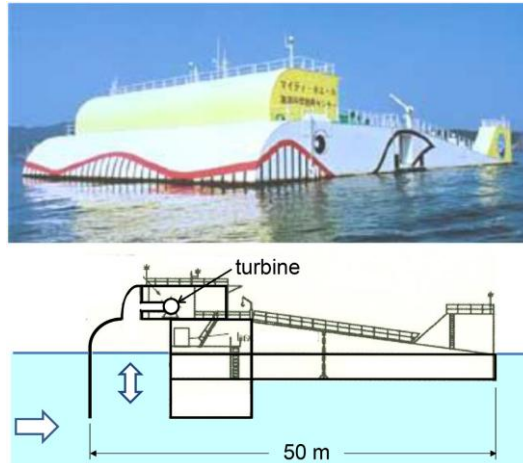
1.1.2.3 Συσσκευές OWC πλεούμενης κατασκευής

Από τις αρχές των δοκιμών στην Ιαπωνία, στα μέσα της δεκαετίας του 80, η ιδέα της κατασκευής μιας συσκευής BBDB OWC έγινε το επίκεντρο του ενδιαφέροντος σε αρκετές χώρες στην Ευρώπη αλλά και σε χώρες όπως η Ιαπωνία, η Νότια Κορέα, οι ΗΠΑ, η Κίνα και η Ινδία, με τις θεωρητικές, υπολογιστικές και πειραματικές μελέτες να αποτελούν ένα ισχυρό υπόβαθρο. Μια BBDB OWC συσκευή κλίμακας 1/4 δοκιμάστηκε στο Galway Bay της Ιρλανδίας μεταξύ του 2008 και 2011 (Σχήμα 1.16). Στην αρχή εξοπλίστηκε με έναν στρόβιλο Wells και μετέπειτα χρησιμοποιήθηκε ένας στρόβιλος δράσης αξονικής ροής ο οποίος επίσης δεν έχει την ανάγκη διορθωτικών βαλβίδων.



Σχήμα 1.16: BBDB OWC συσκευή κλίμακας 1/4 εξοπλισμένη με στρόβιλο Wells στο Galway Bay

Η Mighty Whale, μια άλλη επιπλέουσα συσκευή OWC, αναπτύχθηκε από το κέντρο επιστήμης και τεχνολογίας ναυτιλίας της Ιαπωνίας (Japan Marine Science and Technology Center-JMSTC). Η συσκευή αποτελείται από μια επιπλέουσα κατασκευή (με μήκος 50 m, πλάτος 30 m, βύθισμα 12 m και εκτόπισμα 4400 τόνους) η οποία έχει τρεις θαλάμους παγίδευσης του αέρα, τοποθετημένους στο μπροστά μέρος ο ένας δίπλα στον άλλον, και δεξαμενές στήριξης της (.). Κάθε θάλαμος παγίδευσης του αέρα συνδέεται με έναν στρόβιλο Wells. Η συνολική ισχύς ήταν 110 kW. Η εγκατάσταση της συσκευής πραγματοποιήθηκε κοντά στις εκβολές του Gokasho Bay, στο Mie Prefecture της Ιαπωνίας, το 1998 και δοκιμάστηκε για αρκετά χρόνια.



Σχήμα 1.17: Mighty Whale

Η Αυστραλιανή εταιρεία Oceanlinx πραγματοποίησε την εγκατάσταση μιας συσκευής, γνωστής ως Mk3, από το Φεβρουάριο μέχρι το Μάιο του 2010, ανοιχτά του λιμανιού Kembla της Αυστραλίας, σε κλίμακα 1/3 της πλήρους κλίμακας μιας συσκευής OWC ισχύος 2.5 MW, η οποία (όπως και το Kaimeί τρεις δεκαετίες νωρίτερα) είναι μια επιπλέουσα πλατφόρμα με αρκετούς θαλάμους παγίδευσης του αέρα (σ' αυτήν την περίπτωση είναι 8) κάθε ένας με έναν αεροστρόβιλο. Κατά την διάρκεια των δοκιμών μόνο δύο στρόβιλοι εγκαταστάθηκαν.



Σχήμα 1.18: Συσκευή Mk3-πολύ-θαλαμική επιπλέουσα συσκευή OWC

Η ιδέα μιας αξιsymμετρικής επιπλέουσας συσκευής OWC που αποτελείται από ένα σχετικά μακρύ κατακότυφο αγωγό, ανοιχτό και στα δύο του άκρα και προσκολλημένο στο πλευρό του σώμα, έχει μελετηθεί από τους πρωτοπόρους στον τομέα μετατροπής της κυματικής ενέργειας. Το μήκος του αγωγού καθορίζει το μέγεθος της συχνότητας στο εσωτερικό της στήλης ύδατος. Αυτή η συσκευή, η οποία κάποιες φορές αποκαλείται OWC spar-buoy, ήταν το αντικείμενο δύο εκ των πρώτων δημοσιεύσεων που επικεντρώθηκαν στη θεωρητική μοντελοποίηση των μετατροπών κυματικής ενέργειας. Η ανάλυση της έγινε από τον McCormick στο πρώτο του βιβλίο. Αρκετοί τύποι navigation buoys, για την παραγωγή ενέργειας, έχουν βασιστεί σ' αυτήν την ιδέα. Μια μελέτη που έγινε για το

Βρετανικό τμήμα εμπορίου και βιομηχανίας το 2005, συγκρίνει αρκετούς τύπους πλεούμενων συσκευών OWC για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον του Ατλαντικού και κρίνει τη συσκευή OWC spar-buoy ως την πιο οικονομικά συμφέρουσα επιλογή και με το μικρότερο ρίσκο, με σκοπό την επιπλέον ανάπτυξη του. Η συσκευή OWC spar-buoy έγινε αντικείμενο μελετών με σκοπό τη βελτίωση του αγωγού, ο οποίος πλέον δεν είναι κυλινδρικός στο κάτω μέρος αλλά κωνικός (Σχήμα 1.19)



Σχήμα 1.19: Spar-buoy OWC

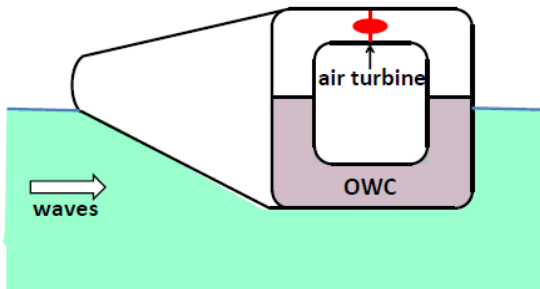
1.1.2.4 Πλεούμενες κατασκευές κυματικής ενέργειας με εσώκλειστη συσκευή OWC

Μερικές διαμορφώσεις συσκευών WEC, στις οποίες η OWC συσκευή είναι εσώκλειστη στην επιπλέουσα κατασκευή και δεν είναι συνδεδεμένη απευθείας με το νερό της θάλασσας, έχουν προταθεί και μελετηθεί.

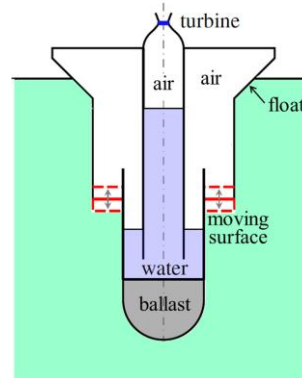
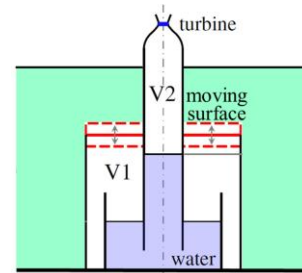
Η U-Gen συσκευή αποτελείται από μια ασύμμετρη επιπλέουσα βάση με μια κυρίαρχη δεξαμενή U, η οποία είναι μερικώς γεμάτη με νερό, και δύο πλευρικούς θαλάμους αέρα συνδεδεμένους με έναν αγωγό. Η κίνηση της συσκευής αυτής επάγεται κυρίως από το ανεβοκατέβασμα της πλεούμενης βάσης, οδηγώντας τον αέρα μέσω του αγωγού σε έναν αεροστρόβιλο, ο οποίος δεν έχει την ανάγκη για διορθωτικές βαλβίδες, με σκοπό την απορρόφηση της ενέργειας (Σχήμα 1.20).

Μια αξισυμμετρική συσκευή WEC, η οποία προτάθηκε και αναλύθηκε πρόσφατα, είναι στην ουσία ένα χώρος γεμάτος αέρα ο οποίος είναι είτε στερεωμένος στον πυθμένα της θάλασσας είτε επιπλέει (Σχήμα 1.21). Η κινούμενη διεπιφάνεια μεταξύ του εσώκλειστου αέρα και της περιβάλλουσας θάλασσας ίσως είναι μια άκαμπτη επιφάνεια τοποθετημένη σε εύκαμπτες φυσούνες, ή μια άκαμπτη επιφάνεια συνδεδεμένη με τους τοίχους της κατασκευής με παρόμοιο τρόπο με το διάφραγμα ενός μεγαφώνου, ή ίσως είναι φτιαγμένη

ολοκληρωτικά από μια εύκαμπτη μεμβράνη. Ο κλειστός αυτός χώρος εσωκλείει έναν όγκο αέρα V_1 που είναι συνδεδεμένος με την ατμόσφαιρα μέσω μιας OWC συσκευής της οποίας οι τοίχοι είναι ομοαξονικοί αγωγοί, έναν όγκο αέρα V_2 και έναν αεροστρόβιλο (Σχήμα 1.21). Η συσκευή OWC και η συμπιεστότητα του αέρα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη δυναμική της συνολικής κατασκευής. Ο απαιτούμενος όγκος αέρα είναι μεγαλύτερος για τη συσκευή που είναι στερεωμένη στον πυθμένα της θάλασσας. Το πλάτος της συχνότητας μιας τέτοιας συσκευής βρέθηκε πως είναι ουσιαστικά μεγαλύτερο απ' ό,τι της πλέουσας εκδοχής.



Σχήμα 1.20: Σχηματική αναπαράσταση της συσκευής U-Gen



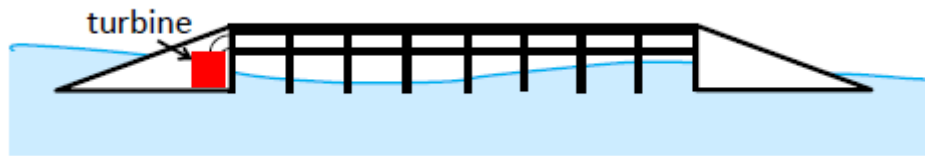
Σχήμα 1.21: Σχηματική αναπαράσταση συσκευών με συμπιεσμένους όγκους αέρα και στήλες νερού

1.1.2.5 Πολλαπλές συσκευές OWC

Εκτός από τις συσκευές OWC που είναι ενσωματωμένες σε κυματοθραύστες, άλλες συσκευές WEC, οι οποίες αποτελούνται από πολλαπλές OWC συσκευές, έχουν μελετηθεί. Σε μερικές περιπτώσεις, αρκετοί θάλαμοι, στους οποίους είναι παγιδευμένος ο αέρας, συνδέονται με μια συμβατική στροβιλομηχανή, μιας κατεύθυνσης περιστροφής, δημιουργώντας έτσι την απαίτηση για αγωγούς χαμηλής και υψηλής πίεσης και διορθωτικές βαλβίδες.

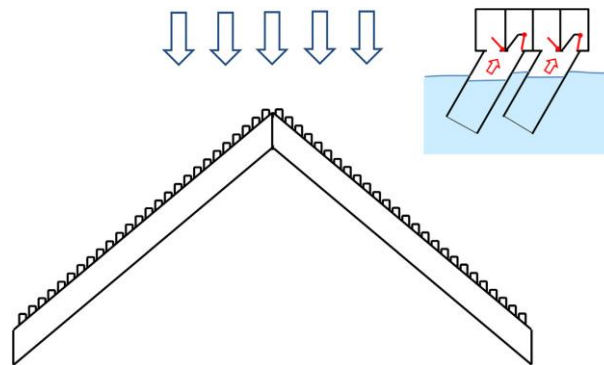
Η Seabreath, υπό την αιγίδα του πανεπιστημίου της Padova στην Ιταλία, είναι ένας πλεούμενος αποσβεστήρας. Αυτό σημαίνει ότι η επιμήκης κατασκευή του είναι ευθυγραμμισμένη με την διεύθυνση διάδοσης των προσκρουόμενων κυμάτων (λ). Περιλαμβάνει έναν αριθμό από ορθογωνικούς θαλάμους, που παγιδεύουν τον αέρα, με ανοιχτό το κάτω μέρος. Κάθε τέτοιος θάλαμος, της OWC συσκευής, είναι συνδεδεμένος,

με την χρήση βαλβίδων αντεπιστροφής, με δύο διαμήκεις αγωγούς (υψηλής και χαμηλής πίεσης) που καταλήγουν σε μια συμβατική στροβιλομηχανή, όπως περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 1.22: Σχηματική αναπαράσταση πολλαπλών συσκευών OWC

Η LEANCON είναι μια ακόμη συσκευή πολλαπλών OWC. Οι συσκευές OWC είναι διατεταγμένες σε δύο σειρές ενώ, οι σειρές αυτές είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους σε σχήμα V (Σχήμα 1.23). Όπως και στην Seabreath, κάθε θάλαμος της συσκευής OWC είναι συνδεδεμένος, με την χρήση βαλβίδων αντεπιστροφής, με δύο αγωγούς που καταλήγουν σε ένα συμβατικό αεροστρόβιλο, μιας κατεύθυνσης περιστροφής. Τέτοιου είδους συσκευές δοκιμάστηκαν στο πανεπιστήμιο Aalborg της Δανίας, χρησιμοποιώντας μοντέλο κλίμακας 1/40, με συνολικά 120 θαλάμους OWC.



Σχήμα 1.23: Σχηματική αναπαράσταση της LEANCON

Μια παρόμοια μεγάλη συσκευή, παρόλο που ουσιαστικά είναι μικρότερη, μελετήθηκε υπολογιστικά και δοκιμάστηκε, υπό κλίμακα 1/50, στην μεγάλη ωκεάνια λεκάνη του Hydraulics and Maritime Research Centre που βρίσκεται στο πανεπιστήμιο College Cork, της Ιρλανδίας. Οι 32 θάλαμοι της συσκευής OWC είναι διατεταγμένοι κατά μήκος δύο πλευρών ενός ορθογωνίου τριγώνου που σχηματίζουν 90° (σχήμα V). Η συγκεκριμένη διάταξη παρέχει στην κατασκευή την απαραίτητη αντοχή, προκειμένου να μπορεί να διατηρηθεί κάτω από τις συνθήκες που επικρατούν στη θάλασσα.

1.2 Αεροστρόβιλοι συσκευών OWC

Οι περισσότερες συμβατικές στροβιλομηχανές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξοπλίσουν τις συσκευές OWC. Ωστόσο, σ' αυτήν την περίπτωση, είναι απαραίτητη προϋπόθεση πως το σύστημα υποστηρίζεται από διορθωτικές και αντιστρεπτές βαλβίδες εξαιτίας του γεγονότος ότι, όλες οι συμβατικές στροβιλομηχανές περιστρέφονται μόνο

προς μια κατεύθυνση και συνεπώς, η περιοδικά αντιστρεπτή ροή του αέρα λόγω της παλινδρομικής κίνησης του κύματος θα έκανε την όλη κατασκευή μη λειτουργική. Τέτοια συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε μικρές συσκευές όπως τα navigation buoys. Παρόλ' αυτά, σε μεγάλες κατασκευές, όπου ο ρυθμός ροής είναι της τάξης του $10^2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ και ο χρόνος απόκρισης είναι τυπικά μικρότερος από 1 s, το παραπάνω σύστημα έχει θεωρηθεί μη πρακτικό. Κάτι τέτοιο έχει επιβεβαιωθεί από τις δοκιμές στο Kaimeí. Εκτός από το Kaimeí και τα μικρά navigation buoys, όλες (ή σχεδόν όλες) οι προτότυπες συσκευές OWC έχουν εξοπλιστεί με αεροστρόβιλους που δεν έχουν την ανάγκη για διορθωτικές βαλβίδες.

Οι περισσότεροι αεροστρόβιλοι self-rectifying τύπου, οι οποίοι έχουν προταθεί και δοκιμαστεί μέχρι στιγμής, είναι αξονικής ροής στροβιλομηχανές δύο τύπων:

- Η τουρμπίνα Wells (Wells turbine) και
- Ο στρόβιλος δράσης (Impulse turbine)

Ο στρόβιλος Wells εφευρέθηκε το 1976 από τον καθηγητή Alan Arthur Wells (1924-2005) στο Queen's University του Belfast, στο Ηνωμένο Βασίλειο. Ο πιο γνωστός στρόβιλος πέραν του στροβίλου Wells είναι ένας στρόβιλος δράσης παντεταρισμένος από τον Ivan A. Babintsev, το 1975.

Το εύρος λειτουργίας ενός στροβίλου Wells είναι γνωστό πως είναι σχετικά μικρό. Για αύξηση του ρυθμού ροής, σε συνθήκες στολλαρίσματος, η απόδοση πέφτει απότομα. Από τους καλύτερους σχεδιασμούς στροβίλων Wells φαίνεται πως, η μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης του στροβίλου, κάτω από συνθήκες εργαστηρίου, φτάνει το 75%.

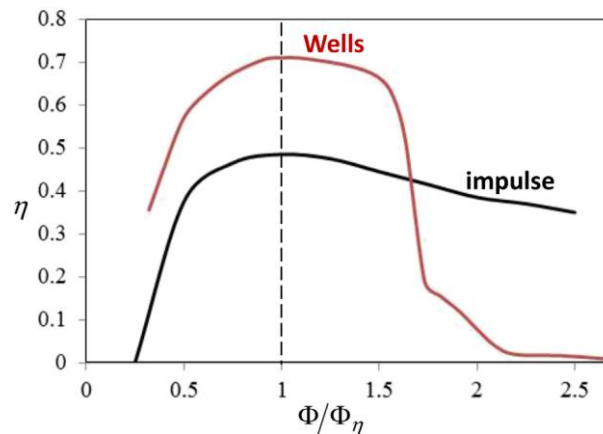
Το βασικό πρόβλημα του στροβίλου δράσης είναι οι μεγάλες αεροδυναμικές απώλειες, εξαιτίας της υπέρμετρης τιμής της γωνίας πρόσπτωσης στην είσοδο της δεύτερης σειράς των οδηγητικών πτερυγίων (αποτέλεσμα της απαίτησης ότι, οι σειρές των οδηγητικών πτερυγίων πρέπει να είναι συμμετρικά τοποθετημένες η μια με την άλλη). Παρόλο που το εύρος λειτουργίας του στροβίλου δράσης είναι μεγαλύτερο, συγκριτικά μ' αυτό του στροβίλου Wells, η μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης του φτάνει σχεδόν το 50%. Για να μειωθούν οι απώλειες αυτές, προτάθηκαν οδηγητικά πτερύγια με μεταβαλλόμενη γεωμετρία. Αυτή η τροποποίηση των οδηγητικών πτερυγίων αύξησε την απόδοση του στροβίλου σχεδόν πάνω από 60%. Μια σύγκριση της απόδοσης με τον ρυθμό ροής μεταξύ των δύο παραπάνω στροβίλων, φαίνεται σε επόμενο σχήμα (Σχήμα 1.24).

Μια δύο διαστάσεων ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να γίνει μια περαιτέρω σύγκριση μεταξύ των δύο στροβίλων, όσον αφορά την ταχύτητα περιστροφής, βασικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά και την διάμετρο του ρότορα. Για τη σύγκριση του στροβίλου Wells (θα συμβολίζεται με W) και του στροβίλου δράσης αξονικής ροής (θα

συμβολίζεται με imp), μπορούν να εξαχθούν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται συγκεντρωτικά παρακάτω. Πριν απ' αυτό όμως, πρέπει να αναφερθεί ότι:

- το έργο ανά μονάδα μάζας
- ο ρυθμός ροής και
- ο λόγος της εσωτερικής προς την εξωτερική διάμετρο D_i/D_o ,

είναι τα ίδια και για τους δύο στροβίλους. Τα αποτελέσματα δίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1), συγκρίνοντας τους λόγους Vx^2 (δύο φορές η κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας στην έξοδο), την εξωτερική διάμετρο του ρότορα και την ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 1.24: Απόδοση συναρτήσει του λόγου συντελεστών ροής Φ/Φ_η για έναν μονοβάθμιο στρόβιλο Wells με οδηγητικά πτερύγια και έναν στρόβιλο δράσης. Ο συντελεστής Φ_η υποδηλώνει τις συνθήκες μέγιστης απόδοσης

Πίνακας 1.1: Σύγκριση μεταξύ ενός στροβίλου Wells και ενός στροβίλου δράσης-Αναπροσαρμογή πίνακα από [3]

$\frac{V_{xW}^2}{V_{ximp}^2}$	$\frac{D_W}{D_{imp}}$	$\frac{\Omega_W}{\Omega_{imp}}$
0.27	1.4	1.7

Από τον παραπάνω πίνακα λοιπόν, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η επαγόμενη ταχύτητα στο πτερύγιο του ρότορα είναι πολύ μεγαλύτερη στον στρόβιλο Wells, ο οποίος επίσης έχει μεγαλύτερη διάμετρο (D) και μεγαλύτερη περιστροφική ταχύτητα (Ω). Αυτά συνεπάγονται ότι, το πρόβλημα του αεροδυναμικού θορύβου αναμένεται να είναι πολύ πιο σημαντικό στον στρόβιλο Wells, ο οποίος όμως από την άλλη πλευρά, έχει πολύ μεγαλύτερη ικανότητα για την αποθήκευση της ενέργειας με το φαινόμενο flywheel. Κάτι τέτοιο είναι πολύ σημαντικό για την εξομάλυνση των διακυμάνσεων της ενέργειας στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό.

Επιπλέον, η ανάλυση αυτή συνεπάγεται ότι, η απόδοση του στροβίλου Wells είναι πιο ευαίσθητη στις αλλαγές του αριθμού Reynolds απ' ότι η απόδοση του στροβίλου δράσης. Μελέτες που έχουν δημοσιευτεί, δείχνουν πως ο στρόβιλος Wells, για σχετικά μικρούς

αριθμούς Reynolds, έχει αισθητά μικρότερη μέγιστη τιμή απόδοσης απ' ότι ο στρόβιλος δράσης.

1.3 Στρόβιλος Wells

Στην απλούστερη μορφή του ο ρότορας του στρόβιλου Wells αποτελείται από έναν αριθμό πτερυγίων τα οποία με τη σειρά τους είναι δομημένα με συμμετρικές αεροτομές. Το επίπεδο των χορδών των πτερυγίων είναι κάθετο στον άξονα περιστροφής. Ο στρόβιλος μπορεί να έχει οδηγητικά πτερύγια στις δύο πλευρές μεταξύ του ρότορα.

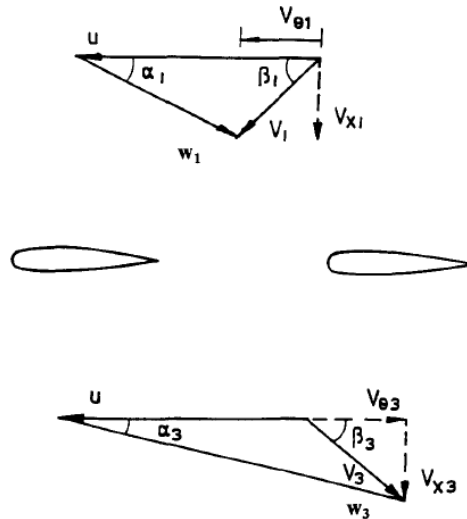
Συμφωνα με την θεωρία αεροτομών, μια αεροτομή η οποία είναι τοποθετημένη με γωνία πρόσπτωσης, α , εντός μιας ροής ρευστού, δημιουργεί μια δύναμη άνωσης, L , κάθετη στο ελεύθερο πεδίο ροής. Επιπλέον, στην αεροτομή αναπτύσσεται μια δύναμη αντίστασης, D , σε διεύθυνση παράλληλη μ' αυτήν του ελεύθερου πεδίου ροής. Αυτές οι δύο δυνάμεις, άνωσης και αντίστασης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση της εφαπτομενικής δύναμης, F_{θ} , (στο επίπεδο περιστροφής) και της αξονικής δύναμης, F_x , (κάθετης στο επίπεδο περιστροφής).

Όσον αφορά την δύο κατευθύνσεων ροή αέρα διαμέσου του στρόβιλου Wells, η γωνία πρόσπτωσης αλλάζει πρόσημο ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής. Εάν η γωνία α μπορεί να θεωρηθεί θετική κατά τη ροή στη μία κατεύθυνση τότε θα είναι αρνητική στην αντίθετη κατεύθυνση. Για συμμετρικά πτερύγια η φορά της εφαπτομενικής δύναμης είναι η ίδια. Συνεπώς, εάν κάθε πτερύγιο τοποθετηθεί γύρω από έναν άξονα περιστροφής τότε ο στρόβιλος θα περιστρέφεται πάντα προς την ίδια κατεύθυνση ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της ροής. Αυτός είναι και ο λόγος που καθιστά το στρόβιλο Wells την πιο πρακτική εφαρμογή για την μετατροπή της κυματικής ενέργειας ανάμεσα στις συσκευές που βασίζονται στην αρχή της ταλαντευόμενης στήλης νερού (OWC).

Σε χαμηλούς συντελεστές ροής (μικρές γωνίες πρόσπτωσης) ο συντελεστής αντίστασης στη διεύθυνση της χορδής είναι μεγαλύτερος από της άνωσης και επομένως, οι αποδόσεις είναι αρνητικές. Σ' αυτές τις γωνίες πρόσπτωσης η πνευματική ενέργεια εισαγωγής μετατρέπεται σε θερμότητα και δεν παράγεται μηχανικό έργο. Σε μεγάλους συντελεστές ροής (μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης) το οριακό στρώμα πάνω στα πτερύγια τείνει να αποκολληθεί οδηγώντας σε μια πτώση της απόδοσης. Σε μια δύο κατευθύνσεων και τυχαία ροή αέρα, τα πτερύγια του στρόβιλου θα εξάγουν μια χρονικά μεταβαλλόμενη ροπή, η οποία μπορεί να ομαλοποιηθεί από έναν υψηλής αδράνειας flywheel ρότορα. Μπορεί να αποδειχθεί ότι για μια δοσμένη ταχύτητα του στρόβιλου, εάν η μεταβολή των ταχυτήτων της ροής του αέρα με το χρόνο είναι ημιτονοειδής, η ενέργεια που χάθηκε στις μικρές γωνίες πρόσπτωσης εξαιτίας της μετατροπής της σε θερμότητα, αποτελεί μόνο ένα μικρό μέρος του χρονικά μέσου παραγόμενου έργου.

1.3.1 Τρίγωνα ταχυτήτων στροβίλου Wells

Όσον αφορά τα τρίγωνα ταχυτήτων του στροβίλου Wells, στην είσοδο και στην έξοδο από το ρότορα, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.25), λαμβάνοντας υπόψη τα όσα ειπώθηκαν προηγουμένως. Στο εν λόγω σχήμα, τα τρίγωνα ταχυτήτων προκύπτουν στη γενική τους μορφή, με την τοποθέτηση οδηγητικών πτερυγίων. Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν οδηγητικά πτερύγια η είσοδος της ροής είναι αξονική, με την γωνία β_1 που απεικονίζεται να ισούται με $\pi/2$.



Σχήμα 1.25: Τρίγωνα ταχυτήτων στροβίλου Wells με οδηγητικά πτερύγια

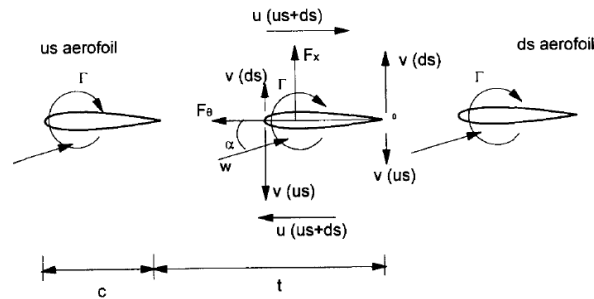
1.3.2 Μέθοδοι πρόβλεψης

Γενικά οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της απόδοσης των στροβιλομηχανών αξονικής ροής χρησιμοποιούνται και για τη μελέτη της αεροδυναμικής απόδοσης του στροβίλου Wells. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν την προσέγγιση της ακτινικής ισορροπίας καθώς και την θεωρία του δίσκου ενέργειας. Εφαρμόζοντας λοιπόν αυτές τις μεθόδους για την πρόβλεψη της απόδοσης του στροβίλου Wells, το πεδίο ροής χωρίζεται σε δακτύλιους και το πτερύγιο μελετάτε με γωνία διάταξης 90° στις δύο διαστάσεις. Εφόσον, η συχνότητα ταλάντωσης της ροής σε μια συσκευή εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας είναι τυπικά μικρότερη από 1 Hz, η ροή που περνά από την επιφάνεια του ρότορα μπορεί να θεωρηθεί ημιμόνιμη. Παρακάτω αναλύονται οι εν λόγω μέθοδοι.

1.3.2.1 Αεροτομές σε σειρά cascade με γωνία διάταξης 90°

Η απόδοση ενός ρότορα με ένα ζεύγος πτερυγίων (μία βαθμίδα) επηρεάζεται από την αμοιβαία αεροδυναμική αλληλεπίδραση των πτερυγίων. Η αλληλεπίδραση αυτή αφορά τόσο τις ταχύτητες που αναπτύσσονται από το ένα πτερύγιο στο άλλο, όσο και τον απόρροου που δημιουργείται από τα πτερύγια. Η πρώτη είναι συνέπεια της ροής του αέρα

χωρίς την παρουσία και τη συμμετοχή δινών στο πεδίο ροής ενώ, η δεύτερη λαμβάνει υπόψη της φαινόμενα δευτερογενούς ροής. Κάθε μια από τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης του ρευστού και της στερεότητας του στροβίλου. Τα αποτελέσματα αυτών μπορούν να κατανοηθούν για μια σειρά αεροτομών με γωνία διάταξης $\pi/2$, αντικαθιστώντας τις αεροτομές με μια σειρά από Vortex singularities δύναμης Γ στο $1/4$ της χορδής, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.26).



Σχήμα 1.26: Vortex singularities σε δισδιάστατη αεροτομή με γωνία διάταξης 90°

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται επίσης, οι επαγόμενες ταχύτητες πάνω στο πτερύγιο, κάθετα στη χορδή κοντά στην ακμή προσβολής και στην ακμή διαφυγής (v) και παράλληλα στη χορδή στην πάνω και κάτω επιφάνεια (u), εξαιτίας του άνω και κάτω ρεύματος των πτερυγίων. Το άνω και κάτω ρεύμα της αεροτομής, στη ροή γύρω από την αεροτομή, παρουσία γειτονικών αεροτομών επηρεάζει την αποτελεσματική γωνία πρόσπτωσης και οδηγεί στη μείωση αυτής κοντά στην ακμή προσβολής και στην αύξηση της κοντά στην ακμή διαφυγής. Παρόλ' αυτά, περισσότερης σημασίας είναι ότι, στην πραγματικότητα, η κυκλοφορία και η άνωση πάνω στο πτερύγιο αυξάνονται ως αποτέλεσμα της αύξησης των ταχυτήτων στην πλευρά αναρρόφησης και της μείωσης αυτών στην πλευρά πίεσης εξαιτίας της παρουσίας γειτονικών αεροτομών.

Μια απλή μέθοδος υπολογισμού των αποτελεσμάτων των διάφορων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των αεροτομών, η οποία είναι γνωστή από τον Weinig, είναι βασισμένη σε μια ανάλυση της ροής επίπεδων αεροτομών σε σειρά, με τα χαρακτηριστικά της ροής να είναι ίδια σε καθεμία αεροτομή (cascade). Σύμφωνα με την ανάλυση του Weinig, η τιμή του συντελεστή άνωσης για μια αεροτομή σε cascade μπορεί να διορθωθεί συμπεριλαμβάνοντας την επίδραση της διάταξης cascade με ένα συντελεστή k τέτοιο ώστε,

$$C_l = kC_{l_0}$$

όπου, το C_{l_0} αναφέρεται στον συντελεστή άνωσης για μια απομονωμένη επίπεδη αεροτομή και με τον παράγοντα k , για μια διάταξη αεροτομών σε σειρά (cascade) με γωνία διάταξης $\pi/2$, να δίνεται από τη σχέση

$$k = \frac{2t}{\pi c} \tan \frac{\pi c}{2t}$$

όπου, c είναι το μήκος της χορδής και t η απόσταση των ακμών προσβολής δύο συνεχόμενων αεροτομών (pitch).

Μια παρόμοια διόρθωση θα μπορούσε να εφαρμοστεί στο συντελεστή άνωσης αεροτομών με πεπερασμένο πάχος, τοποθετημένες σε σειρά (cascade). Εφόσον ο συντελεστής αντίστασης δεν μπορεί να προβλεφθεί από μια ανάλυση του δυναμικού της ροής, θα μπορούσε κανείς να υποθέσει πως $C_d=C_{do}$. Χρησιμοποιώντας την υπόθεση αυτή, οι διάφοροι ερευνητές μπορούν να υπολογίσουν της απόδοση του στροβίλου Wells.

Μια άλλη προσέγγιση υπολογισμού των αποτελεσμάτων των διάφορων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των αεροτομών, μπορεί να γίνει με μια ανάλυση βασισμένη στη μέθοδο των "singularities", όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Κι αυτή η μέθοδος μπορεί να προβλέψει μόνο τον συντελεστή άνωσης και όχι την τιμή του συντελεστή αντίστασης. Η αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί από την ανάλυση του οριακού στρώματος χρησιμοποιώντας την κατανομή πίεσης, η οποία παρέχεται από το δυναμικό της ροής που μελετάται. Αεροτομές σε σειρά (cascade), σε κάποια γωνία πρόσπτωσης, έχουν μια ισοδύναμη γωνία πρόσπτωσης, α_{eq} , η οποία δημιουργεί περίπου την ίδια κατανομή πίεσης στην πάνω επιφάνεια της αεροτομής με αυτήν ενός απομονωμένου πτερυγίου σε γωνία πρόσπτωσης α . Αυτό προϋποθέτει πως, τόσο το C_θ όσο και το C_x , για μια αεροτομή σε σειρά, μπορεί να υπολογιστεί από μια απλή αναλογική εξίσωση,

$$\frac{C_\theta}{C_{\theta o}} = \frac{C_x}{C_{x o}} = \left[\frac{C_x}{C_{x o}} \right]_{pred}$$

όπου, $C_{\theta o}$ και $C_{x o}$ είναι οι υπολογισμένες τιμές, με τη δοκιμή σε αεροσήραγγα, των συντελεστών δύναμης πάνω σε μια απομονωμένη αεροτομή στην ισοδύναμη γωνία πρόσπτωσης, α_{eq} . Ο όρος $[C_x/C_{x o}]_{pred}$ είναι ο λόγος της εκτιμούμενης τιμής της δύναμης που είναι κάθετη πάνω στην αεροτομή που βρίσκεται σε cascade προς την αντίστοιχη δύναμη που ασκείται πάνω στο απομονωμένο πτερύγιο σε μια γωνία πρόσπτωσης η οποία έχει υπολογιστεί από τις μεθόδους που μελετάνε το δυναμικό της ροής. Τέτοιες διαδικασίες υπολογισμών έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της απόδοσης του στροβίλου Wells.

Μια τρίτη εκτίμηση για την πρόβλεψη των αεροδυναμικών αλληλεπιδράσεων πάνω σε μια αεροτομή σε cascade, με γωνία διάταξης $\pi/2$, είναι μια ημι-εμπειρική μεθοδος βασισμένη στη συσχέτιση μεταξύ των υπολογισμένων τιμών του μέσου συντελεστή δύναμης από τις δοκιμές του στροβίλου Wells και τη βάση δεδομένων από τις δοκιμές μιας δύο διαστάσεων αεροτομής σε αεροσήραγγα. Σ' αυτήν τη μέθοδο η αξονική δύναμη F_x και η

παραγόμενη ισχύς στην έξοδο W_o , για ένα στρόβιλο Wells με γνωστή στερεότητα και αριθμό Reynolds, μπορεί να εκφραστεί με όρους μέσων αεροδυναμικών συντελεστών δύναμης για τα πτερύγια ως,

$$F_x = \frac{1}{2} N C_x \rho W^2 A_b$$

$$W_o = \frac{1}{2} N C_\theta \rho W^2 A_b U$$

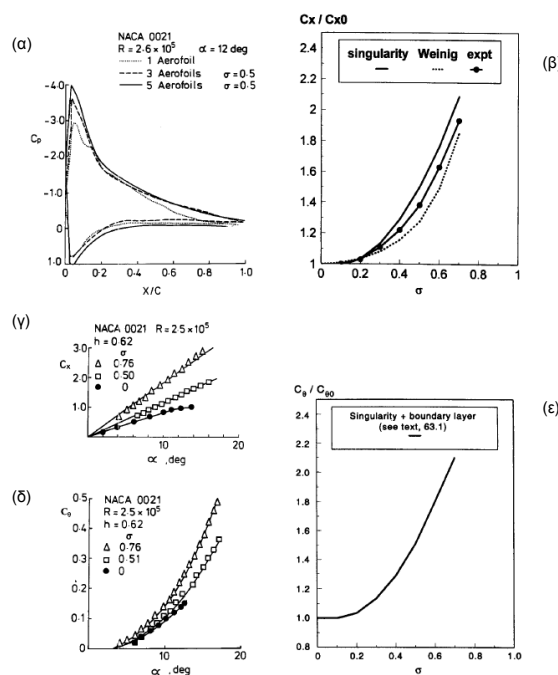
Η πτώση πίεσης διαμέσου του ρότορα μπορεί να εκφραστεί σε όρους αξονικής δύναμης πάνω στα πτερύγια:

$$F_x = \Delta p A_a$$

ενώ, η απόδοση μπορεί να εκφραστεί ως,

$$\eta = \frac{C_\theta}{C_x} \left(\frac{1}{\varphi} \right)$$

Τυπικά αποτελέσματα για την μεταβολή των C_x και C_θ με τη μέση γωνία πρόσπτωσης στα πτερύγια α ($\tan^{-1}\varphi$), βασισμένα στις δοκιμές του στρόβιλου Wells σε ροή μίας διεύθυνσης, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.27).



Σχήμα 1.27: (α) Κατανομή πίεσης από δοκιμές σε αεροσήραγγα με πεπερασμένο αριθμό πτερυγίων. (β) Σύγκριση μεταξύ των μεθόδων πρόβλεψης και των πειραματικών δεδομένων αναφορικά με τους συντελεστές αξονικής δύναμης. (γ) Τιμές του συντελεστή αξονικής δύναμης από τις δοκιμές του στρόβιλου Wells σε αεροσήραγγα. (δ) Τιμές του συντελεστή εφαιπτομενικής δύναμης από τις δοκιμές του στρόβιλου Wells σε αεροσήραγγα. (ε) Πρόβλεψη τιμών του συντελεστή εφαιπτομενικής δύναμης. Αναπροσαρμογή από [2].

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα αφορούν ένα στρόβιλο Wells με πτερύγια δομημένα με την αεροτομή NACA 0021, $h=0.62$, $R=2.5 \times 10^5$ και $\sigma=0.5$ και 0.76 . Οι όροι h και σ θα εξηγηθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού. Στο εν λόγω σχήμα απεικονίζονται επίσης τα αποτελέσματα για το απομονωμένο πτερύγιο σε δισδιάστατη ροή ($\sigma=0$), από δοκιμές σε αεροσήραγγα. Τα αποτελέσματα τόσο από τις δοκιμές του στρόβιλου Wells όσο και από τις δοκιμές στην αεροσήραγγα δείχνουν μια γραμμική μεταβολή του C_x με την α , για γωνίες πρόσπτωσης μέχρι το σημείο απώλειας στήριξης. Ωστόσο, η σχέση μεταξύ του C_θ και της α δεν είναι γραμμική, και για μικρές γωνίες πρόσπτωσης οι τιμές του C_θ είναι αρνητικές. Μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως, για μια δοσμένη γωνία πρόσπτωσης, η ωφέλιμη δύναμη αυξάνεται με τη στερεότητα του στρόβιλου.

Οι κανονικοποιημένες τιμές C_x/C_{x_0} και C_θ/C_{θ_0} , οι οποίες είναι βασισμένες στις μεθόδους πρόβλεψης και τα πειραματικά δεδομένα από τις δοκιμές του στρόβιλου, σχεδιάζονται στο ίδιο διάγραμμα έναντι της στερεότητας. Ένα διάγραμμα μεταξύ C_θ/C_{θ_0} και στερεότητας βασισμένο στην μέθοδο των singularities, με την άνωση και την αντίσταση να έχουν υπολογιστεί από την ανάλυση του οριακού στρώματος που είναι βασισμένη στην κατανομή πίεσης, φαίνεται επίσης στο Σχήμα 1.27. Τα δεδομένα για τη δύο διαστάσεων αεροτομή, τα οποία αντιστοιχούν σε έναν αριθμό Reynolds, αναπαράχθηκαν από βάση δεδομένων. Σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, οι προβλέψεις που είναι βασισμένες στη μέθοδο των "singularities" υπερ-εκτιμούν το συντελεστή αξονικής δύναμης ενώ, αυτές που είναι βασισμένες στη μέθοδο Weiniig τον υπο-εκτιμούν. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα δεδομένα λαμβάνονται από αρκετές πειραματικές εγκαταστάσεις, ο συσχετισμός μεταξύ C_x/C_{x_0} και σ , εντός του εύρους των αριθμών Reynolds που ελέγχονται, είναι λογικός. Αυτός ο συσχετισμός μπορεί να εκφραστεί ως,

$$\frac{C_x}{C_{x_0}} = \frac{1}{1 - \sigma^2}$$

Παρατηρείται πως η επίδραση της στερεότητας στο λόγο C_θ/C_{θ_0} είναι παρόμοια με αυτήν στο C_x/C_{x_0} , τόσο στο μέγεθος όσο και στην τάση. Αυτά τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στα πτερύγια αυξάνουν με τη στερεότητα και ότι ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης, ο οποίος είναι ανάλογος του λόγου της περιφερειακής προς την αξονική δύναμη, δεν αλλάζει αισθητά με τη στερεότητα.

1.3.2.2 Θεωρία ακτινικής ισορροπίας

Σύμφωνα με το θεώρημα της ακτινικής ισορροπίας, η ροή υποτίθεται πως είναι αστρόβιλη και αξισυμμετρική ενώ, η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας V_r είναι αμελητέα οπουδήποτε στο πεδίο ροής εκτός από την περιοχή που διαπερνάτε από τα πτερύγια.

Μπορεί να αποδειχθεί από την εξίσωση της ορμής στην ακτινική διεύθυνση, ότι για να ισχύει η ακτινική ισορροπία, η δύναμη πίεσης στην ακτινική διεύθυνση πρέπει να ισούται με την κεντρομόλο επιτάχυνση.

$$\frac{V_{\theta}^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (1)$$

Μια ειδική περίπτωση της ακτινικής ισορροπίας είναι ότι η αξονική ταχύτητα παραμένει σταθερή στο πεδίο ροής (περίπτωση ελεύθερης στροβίλωσης) και η κυκλοφορία είναι σταθερή κατά μήκος της ακτίνας, η οποία συνεπάγεται ότι στα πτερύγια δεν σχηματίζονται δίνες και το ειδικό έργο που παράγεται από αυτά είναι αμετάβλητο με την ακτίνα.

1.3.2.2.1 Ακτινική ισορροπία στην είσοδο του ρότορα

Λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη μιας σειράς από σταθερά οδηγητικά πτερύγια ανάντη του ρότορα, (Σχήμα 1.25), εάν η ροή διαμέσου του ρότορα υποθεθεί πως είναι μη συνεκτική και αστρόβιλη τότε,

$$P_{01} = P_1 + \frac{\rho}{2} (V_{x1}^2 + V_{\theta 1}^2) = \text{σταθερό} \quad (2)$$

$$\Omega_{\theta 1} = \frac{\partial V_{r1}}{\partial x} - \frac{\partial V_{x1}}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

και από τις εξισώσεις (1), (2) και (3) μπορεί να δειχθεί ότι,

$$\tan \beta_1 = \frac{V_{x1}}{V_{\theta 1}} = k_1 r \quad (4)$$

όπου, το k_1 είναι μια σταθερά.

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό οδηγητικών πτερυγίων στην είσοδο, με την εφαρμογή της ακτινικής ισορροπίας στην έξοδο αυτών.

1.3.2.3 Θεωρητικοί υπολογισμοί για την απόδοση του στροβίλου Wells

Από τα τρίγωνα ταχύτητας στην είσοδο του ρότορα (Σχήμα 1.25) η μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης της ροής στα πτερύγια με την ακτίνα δίνεται από τη σχέση:

$$\cot \alpha_1 = \frac{U}{V_{x1}} - \cot \beta_1$$

όπου $U = \omega r$ είναι η περιφερειακή ταχύτητα του πτερυγίου στο ρότορα. Η σχετική ταχύτητα W_1 και η περιφερειακή ταχύτητα $V_{\theta 1}$ της ροής δίνονται από τις σχέσεις:

$$W_1 = \frac{V_{x1}}{\sin \alpha_1}$$

$$V_{\theta 1} = \frac{V_{x1}}{\tan \beta_1}$$

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν οδηγητικά πτερύγια ανάντη του ρότορα, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, $\beta_1 = \pi/2$. Σε ένα δακτύλιο επιφάνειας $2\pi r dr$ η παραγόμενη ενέργεια στην έξοδο του ρότορα δίνεται από τη σχέση:

$$dW_0 = N dF_{\theta} U$$

όπου,

$$dF_{\theta} = \frac{1}{2} C_T \rho W_1^2 c dr$$

Η αξονική δύναμη που ασκείται πάνω στα πτερύγια στην περιοχή του δακτυλίου είναι $N dF_x$ όπου,

$$dF_x = \frac{1}{2} C_x \rho W_1^2 c dr$$

όπου C_{θ} και C_x είναι οι συντελεστές δύναμης με διεύθυνση παράλληλη και κάθετη στη χορδή αντίστοιχα και οι οποίοι εξαρτώνται από το συντελεστή άνωσης C_l και το συντελεστή αντίστασης C_d . Τα C_l και C_d είναι συνάρτηση αρκετών παραμέτρων όπως το μήκος της χορδής του πτερυγίου, ο αριθμός Reynolds, ο αριθμός Mach, η στερεότητα του ρότορα (σ), ο λόγος της διαμέτρου του ρότορα προς τη διάμετρο της κορυφής του πτερυγίου (h) και η απόσταση της κορυφής του πτερυγίου από το περίβλημα.

Η αξονική δύναμη εξισώνεται με την δύναμη πίεσης πάνω στο ρότορα και δίνουν την παρακάτω σχέση:

$$\frac{p_1 - p_2}{\frac{1}{2} \rho V_{x1}^2} = \frac{N C_x c}{2\pi r \sin^2 \alpha_1}$$

Εάν η κινητική ενέργεια στην έξοδο του ρότορα θεωρηθεί ως απώλεια (κάποιο μέρος αυτής της κινητικής ενέργειας μπορεί να ανακτηθεί με την τοποθέτηση οδηγητικών πτερυγίων στην έξοδο) η παραγόμενη ενέργεια στην είσοδο του ρότορα είναι:

$$dW_1 = (P_{01} - P_{02}) dQ$$

όπου,

$$dQ = V_{x1} 2\pi r dr$$

Η απόδοση του στοιχείου του πτερυγίου είναι:

$$\eta_b = \frac{dW_0}{dW_1}$$

Η μέση ακτινική αεροδυναμική απόδοση είναι:

$$\eta = \frac{\int_{r_{hub}}^{r_{tip}} dW_0}{\int_{r_{hub}}^{r_{tip}} dW_1}$$

Εξισώνοντας τη ροπή πάνω στο στοιχείο του πτερυγίου με τη μεταβολή της στροφορμής παίρνουμε ως αποτέλεσμα τη σχέση:

$$\gamma_1 - \gamma_2 = \frac{V_{x1} N C_{\theta} c}{2 \sin^2 \alpha}$$

Η δύναμη αντίστασης σε μια σειρά πτερυγίων (cascade) εντός του δακτυλίου και οι απώλειες ιξώδους δίνονται από τη σχέση:

$$dF_d = \frac{1}{2} C_d \rho W_1^2 c dr$$

ενώ, η απώλεια ενέργειας εξαιτίας του ιξώδους πάνω στα πτερύγια δίνεται από τη σχέση:

$$dE_D = dF_D W_1$$

Για τη διατήρηση της ενέργειας γράφεται,

$$(P_{01} - P_{02}) 2\pi r dr V_{x1} = dE_D + dW_0$$

από την οποία η στατική πτώση πίεσης Δp_0 μπορεί να εκφραστεί ως

$$\Delta p_0 = \frac{N c \rho W_1^2}{4\pi r} \left[\frac{C_d}{\sin \alpha_1} + C_T (\cot \alpha_1 + \cot \beta_1) \right]$$

Η κινητική ενέργεια του αέρα στην έξοδο του ρότορα στο δακτύλιο δίνεται από τη σχέση:

$$dE_k = \frac{\rho dQ V_2^2}{2}$$

Συνεπώς, η αεροδυναμική απόδοση μπορεί επίσης να εκφραστεί ως,

$$\eta = \frac{\int_{r_{hub}}^{r_{tip}} dW_0}{\int_{r_{hub}}^{r_{tip}} (dW_0 + dE_D + dE_k)}$$

Η επίδραση της απόστασης της κορυφής του πτερυγίου από το περίβλημα μπορεί να συνυπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στις στροβιλομηχανές ενώ, η επίδραση της συμπιεστότητας του ρευστού μπορεί να συνεκτιμηθεί χρησιμοποιώντας το νόμο των Prandtl-Glauert στην παραπάνω ανάλυση.

1.3.2.4 Ακτινική ισοροπία στην έξοδο του ρότορα

Γενικά, διαφορετικές γραμμές ροής στο ρότορα είναι πιθανό να μεταφέρουν διαφορετικά ποσοστά ενέργειας με τη ολική πίεση κατάντη του ρότορα να είναι:

$$P_{02} = P_{02}(r) = p_2 + \frac{\rho}{2}(V_{x2}^2 + V_{T2}^2)$$

Με την εφαρμογή της ακτινικής ισορροπίας κατάντι του ρότορα, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί ως:

$$\frac{d}{dr}(V_{x2}^2) + \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr}(rV_{T2}^2) = \frac{2}{\rho} \frac{dP_{02}}{dr}$$

Εάν P_0 =σταθερό τότε, η παραπάνω εξίσωση μετατρέπεται στην παρακάτω:

$$\frac{d}{dr}(V_{x2}^2) = -\frac{1}{4\pi^2 r^2} \gamma_2^2$$

από την οποία μπορεί να εξαχθεί η $V_{x2}=V_{x2}(r)$.

Για την περίπτωση όπου,

$$\frac{dP_{02}}{dr} = 0 \text{ και } \gamma_2 = \text{σταθερό}$$

η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται στην $V_{x2}=\text{σταθερό}$

1.3.2.5 Θεωρία δίσκου ενέργειας

Πειράματα σε αξονικής ροής μηχανές έχουν δείξει ότι υπάρχει σημαντική αναδιανομή της μάζας της ροής στην περιοχή μετά τη σειρά πτερυγίων καθώς και ότι, η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας μεταβάλλεται κατά μήκος της ακτίνας πέρα απ' αυτή την περιοχή. Τα παραπάνω συμπεράσματα λοιπόν, οδηγούν στην ανάπτυξη της θεωρίας του δίσκου ενέργειας κατά την οποία, κάθε σειρά πτερυγίου αντιπροσωπεύεται από μια ασυνέχεια στις παραμέτρους της ροής. Πιο συγκεκριμένα, οι παραδοχές που ισχύουν κατά την επίλυση του προβλήματος με την εφαρμογή του δίσκου ενέργειας είναι οι παρακάτω:

1. Η εναλλαγή ενέργειας μεταξύ ρευστού και δίσκου γίνεται χωρίς απώλειες.
2. Ο ροϊκός σωλήνας αποτελεί ένα ρεύμα ολίσθησης. Το ρευστό μέσα στον σωλήνα έχει σταθερή ταχύτητα και σχεδόν σταθερή πίεση πάνω στις διατομές κάθετα στον άξονα του ενώ, η επιφάνεια του ροϊκού σωλήνα αποτελεί επιφάνεια ασυνέχειας ταχύτητας.
3. Η φόρτιση (διαφορά πίεσης πριν και μετά) πάνω σ' ολόκληρο το δίσκο είναι σταθερή.
4. Το ρεύμα αέρα μετά το δίσκο σχεδόν στερείται συστροφής. Η μεταβολή της περιφερειακής στροβιλότητας Ω_θ και της ταχύτητας V_θ υποτείνεται πως παραμένει αμετάβλητη στην αξονική διεύθυνση.

Εάν u_r , U_T και u_x είναι η μικρή ακτινική, εφαπτομενική και αξονική ταχύτητα, αντίστοιχα, προσθέτονται επί των τιμών της ακτινικής ισορροπίας και υφίστανται μόνο πριν και μετά το ρότορα έτσι ώστε, οι τελικές τιμές των ταχυτήτων να είναι:

$$\begin{aligned}v_r &= u_r \\v_\theta &= V_\theta + u_r \\v_x &= V_x + u_x\end{aligned}$$

όπου, V_θ και V_x είναι οι τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή της ακτινικής ισορροπίας ($V_r=0$).

Με την εφαρμογή λοιπόν, των παραπάνω υποθέσεων, μπορεί να αποδειχτεί ότι οι ταχύτητες ανάντη και κατάντη του ρότορα εκφράζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned}v_{x1} &= V_{x1} + u_{x1} \\v_{x2} &= V_{x2} + u_{x2} \\u_{x1} = -u_{x2} &= \frac{V_{x2} - V_{x1}}{2} e^{-\frac{\pi x}{b}}\end{aligned}$$

όπου, οι τιμές των αξονικών ταχυτήτων V_{x1} και V_{x2} υπολογίστηκαν από τη θεώρηση της ακτινικής ισορροπίας ενώ, b είναι το ύψος του πτερυγίου.

Στην περιοχή του δίσκου ενέργειας ισχύει $x=0$ και συνεπώς η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται στην,

$$v_{x1} = v_{x2} = \frac{V_{x2} + V_{x1}}{2}$$

Με τις τιμές των V_{x1} και V_{x2} να έχουν υπολογιστεί από την αξονική ισορροπία και τις ταχύτητες v_{x1} και v_{x2} να υπολογίζονται από το θεώρημα δίσκου ενέργεια, οι υπολογισμοί για την απόδοση μπορούν να επανεξεταστούν .

1.3.3 Παράμετροι που επιδρούν στην απόδοση ενός μονοβάθμιου στροβίλου Wells

Η αεροδυναμική απόδοση του στροβίλου Wells εξαρτάται από τους συντελεστές των δυνάμεων που ασκούνται πάνω στο πτερύγιο, οι οποίοι με τη σειρά τους εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους όπως:

- ο συντελεστής ροής ϕ ,
- η στερεότητα σ ,
- ο λόγος της διαμέτρου της βάσης προς την διάμετρο της κορυφής h ,
- ο λόγος του ύψους του πτερυγίου προς το μήκος χορδής AR ,

- η απόσταση της κορυφής του πτερυγίου από το περίβλημα, εκφρασμένη ως ποσοστό του μήκους χορδής,
- η αναλογία του πάχους του πτερυγίου στο μήκος της χορδής,
- η ένταση της τύρβης στην είσοδο του ρότορα,
- ο αριθμός Mach και
- ο αριθμός Reynolds

Η απόδοση του στροβίλου εξαρτάται επίσης από τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας.

Η επίδραση του συντελεστή ροής στην απόδοση του στροβίλου συζητήθηκε παραπάνω. Τα αποτελέσματα από την επίδραση μερικών εκ των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση της τουρμπίνας, αναλύονται παρακάτω.

1.3.3.1 Στερεότητα ρότορα

Η στερεότητα του στροβίλου, σ , είναι στην ουσία ένα μέτρο που υποδηλώνει κατά πόσο παρεμποδίζεται η ροή μέσα στην τουρμπίνα. Καθορίζει επίσης, τον βαθμό που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους τα πτερύγια. Όπως είναι προφανές, η στερεότητα είναι μια πολύ σημαντική σχεδιαστική παράμετρος του στροβίλου Wells και γενικά οποιουδήποτε άλλου αεροστροβίλου.

Πειραματικά δεδομένα, για μια μέση απόδοση, η , κανονικοποιημένη αναφορικά με την συμπεριφορά ενός πτερυγίου δύο διαστάσεων και απόδοσης η_0 , δείχνουν ότι για μικρές τιμές της στερεότητας, οι επιδράσεις αυτής δεν είναι αισθητές. Ωστόσο, για τιμές στερεότητας μεγαλύτερες από 0.5 παρατηρείται σημαντική μείωση του βαθμού απόδοσης. Η μείωση του βαθμού απόδοσης, για έναν στρόβιλο Wells υψηλής στερεότητας, οφείλεται στις αυξημένες απώλειες κινητικής ενέργειας εξαιτίας της παρουσίας δευτερογενούς ροής. Επίσης, για υψηλή στερεότητα, θα μπορούσαν να υπάρξουν σημαντικές επιδράσεις κοντά στη βάση του ρότορα, στις τρεις διαστάσεις, λόγω του ότι τα πτερύγια είναι κοντά μεταξύ τους και συνεπώς, υπάρχει περίπτωση να αλληλεπιδρούν με το οριακό στρώμα της βάσης. Αυτή η αλληλεπίδραση μεταξύ πτερυγίων και βάσης μπορεί να οδηγήσει στην αποκόλληση της ροής πάνω στην βάση και επομένως, και στην επιφάνεια των πτερυγίων που είναι κοντά σ' αυτή. Στην πραγματικότητα, τα πτερύγια κοντά στην βάση επιδρούν σε μεγαλύτερο ποσοστό στην ροή απ' ό,τι στην κορυφή του πτερυγίου.

Έχει παρατηρηθεί ότι με την αύξηση της στερεότητας σ αυξάνεται και η πτώση πίεσης διαμέσου του στροβίλου. Για συσκευές κυματικής ενέργειας με μεγάλη διαθέσιμη πτώση πίεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας στρόβιλος υψηλής στερεότητας. Ένας στρόβιλος δύο βαθμίδων θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί ως μια εναλλακτική λύση. Ένας

στρόβιλος χαμηλής στερεότητας δεν έχει την ικανότητα να ξεπεράσει τη ροπή αδράνειας του συστήματος περιστροφής του και συνεπώς, δεν μπορεί να ξεκινήσει από μόνος του.

1.3.3.2 Λόγος της διαμέτρου της βάσης προς τη διάμετρο της κορυφής του πτερυγίου

Η επίδραση του λόγου της διαμέτρου της βάσης προς τη διάμετρο της κορυφής έχει γίνει αντικείμενο μελέτης πολλών εργασιών. Η μεταβλητή h είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος βάσει της οποίας, για σταθερή στερεότητα και ρυθμό ροής Q , μπορεί να υπολογιστεί η μέση αξονική ταχύτητα ροής V_x από τη σχέση,

$$V_x = \frac{4Q(1 - h^2)}{\pi D_t^2}$$

ενώ, ο συντελεστής ροής φ στην κορυφή του πτερυγίου είναι ίσος με,

$$\varphi_t = \frac{V_x}{U_t}$$

Η επίδραση του λόγου h στην απόδοση του στροβίλου είναι αρκετά περίπλοκη. Έχει αντίκτυπο στην γωνία πρόσπτωσης της ροής πάνω στη βάση, στις απώλειες διαρροής στην κορυφή του πτερυγίου και στα σχετικά αποτελέσματα στη βάση του ρότορα από την αλληλεπίδραση του οριακού στρώματος των πτερυγίων με το οριακό στρώμα της βάσης. Για ένα στρόβιλο ο οποίος λειτουργεί σε συγκεκριμένη ταχύτητα, η γωνία πρόσπτωσης στη βάση είναι μεγαλύτερη απ' αυτή στην κορυφή του πτερυγίου και αυξάνει με τη μείωση του λόγου h . Επομένως, θα περίμενε κανείς ότι με μια μείωση του λόγου h επιταχύνεται η εμφάνιση συνθηκών απώλειας στήριξης του στροβίλου και μειώνεται ο βαθμός απόδοσης του. Για ένα δεδομένο διάκενο μεταξύ πτερυγίου και περιβλήματος, ο λόγος h καθορίζει την αναλογία του διακένου στο ύψος του πτερυγίου. Μια μείωση του h οδηγεί σε μείωση αυτής της αναλογίας με αποτέλεσμα, να αναμένεται μείωση των απωλειών εξαιτίας της διαρροής του ρευστού στην κορυφή του πτερυγίου και επομένως, βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης του στροβίλου. Από την άλλη πλευρά, μια μείωση των διαρροών της ροής στην κορυφή του πτερυγίου μειώνει το συντελεστή "ανακούφισης", έχοντας ως αποτέλεσμα την πιο γρήγορη εμφάνιση του φαινομένου της απώλειας στήριξης (stall). Η αεροδυναμική απόδοση του στροβίλου είναι επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, συνάρτηση των φαινομένων που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση του οριακού στρώματος της βάσης του ρότορα με το οριακό στρώμα της επιφάνειας των πτερυγίων κοντά στη βάση. Μια μείωση του h θα μείωνε αυτήν την αλληλεπίδραση και θα αύξανε τελικά την απόδοση του στροβίλου. Καταλήγοντας, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, συμπεραίνεται ότι μια κατάλληλη τιμή του h για το σχεδιασμό ενός στροβίλου Wells είναι περίπου κοντά στο 0.6.

1.3.3.3 Λόγος του ύψους του πτερυγίου προς το μήκος χορδής

Ο λόγος του ύψους του πτερυγίου προς το μήκος χορδής (Aspect Ratio-AR) επηρεάζει την απόδοση του στροβίλου και τον συντελεστή ροής όπου εμφανίζεται το φαινόμενο της απώλειας στήριξης (stall). Το κυρίαρχο αποτέλεσμα εξαιτίας της μείωσης του AR, μειώνοντας το ύψος του πτερυγίου, είναι η αύξηση της απόδοσης εξαιτίας της αναβολής της εμφάνισης του stall, το οποίο είναι συνδεδεμένο με την αύξηση του συντελεστή ανακούφισης (relief effect) εξαιτίας της σχετικά αυξανόμενης παροχής μάζας διαμέσου της κορυφής του πτερυγίου. Έχει παρατηρηθεί ότι ο στροβιλισμός της ροής κοντά στην κορυφή του πτερυγίου είναι εντονότερος όσο το AR μειώνεται. Επίσης, η επίδραση του AR γίνεται μεγαλύτερη με την αύξηση του διακένου μεταξύ πτερυγίου και περιβλήματος. Ένας λόγος AR ίσος με 0.5, θα μπορούσε να είναι μια συνιστώμενη τιμή για το σχεδιασμό ενός στροβίλου Wells.

1.3.3.4 Μέγεθος διακένου-Tip clearance

Ο στρόβιλος Wells είναι πολύ ευαίσθητος στην επιλογή του διακένου, t_c (αναλογία διακένου στο μήκος χορδής), μεταξύ της κορυφής του πτερυγίου και του περιβλήματος. Μια μείωση του επιταχύνει την εμφάνιση του φαινομένου της απώλειας στήριξης αλλά, αυξάνει την απόδοση ως αποτέλεσμα της μείωσης των απωλειών διαρροής του ρευστού στην κορυφή του πτερυγίου. Από την άλλη πλευρά, η επιλογή ενός μεγάλου t_c θα μπορούσε να οδηγήσει στην επέκταση του εύρους λειτουργίας του στροβίλου χωρίς την εμφάνιση φαινομένων ακραίας αποκόλλησης. Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, δεν υπάρχουν σημαντικά πλεονεκτήματα με την επιλογή ενός $t_c > 0.02$. Συνεπώς, συνιστάται η επιλογή ενός λόγου $t_c < 0.02$.

1.3.3.5 Κατανομή πάχους πτερυγίου

Η επίδραση αυτή στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων δεν μπορεί να διαχωριστεί από την επίδραση του αριθμού Reynolds. Κατά γενική ομολογία, οι λεπτότερες αεροτομές είναι καταλληλότερες για την αυτόματη εκκίνηση του στροβίλου.

1.3.3.6 Τοποθέτηση πτερυγίου στον ρότορα

Οι περισσότερες μελέτες, με θέμα το στρόβιλο Wells, έχουν πραγματοποιηθεί για ρότορες που αποτελούνται από πτερύγια τοποθετημένα σε ορθογωνικής μορφής επίπεδο. Εάν υποθέσουμε ότι η ακτινική συνιστώσα των ταχυτήτων στο ρότορα είναι αμελητέα, το διάνυσμα της ταχύτητας αναφορικά με το ρότορα θα είναι στο περιφερειακό επίπεδο και επομένως, κάθετο σε μια ακτινική γραμμή που περνά από τον άξονα περιστροφής στροβίλου. Για ένα πτερύγιο με ορθογωνικής μορφής επίπεδο, η ακμή προσβολής ή η ακμή διαφυγής ή και τα δύο θα είναι κατά μήκος γραμμών οι οποίες δεν είναι ακτινικές με

αποτέλεσμα, να υπάρχει μια γωνία συστροφής αυτών. Εάν η ακμή προσβολής του πτερυγίου τοποθετηθεί κατά μήκος μιας ακτινικής γραμμής τότε, η γωνία συστροφής είναι μηδέν ενώ, η γωνία συστροφής στην ακμή διαφυγής είναι πολύ μεγάλη. Σ' αυτήν την περίπτωση, η μεσοκάθετος της χορδής του πτερυγίου είναι μετατοπισμένη κατά ένα λόγο $g/c=0.5$. Οι γωνίες συστροφής των ακμών προσβολής και διαφυγής εξαρτώνται απ' αυτή τη μετατόπιση και αυξάνονται και μειώνονται αντίστοιχα όσο μειώνεται ο λόγος g/c , που εκφράζει την αναλογία μετατόπισης σε ποσοστό του μήκους χορδής. Για μια τιμή $g/c=0$ και οι δύο ακμές του πτερυγίου έχουν την ίδια γωνία συστροφής λ . Πρέπει να σημειωθεί ότι, για μια δεδομένη τιμή g/c οι γωνίες συστροφής των ακμών είναι επίσης συσχετισμένες με το AR του πτερυγίου. Απεικόνιση της ροής πάνω στο ρότορα για αρκετές μορφές επιπέδων (πέραν της ορθογωνικής μορφής τοποθέτησης των πτερυγίων), υποδεικνύουν μεγάλη επίδραση της γωνίας συστροφής στην αποκόλληση του οριακού στρώματος πάνω στα πτερύγια. Τα αποτελέσματα αυτά συνεπάγονται ότι, η μείωση της γωνίας συστροφής της ακμής προσβολής των πτερυγίων μειώνει το φαινόμενο αποκόλλησης της ροής. Ένας τρόπος για να μειωθούν οι επιδράσεις της συστροφής στην ακμή προσβολής του πτερυγίου, ορθογωνικής μορφής επιπέδου, είναι να μειωθεί ο λόγος μετατόπισης προς το μήκος χορδής. Η επίδραση του λόγου g/c είναι εμφανής τόσο στην απόδοση του στροβίλου όσο και στη γωνία όπου παρουσιάζεται το φαινόμενο της απώλειας στήριξης (stall). Βασισμένοι στη βιβλιογραφία, συνίσταται η χρήση μιας τιμής $g/c=0.15$ για το σχεδιασμό του στροβίλου Wells.

1.3.3.7 Επίπεδα τύρβης στην είσοδο του ρότορα

Οι στροβιλομηχανές γενικά, είναι πολύ ευαίσθητες στις συνθήκες εισόδου της ροής όπως, η κατανομή του προφίλ ταχυτήτων και τα επίπεδα τύρβης. Αύξηση των επιπέδων τύρβης μπορεί να αλλάξει τη συμπεριφορά και τον τρόπο ανάπτυξης του οριακού στρώματος, βελτιώνοντας τη μετάβαση του οριακού στρώματος και καθυστερώντας την εμφάνιση του φαινομένου stall. Η απόδοση των στροβιλομηχανών μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση των επιπέδων τύρβης πάνω από 3% στην είσοδο. Πειραματικά δεδομένα υποδεικνύουν ότι η απόδοση του στροβίλου Wells βελτιώνεται με την αύξηση της τύρβης αλλά, απαιτείται μια σημαντική αύξηση της έντασης της τύρβης προκειμένου να έχουμε μια αισθητή βελτίωση της απόδοσης. Θα μπορούσε να σημειωθεί πως ο σρόβιλος Wells είναι λιγότερο ευαίσθητος στη μεταβολή της έντασης της τύρβης στην είσοδο, σε σχέση με τις συμβατικές στροβιλομηχανές, και αυτό γιατί στην πραγματικότητα η απόλυτη ταχύτητα στην είσοδο, από την οποία εξαρτάται το επίπεδο της τύρβης, είναι ένα μέρος της ταχύτητας του ρότορα.

1.3.3.8 Επίδραση της δύο κατευθύνσεων ροής αέρα

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η συχνότητα ροής του αέρα σε μια συσκευή κυματικής ενέργειας είναι τόσο μικρή (<1 Hz) ώστε τα δυναμικά φαινόμενα να θεωρούνται αμελητέα. Τα περισσότερα αποτελέσματα που εξάγονται από τις προβλέψεις, βασίζονται στην ημιμόνημη υπόθεση ή σε πειράματα τα οποία διεξάχθηκαν κάτω από συνθήκες ροής προς μία κατεύθυνση. Οι χαρακτηριστικές τιμές που αφορούν τη μέση αεροδυναμική απόδοση και οι οποίες εξάχθηκαν από πειράματα του στροβίλου Wells σε ταλαντούμενη ροή αέρα δείχνουν ότι, λαμβάνει χώρα ένα φαινόμενο υστέρησης, εξαιτίας της ασύμμετρης ανάπτυξης του οριακού στρώματος πάνω στην επιφάνεια των πτερυγίων και της ταλαντευόμενης κίνησης του απόρρου, η έκταση του οποίου μπορεί να εκτιμηθεί σε χαμηλό αριθμό Reynolds. Το φαινόμενο υστέρησης αυξάνεται με την αύξηση της στερεότητας του στροβίλου. Σε μεγάλης κλίμακας στροβίλους, όπου το οριακό στρώμα πάνω στα πτερύγια είναι ουσιαστικά τυρβώδες και σχετικά λεπτό, τα φαινόμενα υστέρησης είναι μικρότερα. Η επίδραση της αδιάστατης συχνότητας f^* στη μέση απόδοση της τουρμπίνας κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης της ροής, σε μικρής κλίμακας στροβίλους, δείχνει ότι η κανονικοποιημένη μέση απόδοση μειώνεται με την αύξηση της f^* . Η απόδοση του στροβίλου κάτω από συνθήκες ημιτονοειδούς ροής είναι καλύτερη απ' ό,τι για μια τυχαία ροή αέρα, όπου ο στροβίλος ίσως λειτουργεί σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης για μεγάλες περιόδους. Σε μια ημιτονοειδή ροή, η επίδραση της συχνότητας ταλάντωσης της ροής στη μέση τετραγωνική ρίζα της πτώσης πίεσης είναι μικρή. Παρόλο που ένας στροβίλος Wells μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί σ' ένα συγκεκριμένο εύρος $+\alpha$, όπου $\alpha < \alpha_s$, θα υπάρχουν περιπτώσεις καταστάσεων της θάλασσας που θα οδηγούν τον στροβίλο σε συνθήκες λειτουργίας κάτω από απώλεια στήριξης. Στην περίπτωση αυτή, θα αναπτύσσονται μεγάλες ασταθείς δυνάμεις στα πτερύγια του στροβίλου. Κάτω από συνθήκες όπου η άνωση είναι ασταθής, θα αναπτύσσονται κρουστικά φορτία στα πτερύγια του στροβίλου, με αποτέλεσμα να μειωθεί η διάρκεια ζωής τους.

1.3.3.9 Κρίσιμος αριθμός Mach

Για μια αεροτομή, ο κρίσιμος αριθμός Mach ορίζεται ως ο αριθμός Mach της ελεύθερης ροής για τον οποίο ο μέγιστος τοπικός αριθμός Mach ισούται με τη μονάδα. Για αριθμούς Mach, ελεύθερης ροής, μεγαλύτερους από τον κρίσιμο αριθμό Mach, η ροή πάνω στο πτερύγιο γίνεται υπερηχητική, οδηγώντας στη δημιουργία κρουστικών κυμάτων και στις ανάλογες επιπτώσεις αυτών, στις οποίες μπορούν να συμπεριληφθούν σημαντικές αυξήσεις της δύναμης αντίστασης και των κρουστικών φορτίων στα πτερύγια. Οι αναφερθείσες επιπτώσεις θα έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της τουρμπίνας και τη μείωση της διάρκειας ζωής των πτερυγίων. Στην περίπτωση του

στροβίλου Wells, ο αριθμός Mach καθορίζεται από τη σχετική ταχύτητα μεταξύ των πτερυγίων και της ροής και η οποία ουσιαστικά είναι συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα. Επομένως, για να αποφευχθούν φαινόμενα υπερηχητικής ροής, ο αριθμός Mach, ο οποίος είναι βασισμένος στην ταχύτητα του στροβίλου στην κορυφή του πτερυγίου, πρέπει να είναι μικρότερος από τον κρίσιμο αριθμό Mach. Αποτελέσματα της βιβλιογραφίας δείχνουν πως, ο κρίσιμος αριθμός Mach μειώνεται αισθητά με την αύξηση της στερεότητας και της γωνίας πρόσπτωσης. Πρέπει να σημειωθεί πως, ο απλός ορισμός που δόθηκε παραπάνω για τον κρίσιμο αριθμό Mach, οδηγεί σε μια απαισιόδοξη εκτίμηση των δυσμενών επιπτώσεων της αύξησης της γωνίας πρόσπτωσης στη δύναμη της αντίστασης και στα κρουστικά φορτία που δέχονται τα πτερύγια.

Τυπικά, ο αριθμός Mach στην κορυφή του πτερυγίου για μια μονοβάθμια τουρμπίνα Wells η οποία έχει στερεότητα 0.3 και λειτουργεί σε ένα εύρος γωνιών πρόσπτωσης $\pm 8^\circ$ πρέπει να είναι μικρότερος από 0.4. Κοντά στη βάση του πτερυγίου, η γωνία πρόσπτωσης και ο κρίσιμος αριθμός Mach έχουν μεγαλύτερες και μικρότερες τιμές αντίστοιχα και συνεπώς, είναι σημαντικό να διασφαλίσουμε ότι τα πτερύγια κοντά στη βάση τους λειτουργούν κάτω από τον κρίσιμο αριθμό Mach. Καταλήγοντας, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο κρίσιμος αριθμός Mach μειώνεται με την αύξηση του πάχους του πτερυγίου.

1.3.3.10 Επιπτώσεις λόγω υπό κλίμακας σχεδιασμού του στροβίλου

Όταν γίνεται πρόβλεψη με τη χρήση του νόμου κλιμάκωσης, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1 - \eta_2}{1 - \eta_1} = A + B \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{0.2}$$

οι τιμές A και B είναι ίσες με 0.4 και 0.6 αντίστοιχα. Από τα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας, μπορεί να παρατηρηθεί πως υπάρχει απόκλιση στα δεδομένα για χαμηλούς αριθμούς Reynolds. Η διαφορά μεταξύ των προβλέψεων και των πειραματικών δεδομένων και η απόκλιση των πειραματικών δεδομένων για πολύ χαμηλούς αριθμούς Reynolds ($R < 10^5$) υφίστανται εξαιτίας των παρακάτω λόγων. Σε δοκιμές για χαμηλό αριθμό Reynolds (μικρή κλίμακα), η τριβή στα έδρανα ολίσθησης και οι απώλειες εξαιτίας της παρεκτροπής του ανέμου παίζουν σημαντικό ρόλο στη συνολική ισχύ και συνεπώς, οι υπολογισμοί της απόδοσης είναι ουσιαστικά εσφαλμένοι σε σημαντικό βαθμό. Η μέθοδος πρόβλεψης που βασίζεται στην παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιεί την υπόθεση ότι το οριακό στρώμα πάνω στα πτερύγια είναι ουσιαστικά τυρβώδες κάτι που είναι απίθανο στους χαμηλούς αριθμούς Reynolds.

1.3.3.11 Χαρακτηριστικά εκκίνησης στροβίλου Wells

Σε μια συσκευή κυματικής ενέργειας, μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη είναι η ικανότητα του στροβίλου να ξεκινάει από μόνος του. Το φαινόμενο που συνήθως λαμβάνει χώρα σε έναν στρόβιλο Wells, όπου ο στρόβιλος επιταχύνει μέχρι μια συγκεκριμένη ταχύτητα, η οποία είναι πολύ χαμηλότερη από την ταχύτητα λειτουργίας του για την μέγιστη απόδοση, μπορεί να χαρακτηριστεί ως φαινόμενο έρπουσας ροής και μπορεί να εξηγηθεί από μια τυπική μεταβολή του συντελεστή εφαπτομενικής δύναμης με τη γωνία πρόσπτωσης, για ένα εύρος γωνιών 0-90° και για συμμετρική αεροτομή.

Τέσσερις ευδιάκριτες περιοχές μπορούν να παρατηρηθούν κατά τη μεταβολή του C_θ . Όταν ο στρόβιλος ξεκινάει από την ηρεμία, η γωνία πρόσπτωσης α ισούται με 90°. Σ' αυτήν τη γωνία ο συντελεστής C_θ είναι θετικός και συνεπώς, ο στρόβιλος αρχίζει και περιστρέφεται. Υποτιέεται πως η αξονική ταχύτητα στην είσοδο είναι σταθερή στην ακτινική διεύθυνση και επομένως, η γωνία πρόσπτωσης πρέπει να μειώνεται όσο ο ρότορας επιταχύνεται. Η τιμή του C_θ είναι θετική στην περιοχή IV δίνοντας την ικανότητα στον στρόβιλο να συνεχίσει να περιστρέφεται. Η περιοχή λειτουργίας του στροβίλου, περιοχή II, είναι περίπου σε ένα σημείο A για μια γωνία κοντά σ' αυτήν όπου παρατηρείται το φαινόμενο της απώλειας στήριξης (stall). Προκείμενου όμως ο στρόβιλος να φτάσει σ' αυτήν την περιοχή λειτουργίας πρέπει πρώτα να περάσει από την περιοχή III όπου, ο συντελεστής C_θ έχει αρνητικές τιμές. Η αδυναμία του στροβίλου να περάσει από την περιοχή III οδηγεί στην ανάπτυξη του φαινομένου crawling. Απο απότέλεσματα της βιβλιογραφίας, παρατηρείται ότι το εν λόγω φαινόμενο μπορεί να μην υφίστανται σε υψηλής στερεότητας ρότορες και η περιοχή III γίνεται ασήμαντη.

Ο λόγος h , ο οποίος αναλύθηκε παραπάνω, παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην ικανότητα του στροβίλου να αποφύγει το φαινόμενο crawling. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για μια δεδομένη ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου, η γωνία πρόσπτωσης στη βάση του ρότορα είναι μεγαλύτερη απ' όση στην κορυφή του. Η σχετική διαφορά μεταξύ των γωνιών αυτών αυξάνει με τη μείωση του λόγου h . Επομένως, είναι κατανοητό ότι κατά τη διάρκεια εκκίνησης του στροβίλου, η επιφάνεια των πτερυγίων που βρίσκεται κοντά στη βάση θα μπορούσε να αφορά την περιοχή IV δημιουργώντας μια θετική ροπή ενώ, η επιφάνεια των πτερυγίων κοντά στην κορυφή είναι στην περιοχή III με μια αρνητική ροπή και συνεπώς, τα πτερύγια στο σύνολο τους θα μπορούσαν να δημιουργούν μια θετική ροπή. Είναι προφανές ότι απαιτούνται χαμηλές τιμές του λόγου h και υψηλές τιμές στερεότητας σ για αυτόματη εκκίνηση του στροβίλου.

1.4 Αναδρομή στη βιβλιογραφία

Αρκετοί μελετητές έχουν ασχοληθεί αρχικά με την θεωρητική περιγραφή τόσο του στροβίλου Wells [1,2] όσο και των τεχνολογιών OWC στις οποίες εγκαθίστανται [3].

Τα τελευταία χρόνια, χάρη στην ανάπτυξη των CFD (Computational Fluid Dynamics), η αριθμητική προσομοίωση τυρβώδων ροών στις τρεις διαστάσεις έχει γίνει εφικτή και αρκετές μελέτες του πεδίου ροής διαμέσου των στροβίλων για συσκευές OWC και άρα και της ροής διαμέσου του στροβίλου Wells, έχουν πλέον καταχωρηθεί στη βιβλιογραφία. Λαμβάνοντας υπόψη τις χαμηλές συχνότητες των κυμάτων της θάλασσας, χρησιμοποιείται συχνά μια ημιμόνιμη προσέγγιση για να αναλυθεί η απόδοση της τουρμπίνας.

Ερευνητές έχουν διεξάγει μελέτες για διαφορετικά αεροδυναμικά προφίλ πτερυγίων [4-8]. Συγκεκριμένα, οι Thakker και Abduladi [4], σύγκριναν τα πειραματικά αποτελέσματα από τέσσερις διαφορετικές αεροτομές (NACA 0015, NACA 0020, CA9 και HSIM 15-262123-1576). Οι δύο αυτοί ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η CA9 και η NACA 0020 με στερεότητα στροβίλου $\sigma=0.64$ είναι οι πιο κατάλληλες αεροτομές για το στροβίλο Wells εξαιτίας της υψηλής απόδοσης που επιτυγχάνεται για ένα μεγάλο εύρος λειτουργίας του συντελεστή ροής, ϕ , συγκριτικά των άλλων αεροτομών. Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις και τα πειράματα των δύο παραπάνω μελετητών πραγματοποιήθηκαν κάτω από συνθήκες μη μόνιμης ροής και τα επιπλέον συμπεράσματα που προέκυψαν θα σχολιασθούν παρακάτω, με την αναφορά στα φαινόμενα υστέρησης που παρουσιάζονται στις εν λόγω συνθήκες. Οι Dhanasekaran και Govardhan [5] με σκοπό να ερευνήσουν τα χαρακτηριστικά του στροβίλου Wells με αεροτομή την NACA 0021 και σταθερό μήκος χορδής πτερυγίων, εγκατέστησαν μια πειραματική διάταξη του στροβίλου Wells με σταθερό μήκος χορδής, εξάγοντας πειραματικά δεδομένα τα οποία είναι ευρέως αποδεκτά ενώ, η βελτίωση της απόδοσης χρησιμοποιώντας ένα μεταβλητό μήκος χορδής μελετήθηκε από τους Govardhan και Chauhan [6]. Οι Dhanasekaran και Govardhan ολοκλήρωσαν τη μελέτη αυτή τόσο για συνθήκες μόνιμης ροής όσο και για ταλαντούμενη ροή ενώ, πραγματοποίησαν και αντίστοιχες υπολογιστικές προσομοιώσεις. Όσον αφορά τις μη μόνιμες συνθήκες ροής της αυτής μελέτης, θα γίνει αναφορά και παρακάτω, στην παράγραφο που σχολιάζονται τα φαινόμενα υστέρησης. Πέραν των πειραματικών δοκιμών, πολλοί ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει υπολογιστικές προσομοιώσεις με σκοπό, να καθορίσουν την καμπύλη της απόδοσης του στροβίλου Wells με διαφορετικά προφίλ αεροτομών, μεταβάλλοντας τη στερεότητα κάτω από μόνιμες και μη μόνιμες συνθήκες ροής. Μερικές τέτοιες προσομοιώσεις έχουν γίνει για τις αεροτομές: NACA 0021 [22], NACA 0015 [8-10] και NACA 0020 [11-13].

Οι Torresi et al. [8] μάλιστα ερευνήσαν και την επίδραση του tip clearance, μεταβάλλοντας το. Η επίδραση του διακένου μελετήθηκε επίσης και από άλλους ερευνητές όπως τους

Thakker and Dhanasekaran [12,14]. Ομάδα ερευνητών μελέτησαν μάλιστα και την ανομοιομορφία του tip clearance [15] περιφερειακά του στροβίλου Wells. Έχει αποδειχτεί πως $TC=1\%$ μειώνει την αποκόλληση της ροής κοντά στην κορυφή του πτερυγίου και βελτιώνει την απόδοση της τουρμπίνας. Το φαινόμενο υστέρησης μειώνεται με την αύξηση του TC. Παρόλ' αυτά, η χρήση ενός ανομοιομορφου TC έχει καλύτερη απόδοση όμως, αυξάνεται η κατασκευαστική δυσκολία.

Επιπλέον, οι Kim et al. [16] πραγματοποίησαν υπολογιστικές προσομοιώσεις με σκοπό να μελετήσουν την επίδραση της συστροφής του πτερυγίου στην απόδοση του στροβίλου Wells χρησιμοποιώντας ως προφίλ πτερυγίων την αεροτομή NACA 0020 ή την CA9. Παρόμοιες προσομοιώσεις που αφορούν την τοποθέτηση των πτερυγίων στον ρότορα έχουν πραγματοποιήσει και οι Mohamed και Shaaban [17]. Για πραγματικές συνθήκες εφαρμογών έχει βρεθεί πως, η τοποθέτηση των πτερυγίων με κάποια γωνία διαφορετική του μηδενός δίνει καλύτερη απόδοση. Αυτό γιατί το πλάτος της ταλάντωσης κατά την εκπνοή του αέρα προς την ατμόσφαιρα είναι μεγαλύτερο απ' αυτό της εισπνοής σε πραγματικές συνθήκες.

Προσπάθειες έχουν γίνει επίσης για την αύξηση της απόδοσης του στροβίλου Wells με την αλλαγή της γεωμετρίας του αγωγού [18-22]. Συγκεκριμένα, βρέθηκε πως η αυλάκωση στην περιοχή της κορυφής βελτιώνει το εύρος λειτουργίας του στροβίλου ενώ, παράγει ποσά ενέργειας συγκρίσιμα μ' αυτά των στροβίλων χωρίς τέτοιου είδους αυλάκωση.

Επιπλέον, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για τη σχεδίαση και χρήση στροβίλων Wells με τη βελτιστοποίηση του προφίλ του πτερυγίου και του πάχους του καθώς, και την τροποποίηση του σχήματος του πτερυγίου [23-28]. Επίσης, η εισαγωγή end plate [29] στα πτερύγια αποδείχτηκε πως αυξάνει την αποδοτικότητα του στροβίλου. Άλλες προσπάθειες περιλαμβάνουν την εισαγωγή οδηγητικών πτερυγίων [30,31], την μελέτη ροής δύο κατευθύνσεων [32,33] και την τοποθέτηση δύο βαθμίδων στροβίλου με την ίδια και αντίστροφη ταχύτητα περιστροφής [34].

Προσομοιώσεις έχουν ολοκληρωθεί από διάφορους ερευνητές και για μη μόνιμες συνθήκες ροής, ελέγχοντας τον τρόπο που επιδρά η συχνότητα ταλάντωσης του αέρα. Συγκεκριμένα, οι Raghunathan και Ombaka [35] έδειξαν μια άυξηση της ροπής εκκίνησης με την αύξηση του αριθμού Strouhal της ροής και την στερεότητα ενώ, το αποτέλεσμα του αριθμού Strouhal στην απόδοση λειτουργίας του στροβίλου εξαρτάται από τη στερεότητα. Οι Inoue et al. [36,37] μελέτησαν το σημείο εμφάνισης απώλειας στήριξης, όπου παρατηρείται μια βίαιη ταλάντωση της τιμής της ροπής. Επίσης μελέτησαν τα χαρακτηριστικά του στροβίλου σε σχέση με τον αριθμό Strouhal και το επιβαλλόμενο φορτίο. Σχολιάζουν ότι οι υπολογιστικές προσομοιώσεις δίνουν ροπή εκκίνησης μικρότερη

απ' ότι τα πειράματα, με αποτέλεσμα να υπάρχει κάποια διακριτοποίηση των τελικών ταχυτήτων περιστροφής της τουρμπίνας σε συνθήκες λειτουργίας. Έχουν υπάρξει έρευνες κατά τις οποίες, ο στρόβιλος φαίνεται να εκκινά κανονικά αλλά, κατά το πείραμα να είναι αδύνατον να περιστραφεί από μόνη της. Αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι, η επίδραση του αριθμού Reynolds στο συντελεστή ροπής φαίνεται να αγνοείται κατά τις προσομοιώσεις. Αυτό γιατί οι υπολογιστικές προσομοιώσεις μελετάνε μόνιμες συνθήκες ροής ενώ στην πραγματικότητα, ο στρόβιλος ξεκινά από την ακινησία, με τον αριθμό Reynolds να είναι πολύ μικρός στην περιοχή του ρότορα. Υπάρχουν φαινόμενα υστέρησης σε μη μόνιμες συνθήκες ροής, με την ταχύτητα του αέρα να εκτελεί περιοδική κίνηση, τα οποία επηρεάζουν τον συντελεστή ροπής. Τέλος, η παραγόμενη περιοδική κίνηση του αέρα δεν είναι ακριβώς ημιτονοειδής όσον αφορά το πείραμα. Οι Ghisu et al. [38] σύγκριναν τα αποτελέσματα μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών μετρήσεων, για ένα στρόβιλο Wells υψηλής στερεότητας με αεροτομή NACA 0015, για ένα εύρος αδιάστατων συχνοτήτων ταλάντωσης του εμβόλου. Το φαινόμενο υστέρησης είναι ίσως ένας από τους κύριους λόγους εξαιτίας του οποίου παρατηρούνται διαφορές μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Πιθανόν δημιουργείται λόγω της πολυπλοκότητας των αποκολλήσεων στο οριακό στρώμα των πτερυγίων και του τοιχώματος που βρίσκεται περιφερειακά κοντά στην κορυφή του πτερυγίου.

Τα εν λόγω φαινόμενα υστέρησης μελετήθηκαν σχετικά πρόσφατα πιο αναλυτικά [4,5,11,39-42] κάτω από συνθήκες ταλαντούμενης ροής. Όσον αφορά τους Thakker και Abdulhadi [4] που αναφέρθηκαν και παραπάνω, πραγματοποίησαν επιπλέον πειράματα για δύο στερεότητες κάτω από συνθήκες ημιτονοειδούς αλλά και ακανόνιστης μη μόνιμης ροής, βασισμένοι στα κύματα που επικρατούν στο Irish. Πέρα από τα συμπεράσματα που σχολιάστηκαν προηγουμένως, οι δυο ερευνητές παρατήρησαν πως η καμπύλη της απόδοσης ενός στρόβιλου Wells κάτω από συνθήκες ροής προς μια κατεύθυνση, αποτυγχάνει να δείξει την γρήγορη αύξηση της στιγμιαίας απόδοσης που πραγματοποιείται για χαμηλούς συντελεστές ροής σε ροή δύο κατευθύνσεων ενώ, ταυτοποίησαν πειραματικά, για τις ίδιες συνθήκες, την επίδραση του προφίλ της αεροτομής στα φαινόμενα υστέρησης. Οι άλλοι ερευνητές συμπλήρωσαν πώς τα φαινόμενα υστέρησης είναι πιο εμφανή όταν το πλάτος ταλάντωσης αυξάνεται. Τέλος, όλοι οι ερευνητές καταλήγουν πως το φαινόμενο υστέρησης δεν συνδέεται με το δυναμικό φαινόμενο της απώλειας στήριξης όταν παρατηρείται μια αριστερόστροφη κλειστή διαδρομή κατά την απεικόνιση των χαρακτηριστικών του στρόβιλου. Όταν η εν λόγω κλειστή διαδρομή είναι δεξιόστροφη, τότε οι μελετητές το αποδίδουν στην αποκόλληση της ροής στην πλευρά αναρρόφησης ανάντη του πτερυγίου κοντά στη βάση και στην ακμή διαφυγής, λόγω των μεγάλων γωνιών πρόσπτωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Υπολογιστική Μοντελοποίηση

Τις τελευταίες δεκαετίες, παράλληλα με τη ραγδαία τεχνολογική προόδο του τομέα που αφορά τις μονάδες ηλεκτρονικών υπολογιστών, τα εργαλεία Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics-CFD) έχουν απλοποιήσει τη διαδικασία μελέτης συστημάτων διάφορων φυσικών διεργασιών. Η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος παράλληλα με την βελτίωση των γραφικών και της ικανότητας παραγωγής ενός τρισδιάστατου μοντέλου έχουν στρέψει το ενδιαφέρον των κατά καιρούς μελετητών στη χρήση τέτοιων μεθόδων. Η ανάγκη εγκατάστασης πειραματικών διατάξεων προκειμένου να αναλυθεί η συμπεριφορά τέτοιων συστημάτων δεν είναι πλέον επιτακτική με τη χρήση CFD τεχνικών, ελαχιστοποιώντας έτσι το κόστος της μελέτης σε όρους χρόνου και οικονομικών πόρων. Όσον αφορά το πεδίο των στροβιλομηχανών, η πρόβλεψη της απόδοσης και των ροϊκών χαρακτηριστικών διαμέσου αυτών είναι πλέον ένα σχετικά εύκολα επιλύσιμο πρόβλημα, με την μοντελοποίηση και την επίλυση των πολύπλοκων εξισώσεων που διέπουν τη ροή των ρευστών να πραγματοποιείται εντός των εργαλείων CFD.

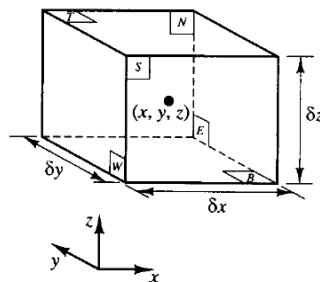
Ένας τέτοιος κώδικας ανάλυσης των ρευστοδυναμικών χαρακτηριστικών είναι και το εμπορικό πρόγραμμα ANSYS CFX. Στην παρούσα εργασία, η υπολογιστική ανάλυση των χαρακτηριστικών της ροής και η πρόβλεψη της απόδοσης, σε όρους συντελεστή ροπής, πτώσης πίεσης και απόδοσης του στροβίλου Wells πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση αυτού του λογισμικού. Στις παρακάτω ενότητες γίνεται μια περιγραφή για το πως λειτουργεί το εν λόγω λογισμικό στο παρασκήνιο αλλά και των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακρίβεια των υπολογιστικών αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία (βλ. Κεφάλαιο 3). Η γνώση των παραμέτρων αυτών είναι απαραίτητη και δίνουν την ικανότητα στον χρήστη να ορίσει με σωστό τρόπο τη φυσική του προβλήματος ενώ τελικά, τον οδηγούν στην απόκτηση αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Επιπλέον, γίνεται ο ορισμός του προβλήματος των διάφορων γεωμετριών του στροβίλου Wells που μελετήθηκαν εντός του λογισμικού του ANSYS. Παρουσιάζονται δηλαδή, τόσο τα υπολογιστικά πλέγματα που δημιουργήθηκαν όσο και οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να, μελετηθεί το πεδίο ροής διαμέσου αυτού με τη χρήση των υπολογιστικών προσομοιώσεων.

2.1 Διέπουσες Εξισώσεις

Γενικά, η ανάλυση με την χρήση των CFD μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους επίλυσης. Η πιο κοινή μέθοδος, μάλιστα σ' αυτήν βασίζεται και ο λύτης που

χρησιμοποιείται στην υπολογιστική ανάλυση της παρούσας εργασίας (CFX), είναι η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων. Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική, η περιοχή προς μελέτη διαιρείται σε μικρές υποπεριοχές, οι οποίες καλούνται όγκοι ελέγχου. Οι εξισώσεις Navier-Stokes μαζί με την εξίσωση της συνέχειας και την διατήρηση της ενέργειας καθώς και οι επιπρόσθετες εξισώσεις των μοντέλων τύρβης διακριτοποιούνται και επιλύονται επαναληπτικά για κάθε τέτοιο όγκο ελέγχου. Με τον τρόπο αυτόν παρέχεται μια προσεγγιστική τιμή της κάθε μεταβλητής σε συγκεκριμένα σημεία καθ' όλη την έκταση του υπολογιστικού χωρίου, δίνοντας έτσι μια πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς της ροής.

Προκειμένου να γίνουν απολύτως κατανοητές οι εξισώσεις που διέπουν το πεδίο ροής και σύμφωνα με τις οποίες επιλύονται τα χαρακτηριστικά της ροής σε ένα υπολογιστικό χωρίο χρησιμοποιείται ένας εξαεδρικός όγκος ελέγχου (Σχήμα 2.1). Σημειώνεται πως η εν λόγω ανάλυση γίνεται σε μακροσκοπική κλίμακα, δηλαδή το μέγεθος του όγκου που μελετάμε ξεπερνάει το 1 μm . Σε τέτοιες κλίμακες η μοριακή δομή της ύλης και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων μπορούν να αγνοηθούν. Επίσης πρέπει να σημειωθεί πως για την διατύπωση των αυτών εξισώσεων χρησιμοποιούνται οι σχέσεις με τους συμβολισμούς που παρέχει το εγχειρίδιο του CFX έτσι ώστε, η ανάλυση να πραγματοποιηθεί αναφορικά με το λογισμικό που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία.



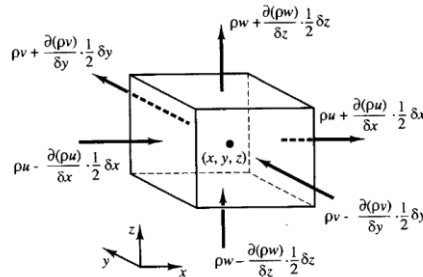
Σχήμα 2.1: Όγκος ελέγχου

Οι έξι έδρες του όγκου ελέγχου σημειώνονται στο παραπάνω σχήμα με N,S,E,W,T και B αναφορικά με τη Βόρεια, τη Νότια, την Ανατολική και τη Δυτική πλευρά του κύβου καθώς και με την Κορυφή και την Βάση αυτού, αντίστοιχα. Επίσης, δίνονται οι θετικές διευθύνσεις κατά μήκος των αξόνων. Το κέντρο του κύβου βρίσκεται στη θέση (x,y,z) . Ο υπολογισμός των μεταβολών της μάζας, της ορμής και της ενέργειας εξαιτίας της ροής του ρευστού διαμέσου των συνόρων του παραπάνω όγκου ελέγχου και ενδεχομένως, λόγω των αιτιών μεταβολής αυτών εντός του όγκου ελέγχου, οδηγεί στη διατύπωση των εξισώσεων που εκφράζουν τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής.

2.1.1 Εξίσωση διατήρησης της μάζας

Ακολουθώντας την παραπάνω λογική και γνωρίζοντας ότι η αρχή διατήρησης της μάζας απαιτεί, σ' έναν στοιχειώδη όγκο $\delta x \delta y \delta z$, το αλγεβρικό σύνολο της μάζας που περνάει

από τις επιφάνειες του όγκου αυτού να είναι μηδέν, μπορεί να διατυπωθεί η εξίσωση της συνέχειας για τρισδιάστατη συμπίεστη ροή στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Ο όγκος ελέγχου που απεικονίζει τον ρυθμό ροής της μάζας εντός του όγκου ελέγχου στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Όγκος ελέγχου για την εξίσωση της συνέχειας

Εξισώνοντας λοιπόν το ρυθμό αύξησης της μάζας μέσα στον όγκο ελέγχου με τον ρυθμό ροής της μάζας εντός αυτού και διαιρώντας με τον όγκο του στοιχείου που μελετάμε, $\delta x \delta y \delta z$, καταλήγουμε στην εξίσωση της συνέχειας,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0$$

όπου \mathbf{U} το διάνυσμα της ταχύτητας στην κάθε διεύθυνση.

Η παραπάνω εξίσωση όπως είπαμε αφορά την αρχή διατήρησης της μάζας στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων για ένα συμπίεστο ρευστό. Ωστόσο, στην παρούσα διπλωματική εργασία, η ανάλυση του πεδίου ροής διαμέσου του στροβίλου Wells έγινε με τη θεώρηση ότι το ρευστό είναι ασυμπίεστο. Λόγω των σχετικά χαμηλών ταχυτήτων (χαμηλοί αριθμοί Reynolds) και πιέσεων που δύναται να παρουσιαστούν στο πεδίο ροής ανάντη και κατόντη του στροβίλου, η υπόθεση ότι η πυκνότητα του αέρα παραμένει σταθερή στο χώρο και στο χρόνο είναι αρκετά λογική. Στην περίπτωση αυτή, η εξίσωση της συνέχειας απλοποιείται στην παρακάτω,

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \Leftrightarrow \nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

2.1.2 Εξίσωση Navier-Stokes

Η εξίσωση Navier-Stokes στην ουσία εκφράζει την αρχή διατήρησης της ορμής. Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα η μεταβολή της ορμής ενός στοιχείου ρευστού ισούται με τη συνισταμένη των δυνάμεων που ενεργούν πάνω στο στοιχείο αυτό. Ο ρυθμός αύξησης της ορμής στις διευθύνσεις x, y και z , ανά μονάδα όγκου, δίνεται αντίστοιχα από τους παρακάτω όρους,

$$\rho \frac{D_u}{Dt} \quad \rho \frac{D_v}{Dt} \quad \rho \frac{D_w}{Dt}$$

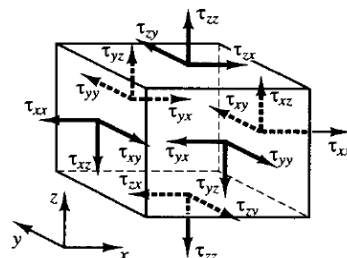
Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως το υπό μελέτη πρόβλημα της παρούσας εργασίας αποτελείται από ένα περιστρεφόμενο μέρος και συνεπώς, οι εξισώσεις που επιλύονται και οι οποίες αφορούν τη διατήρηση της ορμής επηρεάζονται απ' αυτή την περιστροφή. Όσον αφορά λοιπόν τις δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο στοιχείο διακρίνουμε δύο τύπους αυτών:

- οι επιφανειακές δυνάμεις: δυνάμεις πίεσης, δυνάμεις ιξώδους και
- οι δυνάμεις του σώματος: δυνάμεις βαρύτητας, φυγοκεντρικές δυνάμεις, δυνάμεις Coriolis.

Μπορεί να αντιληφθεί κανείς πως η επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes θα συμπεριλαμβάνει τους όρους των δυνάμεων λόγω περιστροφής του σώματος, οι οποίες ασκούνται στο σώμα και δημιουργούν ορμή όταν αυτό περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω . Αναφέρεται επίσης πως, η επιτάχυνση Coriolis και η επιτάχυνση λόγω φυγοκέντρισης είναι πολύ μεγαλύτερες από την επιτάχυνση της βαρύτητας και επομένως, η τελευταία μπορεί εύλογα να θεωρηθεί αμελητέα. Συνεπώς, αμελητέα μπορεί να θεωρηθεί και η ορμή που εισάγει η δύναμη της βαρύτητας. Οι δυνάμεις του σώματος ή αλλιώς εξωτερικές δυνάμεις είναι ανεξάρτητες των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής.

Είναι κοινή πρακτική στην εξίσωση διατήρησης της ορμής, η συνεισφορά των επιφανειακών δυνάμεων να επισημαίνεται με ξεχωριστούς όρους ενώ, η επίδραση των εξωτερικών δυνάμεων να συμπεριλαμβάνεται σε όρους πηγής ορμής.

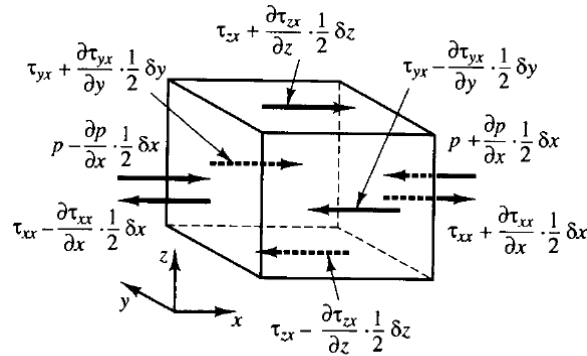
Οι τάσεις που εμφανίζονται στο στοιχείο ρευστού καθορίζονται σε όρους, πίεσης και των εννέα συνιστωσών των τάσεων που εμφανίζονται στο ρευστό λόγω του ιξώδους (Σχήμα 2.3). Όσον αφορά την πίεση (κάθετη τάση) συμβολίζεται με p . Οι τάσεις λόγω του ιξώδους συμβολίζονται με τ . Ο συνήθης συμβολισμός τ_{ij} υποδεικνύει τη διεύθυνση των τάσεων αυτών. Οι συμβολισμοί i και j στον όρο τ_{ij} υποδεικνύουν τη συνιστώσα της τάσης που ασκείται στη j διεύθυνση πάνω σε μια επιφάνεια κάθετη στην i διεύθυνση.



Σχήμα 2.3: Συνιστώσες τάσεων

Πριν αναπαραχθεί η γενική εξίσωση που περιγράφει την αρχή διατήρησης της ορμής μπορεί να θεωρηθεί αρχικά η διεύθυνση x των δυνάμεων που αναπτύσσονται λόγω της

δύναμης πίεσης και των συνιστωσών των τάσεων τ_{xx} , τ_{yx} και τ_{zx} (Σχήμα 2.4), προκειμένου να γίνει ακόμα πιο κατανοητό το τι διέπει η εξίσωση της ορμής σ' ένα στοιχείο ρευστού. Οι δυνάμεις που έχουν την ίδια κατεύθυνση με κάποιον άξονα λαμβάνουν θετικό πρόσημο ενώ, οι δυνάμεις με κατεύθυνση αντίθετη απ' αυτή του άξονα παίρνουν αρνητικό πρόσημο. Επομένως, το μέγεθος της δύναμης που ασκείται στη x διεύθυνση είναι το άθροισμα των συνιστωσών των δυνάμεων που δρούν στο στοιχείο του ρευστού σ' αυτήν τη διεύθυνση.



Σχήμα 2.4: Συνιστώσες τάσης στη διεύθυνση x

Εξισώνοντας λοιπόν, αυτά που έχουν προκύψει από το παραπάνω άθροισμα, σύν τον ρυθμό αύξησης εξαιτίας των πηγών ορμής, με το ρυθμό μεταβολής της ορμής στη διεύθυνση x του στοιχείου του ρευστού, όπως σημειώθηκε στην αρχή της παρούσας υποενότητας, εξαγάγετε η συνιστώσα x της εξίσωσης της ορμής. Δεν είναι δύσκολο να εξαχθούν και οι εξισώσεις της ορμής για τις άλλες δύο συνιστώσες, y και z . Για να μην επέλθει σύγχυση του αναγνώστη και για λόγους συμβατότητας με το εγχειρίδιο του CFX, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, διατυπώνεται μόνο η γενική μορφή της εξίσωσης διατήρησης της ορμής.

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + S_M$$

με \mathbf{U} το διάνυσμα της ταχύτητας στην κάθε διεύθυνση,

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}$$

και S_M οι παράγοντες δημιουργίας ορμής (πηγές ορμής-momentum sources).

Ο δυαδικός τελεστής $\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}$ δίνεται από τη σχέση, $\mathbf{U} \otimes \mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_x U_x & U_x U_y & U_x U_z \\ U_y U_x & U_y U_y & U_y U_z \\ U_z U_x & U_z U_y & U_z U_z \end{bmatrix}$

ενώ, ο τανυστής των τάσεων, $\boldsymbol{\tau}$, σχετίζεται με τον ρυθμό παραμόρφωσης με τη σχέση,

$$\boldsymbol{\tau} = \mu(\nabla\mathbf{U} + (\nabla\mathbf{U})^T) - \frac{2}{3}\delta\nabla \cdot \mathbf{U}$$

με μ να είναι το δυναμικό ιξώδες και δ η συνάρτηση δέλτα του Kronecker, η οποία δίνεται για διάφορες περιπτώσεις ίση με,

$$\delta_{ij} = 0, \quad \forall i \neq j$$

$$\delta_{ij} = 1, \quad \forall i = j$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο όρος πηγή της ορμής μπορεί να αναλυθεί σε όρους πηγής που αφορούν τη δημιουργία ορμής εξαιτίας των δυνάμεων Coriolis και των φυγοκεντρικών δυνάμεων. Τελικά, εξάγεται μια επιπλέον σχέση για τους επιπρόσθετους όρους πηγών ορμής, λόγω του περιστρεφόμενου πλαισίου αναφοράς που απαιτείται για την ανάλυση CFD του στροβίλου που μελετάτε στην παρούσα εργασία, με την παρακάτω μορφή.

$$S_{M,rot} = S_{Cor} + S_{cfg}$$

όπου:

$$S_{Cor} = -2\rho\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{U}$$

$$S_{cfg} = -\rho\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})$$

με \mathbf{r} να είναι το διάνυσμα θέσης και \mathbf{U} η σχετική ταχύτητα του περιστρεφόμενου πλαισίου (η οποία είναι η ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου για ένα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς).

Με την περαιτέρω ανάλυση των όρων πηγής και την ενσωμάτωση του παράγοντα της σχετικής ταχύτητας περιστροφής του πλαισίου, η εξίσωση της ορμής στην ανανεωμένη γενική της μορφή γράφεται ως:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = \nabla \cdot (-p\delta + \mu(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)) - 2\rho\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{U} - \rho\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})$$

Στην παρούσα φάση, εισάγεται σύμφωνα με τη θεωρία επίλυσης του λογισμικού (ANSYS) το εναλλακτικό μοντέλο περιστροφής το οποίο αλλάζει τον όρο μεταγωγής έτσι ώστε, να περιλαμβάνει την ταχύτητα του απόλυτου συστήματος αναφοράς, \mathbf{U}_{abs} , αντί της ταχύτητας του σχετικού συστήματος αναφοράς, \mathbf{U} . Η αλλαγή αυτή της μεταβλητής στον όρο της μεταγωγής απαιτεί μια τροποποίηση του αρχικού όρου πηγής ορμής, αναφορικά με τη δύναμη Coriolis (S_{Cor}). Συμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, η τελική μορφή της εξίσωσης της ορμής είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}_{abs}) = \nabla \cdot (-p\delta + \mu(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)) - 2\rho\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{U} - \rho\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})$$

Οι τρεις εξισώσεις του Navier-Stokes (μία για κάθε διεύθυνση) μαζί με την εξίσωση της συνέχειας, παράγουν τέσσερις εξισώσεις για κάθε σημείο. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την περίπτωση μελέτης των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής διαμέσου του στροβίλου Wells, είναι λογική η υπόθεση που γίνεται σε ότι αφορά την επιλογή ασυμπίεστου ρευστού (αέρα) στην συγκεκριμένη ανάλυση. Συνεπώς, κάτω από συνθήκες στρωτής ροής για ασυμπίεστη ροή οι άγνωστοι είναι επίσης τέσσερις, τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και η πίεση, και επομένως το σύστημα αυτών των εξισώσεων μπορεί θεωρητικά να λυθεί χωρίς την ανάγκη επίλυσης της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας με την επιπλέον χρήση μιας σχέσης που συνδέει την πυκνότητα με την πίεση και τη θερμοκρασία. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη, το πεδίο ροής είναι τυρβώδες.

Παρόλ' αυτά, προσθετικά με τα παραπάνω, η απλοϊκή υπόθεση ότι η ροή, εντός του πεδίου ροής που συγκαταλλέγεται και ο στρόβιλος Wells, είναι ισοθερμοκρασιακή σ' όλο το φάσμα της ανάλυσης, με τη μετάδοση της θερμότητας να μην λαμβάνει χώρα σ' αυτή (αδιαβατική διεργασία), οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επίλυση της εξίσωσης της ενέργειας στις τρεις κατευθύνσεις μπορεί να αμεληθεί και γι' αυτή την περίπτωση.

Κάτι τέτοιο θα απλοποιούσε πολύ την επίλυση των εξισώσεων εντός του υπολογιστικού χωρίου, με άμεσο όμως αντίκτυπο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στη μελέτη ενός περιστρεφόμενου συστήματος μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τυρβώδη κινητική ενέργεια. Με την υπόθεση ενός ισοθερμοκρασιακού πεδίου ροής και την παράβλεψη επίλυσης της εξίσωσης της ενέργειας, παρόλο που για τη μελέτη της τυρβώδους ροής χρησιμοποιούνται τα μοντέλα τύρβης (τα οποία θα αναληθούν σε επόμενη ενότητα), περιορίζουμε ένα τμήμα της ανάλυσης του πεδίου ροής, περιορίζοντας τις θερμοδυναμικές παραμέτρους της ροής. Οπότε, η συγκεκριμένη υπόθεση δεν ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη και θεωρήθηκε απαραίτητο, προκειμένου να μελετηθεί η ροή διαμέσου του στροβίλου, παράλληλα με τις εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της ορμής να προστεθούν στην επίλυση και οι εξισώσεις που περιγράφουν τη θερμοδυναμική της στροβιλομηχανής. Για τον λόγο αυτό, παραθέεται παρακάτω και η εξίσωση της ενέργειας.

2.1.3 Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

Η γενική μορφή της εξίσωσης της ενέργειας είναι όπως φαίνεται από την ακόλουθη σχέση,

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + S_E$$

όπου, h_{tot} η ολική ενθαλπία, σχετιζόμενη με την στατική ενθαλπία $h(T, p)$ βάσει της σχέσης:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2$$

Ο όρος $\nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau})$ αντιπροσωπεύει το έργο λόγω των τάσεων που οφείλονται στο ιξώδες ενώ, S_E είναι ένας όρος πηγής. Ο όρος $\mathbf{U} \cdot S_M$ αντιπροσωπεύει το έργο εξαιτίας των εξωτερικών πηγών ορμής και επί του παρόντος αγνοείται.

Προκειμένου να αναλύσει κανείς τη ροή σ' ένα περιστρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων το λογισμικό ANSYS ορίζει ένα επιπλέον μέγεθος που ονομάζεται ροθαλπία, I , η οποία αντικαθιστά την ολική ενθαλπία ενώ, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I = h_{stat} + \frac{1}{2}U^2 - \frac{1}{2}\omega^2 r^2$$

όπου, U η σχετική ταχύτητα του ρευστού με το περιστρεφόμενο πλαίσιο, r το διάνυσμα θέσης, $h_{stat} = c_p T$ η στατική ενθαλπία, με c_p να είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση και T η στατική θερμοκρασία.

Καθώς όμως έχει γίνει η θεώρηση του ασυμπίεστου ρευστού, δηλαδή η πυκνότητα παραμένει σταθερή με μια συγκεκριμένη τιμή, η μεταβολή της ενθαλπίας μπορεί να εξαχθεί από την παρακάτω καταστατική εξίσωση:

$$dh = c_p(T)dT + \frac{dp}{\rho}$$

όπου η θερμοχωρητικότητα είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας.

2.2 Μοντελοποίηση της τύρβης

Η τύρβη είναι ένα φαινόμενο μεγάλης σημασίας για πολλές περιοχές της επιστήμης και της μηχανικής των ρευστών. Οι τυρβώδεις ροές είναι ακόμη στα περισσότερα σημεία ανεξιχνίαστες ως προς τη φυσική τους αλλά και πολύπλοκες στη μελέτη και τις εφαρμογές τους. Γι' αυτό το λόγο η τύρβη αποτελεί ακόμη και σήμερα μέτωπο έρευνας και θεωρείται το άλυτο πρόβλημα της μηχανικής ρευστών. Οι τυρβώδεις ροές είναι μη μόνιμες ροές που έχουν ακανόνιστες διακυμάνσεις της ταχύτητας στις τρεις κατευθύνσεις, στο χώρο και στο χρόνο. Προκύπτουν όταν οι δυνάμεις αδράνειας του ρευστού γίνονται σημαντικές σε σχέση με τις δυνάμεις ιξώδους λόγω της απότομης κλίσης της ταχύτητας. Ο βασικός τρόπος για να διαχωρίσει κανείς εάν μια ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης είναι η στροβιλότητα του πεδίου. Οι τυρβώδεις ροές είναι ροές υψηλής στροβιλότητας. Αυτό επίσης έχει ως αποτέλεσμα στις στρωτές ροές να εμφανίζονται εν γένει μεγάλες δίνες και στις τυρβώδεις μικροδίνες. Επίσης, οι τυρβώδεις ροές είναι ροές μεγάλης διάχυσης. Οι τυχαίες, στοχαστικές κινήσεις ενός αερίου προκαλούν την ιξώδη διάχυση, τη θερμική

διάχυση και τη διάχυση της μάζας. Μια μικροδίνη μπορεί να μεταφέρει ρευστό από μια περιοχή χαμηλής ορμής σε ροή υψηλής ορμής. Απ' αυτό γίνεται σαφές ότι η τύρβη τείνει να αναμειξει ρευστό και επομένως έχει χαρακτήρα διάχυσης.

Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές δεν έχουν ακόμα ικανοποιητική ισχύ (μνήμη και ταχύτητα) ώστε να διαπραγματευτούμε τις τυρβώδεις ροές ως κατευθείαν λύση των εξισώσεων Navier-Stokes στη μη μόνιμη μορφή τους. Οι τυρβώδεις ροές σε πραγματικούς αριθμούς Reynolds καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος μηκών και χρονικών κλιμάκων ενώ γενικά, περιέχουν κλίμακες μήκους πολύ μικρότερες από του ελάχιστου πεπερασμένου όγκου που μπορεί πρακτικά να χρησιμοποιηθεί σε μια αριθμητική ανάλυση. Επομένως, η άμεση αριθμητική προσομοίωση (DNS-Direct Numerical Simulation) των τυρβώδων ροών απαιτεί άκρως καλή ποιότητα πλέγματος και τεράστια υπολογιστική ισχύ, η οποία είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την διαθέσιμη στο προβλεπόμενο μέλλον.

Προκειμένου λοιπόν να γίνει εφικτή η πρόβλεψη των επιδράσεων της τύρβης, ένα μεγάλο ποσοστό των ερευνών της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής επικεντρώθηκε σε μεθόδους που κάνουν χρήση των *μοντέλων τύρβης (turbulence models)*. Όπως μπορεί να καταλάβει κανείς, τα μοντέλα τύρβης αναπτύχθηκαν για να υπολογίσουν τα αποτελέσματα της τύρβης χωρίς την ανάγκη δημιουργίας πολύ καλών πλεγμάτων και χρήσης της άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης η οποία απαιτεί, όπως συζητήθηκε παραπάνω, απαγορευτικά μεγάλη υπολογιστική ισχύ.

Μια μέθοδος η οποία επιλύει τις εξισώσεις που διέπουν το πεδίο ροής για τις χρονικά μέσες τιμές των μεγεθών της ροής ενώ, οι όροι που αφορούν τη χρονικά μεταβαλλόμενη φύση της τυρβώδους ροής περιγράφονται με τη χρήση κατάλληλου μαθηματικού μοντελου (στατιστικά μοντέλα τύρβης), είναι και η μέθοδος επίλυσης των χρονικά μέσων εξισώσεων Navier-Stokes κατά Reynolds (*Reynolds- Averaged Navier-Stokes-RANS*). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται και στη παρούσα εργασία για την ανάλυση του πεδίου ροής διαμέσου του στροβίλου Wells με τη χρήση υπολογιστικών προσομοιώσεων ενώ, περιγράφεται αναλυτικά σε παρακάτω ενότητα. Επίσης, αναλύεται το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε για το "κλεισιμο" των εξισώσεων RANS.

2.2.1 Στατιστικά μοντέλα τύρβης

Όταν εξετάζονται κλίμακες χρόνου πολύ μεγαλύτερες των κλιμάκων χρόνου των τυρβώδων διακυμάνσεων, η τυρβώδης ροή μπορεί να ειπωθεί ότι εμφανίζει χαρακτηριστικά μέσων όρων, με μια επιπρόσθετη χρονικά μεταβαλλόμενη συνιστώσα διακύμανσης.

Γενικά, τα μοντέλα τύρβης τροποποιούν τις αυθεντικές εξισώσεις Navier-Stokes εισάγοντας μέσους και χρονικά εξαρτώμενους όρους έτσι ώστε, να δημιουργήσουν τις

εξισώσεις RANS. Αυτές οι εξισώσεις απεικονίζουν μόνο τις μέσες ποσότητες της ροής, όταν μοντελοποιούνται οι επιδράσεις της τύρβης χωρίς να χρειάζεται η επίλυση των διακυμάνσεων της. Όλα τα επίπεδα του τυρβώδους πεδίου μοντελοποιούνται. Τα μοντέλα τύρβης τα οποία είναι βασισμένα στις εξισώσεις RANS είναι γνωστά ως *Στατιστικά Μοντέλα Τύρβης*, εξαιτίας της διαδικασίας στατιστικού μέσου όρου που χρησιμοποιείται για να ληφθούν οι εξισώσεις.

Η προσομοίωση με τη χρήση των εξισώσεων RANS μειώνει αισθητά την υπολογιστική ισχύ, σε σύγκριση με τις άμεσες αριθμητικές μεθόδους (DNS), και γενικά υιοθετούνται για πρακτικούς υπολογισμούς στον τομέα της μηχανικής των ρευστών. Παρόλ' αυτά, η διαδικασία δημιουργίας μέσων όρων εισάγει επιπλέον άγνωστους όρους, οι οποίοι περιέχουν γινόμενα κυμαινόμενων ποσοτήτων και οι οποίοι δρουν ως πρόσθετες τάσεις πάνω στο ρευστό. Αυτοί οι όροι καλούνται "*turbulent*" ή "*Reynolds stresses*" και είναι δύσκολο να προσδιοριστούν άμεσα, γεγονός που εισάγει επιπλέον άγνωστους όρους.

Οι "*Reynolds (turbulent) stresses*" χρειάζεται να μοντελοποιηθούν μέσω πρόσθετων εξισώσεων από γνωστές ποσότητες, προκειμένου να επιτευχθεί το "κλείσιμο" του συστήματος των εξισώσεων. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να υπάρχει ένας σαφής αριθμός εξισώσεων για όλους τους αγνώστους, συμπεριλαμβανομένου και των όρων που εισήχθησαν κατά τη διαδικασία δημιουργίας των μέσων όρων. Οι εξισώσεις που επιλέγονται κάθε φορά (μοντέλα τύρβης) για το "κλείσιμο" του συστήματος των εξισώσεων χαρακτηρίζουν σε πρώτο στάδιο τον τύπο του μοντέλου τύρβης που θα χρησιμοποιηθεί. Έτσι, ανάλογα με τον αριθμό των επιπλέον εξισώσεων μεταφοράς που επιλύονται για τη μοντελοποίηση της τύρβης, τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στο σύστημα των εξισώσεων RANS μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε, μοντέλα μηδέν εξισώσεων, μίας εξίσωσης, δύο εξισώσεων και επτά εξισώσεων. Όσο περισσότερες είναι οι επιπλέον εξισώσεις τόσο μεγαλύτερο είναι το κόστος σε υπολογιστική ισχύ και σε απαίτηση ενός πλέγματος καλύτερης ποιότητας

2.2.1.1 Εξισώσεις Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

Όπως περιγράφηκε παραπάνω, τα μοντέλα τύρβης εισάγουν στις ποσότητες των ήδη αναλυμένων εξισώσεων ένα μέσο και ένα χρονικά μεταβαλλόμενο όρο, προκειμένου να επιλύσουν τις τροποποιημένες εξισώσεις μεταφοράς. Κάθε μεταβλητή των αυθεντικών εξισώσεων Navier-Stokes δηλαδή, αντικαθίσταται από το άθροισμα του μέσου όρου της με τη διακύμανση της. Συνεπώς, κάθε φορά που θα αναφέρεται μια μεταβλητή από εδώ και στο εξής θα ερμηνεύεται με την παραπάνω λογική. Για παράδειγμα, η ταχύτητα U_i μπορεί να χωριστεί σε μια συνιστώσα που εκφράζει το μέσο όρο της, \bar{U}_i , και σε μια χρονικά εξαρτώμενη συνιστώσα u_i , γράφοντας,

$$U_i = \bar{U}_i + u_i$$

με τη συνιστώσα που εκφράζει το μέσο όρο της ταχύτητας να δίνεται από τη σχέση,

$$\bar{U}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U_i dt$$

όπου, Δt είναι μια αρκετά μεγάλη χρονική κλίμακα σε σχέση με τις διακυμάνσεις της τύρβης αλλά, μικρή σχετικά με τη χρονική κλίμακα στην οποία επιλύονται οι εξισώσεις.

Ο περαιτέρω σχολιασμός των εξισώσεων RANS γίνεται με την υπόθεση ότι οι διακυμάνσεις της πυκνότητας είναι αμελητέες. Η ποσότητα δηλαδή της πυκνότητας είναι ίση με τη μέση τιμή της και ουσιαστικά το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο. Έτσι, απλοποιούμε τη διαδικασία αποφεύγοντας να αναλύσουμε τη συμπιεστή ροή και τη διαδικασία "Favre-averaging". Ωστόσο, για τη διατύπωση των εν λόγω τροποποιημένων εξισώσεων ο όρος της μεταβολής της πυκνότητας με το χρόνο δεν απαλείφεται.

Αντικαθιστώντας λοιπόν, τους μέσους όρους των ποσοτήτων στις αρχικές εξισώσεις μεταφοράς προκύπτουν οι εξισώσεις RANS, η μορφή των οποίων δίνεται παρακάτω.

$$\text{Εξίσωση συνέχειας: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0$$

$$\text{Εξίσωση της ορμής: } \frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) + S_M$$

όπου, τ , είναι ο τανυστής των τάσεων συνεκτικότητας (συμπεριλαμβανομένου τόσο των κάθετων όσο και των διατμητικών συνιστωσών της τάσης).

Στην ουσία η εξίσωση της συνέχειας δεν έχει αλλάξει αλλά, οι εξισώσεις της ορμής περιέχουν πλέον και όρους τυρβώδους διάχυσης πέραν των όρων διάχυσης λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού. Οι αυτοί επιπρόσθετοι όροι καλούνται τάσεις Reynolds, $\rho \overline{u_i u_j}$, και προκύπτουν από τον μη γραμμικό όρο συναγωγής (αριστερό μέλος) των αρχικών εξισώσεων, πριν την εισαγωγή των μέσων όρων και των διακυμάνσεων. Αντικατοπτρίζουν το γεγονός ότι, η μεταφορά με συναγωγή εξαιτίας των διακυμάνσεων της τυρβώδους ταχύτητας δρά για την ενίσχυση της ανάμιξης του ρευστού που προκλήθηκε από τις θερμικές διακυμάνσεις σε μοριακό επίπεδο. Σε υψηλούς αριθμούς Reynolds, οι διακυμάνσεις της τυρβώδους ταχύτητας συμβαίνουν σε μια κλίμακα μήκους πολύ μεγαλύτερη από την μέση ελεύθερη διαδρομή των θερμικών διακυμάνσεων, έτσι ώστε οι τυρβώδεις ροές να είναι πολύ μεγαλύτερες από τις ροές σε μοριακό επίπεδο.

Η εξίσωση της ενέργειας από την ανάλυση των χρονικών μέσων τιμών του Reynolds είναι:

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h_{tot}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j h} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} [U_i (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j})] + S_E$$

Αυτή η εξίσωση περιέχει έναν επιπρόσθετο τυρβώδη όρο, $\rho \overline{u_j h}$.

Ο όρος $\frac{\partial}{\partial x_j} [U_i (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j})]$ της παραπάνω εξίσωσης, είναι ο όρος του ιξώδους έργου και ο οποίος μπορεί να συμπερηληφθεί στην εξίσωση μόνο με απόφαση του χρήστη του λογισμικού. Στην παρούσα εργασία η επίλυση της εξίσωσης της ενέργειας έγινε συμπεριλαμβάνοντας τον όρο αυτό.

Η μέση ολική ενθαλπία δίνεται από τη σχέση:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U_i U_i + k$$

Παρατηρείται και σημειώνεται πως η εξίσωση της ολικής ενθαλπίας περιέχει τη συνεισφορά της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, k , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i^2}$$

Σε περιστρεφόμενα συστήματα, όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, γίνεται χρήση της έννοιας της ροθαλπίας, I , η οποία αντικαθιστά την ολική ενθαλπία στην εξίσωση της ενέργειας.

Παρόμοια, ένα οποιοδήποτε μη βαθμωτό μέγεθος Φ μπορεί να αναλυθεί σε μια μέση συνιστώσα, $\overline{\Phi}$, και στη διακύμανση του, φ . Οπότε μπορεί να εξαχθεί η τροποποιημένη εξίσωση της επιπρόσθετης μεταβλητής με ανάλογο τρόπο μ' αυτόν που έχει παρουσιαστεί.

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j \varphi} \right) + S_\Phi$$

όπου, $\rho \overline{u_j \varphi}$, ο όρος τυρβώδους διάχυσης του βαθμωτού μεγέθους.

2.2.2 Μοντέλα τυρβώδης ιξώδους (Eddy Viscosity Turbulence Models)

Μια επιπλέον κατηγοριοποίηση των παραπάνω μοντέλων, πέραν αυτής των επιπλέον εξισώσεων που εισάγουν στο σύστημα, τα χωρίζει σε μοντέλα τυρβώδης ιξώδους (Eddy Viscosity Turbulence Models) και σε μοντέλα τάσεων Reynolds (Reynolds Stress Turbulence Models).

Στην κατηγορία των μοντέλων αυτών, θεωρείται πως η τύρβη αποτελείται από μικρές δίνες, οι οποίες συνεχώς σχηματίζονται και συνεχώς καταστρέφονται και στις οποίες οι

τάσεις Reynolds θεωρούνται ανάλογες των κλίσεων της μέσης ταχύτητας. Η πρόταση αυτή ορίζει στην ουσία το μοντέλο τυρβώδης ιξώδους.

Η υπόθεση αυτή υποθέτει πως οι τάσεις Reynolds μπορούν να συσχετιστούν με τις βαθμίδες της μέσης ταχύτητας ενώ, το τυρβώδες ιξώδες με την υπόθεση της κλίσης της διάχυσης, με έναν τρόπο ανάλογο μ' αυτόν της σχέσης μεταξύ των τανυστών των τάσεων και των παραμορφώσεων ενός Νευτώνιου ρευστού σε στρωτή ροή. Οι συγκεκριμένες υποθέσεις επομένως, μπορούν να δωθούν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right)$$

και

$$-\rho \overline{u_i \phi} = \Gamma_t \frac{\partial \phi}{\partial x_i}$$

όπου, μ_t είναι το τυρβώδες ιξώδες, δηλαδή το μέτρο που σχετίζεται με τις τάσεις Reynolds και Γ_t η τυρβώδη διάχυση, η οποία μπορεί να δωθεί από την σχέση,

$$\Gamma_t = \frac{\mu_t}{Pr_t}$$

με Pr_t να είναι ο τυρβώδης αριθμός κατά Prandtl. Οι τυρβώδεις διαχύσεις επομένως, μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας τον τυρβώδη αριθμό Prandtl.

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να εκφράσουν τις τυρβώδεις διακυμάνσεις σε όρους εξισώσεων των μέσων μεταβλητών μόνο εάν το τυρβώδες ιξώδες, μ_t , είναι γνωστό. Τόσο τα μοντέλα k-ε όσο και τα μοντέλα k-ω, τα οποία είναι μοντέλα δύο εξισώσεων, χρησιμοποιούν αυτή τη μεταβλητή.

Στηριζόμενοι σ' αυτήν την υπόθεση, οι χρονικά μέσες εξισώσεις Reynolds της ορμής αλλά και οι εξισώσεις μεταφοράς των βαθμωτών μεγεθών γίνονται:

$$\text{Εξίσωση ορμής: } \frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M$$

όπου, S_M είναι το άθροισμα των εξωτερικών δυνάμεων (δυνάμεων σώματος) και μ_{eff} είναι το ενεργό ιξώδες, το οποίο αντικαθιστά το μοριακό ιξώδες του ρευστού και το οποίο δίνεται από τη σχέση, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$. Η τροποποιημένη πίεση p' δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k}$$

Βάσει του όρου $\frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k}$ η τροποποιημένη πίεση, p' , περιλαμβάνει πλέον την απόκλιση της ταχύτητας δηλαδή, την επίδραση της τύρβης. Ωστόσο, η ποσότητα αυτή αμελείται στο ANSYS CFX. Η παράβλεψη του όρου αυτού είναι απολύτως σωστή μόνο αν το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο, υπόθεση που έχει ληφθεί κατά την ανάλυση στη συγκεκριμένη εργασία.

Ο δεύτερος όρος στο δεξί μέρος της εξίσωσης που δίνει την τροποποιημένη πίεση εξαρτάται από την επιπλέον παράμετρο "*pressure value option*", η οποία παίρνει τρεις διαφορετικές τιμές σύμφωνα με το εγχειρίδιο του ANSYS CFX και είναι στην κρίση του χρήστη ποια απ' αυτές θα επιλεγεί. Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε πως η στατική πίεση p είναι περίπου ίση με την τροποποιημένη p' . Αυτό γιατί, η επιλογή κάποιας άλλης, εκ των εναπομείναντων, επιλογής ίσως παρουσιάσει δυσμενέστερη αριθμητική συμπεριφορά. Αναφορικά, όσον αφορά τις δύο επιλογές που απορρίφθηκαν, η πρώτη εξάγει τη στατική πίεση από την παραπάνω εξίσωση ενώ, η δεύτερη υπολογίζει την p' χωρίς να λάβει υπόψη της τον όρο, $\frac{2}{3} \rho k$. Για την υπόθεση του ασυμπιέστου ρευστού ίσως η τελευταία επιλογή να είναι μαθηματικά ταυτόσημη με την επιλογή που έγινε στην παρούσα εργασία αλλά, δεν προτιμήθηκε η χρήση της διότι ίσως διέφερε αριθμητικά.

Συνεχίζοντας, η εξίσωση Reynolds της ενέργειας γίνεται:

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h_{tot}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} [U_i (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j})] + S_E$$

Σημειώνεται πως εάν η ενθαλπία εξαρτάται από μεταβλητές στις οποίες δεν συμπεριλαμβάνεται η μεταβλητή της θερμοκρασίας τότε, η μετατροπή του όρου της μοριακής διάχυσης ίσως είναι ανακριβής. Παρόλ' αυτά όμως, ο όρος της τυρβώδους διάχυσης είναι σωστός, αφού έχει προέλθει από την υπόθεση της τυρβώδους διάχυσης. Προσθετικά, για μια τέτοια περίπτωση, εφόσον η τυρβώδης διάχυση είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη της μοριακής διάχυσης, τα σφάλματα που μπορούν να υπάρξουν είναι αμελητέα. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία δεν υπάρχει λόγος ανησυχίας περί τέτοιων σφαλμάτων καθώς η ενθαλπία εξαρτάται και από τη θερμοκρασία, απόρροια και πλεονέκτημα του ότι δεν επελέγει ένα ισοθερμοκρασιακό πεδίο ροής.

Παρόμοια, για οποιαδήποτε επιπρόσθετη μεταβλητή (μη βαθμωτό μέγεθος), η μέση χρονικά εξίσωση μεταφοράς Reynolds γίνεται:

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\Phi + \frac{\mu_t}{\sigma_\Phi} \right) \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} + S_\Phi$$

Παρακάτω περιγράφονται τα μοντέλα τύρβης που ακολουθούν την παραπάνω λογική, με σκοπό να αιτιολογηθεί η επιλογή ενός απ' αυτών. Η ανάλυση ωστόσο, που αφορά και την

αναπαραγωγή των επιπλέον εξισώσεων, θα επικεντρωθεί στα μοντέλα τύρβης που θεωρήθηκαν καταλληλότερα για το πεδίο ροής που συναντάται στην παρούσα εργασία. Το μοντέλο τύρβης που επιλέχθηκε για το "κλεισιμο" του συστήματος των μέσων χρονικά εξισώσεων Reynolds είναι το μοντέλο δύο εξισώσεων k- ω SST.

2.2.2.1 Μοντέλα τύρβης μηδέν εξισώσεων

Τα πιο απλά μοντέλα τυρβώδης ιξώδους (eddy viscosity models) είναι αυτά που χαρακτηρίζονται ως μοντέλα μηδέν εξισώσεων. Αμέσως αντιλαμβάνεται κανείς πως δεν απαιτείται η επίλυση επιπλέον εξισώσεων μεταφοράς με τη χρήση αυτών των μοντέλων τύρβης. Υπολογίζουν μια μοναδική τιμή για το τυρβώδες ιξώδες, μ_t , εξαγόμενη από τη μέση ταχύτητα τύρβης και μια γεωμετρική κλίμακα μήκους, χρησιμοποιώντας μια εμπειρική σχέση. Πιο συγκεκριμένα, το τυρβώδες ιξώδες μοντελοποιείται ως το γινόμενο μιας κλίμακας τυρβώδους ταχύτητας, U_t , και μιας τυρβώδους κλίμακας μήκους, l_t , όπως προτάθηκε από τον Prandtl και τον Kolmogorov. Χρησιμοποιείται δηλαδή, μια αλγεβρική εξίσωση για να υπολογιστεί η κατανομή του ιξώδους λόγω των μικροδινών της τύρβης. Συνεπώς, προκύπτει μια σταθερή τιμή του τυρβώδους ιξώδους για όλο το χωρίο όπου αλληλεπιδρά το ρευστό.

$$\mu_t = \rho f_\mu U_t l_t$$

όπου, f_μ , είναι μια αδιάστατη σταθερά αναλογίας.

Όπως γίνεται κατανοητό τα παραπάνω μοντέλα είναι αρκετά απλοϊκά και δε συνίσταται η χρήση τους σε πολύπλοκες τρισδιάστατες ροές. Παρόλ' αυτά, είναι αρκετά αποδοτικά για απλούστερες γεωμετρίες.

2.2.2.2 Μοντέλα τύρβης μίας εξίσωσης

Ο επιλυτής που χρησιμοποιούμε στην παρούσα εργασία υποστηρίζει μόνο ένα μοντέλο με μία επιπλέον εξίσωση μεταφοράς και είναι αυτό που αναπτύχθηκε από τον Menter. Προέρχεται άμεσα από το μοντέλο k- ϵ και γι' αυτό επομένως ονομάστηκε (k- ϵ)_{1E}. Κατά γενική ομολογία, ούτε αυτά τα μοντέλα είναι ικανά να ανταποκριθούν σε προβλήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες λόγω του ότι αδυνατούν να ανταποκριθούν στη μεταφορά των ταχέως μεταβαλλόμενων όρων ενώ, ο προσδιορισμός της κλίμακας μήκους της τύρβης καθίσταται δύσκολος. Η καταλληλότητα τους περιορίζεται στη μελέτη ροών γύρω από αεροτομές και σε απλές γεωμετρίες στροβιλομηχανών.

2.2.2.3 Μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων

Τα μοντέλα δύο εξισώσεων χαίρουν ευρέας χρήσης, αφού παρέχουν αρκετά ακριβή αποτελέσματα με σχετικά μικρό υπολογιστικό κόστος. Είναι ανεπτυγμένα με υψηλότερο

βαθμό πολυπλοκότητας συγκριτικά με τα μοντέλα μηδέν εξισώσεων. Τόσο η ταχύτητα όσο και η κλίμακα μήκους της τύρβης επιλύονται με τη χρήση δύο επιπλέον εξισώσεων μεταφοράς.

Τα δύο εξισώσεων μοντέλα τύρβης χρησιμοποιούν κι αυτά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, την υπόθεση κλίσης της διάχυσης προκειμένου να συσχετίσουν τις τάσεις Reynolds με τις βαθμίδες της μέσης ταχύτητας της τύρβης και το τυρβώδες ιξώδες. Το τυρβώδες ιξώδες μοντελοποιείται ως το γινόμενο της τυρβώδους ταχύτητας και της κλίμακας μήκους της τύρβης. Ωστόσο, η διαφορά τους από τα μοντέλα τύρβης που έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής είναι πως, η κλίμακα ταχύτητας της τύρβης υπολογίζεται από την κινητική ενέργεια της τύρβης, η οποία παρέχεται με την επίλυση των επιπλέον εξισώσεων μεταφοράς ενώ, η κλίμακα μήκους της τύρβης εκτιμάται από δύο ιδιότητες του τυρβώδους πεδίου, την τυρβώδη κινητική ενέργεια (k) και το ρυθμό καταστροφής της (ϵ) ή τη συχνότητα της τύρβης (ω). Ο ρυθμός καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας καθώς και η συχνότητα της τύρβης εξάγονται επίσης με την επίλυση των επιπλέον εξισώσεων μεταφοράς.

2.2.2.3.1 Μοντέλο τύρβης k-ε

Στο μοντέλο αυτό, το " k " (μονάδες: L^2T^{-2}) αντιπροσωπεύει την κινητική ενέργεια της τύρβης και ορίζεται ως η απόκλιση των διακυμάνσεων της ταχύτητας ενώ, το " ϵ " (μονάδες: L^2T^{-3}) δηλώνει τη σκέδαση της τύρβης (η τιμή στην οποία οι διακυμάνσεις της ταχύτητας σταματούν να υπάρχουν) . Οπότε, οι δύο επιπλέον εξισώσεις που εισάγει το μοντέλο αυτό, προκειμένου να λυθεί το σύστημα των χρονικά μέσων εξισώσεων Reynolds, είναι η εξίσωση για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και η εξίσωση για τον ρυθμό καταστροφής της.

2.2.2.3.1.1 Μοντέλο τύρβης RNG k-ε

Το μοντέλο αυτό αποτελεί μια τροποποίηση του μοντέλου k-ε και βασίζεται στην ανάλυση επανακανονικοποίησης των εξισώσεων Navier-Stokes ώστε, να λαμβάνει υπόψη την επίδραση μικρότερων κλιμάκων κίνησης. Οι εξισώσεις μεταφοράς για τη δημιουργία και την καταστροφή της τύρβης παραμένουν οι ίδιες με του αρχικού μοντέλου (k-ε) αλλά, οι σταθερές των επιπλέον εξισώσεων διαφέρουν ή αντικαθίστανται από άλλες.

2.2.2.3.2 Μοντέλο τύρβης k-ω

Ένα από τα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιεί τους υπολογισμούς των χαρακτηριστικών της ροής κοντά στο τοίχωμα, για χαμηλούς αριθμούς Reynolds. Το μοντέλο αυτό δεν περιλαμβάνει τις πολύπλοκες μη γραμμικές εξισώσεις που απαιτεί το μοντέλο k-ε και επομένως, είναι πιο ακριβές και πιο ισχυρό-εύρωστο. Το μοντέλο k-ε, κάτω από συνθήκες χαμηλών αριθμών Reynolds, τυπικά θα απαιτούσε μια πάρα πολύ υψηλή ανάλυση του οριακού στρώματος (ροή κοντά στο

τοίχωμα), η οποία θα επιτυγχανόταν για ένα $y^+ < 0.2$. Αντίθετα, το μοντέλο k- ω , για τις ίδιες συνθήκες, θα απαιτούσε τουλάχιστον $y^+ < 2$. Η έννοια του y^+ θα αναλυθεί παρακάτω ωστόσο, σημειώνεται σ' αυτό το σημείο ότι, η απαίτηση για $y^+ < 0.2$ συνεπάγεται δραματική αύξηση του υπολογιστικού κόστους σε όρους χρόνου και μνήμης. Το μοντέλο k- ω επιτρέπει την ομαλή μετάβαση από μια μορφή του μοντέλου για χαμηλούς αριθμούς Reynolds σε μια διατύπωση που βασίζεται σε συναρτήσεις τοιχώματος. Το παραπάνω πλεονέκτημα που παρέχεται με τη χρήση ενός μοντέλου k- ω , είναι το βασικό χαρακτηριστικό που στην ουσία οδήγησε στην επιλογή ενός τέτοιου μοντέλου τύρβης για την ανάλυση που πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία.

Τα μοντέλα k- ω υποθέτουν ότι το τυρβώδες ιξώδες σχετίζεται με την κινητική ενέργεια της τύρβης (k) και τη συχνότητα της τύρβης (ω) μέσω της σχέσης:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}$$

όπου,

$$\omega = \frac{\varepsilon}{\beta' k}$$

με β' μια σταθερά που δίνεται παρακάτω.

Το πρώτο μοντέλο k- ω αναπτύχθηκε από τον Wilcox. Επιλύει δύο εξισώσεις μεταφοράς, μια για την κινητική ενέργεια της τύρβης, k, και μία για τη συχνότητα της τύρβης, ω . Ο τανυστής των τάσεων εξάγεται με την υπόθεση του τυρβώδες ιξώδους (eddy viscosity concept).

$$\text{Εξίσωση} - k: \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb}$$

$$\text{Εξίσωση} - \omega: \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b}$$

Η πυκνότητα, ρ , και το διάνυσμα της ταχύτητας, U , αντιμετωπίζονται ως γνωστές ποσότητες. Οι όροι P_{kb} και $P_{\omega b}$ είναι αντίστοιχα οι πηγές κινητικής ενέργειας και συχνότητας αυτής που οφείλονται στην επίδραση των δυνάμεων που ασκούνται στο ρευστό λόγω κίνησης του ρευστού εξαιτίας της μεταβολής της πυκνότητας του, είτε σύμφωνα με το μοντέλο που ακολουθεί την προσέγγιση του Boussinesq (Boussinesq model), σύμφωνα με το οποίο η πυκνότητα του ρευστού μεταβάλλεται λόγω μικρών μεταβολών της θερμοκρασίας, είτε σύμφωνα με το μοντέλο όπου η μεταβολή της πυκνότητας του ρευστού μπορεί να είναι συνάρτηση των μεταβολών της πίεσης, της θερμοκρασίας ή άλλων μεταβλητών (full buoyancy model). Οι όροι αυτοί εξαρτώνται από

το χρησιμοποιούμενο μοντέλο ενώ, περιλαμβάνονται στην εξίσωση k μόνο εάν ο χρήστης του λογισμικού ορίσει μια ροή όπου η πυκνότητα μεταβάλλεται σύμφωνα με έναν από τους παραπάνω τρόπους (buoyant flow) και παράλληλα επιλέξει μια εκ των επιλογών "Production" και "Production and Dissipation", που προκύπτουν από την επιλογή "Buoyancy Turbulence". Στην παρούσα εργασία, όπως έχουμε αναφέρει, έχει χρησιμοποιηθεί η υπόθεση του ασυμπίεστου ρευστού οπότε, η μεταβολή της πυκνότητας είναι μηδενική και δεν επηρεάζει την κίνηση του ρευστού με την έννοια του ότι ασκεί σ' αυτό κάποια δύναμη άνωσης. Στην πραγματικότητα, ακόμα και αν η ροή διαμέσου του στροβίλου Wells ήταν συμπιεστή, η φυσική του προβλήματος δεν περιλαμβάνει τέτοιου είδους δραστηριότητες. Επομένως, οι αυτοί όροι στην παρούσα μελέτη δεν περιλαμβάνονται στις εξισώσεις k και ω του μοντέλου. Ωστόσο, για να υπάρχει μια ολοκληρωμένη άποψη του μοντέλου τύρβης που επιλέχθηκε και το οποίο βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων k και ω παραθέτονται οι σχέσεις που δίνουν τους εν λόγω όρους. Για τα μοντέλα τύρβης k - ω λοιπόν, ο όρος P_{kb} δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{kb} = -\frac{\mu_t}{\rho\sigma_\rho} g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

εάν χρησιμοποιείται το "full buoyancy model" ενώ, εάν χρησιμοποιείται το "Boussinesq buoyancy model" τότε, ο παραπάνω όρος δίνεται από τη σχέση,

$$P_{kb} = -\frac{\mu_t}{\rho\sigma_\rho} \rho\beta g_i \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

Ο όρος $P_{\omega b}$ εξάγεται από τους όρους P_{kb} και $P_{\varepsilon b}$ σύμφωνα με την τροποποίηση του P_{kb} , εισάγοντας το τυρβώδες ιξώδες, μ_t , του μοντέλου k - ω . Ο όρος $P_{\varepsilon b}$ είναι ο όρος πηγής της καταστροφής της κινητικής ενέργειας της τύρβης που χρησιμοποιείται στο μοντέλο k - ε .

Οπότε, ο επιπρόσθετος όρος $P_{\omega b}$ της εξίσωσης ω προκύπτει από τη σχέση:

$$P_{\omega b} = \frac{\omega}{k} ((\alpha + 1)C_3 \max(P_{kb}, 0) - P_{kb})$$

Ο πρώτος όρος μέσα στην παρένθεση, στο δεξί μέλος της παραπάνω εξίσωσης, περιλαμβάνεται μόνο εάν στην επιλογή "Buoyancy Turbulence" είναι ενεργοποιημένη η επιλογή "Production and Dissipation". Εάν είναι ενεργοποιημένη η επιλογή "Production" τότε η παραπάνω εξίσωση τροποποιείται όπως φαίνεται ακολούθως:

$$P_{\omega b} = \frac{\omega}{k} ((\alpha + 1)C_3 \max(P_{kb}, 0) \cdot \sin \varphi - P_{kb})$$

Στη συνέχεια, ο όρος P_k υποδηλώνει το ρυθμό παραγωγής της τύρβης και δίνεται από τη σχέση, όπως και για το μοντέλο k - ε :

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right)$$

Για ασυμπίεστο ρευστό ωστόσο, ο όρος $\frac{\partial U_k}{\partial x_k}$ είναι μικρός και συνεπώς, ο δεύτερος όρος του δεξί μέλους της παραπάνω εξίσωσης δεν συνεισφέρει σημαντικά στην παραγωγή της τύρβης. Για συμπιεστά ρευστά ο όρος αυτός είναι μεγάλος μόνο σε περιοχές με υψηλή απόκλιση της ταχύτητας, για παράδειγμα όταν η ταχύτητα του ρευστού γίνεται ηχητική ή μεγαλύτερη.

Οι σταθερές του μοντέλου παίρνουν τις τιμές που δίνονται παρακάτω:

$$\beta' = 0.09 \quad \alpha = \frac{5}{9} \quad \beta = 0.075 \quad \sigma_k = 2 \quad \sigma_\omega = 2$$

Ο άγνωστος τανυστής των τάσεων Reynolds, $\rho \overline{u_i u_j}$, υπολογίζεται βάσει της σχέσης,

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right)$$

Προκειμένου να αποφύγουμε την συσσώρευση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στα σημεία ανακοπής είναι διαθέσιμοι δυο διορθωτικοί παράγοντες (Production Limiters) που στην ουσία περιορίζουν την παραγωγή της σ' αυτές τις περιοχές. Η συγκεκριμένη διόρθωση, μαζί με μια ακόμα που αφορά την καμπυλότητα των ροϊκών γραμμών (Curvature Correction), εφαρμόστηκε κατά τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος για το οποίο γίνεται λόγος στην παρούσα εργασία. Για να υπάρχει μια συνοχή στη σύνταξη της αναφοράς της εργασίας θα αναληθούν περαιτέρω, και οι δύο αυτές διορθώσεις, σε επόμενη ενότητα.

2.2.2.3.2.1 Μοντέλο k-ω BSL (Baseline)

Το κύριο πρόβλημα με το μοντέλο του Wilcox είναι η γνωστή του αδυναμία για περιοχές έντονης αποκόλλησης ενώ, παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε συνθήκες ελεύθερης ροής (Menter). Εξαιτίας του γεγονότος ότι είναι εξαρτώμενο από την τιμή της συχνότητας της τύρβης (ω) στην είσοδο, η πιθανότητα να αλλοιωθούν τα αποτελέσματα της επίλυσης είναι πολύ υψηλή. Κάτι τέτοιο προφανώς και είναι ανεπιθύμητο. Προκειμένου λοιπόν να λυθεί το παραπάνω πρόβλημα, αναπτύχθηκε από τον Menter μια διατύπωση που περιλαμβάνει την ανάμιξη του μοντέλου k-ω που δρά κοντά στο τοίχωμα και του k-ε για την περιοχή μακριά από το τοίχωμα. Πραγματοποιεί δηλαδή, μια μετατροπή του μοντέλου k-ε σε μια διατύπωση k-ω με την προσθήκη των αντίστοιχων εξισώσεων. Το μοντέλο του Wilcox είναι ως εκ τούτου πολλαπλασιασμένο με μια συνάρτηση ανάμιξης F_1 ενώ, το τροποποιημένο μοντέλο k-ε πολλαπλασιάζεται με μια συνάρτηση $1-F_1$. Έτσι, η F_1 μπορεί

να πάρει τιμές από ένα, για περιοχές κοντά στο τοίχωμα, μέχρι μηδέν, για περιοχές εκτός του οριακού στρώματος (είναι συνάρτηση δηλαδή της απόστασης από το τοίχωμα).

Οι εξισώσεις του μοντέλου του Wilcox έχουν δωθεί παραπάνω αλλά, αναπαράγονται ξανά για λόγους συνοχής και άμεσης κατανόησης του μοντέλου BSL.

Μοντέλο Wilcox:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb}$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b}$$

Οι εξισώσεις του τροποποιημένου μοντέλου k-ε σε μια διατύπωση k-ω με την προσθήκη των αντίστοιχων εξισώσεων είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k2}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 2}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_2 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_2 \rho \omega^2$$

Στο σημείο αυτό, οι εξισώσεις του μοντέλου του Wilcox πολλαπλασιάζονται με τη συνάρτηση ανάμιξης F_1 , η οποία δίνεται στην επόμενη ενότητα, οι εξισώσεις του τροποποιημένου μοντέλου k-ε πολλαπλασιάζονται με τη συνάρτηση $1-F_1$ και οι αντίστοιχες εξισώσεις k και ω προστίθενται κατά μέλη για να δώσουν τις εξισώσεις του μοντέλου BSL. Στις παρακάτω εξισώσεις συμπεριλαμβάνονται και οι επιδράσεις από "buoyant" ροή, όπως αυτή αναλύθηκε παραπάνω. Όπως σχολιάστηκε και προηγουμένως, στην παρούσα εργασία οι οι όροι που εκφράζουν τις επιδράσεις αυτές δεν συνεισφέρουν στις εξισώσεις του μοντέλου. Ωστόσο, εισάγονται τελικά στις εξισώσεις αυτού για λόγους σαφήνειας.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2 + P_{\omega b} \end{aligned}$$

Ο συντελεστής α του όρου πηγής $P_{\omega b}$, όπως είχε δωθεί στο μοντέλο του Wilcox σε παραπάνω ενότητα, αντικαθίσταται από τον συντελεστή α_3 .

Οι συντελεστές του νέου μοντέλου είναι γραμμικοί συνδυασμοί των αντίστοιχων συντελεστών των μοντέλων από τα οποία προήλθαν:

$$\Phi_3 = F_1\Phi_1 + (1 - F_1)\Phi_2$$

εάν Φ οποιαδήποτε σταθερά.

Για να ολοκληρωθεί η διατύπωση του μοντέλου BSL, οι τιμές όλων των συντελεστών παραθέτονται παρακάτω:

$$\begin{array}{ccccc} \beta' = 0.09 & \alpha_1 = \frac{5}{9} & \beta_1 = 0.075 & \sigma_{k1} = 2 & \sigma_{\omega 1} = 2 \\ & \alpha_2 = 0.44 & \beta_1 = 0.0828 & \sigma_{k2} = 1 & \sigma_{\omega 2} = \frac{1}{0.856} \end{array}$$

2.2.2.3.2 Μοντέλο μεταφοράς διατμητικών τάσεων (SST)

Το μοντέλο SST, το οποίο είναι βασισμένο στο μοντέλο k- ω , συμπεριλαμβάνει τη μεταφορά των διατμητικών τάσεων της τύρβης και παρέχει προβλέψεις υψηλής ακρίβειας για την έναρξη και την ποσοτικοποίηση της αποκόλλησης της ροής κάτω από συνθήκες αρνητικών κλίσεων πίεσης.

Το μοντέλο BSL μπορεί να συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του μοντέλου του Wilcox και του μοντέλου k- ϵ ωστόσο, αποτυγχάνει να δώσει αξιόπιστες προβλέψεις για την έναρξη της αποκόλλησης της ροής και την ποσοτικοποίηση αυτής. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι και τα δύο μοντέλα δεν συνυπολογίζουν τη μεταφορά των τυρβώδων διατμητικών τάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση του τυρβώδους ιξώδους. Με τη χρήση ενός παράγοντα που θα περιορίζει το τυρβώδες ιξώδες μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη συμπεριφορά:

$$v_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)}$$

όπου,

$$v_t = \frac{\mu_t}{\rho}$$

Η συνάρτηση F_2 που φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση είναι κι αυτή μια συνάρτηση ανάμιξης παρόμοια της F_1 , η οποία οριοθετεί τον παράγοντα περιορισμού στο οριακό στρώμα του τοιχώματος καθώς, οι συγκεκριμένες υποθέσεις δεν είναι σωστές για ελεύθερες ροές. Οι συναρτήσεις ανάμιξης δίνονται σε επόμενη ενότητα, προκειμένου να κατανοηθεί η βαρύτητα που έχουν στην επιτυχία των μοντέλων αυτών. Το S είναι ένας αμετάβλητος όρος μέτρησης του ρυθμού παραμόρφωσης.

Οι επιπλέον εξισώσεις μεταφοράς του μοντέλου λοιπόν, είναι:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{2\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2$$

Στις παραπάνω εξισώσεις μεταφοράς εμφανίζονται οι ακόλουθοι όροι:

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k1}} + \frac{(1 - F_1)}{\sigma_{k2}}}$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega 1}} + \frac{(1 - F_1)}{\sigma_{\omega 2}}}$$

2.2.2.3.3 Συναρτήσεις ανάμιξης

Οι συναρτήσεις ανάμιξης (F_1 και F_2) διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιτυχία των μεθόδων. Είναι συναρτήσεις βασισμένες στην απόσταση από την κοντινότερη επιφάνεια αλλά και στις μεταβλητές της ροής. Η F_1 που χρησιμοποιείται τόσο στο μοντέλο BSL όσο και στο μοντέλο SST δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_1 = \tanh(\text{arg}g_1^4)$$

με:

$$\text{arg}g_1 = \min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} \sigma_{\omega 2} y^2} \right)$$

όπου y είναι η απόσταση από το κοντινότερο τοίχωμα, ν είναι το κινηματικό ιξώδες και:

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 1.0 \times 10^{-10} \right)$$

Όσον αφορά τη συνάρτηση ανάμιξης F_2 δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_2 = \tanh(\text{arg}g_2^2)$$

με:

$$\text{arg}g_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right)$$

Γίνεται αντιληπτή επομένως, η επίδραση της απόστασης από το κοντινότερο τοίχωμα και γι αυτό το λόγο είναι αναγκαίο να αναλυθεί διεξοδικά.

2.2.2.3.3 Μοντελοποίηση της ροής κοντά στο τοίχωμα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι μαθηματικές σχέσεις σύμφωνα με τις οποίες μοντελοποιείται η ροή κοντά σε ένα τοίχωμα όπου εφαρμόζεται η συνθήκη μη-ολίσθησης. Η κατανόηση της συγκεκριμένης ενότητας είναι πραγματικά εάν όχι ο πιο κρίσιμος, από τους πιο κρίσιμους παράγοντες που καθορίζουν την επιτυχία του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί.

Όπως γνωρίζουμε από την μηχανική των ρευστών, το τυρβώδες οριακό στρώμα αποτελείται από δύο μέρη, το εσωτερικό και το εξωτερικό οριακό στρώμα. Το εσωτερικό οριακό στρώμα χωρίζεται επίσης σε δύο μέρη, το στρωτό οριακό υπόστρωμα και την λογαριθμική περιοχή όπου ισχύει ο λογαριθμικός νόμος που αναπτύχθηκε από τον Prandtl και τον Von-Karman. Αυτές οι δύο περιοχές παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο σε προβλήματα ροών όπως αυτό για το οποίο γίνεται λόγος στη συγκεκριμένη εργασία και συνεπώς, κατά την υπολογιστική διαδικασία είναι πολύ σημαντικό να μοντελοποιηθεί σωστά η επίδραση τους στα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής.

Η μοντελοποίηση των περιοχών αυτών στο λογισμικό ANSYS CFX γίνεται με τη χρήση τριών διαφορετικών προσεγγίσεων. Κάθε μοντέλο τύρβης ανάλογα με τις εξισώσεις στις οποίες βασίζεται χρησιμοποιεί και διαφορετική προσέγγιση. Οι τρεις προσεγγίσεις που είναι γνωστές και χρησιμοποιούνται από το λογισμικό είναι:

- οι Τυπικές εξισώσεις τοιχώματος (Standard Wall Functions)
- οι Κλιμακούμενες εξισώσεις τοιχώματος (Scalable Wall Functions) και
- η Αυτοματοποιημένη μεταχείριση τοιχώματος (Automatic Near-Wall Treatment)

Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία εξισώσεων, έχουν πλέον αντικατασταθεί ολοκληρωτικά από τις κλιμακούμενες εξισώσεις τοιχώματος καθώς, η χρήση τους δεν προσφέρει κανένα πλεονέκτημα συγκριτικά με την δεύτερη κατηγορία. Το εγχειρίδιο του ANSYS CFX μάλιστα, τονίζει στο χρήστη πως δεν πρέπει να επιλέγει πλέον αυτές τις εξισώσεις. Για τον λόγο αυτό λοιπόν, θα γίνει αναφορά μόνο στις κλιμακούμενες εξισώσεις τοιχώματος και στη διατύπωση της αυτοματοποιημένης μεταχείρισης του τοιχώματος.

Γενικά, η λειτουργία των εξισώσεων τοιχώματος αφορά τη γεφύρωση, με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων, των επιδράσεων των δυνάμεων συνεκτικότητας στην περιοχή του υποστρώματος προκειμένου να, παρέχει τις επικρατούσες συνθήκες κοντά στο τοίχωμα, αναφορικά με τη μέση ροή και τις εξισώσεις μεταφοράς της τύρβης. Στην ουσία δηλαδή, με τις εξισώσεις τοιχώματος επιτυγχάνεται η συσχέτιση των μεταβολών που λαμβάνουν χώρα στο στρωτό οριακό στρώμα και στη μεταβατική περιοχή με τις αντίστοιχες συνθήκες που συναντώνται στην πλήρως τυρβώδη περιοχή.

Ως γνωστόν η ταχύτητα κοντά στο τοίχωμα εντός της λογαριθμικής περιοχής δίνεται από το νόμο τοιχώματος σύμφωνα με την παρακάτω λογαριθμική σχέση:

$$u^+ = \frac{U_t}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C$$

όπου,

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y u_\tau}{\mu}$$

και

$$u_\tau = \left(\frac{\tau_\omega}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

με u^+ να είναι η αδιάστατη ταχύτητα κοντά στο τοίχωμα, u_τ να είναι η ταχύτητα τριβής, U_t να είναι η γνωστή εφαπτομενική ταχύτητα στο τοίχωμα σε μια απόσταση Δy απ' αυτό, y^+ να είναι η αδιάστατη απόσταση από το τοίχωμα, τ_ω να είναι η διατμητική τάση στο τοίχωμα, $\kappa = 0.41$ να είναι η σταθερά von Karman και C να είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται από την τραχύτητα του τοιχώματος και η οποία ισούται με 5.24 για λείο τοίχωμα.

Όσον αφορά την απόσταση Δy από το τοίχωμα, σε επόμενη ενότητα θα δοθεί ο ορισμός της ανάλογα με τις διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης της ροής κοντά στο τοίχωμα που είναι διαθέσιμες και οι οποίες αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

2.2.2.3.3.1 Κλιμακούμενες εξισώσεις τοιχώματος

Ο νόμος τοιχώματος, έτσι όπως διατυπώθηκε στην προηγούμενη ενότητα, παρουσιάζει μια ιδιάζουσα συμπεριφορά σε σημεία αποκόλλησης της ροής όπου δηλαδή, η εφαπτομενική ταχύτητα στο τοίχωμα, U_t , τείνει να μηδενιστεί. Στην λογαριθμική περιοχή λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εναλλακτική κλίμακα της ταχύτητας, η οποία συμβολίζεται με u^* , έναντι της ταχύτητας της τριβής, u_τ .

$$u^* = C_\mu^{\frac{1}{4}} k^{\frac{1}{2}}$$

όπου C_μ είναι μια σταθερά του μοντέλου k-ε, η οποία ισούται με 0.09. Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι η χρήση αυτής της κλίμακας της ταχύτητας έχει το πλεονέκτημα ότι δεν μηδενίζεται όταν η U_t τείνει στο μηδέν. Βάσει αυτού του ορισμού μπορεί να εξαχθεί άμεσα η εξίσωση που δίνει την ταχύτητα της τριβής ενώ, μπορεί να δοθεί και ο ορισμός της απόλυτης τιμής της διατμητικής τάσεως, τ_ω .

$$u_\tau = \frac{U_\tau}{\frac{1}{\kappa} \ln(y^*) + C}$$

$$\tau_\omega = \rho u^* u_\tau$$

όπου,

$$y^* = \frac{\rho u^* \Delta y}{\mu}$$

Ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματα των εξισώσεων τοιχώματος είναι ότι οι προβλέψεις των μεταβλητών εξαρτώνται από τη θέση του κοντυνότερου κόμβου του πλέγματος από το τοίχωμα. Συνεπώς, είναι ευαίσθητες στο πλέγμα που θα δημιουργηθεί κοντά στο τοίχωμα. Οι Grotjans και Menter πρόσθεσαν πως η επιπλέον εκλέπτυνση του πλέγματος δεν είναι απαραίτητα η καλύτερη λύση για αύξηση της ακρίβειας. Το πρόβλημα των ασυνεχειών στις εξισώσεις τοιχώματος, στην περίπτωση πυκνών πλεγμάτων, μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση της κλιμακούμενης εξίσωσης τοιχώματος. Η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυθαίρετα πυκνά πλέγματα ενώ, επιτρέπει τη σταθερή πύκνωση του πλέγματος ανεξάρτητα από τον αριθμό Reynolds που επικρατεί στο υπό μελέτη υπολογιστικό χωρίο μέχρις ότου, επιτευχθεί η ανεξαρτησία της λύσης από το πλέγμα.

Η βασική ιδέα πίσω από την κλιμακούμενη εξίσωση τοιχώματος είναι ο περιορισμός της τιμής του y^* , το οποίο χρησιμοποιείται στον λογαριθμικό νόμο, ορίζοντας ένα κατώτερο όριο της τιμής αυτής:

$$\tilde{y}^* = \max(y^*, 11.06)$$

όπου, 11.06 είναι η τιμή του y^* στην οποία τέμνονται η λογαριθμική και η γραμμική κατανομή που ισχύουν κοντά στο τοίχωμα. Αντιλαμβάνεται αμέσως κάποιος ότι το \tilde{y}^* δεν μπορεί να είναι μικρότερο από 11.06. Επομένως, γίνεται κατανοητό πως η ανάλυση του οριακού στρώματος περιορίζεται εκτός του στρωτού οριακού υποστρώματος. Έτσι, αποφεύγονται οι ασυνέπειες ενός πυκνού πλέγματος.

Η οριακή συνθήκη για το ρυθμό καταστροφής της τύρβης, ε , συμπεριλαμβάνοντας όλα τα παραπάνω, μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη σχέση η οποία είναι έγκυρη στην λογαριθμική περιοχή:

$$\varepsilon = \frac{\rho u^* C_\mu^{\frac{3}{4}}}{\tilde{y}^* \mu \kappa} k^{\frac{3}{2}}$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι για μια πλήρη ανάλυση του οριακού στρώματος πρέπει να εισαχθούν τουλάχιστον 10 κόμβοι στο υπολογιστικό πλέγμα και πως το άνω όριο του y^+ καθορίζεται συναρτήσει του αριθμού Reynolds που επικρατεί στο υπό μελέτη υπολογιστικό χωρίο.

Στις περισσότερες τυρβώδεις ροές η τυρβώδη κινητική ενέργεια δεν είναι απόλυτα μηδενική και ο ορισμός που έχει δοθεί για το u^* θα δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα στις περισσότερες περιπτώσεις. Σε ροές με χαμηλή ένταση της τύρβης ωστόσο, η τυρβώδης κινητική ενέργεια μπορεί να είναι πολύ μικρή οδηγώντας στο μηδενισμό του u^* και επομένως στο μηδενισμό των διαμηθικών τάσεων στο τοίχωμα. Εάν επέλθει μια τέτοια κατάσταση, μπορεί να εφαρμοστεί ένα χαμηλότερο όριο για το u^* με την εισαγωγή μιας επιπρόσθετης παραμέτρου ονόματι "ustar limiter=t". Με την συγκεκριμένη προσθήκη το u^* μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$u^* = \max\left(C_\mu^{\frac{1}{4}} \sqrt{k}, \frac{Coef \cdot U_t}{\tilde{y}^*}\right)$$

Ο συντελεστής *Coef* που χρησιμοποιείται στην παραπάνω σχέση μπορεί να αλλάξει εισάγοντας την παράμετρο "ustar limiter coef". Η προκαθορισμένη τιμή του συντελεστή αυτού είναι 0.01.

2.2.2.3.2 Αδιάστατη απόσταση από το τοίχωμα

Η σχέση που δίνει την αδιάστατη απόσταση από το τοίχωμα δόθηκε στην προηγούμενη ενότητα ωστόσο, για την μεταβλητή "Yplus" τα CFD χρησιμοποιούν μια γενική διατύπωση για το βασικό ορισμό της, η οποία δίνεται παρακάτω:

$$y^+ = \frac{\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \cdot \Delta_n}{\nu}$$

με:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Ο όρος Δ_n είναι η κοντινότερη απόσταση από το τοίχωμα μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου κόμβου του πλέγματος.

Επιπρόσθετα, μια δεύτερη μεταβλητή, y_{solver}^+ , είναι διαθέσιμη από τον επιλυτή, η οποία περιέχει το y^+ που χρησιμοποιήθηκε στη λογαριθμική περιοχή και η οποία εξαρτάται από τον τύπο της προσέγγισης που χρησιμοποιείται στην ανάλυση. Οι τρεις διαφορετικές

προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται από το ANSYS CFX βασίζονται σε διαφορετικούς ορισμούς των αποστάσεων και των κλιμάκων της ταχύτητας. Πιο συγκεκριμένα:

- ✓ Οι τυπικές εξισώσεις τοιχώματος βασίζονται στη σχέση:

$$\Delta y = \frac{\Delta n}{4}$$

- ✓ Οι κλιμακούμενες εξισώσεις τοιχώματος βασίζονται κι αυτές στη σχέση:

$$\Delta y = \frac{\Delta n}{4}$$

με το y^+ να ορίζεται από τη σχέση $y^+ = \max(y^*, 11.06)$ και το y^* τελικά να ισούται με:

$$y^* = \frac{u^* \frac{\Delta n}{4}}{\nu}$$

- ✓ Τέλος, η προσέγγιση της αυτοματοποιημένης μεταχείρισης του τοιχώματος βασίζεται στη σχέση:

$$\Delta y = \Delta n$$

Τόσο οι κλιμακούμενες εξισώσεις τοιχώματος όσο και η προσέγγιση αυτοματοποιημένης μεταχείρισης του τοιχώματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιοδήποτε αυθαίρετο πυκνό πλέγμα.

2.2.2.3.3 Προσέγγιση αυτοματοποιημένης μεταχείρισης τοιχώματος

Ενώ οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω επιτρέπουν μια συνεπή προσαρμογή του πλέγματος, βασίζονται σε φυσικές υποθέσεις οι οποίες είναι προβληματικές, ειδικά για ροές με χαμηλότερους αριθμούς Reynolds ($Re < 10^5$) εφόσον, το στρωτό οριακό υπόστρωμα δεν λαμβάνεται υπόψη στο ισοζύγιο μάζας και ορμής. Για ροές με χαμηλό αριθμό Reynolds αυτό μπορεί να επιφέρει ένα σφάλμα στο πάχος μετάθεσης έως και 25%. Είναι επομένως επιθυμητό να υπάρξει μια σχέση η οποία θα μπορεί αυτόματα να αλλάζει από τις εξισώσεις τοιχώματος σε μια διατύπωση για χαμηλούς αριθμούς Reynolds κοντά στο τοίχωμα. Όσον αφορά το μοντέλο k- ω του Wilcox, έχει το πλεονέκτημα ότι είναι γνωστή μια αναλυτική έκφραση για το ω , στο στρωτό οριακό υπόστρωμα, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί για την επίτευξη του εν λόγω στόχου. Η κύρια ιδέα πίσω απ' αυτή την διατύπωση είναι ο συνδυασμός της τιμής του ω κοντά στο τοίχωμα με την διατύπωση που εκφράζει την λογαριθμική περιοχή και την περιοχή κοντά στο τοίχωμα.

Η αυτοματοποιημένη μεταχείριση του τοιχώματος επιτρέπει μια σταθερή εκλέπτυνση του πλέγματος, η οποία δεν είναι ευαίσθητη στην επιλογή του y^+ , από αραιά πλέγματα τα οποία δεν αναλύουν το στρωτό οριακό υπόστρωμα μέχρι πυκνά πλέγματα τα οποία τοποθετούν κελιά εντός της περιοχής αυτής. Στο σημείο αυτό σημειώνεται πως για υψηλής ακρίβειας προσομοιώσεις συνίσταται η δημιουργία ενός πυκνού πλέγματος με

$y^+ \approx 1$. Το υπολογιστικό πλέγμα που δημιουργήθηκε για την μελέτη του πεδίου ροής διαμέσου του στροβίλου Wells κάνει χρήση μιας τέτοιας τιμής για το y^+ .

Ο ρυθμός μεταφοράς της κινητικής ενέργειας της τύρβης (k) ανά μονάδα επιφάνειας διατηρείται τεχνητά ίσος με μηδέν ($F_k = 0$) και ο ρυθμός μεταφοράς της ορμής ανά μονάδα επιφάνειας υπολογίζεται από την κατανομή της ταχύτητας.

Ο ρυθμός μεταφοράς της ορμής ανά μονάδα επιφάνειας, F_U , δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_U = -\rho u_\tau u^*$$

με:

$$u^* = \sqrt[4]{\left(\sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \left| \frac{\Delta U}{\Delta y} \right| \right)^4 + (\sqrt{\alpha_1 k})^4}$$

και

$$u_\tau = \sqrt[4]{(u_\tau^{vis})^4 + (u_\tau^{log})^4}$$

όπου:

$$u_\tau^{vis} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho} \left| \frac{\Delta U}{\Delta y} \right|}$$

και

$$u_\tau^{log} = \frac{U}{\frac{1}{\kappa} \log(y^+) + C}$$

Στην εξίσωση ω χρησιμοποιείται μια αλγεβρική έκφραση αντί ενός προστιθέμενου όρου μεταφοράς (flux). Η έκφραση αυτή είναι ένας συνδυασμός μεταξύ της αναλυτικής έκφρασης για το ω στην λογαριθμική περιοχή

$$\omega_l = \frac{u^*}{\alpha_1 \kappa y} = \frac{1}{\alpha_1 \kappa \nu} \frac{u^{*2}}{y^+}$$

και της αντίστοιχης στην περιοχή του στρωτού οριακού υποστρώματος,

$$\omega_s = \frac{6 \nu}{\beta (\Delta y)^2}$$

με Δy να είναι η απόσταση μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου κόμβου του υπολογιστικού πλέγματος. Προκειμένου να επιτευχθεί ένας ομαλός συνδυασμός και να

αποφευχθούν προβλήματα στη συμπεριφορά της σύγκλισης, επιλέγεται η ακόλουθη διατύπωση:

$$\omega_\omega = \omega_s \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_l}{\omega_s}\right)^2}$$

Ενώ στην διατύπωση της εξίσωσης του τοιχώματος το πρώτο σημείο θεωρείται πως βρίσκεται έξω από το στρωτό οριακό υπόστρωμα, όταν γίνεται χρήση της μοντελοποίησης για χαμηλούς αριθμούς Reynolds, η θέση του πρώτου κόμβου μετακινείται εικονικά προς το στρωτό οριακό υπόστρωμα όσο το πλέγμα πυκνώνει. Σημειώνεται ότι η φυσική θέση του πρώτου κόμβου είναι πάντα πάνω στο τοίχωμα ($y=0$). Παρολ' αυτά, ο πρώτος κόμβος θεωρείται ότι βρίσκεται σε μια απόσταση Δy από το τοίχωμα. Το σφάλμα της διατύπωσης της εξίσωσης του τοιχώματος προκύπτει απ' αυτήν την εικονική μετατόπιση, η οποία ισοδυναμεί με μείωση του πάχους μετατόπισης. Επίσης, σε πολύ χαμηλούς αριθμούς Reynolds αυτή η εικονική μετατόπιση γίνεται ορατή όταν η λύση συγκρίνεται με τον υπολογισμό για στρωτή ροή λόγω του ότι, η μετατόπιση αυτή δεν χρειάζεται στη μοντελοποίηση της στρωτής ροής κοντά στο τοίχωμα. Το σφάλμα αυτό είναι πάντα παρόν στη μοντελοποίηση με την εξίσωση του τοιχώματος. Η μετατόπιση βασίζεται στην απόσταση μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου κόμβου του υπολογιστικού πλέγματος, $\Delta y = y_2 - y_1$, με y να είναι η κάθετη απόσταση από το τοίχωμα.

2.2.2.3.4 Επιλογή μοντέλου low-Re k- ω SST

Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα η προσέγγιση της μοντελοποίησης του τοιχώματος για χαμηλούς αριθμούς Reynolds αναλύει με λεπτομέρεια την κατανομή των μεταβλητών στο οριακό στρώμα, χρησιμοποιώντας πολύ μικρές κλίμακες μήκους κελιών και κόμβων του υπολογιστικού πλέγματος στη κάθετη διεύθυνση από το τοίχωμα (πολύ λεπτά στρώματα πλέγματος στην περιοχή του τοιχώματος). Τα μοντέλα τύρβης που βασίζονται στην επίλυση της εξίσωσης ω , όπως το μοντέλο SST, είναι κατάλληλα για την εφαρμογή της παραπάνω προσέγγισης. Σημειώνεται σ' αυτό το σημείο πως όταν γίνεται αναφορά στον όρο "χαμηλός αριθμός Reynolds" δεν υποδηλώνεται ο αριθμός Reynolds του υπό μελέτη πεδίου ροής αλλά ο τυρβώδης αριθμός Reynolds, ο οποίος έχει μικρή τιμή στο στρωτό οριακό υπόστρωμα. Αυτή η μέθοδος επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοιώσεις εφαρμογών όπου ο υπάρχων αριθμός Reynolds είναι υψηλός εφόσον, έχει αναλυθεί η περιοχή του στρωτού οριακού υποστρώματος.

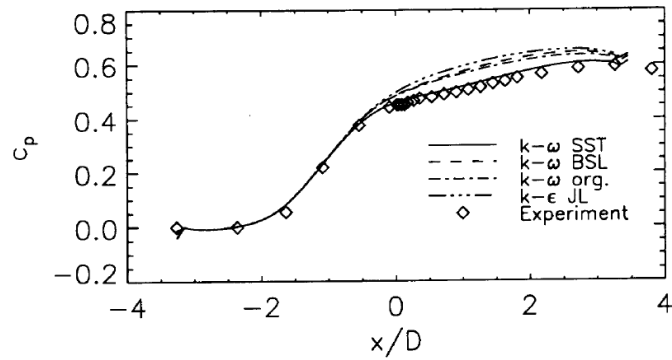
Η προσέγγιση της μοντελοποίησης για χαμηλό αριθμό Reynolds απαιτεί ένα πολύ πυκνό πλέγμα κοντά στην περιοχή του τοιχώματος και αντίστοιχα μεγάλο αριθμό κόμβων. Συνεπώς, οι απαιτήσεις για υπολογιστική ισχύ και υπολογιστικό χρόνο είναι υψηλότερες απ' όταν γίνεται χρήση των εξισώσεων τοιχώματος ενώ, πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη

προσοχή προκειμένου να εξασφαλιστεί μια καλή υπολογιστική ανάλυση κοντά στην περιοχή του τοιχώματος και να καταγραφεί η γρήγορη μεταβολή των μεταβλητών. Για τον λόγο αυτόν εφαρμόζεται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αυτοματοποιημένη διαχείριση του τοιχώματος ώστε να μειωθούν οι απαιτήσεις αυτές και να επιτραπεί η βαθμιαία εναλλαγή μεταξύ των εξισώσεων τοιχώματος και της προσέγγισης για χαμηλούς αριθμούς Reynolds, χωρίς απώλειες στην ακρίβεια.

Βάσει όλων των παραπάνω γίνεται κατανοητό πως η προσέγγιση για χαμηλούς αριθμούς Reynolds με τη χρήση της αυτοματοποιημένης μεταχείρισης του τοιχώματος είναι κατάλληλη για εφαρμογές όπου μελετώνται φαινόμενα αποκόλλησης της ροής. Έτσι λοιπόν αποφασίστηκε ότι για τη μελέτη του προβλήματος που αφορά την παρούσα εργασία, η χρήση του μοντέλου τύρβης k- ω SST, το οποίο κάνει χρήση της αυτοματοποιημένης μεταχείρισης του τοιχώματος, με την προσέγγιση για χαμηλούς αριθμούς Reynolds είναι η ιδανικότερη επιλογή. Στην βιβλιογραφία το συγκεκριμένο μοντέλο τύρβης διατυπώνεται συχνά και ως "low Re k- ω SST turbulence model".

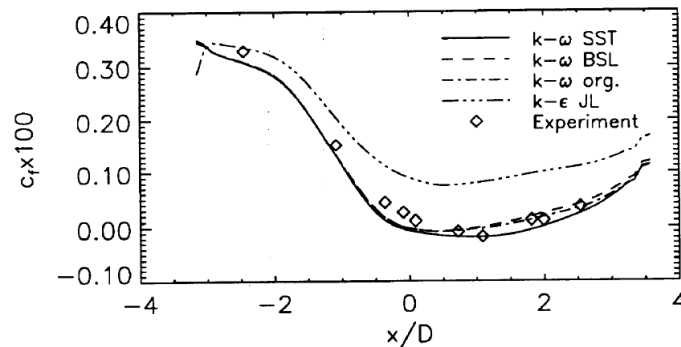
Προκειμένου να μην υπάρχουν αμφιβολίες για τη σωστή επιλογή του μοντέλου, ακολουθεί μια οπτικοποίηση των πλεονεκτημάτων του (Menter [43]) συγκριτικά με τα μοντέλα k- ϵ , BSL και k- ω για συνθήκες όπου είναι έντονη η παρουσία φαινομένων αποκόλλησης. Παίρνοντας το πρόβλημα της ροής του Driver (Driver's flow) γίνεται αντιληπτό πως το μοντέλο SST είναι κατά πολύ ανώτερο του μοντέλου k- ϵ , όπως αυτό έχει προταθεί από τους Jones και Launder, και δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα από τα μοντέλα BSL και k- ω για δυσμενείς συνθήκες κλίσεων της πίεσης και χαμηλό αριθμό Reynolds. Ενημερωτικά, το πρόβλημα της ροής του Driver αφορά το τυρβώδες οριακό στρώμα που αναπτύσσεται στην αξονική διεύθυνση ενός κυλίνδρου κάτω από αρνητικές κλίσεις πίεσης, οι οποίες δημιουργούνται από την απόκλιση των τοιχωμάτων του κυλίνδρου και την αναρρόφηση της ροής που εφαρμόζεται σ' αυτά τα τοιχώματα. Η κλίση πίεσης που δημιουργείται είναι αρκετά υψηλή ώστε να προκληθεί αποκόλληση της ροής. Ο αριθμός Reynolds, σύμφωνα με τη διάμετρο του κυλίνδρου D (140 mm), είναι ίσος με 2.8×10^5 . Όπως θα γίνει αντιληπτό στα επόμενα κεφάλαια, τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει η ροή στο πρόβλημα του Driver είναι παρόμοια με τα χαρακτηριστικά της ροής του προβλήματος που μελετάτε στην παρούσα εργασία, με την έννοια των αριθμών Reynolds που επικρατούν.

Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται η κατανομή της πίεσης στο τοίχωμα όπως υπολογίστηκε από τα διάφορα μοντέλα, αναφερόμενοι πάντα στο πρόβλημα ροής του Driver. Το μοντέλο SST δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τ' άλλα μοντέλα, εξαιτίας της ικανότητας του να συνυπολογίζει τη μεταφορά των διατμητικών τάσεων. Όπως αναμενόταν το μοντέλο k- ϵ παράγει τα χειρότερα αποτελέσματα ενώ, τα μοντέλα k- ω και BSL δίνουν σχεδόν τα ίδια, καλύτερα από το μοντέλο k- ϵ και χειρότερα από το SST.



Σχήμα 2.5: Κατανομή πίεσης στο τοίχωμα για τις αρνητικές κλίσεις πίεσης που εφαρμόζονται στο πρόβλημα ροής του Driver

Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται η κατανομή των διατμητικών τάσεων στο τοίχωμα και δείχνει πως το μοντέλο SST προβλέπει το μεγαλύτερο ποσό αποκόλλησης ενώ, εφαρμόζοντας το μοντέλο k-ε η ροή φαίνεται να παραμένει προσκολλημένη στα τοιχώματα. Όσον αφορά τα μοντέλα BSL και k-ω, δίνουν πάλι παρόμοια αποτελέσματα μεταξύ τους και παρουσιάζεται καλή συμφωνία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με των πειραματικών.

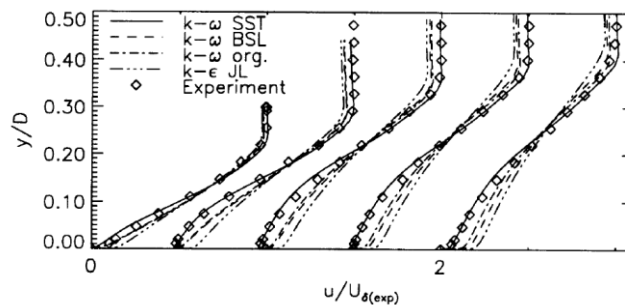


Σχήμα 2.6: Κατανομή διατμητικών τάσεων στο τοίχωμα για τις αρνητικές κλίσεις πίεσης που εφαρμόζονται στο πρόβλημα ροής του Driver

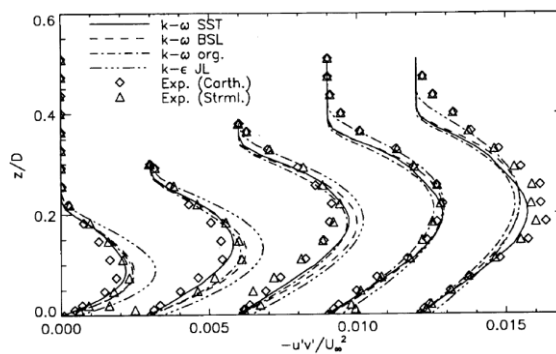
Οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων μπορούν να γίνουν καλύτερα αντιληπτές από το Σχήμα 2.7, όπου φαίνονται τα προφίλ ταχυτήτων. Το μοντέλο SST παρουσιάζει μια ξεκάθαρη υπεροχή έναντι των άλλων, σ' ότι αφορά τη σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων μ' αυτά των πειραματικών. Η πρόβλεψη της επίδρασης της μεγαλύτερης μετατόπισης από το μοντέλο SST αντικατοπτρίζεται από την πτώση του C_p , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Το μοντέλο k-ω προβλέπει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το BSL ενώ, το μοντέλο k-ε παρουσιάζει πολύ μικρή ευαισθησία στην κλίση πίεσης, όπως φαίνεται και από τα προηγούμενα σχήματα.

Οι αιτίες για τη διαφορετική συμπεριφορά των μοντέλων μπορούν να κατανοηθούν από τα δύο επόμενα σχήματα. Το Σχήμα 2.8 συγκρίνει τις κατανομές της τυρβώδους διατμητικής τάσης σε διάφορες θέσεις. Τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται τόσο σε μια

προσανατολισμένη επιφάνεια (Carth.) όσο και σε μια προσανατολισμένη γραμμή ροής (Strml.) στο σύστημα συντεταγμένων. Σημειώνεται πως τα υπολογιστικά αποτελέσματα φαίνεται να μην είναι τόσο ευαίσθητα σε μικρές αλλαγές της διεύθυνσης, εξαιτίας της σχέσης του τυρβώδες ιξώδους. Ο Driver έδειξε πως για μια ροή, η διεύθυνση της γραμμής ροής είναι κάθετη στη διεύθυνση του μέγιστου λόγου τάσης-παραμόρφωσης. Εφόσον τα μοντέλα τυρβώδες ιξώδους είναι βαθμονομημένα σ' αυτήν τη διεύθυνση, η σύγκριση των μοντέλων γίνεται σύμφωνα μ' αυτή. Το μοντέλο k-ε προφανώς προβλέπει σημαντικά υψηλότερες τιμές για το λόγο τάσης-παραμόρφωσης, συγκριτικά με τ' άλλα μοντέλα, ειδικά στην περιοχή όπου αρχίζει να εμφανίζεται η αποκόλληση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ροή να είναι σταθερά προσκολλημένη, όπως φαίνεται και από τα προφίλ ταχυτήτων στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Προφίλ ταχυτήτων για τις αρνητικές κλίσεις πίεσης που εφαρμόζονται στο πρόβλημα ροής του Driver

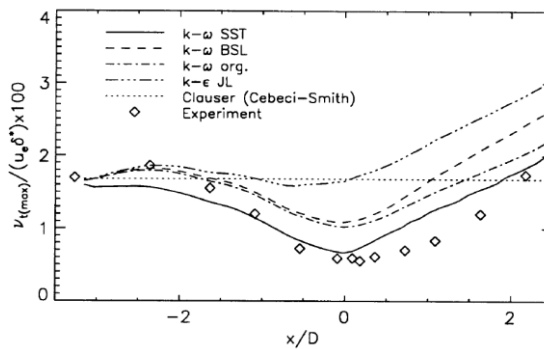


Σχήμα 2.8: Προφίλ του λόγου τυρβώδες τάσης-παραμόρφωσης για τις αρνητικές κλίσεις πίεσης που εφαρμόζονται στο πρόβλημα ροής του Driver για διάφορες θέσεις

Οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων γίνονται αισθητά φανερές παρατηρώντας την κατανομή του τυρβώδες ιξώδους. Το Σχήμα 2.9 δείχνει τη μέγιστη τιμή των κατανομών του κανονικοποιημένου κινηματικού τυρβώδες ιξώδους για όλες τις θέσεις x. Το μοντέλο SST προβλέπει τη μείωση της ποσότητας αυτής, η οποία επάγεται από την αρνητική κλίση πίεσης, με πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα μοντέλα BSL και k-ω δίνουν πάλι παρόμοια αποτελέσματα έως τη στιγμή εμφάνισης της αποκόλλησης (περιοχή κοντά στη θέση $x/D=0$) ενώ, το αυθεντικό μοντέλο k-ω είναι πιο κοντά στα

πειραματικά αποτελέσματα για την περιοχή ανάκτησης της ροής. Το μοντέλο k-ε αποτυγχάνει να πιάσει τα πειραματικά αποτελέσματα.

Όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα οδηγούν στο συμπέρασμα πως το πιο κατάλληλο μοντέλο για το πρόβλημα που μελετάτε στην παρούσα εργασία είναι το μοντέλο SST. Η σύγκριση των μοντέλων τύρβης μηδέν εξισώσεων, μίας εξίσωσης και δύο εξισώσεων έδειξε πως το μοντέλο SST είναι το πιο αξιόπιστο για την επίλυση των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής διαμέσου του στροβίλου Wells. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε το SST για το "κλείσιμο" του συστήματος των χρονικά μέσω εξισώσεων Reynolds.



Σχήμα 2.9: Κατανομή του τυρβώδες κινηματικού ιξώδους για τις αρνητικές κλίσεις πίεσης που εφαρμόζονται στο πρόβλημα ροής του Driver

2.2.2.3.5 Διορθωτικοί παράγοντες Production Limiters και Curvature Correction

Κατά την ανάλυση του μοντέλου k- ω έγινε λόγος για κάποιους διορθωτικούς παράγοντες που επιλέγει ο χρήστης προκειμένου να διορθώσει κάποια μειονεκτήματα που γενικά παρουσιάζονται στα μοντέλα δύο εξισώσεων.

2.2.2.3.5.1 Διορθωτικοί παράγοντας Production Limiters

Ένα από τα μειονεκτήματα των μοντέλων δύο εξισώσεων είναι η υπερβολική παραγωγή τυρβώδους ενέργειας, που δίνεται από τον όρο P_k , στις περιοχές των σημείων ανακοπής. Προκειμένου να αποφευχθεί λοιπόν η συσσώρευση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στις περιοχές στασιμότητας της ροής, είναι διαθέσιμη μια σχέση της οποίας οι όροι μπορούν να περιορίζουν τον όρο παραγωγής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

Η σχέση αυτή αναπτύχθηκε από τον Menter και έχει την ακόλουθη μορφή:

$$P_k = \min(P_k, C_{lim}\rho\varepsilon)$$

με:

$$\varepsilon = \beta'k\omega$$

Ο συντελεστής C_{lim} καλείται "Clip Factor" και έχει τιμή ίση με 10 για τα μοντέλα που βασίζονται στην εξίσωση ω .

Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Boussinesq για τον τανυστή των τάσεων Reynolds, ο όρος P_k μπορεί να περιγραφεί για ασυμπίεστη ροή από τη σχέση:

$$P_k = \mu_t S^2$$

με:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

όπου το S υποδηλώνει το μέγεθος του ρυθμού παραμόρφωσης και S_{ij} είναι ο τανυστής του ρυθμού παραμόρφωσης.

Οι Kato και Launder παρατήρησαν ότι τα πολύ υψηλά επίπεδα του ρυθμού παραμόρφωσης, S, σε περιοχές στασιμότητας είναι υπεύθυνα για τις υπερβολικά υψηλές τιμές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Λόγω του ότι σ' ένα σημείο ανακοπής η ροή είναι σχεδόν αστρόβιλη δηλαδή, η στροβιλότητα, Ω , είναι πολύ μικρή πρότειναν την ακόλουθη αντικατάσταση στον όρο παραγωγής:

$$P_k = \mu_t S \Omega$$

με:

$$\Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

όπου το Ω υποδηλώνει το μέγεθος του ρυθμού στροβιλότητας και Ω_{ij} τον τανυστή της στροβιλότητας. Για την περίπτωση μιας απλής ροής το S ισούται με το Ω .

Στην παρούσα εργασία ο διορθωτικός παράγοντας "Production Limiters" χρησιμοποιήθηκε όπως αναπτύχθηκε από τον Menter.

2.2.2.3.5.2 Διορθωτικός παράγοντας Curvature Correction

Μια αδυναμία των μοντέλων τυρβώδης ιξώδους είναι η μη ευαισθησία τους στην καμπυλότητα των ροϊκών γραμμών και στην περιστροφή του συστήματος. Βασιζόμενοι στην εργασία των Spalart και Shur πραγματοποιείται μια τροποποίηση του όρου παραγωγής προκειμένου τα μοντέλα δύο εξισώσεων να αποκτήσουν ευαισθησία στα φαινόμενα αυτά. Η εμπειρική σχέση που προτάθηκε από τους Spalart και Shur ώστε να ληφθούν υπόψη αυτά τα φαινόμενα ορίζεται ως ακολούθως:

$$f_{rotation} = (1 + c_{r1}) \frac{2r^*}{1 + r^*} [1 - c_{r3} \tan^{-1}(c_{r2} \tilde{r})] - c_{r1}$$

Με τη συνάρτηση αυτή πολλαπλασιάζεται ο όρος παραγωγής ενώ, στο ANSYS CFX περιορίζεται με τον παρακάτω τρόπο:

$$P_k \rightarrow P_k \cdot f_r$$

όπου,

$$f_r = \max[0, 1 + C_{scale}(\tilde{f}_r - 1)]$$

και

$$f_r = \max\{\min(f_{rotation}, 1.25), 0\}$$

Η αρχική συνάρτηση περιορίζεται στο εύρος τιμών από μηδέν, για παράδειγμα, σε μια έντονα κυρτή καμπύλη (σταθεροποιημένη ροή χωρίς παραγωγή τύρβης) έως 1.25, για παράδειγμα, σε μια έντονα κοίλη καμπύλη (ενισχύεται η παραγωγή της τύρβης). Το κάτω όριο εισάγεται για λόγους αριθμητικής σταθερότητας ενώ, το άνω όριο χρειάζεται ώστε να αποφευχθεί η υπερεκτίμηση του τυρβώδους ιξώδους σε ροές με αποσταθεροποιητική καμπυλότητα/περιστροφή. Το άνω όριο, με τιμή 1.25, παρέχει ένα καλό συμβιβασμό για διαφορετικές περιπτώσεις δοκιμών με χρήση του μοντέλου SST. Ο συντελεστής κλίμακας C_{scale} εισάγεται ώστε να ενεργοποιήσει την επίδραση της διόρθωσης της καμπυλότητας, εάν αυτό είναι αναγκαίο, για ιδιαίτερες ροές. Η προκαθορισμένη τιμή για το συντελεστή αυτόν ισούται με 1 με τη δυνατότητα αλλαγής εάν ο χρήστης το επιλέξει. Στην παρούσα εργασία ο συγκεκριμένος συντελεστής παρέμεινε στην προκαθορισμένη του μορφή.

Υποθέτοντας ότι όλες οι μεταβλητές και οι διαφορίσεις τους ορίζονται σύμφωνα με το πλαίσιο αναφοράς στο οποίο πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί, το οποίο περιστρέφεται με μια Ω^{rot} , τότε οι όροι r^* και \tilde{r} της συνάρτησης $f_{rotation}$ ορίζονται όπως φαίνεται ακολούθως:

$$r^* = \frac{S}{\Omega}$$

$$\tilde{r} = 2\Omega_{ik}S_{jk} \left[\frac{DS_{ij}}{Dt} + (\varepsilon_{imn}S_{jn} + \varepsilon_{jmn}S_{in})\Omega_m^{Rot} \right] \frac{1}{\Omega D^3}$$

όπου ο πρώτος όρος στις αγκύλες είναι ισοδύναμος της δεύτερης παραγωγής της ταχύτητας (στην περίπτωση αυτή είναι η παράγωγος του τανυστή του ρυθμού παραμόρφωσης) και ο δεύτερος όρος στις αγκύλες είναι ένα μέτρο της περιστροφής του συστήματος.

Ο τανυστής του ρυθμού παραμόρφωσης, S_{ij} , είναι ίδιος μ' αυτόν που ορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα ενώ, ο τανυστής στροβιλότητας ορίζεται ως:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + 2\varepsilon_{mji} \Omega_m^{rot}$$

Τέλος, οι εξαγόμενες από πραγματοποιημένες δοκιμές εμπειρικές σταθερές c_{r1}, c_{r2}, c_{r3} ισούνται με 1.0, 2.0 και 1.0 αντίστοιχα.

2.2.2.4 Μοντέλα Reynolds Stresses

Πέρα από τη χρήση του μοντέλου τύρβης SST στην παρούσα εργασία, υπήρχε και η εναλλακτική επιλογή μοντέλων που επιλύουν επτά επιπλέον εξισώσεις (μοντέλα Reynolds Stress), τα οποία σύμφωνα με διάφορες υπολογιστικές μελέτες έχουν δείξει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα σε περίπλοκες ροές, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως είναι σε κάθε περίπτωση πολύ ανώτερα από τα μοντέλα δύο εξισώσεων. Ωστόσο, η χρήση ενός τέτοιου μοντέλου αυξάνει δραματικά τις απαιτήσεις τόσο σε ποιότητα υπολογιστικού πλέγματος όσο και σε υπολογιστική ισχύ καθώς, επιλύει μια εξίσωση μεταφοράς για κάθε τάση Reynolds (σύνολο έξι εξισώσεις) και μία για το ρυθμό καταστροφής της τύρβης. Συνεπώς, τα μοντέλα τύρβης επτά εξισώσεων απορρίφθηκαν εξ' αρχής και έγινε προσπάθεια επιλογής ενός μοντέλου που να συμβαδίζει με τα μέσα που παρέχονται για την πραγματοποίηση των υπολογιστικών προσομοιώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Επιλογή, Σχεδιασμός και Εισαγωγή Γεωμετριών - Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος-Ορισμός του προβλήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκαν υπολογιστικά δύο διαφορετικές γεωμετρίες στροβίλων Wells, η γεωμετρία A και η γεωμετρία B. Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά, θα γίνει αναφορά στον τρόπο με τον οποίο επιλέχτηκαν οι συγκεκριμένες γεωμετρίες, στο σχεδιασμό των υπό μελέτη γεωμετριών με τη χρήση του λογισμικού "Solidworks" ενώ αμέσως μετά, θα ακολουθήσει η εισαγωγή των γεωμετριών αυτών εντός του περιβάλλοντος του ANSYS CFX. Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών γεωμετριών παρουσιάζονται στον πρώτο πίνακα του κεφαλαίου αυτού (Πίνακας 3.1).

Αφού ολοκληρωθεί το παραπάνω πρωταρχικό σκέλος και έχοντας αποκτήσει από το προηγούμενο κεφάλαιο το μαθηματικό υπόβαθρο που χρειάστηκε για τη διεξαγωγή των υπολογιστικών προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας, γίνεται η παρουσίαση των υπολογιστικών πλεγμάτων των γεωμετριών που μελετώνται, εντός του λογισμικού ANSYS CFX και τα οποία δημιουργήθηκαν προκειμένου να επιλυθούν οι εξισώσεις που διέπουν το πεδίο ροής.

Όσον αφορά τη Γεωμετρία A, η οποία στην ουσία ήταν η πρώτη γεωμετρία που ελέγχθηκε υπολογιστικά, παρουσιάζονται δύο διαφορετικά πλέγματα με σκοπό, να γίνει εφικτή η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που εξάγονται με τη χρήση αυτών, στο Κεφάλαιο 4, αλλά κυρίως, για να γίνει αντιληπτή η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για την ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από τα χαρακτηριστικά του πλέγματος. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα μοντελοποίησης της ροής κοντά στο τοίχωμα, πρέπει να γίνει μια συνεπής πύκνωση του πλέγματος μέχρι τα παραγόμενα αποτελέσματα να μην επηρεάζονται πλέον απ' αυτό. Ο έλεγχος της ανεξαρτησίας του πλέγματος έγινε με την παραγωγή αρκετών διαφορετικών πλεγμάτων, ολοένα και πυκνότερων, μέχρι το σημείο όπου η επιπλέον πύκνωση του πλέγματος δεν άλλαζε τις μεταβλητές του πεδίου ροής. Το πλέγμα στο οποίο επιτυγχάνεται αυτή η ανεξαρτησία είναι αυτό που τελικά θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Στην παρούσα αναφορά θα παρουσιαστούν μόνο, το αρχικό πλέγμα που δημιουργήθηκε, το οποίο στην ουσία ήταν σχετικά αραιό με πολύ χαμηλή ανάλυση του οριακού στρώματος, χωρίς όμως να υστερεί σε ποιότητα και το τελικό πλέγμα, το οποίο ήταν αρκετά πυκνότερο με πολύ υψηλή ανάλυση του οριακού στρώματος και το οποίο βασικά οδήγησε στην εξαγωγή των σωστότερων αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με τον παραπάνω διαχωρισμό, από το σημείο αυτό, οι εν λόγω γεωμετρίες θα συμβολίζονται με A1 και A2 αντίστοιχα.

Για τη Γεωμετρία B, η διαδικασία δημιουργίας του υπολογιστικού πλέγματος βασίστηκε και αυτή στην παραπάνω λογική. Ωστόσο, ο έλεγχος ανεξαρτησίας των αποτελεσμάτων από το πλέγμα ήταν πιο άμεσος εφόσον, είχαν κατανοηθεί οι διάφοροι παράμετροι του πλέγματος που επηρεάζουν τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Συνέπως, το τελικό πλέγμα, σύμφωνα με το οποίο ολοκληρώθηκαν οι προσομοιώσεις που θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκε πιο εύκολα. Επιπλέον, η σύγκριση που θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο μεταξύ των αποτελεσμάτων των διαφορετικών πλεγμάτων της γεωμετρίας A αρκεί για να κατανοήσει κανείς την επίδραση του πλέγματος στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και επομένως, θα παρουσιαστεί μόνο το τελικό πλέγμα της γεωμετρίας B.

Στο σημείο αυτό, είναι απαραίτητο να σημειωθεί πως, οι υπολογιστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, αφορούν κατά βάση τον έλεγχο του στροβίλου Wells για περιστροφική ταχύτητα αυτού, ισοδύναμη με 2000 rpm, 3000 rpm και 4000 rpm ενώ, για κάθε μία τέτοια ταχύτητα περιστροφής μελετούνταν η συμπεριφορά του στροβίλου για οχτώ διαφορετικές ταχύτητες εισαγωγής. Το μόνο επιπλέον που πρέπει να γνωρίζει ο αναγνώστης σ' αυτή τη φάση, προκειμένου να υπάρχει μια συνέχεια στην παρούσα εργασία και να μπορεί να αντιληφθεί τη διαδικασία δημιουργίας των πλεγμάτων, είναι η μέγιστη και η ελάχιστη ταχύτητα εισαγωγής, οι οποίες είναι ίσες με 17.44 m/s και 2.36 m/s αντίστοιχα.

Στο τέλος της ενότητας, αφού έχουν σχολιαστεί τα εν λόγω πλέγματα, θα παρουσιαστεί ο ορισμός του προβλήματος (Setup) εντός του ANSYS CFX, του οποίου τα χαρακτηριστικά σχολιάστηκαν εν μέρη στην προηγούμενη ενότητα και στη θεωρία που αναπτύχθηκε. Ο ορισμός του προβλήματος θα αφορά μόνο τα υπολογιστικά πλέγματα για τα οποία έχει επιτευχθεί η ανεξαρτησία των μεταβλητών της ροής απ' αυτά. Όσον αφορά τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες, ο ορισμός του προβλήματος είναι ο ίδιος οπότε, δεν θα γίνει αναπαραγωγή αυτού στην περίπτωση της δεύτερης γεωμετρίας. Ο ορισμός του προβλήματος είναι εξίσου σημαντικός με τη δημιουργία ενός σωστού πλέγματος καθώς, ορίζεται η φυσική του προβλήματος ενώ, είναι το στάδιο που θα οδηγήσει τελικά στην ανάλυση του πεδίου ροής διαμέσου του στροβίλου Wells.

3.1 Επιλογή γεωμετριών

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν προς μελέτη απλές γεωμετρίες στροβίλου Wells, χωρίς για παράδειγμα την προσθήκη κάποιων οδηγητικών πτερυγίων ή κάποιας άλλης βελτίωσης που αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Ο λόγος είναι ότι, η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε πρώτη φορά για το Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας και συνεπώς, έπρεπε να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του στροβίλου πριν κάποια επιπρόσθετη

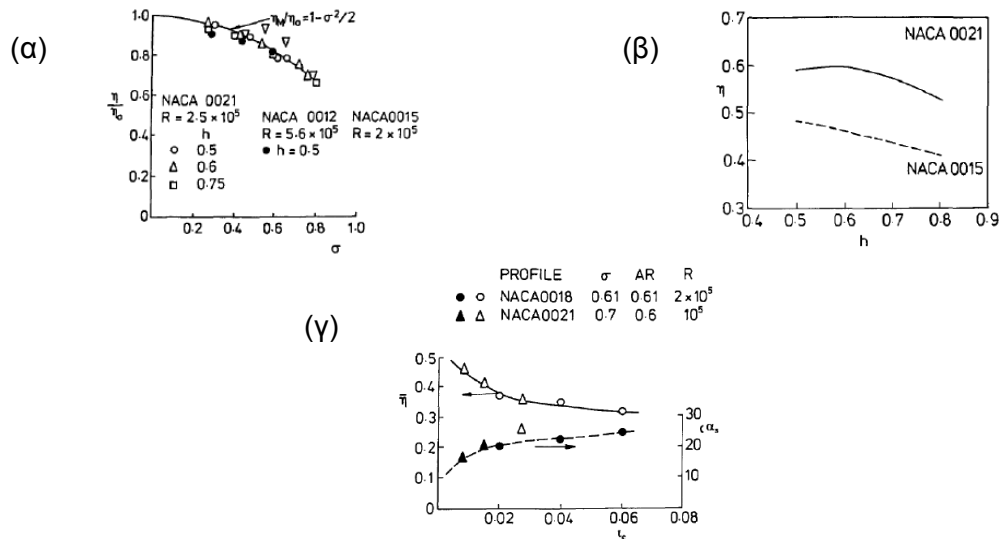
βελτίωση. Όσον αφορά λοιπόν, την επιλογή των διάφορων γεωμετριών, αυτή έγινε λαμβάνοντας υπόψη τους παρακάτω λόγους.

Κατά πρώτον, εφόσον στην παρούσα διπλωματική εργασία ο στρόβιλος Wells μελετάτε και πειραματικά, ήταν λογικό να ληφθούν εξ' αρχής υπόψη μερικές βασικές διαστάσεις, συναρτήσει με τη δυνατότητα του Πανεπιστημίου να χορηγήσει μια τέτοια πειραματική μελέτη. Η σκέψη για επιλογή πολύ μικρών διαστάσεων στροβίλου απορρίφθηκε, λόγω του ότι εμφανιζόταν ο κίνδυνος να μην μπορεί καν να περιστραφεί ο στρόβιλος αφού, η παραγόμενη ροπή είναι γενικά πάρα πολύ μικρή σε τέτοιες κλίμακες. Όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, η τιμή της εν λόγω ροπής είναι όντως σχετικά χαμηλή. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη και το οικονομικό κόστος της πειραματικής διάταξης, αποφασίστηκε μια διάμετρος κελύφους περίπου στα 300 mm, για τη γεωμετρία του πειράματος (Γεωμετρία Β).

Κατά δεύτερο λόγο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μελέτη του στροβίλου Wells πραγματοποιήθηκε πρώτη φορά για το Πανεπιστήμιο και επομένως, αποφασίστηκε να ελεγχθεί η συμπεριφορά του και για μια ήδη μελετημένη γεωμετρία, προκειμένου να γίνει εφικτή μια επιπλέον αξιολόγηση της αυτής μελέτης. Ωστόσο, η γεωμετρία που θα αναπαραχθεί από τη βιβλιογραφία (Γεωμετρία Α) αποφασίστηκε πως πρέπει να είναι παρόμοιας κλίμακας με τον στρόβιλο που θα χρησιμοποιούνταν στο πείραμα. Αυτό για να μην αλλάζουν κατά πολύ τα ροϊκά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής ανά τις δύο υπό μελέτη γεωμετρίες. Ο λόγος αυτός θα γίνει πιο σαφής παρακάτω.

Κατά την αναζήτηση της γεωμετρίας Α λοιπόν, συνδιάστηκαν αρκετές γνώσεις που είχαν αποκτηθεί από τη μελέτη της βιβλιογραφίας, προκειμένου να επιλεγεί ένας στρόβιλος που θα παρουσιάζει έναν αρκετά ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης, αναφορικά με τις διαστάσεις που αναφέρθηκαν ως μια πρωταρχική επιλογή παραπάνω και των συνιστώμενων διαστάσεων από τη βιβλιογραφία. Γενικά, όπως έχει ειπωθεί και στο κεφάλαιο της εισαγωγής, οι κατά καιρούς μελετητές έχουν παρατηρήσει τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζουν οι διάφοροι παράμετροι τη λειτουργία του στροβίλου Wells. Οι τρεις βασικοί παράμετροι για μια απλή γεωμετρία όπως αυτή της παρούσας εργασίας, που καθορίζουν ουσιαστικά και τις διαστάσεις του στροβίλου, είναι ο λόγος h , η στερεότητα σ , το διάκενο μεταξύ κορυφής πτερυγίου και περιβλήματος, t , και η επιλογή της συμμετρικής αεροτομής που απαιτείται. Ελέγχοντας μερικά είδη αεροτομών, NACA 0012, NACA 0015, NACA 0018 και NACA 0021, οι διάφοροι μελετητές, συσχετίζοντας τις παραπάνω παραμέτρους με την απόδοση του στροβίλου, κατέληξαν στο γεγονός ότι για έναν σχετικά χαμηλό αριθμό Reynolds ($\sim 10^5$) και για ένα λόγο h ή μια στερεότητα σ ή ένα μέγεθος διακένου t , η χρήση της αεροτομής NACA 0021 φαίνεται να παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση (Σχήμα 3.1). Τέτοιοι αριθμοί Reynolds θα επικρατούν περίπου και στην παρούσα μελέτη

(γνωρίζοντας στο περίπου τις διαστάσεις και τις ταχύτητες που θα υφίστανται) οπότε, τα παραπάνω αποτελούν σημαντική πηγή ενδιαφέροντος. Επιπλέον, για ένα στρόβιλο που τα περύγια του αποτελούνται από την αεροτομή NACA 0021, από την βιβλιογραφία [2] συνίσταται η χρήση ενός λόγου $h \approx 0.6$ (Σχήμα 3.1(β)) και η ταυτόχρονη χρήση ενός στρόβιλου στερεότητας $0.5 \leq \sigma \leq 0.6$ (Σχήμα 3.1(α)).



Σχήμα 3.1: Αναπαραγωγή αποτελεσμάτων από τη βιβλιογραφία - απόδοση του στρόβιλου Wells κάτω από την επίδραση διαφόρων παραγόντων

Με γνώμονα τα παραπάνω λοιπόν, οδηγούμαστε στην επιλογή των δύο γεωμετριών. Για τη Γεωμετρία A, οι διαστάσεις της είναι ταυτόσιμες με μιας γεωμετρίας η οποία έχει ήδη μελετηθεί τόσο υπολογιστικά [7] όσο και πειραματικά [5] ενώ, η εν λόγω γεωμετρία παρουσιάζει πολλά κοινά χαρακτηριστικά μ' αυτά που προτιμούνταν από τον συγγραφέα της παρούσας εργασίας κατά τη μελέτη της θεωρίας της βιβλιογραφίας. Όσον αφορά την αναπαραγόμενη γεωμετρία, παρόλο που υπήρχαν μελετημένες γεωμετρίες με διαστάσεις πιο κοντά στα 300 mm, επιλέχτηκε η συγκεκριμένη για τον επιπλέον λόγο πως είχε το πλεονέκτημα του πειραματικού υποβάθρου. Τα πειράματα που έχουν γίνει γενικά σε τέτοιες κλίμακες, επ' ουδενί φτάνουν σε αριθμό τις ολοκληρωμένες υπολογιστικές προσομοιώσεις και γι' αυτό το λόγο θεωρήθηκε ιδανική επιλογή. Ο σκοπός της επιλογής αυτής, όπως αναφέρθηκε, είναι η εν μέρη αξιολόγηση της παρούσας μελέτης δηλαδή, ο άμεσος έλεγχος της αξιοπιστίας των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Εφόσον, όπως θα φανεί και στο κεφάλαιο 4, υπήρξε τελικά μια σχετικά καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, με την έννοια ότι επιτεύχθηκε ο μέγιστος βαθμός απόδοσης και η απώλεια στήριξης για του ίδιους συντελεστές ροής με της βιβλιογραφίας και όχι απόλυτα με την έννοια των αριθμητικών αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν, η γεωμετρία A και ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε το υπολογιστικό πλέγμα αλλά και ο ορισμός του προβλήματος, έδειξε το δρόμο για τη μελέτη μιας γεωμετρίας

παρόμοιας κλίμακας, που μπορεί να μην υπάρχει στη βιβλιογραφία (Γεωμετρία Β). Με την εν λόγω σχετική εξακρίβωση της εγκυρότητας της υπολογιστικής διαδικασίας, η οποία ήταν το βέλτιστο που μπορούσε να γίνει στην παρούσα διπλωματική εργασία και προφανώς επιδέχεται εν τέλει βελτιώσεις, μπορούσαν να προσαρμοστούν και οι υπόλοιπες διαστάσεις του στροβίλου της πειραματικής διάταξης (Γεωμετρία Β). Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως, μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων της γεωμετρίας Α κάτω από συνθήκες για τις οποίες έχει μελετηθεί η γεωμετρία ίδιων διαστάσεων, οι προσομοιώσεις συνεχίστηκαν με σκοπό τον έλεγχο του εν λόγω στροβίλου και σ' άλλες συνθήκες, οι οποίες τελικά αποτελούν το βασικό πυλώνα της εργασίας αυτής. Αντίστοιχες προσομοιώσεις ολοκληρώθηκαν και για τη γεωμετρία Β, με τη διαφορά πως έπρεπε να πραγματοποιηθούν και κάποιες επιπλέον, κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής, με τελικό σκοπό την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και τον σχολιασμό των συμπερασμάτων που θα προέκυπταν. Στον παρακάτω πίνακα λοιπόν, δίνονται οι γεωμετρίες των δύο υπό μελέτη στροβίλων (Πίνακας 3.1).

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των δύο γεωμετριών¹

	Γεωμετρία Α	Γεωμετρία Β
Αεροτομή	NACA 0021	NACA 0021
Αριθμός πτερυγίων, N	4	4
Μήκος χορδής αεροτομής, c	100	100
Λόγος διαμέτρου της βάσης προς τη διάμετρο της κορυφής, h	0.619	0.562
Στερεότητα, σ	0.598	0.566
Διάμετρος στη βάση του πτερυγίου, D_h	163	163
Διάμετρος στην κορυφή του πτερυγίου, D_t	263	288
AR	0.5	0.625
Διάκενο κορυφής πτερυγίου-πειρβλήματος στροβίλου, t	1	1

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, η μόνη πραγματική διαφορά της γεωμετρίας Β από την γεωμετρία Α, είναι η διάμετρος στην κορυφή του πτερυγίου. Στην ουσία δηλαδή, έχοντας επιλέξει τη γεωμετρία Α, η γεωμετρία Β προέκυψε δίνοντας μεγαλύτερο ύψος στο πτερύγιο μέχρις ότου, να επιτευχθεί ισάξιο διάκενο με της γεωμετρίας Α (1 mm). Αναφορικά με την επιλογή του μεγέθους του διακένου και του μήκους χορδής που έκαναν οι μελετητές της ταυτόσημης γεωμετρίας με την Α, από το Σχήμα 3.1(γ) μπορεί να δει κανείς πως το εν λόγω $t_c=0.01$ αποτελεί μια καλή λύση αφού, φαίνεται να παρουσιάζει καλή απόδοση για τις εν λόγω παραμέτρους που απεικονίζονται στο σχήμα. Οι παράμετροι αυτοί διαφέρουν για τις γεωμετρίες Α και Β ωστόσο, η χρήση ενός τέτοιου t_c είναι γενικά αποδεκτή καθώς, η επιλογή ενός αρκετά μικρότερου ή ενός αρκετά μεγαλύτερου επηρεάζουν δραματικά την απόδοση του στροβίλου και χρησιμοποιούνται σε ειδικές συνθήκες μελετών. Το ίδιο καλή επιλογή, σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν παραπάνω

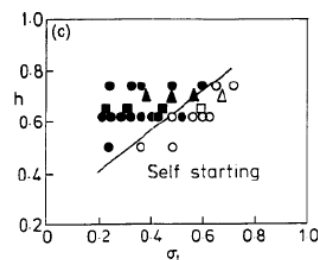
¹ Όλες οι μη αδιάστατες παράμετροι είναι σε mm

για τις προτεινόμενες διαστάσεις, φαίνεται να είναι και η χρήση μιας γεωμετρίας με αυτό τον λόγο h και αυτή τη στερεότητα, η οποία προκύπτει τελικά με τη χρήση τεσσάρων αεροτομών NACA 0021 με μήκος χορδής 100 mm.

Όσον αφορά τη γεωμετρία B, υπήρχε η αρχική σκέψη για μια δεύτερη επιλογή διαστάσεων (h_{B2}, σ_{B2}) έναντι αυτών που τελικά χρησιμοποιήθηκαν (h_{B1}, σ_{B1}). Αντί να αυξανόταν το ύψος του πτερυγίου, η δεύτερη επιλογή πρότεινε να διατηρούνταν στο ίδιο ύψος με της γεωμετρίας A και να μεγάλωνε η διάμετρος της βάσης του ρότορα όσο χρειαζόταν, προκειμένου να επιτευχθεί το ίδιο διάκενο με ένα κέλυφος διαμέτρου 290 mm. Σύμφωνα με τα παραπάνω, μεταξύ αυτών των δύο επιλογών της γεωμετρίας B τελικά ισχύουν:

$$h_2 > h_1 \text{ και } \sigma_2 > \sigma_1$$

Η επίδραση του λόγου, h , και της στερεότητας, σ , στην ικανότητα του στροβίλου να λειτουργεί στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής έχει γίνει κατανοητή στο κεφάλαιο της εισαγωγής. Στην περίπτωση λοιπόν, που επιλεγόταν η χρήση της γεωμετρίας με χαρακτηριστικά h_{B2} και σ_{B2} , αρχικά υπήρχε το ρίσκο να μην μπορεί να εκκινήσει ο στρόβιλος από μόνος του. Το ρίσκο αυτό μπορεί να υπάρχει και με τη χρήση της άλλης επιλογής ωστόσο, αυξάνοντας τα h_{B2} και σ_{B2} αυξάνεται και η πιθανότητα παρουσίας αυτού του φαινομένου (Σχήμα 3.2). Επίσης, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.1(β), η αύξηση του λόγου h οδηγεί σε πιο απότομη πτώση της απόδοσης του στροβίλου. Ταυτόχρονα, η χρήση ενός στροβίλου με μεγαλύτερη στερεότητα θα οδηγούσε θεωρητικά σε περισσότερες απώλειες στην περιοχή όπου αλληλεπιδρούν τα πτερύγια με τη βάση του ρότορα, λόγω του ότι τα πτερύγια βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους. Αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί να οδηγήσει στην πρόωρη εμφάνιση της αποκόλλησης της ροής πάνω στη βάση και επομένως και στην επιφάνεια των πτερυγίων κοντά σ' αυτή. Για τους λόγους αυτούς, για τη γεωμετρία B επιλέχθηκαν τα χαρακτηριστικά h_{B1} και σ_{B1} , όπως αυτά απεικονίζονται στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 3.1). Η διάμετρος του κελύφους τελικά, για τη γεωμετρία B, είναι ίση με 290 mm, λόγω κατασκευαστικών προβλημάτων με την επιλογή διαμέτρου 300 mm.

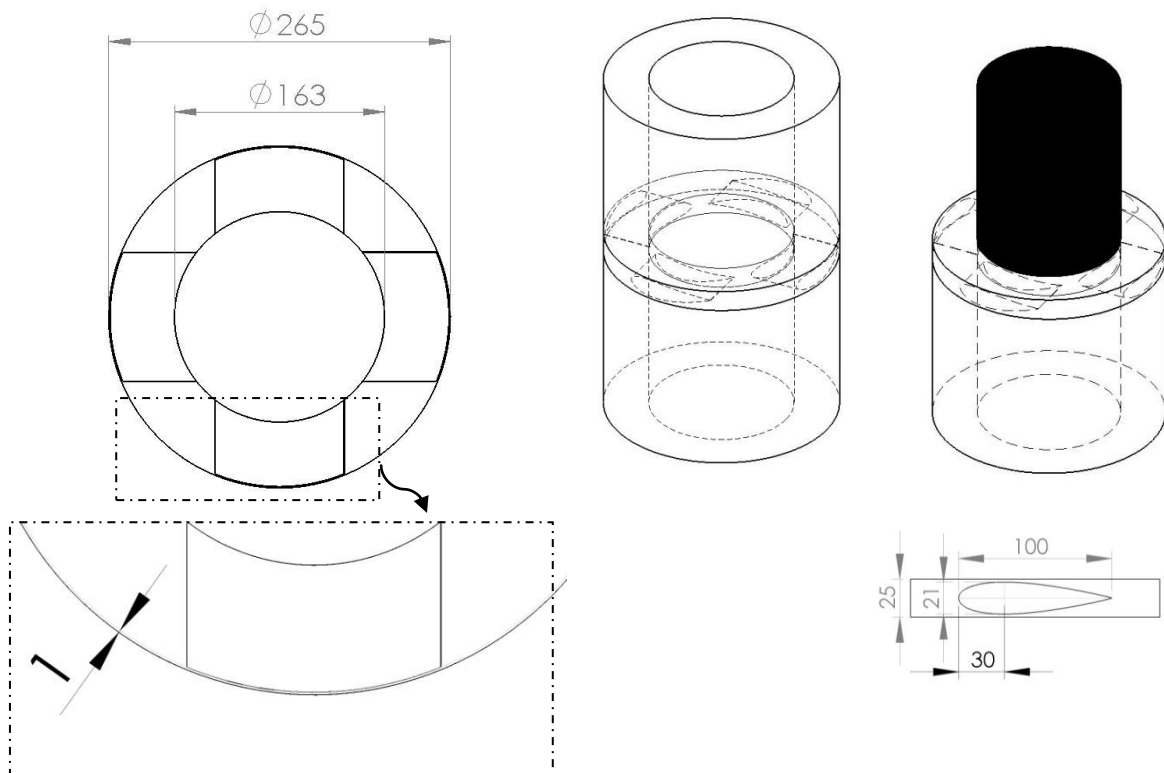


Σχήμα 3.2: Αναπαραγωγή σχήματος από τη βιβλιογραφία-κατάλληλες τιμές h και σ για ένα στρόβιλο Wells προκειμένου να μπορεί να εκκινήσει από μόνος του

3.2 Σχεδιασμός γεωμετριών με τη χρήση του λογισμικού Solidworks- Εισαγωγή γεωμετριών στο λογισμικό ANSYS CFX

Τα σχέδια όλων των γεωμετριών πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Solidworks. Το ANSYS CFX προσφέρει και σχεδιαστικό περιβάλλον αλλά δεν είναι τόσο εύχρηστο όσο το Solidworks.

Στην αρχή του κεφαλαίου αυτού αναφέρθηκε πως, όσον αφορά τις γεωμετρίες A1 και A2, δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά πλέγματα. Η μόνη διαφορά τους λοιπόν, είναι ότι εισάχθηκαν και μελετήθηκαν στο ANSYS CFX με διαφορετικό τρόπο. Η γεωμετρία A1 σχεδιάστηκε και μελετήθηκε ολόκληρη ενώ, η γεωμετρία A2 αφορούσε τη μελέτη μόνο του 1/4 της A1. Παρακάτω λοιπόν, ακολουθούν μερικά σχήματα που απεικονίζουν τον σχεδιασμό των δύο αυτών γεωμετριών, βάσει των διαστάσεων που δόθηκαν σε παραπάνω πίνακα ([Πίνακας 3.1](#)). Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως, για επιβεβαίωση της χρήσης της αεροτομής NACA 0021 παρουσιάζεται, μια φορά στα παρακάτω σχήματα, το χαρακτηριστικό της ότι στο 30% της χορδής βρίσκεται το μέγιστο πάχος αυτής, ίσο με 21% του μήκους χορδής.

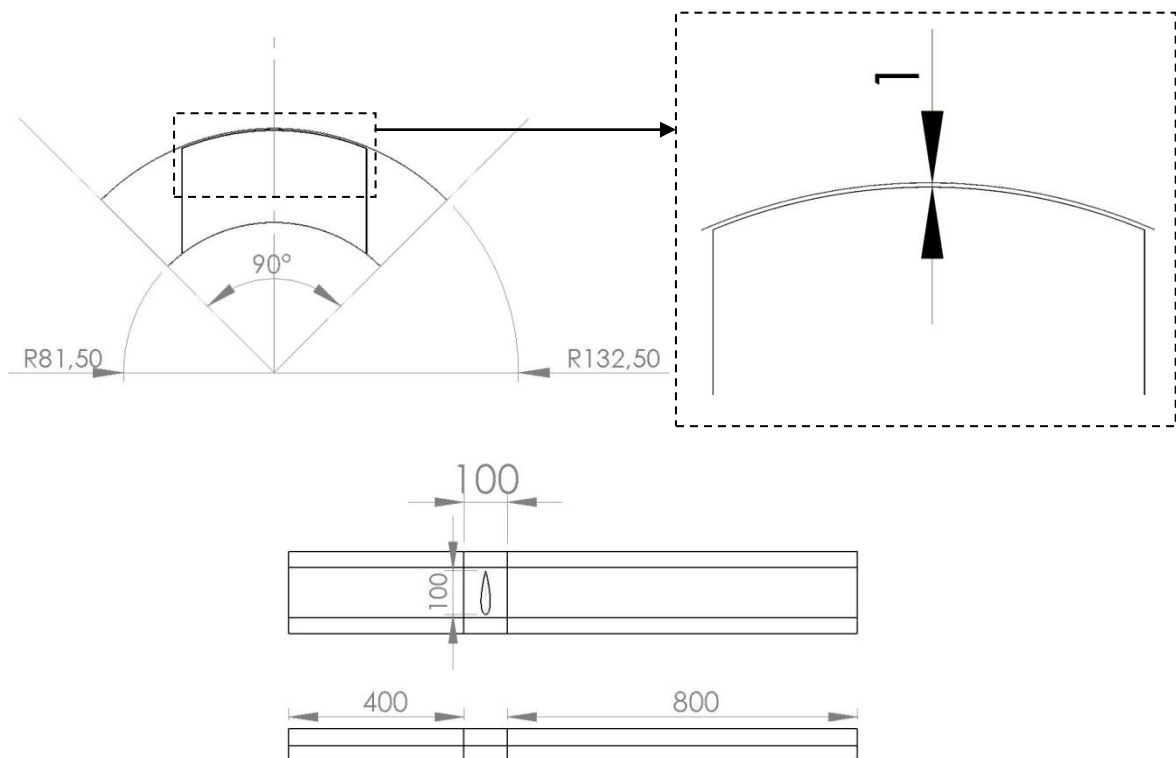


Σχήμα 3.3: Σχέδια γεωμετρίας A1-Solidworks

Στο παραπάνω σχήμα ([Σχήμα 3.3](#)) μπορεί κανείς να παρατηρήσει διάφορες όψεις τις γεωμετρίας A1. Πέρα από τις διαστάσεις οι οποίες έχουν αναφερθεί, αυτό που πρέπει να τραβήξει την προσοχή του αναγνώστη στην παρούσα φάση, είναι η απεικόνιση ενός

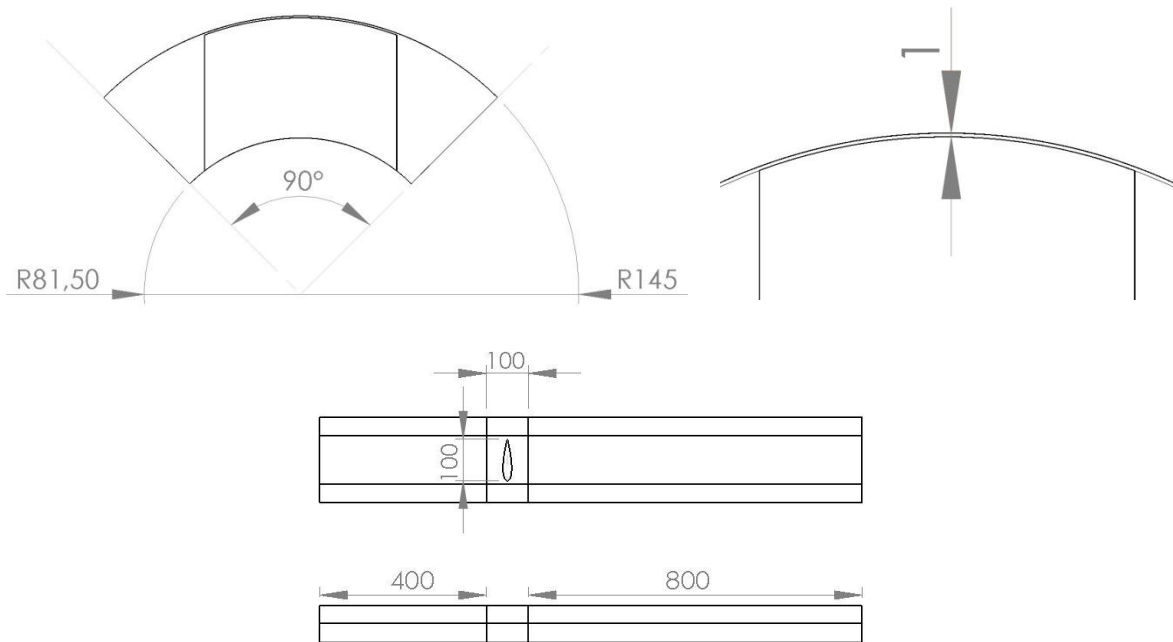
μέρους της γεωμετρίας με μαύρο χρώμα. Απ' αυτό το μέρος της γεωμετρίας, όπως και από το συμμετρικό του, δεν θα περνάει ρευστό. Αντιλαμβάνεται κανείς ότι ο σχεδιασμός της γεωμετρίας που θα εισαχθεί στο ANSYS CFX, έγινε με τρόπο τέτοιο ώστε, το ρευστό να ρέει μόνο στη διατομή που ορίζεται από τα πτερύγια. Έτσι, αποφεύγονται οι απώλειες πρόσκρουσης της ροής πάνω στο ρότορα. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε σ' όλες τις γεωμετρίες. Μια επιπλέον παρατήρηση είναι το πολύ μικρό πάχος του ρότορα. Κάτι τέτοιο ίσως δημιούργησε σφάλματα κατά την επίλυση.

Στο Σχήμα 3. 4, ο αναγνώστης μπορεί να δει μερικές όψεις της γεωμετρίας A2. Μπορεί να αντιληφθεί κανείς πώς η συμμετρία της γεωμετρίας επέτρεψε το διαχωρισμό αυτής, ανά 90° . Επίσης, γίνεται αντιληπτό πως σ' αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο πάχος στη βάση του ρότορα, προκειμένου να ληφθούν όλες οι αλληλεπιδράσεις αυτής με τα πτερύγια. Κάτι που δεν έχει αναφερθεί είναι πως στην γεωμετρία A2, όπως και στην γεωμετρία B, το εμπρός τμήμα όπου είναι και η είσοδος της ροής του αέρα έχει μήκος $4c$. Αντίστοιχα το πίσω τμήμα, όπου είναι η έξοδος της ροής, έχει μήκος $8c$ έτσι ώστε τα φαινόμενα στον απόρρου να έχουν χώρο να εξελιχτούν. Στην περίπτωση της γεωμετρίας αυτής, όπως και της γεωμετρίας B, το ρευστό θα ρέει σ' όλη τη σχεδιαζόμενη διατομή.



Σχήμα 3. 4: Σχέδια γεωμετρίας A2-Solidworks

Παρόμοια με τη γεωμετρία A2, σχεδιάστηκε και η γεωμετρία B. Παρακάτω παραθέτονται τα σχέδια αυτής (Σχήμα 3.5).



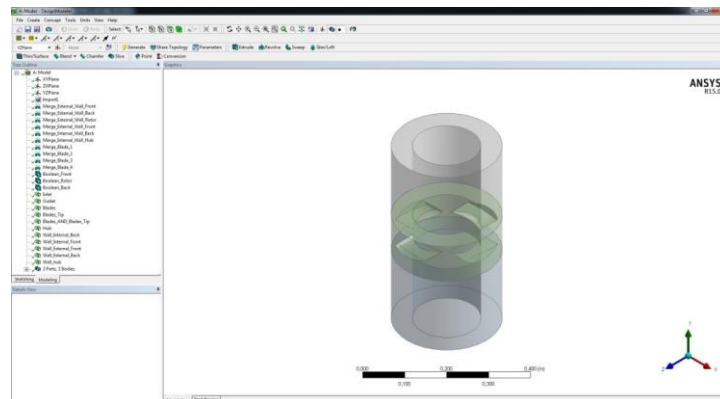
Σχήμα 3.5: Σχέδια γεωμετρίας B-Solidworks

Στο παραπάνω σχήμα, μπορεί κανείς να παρατηρήσει το μεγαλύτερο ύψος του πτερυγίου.

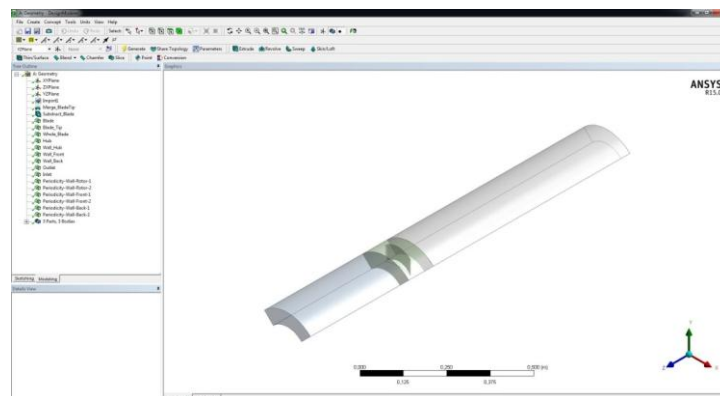
Αφού σχεδιάστηκαν οι γεωμετρίες στο solidworks εξάγονται ως αρχεία IGS, προκειμένου να εισαχθούν στο λογισμικό ANSYS CFX και πιο συγκεκριμένα στο DESIGN MODELER αυτού. Στο DESIGN MODELER ο χρήστης μπορεί να ονομάσει κάποιες περιοχές που θα του φανούν χρήσιμες κατά τα επόμενα βήματα της μοντελοποίησης όπως, την είσοδο και την έξοδο του αέρα, τις επιφάνειες του περιβλήματος που θα οριστούν ως τοιχώματα ενώ, συγκεκριμένα για την παρούσα μελέτη μπορεί να ονομάσει, για την περιοχή του ρότορα, την επιφάνεια του πτερυγίου και το τοίχωμα στην κορυφή του πτερυγίου αλλά και στη βάση. Επιπλέον, ο χρήστης απαιτείται να ορίσει το πεδίο όπου θα ρέει το ρευστό. Ο ορισμός αυτός είναι απόλυτα αναγκαίος. Επίσης, μεταξύ των τμημάτων, του εμπρός μέρους, του ρότορα και του πίσω μέρους, ο χρήστης θα μπορούσε εκ των προτέρων να ονομάσει τις περιοχές διεπιφάνειας. Έτσι, θα γίνει πιο εύκολος ο μετέπειτα ορισμός τους. Στην συνέχεια, όσον αφορά τις γεωμετρίες A2 και B, ο χρήστης μπορεί να ονομάσει για διευκόλυνση του τις επιφάνειες όπου θα οριστούν περιοδικές συνθήκες.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.1) απεικονίζονται οι υπό μελέτη γεωμετρίες εντός του περιβάλλοντος του DESIGN MODELER. Ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει στο

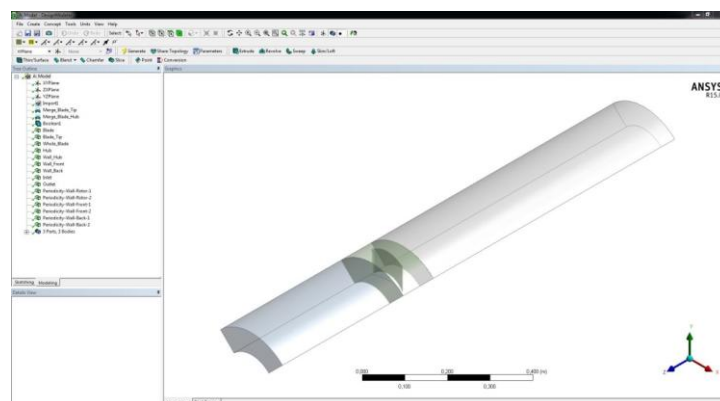
αριστερό μέρος της κάθε εικόνας τις ονομασίες των επιφανειών που έχουν δοθεί σε κάθε γεωμετρία. Μεταξύ των γεωμετριών A2 και B δεν υπάρχει καμία διαφορά. Ωστόσο, για τη γεωμετρία A1, μερικές ονομασίες επιφανειών διαφέρουν σε σχέση με τις άλλες δύο γεωμετρίες. Επίσης, διαφέρει ο άξονας περιστροφής στη γεωμετρία A1 συγκριτικά με τις γεωμετρίες A2 και B. Αυτές οι διαφορές δεν παίζουν κανέναν ρόλο στην επίλυση του προβλήματος αφού, λαμβάνονται υπόψη. Τέλος, όσον αφορά τη γεωμετρία A1, λόγω του ότι αποτελείται από περισσότερα τμήματα, απαιτεί κάποια παραπάνω βήματα για τον ορισμό του πεδίου ροής, τα οποία φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Γεωμετρία A1



Γεωμετρία A2



Γεωμετρία B

Σχήμα 3.6: Εισαγωγή γεωμετριών στο DESIGN MODELER

3.3 Υπολογιστικό πλέγμα

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί πως όλα τα υπολογιστικά πλέγματα δημιουργήθηκαν με τον αυτοματοποιημένο αλγόριθμο που παρέχει το ANSYS MESHING. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί πως σε περίπλοκες γεωμετρίες, όπως η γεωμετρία του στροβίλου Wells της παρούσας εργασίας, είναι εξαιρετικά δύσκολο να δημιουργηθεί ένα δομημένο πλέγμα, όπου δηλαδή οι όγκοι ελέγχου είναι εξάεδρα. Το πλεονέκτημα ενός δομημένου πλέγματος, συγκριτικά με ένα μη δομημένο πλέγμα, είναι πως μειώνει το υπολογιστικό κόστος και την υπολογιστική ισχύ που απαιτείται, λόγω της καλύτερης δομής του πλέγματος και συνεπώς, των λιγότερων κελιών που απαιτούνται για την ίδια ακρίβεια. Παρόλ' αυτά, είτε είναι δομημένο το πλέγμα είτε όχι δηλαδή, οι όγκοι ελέγχου είναι τετράεδρα ή πεντάεδρα, εάν η ποιότητα και η ακρίβεια του πλέγματος είναι εξίσου καλή μεταξύ των δύο τότε, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι η ίδια. Η αλήθεια είναι πως σε ένα μη δομημένο πλέγμα, σε συνδυασμό με μια περίπλοκη γεωμετρία, δεν είναι απλό να πετύχεις καλή ποιότητα και ακρίβεια πλέγματος.

Στην παρούσα εργασία τα πλέγματα που δημιουργήθηκαν αποτελούνται στο μεγαλύτερο μέρος τους από τετράεδρα (τρίγωνα) ενώ, ένα μικρό ποσοστό των κελιών είναι πεντάεδρα (πυραμίδες) τα οποία, τα δημιουργεί ο αλγόριθμος του ANSYS σε περιοχές όπου δεν ευνοείται η δημιουργία τριγωνικού κελιού. Για να δημιουργηθεί ένα σωστό πλέγμα πρέπει να έχει αντιληφθεί κανείς όσο το δυνατόν περισσότερο τις συνθήκες που πρόκειται να επικρατήσουν εντός του υπολογιστικού χωρίου. Βάσει αυτών των συνθηκών καθορίζονται τα χαρακτηριστικά του πλέγματος, όπως το μέγεθος των όγκων ελέγχου στις διάφορες περιοχές, ο αριθμός των στρωμάτων (layers) και το πάχος αυτών που σκοπό έχουν την ανάλυση του οριακού στρώματος.

Όσον αφορά την ανάλυση του οριακού στρώματος σε ένα τοίχωμα, έχει ήδη αναφερθεί η επίδραση της αδιάστατης απόστασης y^+ και της απόστασης Δy στη επιτυχία του μοντέλου τύρβης που χρησιμοποιείται και συνεπώς, στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Αυτή η διαφορά θα γίνει πιο συγκεκριμένη στο κεφάλαιο αυτό, για να οδηγηθούμε τελικά στο κεφάλαιο 4 όπου θα γίνει οπτικοποίηση της στα αποτελέσματα. Στο σημείο αυτό αναπαράγεται η σχέση που δίνει την απόσταση αυτή ενώ, σημειώνονται και κάποιες επιπλέον χρήσιμες σχέσεις για τη δημιουργία του πλέγματος σε ότι αφορά την ανάλυση του οριακού στρώματος:

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y u_\tau}{\mu}$$

όπου:

$$u_\tau = \left(\frac{\tau_\omega}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

η ταχύτητα τριβής

με:

$$\tau_\omega = \frac{1}{2}\rho C_f U_\infty^2$$

να είναι η διατμητική τάση στο τοίχωμα.

Ο όρος C_f είναι ο συντελεστής τριβής, το ρ είναι η πυκνότητα του αέρα και το U_∞ υποδηλώνει την ταχύτητα στην εξωτερική περιοχή του οριακού στρώματος, όπου δεν υπάρχει σημαντική επίδραση του ιξώδους του ρευστού.

Από την μηχανική ρευστών, μπορούμε να θεωρήσουμε προσεγγιστικά τις παρακάτω σχέσεις για τον συντελεστή τριβής και για το πάχος του οριακού στρώματος:

$$C_f = \frac{0,059}{Re^{1/5}}$$

και

$$\delta = \frac{0,37 L}{Re^{1/5}}$$

όπου, L είναι το μήκος αναφοράς για τον υπολογισμό του πάχους του οριακού στρώματος. Στην περίπτωση μας το L εκφράζει το μήκος χορδής του πτερυγίου ([Πίνακας 3.1](#)).

Στην παρούσα μελέτη, η κύρια περιοχή ενδιαφέροντος είναι ο ρότορας του στροβίλου Wells. Για το λόγο αυτό, η ποιότητα των διαφορετικών πλεγμάτων πρόκειται να σχολιαστεί με βάση αυτήν την περιοχή. Η ποιότητα ενός πλέγματος μπορεί να γίνει κατανοητή με μια σειρά από όρους που παρέχει το ANSYS CFX ωστόσο, στην παρούσα εργασία ένας απ' αυτούς τους όρους αρκεί για το σκοπό αυτό. Η παράμετρος που θα χρησιμοποιηθεί καλείται "Skewness" και είναι σύμφωνα με το εγχειρίδιο του ANSYS η πιο βασική μονάδα μέτρησης της ποιότητας του πλέγματος και η οποία στην ουσία, καθορίζει πόσο κοντά στο ιδανικό κελί είναι τα κελιά που έχουν δημιουργηθεί. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των τριγωνικών κελιών που δημιουργούνται στα πλέγματα της παρούσας γεωμετρίας, το ιδανικό θεωρείται ένα ισόπλευρο τρίγωνο. Στον παρακάτω πίνακα ([Πίνακας 3.2](#)) φαίνεται το εύρος των τιμών που μπορεί να πάρει η παράμετρος "Skewness" και το πως καθορίζεται αντίστοιχα η ποιότητα του πλέγματος.

Πίνακας 3.2: Ποιότητα κελιού βάσει της παραμέτρου "Skewness" (Αναπροσαρμογή από εγχειρίδιο "ANSYS Meshing User's Guide")

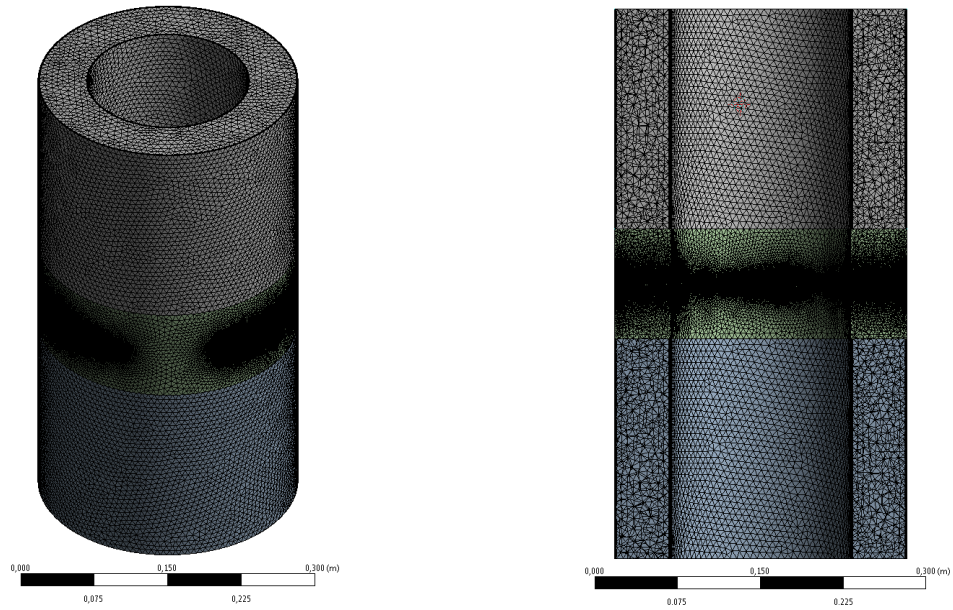
Τιμή παραμέτρου "Skewness"	Ποιότητα κελιού
1	Απογοητευτικά κακή
0.9 - <1	Κακή
0.75 - 0.9	Φτωχή
0.5 - 0.75	Αποδεκτή
0.25 - 0.5	Καλή
>0 - 0.25	Άριστη
0	Ιδανική

3.3.1 Γεωμετρία A1

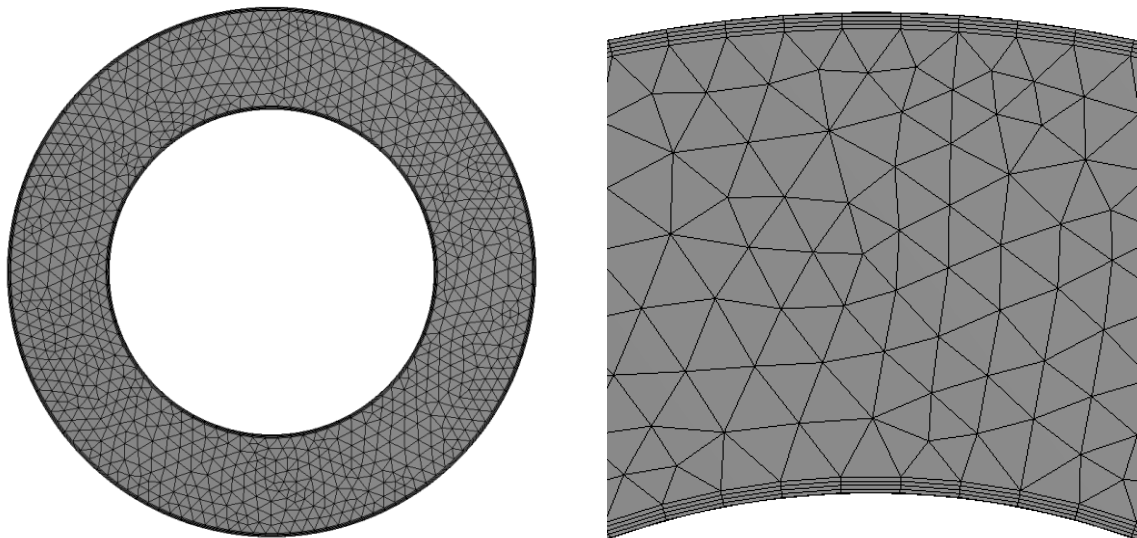
Όπως έχει γίνει γνωστό, για τη γεωμετρία A δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά πλέγματα. Το πρώτο πλέγμα, σύμφωνα με το οποίο εξάχθηκαν και τα πρώτα αποτελέσματα, δημιουργήθηκε εισάγοντας ολόκληρη τη γεωμετρία του στροβίλου Wells (Σχήμα 3.3). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το πλέγμα αυτό ήταν σχετικά αραιό με πολύ κακή ανάλυση του οριακού στρώματος. Μια πρώτη άποψη γι' αυτό δίνεται στο Σχήμα 3. 7.

Στο σχήμα αυτό, γίνονται διακριτά τα τρία διαφορετικά τμήματα του υπολογιστικού χωρίου. Στην περίπτωση της γεωμετρίας A1, το εμπρός και το πίσω μέρος είναι συμμετρικά ως προς το ρότορα. Επιπλέον, αμέσως αντιλαμβάνεται κανείς ότι έχει πραγματοποιηθεί εκλέπτυνση του πλέγματος στην περιοχή κοντά στα πτερύγια.

Στη συνέχεια, από το Σχήμα 3. 8, μπορεί να παρατηρηθεί η δημιουργία των τεσσάρων στρωμάτων (layers) στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Η δημιουργία αυτών των στρωμάτων δεν έγινε με ικανοποιητικό τρόπο. Ωστόσο, η ύπαρξη των στρωμάτων αυτών δεν έχει κάποια ιδιαίτερη επίδραση στα κύρια χαρακτηριστικά του πεδίου ροής. Τα στρώματα στην περιοχή αυτή, στην ουσία εισάγονται μόνο για να γίνει αντιληπτό από τον επιλυτή ότι η περιοχή αυτή αφορά τοίχωμα. Δεν απαιτείται επομένως κάποια ιδιαίτερη ανάλυση του οριακού στρώματος. Από την άλλη, η ύπαρξη του διακένου μεταξύ πτερυγίου και περιβλήματος, με τιμή 1 mm, δεν επιτρέπει την εισαγωγή στρωμάτων με τέτοιο πάχος. Έτσι, στην παρούσα φάση δεν δημιουργήθηκαν στρώματα στο τοίχωμα του ρότορα. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιφέρει αριθμητικά σφάλματα. Ο ορισμός ενός τοιχώματος γίνεται σωστά μόνο εάν έχουν δημιουργηθεί στρώματα έστω, για μια υποτυπώδη ανάλυση του οριακού στρώματος.

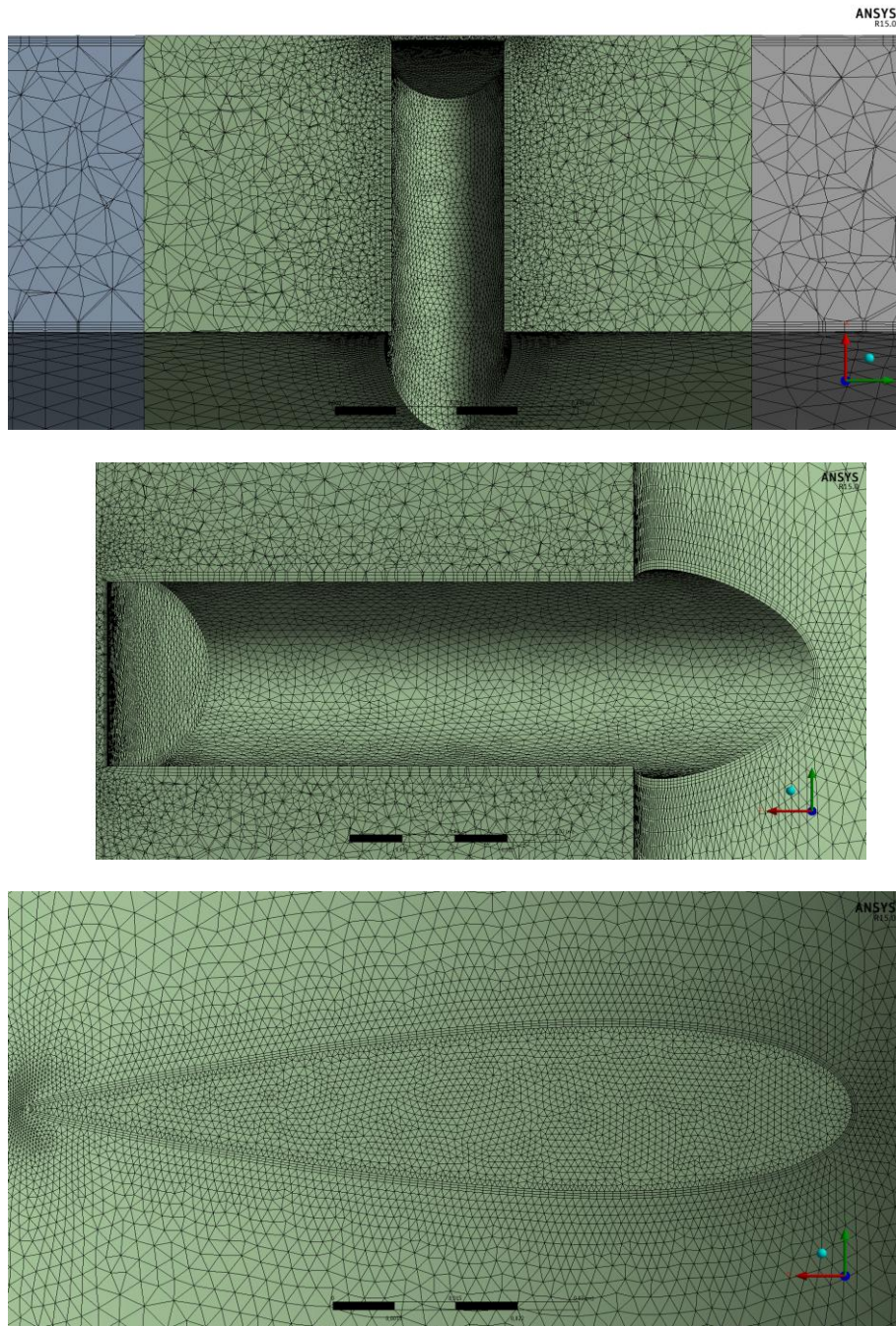


Σχήμα 3. 7: Πλέγμα γεωμετρίας A1



Σχήμα 3. 8: Ανάλυση οριακού στρώματος στο τοίχωμα του κυλίνδρου

Ακολούθως, στο Σχήμα 3. 9, μπορεί κανείς να δει το πλέγμα κοντά στην περιοχή του περυγίου ενώ, μπορεί να διακρίνει τα πέντε στρώματα που δημιουργήθηκαν. Όσον αφορά την ανάλυση του οριακού στρώματος στο περύγιο, έγινε για ένα y^+ ίσο με είκοσι. Λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα εισαγωγής του αέρα για να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις του αριθμού Reynolds, προέκυψαν τα χαρακτηριστικά της ανάλυσης του οριακού στρώματος στο περύγιο, τα οποία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.3). Η αριθμητική διαδικασία εξαγωγής των χαρακτηριστικών της ανάλυσης του οριακού στρώματος θα πραγματοποιηθεί αναλυτικά για την γεωμετρία A2.



Σχήμα 3. 9: Πλέγμα στην περιοχή του ρότορα και ανάλυση οριακού στρώματος στο πτερύγιο

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά ανάλυσης οριακού στρώματος πτερυγίου για τη γεωμετρία A1

y+	20
Re	112,869
Δy	3.3×10^{-4} m
Αριθμός στρωμάτων	5
Ρυθμός αύξησης	1.05
δ	8.83×10^{-4} m

Για την ανάλυση του οριακού στρώματος του πτερυγίου στη γεωμετρία A1, ο αριθμός Reynolds υπολογίστηκε βάσει της μέγιστης απόλυτης συνιστώσας της ταχύτητας εισαγωγής που ελέγχεται (17.44 m/s). Αυτή η επιλογή μεταγενέστερα κρίθηκε ως λανθασμένη αφού, ο αριθμός Reynolds πρέπει τελικά να καθοριστεί από τη σχετική ταχύτητα που αναπτύσσεται λόγω περιστροφής του ρότορα, η οποία είναι μεγαλύτερη από την απόλυτη συνιστώσα της ταχύτητας. Αντιλαμβάνεται κανείς ότι λόγω των διαφορετικών ταχυτήτων εισαγωγής και των διαφορετικών ταχυτήτων περιστροφής του ρότορα που ελέγχονται στην παρούσα εργασία, ο σχετιζόμενος με την περιστροφή του ρότορα αριθμός Reynolds κυμαίνεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών. Όσον αφορά τον ρυθμό αύξησης που φαίνεται στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 3.3), αυτός αφορά την κλιμάκωση του ύψους του κελιού ανά στρώμα. Έτσι, για έναν ρυθμό αύξησης 1.05 το ύψος του κελιού n θα είναι κατά 5% μεγαλύτερο από του κελιού $n-1$. Ο σκοπός του ρυθμού αυξησης συνδυάζεται με τον αριθμό των στρωμάτων ώστε, η ανάλυση να περιλαμβάνει όλο το πάχος του οριακού στρώματος. Ως γνωστόν, όσο μικρότερος είναι ο αριθμός Reynolds τόσο μεγαλύτερο είναι το πάχος αυτό. Συνεπώς, για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση με ένα κοινό πλέγμα για τις διάφορες συνθήκες που μελετώνται, πρέπει η απόσταση Δy να υπολογιστεί από τον μέγιστο αριθμό Reynolds που επικρατεί, υπολογισμένος σύμφωνα με την σχετική ταχύτητα, ενώ, το συνολικό ύψος των στρωμάτων πρέπει να υπολογιστεί από το πάχος του οριακού στρώματος που δημιουργείται κατά τον χαμηλότερο αριθμό Reynolds, με έναν συγκεκριμένο ρυθμό αύξησης. Η ανάλυση αυτή θα κατανοηθεί καλύτερα στο τελικό πλέγμα της γεωμετρίας A2.

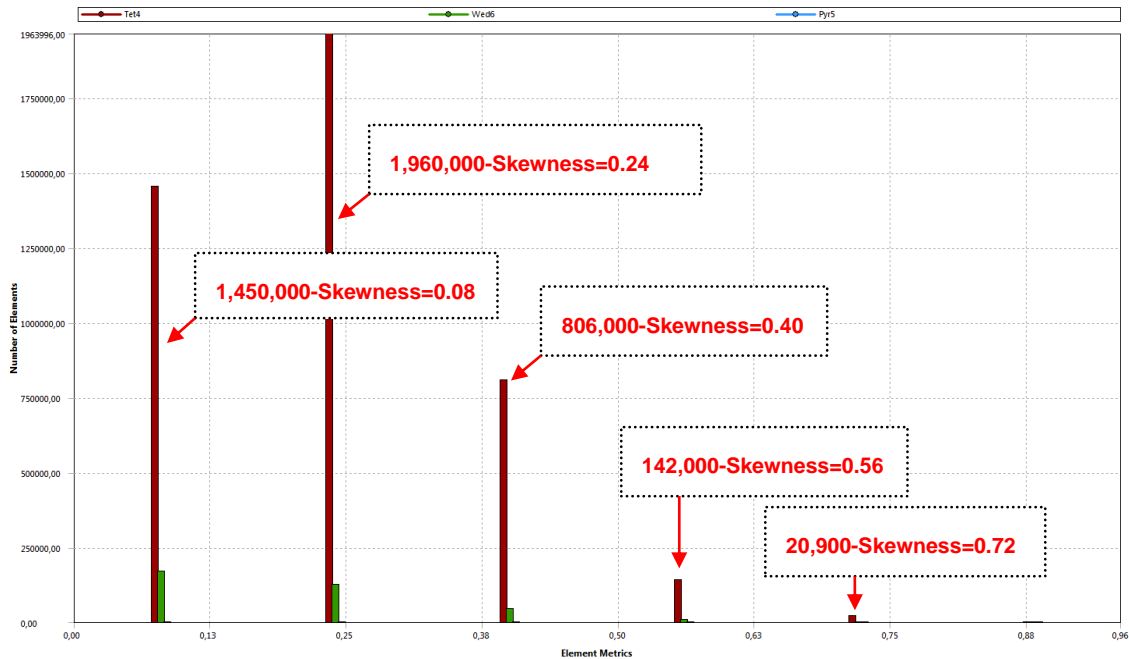
Ο αριθμός των κελιών που δημιουργήθηκαν μπορεί να φανεί στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 3.4), για κάθε ένα από τα τρία τμήματα του υπολογιστικού χωρίου. Σημειώνεται πως στην περιοχή γύρω από το πτερύγιο επιβλήθηκε εκλέπτυνση με μέγεθος κελιού 1 mm. Ο αριθμός των κελιών προκύπτει από το άθροισμα των τετράεδρων όγκων ελέγχου, των όγκων ελέγχου που δημιουργήθηκαν με στοπό την ανάλυση του οριακού στρώματος (στρώματα) και των πεντάεδρων όγκων ελέγχου.

Πίνακας 3.4: Αριθμός κελιών ανά τμήμα της γεωμετρίας A1

Τμήμα	Αριθμός κελιών
Εμπρός	252,798
Πίσω	252,760
Ρότορας	4,734,746
Σύνολο	5,240,342

Όσον αφορά την ποιότητα του παρόντος πλέγματος, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ήταν ισάξια καλή των επόμενων πλεγμάτων που ακολούθησαν. Παρατηρώντας τον πίνακα που δίνει τα χαρακτηριστικά της παραμέτρου "Skewness" (Πίνακας 3.2) μπορεί να

γίνει κατανοήτη η εν λόγω ποιότητα από το Σχήμα 3.10. Η ποιότητα αυτή αναφέρεται μόνο στην περιοχή κύριου ενδιαφέροντος, του ρότορα.



Σχήμα 3.10: Ποιότητα πλέγματος της γεωμετρίας A1 στην περιοχή του ρότορα

Από το παραπάνω σχήμα μπορεί επίσης να παρατηρηθεί η δομή του πλέγματος στον ρότορα αφού, με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται τα τετράεδρα, με πράσινο χρώμα γίνεται αναφορά στα στρώματα, που δημιουργήθηκαν για την ανάλυση του οριακού στρώματος στο περύγιο, και με μπλέ χρώμα χαρακτηρίζονται τα πεντάεδρα, τα οποία όπως φαίνεται αποτελούν αμελητέο ποσοστό των συνολικών κελιών και συνεπώς, μπορούν να αγνοηθούν.

Για το σχολιασμό που θα ακολουθήσει, τα ποσοστά που θα χρησιμοποιηθούν αναφέρονται στο συνολικό αριθμό κελιών του ρότορα. Έτσι, μπορεί να γίνει και μια καταμέτρηση των τετράεδρων καθώς και των όγκων ελέγχου που δημιουργήθηκαν από την προσθήκη των στρωμάτων. Όσον αφορά τους τετραεδρικούς όγκους ελέγχου, το 72% έχει δημιουργηθεί με άριστη ποιότητα, το 17% με καλή ποιότητα ενώ, το 3,5% έχει αποδεκτή ποιότητα, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει ανάγκη για επανασχεδιασμό του πλέγματος.

Στην ανάλυση του οριακού στρώματος, υπόλοιπο 7.5%, παρατηρείται μια αντίστοιχη κατανομή της ποιότητας του πλέγματος, μόνο που αυτή τη φορά το μεγαλύτερο ποσοστό έχει άριστη ποιότητα. Ωστόσο, για το πλέγμα που δημιουργείται στο τοίχωμα του περυγίου και το οποίο, όπως έχει τονιστεί στις προηγούμενες ενότητες, είναι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις μεταβλητές στο πεδίο ροής, δεν είναι

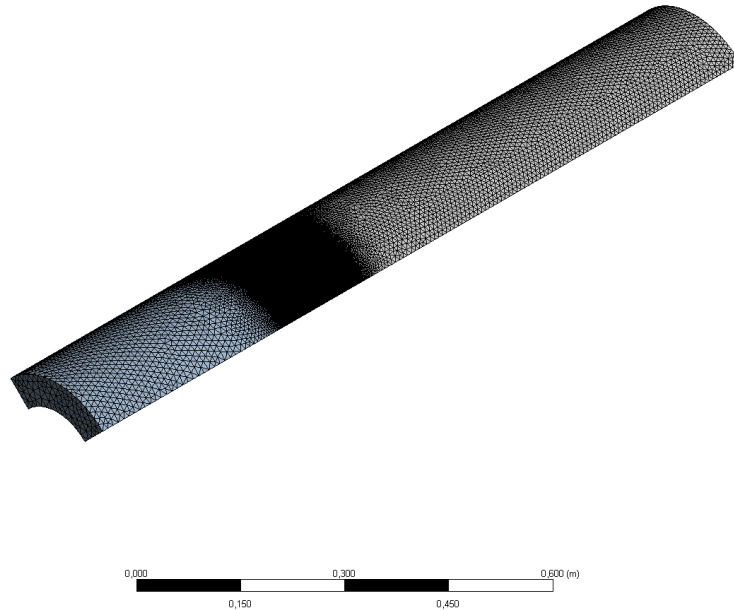
ορθό να χαρακτηρίζεται μόνο από την ποιότητα του. Η περίπτωση του πλέγματος της γεωμετρίας A1 είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα καθώς, παρόλο που η ποιότητα στο μεγαλύτερο ποσοστό της είναι άριστη, η ανάλυση είναι εσφαλμένη.

3.3.2 Γεωμετρία A2

Κατά τη διαδικασία ανεξαρτητοποίησης των αποτελεσμάτων από το πλέγμα, η ανάγκη για περαιτέρω πύκνωση του πλέγματος και πολύ υψηλότερη ανάλυση του οριακού στρώματος στο πτερύγιο οδήγησε στη χρήση της γεωμετρίας A2. Εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι ο ρότορας είναι συμμετρικός και ως προς τους τρεις άξονες συντεταγμένων (x,y,z), προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία πλεγμάτων πολλών εκατομμυρίων, εισάχθηκε και στη συνέχεια αναλύθηκε μόνο το ένα πτερύγιο του ρότορα. Η συγκεκριμένη πρακτική έχει το πλεονέκτημα ότι η πύκνωση του πλέγματος θα γίνει στο ροϊκό πεδίο που καλύπτεται μόνο από το ένα πτερύγιο και συνεπώς, η αύξηση του αριθμού των κελιών θα αφορά μόνο το 1/4 της αρχικής γεωμετρίας. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε στην γεωμετρία A2 ξεπερνάει τα δέκα εκατομμύρια κελιά. Επομένως, μπορεί κανείς να φανταστεί ότι η χρήση της γεωμετρίας A1 με μια τέτοια εκτέλεση, θα οδηγούσε σε απαγορευτικό αριθμό κελιών (~40 εκατομμύρια κελιά) και σε δραματική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και μνήμης. Μια πρώτη αντίληψη του πλέγματος της γεωμετρίας A2 δίνεται στο Σχήμα 3.11.

Για να δημιουργηθεί το τελικό πλέγμα, η διαδικασία πύκνωσης και ανάλυσης του οριακού στρώματος έπρεπε να γίνει πιο μεθοδευμένα. Αρχικά, όπως αναφέρθηκε στην ανάλυση του πλέγματος της γεωμετρίας A1, ο αριθμός Reynolds έπρεπε να υπολογιστεί με βάση τη σχετική ταχύτητα (W) που αναπτύσσεται, λόγω περιστροφής, πάνω στο πτερύγιο. Σε συνθήκες μόνιμης ροής ως γνωστόν, η σχετική ταχύτητα προσκρούει στην ακμή προσβολής του πτερυγίου με μια γωνία πρόσπτωσης α . Η σχετική ταχύτητα λοιπόν εξάγεται από τα τρίγωνα ταχύτητας στην είσοδο (Σχήμα 1.25). Στην προηγούμενη ενότητα σημειώθηκε πως, για να είναι αποδεκτή η χρήση ενός κοινού πλέγματος πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο ο μικρότερος (μικρότερη σχετική ταχύτητα) όσο και ο μεγαλύτερος (μεγαλύτερη σχετική ταχύτητα) αριθμός Reynolds. Η μικρότερη σχετική ταχύτητα αναπτύσσεται για ταχύτητα εισαγωγής (απόλυτη ταχύτητα, C) 2.36 m/s και ταχύτητα περιστροφής του ρότορα ισοδύναμη με 2000 rpm ενώ, η μεγαλύτερη, για 17.44 m/s και 4000 rpm αντίστοιχα. Η εφαπτομενική ταχύτητα (U) που αναπτύσσεται στο πτερύγιο και η οποία σχετίζεται με την περιστροφή, υπολογίστηκε με βάση την ακτινική θέση στην κορυφή του πτερυγίου ($r_t=0.1315$ m). Η πυκνότητα του αέρα, ρ , και το δυναμικό ιξώδες, μ , ισούνται με $1.185 \frac{kg}{m^3}$ και $1.1831 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$ αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές, σύμφωνα με τις οποίες

πραγματοποιούνται και οι προσομοιώσεις, δίνονται από το λογισμικό και αφορούν την εισαγωγή αέρα σε θερμοκρασία 25°C.



Σχήμα 3.11: Πλέγμα γεωμετρίας A2

Οι υπολογισμοί που αφορούν την απόσταση Δy , σύμφωνα με τον μέγιστο αριθμό Reynolds και όσα ειπώθηκαν παραπάνω, φαίνονται στη συνέχεια:

$$\tan \alpha = \frac{C}{U} = \frac{C}{2\pi N r_t / 60} = \frac{17.44}{55.08} \Rightarrow \alpha = 17.57^\circ$$

$$\sin \alpha = \frac{C}{W} \Rightarrow W = \frac{C}{\sin \alpha} = \frac{17.44}{\sin 17.57^\circ} = 57.77 \text{ m/s}$$

οπότε:

$$Re = \frac{\rho W c}{\mu} = \frac{1.185 \cdot 57.77 \cdot 0.1}{1.1831 \cdot 10^{-5}} \approx 373,880$$

όπου c είναι το μήκος χορδής του πτερυγίου.

Από τις σχέσεις που είχαν δοθεί σε προηγούμενη ενότητα ([3.3 Υπολογιστικό πλέγμα](#)) μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή τριβής, τη διαμητική τάση τοιχώματος και την ταχύτητα τριβής:

$$C_f = \frac{0,059}{Re^{1/5}} = 4.53 \cdot 10^{-3}$$

$$\tau_\omega = \frac{1}{2} \rho C_f W^2 = 8.96 \text{ N/m}^2$$

$$u_{\tau} = \left(\frac{\tau_{\omega}}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} = 2.75 \text{ m/s}$$

Οπότε, η απόσταση Δy προκύπτει ίση με:

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y u_{\tau}}{\mu} \Rightarrow \Delta y = \frac{\mu y^+}{\rho u_{\tau}} = 5.62 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Ο τελευταίος υπολογισμός έγινε για $y^+ = 1$ (όπως συζητήθηκε στην ενότητα [2.2.2.3.3.3 Προσέγγιση αυτοματοποιημένης μεταχείρισης τοιχώματος](#)).

Από την άλλη, οι υπολογισμοί που αφορούν το πάχος του οριακού στρώματος, σύμφωνα με τον ελάχιστο αριθμό Reynolds και όσα ειπώθηκαν παραπάνω, φαίνονται στη συνέχεια:

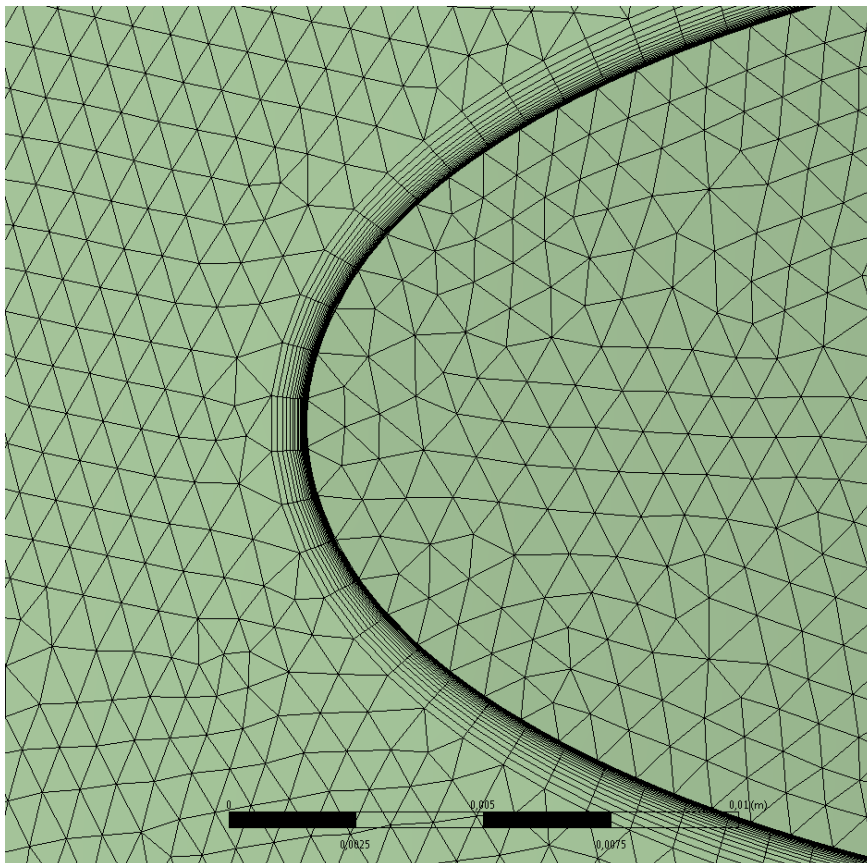
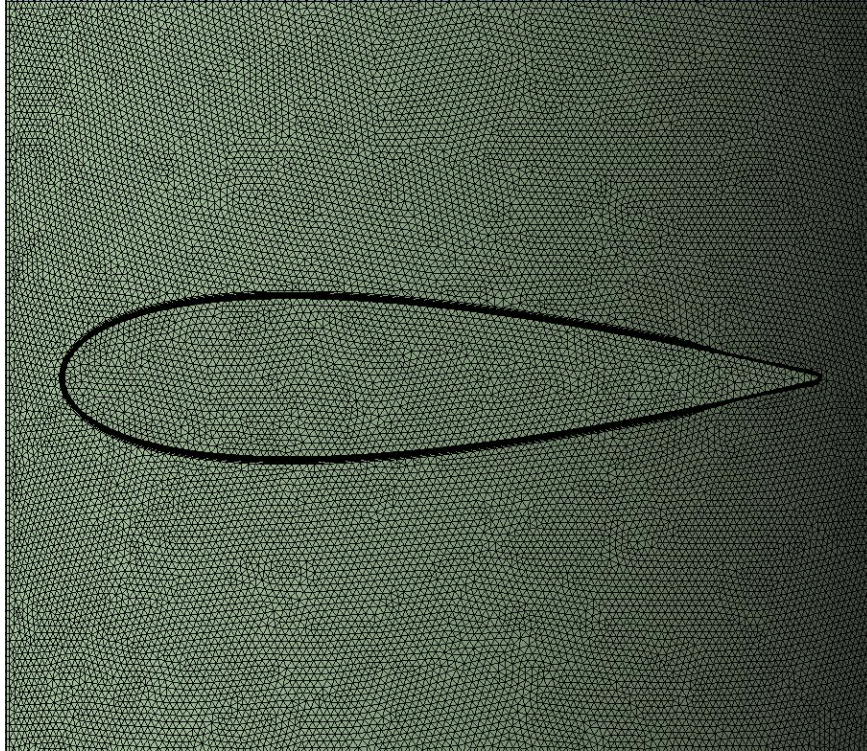
$$\tan \alpha = \frac{C}{U} = \frac{C}{2\pi N r_m / 60} = \frac{2.36}{22.31} \Rightarrow \alpha = 6.04^\circ$$

$$\sin \alpha = \frac{C}{W} \Rightarrow W = \frac{C}{\sin \alpha} = \frac{2.36}{\sin 6.04^\circ} = 22.43 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho W c}{\mu} = \frac{1.185 \cdot 22.43 \cdot 0.1}{1.1831 \cdot 10^{-5}} \approx 145164$$

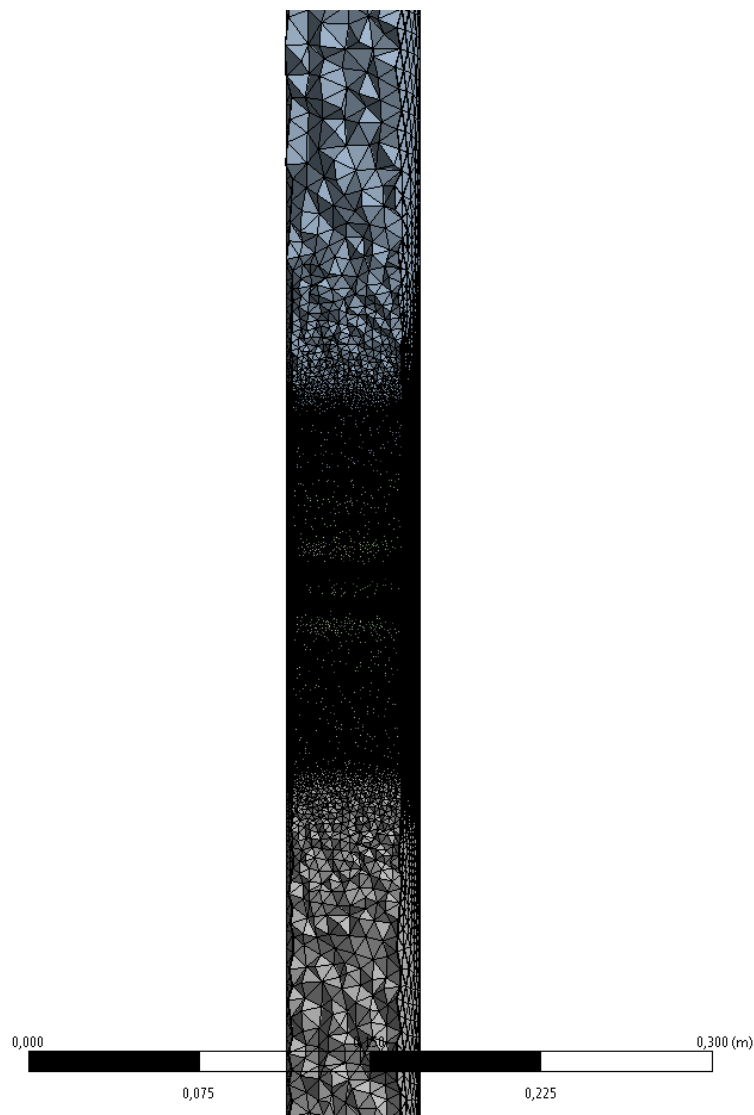
$$\delta = \frac{0.37 c}{Re^{1/5}} = 3.43 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, για την συγκεκριμένη απόσταση Δy και για έναν ρυθμό αύξησης ίσο με 1.2 απαιτείται η δημιουργία 26 στρωμάτων για να καλυφθεί όλο το εύρος του πάχους του οριακού στρώματος ανά συνθήκη. Ωστόσο, ο αριθμός των στρωμάτων αυτών κρίνεται υπερβολικός. Σύμφωνα με την θεωρία των εξισώσεων τοιχώματος, για μια πολύ καλή ανάλυση του οριακού στρώματος απαιτούνται περίπου 10 στρώματα. Η επιλογή 26 στρωμάτων λοιπόν, ίσως οδηγούσε τις εξισώσεις τοιχώματος στο να αγνοήσουν μερικά από τα τελευταία στρώματα. Στην παρούσα εργασία επομένως, η ανάλυση του οριακού στρώματος έγινε χρησιμοποιώντας την απόσταση Δy που βρέθηκε παραπάνω και έναν αριθμό στρωμάτων ίσο με 20. Μια τέτοια επιλογή τελικά δεν επηρέασε τα αποτελέσματα αφού, κατά τη διαδικασία των προσομοιώσεων, πριν πραγματοποιηθεί η ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από το πλέγμα, δημιουργήθηκε και ένα επιπλέον πυκνότερο πλέγμα με περισσότερα στρώματα ανάλυσης του οριακού στρώματος και με περίπου 14 εκατομμύρια κελιά, το οποίο δεν οδήγησε σε παραγωγή διαφορετικών αποτελεσμάτων. Παρακάτω, παρουσιάζεται ένα σχήμα που απεικονίζει την περιοχή του περυγίου και τη δημιουργία των στρωμάτων σ' αυτό ([Σχήμα 2.10](#)).



Σχήμα 2.10: Περιοχή πτερυγίου-Ανάλυση οριακού στρώματος γεωμετρίας A2

Στην παρούσα γεωμετρία, το εμπρός και το πίσω μέρος δεν είναι συμμετρικά ως προς το ρότορα. Όπως έχει αναφερθεί, το εμπρός τμήμα αποφασίστηκε να έχει ένα μήκος $4c=400$ mm ενώ, το πίσω τμήμα μήκος $8c=800$ mm. Έτσι, επιλέχτηκε μια πιο μεθοδευμένη δημιουργία του πλέγματος στις περιοχές αυτές. Συγκεκριμένα, επιλέχτηκε η ελαφρώς πύκνωση του πλέγματος στο πίσω τμήμα, με το μέγεθος των κελιών να κυμαίνεται σταθερά κοντά στα 8mm ενώ, το μέγεθος των κελιών του μπροστινού μέρους επιλέχτηκε να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο (Σχήμα 3.12). Αυτό γιατί στην ουσία, η ροή είναι ακόμα ομαλή σ' αυτήν την περιοχή και συνεπώς, μπορεί να χαρακτηριστεί ως αδιάφορη περιοχή για το σχολιασμό των χαρακτηριστικών της ροής.



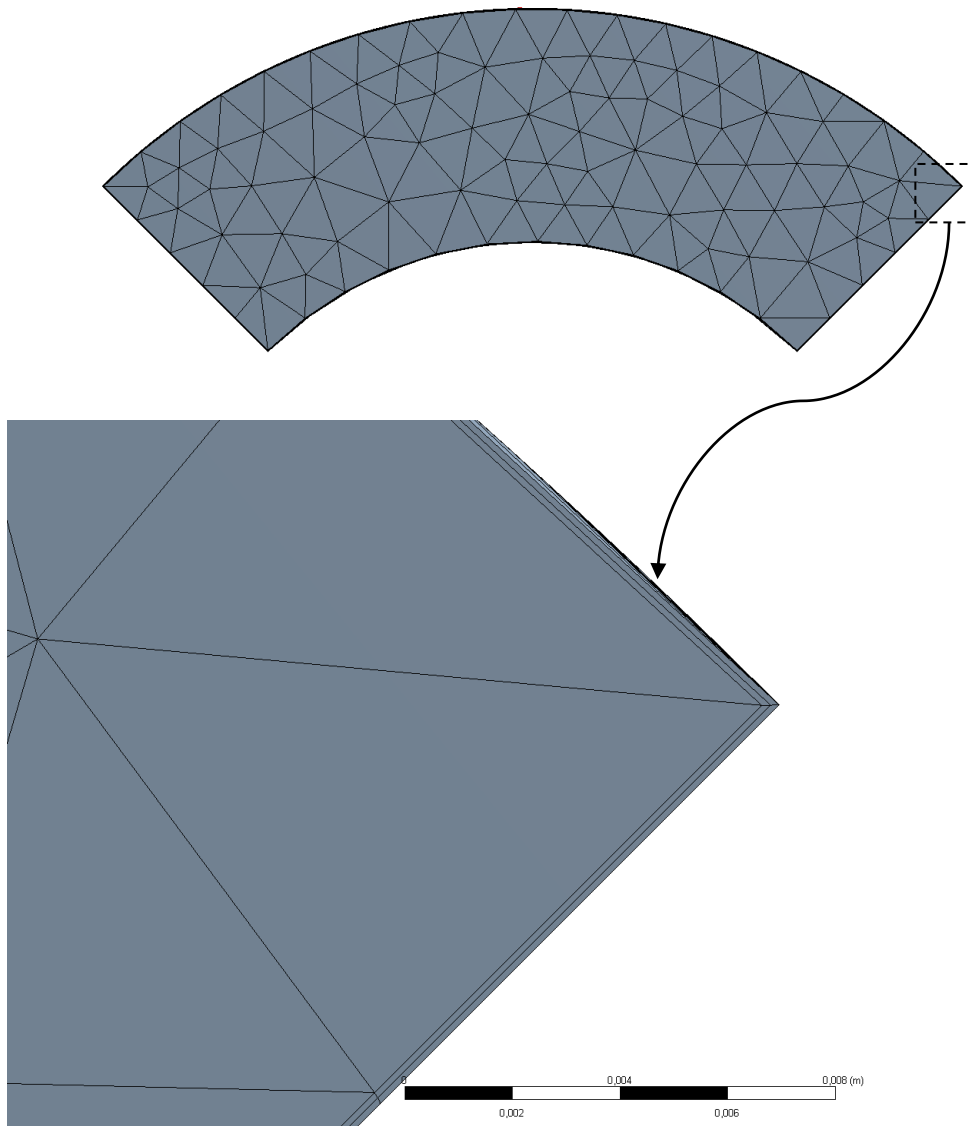
Σχήμα 3.12: Μέγεθος όγκων ελέγχου της γεωμετρίας A2

Επιπλέον, έγινε εκλέπτυνση του πλέγματος στην περιοχή του ρότορα η οποία, σε αντίθεση με τη γεωμετρία A1, αφορά όλο το χωρίο. Όπως ίσως έχει γίνει αντιληπτό,

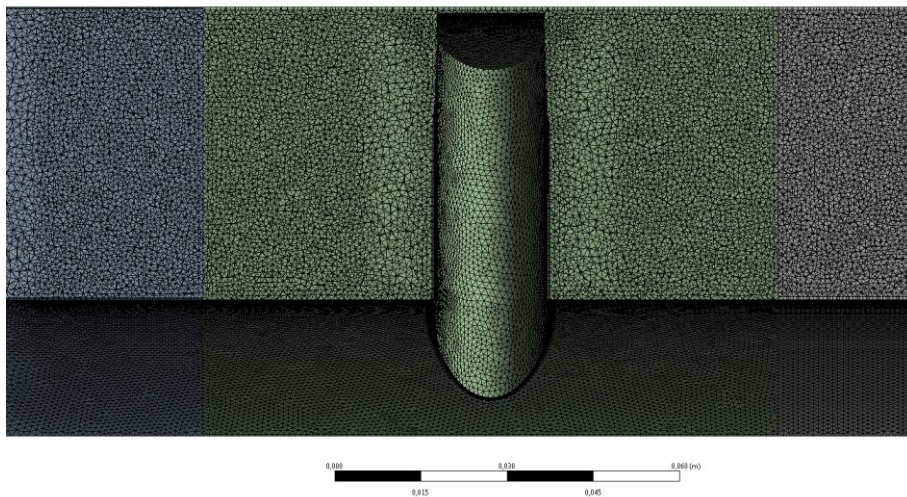
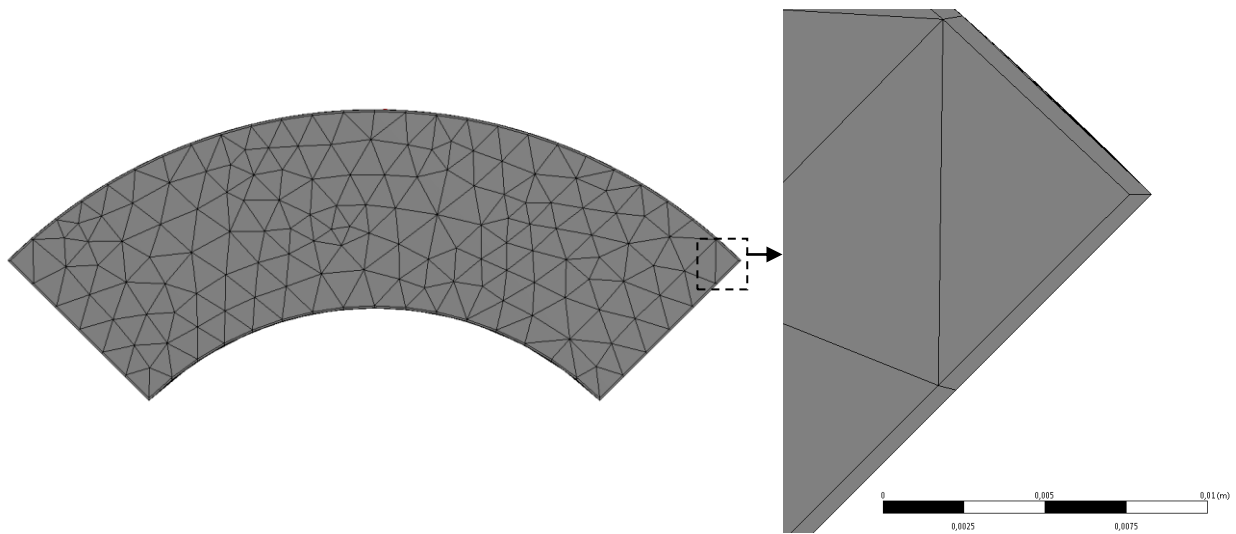
επιλέχτηκε και η πύκνωση του πλέγματος στις περιοχές λίγο πριν και λίγο μετά το ρότορα. Στις δύο παραπάνω περιοχές επιβλήθηκε μέγεθος κελιού ίσο με 1 mm.

Όσον αφορά την ανάλυση του οριακού στρώματος στα τοιχώματα του περιβλήματος, εισήχθησαν στρώματα. Στο μπροστά μέρος, λόγω του ότι παρουσιάζει ομαλή ροή, προστέθηκαν μόνο δύο στρώματα έτσι ώστε, να γίνει αντιληπτό στο λογισμικό ότι στην περιοχή αυτή βρίσκεται τοίχωμα (Σχήμα 3.13). Από την άλλη, στα τοιχώματα των περιοχών του ρότορα και του πίσω τμήματος η ανάλυση έγινε για $y^+=1$ αλλά, λόγω της παρουσίας του διακένου μεταξύ της κορυφής του πτερυγίου και του περιβλήματος, το οποίο ισούται με 1 mm, υπήρξε δυνατότητα τοποθέτησης μόνο ενός στρώματος (

Σχήμα 3.14). Ωστόσο, ένα στρώμα είναι αρκετό για να δράσουν οι εξισώσεις τοιχώματος



Σχήμα 3.13: Ανάλυση οριακού στρώματος στο εμπρός τμήμα



Σχήμα 3.14: Ανάλυση οριακού στρώματος στο πίσω τμήμα και στην περιοχή του ρότορα

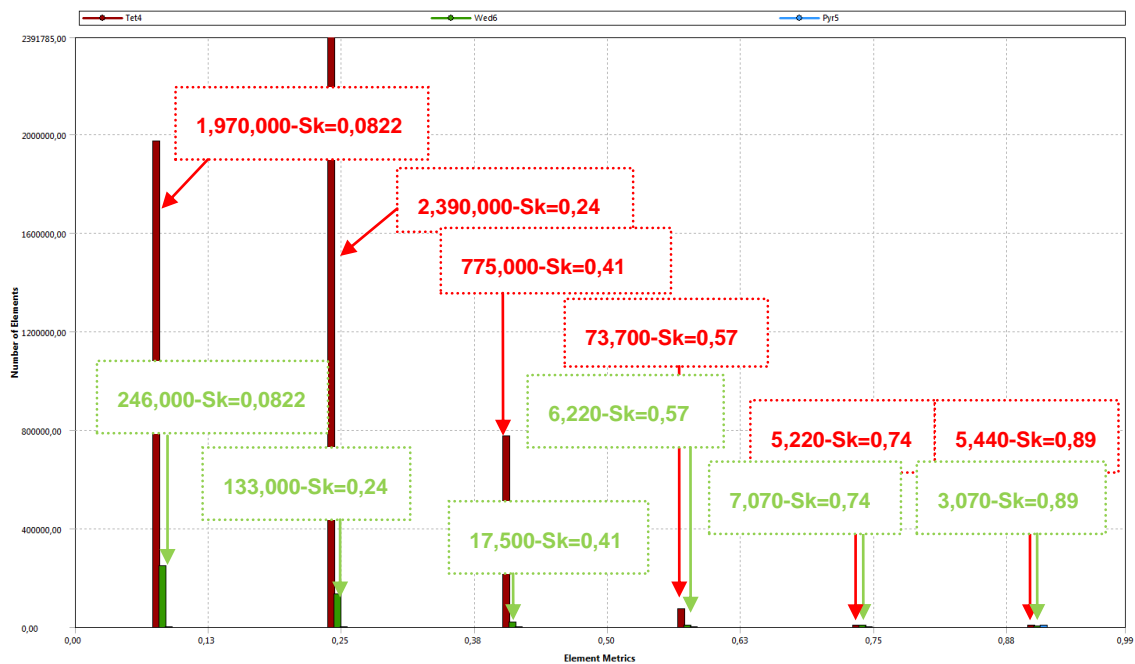
Ο αριθμός των κελιών που δημιουργήθηκαν στη συγκεκριμένη γεωμετρία φαίνεται στον παρακάτω πίνακα ([Πίνακας 3.5](#)). Στον πίνακα αυτόν παραθέτεται και ο αριθμός των κελιών για τα αντίστοιχα τμήματα της γεωμετρίας A1. Το εμπρός και το πίσω μέρος έχουν αλλιάξει διαστάσεις οπότε, η σύγκριση δεν είναι άμεση. Ωστόσο, η περιοχή του ρότορα μεταξύ των δύο γεωμετριών είναι η ίδια σε διαστάσεις, μόνο που η γεωμετρία A2, όπως έχει αναφερθεί, περιέχει το ένα από τα συνολικά τέσσερα περύγια. Η σύγκριση των πλεγμάτων των δύο γεωμετριών γι' αυτή την περιοχή αναδεικνύει την εκλέπτυνση που έγινε στο πλέγμα.

Πίνακας 3.5: Αριθμός κελιών ανά τμήμα της γεωμετρίας A2

Τμήμα	Αριθμός κελιών Γεωμετρίας A1	Αριθμός κελιών Γεωμετρίας A2
Εμπρός	252,798	2,373,640
Πίσω	252,798	2,393,491
Ρότορας	4,734,746	5,640,949
Σύνολο	5,240,342	10,408,080

Γίνεται αντιληπτό αμέσως πως στην περιοχή του ρότορα ο αριθμός των κελιών έχει αυξηθεί κατά πολύ στην γεωμετρία A2. Από τον παραπάνω πίνακα η εμφανής διαφορά είναι 906,203 κελιά. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη πως η γεωμετρία A2 στην περιοχή του ρότορα είναι το 1/4 της γεωμετρίας A1, η διαφορά αυτή γίνεται ίση με 4,457,330.

Η ποιότητα του πλέγματος της γεωμετρίας A2 σχολιάζεται με παρόμοιο τρόπο όπως στη γεωμετρία A1, χρησιμοποιώντας την παράμετρο "Skewness" (Sk). Στο Σχήμα 3.15 φαίνεται η κατανομή της εν λόγω παραμέτρου, για το πλέγμα στην περιοχή του ρότορα.



Σχήμα 3.15: Ποιότητα πλέγματος της γεωμετρίας A2 στην περιοχή του ρότορα

Ο σχολιασμός της ποιότητας του πλέγματος στην περιοχή του ρότορα για τη γεωμετρία A2 θα γίνει με λίγο αναλυτικότερο τρόπο απ' ότι της γεωμετρίας A1. Τα ποσοστά των διάφορων όγκων ελέγχου διαχωρίζονται μεταξύ τους, προκειμένου η ποιότητα να αφορά κάθε διαφορετικό όγκο ελέγχου ξεχωριστά. Έτσι, κυρίως η ποιότητα των κελιών στο οριακό στρώμα, που αποτελούν μικρό συνολικό ποσοστό, θα γίνει πιο κατανοητή. Για το λόγο αυτό σχηματίστηκε ο Πίνακας 3.6, βάσει του παραπάνω σχήματος (Σχήμα 3.15)

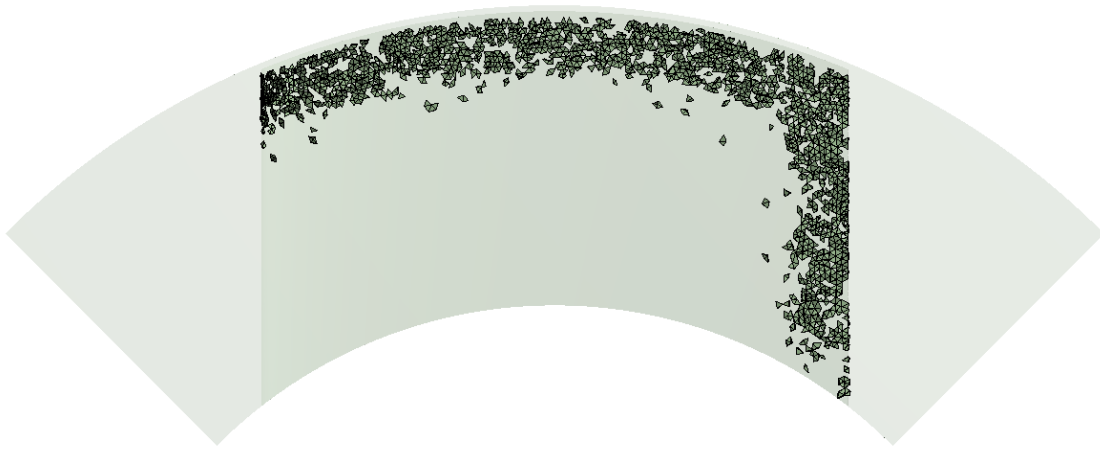
συναρτήσει της παραμέτρου "Skewness". Από τον παραπάνω διαχωρισμό εξαιρούνται οι πεντάεδροι όγκοι ελέγχου εξαιτίας του ότι εμφανίζονται μόνο για μια τιμή της παραμέτρου "Skewness". Οι συγκεκριμένοι όγκοι ελέγχου θα σχολιαστούν ξεχωριστά στο τέλος. Στο σημείο αυτό επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι οι αριθμοί που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.15, οι οποίοι προκύπτουν από το γράφημα εντός του λογισμικού ANSYS, είναι στρογγυλοποιημένοι (στην πραγματικότητα μπορεί να είναι λίγο μεγαλύτεροι ή λίγο μικρότεροι) από το ίδιο το λογισμικό και συνεπώς, ο συνολικός αριθμός κελιών που προκύπτει από το παραπάνω σχήμα ίσως διαφέρει ελάχιστα μ' αυτόν που φαίνεται στον σχετικό πίνακα (Πίνακας 3.5). Ωστόσο, η διαφορά αυτή είναι μικρή και επομένως, δεν υπάρχει λόγος περί μεγάλου σφάλματος.

Πίνακας 3.6: Ποσοστά ανά όγκο ελέγχου στην περιοχή του ρότορα

Skewness	Ποσοστό ως προς το συνολικό αριθμό κελιών		Ποσοστό κελιών ανά τη μορφή κάθε όγκου ελέγχου	
	Τετράεδροι όγκοι ελέγχου (%)	Όγκοι ελέγχου ανάλυσης οριακού στρώματος (%)	Τετράεδροι όγκοι ελέγχου (%)	Όγκοι ελέγχου ανάλυσης οριακού στρώματος (%)
0.0822 και 0.24	77.29	6.72	83.55	91.8
0.41	13.74	0.31	14.85	4.24
0.57 και 0.74	1.40	0.24	1.51	3.22
0.89	0.10	0.05	0.11	0.74

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα αμέσως γίνεται αντιληπτό πως, τόσο οι τετράεδροι όγκοι ελέγχου όσο και οι όγκοι ελέγχου που δημιουργήθηκαν για την ανάλυση του οριακού στρώματος έχουν δημιουργηθεί στο μεγαλύτερο ποσοστό τους με άριστη ποιότητα. Συγκεκριμένα το 83.55% των δημιουργημένων τετράεδρων όγκων ελέγχου και το 91.8% των όγκων ελέγχου στην περιοχή ανάλυσης του οριακού στρώματος χαρακτηρίζονται από άριστη ποιότητα. Αντίστοιχα, το 14.85% και το 4.24% παρουσιάζουν καλή ποιότητα, το 1.51% και το 3.22% αποδεκτή ποιότητα ενώ, το 0.11% και το 0.74% παρουσιάζουν φτωχή ποιότητα. Τα τελευταία ποσοστά είναι αμελητέα για να χαρακτηρίσουν τη συνολική ποιότητα των κελιών ωστόσο, χρήζουν προσοχής. Αυτά τα ποσοστά διακρίνονται κυρίως στην ακμή φυγής και στην κορυφή του πτερυγίου, δηλαδή στα σημεία όπου υπάρχει έντονη καμπυλότητα. Επιπρόσθετα, όσον αφορά την κορυφή του πτερυγίου, η ύπαρξη του διακένου στην περιοχή αυτή καθιστά δύσκολο το να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό πλέγμα. Συνεπώς, η δημιουργία φτωχής ποιότητας πλέγματος στις περιοχές αυτές είναι αναμενόμενη και δύσκολα αποφεύγεται με τη χρήση ενός μη δομημένου πλέγματος (Σχήμα 3.16).

Καταλήγοντας, σ' ότι αφορά τους όγκους ελέγχου με μορφή πεντάεδρων, εμφανίζονται στις ίδιες περιοχές μ' αυτές όπου παρατηρείται φτωχή ποιότητα πλέγματος για τους τετραεδρικούς όγκους ελέγχου και τους όγκους ελέγχου που δηλώνουν την ανάλυση του οριακού στρώματος του πτερυγίου. Η εμφάνιση των πεντάεδρων όγκων ελέγχου σ' αυτές τις περιοχές δεν είναι τυχαία καθώς, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η δημιουργία αυτών επιβάλλεται σε σημεία όπου το λογισμικό αδυνατεί να κατασκευάσει άλλου είδους όγκους ελέγχου. Το ποσοστό αυτών είναι αμελητέο και ίσο με 0.15% σύμφωνα με τον προηγούμενο πίνακα (Πίνακας 3.6) και συνεπώς, δεν επιδρά καθοριστικά στη συνολική ποιότητα του πλέγματος.



Σχήμα 3.16: Περιοχή φτωχής ποιότητας πλέγματος

Συμπεραίνοντας, το δημιουργημένο πλέγμα κρίνεται κατάλληλης ποιότητας προκειμένου να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Συνεπώς, τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο και τα οποία τελικά χαρακτηρίζονται από σχετικά καλή ακρίβεια αναδεικνύοντας μια συμφωνία με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, όπως αυτή σχολιάστηκε προηγουμένως, εξάγονται από προσομοιώσεις με τη χρήση αυτού του πλέγματος.

3.3.3 Γεωμετρία Β

Εφόσον ο τρόπος με τον οποίο δημιουργήθηκε το υπολογιστικό πλέγμα της γεωμετρίας A2 θεωρήθηκε αξιόπιστος, δεν υπήρχε λόγος η διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος της γεωμετρίας Β να διαφέρει. Στην ουσία, οι διαφορές στις διαστάσεις αλλά και στις συνθήκες ροής που θα επικρατούν μεταξύ των δύο γεωμετριών είναι μικρές οπότε, μια καλή αρχή ήταν η δημιουργία ενός πλέγματος με τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά με της γεωμετρίας A2. Αυτό οδήγησε στην δημιουργία ενός πλέγματος με 15 περίπου εκατομμύρια κελιά. Δεδομένου ότι ο όγκος που ρέει το ρευστό είναι μεγαλύτερος στη γεωμετρία Β, με την

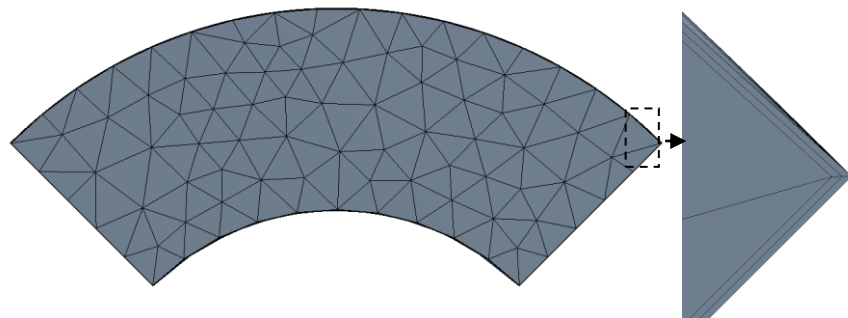
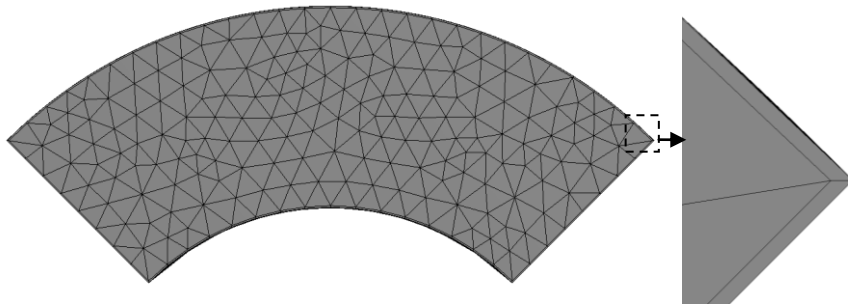
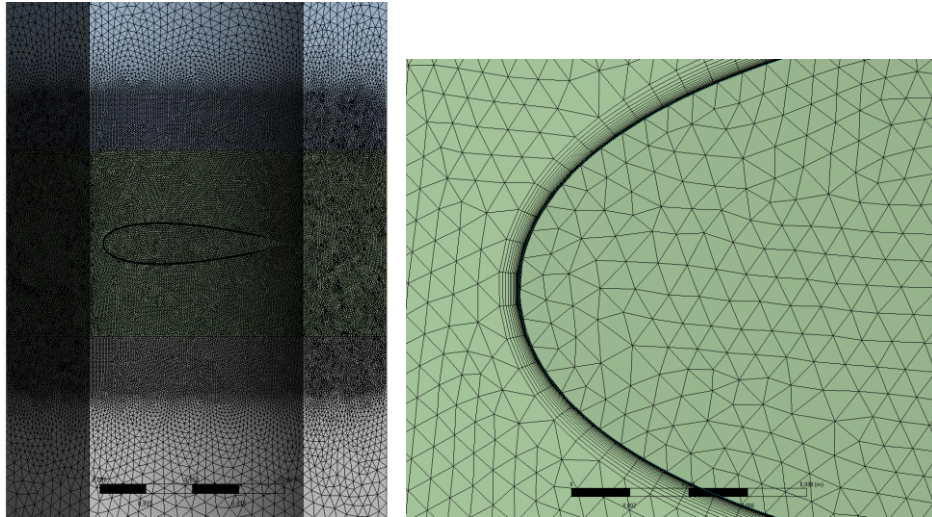
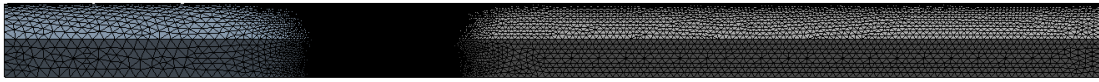
επιβολή μεγέθους κελιών 1 mm και 8 mm που είχαν χρησιμοποιηθεί στην γεωμετρία A2, η αύξηση του συνολικού αριθμού κελιών συγκριτικά με τη γεωμετρία A2 είναι λογική. Ωστόσο, η χρήση ενός τέτοιου μεγέθους πλέγματος κρίθηκε υπερβολική. Στη συνέχεια λοιπόν, προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των κελιών, άλλαξε η τιμή της παραμέτρου που επέβαλλε μέγεθος κελιού ίσο με 1mm στην περιοχή του ρότορα και στην περιοχή λίγο πριν και λίγο μετά απ' αυτόν. Σ' όλη αυτή τη διαδικασία, η ανάλυση του οριακού στρώματος δεν άλλαξε εφόσον, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι συνθήκες του ροϊκού πεδίου μεταξύ των γεωμετριών A2 και B δεν παρουσιάζουν ακραίες διαφορές, όσον αφορά τουλάχιστον τις ταχύτητες που αναπτύσσονται. Επιπλέον, παρέμεινε η επιβολή μεγέθους κελιού ίσο με 8 mm στο πίσω μέρος. Το πίσω και το μπροστά μέρος είναι ίδια με της γεωμετρίας A2, σ' ότι αφορά τη δομή του πλέγματος, την ανάλυση του οριακού στρώματος που έγινε σ' αυτά και το μήκος που έχει το καθένα απ' αυτά. Έτσι, πραγματοποιήθηκε η δημιουργία του πλέγματος που εν τέλει χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις της γεωμετρίας B. Τα χαρακτηριστικά του πλέγματος αυτού φαίνονται συγκριτικά στον παρακάτω πίνακα ([Πίνακας 3.7](#)).

Πίνακας 3.7: Στοιχεία πλέγματος γεωμετρίας B

y+	1
Δy (για την ανάλυση του οριακού στρώματος στο πτερύγιο)	5.62×10^{-6} m
Αριθμός στρωμάτων	20
Ρυθμός αύξησης	1.2
Επιβολή μεγέθους κελιού στην περιοχή λίγο πριν και λίγο μετά το ρότορα καθώς και στην περιοχή του χωρίου του ρότορα	1.1 mm
Επιβολή μεγέθους κελιού στην περιοχή του πίσω μέρους	8 mm

Τμήμα	Αριθμός κελιών
Εμπρός	2,581,766
Πίσω	2,643,768
Ρότορας	5,865,767
Σύνολο	11,091,301

Στη συνέχεια επιβεβαιώθηκε η ποιότητα του πλέγματος. Η εν λόγω ποιότητα παρουσίασε πανομοιότυπη κατανομή μ' αυτήν της γεωμετρίας A2. Για το λόγο αυτό επιλέχτηκε να μην σχολιαστεί στην παρούσα αναφορά. Ακολουθεί ένα σχήμα στο οποίο απεικονίζονται τα διάφορα χαρακτηριστικά του παρόντος πλέγματος, σε συμφωνία με τον τρόπο απεικόνισης της γεωμετρίας A2 ([Σχήμα 3.17](#)).



Σχήμα 3.17: Πλέγμα γεωμετρίας Β

3.4 Ορισμός προβλήματος

Έχοντας δημιουργήσει τα πλέγματα των διάφορων γεωμετριών ακολουθεί ο ορισμός του προβλήματος εντός του περιβάλλοντος του ANSYS CFX-Pre, ο οποίος αποτελεί το τελευταίο στάδιο πριν την υπολογιστική ανάλυση του πεδίου ροής διαμέσου του στροβίλου Wells. Όπως έγινε κατανοητό στις προηγούμενες ενότητες, η δημιουργία ενός σωστού πλέγματος είναι ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων ωστόσο, ακόμα κι αν έχει δημιουργηθεί ένα σωστό πλέγμα, ένας λανθασμένος ορισμός του προβλήματος θα οδηγούσε σε αναξιόπιστα αποτελέσματα.

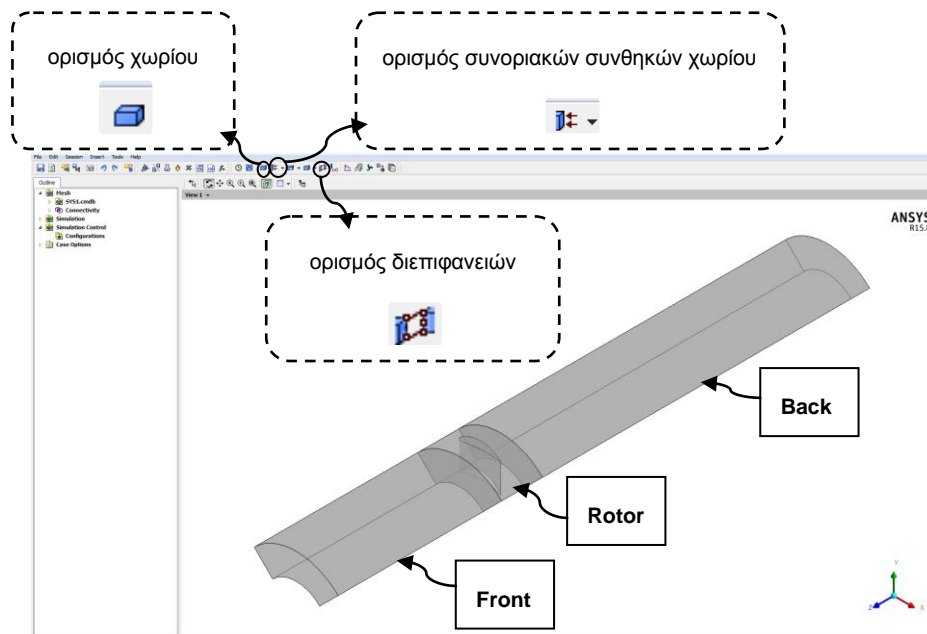
Στην παρούσα εργασία, ο βασικός σκοπός ήταν η μελέτη του στροβίλου Wells κάτω από συνθήκες μόνιμης ροής. Το λογισμικό ANSYS CFX δηλαδή, κάτω απ' αυτές τις συνθήκες, επιλύει τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής σε μια στιγμή όπου γίνεται λόγος μόνο για μόνιμα χαρακτηριστικά, τα οποία αφορούν τόσο το πεδίο ροής όσο και το στρόβιλο. Θα μπορούσε να φανταστεί κανείς πως τα ροϊκά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πεδίου επιλύονται πάνω σε μια φωτογραφία, όπου ο στρόβιλος περιστρεφόταν με σταθερές στροφές, απεικονίζοντας το αντίκτυπο αυτού στο πεδίο ροής κάτω από μια ταχύτητα εισαγωγής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μελέτη των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής διαμέσου του στροβίλου Wells έγινε ελέγχοντας οχτώ διαφορετικές ταχύτητες εισαγωγής για κάθε μία από τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής του στροβίλου. Ωστόσο, επιλέχτηκε να ολοκληρωθούν και κάποιες προσομοιώσεις κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής, με άμεσο συσχετισμό με τον πειραματικό έλεγχο του στροβίλου Wells γεωμετρίας B. Παρόλ' αυτά, ο βασικός ορισμός του προβλήματος, αναφορικά με τις συνοριακές συνθήκες και με τις εξισώσεις που επιλέγονται να επιλυθούν, δεν διαφέρει. Η μόνη διαφορά έγκειται στον καθορισμό του τύπου της υπολογιστικής ανάλυσης και στις χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές που πρέπει να εισαχθούν (αρχικές συνθήκες). Για τον λόγο αυτό, εξαιτίας της επιπλέον ανάγκης για εξοικονόμηση χώρου και λόγω του ότι οι προσομοιώσεις αυτές αποτελούν την μειονότητα της παρούσας εργασίας, δεν θα παρουσιαστεί ο ορισμός των προσομοιώσεων κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής.

Κατά τη διαδικασία ορισμού του προβλήματος πρέπει να οριστούν μια σειρά από παραμέτρους, οι οποίες είναι απαραίτητες για την αριθμητική επίλυση του. Αυτές οι παράμετροι αφορούν, τον καθορισμό των αρχικών και συνοριακών συνθηκών, ορίζοντας έτσι τη φυσική του προβλήματος, τον καθορισμό μερικών εκ των εξισώσεων που θα χρησιμοποιηθούν με σκοπό την επίλυση των χρονικά μέσων εξισώσεων Navier-Stokes και τέλος, τον καθορισμό κάποιων παραμέτρων που αφορούν την διαδικασία της επίλυσης.

Όσον αφορά τις γεωμετρίες A2 και B, ο ορισμός του προβλήματος είναι ακριβώς ο ίδιος. Από την άλλη, για τη γεωμετρία A και για τα δύο διαφορετικά πλέγματα που δημιουργήθηκαν, ο εν λόγω ορισμός διαφέρει. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι η γεωμετρία A2, πέρα από τον καθορισμό κάποιων παραμέτρων που προέκυψαν λόγω της εισαγωγής του 1/4 της γεωμετρίας, περιέχει και κάποιους διορθωτικούς παράγοντες (βλ. ενότητα [2.2.2.3.5 Διορθωτικοί παράγοντες Production Limiters και Curvature Correction](#)). Στην ουσία δηλαδή, η γεωμετρία A2 περιέχει τον απλό ορισμό που είχε γίνει στην γεωμετρία A1 και κάποια επιπλέον στοιχεία. Συνεπώς, η παρουσίαση του ορισμού της γεωμετρίας A2 ή της γεωμετρίας B καλύπτει όλες τις υπολογιστικές προσομοιώσεις, με την έννοια ότι εξηγεί τις διάφορες παραμέτρους που επιλέχθηκαν. Για λόγους απλούστευσης, για την παρουσίαση του ορισμού του προβλήματος θα χρησιμοποιείται απλά η λέξη γεωμετρία για αναφορά στις γεωμετρίες A2 και B. Μια πρώτη άποψη της γεωμετρίας εντός του περιβάλλοντος του ANSYS CFX-Pre φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ([Σχήμα 3.18](#)).

Ξεκινώντας τον ορισμό του προβλήματος, το πρώτο βήμα είναι να καθορισθεί ο τύπος της υπολογιστικής ανάλυσης. Έτσι, στην περίπτωση της παρούσας αναφοράς, ορίζεται ανάλυση μόνιμων συνθηκών ροής.

Στη συνέχεια, πρέπει να οριστούν τα χωρία από τα οποία αποτελείται η γεωμετρία. Όπως έχει αναφερθεί πολλάκις, η γεωμετρία αποτελείται από τρία διαφορετικά μέρη, το εμπρός τμήμα (Front), τον ρότορα (Rotor) και το πίσω τμήμα (Back) ([Σχήμα 3.18](#)).

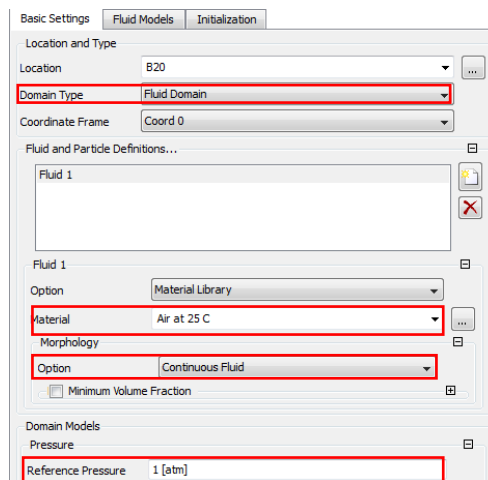


Σχήμα 3.18: Εισαγωγή γεωμετρίας στο περιβάλλον του CFX-Pre

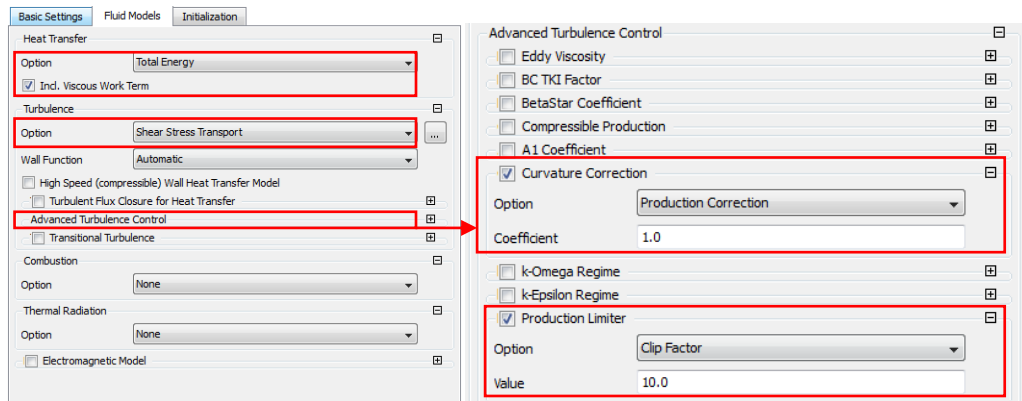
Ορίζοντας τα εν λόγω χωρία, ακολουθεί και ο καθορισμός των παραμέτρων που αφορούν καθένα απ' αυτά. Αρχικά, ορίζεται ο τύπος του χωρίου, ως μέρος όπου θα μελετηθεί

κάποιο ρευστό. Στη συνέχεια επιλέγεται το εργαζόμενο μέσο, το οποίο στην παρούσα εργασία αφορά αέρα στους 25°C. Η προσέγγιση που έγινε και η οποία έχει αναφερθεί, θεωρεί το ρευστό αυτό ως ασυμπίεστο. Η προσέγγιση αυτή εισάγεται στον ορισμό του προβλήματος. Ακολούθως, εισάγεται η πίεση αναφοράς ίση με 1 atm. Οι παραπάνω επιλογές σημειώνονται στο Σχήμα 3.19. Οι παράμετροι που ορίστηκαν στην παρούσα παράγραφο αφορούν κάθε ένα από τα τρία χωρία και απαιτείται ο ορισμός τους μόνο σ' ένα απ' αυτά καθώς, στα υπόλοιπα γίνεται αυτόματα.

Όσον αφορά τον καθορισμό των εξισώσεων που θα χρησιμοποιηθούν με σκοπό την επίλυση των χρονικά μέσων εξισώσεων Navier-Stokes, στην παρούσα εργασία επιλέγεται αρχικά, η επίλυση της εξίσωσης της ενέργειας. Επιπρόσθετα, όπως προτάθηκε σε προηγούμενη ενότητα ([2.2.1.1 Εξισώσεις Reynolds Averaged Navier-Stokes \(RANS\)](#)), η εξίσωση της ενέργειας συμπεριλαμβάνει και τον όρο του ιξώδους έργου. Ο όρος αυτός ενεργοποιείται εντός του ANSYS-CFX-Pre. Συνεχίζοντας, στην παρούσα εργασία επιλέγεται το μοντέλο τύρβης low-Re k- ω SST εφόσον, αποδείχτηκε θεωρητικά η καταλληλότητα του (βλ. ενότητα [2.2.2.3.4 Επιλογή μοντέλου low-Re k- \$\omega\$ SST](#)). Ο επιπρόσθετος όρος "low-Re" που έχει εισαχθεί, δεν επιλέγεται εντός του ANSYS CFX-Pre αλλά, καθορίζεται από την ανάλυση που έγινε στο οριακό στρώμα κατά τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος. Στη συνέχεια, στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση των διορθωτικών παραγόντων που αναλύθηκαν για τα μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων σε προηγούμενη ενότητα ([2.2.2.3.5 Διορθωτικοί παράγοντες Production Limiters και Curvature Correction](#)), ορίζοντας τις προκαθορισμένες τιμές γι' αυτούς. Οι παράμετροι που ορίστηκαν στην παρούσα παράγραφο αφορούν επίσης κάθε χωρίο ενώ παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.19: Ορισμός βασικών παραμέτρων

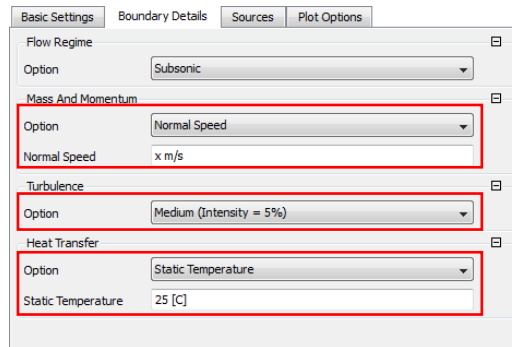


Σχήμα 3.20: Ορισμός εξισώσεων και διορθωτικών παραγόντων

Ακολούθως, ο ορισμός του προβλήματος απαιτεί τον ορισμό κάποιων επιπλέον στοιχείων για κάθε χωρίο ξεχωριστά. Για το εμπρός χωρίο καθορίζεται αρχικά η κίνηση αυτού. Εφόσον το εμπρός χωρίο είναι στην ουσία ένα πλαίσιο το οποίο είναι σταθερό, ορίζεται αντίστοιχα και η παράμετρος κίνησης του. Παρόμοια, το πίσω τμήμα ορίζεται κι αυτό ως σταθερό χωρίο. Αντίθετα, ο ρότορας αφορά περιστρεφόμενο πλαίσιο και επομένως χρειάζεται ο ορισμός κάποιων επιπλέον παραμέτρων που θα αναλυθούν παρακάτω.

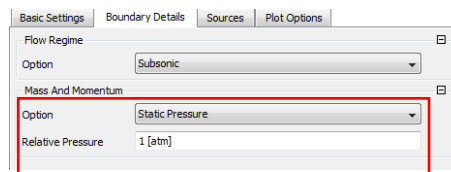
Έπειτα, όσον αφορά το εμπρός τμήμα, απαιτείται ο καθορισμός της περιοχής εισόδου του αέρα (Inlet). Από το Σχήμα 3.18 μπορεί να δει κανείς τι πρέπει να επιλέξει για να ακολουθήσει ο παραπάνω ορισμός. Με την εισαγωγή της παραπάνω περιοχής επιλέγονται και οι συνθήκες που θα επικρατούν στο εν λόγω σύνορο. Έτσι, ορίζεται αρχικά ο τρόπος με τον οποίο θα εισάγεται η μάζα του αέρα. Στην παρούσα εργασία η εισαγωγή της μάζας πραγματοποιείται προσδιορίζοντας την ταχύτητα του αέρα στην είσοδο, σε μονάδες m/s. Η επιλογή αυτή αναφέρεται στις οχτώ διαφορετικές ταχύτητες εισαγωγής που ελέγχονται και αλλάζει ανάλογα με την προσομοίωση που πραγματοποιείται. Εξαιτίας του ελέγχου της μάζας του αέρα που εισάγεται σε όρους ταχύτητας, εντός του παραθύρου που αφορά την περιοχή εισόδου, πρέπει να καθοριστεί και η ένταση της τύρβης με την οποία θα εισάγεται ο αέρας αυτός. Η επιλογή αυτή στην ουσία όπως και να οριστεί, κατά την εκκίνηση της επίλυσης του προβλήματος προσαρμόζεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που εισαχθεί ένα μεγάλο ποσοστό έντασης της τύρβης, εάν η ένταση αυτή δεν μπορεί να διατηρηθεί από το υπάρχον πεδίο ροής, ο επιλυτής θα την προσαρμόσει στις ανάλογες επικρατούσες συνθήκες. Έτσι, επιλέχθηκε ένα μέσο ποσοστό έντασης της τύρβης ίσο με 5%. Τέλος, ορίζεται και η επικρατούσα θερμοκρασία στην είσοδο. Η πιο σωστή επιλογή για την παρούσα μελέτη, είναι η χρήση της στατικής θερμοκρασίας καθώς, με μια διαφορετική επιλογή, όπως είναι αυτή της ολικής θερμοκρασίας, υπάρχει περίπτωση να

επηρεαστεί η επιθυμητή τιμή της ταχύτητας εισόδου. Η στατική θερμοκρασία στην είσοδο λοιπόν, καθορίζεται ίση με 25 °C. Ο αναγνώστης μπορεί να δει το πως επιλέγονται οι παραπάνω τιμές εντός του λογισμικού ANSYS CFX-Pre στο Σχήμα 3.21.



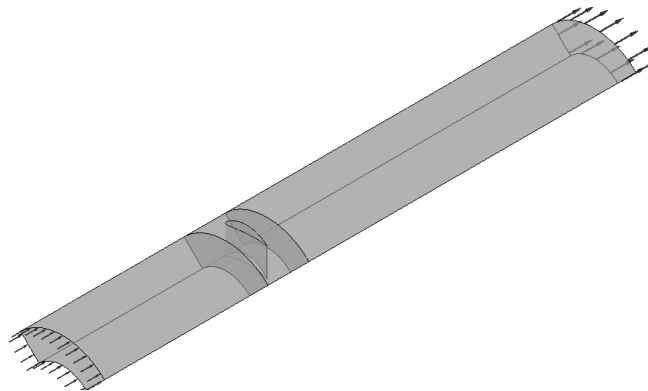
Σχήμα 3.21: Ορισμός περιοχής εισόδου

Αντίστοιχα, πρέπει να καθοριστεί και η περιοχή εξόδου του αέρα (outlet). Η περιοχή αυτή τοποθετείται στο πίσω τμήμα. Όσον αφορά την έξοδο της μάζας του αέρα, και σ' αυτήν την περίπτωση πρέπει να επιλεγεί ο τρόπος με τον οποίο θα πραγματοποιείται. Στην παρούσα εργασία, η παραπάνω ενέργεια πραγματοποιείται με όρους στατικής πίεσης, ορίζοντας μια τιμή σχετικής πίεσης ίση με 1 atm (Σχήμα 3.22). Κάνοντας χρήση της αναφερόμενης επιλογής, στην ουσία καθορίζεται το τι αποτελέσματα θα παράγονται στην έξοδο. Η παρούσα επιλογή ήταν η πιο λογική για την μελέτη του στροβίλου Wells.



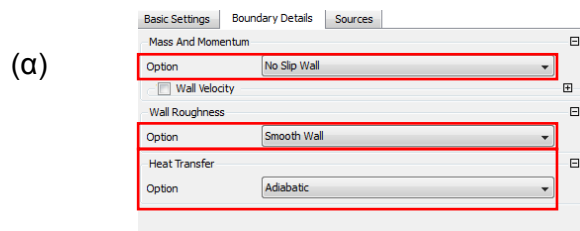
Σχήμα 3.22: Ορισμός περιοχής εξόδου

Η εισαγωγή των παραπάνω συνωριακών συνθηκών μπορεί να φανεί, απεικονίζοντας τη γεωμετρία, στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 3.23).

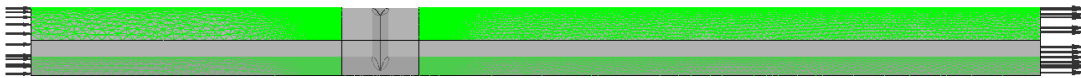


Σχήμα 3.23: Απεικόνιση εισόδου και εξόδου στη γεωμετρία εντός του περιβάλλοντος CFX-Pre

Στη συνέχεια του ορισμού του προβλήματος πρέπει να οριστούν οι συνθήκες που επικρατούν στις επιφάνειες του εμπρός και του πίσω μέρους. Εφόσον τα δύο αυτά τμήματα χαρακτηρίστηκαν ως σταθερά πλαίσια, ο μόνος επιλέγον ορισμός που απαιτείται είναι αυτός που εφαρμόζει τη συνθήκη μη ολίσθησης σε τοίχωμα που δεν παρουσιάζει τραχύτητα και για το οποίο θεωρείται πως, οι διεργασίες που αφορούν τη μεταφορά θερμότητας μέσω αυτού είναι αδιαβατικές (Σχήμα 3.24(α)). Στο σημείο αυτό σημειώνεται πως, ως τοίχωμα για τα δύο παραπάνω τμήματα ορίζεται η περιοχή που φαίνεται με πράσινο χρώμα στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.24(β)). Αυτό γιατί στα πλαϊνά μέρη των τμημάτων πρέπει να οριστούν άλλες συνθήκες, οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω.



(β)

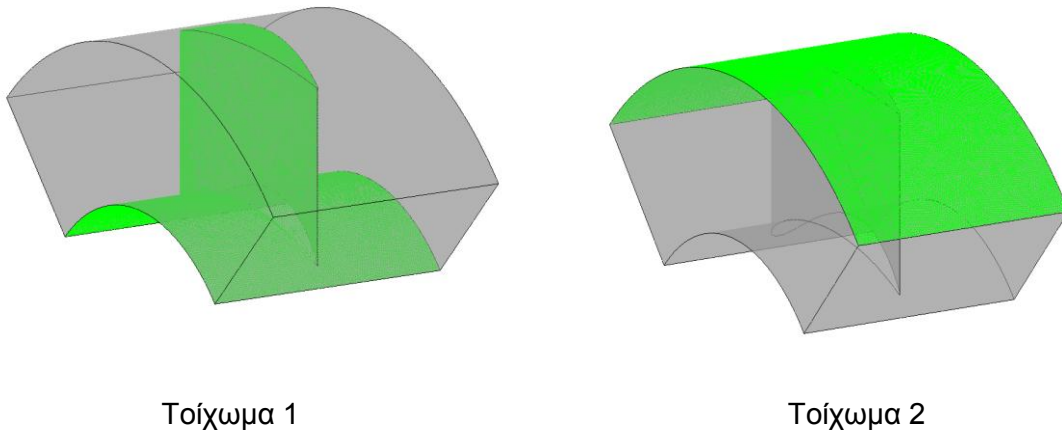


Σχήμα 3.24: Ορισμός τοιχώματος για το εμπρός και το πίσω μέρος της γεωμετρίας

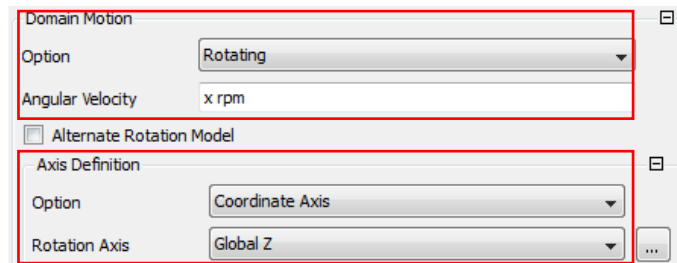
Έχοντας ορίσει τις συνοριακές συνθήκες του εμπρός και πίσω μέρους της γεωμετρίας, πραγματοποιείται η αντίστοιχη διαδικασία και για το τμήμα του ρότορα. Ο ορισμός του χωρίου του ρότορα είναι λίγο διαφορετικός. Για να γίνει κατανοητός, διαχωρίζονται οι επιφάνειες του πτερυγίου και της βάσης από την επιφάνεια του περιβλήματος. Ο ορισμός των πλαϊνών επιφανείων του ρότορα και σ' αυτήν την περίπτωση, θα σχολιαστεί παρακάτω. Τα δύο αυτά μέρη θα αναφέρονται από δω και πέρα ως τοίχωμα 1 και τοίχωμα 2 αντίστοιχα, ενώ, μια απεικόνιση αυτών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.25).

Αρχικά, πέρα από τις βασικές παραμέτρους του ορισμού του προβλήματος, οι οποίες αφορούν κάθε χωρίο και οι οποίες αναλύθηκαν παραπάνω, ο ρότορας αποτελεί ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο και συνεπώς, πρέπει να γίνει ο ανάλογος προσδιορισμός του. Έτσι, ορίζεται η απαιτούμενη περιστροφική κίνηση του τοιχώματος του ρότορα εισάγοντας μια περιστροφική ταχύτητα σε μονάδες rpm (Σχήμα 3. 26). Ως άξονας περιστροφής επιλέγεται ο "z", όπως μπορεί να φανεί και από το Σχήμα 3.18. Στο σημείο αυτό

σημειώνεται πως η ταχύτητα περιστροφής αλλάζει ανάλογα με την εκάστοτε προσομοίωση.



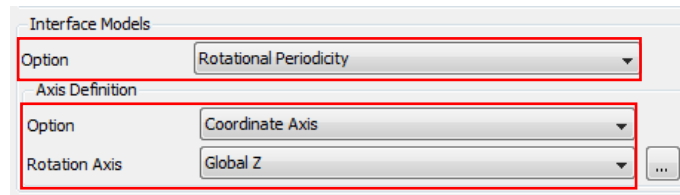
Σχήμα 3.25: Τοιχώματα στην περιοχή του ρότορα



Σχήμα 3. 26: Ορισμός του περιστρεφόμενο πλαισίου του ρότορα

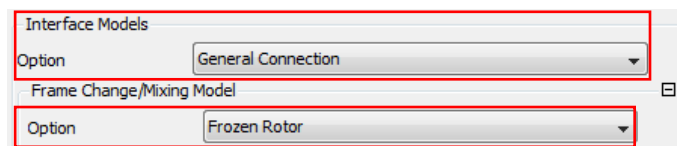
Ορίζοντας τον ρότορα ως ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο το λογισμικό αντιλαμβάνεται πως θα περιστρέφεται όλο το χωρίο του ρότορα. Κάτι τέτοιο δεν είναι επιθυμητό αφού, το τοίχωμα 2 πρέπει να παραμένει σταθερό. Για να επιτευχθεί ο ορισμός του τοιχώματος 2 ως σταθερό πλαίσιο, ορίζεται μια αντίστοιχη σε μέγεθος ταχύτητα περιστροφής αυτού με αντίθετη όμως κατεύθυνση. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του τοιχώματος 2 είναι ταυτόσιμα με των υπόλοιπων τοιχωμάτων. Όσον αφορά το τοίχωμα 1, δημιουργείται αυτόματα κατά τον ορισμό του τοιχώματος 2. Η επιλογή των συνοριακών συνθηκών που επικρατούν στο τοίχωμα αυτό, γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και για τα προηγούμενα τοιχώματα, χωρίς να χρειάζεται κάτι παραπάνω.

Στη συνέχεια, λόγω του ότι έχει εισαχθεί μόνο το 1/4 της ολόκληρης γεωμετρίας, απαιτείται ο ορισμός διεπιφανειών. Στις πλαϊνές επιφάνειες τόσο του εμπρός και του πίσω χωρίου όσο και του χωρίου του ρότορα ορίζονται περιοδικές συνθήκες ως προς τον άξονα περιστροφής (Σχήμα 3.27). Μ' αυτόν τον τρόπο το λογισμικό αντιλαμβάνεται πως η γεωμετρία επαναλαμβάνεται και συνεπώς, λαμβάνει υπόψη του το αντίκτυπο στο πεδίο ροής της εκλειπόμενης γεωμετρίας. Αυτό σημαίνει πως, αλληλεπιδράσεις όπως αυτή μεταξύ των πτερυγίων συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση.



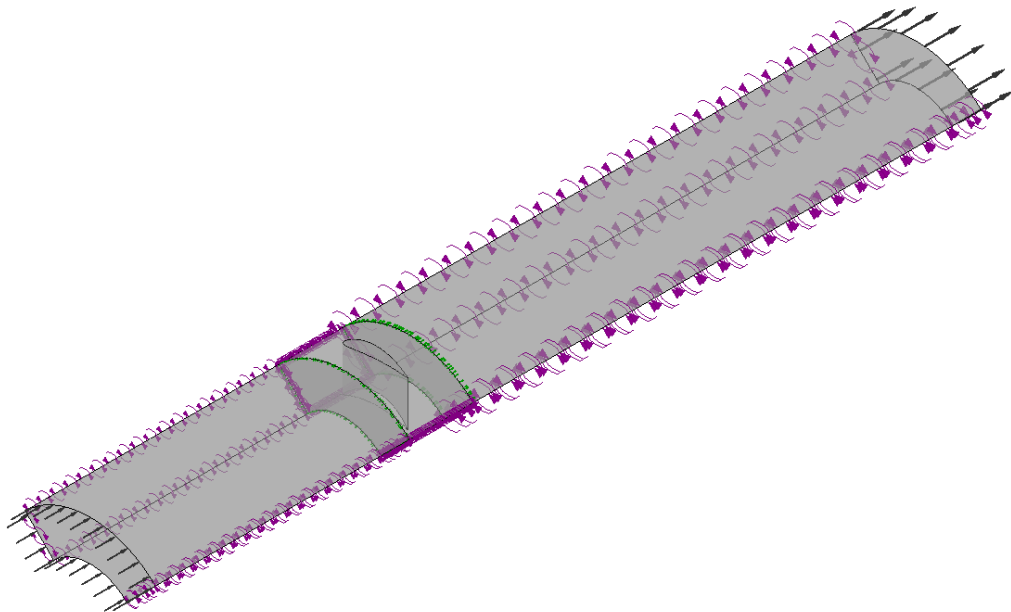
Σχήμα 3.27: Ορισμός περιοδικών συνθηκών-διεπιφάνειες

Ο ορισμός διεπιφανειών πρέπει να γίνει και μεταξύ των επιφανειών που συνδέουν το εμπρός τμήμα με το ρότορα και το ρότορα με το πίσω τμήμα. Η επιλογή "Frozen Rotor" δίνει στο λογισμικό να καταλάβει πως, οι επιφάνειες που έχουν συμπεριληφθεί στην εν λόγω επιλογή συνδέουν ένα κινητό με ένα ακίνητο πλαίσιο (Σχήμα 3.28).



Σχήμα 3.28: Ορισμός διεπιφανειών μεταξύ κινητού και ακίνητων πλαισίων

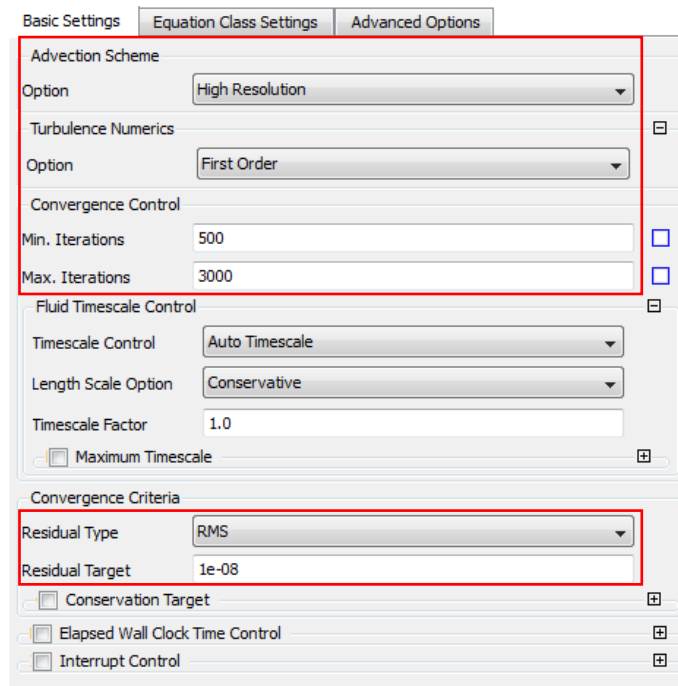
Στο Σχήμα 3.29 μπορεί να φανεί η τελική γεωμετρία σύμφωνα με τις τελευταίες προσθήκες στον ορισμό του προβλήματος.



Σχήμα 3.29: Γεωμετρία εντός του περιβάλλοντος CFX-Pre μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας ορισμού του προβλήματος

Καταλήγοντας, προκειμένου να ξεκινήσει η επίλυση του προβλήματος, απαιτείται ο επιπλέον ορισμός κάποιων χαρακτηριστικών του επιλυτή. Έτσι, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ελάχιστος αριθμός επαναλήψεων ίσος με 500 και μέγιστος ίσος με 3000.

Στην ουσία όμως, κατά την επίλυση, η επιλογή αυτή λαμβάνεται υπόψη μόνο ως προς το άνω όριο της καθώς, επιλέχθηκε επίπεδο σύγκλισης 10^{-8} . Ένα τέτοιο επίπεδο σύγκλισης είναι σχεδόν αδύνατο να παρουσιαστεί, τουλάχιστον όσον αφορά την παρούσα μελέτη οπότε, ο επιλυτής συνεχίζει την επίλυση του προβλήματος και η προσομοίωση διακόπτεται από τον χρήστη όταν το πρόβλημα συγκλίνει σε λύση ή όταν ο αριθμός των επαναλήψεων φτάσει το ανώτατο όριο. Το επίπεδο σύγκλισης επιλέχτηκε να είναι μεγάλο έτσι ώστε, να μην υπάρχει ο κίνδυνος αλλοίωσης των αποτελεσμάτων. Επιλέγοντας ένα χαμηλό επίπεδο σύγκλισης, εμφανίζεται το ρίσκο της πρόωρης διακοπής της προσομοίωσης χωρίς να έχει πραγματικά συγκλίνει σε λύση το πρόβλημα. Στη συνέχεια οι επιλογές που έγιναν αφορούν, το επίπεδο ανάλυσης των όρων μεταφοράς που εμφανίζονται στις εξισώσεις καθώς και το βαθμό ανάλυσης της τύρβης. Ορίστηκε λοιπόν, υψηλή ανάλυση των όρων μεταφοράς και επίλυση πρώτης τάξης για την τύρβη. Όλες οι παραπάνω επιλογές απεικονίζονται στο [Σχήμα 3.30](#).



Σχήμα 3.30: Ορισμός χαρακτηριστικών επιλυτή

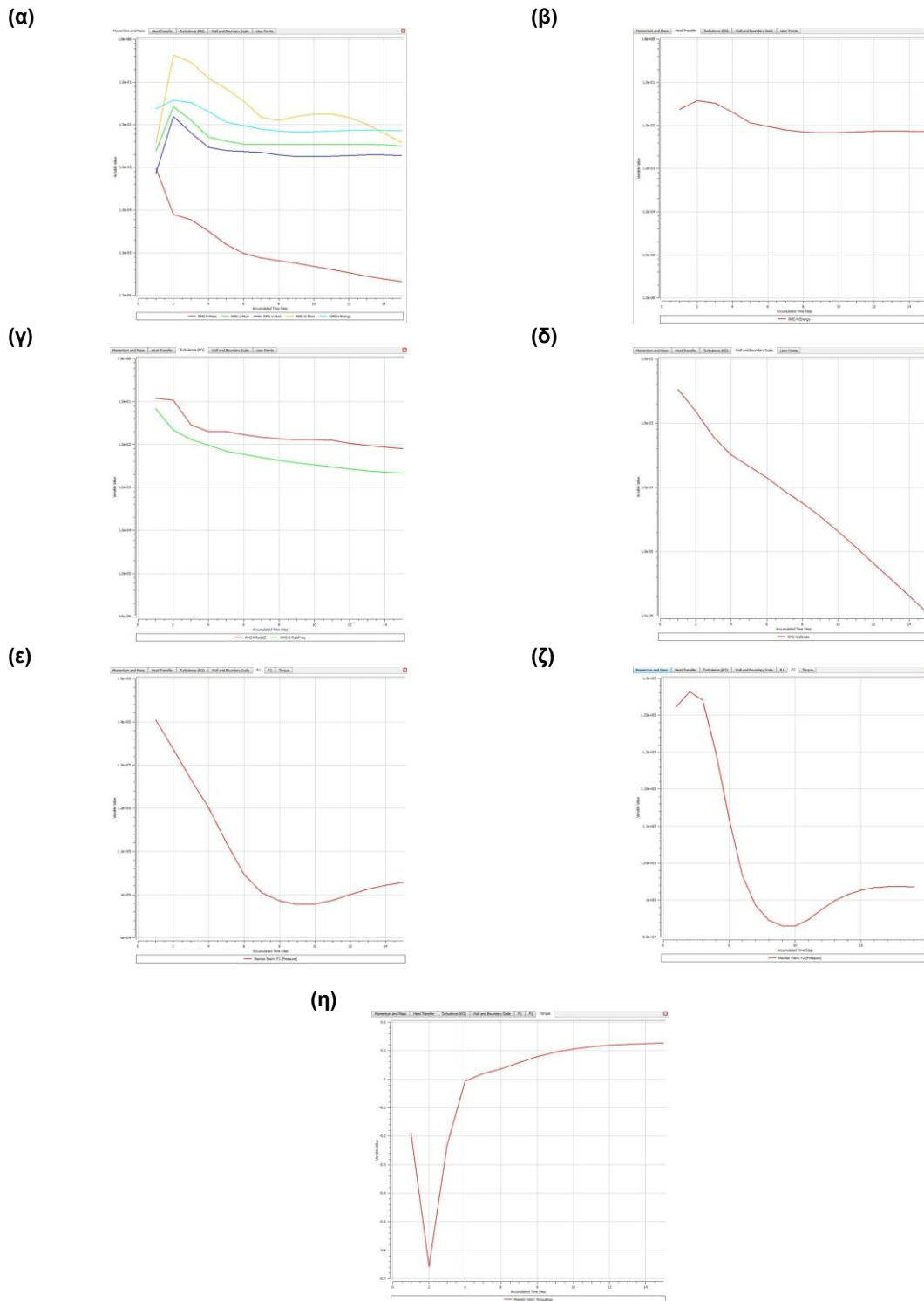
Στο σημείο αυτό, πριν κλείσει η ενότητα ορισμού του προβλήματος, σημειώνεται πως ο χρήστης έχει μια επιπλέον δυνατότητα, αυτή του ορισμού των αρχικών συνθηκών του προβλήματος. Ο ορισμός αυτός μπορεί να παραβλεφθεί και οι αρχικές συνθήκες να καθοριστούν αυτόματα από τον επιλυτή. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε σε αρκετές προσομοιώσεις ο παραπάνω ορισμός, ορίζοντας την αρχική τιμή της αξονικής ταχύτητας, η οποία θεωρήθηκε ίση με την ταχύτητα εισαγωγής που μελετάτε ανά προσομοίωση, την αρχική τιμή της πίεσης, ορίζοντας τη σχετική πίεση ίση με 1 atm, την αρχική τιμή της θερμοκρασίας, η οποία ισούται με 25°C και το αρχικό επίπεδο της έντασης

της τύρβης, το οποίο ισούται με 5%. Όλες οι παραπάνω επιλογές στην ουσία βοηθάνε τον επιλυτή ώστε να εκκινήσει τη διαδικασία επίλυσης. Ακόμα κι αν οι τιμές που εισάγονται παραπάνω είναι λανθασμένες, ο επιλυτής θα βρεί τον δρόμο από μόνος του σύμφωνα με τον ορισμό που αναλύθηκε παραπάνω στην παρούσα ενότητα. Ο ορισμός των αρχικών συνθηκών εντός του περιβάλλοντος του CFX-Pre αναφέρθηκε πως χρησιμοποιήθηκε σε αρκετές προσομοιώσεις διότι, υπήρχαν περιπτώσεις προσομοιώσεων όπου τον αρχικό ορισμό του προβλήματος αναλάμβαναν οι ήδη επιλυμένες προσομοιώσεις, αναφερόμενοι πάντα μεταξύ ίδιων γεωμετριών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Παρουσίαση αποτελεσμάτων υπολογιστικών προσομοιώσεων

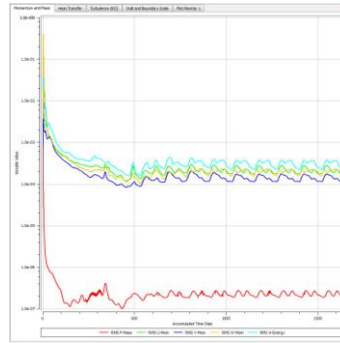
Έχοντας δημιουργήσει τα πλέγματα των γεωμετριών και πραγματοποιήσει τον ορισμό του προβλήματος για κάθε μία προσομοίωση που πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία, το επόμενο βήμα της υπολογιστικής διαδικασίας είναι η επίλυση. Κατά τη διαδικασία της επίλυσης παρατηρούνταν μια σειρά από υπολογιστικά παράθυρα, τα οποία αφορούσαν τόσο τη διαδικασία της σύγκλισης των εξισώσεων που έχουν αναφερθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 2 (εξισώσεις Navier-Stokes, εξίσωση συνέχειας και ενέργειας, εξισώσεις μοντέλου τύρβης και εξισώσεις τοιχώματος) όσο και τη διαδικασία της σύγκλισης ορισμένων παραμέτρων που σχετίζονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του στροβίλου (πτώση πίεσης διαμέσου του στροβίλου, παραγόμενη ροπή στα πτερύγια κ.α.). Μερικές εικόνες από τα παραπάνω αναφερθέν παράθυρα, μετά από έναν μικρό αριθμό επαναλήψεων, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.1). Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.1(α) φαίνεται το πως εξελίσσεται η επίλυση των εξισώσεων συνέχειας (κόκκινο) και ενέργειας (ανοιχτό μπλέ) καθώς και των εξισώσεων Navier-Stokes στις τρεις διευθύνσεις (x-πράσινο, y-μπλέ, z-κίτρινο). Στο Σχήμα 4.1(β) μπορεί κανείς να δει τη μεταφορά θερμότητας, η οποία ήδη από τις 15 επαναλήψεις που διακρίνονται φαίνεται να έχει σταθεροποιηθεί. Αυτό γιατί οι διεργασίες μεταφοράς της θερμότητας στα τοιχώματα είναι αδιαβατικές δηλαδή, δεν ανταλλάσσεται θερμότητα με το περιβάλλον. Στο Σχήμα 4.1(γ) φαίνεται το πως εξελίσσεται η διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων που μοντελοποιούν την τύρβη. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την παρούσα εργασία, διακρίνει κανείς τη διαδικασία σύγκλισης των εξισώσεων k και ω . Στο τέταρτο παράθυρο (Σχήμα 4.1(δ)) φαίνεται η πρόδος των εξισώσεων τοιχώματος. Στο πέμπτο και έκτο παράθυρο (Σχήμα 4.1(ε),(ζ)) έχουν οριστεί δύο περιοχές όπου παρατηρούνται οι επαγόμενες πιέσεις ανάντη και κατόντη του ρότορα. Είναι σαν κάποιος δηλαδή να μετράει με ένα όργανο "pitot". Τέλος, στο Σχήμα 4.1(η) έχει οριστεί μια έκφραση που δίνει την παραγόμενη ροπή στα πτερύγια. Το εν λόγω σχήμα δείχνει την παραγόμενη ροπή για ένα πτερύγιο, αφού εξάχθηκε από προσομοίωση που αφορά τη γεωμετρία A2. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να σημειωθεί πως οι τιμές της ροπής που θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο έχουν αναχθεί για το σύνολο των πτερυγίων από τα οποία αποτελείται ο ρότορας του στροβίλου. Κάθε τιμή δηλαδή, πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό τέσσερα. Εφόσον έχουν οριστεί περιοδικές συνθήκες, λαμβάνοντας έτσι υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των τεσσάρων πτερυγίων, δεν υπάρχει λόγος για σφάλμα κατά την αριθμητική διαδικασία αυτή.



Σχήμα 4.1: Υπόλοιπα υπολογιστικής προσομοίωσης

Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί πώς όλες οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, ολοκληρώθηκαν με πολύ ικανοποιητικό βαθμό σύγκλισης (π.χ. Σχήμα 4.2). Ακόμα και για τις προσομοιώσεις που αρχικά παρουσίαζαν φτωχή σύγκλιση λόγω της ύπαρξης ακραίων φαινομένων αποκόλλησης, τα οποία φαινόμενα γίνονται αντιληπτά κατά την επίλυση ως έντονες μεταβολές των υπολογιστικών υπολοίπων, οι

οποίες μεταβολές δεν ακολουθούν κάποιο μοτίβο, στο τέλος επιτεύχθηκε ικανοποιητική σύγκλιση αυτών, χρησιμοποιώντας μικρότερο βήμα για την εξέλιξη του ψευδοχρόνου, υπολογίζοντας έτσι σε μικρότερη κλίμακα χρόνου τις εν λόγω απότομες μεταβολές.



Σχήμα 4.2: Σύγκλιση προβλήματος

Στην παρούσα εργασία, όπως έχει αναφερθεί πολλάκις, η μελέτη της συμπεριφοράς του στροβίλου Wells, για όλες τις γεωμετρίες, γίνεται κατά βάση κάτω από συνθήκες μόνιμης ροής, με τον έλεγχο οχτώ διαφορετικών ταχυτήτων εισαγωγής ανά τρεις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής του ρότορα. Πιο συγκεκριμένα, οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν τα μέτρα ταχυτήτων εισόδου και ισοδύναμης ταχύτητας περιστροφής του στροβίλου που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4. 1). Η ταχύτητα εισόδου αφορά την απόλυτη συνιστώσα της ταχύτητας (C).

Πίνακας 4. 1: Εύρος υπολογιστικών προσομοιώσεων

C(m/s) \ rpm	2000 rpm	3000 rpm	4000 rpm
2,36	✓	✓	✓
4,36	✓	✓	✓
6,72	✓	✓	✓
8,72	✓	✓	✓
10,72	✓	✓	✓
12,72	✓	✓	✓
14,72	✓	✓	✓
17,44	✓	✓	✓

Στον παραπάνω πίνακα, η ταχύτητα εισαγωγής έχει οριστεί σε μονάδες m/s και η ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου σε rpm ωστόσο, είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος όρος για να περιγραφούν οι εν λόγω ταχύτητες εισόδου και περιστροφής. Ο αδιάστατος αυτός όρος καλείται συντελεστής ροής, ϕ και είναι ο λόγος της απόλυτης συνιστώσας της ταχύτητας προς τη συνιστώσα της εφαπτομενικής ταχύτητας (U), η οποία συνδέεται με την ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου. Ο συντελεστής ροής επομένως μπορεί να γραφεί ως:

$$\varphi = \frac{C}{U}$$

όπου,

$$U = \omega \cdot r_t$$

με r_t να είναι η ακτίνα στην κορυφή του πτερυγίου, η οποία δίνεται στο κεφάλαιο 3 σε όρους διαμέτρου (Πίνακας 3.1) και:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60}$$

όπου, N είναι ο αριθμός των στροφών του στροβίλου, σε rpm. Οπότε, ο Πίνακας 4. 1 μπορεί να αναδιαμορφωθεί στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.2), για τις δύο γεωμετρίες που ελέγχονται.

Πίνακας 4.2: Συνθήκες υπολογιστικών προσομοιώσεων για τις δύο γεωμετρίες

Γεωμετρία Α

$\Psi_{(2000 \text{ rpm})}$	$\Psi_{(3000 \text{ rpm})}$	$\Psi_{(4000 \text{ rpm})}$
0.086	0.057	0.043
0.158	0.106	0.079
0.244	0.163	0.122
0.317	0.211	0.158
0.389	0.259	0.195
0.462	0.308	0.231
0.534	0.356	0.267
0.633	0.422	0.317

Γεωμετρία Β

$\Psi_{(2000 \text{ rpm})}$	$\Psi_{(3000 \text{ rpm})}$	$\Psi_{(4000 \text{ rpm})}$
0.078	0.052	0.039
0.145	0.096	0.072
0.223	0.149	0.111
0.289	0.193	0.145
0.355	0.237	0.178
0.422	0.281	0.211
0.488	0.325	0.244
0.578	0.386	0.289

Στο παρόν κεφάλαιο λοιπόν, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων τόσο σε μορφή σχημάτων, τα οποία θα απεικονίζουν τα ροϊκά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής, όσο και σε όρους απόδοσης του στροβίλου, παραγόμενης ροπής ως προς τον άξονα περιστροφής του αλλά και πτώσης πίεσης λόγω της παρουσίας του εντός του πεδίου ροής. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα αφορά αρχικά κάθε γεωμετρία ξεχωριστά.

Όσον αφορά τη Γεωμετρία Α, για την οποία παρουσιάστηκαν τελικά δύο διαφορετικά πλέγματα, κρίθηκε απαραίτητο να παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματα της γεωμετρίας Α2. Αυτό γιατί θεωρήθηκαν πιο αξιόπιστα αφού, όπως θα φανεί προς το τέλος του κεφαλαίου, όπου θα γίνει μια σύγκριση των εν λόγω αποτελεσμάτων αυτής αλλά και των αποτελεσμάτων της γεωμετρίας Α1 με τα αποτελέσματα που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία, σε όρους απόδοσης, κατάφεραν να αναδείξουν μια συμπεριφορά του στροβίλου Wells ταυτόσημη μ' αυτήν που παρουσιάζουν οι διάφοροι μελετητές, σε αντίθεση με τη γεωμετρία Α1. Η σύγκριση αυτή, παρόλο που παρουσιάζεται προς το τέλος του κεφαλαίου, μετά τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων των δύο γεωμετριών, έγινε πριν την πραγματοποίηση όλων των προσομοιώσεων που αφορούν τη συγκεκριμένη εργασία. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3 συνεπώς, υπήρχε ένα επιπλέον μέτρο σύγκρισης προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος αξιοπιστίας του κάθε δημιουργημένου πλέγματος και των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Παρόλο που η συμφωνία αυτή δεν είναι αριθμητικά καλή, στην παρούσα εργασία με τη δημιουργία μη δομημένων πλεγμάτων δεν μπορούσε να γίνει κάτι καλύτερο και συνεπώς, ο συγγραφέας αρκέστηκε στο ότι η συμπεριφορά του στροβίλου Wells είναι ταυτόσημη με της βιβλιογραφίας. Προφανώς τα αποτελέσματα και ο τρόπος με τον οποίο ελέγχθηκε η συμπεριφορά των δύο διαφορετικών γεωμετριών στροβίλου Wells, επιδέχεται βελτίωσης. Στη συνέχεια, λόγω του γεγονότος ότι, η σύγκριση αυτή επέβαλλε την προσομοίωση του στροβίλου Wells κάτω από συνθήκες συγκεκριμένων συντελεστών ροής, οι οποίοι προκύπτουν για ταχύτητες εισαγωγής και περιστροφική ταχύτητα στροβίλου που δεν αποτελούν τον βασικό πυλώνα της παρούσας εργασίας, ολοκληρώθηκε ένα επιπλέον πακέτο προσομοιώσεων όπου μελετάται η συμπεριφορά του στροβίλου Wells για ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής αυτού, ίση με 4500 rpm. Οι συντελεστές ροής, φ , που προκύπτουν από το εν λόγω επιπλέον πακέτο προσομοιώσεων διακρίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.3).

Πίνακας 4.3: Συνθήκες επιλέον προσομοιώσεων για σύγκριση με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία

φ
0.08
0.118
0.134
0.155
0.175
0.206
0.228

Από την άλλη, όσον αφορά τη Γεωμετρία Β, εφόσον παρουσιάστηκε μόνο το τελικό πλέγμα που δημιουργήθηκε, τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν αφορούν το

πλέγμα αυτό. Η γεωμετρία B, όπως έχει αναφερθεί, δημιουργήθηκε για τη συσχέτιση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν, με τα πειραματικά αποτελέσματα που εξάχθηκαν από την πειραματική διάταξη που εγκαταστάθηκε στο εργαστήριο στροβιλομηχανών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και τα οποία θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο 5.

Επιπρόσθετα, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3 στην ενότητα του ορισμού του προβλήματος, σε αντίθεση με όσα ειπώθηκαν παραπάνω περί προσομοιώσεων κάτω από συνθήκες μόνιμης ροής, λόγω του ότι η πειραματική διάταξη αποφασίστηκε στο σύνολο της να δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της συμπεριφοράς του στροβίλου Wells, γεωμετρίας B, κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής, πραγματοποιήθηκαν και κάποιες επιπλέον προσομοιώσεις κάτω απ' αυτές τις συνθήκες. Οι προσομοιώσεις αυτές αφορούν αρχικά, τον έλεγχο της συμπεριφοράς του στροβίλου Wells κάτω από την ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου, ορίζοντας διαφορετικές συχνότητες και πλάτη ταλάντωσης. Στην ουσία δηλαδή, πέρα από τις πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κάτω από συνθήκες μόνιμης ροής, με τη δοκιμή του στροβίλου Wells σε αεροσήραγγα, πάρθηκαν και πειραματικές μετρήσεις οι οποίες αναφέρονται στη δοκιμή του στροβίλου Wells κάτω από ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου και συνεπώς, έπρεπε να υπάρχει μια αρχική εικόνα λειτουργίας του στροβίλου και κάτω από τέτοιες συνθήκες. Ωστόσο, το επόμενο πακέτο προσομοιώσεων κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής, αφορά την εξαγωγή των χαρακτηριστικών εκκίνησης του στροβίλου, προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα σχολιασμού κάποιων φαινομένων κατά τον έλεγχο του στροβίλου Wells με τη δοκιμή του στην αεροσήραγγα. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής θα γίνει στο τέλος του κεφαλαίου, παραθέτοντας διαγράμματα που αφορούν τη χρονικά μεταβαλλόμενη τιμή της ροπής αλλά και διαγράμματα όπου απεικονίζουν τα φαινόμενα υστέρησης, τα οποία ως γνωστόν εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του στροβίλου Wells κάτω από αντιστρεπτή ροή του αέρα.

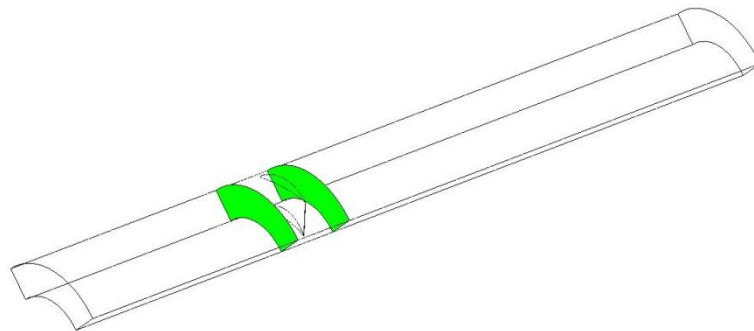
Όσον αφορά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής, έγινε με γνώμονα την παράθεση βασικών χαρακτηριστικών του ροϊκού πεδίου. Συγκεκριμένα, μέσα από μια πληθώρα γραφημάτων που εξάχθηκαν από το λογισμικό ANSYS CFX στο περιβάλλον RESULTS, επιλέχτηκε ένα μέρος αυτών με σκοπό την εξοικονόμηση χρόνου και χώρου. Επίσης, τα γραφήματα θα παρουσιάζονται κάθε φορά από τον χαμηλότερο προς τον υψηλότερο συντελεστή ροής προκειμένου να αποφευχθεί η συνεχής παράθεση αυτών. Αν γίνει λόγος για κάτι διαφορετικό θα αναφέρεται στο συγκεκριμένο σχήμα.

Πριν ξεκινήσει η εν λόγω παρουσίαση των αποτελεσμάτων, είναι σημαντικό να σημειωθούν στο σημείο αυτό, οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να εξαχθούν οι συντελεστές πίεσης, ροπής και απόδοσης.

Ο συντελεστής πίεσης C_p δίνεται από τη σχέση:

$$C_p = \frac{\Delta P}{\rho \omega^2 r_t^2}$$

όπου, ΔP είναι η πτώση πίεσης διαμέσου του στροβίλου και ρ είναι η πυκνότητα του εργαζόμενου μέσου, αέρα. Όσον αφορά την πτώση πίεσης, υπολογίστηκε από την είσοδο και την έξοδο του χωρίου του ρότορα παίρνοντας τον μέσο όρο των επαγόμενων πιέσεων σε κάθε μια από τις επιφάνειες αυτές. Στο παρακάτω σχήμα μπορεί κανείς να διακρίνει τις εν λόγω επιφάνειες με πράσινο χρώμα (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Επιφάνειες υπολογισμού πτώσης πίεσης

Η σχέση για τον συντελεστή ροπής C_T είναι:

$$C_T = \frac{T}{\rho \omega^2 r_t^5}$$

όπου, T η παραγόμενη ροπή από το στρόβιλο ως προς τον άξονα περιστροφής του. Η παραγόμενη ροπή μπορεί να εξαχθεί από το χώρο των RESULTS στο ANSYS CFX μέσω της έκφρασης "torque_z()@Whole_Blade" όπου, z είναι ο άξονας περιστροφής του ρότορα, για τις γεωμετρίες που γίνεται αναφορά στο παρόν κεφάλαιο και "Whole_Blade" η επιφάνεια όλου του πτερυγίου.

Τέλος, η σχέση σύμφωνα με την οποία εξάγεται η απόδοση του στροβίλου είναι:

$$\eta = \frac{T\omega}{\Delta P Q}$$

με Q να είναι η παροχή μάζας στην είσοδο της κάθε γεωμετρίας και η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = C \cdot A$$

όπου, A η διατομή που ρέει το ρευστό, η οποία γενικά για κάθε γεωμετρία που μελετήθηκε ισούται με:

$$A = \pi(r_c^2 - r_h^2)$$

όπου, $r_c = r_t + t$, με t να είναι το διάκενο μεταξύ περιβλήματος και κορυφής πτερυγίου.

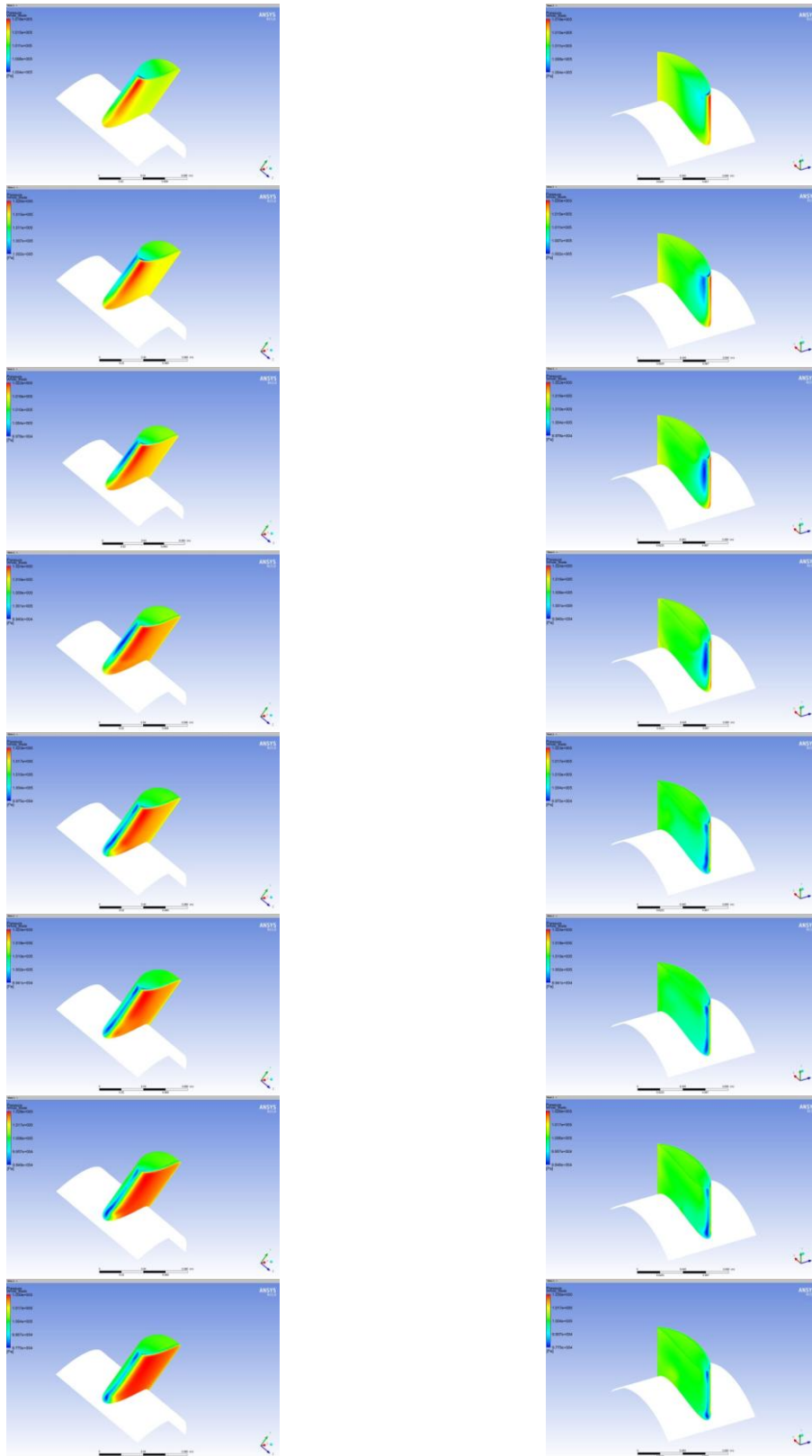
4.1 Αποτελέσματα για τη Γεωμετρία A2 κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής

4.1.1 Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισοδύναμη με 2000 rpm

Οι διάφοροι συντελεστές ροής που ελέγχονται, θα παρουσιάζονται με ονομασίες αριθμών, με τον πρώτο συντελεστή ροής να είναι ο μικρότερος, προκειμένου να μην υπάρξει σύγχυση του αναγνώστη. Για τον λόγο αυτό καλό θα ήταν να ξαναδεί κάποιος τον αντίστοιχο πίνακα που αναφέρονται οι εν λόγω συντελεστές ροής, για περιστροφική ταχύτητα στροβίλου 2000 rpm ([Πίνακας 4.2](#)).

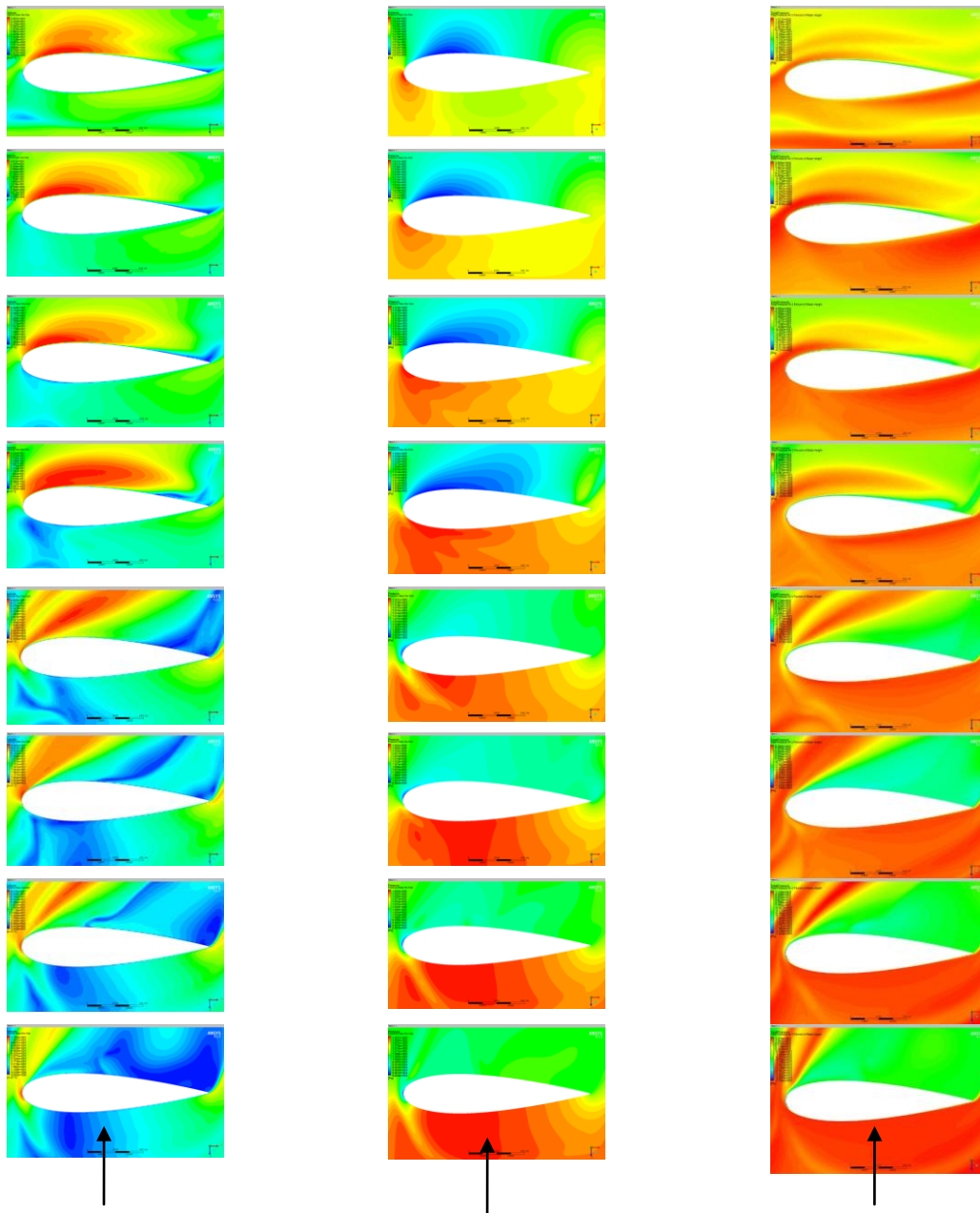
Μια καλή αρχή για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, είναι η οπτικοποίηση των στατικών πιέσεων πάνω στην επιφάνεια του πτερυγίου ([Σχήμα 4. 4](#)). Ως γνωστόν, η στατική πίεση στην περίπτωση αυτή, αντιπροσωπεύει τη δύναμη που ασκείται πάνω στην επιφάνεια του πτερυγίου λόγω της πρόσκρουσης του ρευστού. Η στατική πίεση στα παρακάτω σχήματα μετριέται σε μονάδες Pascal και είναι υπολογισμένη ως απόλυτη στατική πίεση ενώ, αναφέρεται τόσο για την πλευρά πίεσης (αριστερή στήλη) του πτερυγίου όσο και για την πλευρά αναρρόφησης αυτού (δεξιά στήλη).

Ένα από τα βασικά συμπεράσματα που μπορεί να εξάγει κανείς από τα παρακάτω σχήματα είναι αρχικά, η μετακίνηση του σημείου ανακοπής προς την πλευρά πίεσης όσο αυξάνεται ο συντελεστής ροής δηλαδή, όσο αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης. Η μετακίνηση αυτή δηλώνεται με την αντίστοιχη μετακίνηση του σημείου όπου, σημειώνεται η μέγιστη τιμή της στατικής πίεσης. Ως γνωστόν, η μετακίνηση αυτή έχει σοβαρές συνέπειες στη μετέπειτα ανάπτυξη του οριακού στρώματος γιατί αφενός επιμηκύνει το οριακό στρώμα και αφετέρου, μπορεί να προκαλέσει τοπική αποκόλληση του στρωτού οριακού στρώματος λόγω της μεγάλης καμπυλότητας κυρίως στην περιοχή του σημείου ανακοπής.



Σχήμα 4. 4: Στατικές πιέσεις στο πτερύγιο ανά συντελεστή ροής, ϕ

Εάν αρχικά διαχωριστούν οι τέσσερις πρώτοι και μικρότεροι συντελεστές ροής μπορεί να προκύψει ένα ακόμη βασικό συμπέρασμα. Η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης ελαττώνει την ελάχιστη πίεση στην πλευρά αναρρόφησης και αυξάνει την αντίστοιχη στην επιφάνεια πίεσης με αποτέλεσμα, στην πλευρά αναρρόφησης η θετική κλίση πίεσης να αυξηθεί και στην πλευρά πίεσης να μειωθεί. Όπως είναι γνωστό, η θετική κλίση πίεσης προκαλεί αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος. Παρόλ' αυτά, σύμφωνα με τα παραπάνω, όσο μεγαλώνει η γωνία πρόσπτωσης τόσο μεγαλύτερη είναι και η διαφορά πίεσης στο πτερύγιο και άρα η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης δίνει περισσότερο έργο, το οποίο όμως είναι συνδεδεμένο με την περιοχή αποκόλλησης. Ο λόγος που διαχωρίστηκαν οι τέσσερις πρώτοι συντελεστές ροής είναι ότι για τον πέμπτο συντελεστή ροής, $\varphi=0.389$, παρατηρήθηκε μείωση της πτώσης πίεσης που σημαίνει ότι ίσως στο πτερύγιο έχουν αρχίσει να λαμβάνουν χώρα φαινόμενα αποκόλλησης. Τα παραπάνω σχήματα ωστόσο, δεν είναι αρμόδια να καθορίσουν ένα τέτοιο φαινόμενο καθώς, η μεταβολή της πίεσης στο πεδίο ροής δεν περιορίζεται μόνο πάνω στο πτερύγιο αλλά, εκτείνεται σ' όλο το πεδίο ροής. Για τους υπόλοιπους τρεις συντελεστές ροής παρατηρούνται τα ίδια με τους πρώτους τέσσερις ωστόσο, δεν είναι συμπεράσματα που πρέπει να εμπιστευτούν κι οι λόγοι θα εξηγηθούν παρακάτω. Στη συνέχεια, ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει από το Σχήμα 4.5 τα ροϊκά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής που αφορούν τις επαγόμενες ταχύτητες, τις αντίστοιχες στατικές πιέσεις αλλά και τις ολικές πιέσεις κοντά στην περιοχή της βάσης (στο 3% του ύψους του πτερυγίου). Οι ολικές πιέσεις όπως είχε αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2 (ενότητα [2.1.3 Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας](#)), για ένα περιστρεφόμενο σύστημα, υπολογίζονται βάσει της ροθαλπίας και λαμβάνουν υπόψη την κίνηση του ρευστού και τη μεταβολή της κινητικής του ενέργειας αλλά και της ορμής του, με τη μεταβολή αυτή να εμφανίζεται ως πίεση. Οι αναφερόμενες ταχύτητες (αριστερή στήλη) είναι υπολογισμένες σε m/s, οι στατικές πιέσεις (κεντρική στήλη) είναι υπολογισμένες και σ' αυτή την περίπτωση ως απόλυτες στατικές πιέσεις, σε Pascal ενώ, οι ολικές πιέσεις (Pascal)(δεξιά στήλη) είναι υπολογισμένες αφαιρώντας την πίεση αναφοράς (1 atm), προκειμένου να γίνουν πιο αντιληπτές οι υποπίεσεις που δημιουργούνται πάνω στο πτερύγιο. Ως υποπίεση εννοείται η αρνητική διαφορά από την πίεση αναφοράς (πίεση περιβάλλοντος). Η κατεύθυνση της ροής συμβολίζεται με ένα βέλος για λόγους καλύτερης αντίληψης.



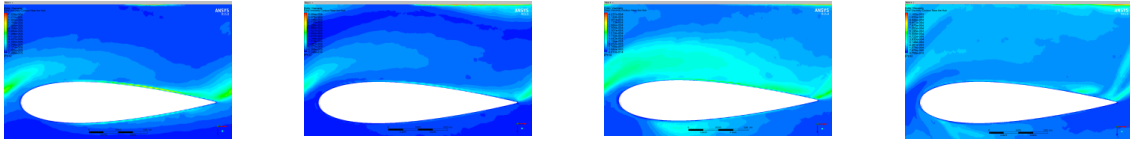
Κατεύθυνση ροής

Σχήμα 4.5: Περιοχή στο 3% του ύψους του πτερυγίου - Επαγόμενες ταχύτητες, Στατικές πιέσεις, Ολικές πιέσεις

Από το παραπάνω σχήμα, όσον αφορά τις επαγόμενες ταχύτητες πάνω στο πτερύγιο, στο σύνολο τους, μπορεί να δει κανείς τη μεταφορά του σημείου αποκόλλησης ολοένα πιο μπροστά, προς το μέρος της ακμής προσβολής, με την αύξηση του συντελεστή ροής φ (αύξηση γωνίας πρόσπτωσης) ενώ, το εύρος της περιοχής αποκόλλησης αυξάνεται αντίστοιχα. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί πως το σημείο ανακοπής μετακινείται και πάλι προς την πλευρά πίεσης, με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης. Όσον αφορά τον τέταρτο συντελεστή ροής, $\varphi=0.317$, μπορεί να παρατηρηθεί μια τοπική αποκόλληση της

ροής στο σημείο ανακοπής, η οποία στη συνέχεια επανακολλάται. Για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές ροής η περιοχή αποκόλλησης φαίνεται πως περιορίζεται μόνο στην ακμή φυγής του πτερυγίου. Από τον πέμπτο συντελεστή ροής και έπειτα, παρατηρείται μια μεγαλύτερη κλίση της ταχύτητας η οποία όπως φαίνεται, οδηγεί σε αποκόλληση της ροής και σε ανακυκλοφορίες αυτής. Οι ανακυκλοφορίες της ροής και η αντίθετη κατεύθυνση του ρευστού από την κύρια ροή είναι πολύ έντονες, όπως θα φανεί και παρακάτω. Το πτερύγιο μετά τον έκτο συντελεστή ροής παύει να λειτουργεί ως μηχανισμός δημιουργίας δύναμης και μεταφοράς ενέργειας. Όσον αφορά τις στατικές πιέσεις παρατηρούνται ανάλογα συμπεράσματα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ολική πίεση από τον πέμπτο συντελεστή ροής και μετά, όπου εμφανίζονται μεγάλες τιμές υποπίεσης. Ωστόσο, υποπίεσεις παρατηρούνται και για τους αρχικούς τρεις συντελεστές ροής αλλά είναι μικρότερης τιμής και γι' αυτό δεν παρουσιάζεται έντονη αναστροφή της ροής.

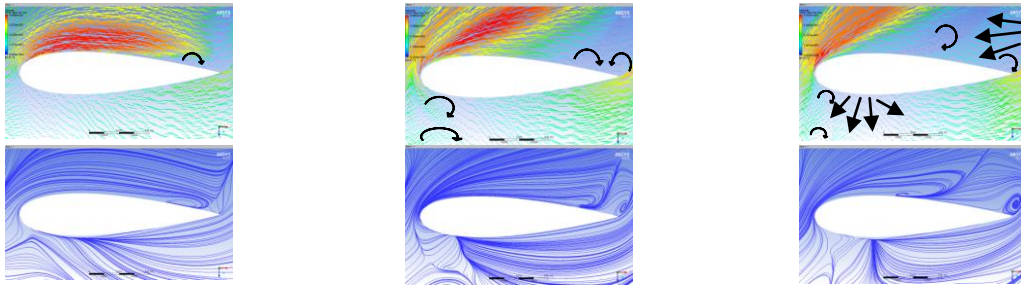
Γενικά, η περιοχή κοντά στη βάση είναι μια ιδιαίτερη περίπτωση στις στροβιλομηχανές. Λόγω του ότι η εφαπτομενική ταχύτητα του πτερυγίου έχει μικρότερο μέγεθος καθώς προχωράει κανείς προς τη βάση, οι γωνίες πρόσπτωσης του ρευστού είναι μεγαλύτερες και ολοένα αυξανόμενες με την αύξηση της απόλυτης ταχύτητας. Παράλληλα με την αύξηση της απόλυτης ταχύτητας, μιλώντας για την ίδια περιοχή του πτερυγίου, αυξάνεται και η σχετική ταχύτητα. Για την ίδια απόλυτη ταχύτητα, η σχετική ταχύτητα που αναπτύσσεται στο πτερύγιο, η οποία φαίνεται στα σχήματα, είναι μικρότερη στην περιοχή της βάσης του, συγκριτικά με το υπόλοιπο ύψος του πτερυγίου που καθώς φτάνει κανείς προς την κορυφή αυξάνεται, λόγω αύξησης της εφαπτομενικής ταχύτητας. Επιπλέον, η αλληλεπίδραση των πτερυγίων με το οριακό στρώμα της βάσης αλλά και η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων (απόρρους), η οποία είναι εντονότερη κοντά στην περιοχή της βάσης λόγω των μικρότερων στεροτήτων που υπάρχουν (τα πτερύγια είναι πιο κοντά το ένα στ' άλλο), ομολογουμένως επηρεάζουν τη συμπεριφορά της ροής στην περιοχή της βάσης. Όσον αφορά την αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων, αυτή γίνεται όντως αισθητή κοιτάζοντας το επίπεδο τύρβης που αναπτύσσεται πάνω στο πτερύγιο στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.8). Για τους σκοπούς του παρακάτω σχήματος θα απεικονιστούν μόνο οι τέσσερις πρώτοι συντελεστές ροής, μ' αυτούς να αυξάνονται από αριστερά προς τα δεξιά. Από τον πέμπτο συντελεστή ροής και μετά, τα φαινόμενα αποκόλλησης που λαμβάνουν χώρα απομακρύνονται από το πτερύγιο με τέτοιο τρόπο ώστε, να μην επηρεάζουν τη συμπεριφορά της ροής στο επόμενο πτερύγιο. Οι μεγάλες κλίσεις της ταχύτητας και η μεγάλη έκταση της περιοχής αποκόλλησης είναι το κυρίαρχο φαινόμενο στους τέσσερις τελευταίους συντελεστές ροής.



Σχήμα 4.6: Επίπεδα τύρβης στην ακτινική θέση στο 3% του ύψους του πτερυγίου-Επίδραση απόρρου

Γενικά, όσο αυξάνονται οι συντελεστές ροής τόσο αυξάνεται και το επίπεδο τύρβης, λόγω των μεγαλύτερων αποκολλήσεων που δρουν στην επιφάνεια του πτερυγίου.

Για να γίνει πιο αντιληπτό το εύρος της αποκόλλησης στη συγκεκριμένη περιοχή, παρουσιάζονται παρακάτω τα διανύσματα των ταχυτήτων και η κυκλοφορία των γραμμών ροής για τον τέταρτο, τον πέμπτο και τον έκτο συντελεστή ροής (Σχήμα 4.7), αφού μετά τον έκτο τα φαινόμενα αναστροφής και κίνησης της ροής προς την αντίθετη κατεύθυνση από την κύρια ροή, είναι πάρα πολύ έντονα και ίσως η απεικόνισή τους να μειώνει το μέγεθός τους. Στην περίπτωση αυτή η τιμή του συντελεστή ροής αυξάνει επίσης από τα αριστερά προς τα δεξιά για κάθε μια κατηγορία σχημάτων.

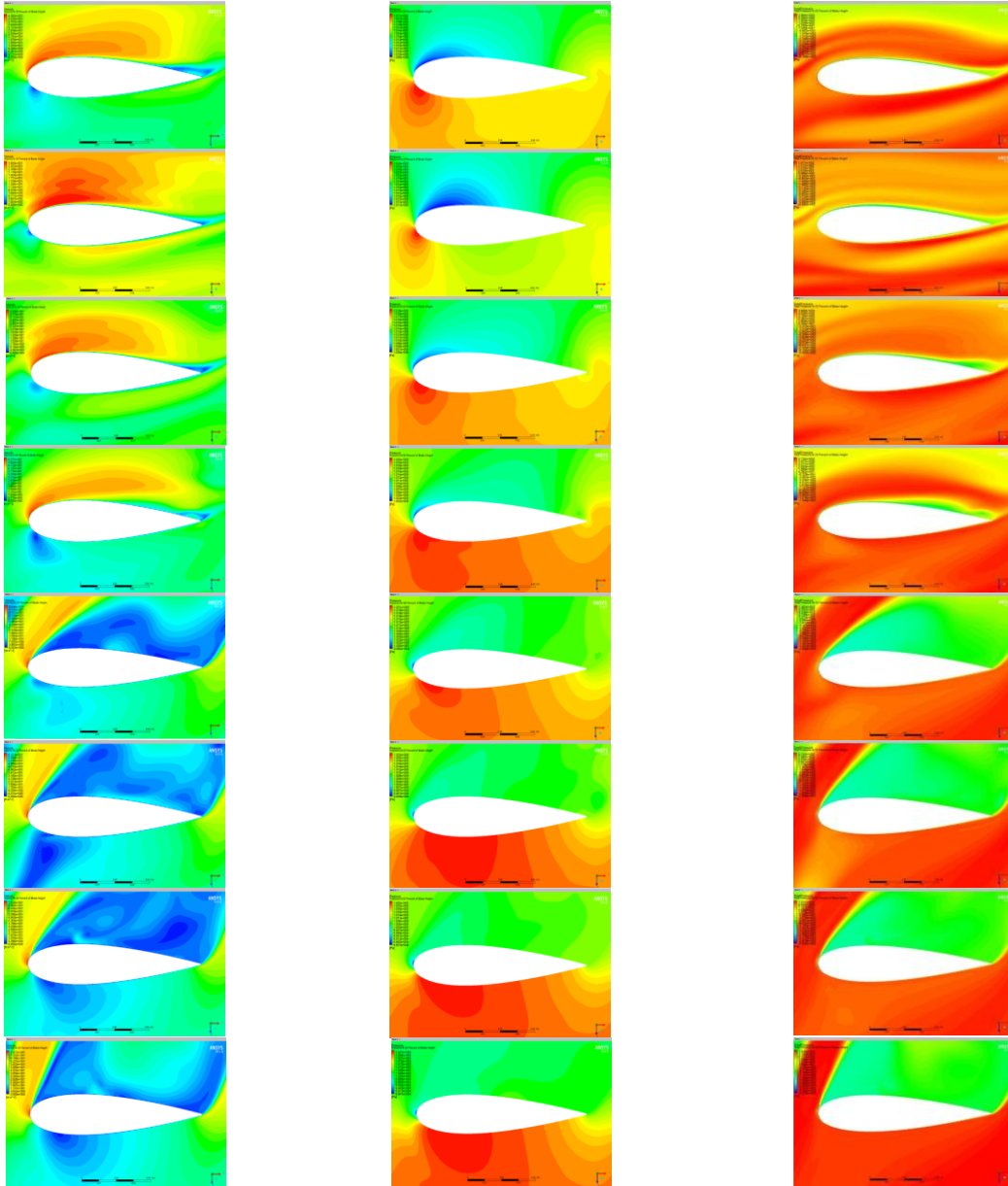


Σχήμα 4.7: Περιοχή 3% του ύψους του πτερυγίου - Διανύσματα ταχύτητας

Στη συνέχεια για την περιοχή του 20% του ύψους του πτερυγίου, παρουσιάζονται ανάλογα σχήματα (Σχήμα 4.8). Η ροή έχει την ίδια κατεύθυνση με αυτή στο Σχήμα 4.5.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το παρακάτω σχήμα, όσον αφορά την εξέλιξη της ροής με την αύξηση της ταχύτητας εισόδου, είναι σχεδόν ίδια μ' αυτά για το 3% του ύψους του πτερυγίου. Αυτή τη φορά, στον τέταρτο συντελεστή ροής παρουσιάζεται ένα ελαφρώς μεγαλύτερο ποσοστό υποπίεσης στην περιοχή της αποκόλλησης, το οποίο όμως δεν είναι ικανό και πάλι να αναστρέψει τη ροή σε μεγάλο βαθμό. Η μικρή αυτή ανακυκλοφορία ωστόσο, όπως θα φανεί και στο Σχήμα 4.12, έχει μεταφερθεί προς την ακμή φυγής του πτερυγίου. Μια ακόμη διαφορά παρατηρείται για τον τρίτο συντελεστή ροής όπου και πάλι η τιμή της υποπίεσης είναι μεγαλύτερη, με την αποκόλληση της ροής να ξεκινάει πιο μπροστά. Γενικά, όσο αυξάνονται οι ταχύτητες της ροής τόσο αυξάνονται και οι εντάσεις των εν λόγω υποπίεσεων. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως κατά τη πορεία της ανάλυσης αυτής από τη βάση προς την κορυφή του πτερυγίου, δεν παίζουν ρόλο μόνο οι γωνίες πρόσπτωσης της ροής και είναι λανθασμένη η σκέψη ότι επειδή επικρατούν μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης στην περιοχή της βάσης, η ροή σ' όλο το υπόλοιπο ύψος του πτερυγίου θα είναι πιο ομαλή, χωρίς ανακυκλοφορίες. Τέλος,

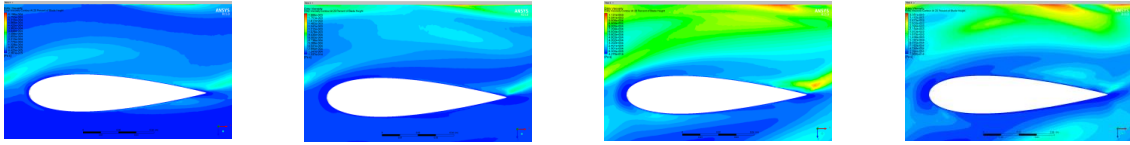
συνεχίζοντας την ανάλυση για την περιοχή του 20% του ύψους του πτερυγίου, για τους τέσσερις τελευταίους συντελεστές ροής, η ροή φαίνεται να έχει πιο λογική συμπεριφορά από την περιοχή της βάσης, αλλά και πάλι τα φαινόμενα που εξελίσσονται είναι ακραία. Η περιοχή αποκόλλησης ξεκινάει πιο μπροστά, προς την ακμή προσβολής του πτερυγίου.



Σχήμα 4.8: Περιοχή στο 20% του ύψους του πτερυγίου - Επαγόμενες ταχύτητες, Στατικές πιέσεις, Ολικές πιέσεις

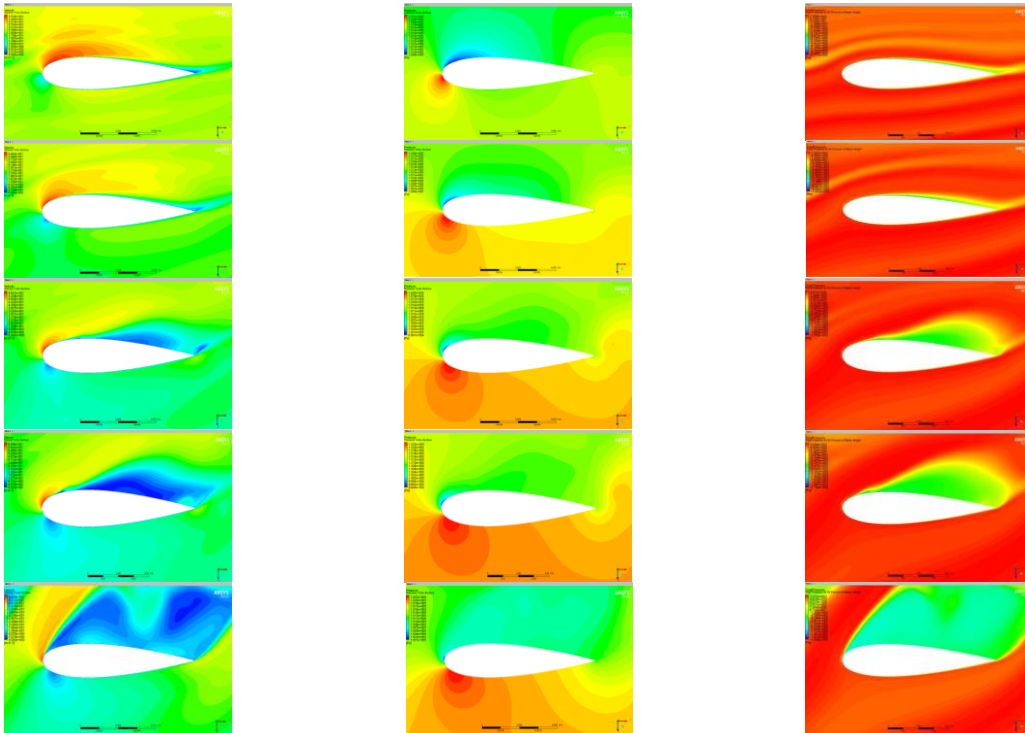
Επιπλέον, η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων είναι και στην παρούσα περιοχή αισθητή στη κυκλοφορία του ρευστού πάνω στο πτερύγιο. Η ένταση των δινών που δημιουργούνται είναι μεγαλύτερη σε όλους τους συντελεστές ροής, συγκριτικά με την περιοχή της βάσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση των επιπέδων τύρβης. Μάλιστα, για τους συντελεστές ροής όπου ο απόρροος του προηγούμενου πτερυγίου επηρεάζει τη συμπεριφορά της ροής στο επόμενο, η αύξηση αυτή παίζει σημαντικό ρόλο. Στο

παρακάτω σχήμα, σύμφωνα με τα παραπάνω, ο αναγνώστης μπορεί να δει τα επίπεδα τύρβης που αναπτύσσονται και τα οποία μεταφέρονται μέσω του απόρρου στο επόμενο πτερύγιο ενώ, παρουσιάζονται και πάλι μόνο για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές ροής.



Σχήμα 4. 9: Επίπεδα τύρβης στην ακτινική θέση στο 20% του ύψους του πτερυγίου-Επίδραση απόρρου στην κυκλοφορία του ρευστού πάνω στο πτερύγιο

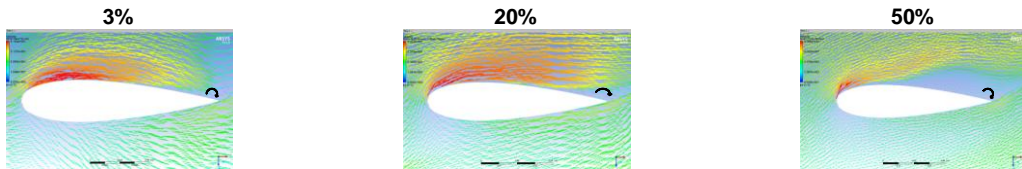
Όσον αφορά τη μέση ακτινική θέση του πτερυγίου θα παρουσιαστούν επίσης ανάλογα σχήματα (Σχήμα 4.10), μόνο που αυτή τη φορά θα αφορά τους πέντε πρώτους συντελεστές ροής, φ , καθώς, έχει γίνει αντιληπτό πως μετά τον πέμπτο συντελεστή ροής, επικρατούν φαινόμενα μαζικής αποκόλλησης της ροής τα οποία, όπως έχει αναγνωριστεί, δεν σταθεροποιούνται καθ' όλο το ύψος του πτερυγίου. Συνεπώς, κρίθηκε πως δεν έχει νόημα η περαιτέρω ανάλυση του ροϊκού πεδίου γι' αυτές τις συνθήκες καθώς όπως φαίνεται, ο στρόβιλος βρίσκεται στην περιοχή ακραίας αποκόλλησης (stall). Η κατεύθυνση της ροής στα παρακάτω σχήματα είναι αντίστοιχη των προηγούμενων σχημάτων.



Σχήμα 4.10: Περιοχή στο 50% του ύψους του πτερυγίου - Επαγόμενες ταχύτητες, Στατικές πιέσεις, Ολικές πιέσεις

Στα παραπάνω σχήματα η ροή φαίνεται να έχει ομαλοποιηθεί ελαφρώς για τους δύο πρώτους συντελεστές ροής, συγκριτικά με τις προηγούμενες περιοχές του ύψους του πτερυγίου. Η περιοχή αποκόλλησης της ροής είναι ελαφρώς μειωμένη. Από την άλλη, η

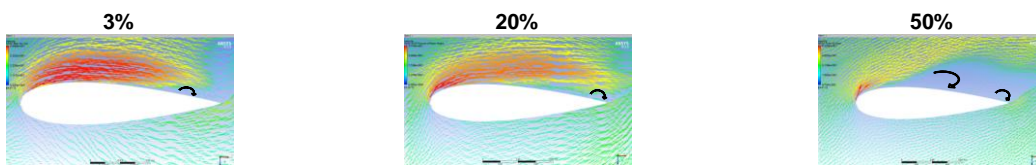
περιοχή αποκόλλησης της ροής, με την αναστροφή της ροής να περιορίζεται πάλι στην ακμή φυγής του πτερυγίου, είναι μεγαλύτερη για τον τρίτο συντελεστή ροής, με τις τιμές των υποπίεσεων να είναι κι αυτές μεγαλύτερες. Μια σύγκριση μεταξύ των διανυσμάτων της ταχύτητας για τις ακτινικές θέσεις που έχουν σημειωθεί μέχρι στιγμής, μπορούν να αναδείξουν αυτήν την αύξηση της περιοχής αποκόλλησης της ροής (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.11: Περιοχή αποκόλλησης της ροής για $\phi=0.244$ στις ακτινικές θέσεις 3%,20% και 50%

Υπενθυμίζεται πως δεν πρέπει να μπει κανείς στη διαδικασία να σκεφτεί το γιατί βλέπει μεγαλύτερη αποκόλληση της ροής στο 50% του ύψους του πτερυγίου εφόσον, η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη, συγκριτικά με το 3% και το 20% του ύψους του πτερυγίου. Η ροή είναι τρισδιάστατη και τα φαινόμενα που εκτυλίσσονται είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάδειξη των χαρακτηριστικών του στροβίλου. Σχόλια που αφορούν τα φαινόμενα αυτά θα γίνουν στο τέλος της παρούσας ενότητας.

Όσον αφορά τον τέταρτο συντελεστή ροής, πέραν του ότι η περιοχή αποκόλλησης είναι μεγαλύτερης έκτασης, η αναστροφή της ροής παρουσιάζεται πιο μπροστά, προς την ακμή προσβολής. Μια ανάλογη σύγκριση με την παραπάνω ακολουθεί στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.12).

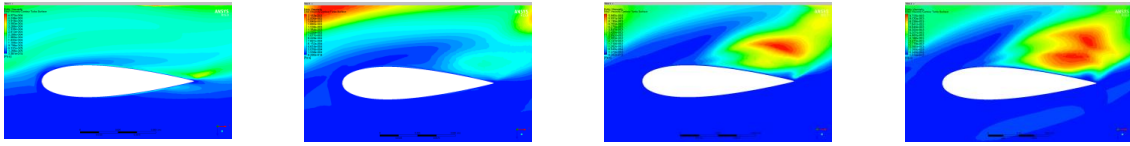


Σχήμα 4.12: Περιοχή αποκόλλησης της ροής για $\phi=0.317$ στις ακτινικές θέσεις 3%, 20% και 50%

Στη συνέχεια της ανάλυσης στο 50% του ύψους του πτερυγίου, η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, με την αύξηση της ταχύτητας εισόδου, μετέφερε σιγά σιγά το σημείο όπου αποκολλάται το ρευστό πιο μπροστά, προς την ακμή προσβολής. Έως τον τρίτο συντελεστή ροής ωστόσο, δεν εμφανίστηκαν μεγάλες ανακυκλοφορίες της ροής. Για τον τέταρτο συντελεστή, αναφορικά με το σχήμα που παρουσιάστηκε παραπάνω (Σχήμα 4.12), το σημείο αποκόλλησης είναι πολύ κοντά στο μέγιστο πάχος του πτερυγίου και συνεπώς, η ροή που απεικονίζεται είναι λίγο πριν το φαινόμενο της μαζικής αποκόλλησης.

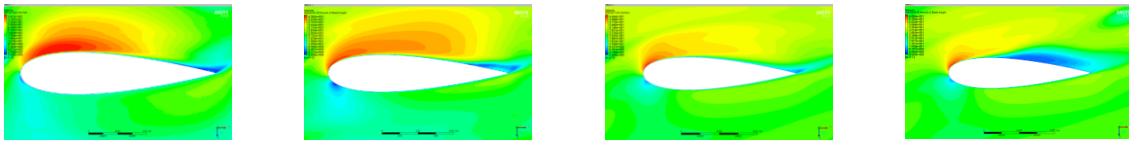
Η επίδραση του απόρρου στην κυκλοφορία της ροής πάνω στο πτερύγιο, σ' αυτήν την περιοχή, φαίνεται να έχει μειωθεί στο σύνολο της, συγκριτικά με τις προηγούμενες ακτινικές θέσεις. Τα μεγαλύτερα επίπεδα τύρβης φαίνονται πλέον στην περιοχή αποκόλλησης της ροής. Η αποκόλληση του οριακού στρώματος πάνω στο πτερύγιο, φαίνεται να απομακρύνεται μέσω του απόρρου από την επιφάνεια του επόμενου

πτερυγίου. Στο Σχήμα 4.13 παραθέτονται για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές ροής τα εν λόγω αναπτυσσόμενα επίπεδα τύρβης.



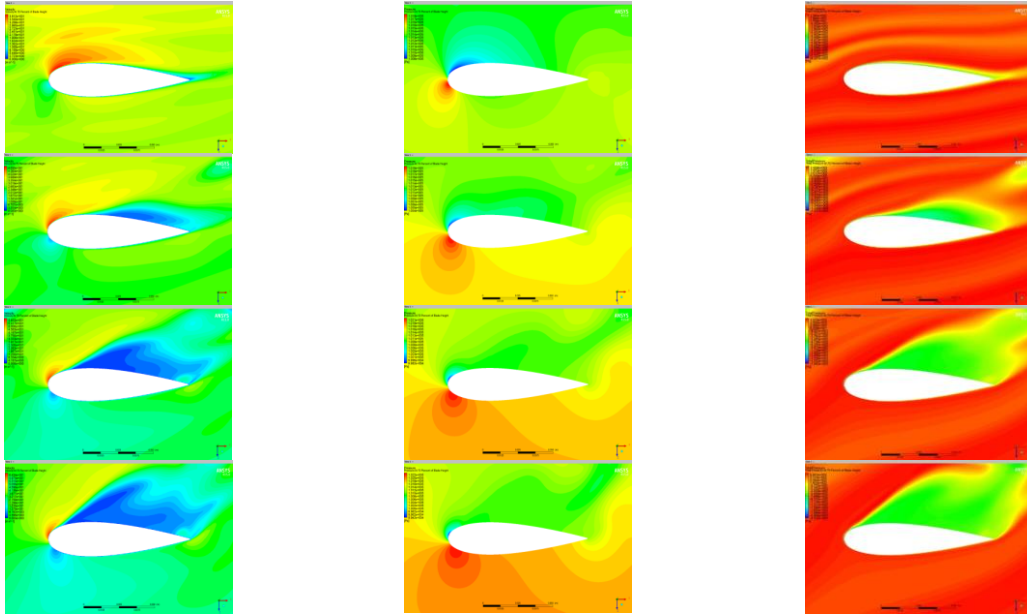
Σχήμα 4.13: Επίπεδα τύρβης στην ακτινική θέση στο 50% του ύψους του πτερυγίου-Επίδραση απόρρου στην κυκλοφορία του ρευστού πάνω στο πτερύγιο

Όσον αφορά την περιοχή του 70% του ύψους του πτερυγίου η αποκόλληση της ροής εμφανίζεται πλέον και στον δεύτερο συντελεστή ροής. Μια σύγκριση μεταξύ του πεδίων ταχυτήτων, για το συγκεκριμένο συντελεστή ροής και για τις ακτινικές θέσεις που έχουν σχολιαστεί, μπορεί να δείξει την παραπάνω περιοχή (Σχήμα 4.14). Ας σημειωθεί πως η περιοχή στο 70% του ύψους του πτερυγίου μπορεί να αλληλεπιδρά με τα φαινόμενα που εκτυλίσσονται στην κορυφή του πτερυγίου, όπως αυτά θα σχολιαστούν παρακάτω, και συνεπώς, η εμφάνιση φαινομένων αποκόλλησης που δεν παρουσιάστηκαν πριν, μπορούν να εξηγηθούν βάσει αυτών των φαινομένων.



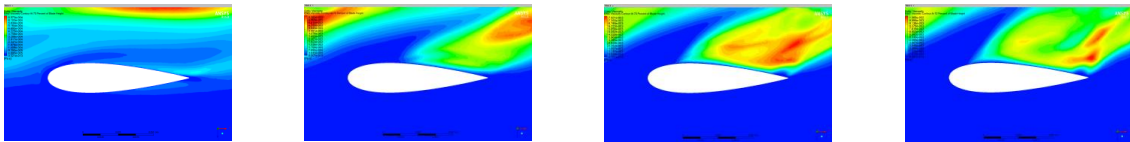
Σχήμα 4.14: Επαγόμενες ταχύτητες για $\phi=0.158$ στις ακτινικές θέσεις 5%, 20%, 50% και 70%

Η περιοχή αποκόλλησης της ροής για τους υπόλοιπους συντελεστές ϕ , μεγαλύτερους από τον δεύτερο, ξεκινάει ακόμα πιο μπροστά απ' ότι στις άλλες ακτινικές θέσεις. Από τις ολικές πιέσεις μπορεί να δει κανείς πως αναπτύσσονται οι υποπίεσεις στην περιοχή γύρω από το πτερύγιο. Η ένταση των εν λόγω υποπιέσεων στην περιοχή της αποκόλλησης της ροής είναι ακόμα μεγαλύτερη, συγκριτικά με τις προηγούμενες ακτινικές θέσεις. Όλα τα παραπάνω, μαζί με τις στατικές πιέσεις, μπορούν να φανούν στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.15), παρουσιάζοντας τα εν λόγω μόνο για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές. Η κατεύθυνση της ροής είναι αντίστοιχη των προηγούμενων όμοιων σχημάτων.



Σχήμα 4.15: Περιοχή στο 70% του ύψους του πτερυγίου - Επαγόμενες ταχύτητες, Στατικές πιέσεις, Ολικές πιέσεις

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων και η επίδραση του απόρρου στην κυκλοφορία πάνω στο πτερύγιο, δεν είναι αισθητή στο σύνολο της ούτε σ' αυτήν την περίπτωση. Τα επίπεδα τύρβης έχουν αυξηθεί στην περιοχή αποκόλλησης της ροής όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.16), για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές ροής (αύξηση ϕ από τα αριστερά προς τα δεξιά).

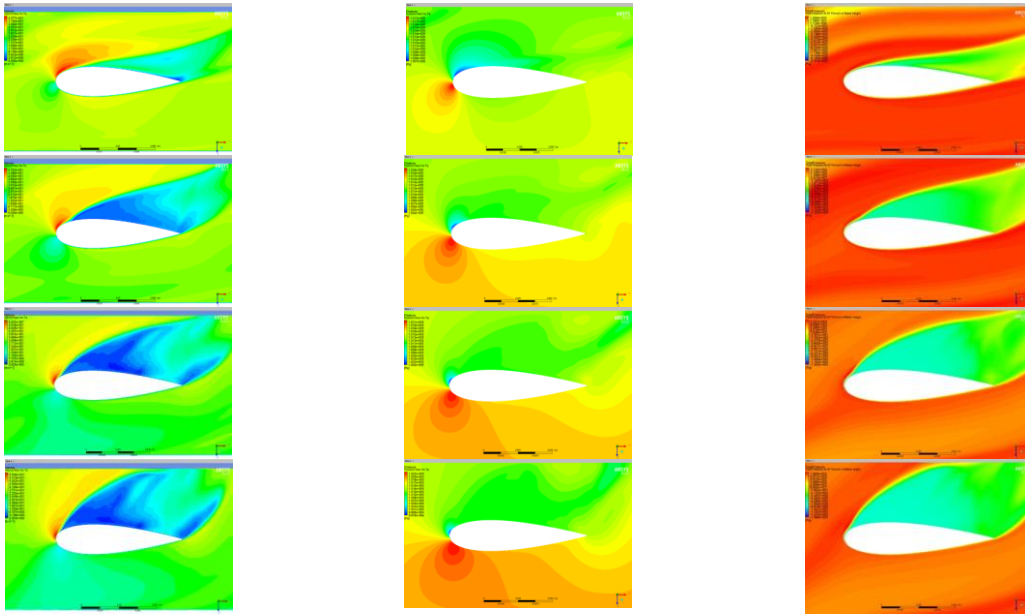


Σχήμα 4.16: Επίπεδα τύρβης στην ακτινική θέση στο 70% του ύψους του πτερυγίου-Επίδραση απόρρου στην κυκλοφορία του ρευστού πάνω στο πτερύγιο

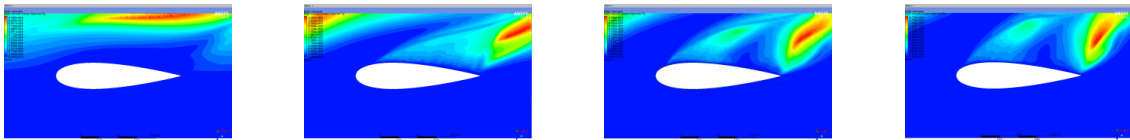
Τα παραπάνω φαινόμενα αποκόλλησης γίνονται πιο έντονα κοντά στην κορυφή του πτερυγίου. Όσον αφορά τον πρώτο συντελεστή ροής, για τον οποίο μέχρι τώρα στις διαφορετικές ακτινικές θέσεις παρουσιαζόταν μια ομαλή κυκλοφορία της ροής πάνω στο πτερύγιο, στην ακτινική θέση στο 97% του ύψους του πτερυγίου η κλίση της ταχύτητας πάνω στο πτερύγιο έχει αυξηθεί. Σε μια τρισδιάστατη μελέτη του πεδίου ροής γύρω από την περιοχή του πτερυγίου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Συγκεκριμένα, για την κορυφή του πτερυγίου, η οποία είναι επίσης μια ιδιαίτερη περίπτωση στις στροβιλομηχανές, επικρατούν φαινόμενα αλληλεπιδράσεων της ροής πάνω στο πτερύγιο με της ροής διαμέσου του διακένου, τα οποία σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να αμεληθούν. Η θεωρία αεροτομών δύο διαστάσεων δεν μπορεί να εξηγήσει τα φαινόμενα που εξελίσσονται στις τρεις διαστάσεις και συνεπώς, ο αναγνώστης δεν πρέπει να τα συγχέει. Βάσει των παραπάνω λοιπόν, θα μπορούσε να

εξηγηθεί η ύπαρξη ανακυκλοφορίας και οι μεγαλύτερες περιοχές αποκόλλησης της ροής, για όλους τους συντελεστές ροής.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.17) φαίνονται οι ταχύτητες του πεδίου ροής, οι στατικές και ολικές πιέσεις για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές ροής. Όπως μπορεί να δει κανείς από το Σχήμα 4.18, τα επίπεδα τύρβης παρουσιάζονται μόνο στην περιοχή αποκόλλησης της ροής και συνεπώς, στην περιοχή αυτή, η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων είναι αμελητέα.



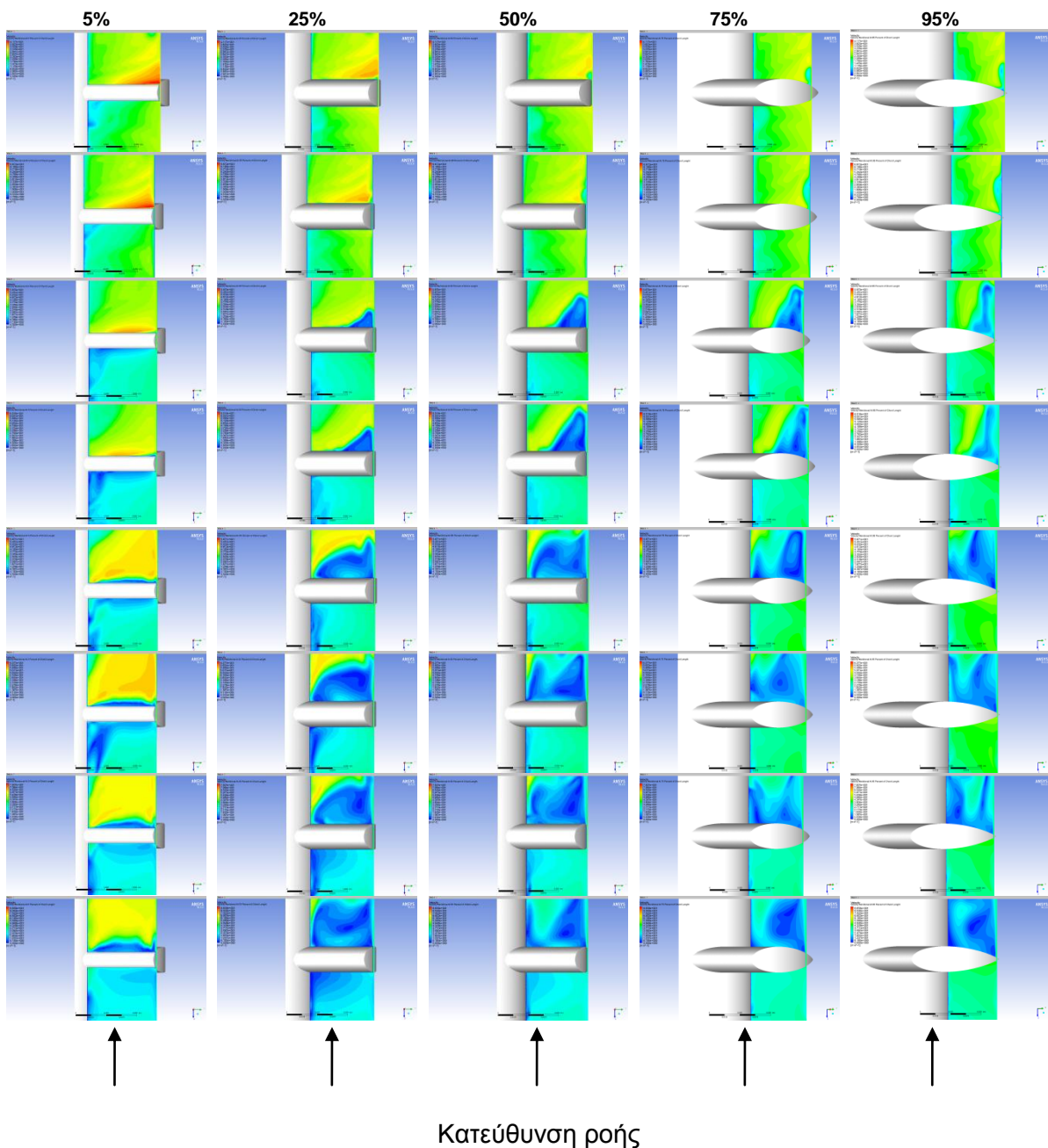
Σχήμα 4.17: Περιοχή στο 97% του ύψους του πτερυγίου - Επαγόμενες ταχύτητες, Στατικές πιέσεις, Ολικές πιέσεις



Σχήμα 4.18: Επίπεδα τύρβης στην ακτινική θέση στο 97% του ύψους του πτερυγίου-Επίδραση απόρρου στην κυκλοφορία του ρευστού πάνω στο πτερύγιο

Τα χαρακτηριστικά της ροής, όσον αφορά τα πεδία ταχυτήτων μπορούν να απεικονιστούν και στη μεσημβρινή τομή του πτερυγίου, η οποία ανάλογα με τη θέση της δίνει τις αναπτυσσόμενες ταχύτητες σ' όλο το ύψος του πτερυγίου. Δημιουργήθηκαν τέτοιες μεσημβρινές τομές, για το 5%, το 25%, το 50%, το 75% και το 95% του μήκους χορδής. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.19) παρουσιάζονται τα πεδία ταχυτήτων σ' αυτές τις θέσεις, για όλους τους συντελεστές ροής. Με το παρακάτω σχήμα ο αναγνώστης μπορεί να δει την εξέλιξη της ροής και να αντιληφθεί τα φαινόμενα αποκόλλησης που λαμβάνουν χώρα. Επίσης, μπορεί να παρατηρήσει πως μετά τον τρίτο συντελεστή αρχίζουν και λαμβάνουν χώρα έντονα φαινόμενα αποκόλλησης της ροής ενώ, από τον πέμπτο συντελεστή και μετά η περιοχή αποκόλλησης της ροής εξαπλώνεται σ' όλη την πλευρά

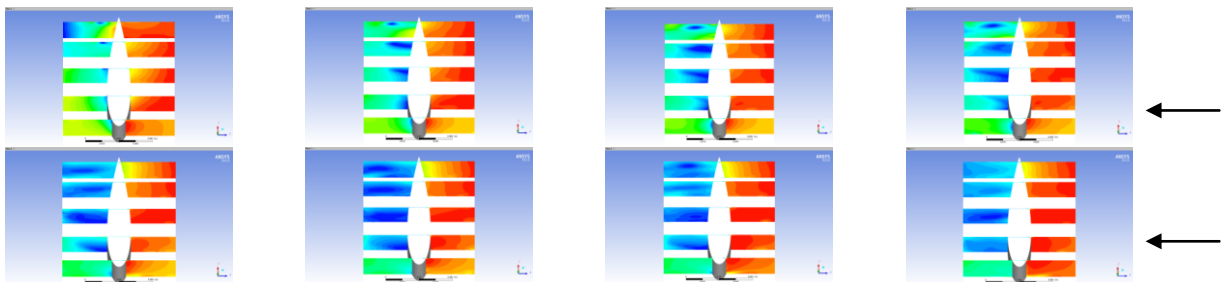
αναρρόφησης του πτερυγίου. Σημειώνεται πως η μεσημβρινή τομή στο 25% του μήκους χορδής του πτερυγίου, είναι πιο μπροστά από το μέγιστο πάχος αυτού, το οποίο για μια αεροτομή NACA 0021 βρίσκεται στο 30% του μήκους χορδής. Τέλος, μπορεί να δει κανείς ότι τελικά τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή της κορυφής του πτερυγίου είναι εντονότερα απ' ότι στη βάση αυτού. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων στην περιοχή της βάσης και τα αναπτυσσόμενα επίπεδα τύρβης που παρουσιάστηκαν, μπορεί να πεί κανείς ότι βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά της ροής στην περιοχή αυτή



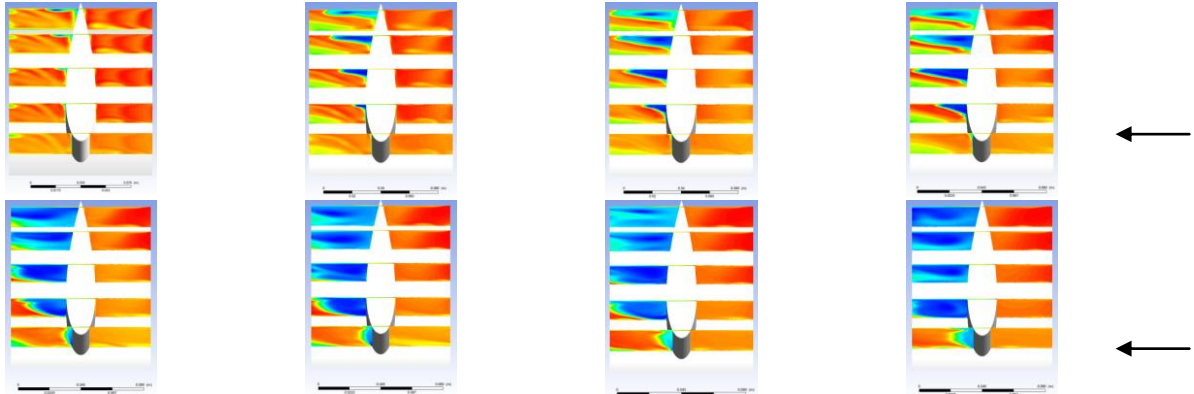
Σχήμα 4.19: Επαγόμενες ταχύτητες για τη μεσημβρινή τομή του πτερυγίου στο, 5%, 25%, 50%, 75% και 95% του μήκους χορδής

Ανάλογα σχήματα μπορούν να προκύψουν και για τις στατικές και τις ολικές πιέσεις. Τέτοια σχήματα φαίνονται παρακάτω (Σχήμα 4.20) ωστόσο, για εξοικονόμηση χώρου οι εν λόγω πιέσεις παρουσιάζονται μεν, για όλους τους συντελεστές ροής αλλά, όλα τα επίπεδα της μεσημβρινής τομής βρίσκονται σε μια εικόνα. Η μεσημβρινή τομή ξεκινάει κοντά στην ακμή προσβολής του πτερυγίου στο 5 % του μήκους χορδής και καταλήγει βαθμιαία, όπως και προηγουμένως, στο 95 % του μήκους χορδής, κοντά στην ακμή φυγής του πτερυγίου. Ο συντελεστής ροής στο παρακάτω σχήμα θα αυξάνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω για κάθε πίεση που έγινε αναφορά. Τα βέλη που φαίνονται δείχνουν την κατεύθυνση της ροής

Στατική πίεση:



Ολική πίεση:



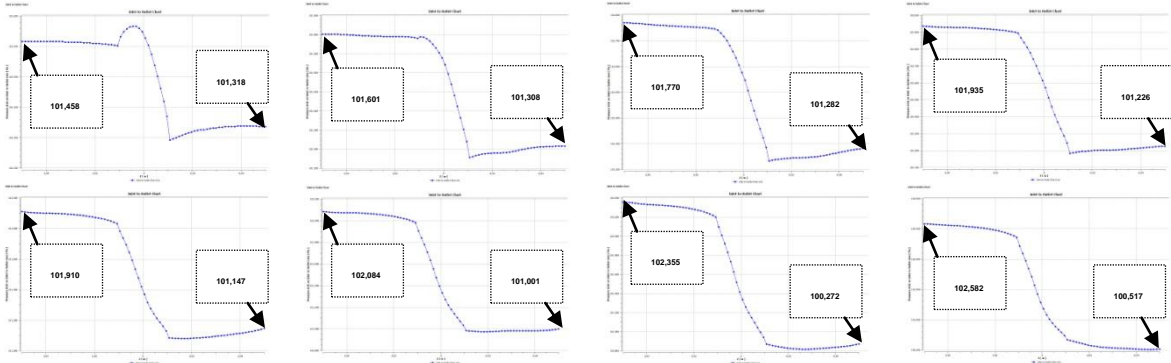
Σχήμα 4.20: Στατικές και ολικές πιέσεις για τη μεσημβρινή τομή του πτερυγίου στο, 5%, 25%, 50%, 75% και 95% του μήκους χορδής

Όσον αφορά τα σχήματα των ολικών πιέσεων μπορεί να φανεί πως από τον πέμπτο συντελεστή ροής οι υποπίεσεις είναι πολύ έντονες ήδη από την ακμή προσβολής του πτερυγίου. Αυτός ο συντελεστής ροής, όπως θα φανεί και παρακάτω, δεν είναι τυχαίος.

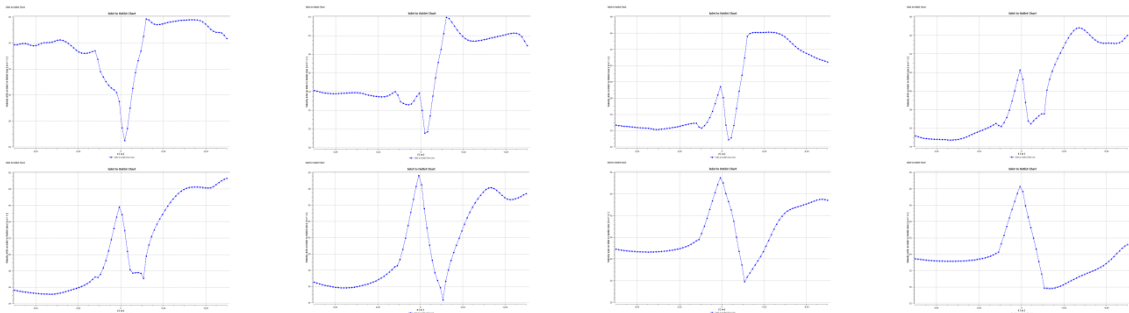
Στη συνέχεια, ενδιαφέρον είναι να δεί κανείς την πτώση πίεσης διαμέσου του στροβίλου Wells, γι' αυτές τις συνθήκες. Η πτώση πίεσης υπολογίστηκε όπως αναφέρθηκε στην αρχή της ενότητας αυτής ενώ, παρακάτω φαίνεται σε μορφή διαγραμμάτων (Σχήμα 4. 21) για όλους τους συντελεστές ροής, όπως αυτά εξάχθηκαν από το λογισμικό ANSYS CFX. Στο ίδιο σχήμα, ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει επίσης τις μέσες ταχύτητες που

επάγωνται στο χωρίο του ρότορα, από την είσοδο έως την έξοδο αυτού, για όλους τους συντελεστές ροής. Τα εν λόγω σχήματα αναφέρονται σε αυξανόμενο συντελεστή ροής από τα αριστερά προς τα δεξιά και από κάτω προς τα πάνω.

Πτώση πίεσης:



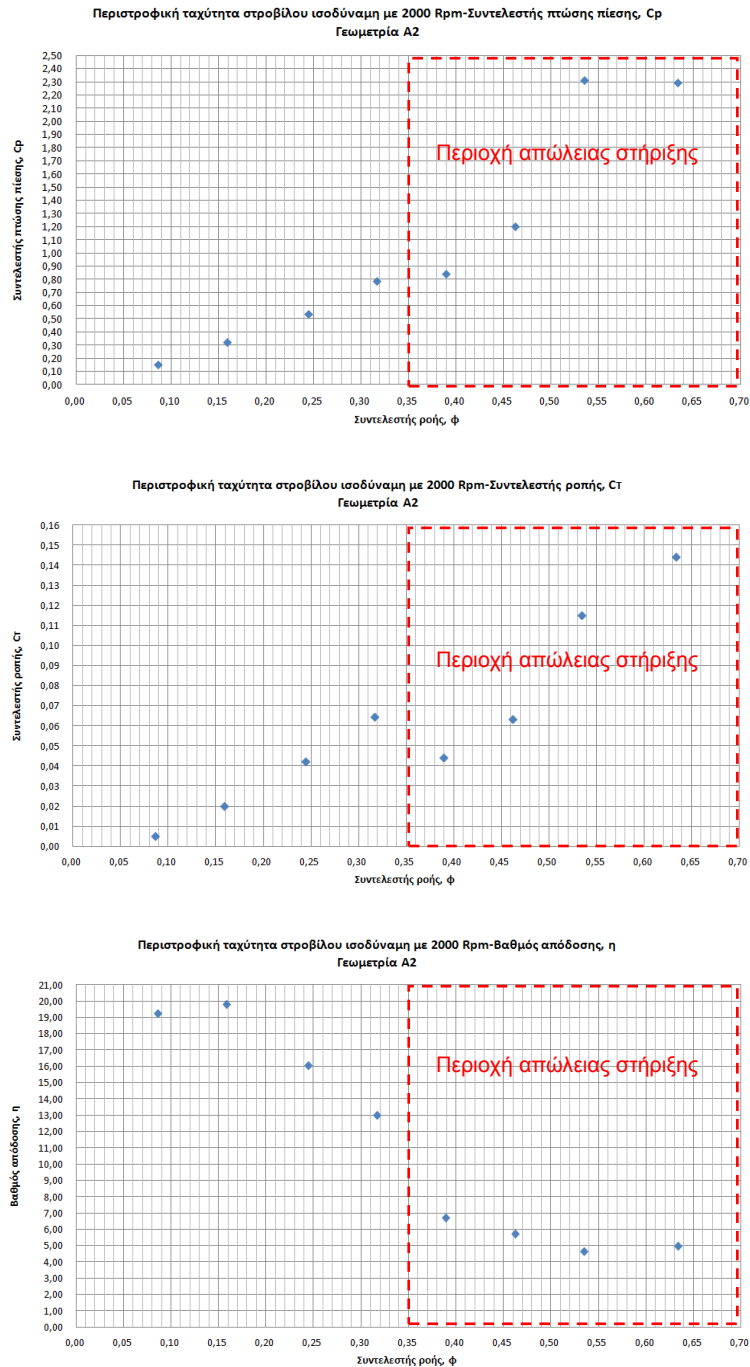
Επαγόμενες ταχύτητες:



Σχήμα 4. 21: Πτώση πίεσης και επαγόμενες ταχύτητες διαμέσου του χωρίου του ρότορα

Η πτώση πίεσης αυξάνει με την αύξηση του συντελεστή ροής. Όσον αφορά τις ταχύτητες που αναπτύσσονται εντός του χωρίου του ρότορα, αν δει κανείς μόνο την περιοχή του πτερυγίου, παρατηρείται πως, από τον συντελεστή $\varphi=0.389$ και έπειτα, η διαφορά των ταχυτήτων για λίγο πριν και λίγο μετά από το πτερύγιο είναι θετική. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι η ύπαρξη των φαινομένων ακραίας αποκόλλησης που σχολιάστηκαν προηγουμένως.

Όσον αφορά την απόδοση του στροβίλου σε όρους συντελεστή ροπής, πτώσης πίεσης και απόδοσης, μπορούν να φανούν στο παρακάτω σχήμα ([Σχήμα 4.22](#)).



Σχήμα 4.22: Συντελεστές ροπής, πίεσης και απόδοση στροβίλου για N=2000 rpm

Παρατηρώντας αρχικά το συντελεστή ροπής, βλέπει κανείς αρχικά την πτώση του για ένα συντελεστή ροής $\phi=0.317$ και ύστερα τη συνεχή αύξηση του υπερεκτιμώντας. Η καμπύλη της ροπής δεν είναι η αναμενόμενη ομολογουμένως. Ωστόσο, οι περισσότεροι ερευνητές έχουν εξαγάγει τέτοιες καμπύλες ροπής. Μερικοί απ' αυτούς μάλιστα τολμούν να σχολιάσουν πως κάτι τέτοιο οφείλεται σε αδυναμία των μοντέλων, που χρησιμοποιούν τις μέσες χρονικές εξισώσεις RANS, να ανταπεξέλθουν κάτω απ' αυτές τις συνθήκες ακραίας αποκόλλησης. Άλλοι ερευνητές, έχουν αποδεχτεί αυτήν την αδυναμία και χωρίς κανένα περαιτέρω σχόλιο απεικονίζουν την καμπύλη της ροπής μέχρι την πρώτη πτώση του.

Τέλος, μερικοί ερευνητές έχουν καταφέρει να πιάσουν την επιθυμητή καμπύλη όμως, δεν παρουσιάζουν στη βιβλιογραφία τον τρόπο με τον οποίο τα κατάφεραν. Εν τέλει όμως, όλοι οι ερευνητές ξεπερνούν αυτή την οπτική ιδιομορφία της καμπύλης της ροπής και σημειώνουν πως, στην πρώτη πτώση του συντελεστή ροπής βρίσκεται το σημείο εμφάνισης του φαινομένου της απώλειας στήριξης (stall). Συνεπώς, σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα το σημείο απώλειας στήριξης βρίσκεται για $\varphi=0.317$, κάτω από τις συνθήκες που μελετώνται σ' αυτήν την ενότητα. Τα αποτελέσματα που είναι μετά απ' αυτό το σημείο δεν θα έπρεπε να τα εμπιστευτεί απόλυτα κανείς. Ο συντελεστής πίεσης δεν καταφέρνει να πιάσει αυτή την πτώση, στις παρούσες συνθήκες. Καταλήγοντας, από το διάγραμμα της απόδοσης του στροβίλου βλέπει κανείς πως ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι για $\varphi=0.158$, ίσος με περίπου 20% ενώ, για το μέγιστο συντελεστή ροπής ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου είναι περίπου 13%. Τέτοιοι βαθμοί απόδοσης, γενικά για τον στρόβιλο Wells, είναι πολύ μικροί και συνεπώς, κρίνεται πως η παρούσα γεωμετρία, κάτω απ' αυτές τις συνθήκες είναι μη αποδοτική.

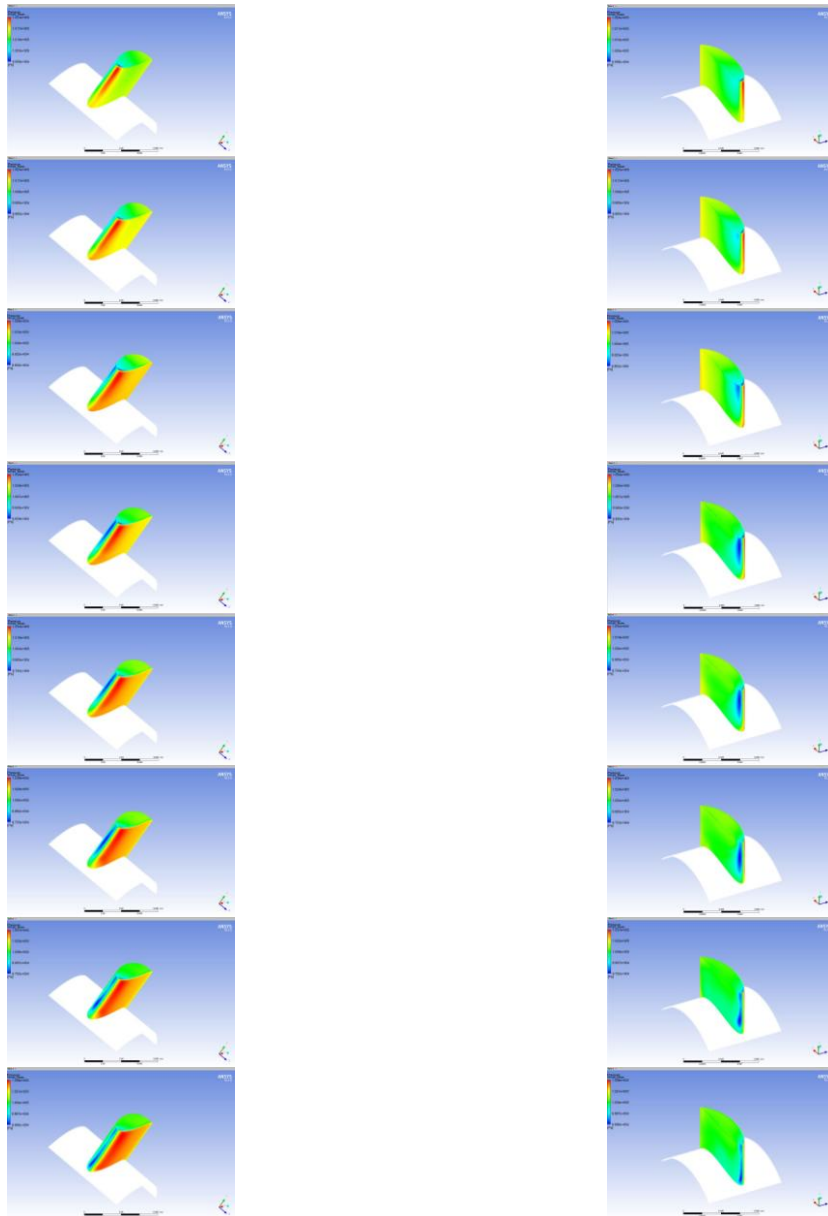
Στο σημείο αυτό, μπορεί να ανατρέξει κανείς στην ανάλυση του πεδίου ροής που προηγήθηκε και να δει πως για συντελεστή ροής $\varphi \geq 0.389$, τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν οφείλονταν στο ότι ο στρόβιλος βρισκόταν σε συνθήκες απώλειας στήριξης ενώ, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης για $\varphi=0.158$, είναι απόλυτα συνδεδεμένος με την σχετικά ομαλή ροή που παρατηρήθηκε γι' αυτόν τον συντελεστή ροής.

4.1.2 Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισοδύναμη με 3000 rpm

Αντιλαμβάνεται κανείς ότι λόγω της ανάγκης για εξοικονόμηση χώρου, δεν μπορεί να ακολουθήσει μια αντίστοιχη παράθεση σχημάτων και για την περίπτωση αυτή. Συνεπώς, τα σχήματα θα μειωθούν κατά βάση σε ποσότητα και σε μέγεθος ωστόσο, κάτι τέτοιο δε σημαίνει πως ο σχολιασμός που θα ακολουθήσει θα υστερεί. Επιπλέον, Οι διάφοροι συντελεστές ροής που ελέγχονται, θα παρουσιάζονται με ονομασίες αριθμών και σ' αυτήν την περίπτωση, με τον πρώτο συντελεστή ροής να είναι ο μικρότερος. Για τον λόγο αυτό καλό θα ήταν να ξαναδεί κάποιος τον αντίστοιχο πίνακα που αναφέρονται οι εν λόγω συντελεστές ροής, για περιστροφική ταχύτητα στροβίλου 3000 rpm (Πίνακας 4.2).

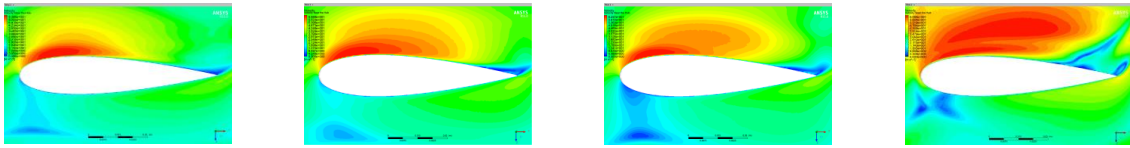
Οι στατικές πιέσεις πάνω στην επιφάνεια του πτερυγίου, αντίστοιχα με της προηγούμενης ενότητας φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.23). Στις παρούσες συνθήκες, η στατική πίεση στην πλευρά πίεσης του πτερυγίου συνεχώς αυξάνεται. Ωστόσο, ο ρυθμός αύξησης της είναι μικρότερος μετά τον τέταρτο συντελεστή ροής. Μια ανάλογη παρατήρηση μ' αυτήν που έγινε στην ανάλυση για 2000 rpm, είναι ότι στον τέταρτο συντελεστή ροής παρατηρείται μια αύξηση της ελάχιστης πίεσης στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου, η οποία ίσως σημαίνει μια μείωση του παραγόμενου έργου

από τα πτερύγια. Μια αντίστοιχη αύξηση παρατηρείται επίσης και για τον έβδομο συντελεστή ροής. Παρόλ' αυτά, η πτώση πίεσης μεταξύ του πτερυγίου αυξάνεται όσο αυξάνεται ο συντελεστής ροής, με μια εξαίρεση στον έβδομο συντελεστή ϕ . Κάτι άλλο που θα μπορούσε να παρατηρήσει ο αναγνώστης, αντίστοιχα με την προηγούμενη ανάλυση, είναι ότι η ελάχιστη στατική πίεση στην πλευρά αναρρόφησης μετακινείται ολοένα και πιο κοντά προς την ακμή προσβολής, με την αύξηση του συντελεστή ροής. Η μετακίνηση του σημείου ανακοπής προς την πλευρά πίεσης αναγκάζει το ρευστό να έχει μεγαλύτερη ταχύτητα κοντά στην ακμή προσβολής. Μάλιστα, μετά τον τέταρτο συντελεστή ροής παρατηρείται μια αύξηση της κλίσης της ταχύτητας σ' όλο το ύψος του πτερυγίου, στην ακμή προσβολής. Μπορεί η παρατήρηση της επιφάνειας του πτερυγίου να είναι ένα πολύ πρωταρχικό στάδιο ανάλυσης αλλά τελικά, όπως θα δούμε και παρακάτω, οι εν λόγω μεταβολές που παρατηρούνται σ' αυτούς τους συντελεστές ροής έχουν βάση.



Σχήμα 4.23: Στατικές πιέσεις στο πτερύγιο ανά συντελεστή ροής, ϕ

Όσον αφορά τη συμπεριφορά του ρευστού κοντά στη βάση (3% του ύψους του πτερυγίου), στον τρίτο συντελεστή ροής εμφανίζεται ένα πεδίο χαμηλών ταχυτήτων πριν το σημείο ανακοπής, το οποίο όσο αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης του ρευστού μετακινείται ολοένα και πιο κοντά προς την επιφάνεια του πτερυγίου. Από το Σχήμα 4.24 μπορεί να δει κανείς την εν λόγω αυξανόμενη ανακυκλοφορία, παρουσιάζοντας μόνο τον τρίτο, τον τέταρτο, τον πέμπτο και τον έκτο συντελεστή ροής. Επίσης, για τους συντελεστές ροής του παρακάτω σχήματος, φαίνεται η ολοένα μεγαλύτερη κλίση της ταχύτητας, για αυξανόμενο ϕ ενώ, για τον έκτο συντελεστή ροής φαίνεται μια απότομη αύξηση αυτής.



Σχήμα 4.24: Ανακυκλοφορία πριν την πρόσκρουση του ρευστού στην επιφάνεια του πτερυγίου-περιοσχή στο 3% του ύψους του πτερυγίου

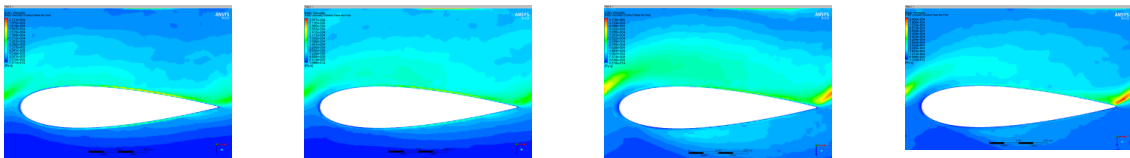
Η ανακυκλοφορία αυτή είναι δύσκολο να εξηγηθεί ωστόσο, κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στην αλληλεπίδραση του ρευστού με το οριακό στρώμα της βάσης. Το φαινόμενο αυτό είχε παρατηρηθεί και στην προηγούμενη ανάλυση όπου φαινόταν καθαρά από τον τέταρτο συντελεστή ροής και μετά ενώ, για τους μικρότερους συντελεστές ροής υπάρχει περίπτωση να εμφανιζόταν πιο μακριά από το πτερύγιο. Εφόσον, ο αριθμός Reynolds στην προηγούμενη ανάλυση ήταν μικρότερος, αυτό σημαίνει πως για τον ίδιο συντελεστή ροής το πάχος του οριακού στρώματος της βάσης είναι μεγαλύτερο και συνεπώς, γι' αυτό ίσως ξεκινάει πιο νωρίς η αποκόλληση του, σε αντιστοιχία με τους παραπάνω συντελεστές ροής.

Όσον αφορά τους συντελεστές ροής που δεν παρουσιάστηκαν στο παραπάνω σχήμα, για τους δύο πρώτους ($\phi=0.057, 0.106$) παρουσιάζεται μια πολύ μικρή περιοχή αποκόλλησης η οποία περιορίζεται στην ακμή φυγής του πτερυγίου ενώ, για τους δύο τελευταίους ($\phi=0.356, 0.422$), τα φαινόμενα αποκόλλησης που λαμβάνουν χώρα είναι ακραία και σ' αυτήν την περίπτωση της ανάλυσης. Ωστόσο, η ροή του ρευστού πάνω στο πτερύγιο, κοντά στη βάση, ομολογουμένως παρουσιάζει στο σύνολο της μικρότερες εκτάσεις αποκολλήσεων έναντι της προηγούμενης ανάλυσης (Σχήμα 4.5).

Κάτι τέτοιο οφείλεται στην αύξηση της εφαιπτομενικής ταχύτητας του πτερυγίου, όπου για την ίδια ταχύτητα εισαγωγής (συνιστώσα απόλυτης ταχύτητας), η γωνία πρόσπτωσης του ρευστού είναι μικρότερη, σύμφωνα με τα τρίγωνα ταχυτήτων ενώ, το σημείο ανακοπής είναι πιο κοντά στην ακμή προσβολής. Ωστόσο, όπως ειπώθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η μείωση της γωνίας πρόσπτωσης, για τρισδιάστατες ροές, δεν είναι πανάκεια για να αποδειχτεί η ομαλή συμπεριφορά της ροής σ' όλο το ύψος του πτερυγίου και

χρειάζεται να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κοντά στη βάση και στην κορυφή του πτερυγίου.

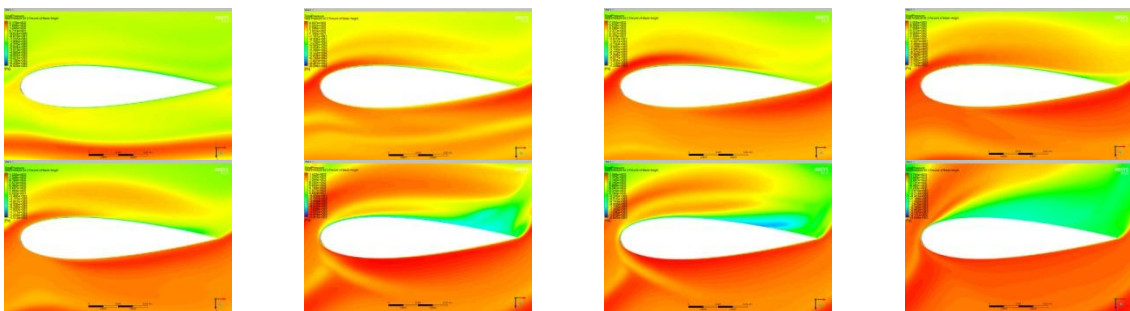
Ενδιαφέρον έχει να παρατηρήσει κανείς τα επίπεδα τύρβης που αναπτύσσονται στη ροή πάνω στο πτερύγιο και τα οποία μεταφέρονται από το ένα πτερύγιο στο άλλο. Τα εν λόγω επίπεδα τύρβης, συγκριτικά με την προηγούμενη ανάλυση, είναι υψηλότερα παρόλο που η ροή φαίνεται να είναι πιο ομαλή. Αναφορικά με το Σχήμα 4.6, παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήμα 4.25), για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές ροής (οι τέσσερις πρώτοι συντελεστές ροής αναφέρονται σε ίδια ταχύτητα εισόδου), τα επίπεδα τύρβης. Θα μπορούσε να συμπεράνει λοιπόν κανείς, ότι τα αυξημένα επίπεδα τύρβης στην είσοδο του πτερυγίου, συνέβαλαν κι αυτά στην ανάπτυξη πιο ομαλών συνθηκών ροής στην παρούσα περίπτωση.



Σχήμα 4.25: Επίπεδα τύρβης στην ακτινική θέση στο 3% του ύψους του πτερυγίου-Επίδραση απόρρου

Όπως φαίνεται, ο απόρρους των πτερυγίων περιέχει μεγαλύτερα επίπεδα τύρβης τα οποία ξεκινούν από την περιοχή αποκόλλησης του ρευστού, στην ακμή φυγής. Όσο αυξάνεται ο συντελεστής ροής τόσο αυξάνεται και η ένταση της τύρβης.

Παρατηρώντας τις ολικές πιέσεις, συγκριτικά με την προηγούμενη ανάλυση, μπορεί να δει κανείς ότι η ανακυκλοφορία του ρευστού στην ακμή φυγής του πτερυγίου γίνεται με πιο έντονο ρυθμό, παρόλο που η έκταση της περιοχής αποκόλλησης της ροής είναι μικρότερη. Οι μεγάλες τιμές υποπίεσεων μπορούν να συσχετιστούν και με τα παραπάνω αναπτυσσόμενα επίπεδα τύρβης. Όσο αυξάνεται ο συντελεστής ροής τόσο αυξάνονται και οι αναφερόμενες υποπίεσεις. Για τους όλους τους συντελεστές ροής, μπορούν να παρατηρηθούν τα παραπάνω στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.26). Ο συντελεστής ϕ αυξάνεται από τ' αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω.



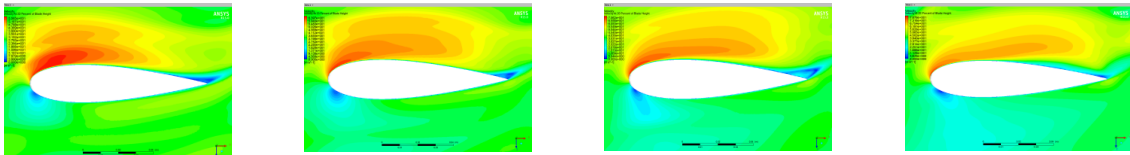
Σχήμα 4.26: Περιοχή στο 3% του ύψους του πτερυγίου-Ολικές πιέσεις

Φαίνεται λοιπόν, συγκριτικά με την ανάλυση για 2000 rpm (Σχήμα 4.5) πως οι υποπίεσεις έχουν μεν μικρότερη έκταση αλλά έχουν και υψηλότερες τιμές.

Όσον αφορά το 20% του ύψους του πτερυγίου, το χαμηλό πεδίο ταχυτήτων που καθορίζεται από την ανακυκλοφορία του ρευστού κοντά στην πλευρά πίεσης του πτερυγίου και στην περιοχή κοντά στη βάση αυτού, έχει μειωθεί αισθητά. Οπότε, μεγαλώνουν οι πιθανότητες να οφειλόταν στην αλληλεπίδραση μεταξύ της ροής στο πτερύγιο και του οριακού στρώματος της βάσης.

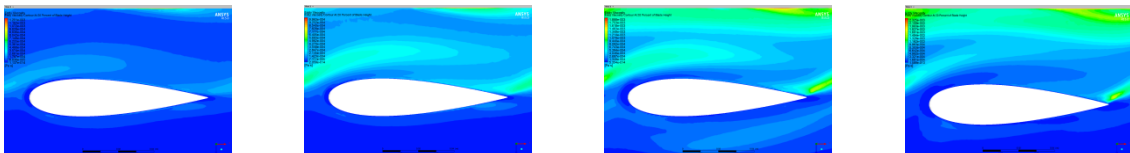
Για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές ροής, η κατανομή των ταχυτήτων πάνω στο πτερύγιο παρουσιάζει σχεδόν ίδια συμπεριφορά. Ο τέταρτος συντελεστής ροής μάλιστα παρουσιάζει μια μείωση στην έκταση της περιοχής της αποκόλλησης. Μείωση της περιοχής αποκόλλησης παρατηρείται και για τον πέμπτο και έκτο συντελεστή ροής. Για τον έβδομο και όγδοο συντελεστή ροής η περιοχή αποκόλλησης μετακινείται στο σημείο μέγιστου πάχους και στην ακμή προσβολής αντίστοιχα. Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.27) παρουσιάζονται τα πεδία ταχυτήτων σε αντιστοιχία με το Σχήμα 4.24.

Παρόλο που η αλληλεπίδραση της ροής με το οριακό στρώμα της βάσης μειώθηκε, η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων φαίνεται να είναι ακόμα συγκρίσιμη με την περιοχή κοντά στη βάση, με τα επίπεδα τύρβης πάνω στο πτερύγιο αλλά και στον απόρρου να μην είναι αισθητά μικρότερα, τουλάχιστον για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές ροής. Για τους εν λόγω συντελεστές ροής, σε συμφωνία με τα προηγούμενα αντίστοιχα σχήμα, τα επίπεδα τύρβης που αναπτύσσονται διακρίνονται στο Σχήμα 4.28.

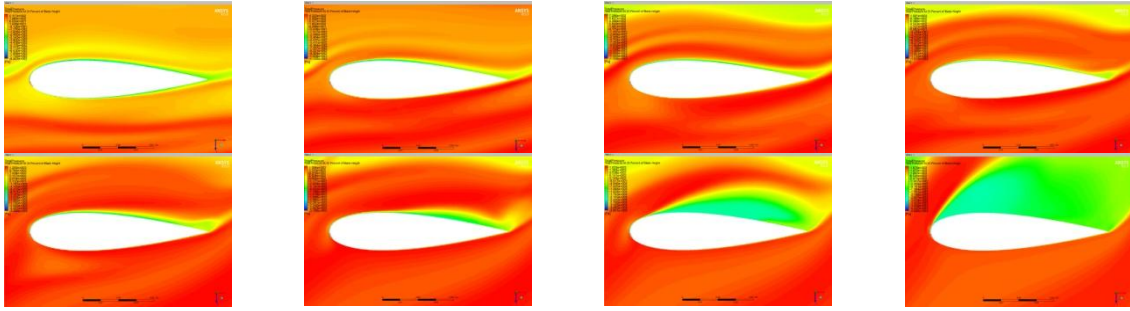


Σχήμα 4.27: Ανακυκλοφορία πριν την πρόσκρουση του ρευστού στην επιφάνεια του πτερυγίου-περιοχή στο 20% του ύψους του πτερυγίου

Από τις ολικές πιέσεις μπορεί να δει κανείς ότι η ροή είναι πιο "στρωτή" στο σύνολο της ωστόσο, στις περιοχές αποκόλλησης το μέγεθος των υποπίεσεων είναι μεγαλύτερο και συνεπώς, οι δίνες είναι πιο εύκολο να δημιουργηθούν. Οι εν λόγω ολικές πιέσεις διακρίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.29) σε αντιστοιχία με το Σχήμα 4.26.



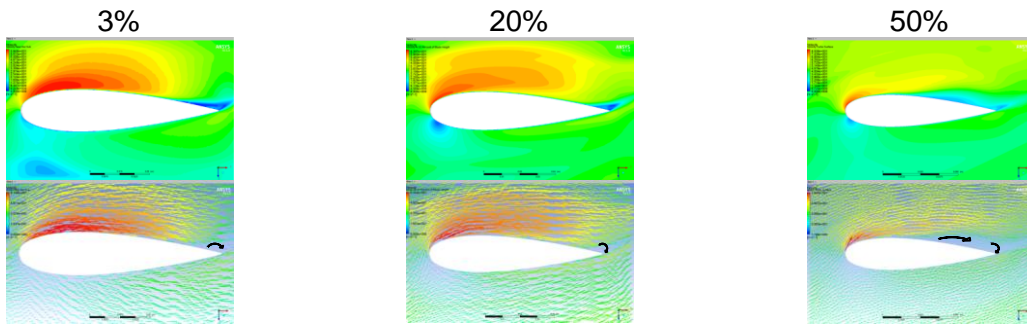
Σχήμα 4.28: Επίπεδα τύρβης στην ακτινική θέση στο 20% του ύψους του πτερυγίου-Επίδραση απόρρου



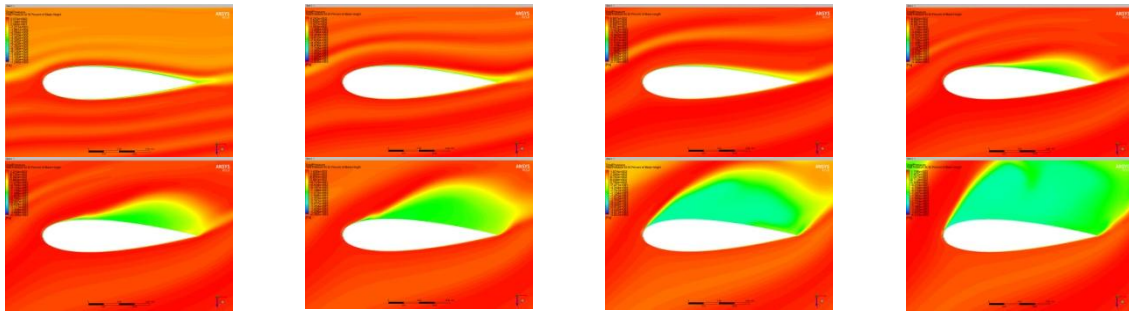
Σχήμα 4.29: Περιοχή στο 20% του ύψους του πτερυγίου-Ολικές πιέσεις

Στο 50% του ύψους του πτερυγίου, για τους τρεις πρώτους συντελεστές ροής, τα πεδία ταχυτήτων που επάγονται είναι παρόμοια με των προηγούμενων ακτινικών θέσεων. Ωστόσο, από τον τέταρτο συντελεστή ροής αρχίζει να λαμβάνει χώρα μια αποκόλληση της ροής πιο κοντά στην ακμή προσβολής του πτερυγίου (Σχήμα 4.30), η οποία όμως προλαβαίνει να επανακολληθεί στο πτερύγιο για να δημιουργήσει τελικά μια δίνη στην ακμή φυγής αυτού. Οι υποπίεσεις που δημιουργούν αυτή τη δίνη είναι σχεδόν μια τάξη μεγαλύτερες από τις υποπίεσεις που αναπτύσσονταν μέχρι τώρα (Σχήμα 4.31). Από τον πέμπτο συντελεστή ροής και μετά, οι περιοχές αποκόλλησης είναι μεγαλύτερης έκτασης και ξεκινάνε από πιο μπροστά, προς την ακμή προσβολής. Μάλιστα, για τον πέμπτο συντελεστή ροής η αποκόλληση ξεκινάει οριακά στο μέγιστο πάχος του πτερυγίου. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.30) φαίνεται αρχικά η περιοχή αποκόλλησης της ροής για τον τέταρτο συντελεστή ροής, συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες ακτινικές θέσεις ενώ, παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα διανύσματα ταχυτήτων, προκειμένου να φανούν οι δίνες που σχηματίζονται. Στο Σχήμα 4.31 σχήμα φαίνονται οι ολικές πιέσεις που αναπτύσσονται πάνω στο πτερύγιο, για την περιοχή αυτή, σε αντιστοιχία με τα δύο αντίστοιχα σχήματα που προηγήθηκαν.

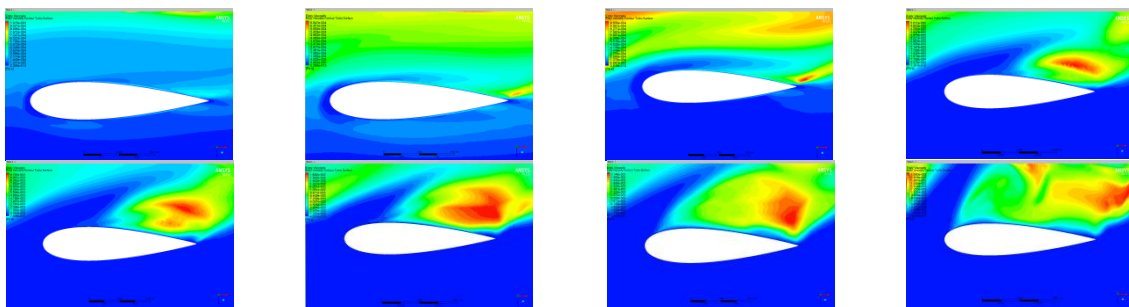
Στη συνέχεια, τα αναπτυσσόμενα επίπεδα τύρβης στην περιοχή αυτή, δείχνουν την ένταση που έχουν οι δίνες, οι οποίες μέχρι τον τρίτο συντελεστή ροής μεταφέρονται και αλληλεπιδρούν με τη ροή του επόμενου πτερυγίου. Εφόσον, η περιοχή του 50% είναι στην ουσία η πιο αντιπροσωπευτική περιοχή για να δεί κάποιος τη συμπεριφορά του ρευστού, απαλλαγμένη από τις τρισδιάστατες αλληλεπιδράσεις που υφίστανται κοντα στη βάση και στη κορυφή, στο Σχήμα 4.32 παρουσιάζονται τα επίπεδα τύρβης για όλους τους συντελεστές ροής που ελέγχονται.



Σχήμα 4.30: Περιοχή αποκόλλησης της ροής για $\alpha=0.211$ στις ακτινικές θέσεις 3%, 20% και 50%



Σχήμα 4.31: Περιοχή στο 50% του ύψους του πτερυγίου-Ολικές πιέσεις



Σχήμα 4.32: Επίπεδα τύρβης στην ακτινική θέση στο 50% -Επίδραση απόρρου

Απο το Σχήμα 4.32 φαίνεται λοιπόν, πως για τον δεύτερο συντελεστή ροής που δεν σχολιάστηκε μέχρι τώρα, τα επαγόμενα επίπεδα τύρβης, τα οποία μεταφέρονται μέσω του απόρρου, επιδρούν στη ροή πάνω στο πτερύγιο αισθητά. Κάτι τέτοιο δεν είχε παρατηρηθεί τόσο έντονα στις προηγούμενες ακτινικές θέσεις. Φαίνεται πως η ένταση των δινών που αναπτύσσονται είναι καθ' όλα μεγάλη και δεν προλαβαίνουν να καταστραφούν σε μεγάλο βαθμό ενώ, σε συνδυασμό με τις μικρότερες γωνίες πρόσπτωσης που επικρατούν και την ανάλογη αύξηση του τοπικού αριθμού Reynolds δηλαδή, την ύπαρξη λεπτότερου πάχους οριακού στρώματος, το τυρβώδες πεδίο οδηγείται προς την ακμή προσβολής του επόμενου. Εφόσον, στον συγκεκριμένο συντελεστή ροής δεν παρατηρείται κάποια μεγάλη αποκόλληση της ροής, θα μπορούσε να ισχυριστεί κανείς, πως το τυρβώδες πεδίο, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγάλες ταχύτητες, βοηθάει τη ροή να συμπεριφερθεί πιο ομαλά. Είναι γνωστό έτσι κι αλλιώς πως, η ύπαρξη τυρβώδους πεδίου στην είσοδο μιας πτέρυγας μπορεί να ενισχύσει την εναλλαγή έργου μεταξύ αυτής και του ρευστού. Όπως θα φανεί και στο τέλος της ενότητας αυτής, ο δεύτερος μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης του στροβίλου πετυχαίνεται για αυτόν τον συντελεστή

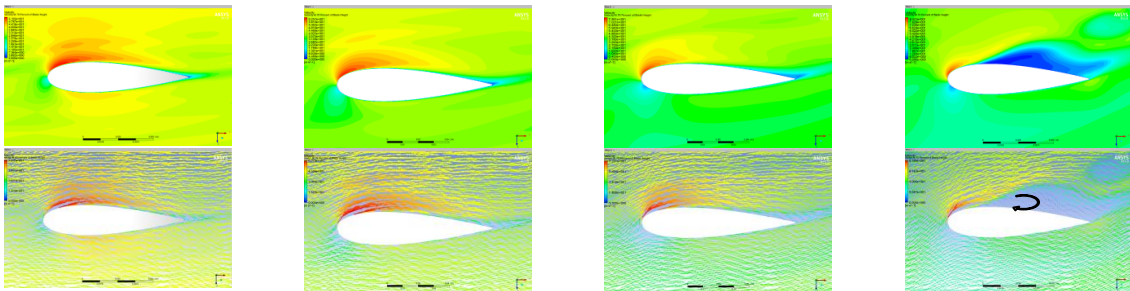
ροής. Όσο αυξάνει ο συντελεστής ροής, μιλώντας για την ίδια περιοχή ύψους του πτερυγίου, αυξάνει και η γωνία πρόσπτωσης του ρευστού με αποτέλεσμα, να επιβάλλονται μεγαλύτερες θετικές κλίσης πίεσης και το τυρβώδες οριακό στρώμα να αποκολλάται ήδη από τον τρίτο συντελεστή ροής.

Επίσης σημειώνεται πως, για τον τέταρτο συντελεστή ροής παρόλο που δεν παρατηρήθηκαν έντονες ανακυκλοφορίες συγκριτικά με τις άλλες ακτινικές θέσεις, η περιοχή αποκόλλησης της ροής δείχνει ένα έντονα τυρβώδες πεδίο. Μάλιστα, σε σύγκριση με τους προηγούμενους συντελεστές ροής, στους οποίους παρατηρείται μια βαθμιαία αύξηση του πάχους του τυρβώδους οριακού στρώματος, διακρίνεται μια απότομη μεταβολή αυτού με μια αντίστοιχα απότομη αύξηση των επιπέδων τύρβης. Όπως θα φανεί και παρακάτω, απ' αυτόν τον συντελεστή ροής και μετά και απ' αυτό το ύψος πτερυγίου και μέχρι την κορυφή, αρχίζει μια έντονη αποκόλληση της ροής.

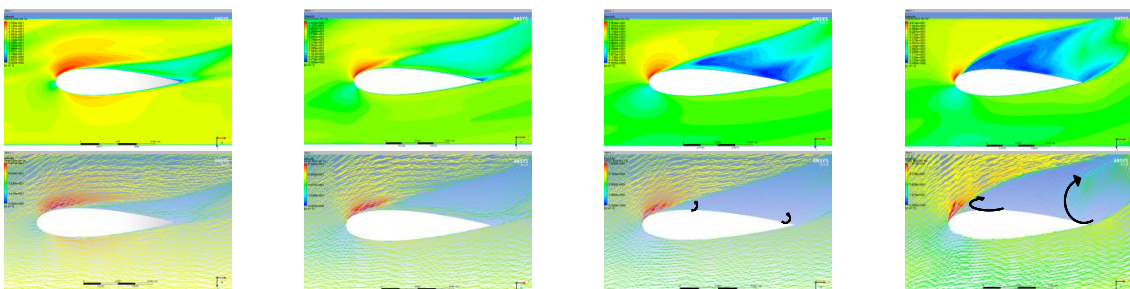
Όσον αφορά το 70% και το 97% του ύψους του πτερυγίου, οι αλληλεπιδράσεις της ροής στο πτερύγιο με τις διαρροές μέσω του διακένου, μεταξύ κορυφής πτερυγίου και περιβλήματος, είναι και σ' αυτήν την περίπτωση πολύ έντονες και συνεπώς, οι περιοχές αποκόλλησης έχουν επεκταθεί. Μάλιστα, στην ακτινική θέση στο 70%, για τον τέταρτο συντελεστή ροής, η αποκόλληση της ροής ξεκινάει πιο μπροστά από το μέγιστο πάχος του πτερυγίου και επομένως, ακολουθεί η λεγόμενη μαζική αποκόλληση της ροής.

Για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές ροής, τα πεδία και τα διανύσματα ταχυτήτων στο 70% και στο 97% του ύψους του πτερυγίου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.33).

Ακτινική θέση στο 70%:



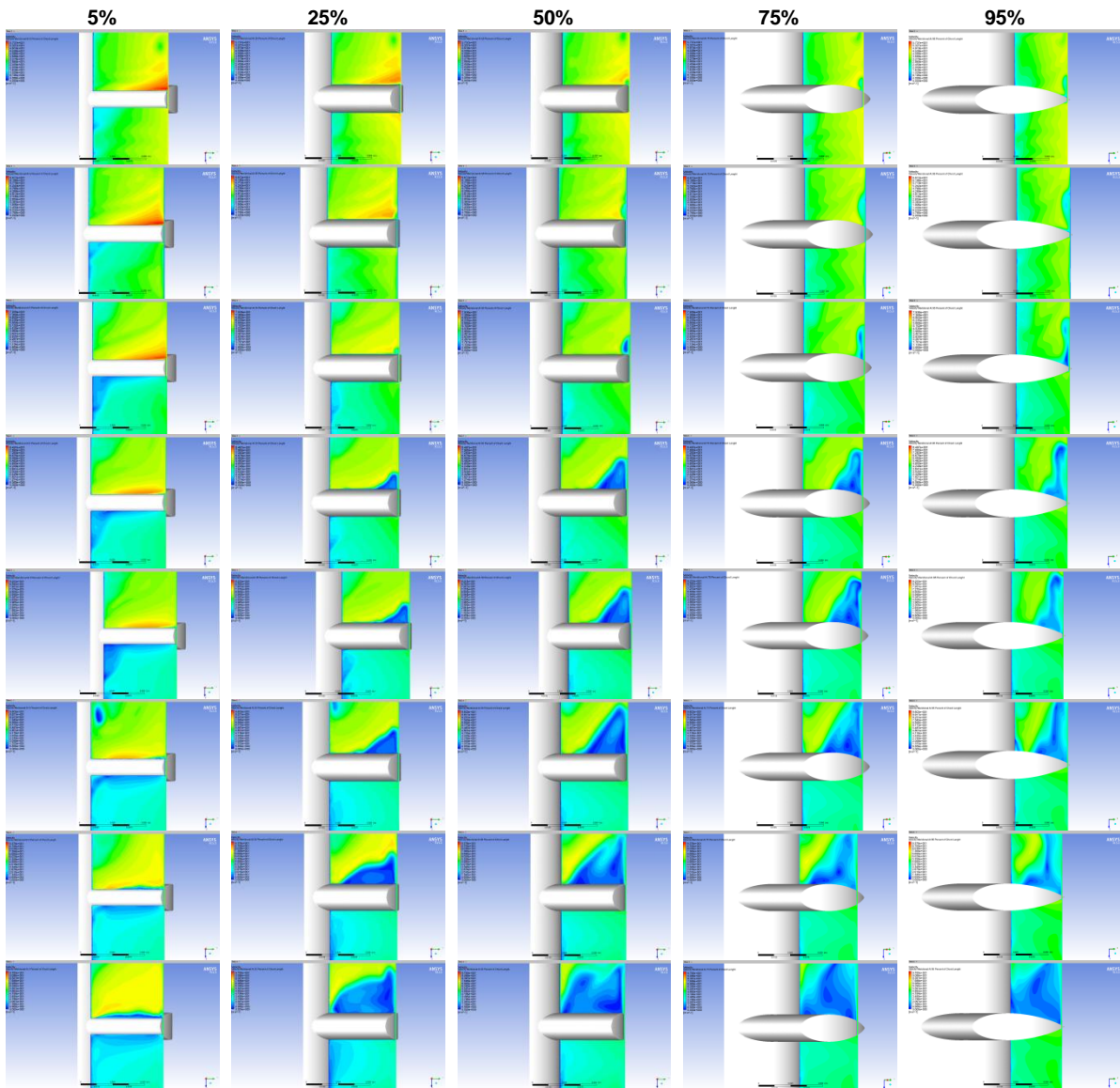
Ακτινική θέση στο 97%:



Σχήμα 4.33: Περιοχή στο 70% και στο 97% του ύψους του πτερυγίου - Επαγόμενες ταχύτητες, Διανύσματα ταχυτήτων

Αξίζει να σημειωθεί στο παραπάνω σχήμα ότι, για τον τρίτο συντελεστή ροής, στην ακτινική θέση στο 97%, παρατηρείται μια αριστερόστροφη κίνηση του ρευστού, η οποία δεν συνδέεται με το δυναμικό φαινόμενο της απώλειας στήριξης, όπου δημιουργούνται δεξιόστροφες δίνες. Μετά τον τέταρτο συντελεστή οι απώλειες είναι μεγάλες

Για να καταλάβει κανείς το μέγεθος των αποκολλήσεων, σ' όλο το ύψος του πτερυγίου, μπορεί να παρατηρήσει τα πεδία ταχυτήτων που αναπτύσσονται πάνω στο πτερύγιο, για το 5%, το 25%, το 50%, το 75% και το 95% του μήκους χορδής του (Σχήμα 4.34). Οι συντελεστές ροής αυξάνονται από πάνω προς τα κάτω.



Σχήμα 4.34: Επαγόμενες ταχύτητες για τη μεσημβρινή τομή του πτερυγίου στο, 5%, 25%, 50%, 75% και 95% του μήκους χορδής

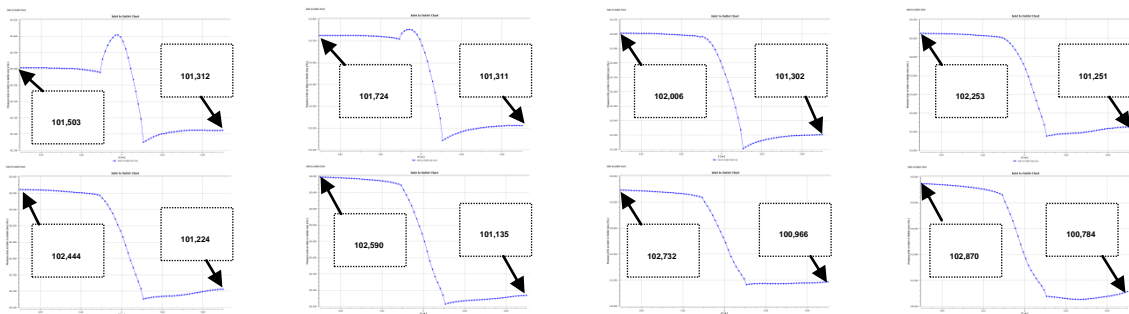
Απο το παραπάνω σχήμα μπορεί να γίνει αντιληπτό πως η περιοχή που επηρεάζει περισσότερο τη συμπεριφορά του στροβίλου, είναι πάλι αυτή κοντά στην κορυφή του πτερυγίου. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ροής πάνω στο πτερύγιο και των διαρροών

διαμέσου του διακένου που υπάρχει στην περιοχή αυτή, είναι και πάλι εντονότερες σε σχέση με τις αλληλεπιδράσεις που επικρατούν στη βάση του πτερυγίου. Μάλιστα, στην περιοχή της βάσης, ο απόρρους και τα επίπεδα τύρβης που μεταφέρονται μέσω αυτού από πτερύγιο σε πτερύγιο, φαίνεται να μειώνει τα έντονα φαινόμενα που επικρατούν στην περιοχή αυτή, για συντελεστές ροής όπου η δημιουργία των δινών περιορίζεται στην ακμή φυγής. Ωστόσο, ακόμα και για μεγαλύτερους συντελεστές ροής τα φαινόμενα που εκτυλίσσονται στην κορυφή του πτερυγίου είναι και πάλι ισχυρότερα, καθορίζοντας έτσι το σημείο εμφάνισης της απώλειας στήριξης του πτερυγίου. Μελέτες που έλεγξαν την επίδραση του διακένου συμφωνούν με τα παραπάνω σχόλια, όπως αυτό του [12].

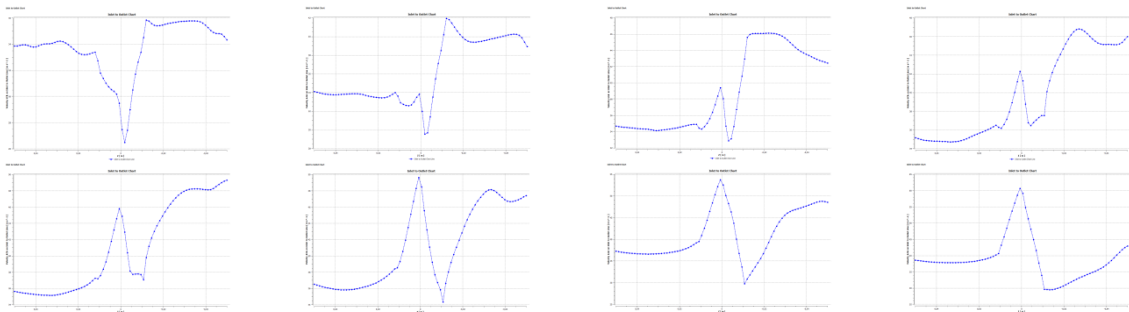
Ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει επίσης πως για τον τέταρτο συντελεστή ροής, κοντά στην περιοχή της κορυφής, η περιοχή αποκόλλησης ξεπερνάει το μέγιστο πάχος του πτερυγίου αφού, εμφανίζεται στην μεσημβρινή τομή στο 25% του μήκους του μήκους του. Η περιοχή κοντά στην κορυφή του πτερυγίου, όπως θα φανεί και στη συνέχεια είναι αυτή που καθορίζει και πάλι το σημείο απώλειας στήριξης του πτερυγίου.

Η πτώση πίεσης και τα πεδία ταχυτήτων διαμέσου του χωρίου του ρότορα μπορούν να φανούν σε μορφή διαγραμμάτων, στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.35).

Πτώση πίεσης:



Επαγόμενες ταχύτητες:

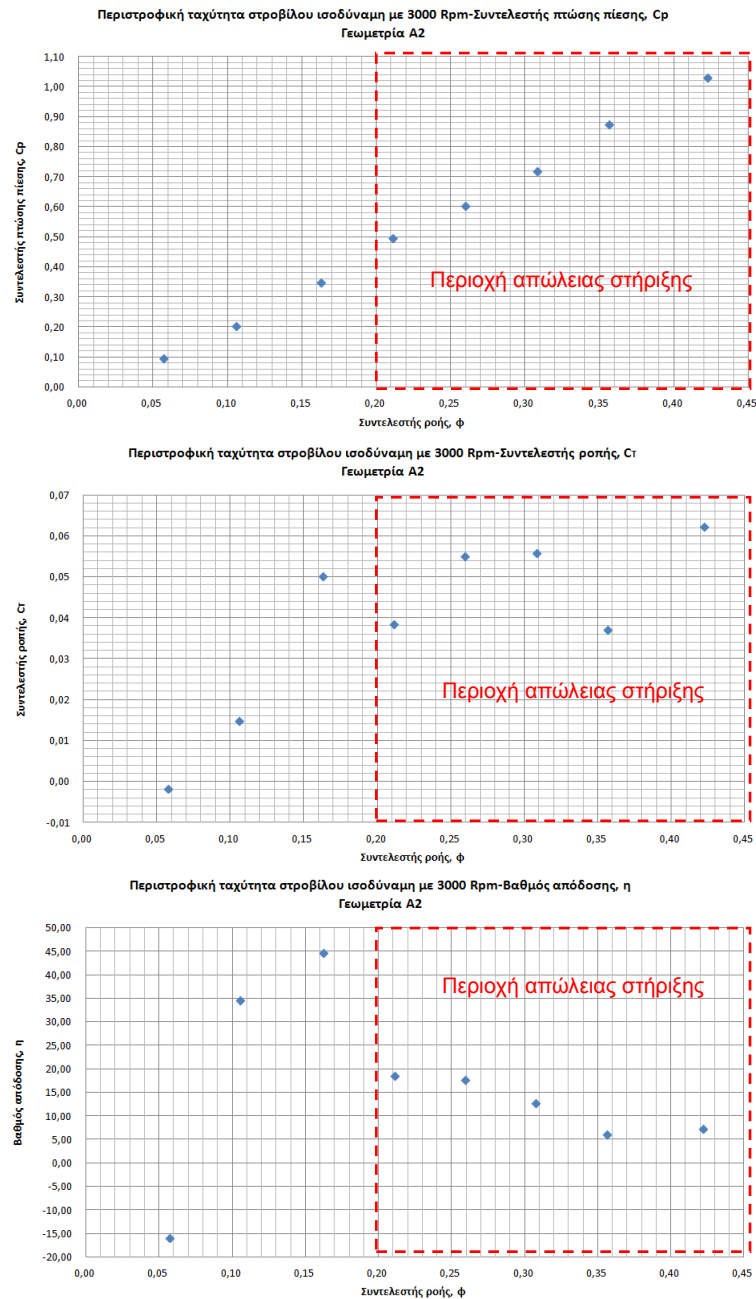


Σχήμα 4.35: Πτώση πίεσης και επαγόμενες ταχύτητες διαμέσου του χωρίου του ρότορα

Όσον αφορά τις ταχύτητες που αναπτύσσονται εντός του χωρίου του ρότορα, αν δει κανείς μόνο την περιοχή του πτερυγίου, παρατηρείται πως από τον τέταρτο συντελεστή

($\phi=0.211$) και έπειτα, οι ταχύτητες στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου είναι αισθητά μικρότερες. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι η ύπαρξη των φαινομένων ακραίας αποκόλλησης που σχολιάστηκαν προηγουμένως.

Όσον αφορά την απόδοση του στροβίλου σε όρους συντελεστή ροπής, πτώσης πίεσης και απόδοσης, μπορούν να φανούν στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.36).



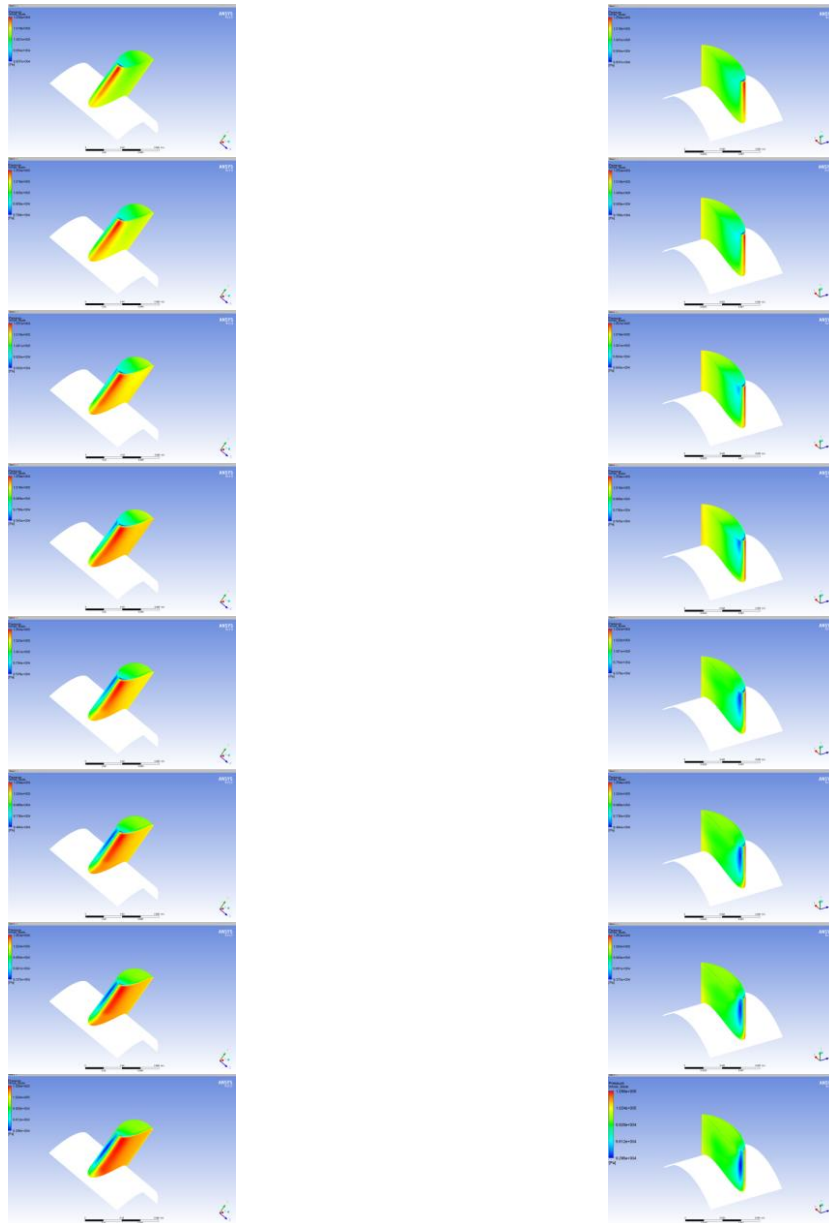
Σχήμα 4.36: Συντελεστές ροπής, πίεσης και απόδοση στροβίλου για $N=3000$ rpm

Βάσει όσων είχαν εξηγηθεί στην προηγούμενη ανάλυση λοιπόν, το σημείο εμφάνισης απώλειας στήριξης (stall), για τον στρόβιλο Wells ο οποίος περιστρέφεται με ισοδύναμη ταχύτητα 3000 rpm, επιτυγχάνεται για $\phi=0.163$ ενώ, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι πάλι γι' αυτόν τον συντελεστή ροής, ίσως με περίπου 45%.

4.1.3 Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισοδύναμη με 4000 rpm

Εφόσον στις προηγούμενες αναλύσεις αποδείχτηκε στην ουσία πως οι κρισιμότερες περιοχές, οι οποίες καθορίζουν και τη συνολική συμπεριφορά του στροβίλου Wells, είναι αυτές που βρίσκονται μεταξύ της μέσης ακτινικής θέσης και της κορυφής του πτερυγίου, στην παρούσα ενότητα θα δοθεί σημασία μόνο σ' αυτές τις περιοχές. Ο εν λόγω περιορισμός στο σχολιασμό της συμπεριφοράς του στροβίλου Wells, ο οποίος περιστρέφεται με ταχύτητα ισοδύναμη με 4000 rpm, αποφασίστηκε αφού πρώτα εξάχθηκαν και μελετήθηκαν τα αποτελέσματα για όλες τις περιοχές που έγινε λόγος στις προηγούμενες ενότητες ενώ, γίνεται και για χωροταξικούς λόγους. Ο αναγνώστης σε περίπτωση που το επιθυμεί, μπορεί να αναζητήσει τα σχήματα για τις περιοχές που δεν θα παρουσιαστούν. Επιπλέον, οι διάφοροι συντελεστές ροής που ελέγχονται, θα παρουσιάζονται με ονομασίες αριθμών και σ' αυτήν την περίπτωση, με τον πρώτο συντελεστή ροής να είναι ο μικρότερος. Για τον λόγο αυτό καλό θα ήταν να ξαναδεί κάποιος τον αντίστοιχο πίνακα που αναφέρονται οι εν λόγω συντελεστές ροής, για περιστροφική ταχύτητα στροβίλου 4000 rpm ([Πίνακας 4.2](#)).

Ξεκινώντας λοιπόν την ανάλυση, στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι στατικές πιέσεις που αναπτύσσονται πάνω στην επιφάνεια του πτερυγίου, σε αντιστοιχία με τον τρόπο που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες αναλύσεις. Στο σχήμα αυτό παρατηρούνται ανάλογα συμπεράσματα με τις προηγούμενες αναλύσεις και το μόνο που αλλάζει στην ουσία είναι ο συντελεστής ροής που εμφανίζονται. Έτσι, στην παρούσα ανάλυση διακρίνεται μια αύξηση της ελάχιστης πίεσης στον πέμπτο συντελεστή ροής. Αποτέλεσμα αυτής της αύξησης στην παρούσα περίπτωση είναι πως, η πτώση πίεσης μεταξύ της πλευράς αναρρόφησης και της πλευράς πίεσης μειώνεται, συγκριτικά με τους πρώτους τέσσερις συντελεστές ροής. Για τον ίδιο συντελεστή ροής μπορεί να παρατηρηθεί κανείς επίσης πως οι αυξημένες κλίσεις της ταχύτητας καταλαμβάνουν παραπάνω από το μισό ύψος του πτερυγίου.

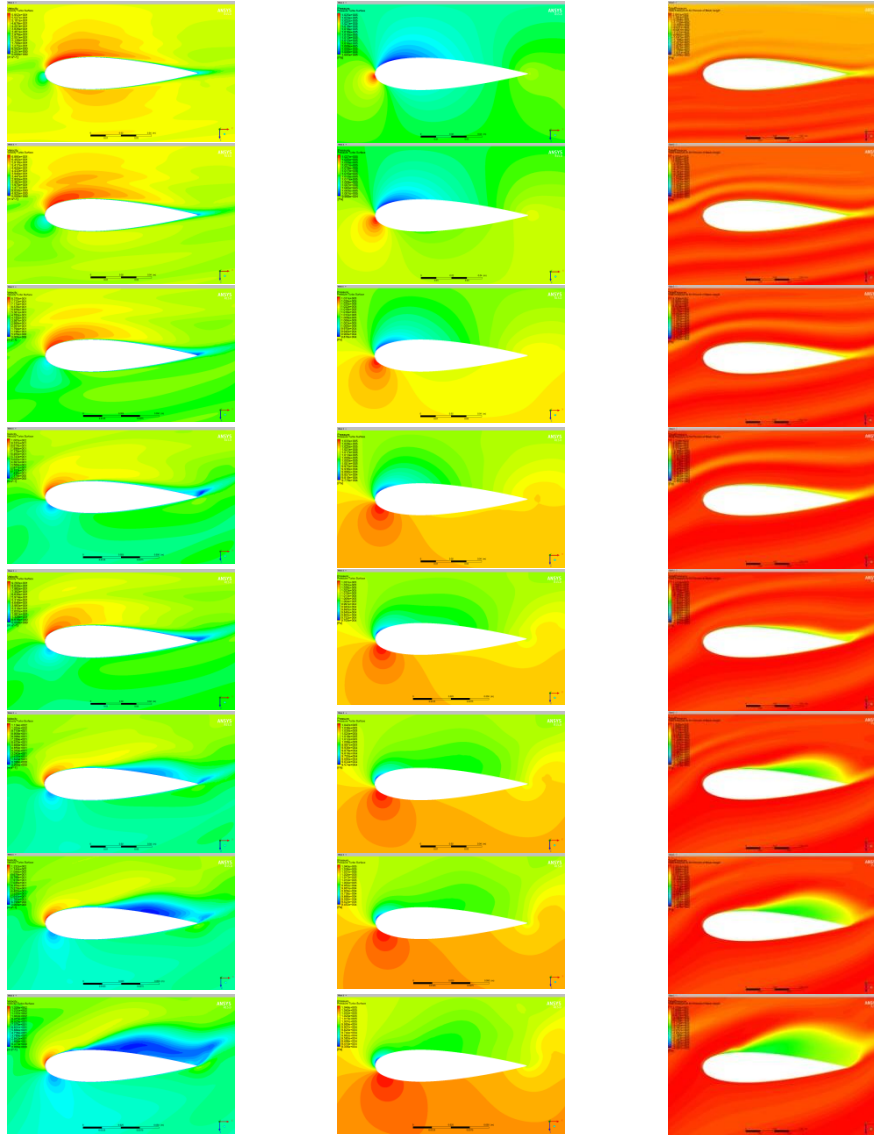


Σχήμα 4. 37: Στατικές πιέσεις στο πτερύγιο ανά συντελεστή ροής, ϕ

Επίσης, όπως είναι λογικό, η πτώση πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών του πτερυγίου έχει αυξηθεί συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις. Αυτό γιατί η επαπτομενική ταχύτητα του πτερυγίου έχει αυξηθεί και συνεπώς, έχει αυξηθεί και η σχετική ταχύτητα που προσκρούει το ρευστό πάνω σ' αυτό. Κάτι τέτοιο εμφανιζόταν και στην σύγκριση μεταξύ των προηγούμενων αναλύσεων για τον ίδιο λόγο

Όσον αφορά την ακτινική θέση στο 50%, μπορεί κανείς να δει αναλυτικά τα πεδία ταχυτήτων που αναπτύσσονται (αριστερή στήλη), μαζί με τις στατικές (μεσαία στήλη) και ολικές πιέσεις (δεξιά στήλη), στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4. 38). Οι συντελεστές ροής αυξάνουν από πάνω προς τα κάτω.

Εφόσον η συμπεριφορά της ροής, για την περιοχή στο 50% του ύψους του πτερυγίου, ήταν πιο ομαλή στην περίπτωση όπου ο στρόβιλος περιστρεφόταν με 3000 rpm, συγκριτικά με την περίπτωση όπου ο στρόβιλος περιστρεφόταν με ισοδύναμη ταχύτητα 2000 rpm, μπορεί να γίνει μια σύγκριση της παρούσας ανάλυσης μ' αυτήν για 3000 rpm.

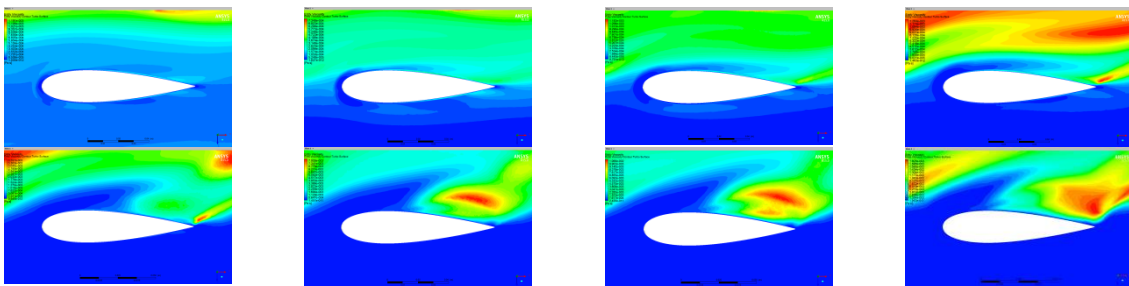


Σχήμα 4. 38: Περιοχή στο 50% του ύψους του πτερυγίου - Επαγόμενες ταχύτητες, Στατικές πιέσεις, Ολικές πιέσεις

Με μια γρήγορη ματιά στο παραπάνω σχήμα, φαίνεται πως η ροή δεν παρουσιάζει εκτεταμένες περιοχές αποκόλλησης μέχρι τον έκτο συντελεστή ροής, όπου λαμβάνει χώρα μια αποκόλληση της ροής με μεγάλες τιμές υποπίεσεων. Για τους δύο πρώτους συντελεστές ροής η ροή είναι εξαιρετικά ομαλή. Η αποκόλληση της ροής για τους επόμενους τρεις συντελεστές ροής φαίνεται πως περιορίζεται στην ακμή φυγής του πτερυγίου. Επιπρόσθετα, αν παρατηρήσει κανείς τη συμπεριφορά της ροής για τον τέταρτο συντελεστή ϕ , συγκριτικά με τη συμπεριφορά της ροής στον αντίστοιχο συντελεστή στην προηγούμενη ανάλυση (Σχήμα 4.30) θα δει ότι, η περιοχή αποκόλλησης

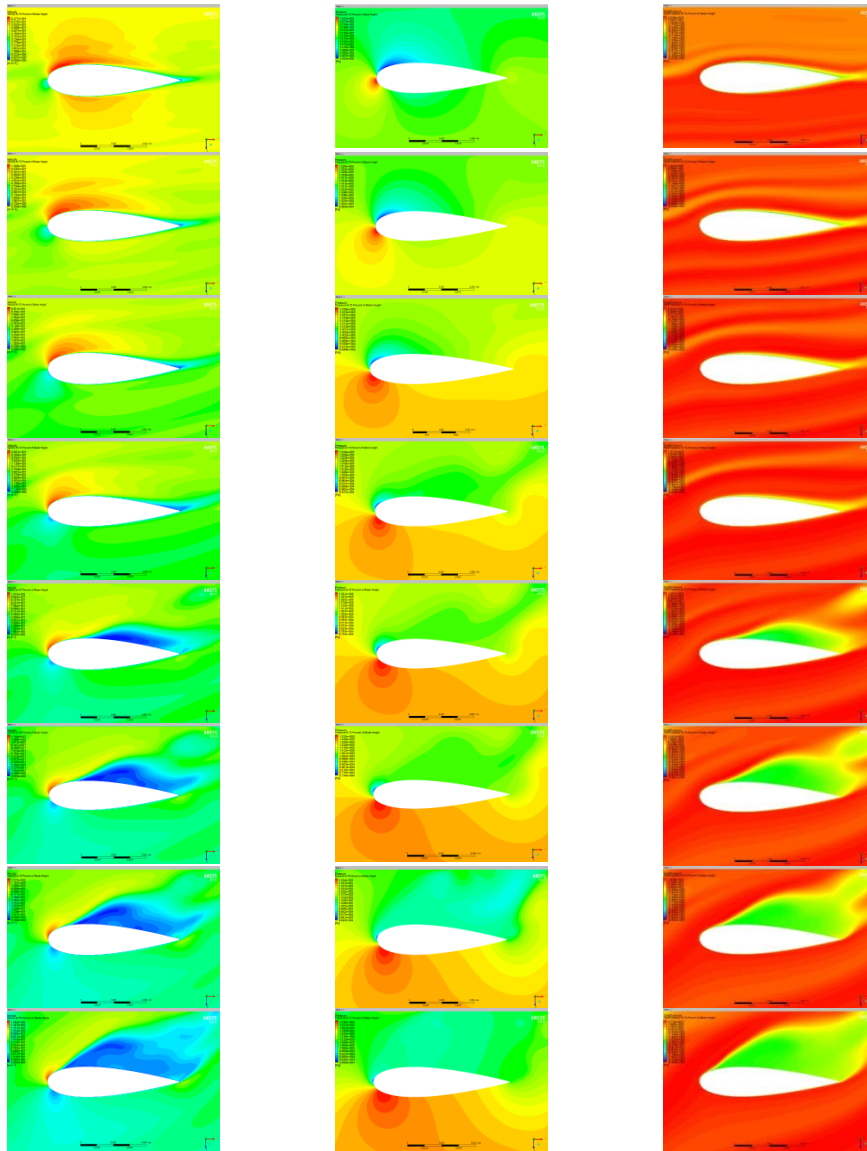
που είχε εμφανιστεί δεν υπάρχει σ' αυτήν την περίπτωση. Η εν λόγω αντίστοιχη αποκόλληση εμφανίζεται πλέον στον έκτο συντελεστή ροής, με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν. Η ροή για τους τρεις πρώτους συντελεστές παρουσιάζει μεγαλύτερη ικανότητα για δημιουργία ανακυκλοφοριών της ροής συγκριτικά με τους αντίστοιχους συντελεστές ροής της προηγούμενης ανάλυσης, όπου ακόμα δεν είχε λάβει χώρα κάποια αποκόλληση. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο λόγω της αύξησης των σχετικών ταχυτήτων για τους διάφορους συντελεστές ροής. Μετά τον τρίτο συντελεστή ροής όμως, είναι λογικό να παρουσιάζονται μικρότερες υποπίεσεις εφόσον στον τέταρτο συντελεστή, για την προηγούμενη ανάλυση, είχε δημιουργηθεί μια ικανοποιητική περιοχή αποκόλλησης. Η προδιάθεση της ροής στην παρούσα ανάλυση για αποκόλληση της ροής παρόλο που φαίνεται να ήταν μεγαλύτερη αρχικά φαίνεται να περιορίζεται. Κατά πάσα πιθανότητα αυτό ενισχύεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων μέσω του απόρρου.

Στην περιοχή ανάπτυξης των δινών, τα επίπεδα τύρβης είναι αισθητά παρόλο που η περιοχή αποκόλλησης είναι μικρότερη στο σύνολο. Όσον αφορά τα επίπεδα τύρβης που αναπτύσσονται πάνω στο πτερύγιο και τα οποία μεταφέρονται με τον απόρρου, φαίνονται να είναι μεγαλύτερα, συγκριτικά με της προηγούμενης ανάλυσης. Λόγω του ότι η εφαπτομενική ταχύτητα έχει αυξηθεί, για την ίδια ταχύτητα εισαγωγής, οι γωνίες πρόσπτωσης είναι μικρότερες με αποτέλεσμα, η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων να είναι αισθητή για μεγαλύτερο εύρος συντελεστών ροής. Συνεπώς, η ροή πάνω στο πτερύγιο χαρακτηρίζεται από έντονα πεδία τύρβης τα οποία όμως, δεν φαίνεται να δημιουργούν ιδιαίτερα προβλήματα. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4. 39), σε αντιστοιχία με το Σχήμα 4.32 φαίνονται τα εν λόγω φαινόμενα.



Σχήμα 4. 39: Επίπεδα τύρβης στην ακτινική θέση στο 50% -Επίδραση απόρρου

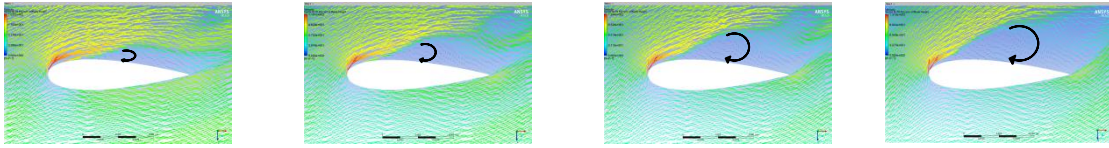
Όσον αφορά την ακτινική θέση στο 70%, στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.1) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα πεδία ταχυτήτων, στατικών και ολικών πιέσεων, σε αντιστοιχία με το προηγούμενο ανάλογο σχήμα.



Σχήμα 4.40: Περιοχή στο 70% του ύψους του πτερυγίου - Επαγόμενες ταχύτητες, Στατικές πιέσεις, Ολικές πιέσεις

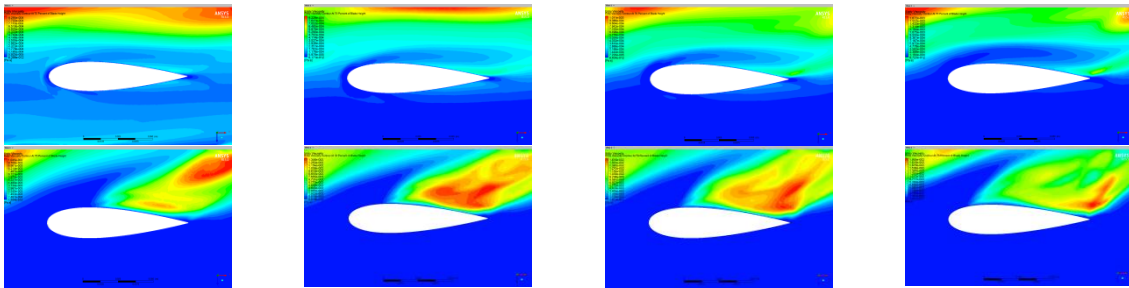
Στο σχήμα αυτό, μπορεί κανείς να παρατηρήσει πώς η αποκόλληση της ροής γίνεται αισθητή από τον πέμπτο συντελεστή ροής και μετά. Ο τρόπος που αποκολλάται η ροή στον συγκεκριμένο συντελεστή ροής παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με την αποκόλληση που είχε εμφανιστεί στον τέταρτο συντελεστή ροής, στην προηγούμενη ανάλυση. Η εν λόγω αποκόλληση στην παρούσα ανάλυση ξεκινάει οριακά λίγο πριν το σημείο μέγιστου πάχους του πτερυγίου. Στην προηγούμενη περίπτωση, είχε ξεπεραστεί το μέγιστο πάχος. Για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές ροής, η αποκόλληση περιορίζεται και πάλι στην ακμή φυγής του πτερυγίου. Κάτι που θα μπορούσε να παρατηρηθεί και το οποίο δεν σχολιάστηκε προηγουμένως είναι πως, για τον πρώτο συντελεστή ροής η κατανομή των πιέσεων και των ταχυτήτων φαίνεται να είναι παρόμοια μεταξύ της πλευράς αναρρόφησης και της πλευράς πίεσης. Αυτό συνδέεται με το γεγονός ότι το πτερύγιο δεν παράγει έργο για αυτόν τον συντελεστή ροής, όπως θα φανεί και στα τελικά χαρακτηριστικά του στροβίλου.

Επιπλέον, για τους τέσσερις τελευταίους συντελεστές ροής, απεικονίζοντας τα διανύσματα των ταχυτήτων στο παρακάτω σχήμα αναδεικνύεται το μέγεθος της ανακυκλοφορίας.



Σχήμα 4. 41: Περιοχή 70% του ύψους του πτερυγίου - Διανύσματα ταχύτητας

Όσον αφορά τα επίπεδα τύρβης που αναπτύσσονται πάνω στο πτερύγιο και σ' αυτήν την περίπτωση η επίδραση τους φαίνεται να διαρκεί για μεγαλύτερους συντελεστές ροής. Κάτι τέτοιο υπενθυμίζεται πως είναι απόλυτα λογικό. Η επίδραση αυτή μπορεί να πει κανείς πως σταματά στον πέμπτο συντελεστή ροής, όπου ξεκινάει η αποκόλληση από πιο μπροστά, προς την ακμή προσβολής. Τα μέγιστα επίπεδα τύρβης για τον συντελεστή αυτό, φαίνεται να είναι συγκεντρωμένα σ' ένα σημείο και μακριά από την επιφάνεια του πτερυγίου. Τα παραπάνω αναφερθέν σχόλια διακρίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.42), με το συντελεστή ροής να αυξάνει από τ' αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω.



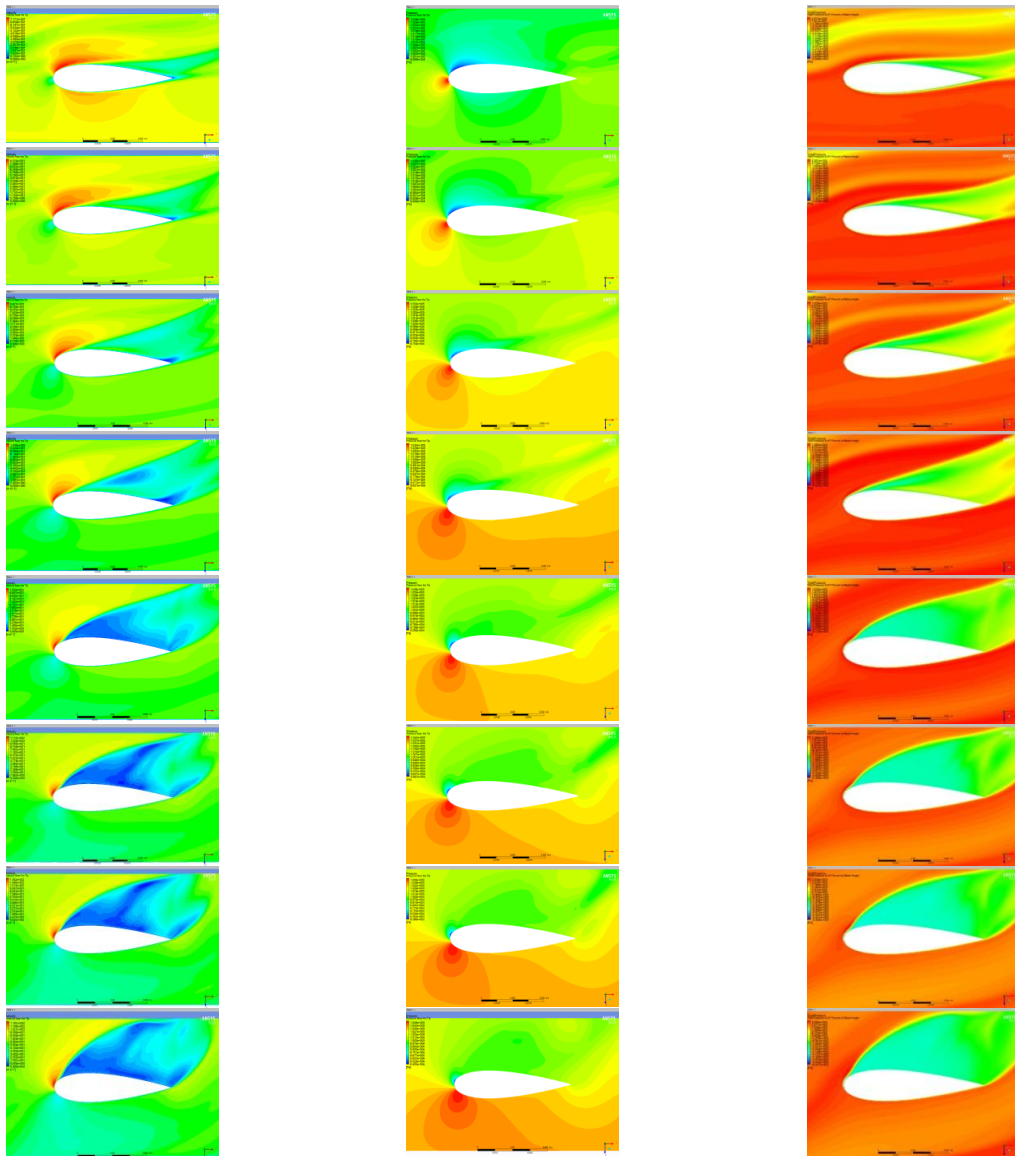
Σχήμα 4.42: Επίπεδα τύρβης στην ακτινική θέση στο 70% -Επίδραση απόρρου

Στην ακτινική θέση στο 97% οι αποκολλήσεις είναι πιο έντονες όπως θα περίμενε κανείς. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.43) φαίνονται και πάλι τα πεδία ταχυτήτων, στατικών και ολικών πιέσεων.

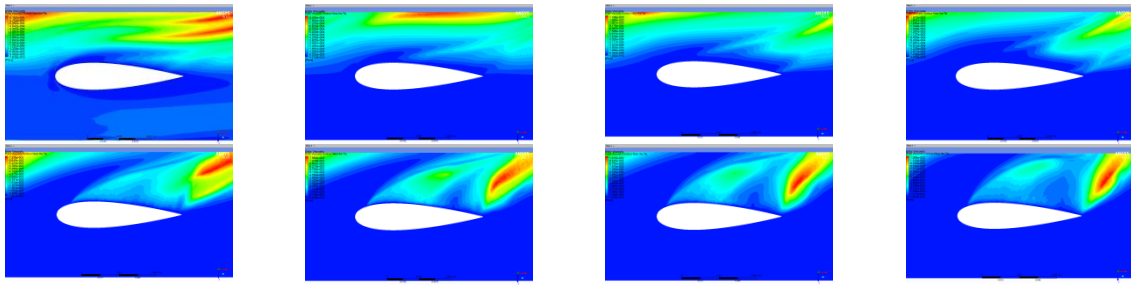
Παρατηρείται λοιπόν πως, η αποκόλληση που λαμβάνει χώρα στον πέμπτο συντελεστή, ξεκινάει πλέον από την ακμή προσβολής του πτερυγίου. Το πεδίο ταχυτήτων για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές ροής δείχνει ένα έντονα τυρβώδες πεδίο, με την ανακυκλοφορία της ροής, όπου εμφανίζεται, να περιορίζεται στην ακμή φυγής του πτερυγίου.

Η ροή πάνω στο πτερύγιο παρουσιάζει μεγάλες τιμές υποπίεσεων, ακόμα και για τους πρώτους συντελεστές ροής. Συγκεκριμένα, για τους τρεις πρώτους συντελεστές ροής, όπου οι ανακυκλοφορίες περιορίζονται στην ακμή φυγής του πτερυγίου, η ροή κατά πάσα πιθανότητα βελτιώνεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων και τα αναπτυσσόμενα πεδία τύρβης οπότε, ίσως αυτός είναι ο λόγος που δεν παρατηρείται κάποια μεγαλύτερη ανακυκλοφορία. Αν σχολιαστεί και κάτι παραπάνω, θα μπορούσε η

εξίσωση της συνέχειας να δώσει μια εξήγηση. Έστω ότι με την υπάρχουσα ροή, χωρίς την αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων, η περιοχή της αποκόλλησης έτεινε να έχει μια μεγαλύτερη διατομή τότε, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση των πτερυγίων μέσω του απόρρου, η διατομή αυτή εξαναγκάζεται να μικρίνει οπότε, η ροή επιταχύνεται και δεν αποκολλάται. Στον τέταρτο συντελεστή όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων μειώνεται παρατηρείται εκτός από την αποκόλληση της ροής στην ακμή φυγής και ένα πεδίο χαμηλών ταχυτήτων, το οποίο δεν οδηγεί σε ανακυκλοφορία και σε απώλεια στήριξης του πτερυγίου. Τα επίπεδα τύρβης που σχολιάστηκαν διακρίνονται στο Σχήμα 4.44, για όλους τους συντελεστές ροής σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα ανάλογα σχήματα της παρούσας ανάλυσης.

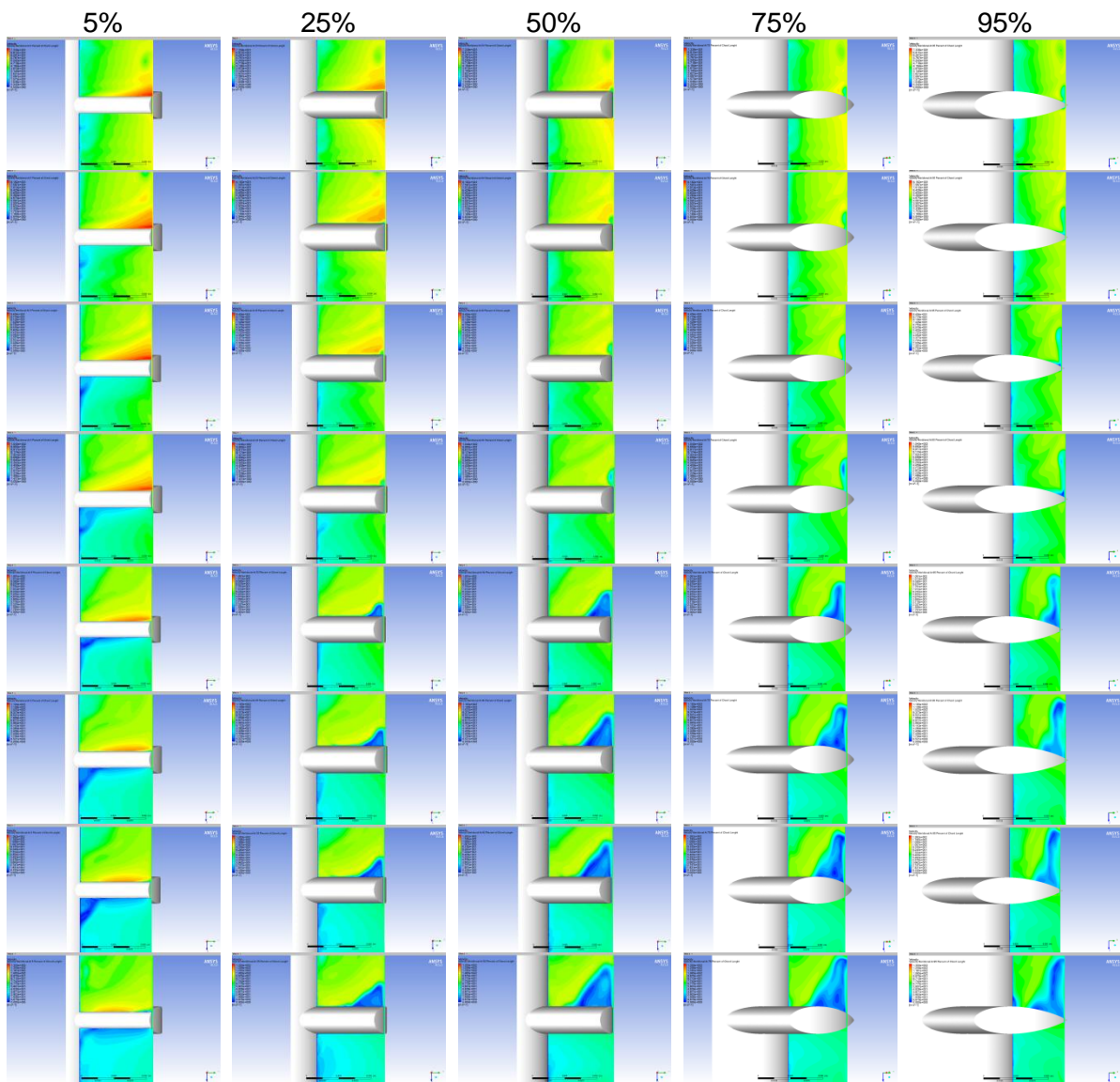


Σχήμα 4.43: Περιοχή στο 97% του ύψους του πτερυγίου - Επαγόμενες ταχύτητες, Στατικές πιέσεις, Ολικές πιέσεις



Σχήμα 4.44: Επίπεδα τύρβης στην ακτινική θέση στο 97% -Επίδραση απόρρου

Στη συνέχεια, προκειμένου να γίνει και μια ταυτοποίηση των όσων αναφέρθηκαν για τις περιοχές κοντά στη βάση, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.45) η συμπεριφορά της ροής σ' όλο το ύψος του πτερυγίου για τις θέσεις 5%, 25%, 50%, 75% και 95% του μήκους προηγούμενες ενότητες.

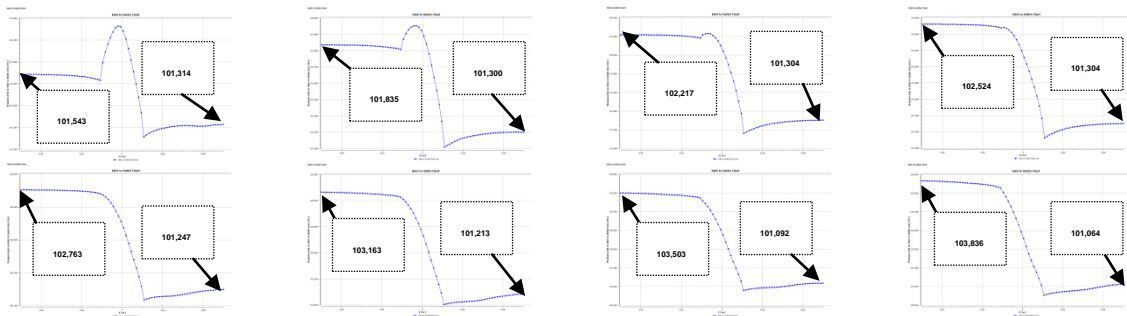


Σχήμα 4.45: Επαγόμενες ταχύτητες για τη μεσημβρινή τομή του πτερυγίου στο, 5%, 25%, 50%, 75% και 95% του μήκους χορδής

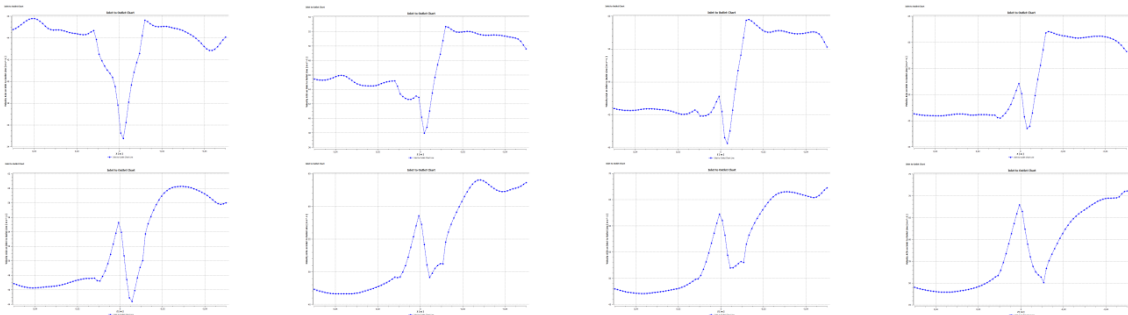
Αντιλαμβάνεται κανείς λοιπόν πως, οι αλληλεπιδράσεις στην κορυφή του πτερυγίου είναι και πάλι ισχυρότερες και είναι αυτές που στο τέλος θα καθορίσουν το σημείο εμφάνισης απώλειας στήριξης του πτερυγίου. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί πως για τον πέμπτο συντελεστή ροής η περιοχή αποκόλλησης ξεκινάει όντως πιο μπροστά από το μέγιστο πάχος του πτερυγίου, όπως φάνηκε και παραπάνω.

Η πτώση πίεσης και οι αναπτυσσόμενες ταχύτητες διαμέσου του στροβίλου, μπορούν να φανούν στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.46).

Πτώση πίεσης:



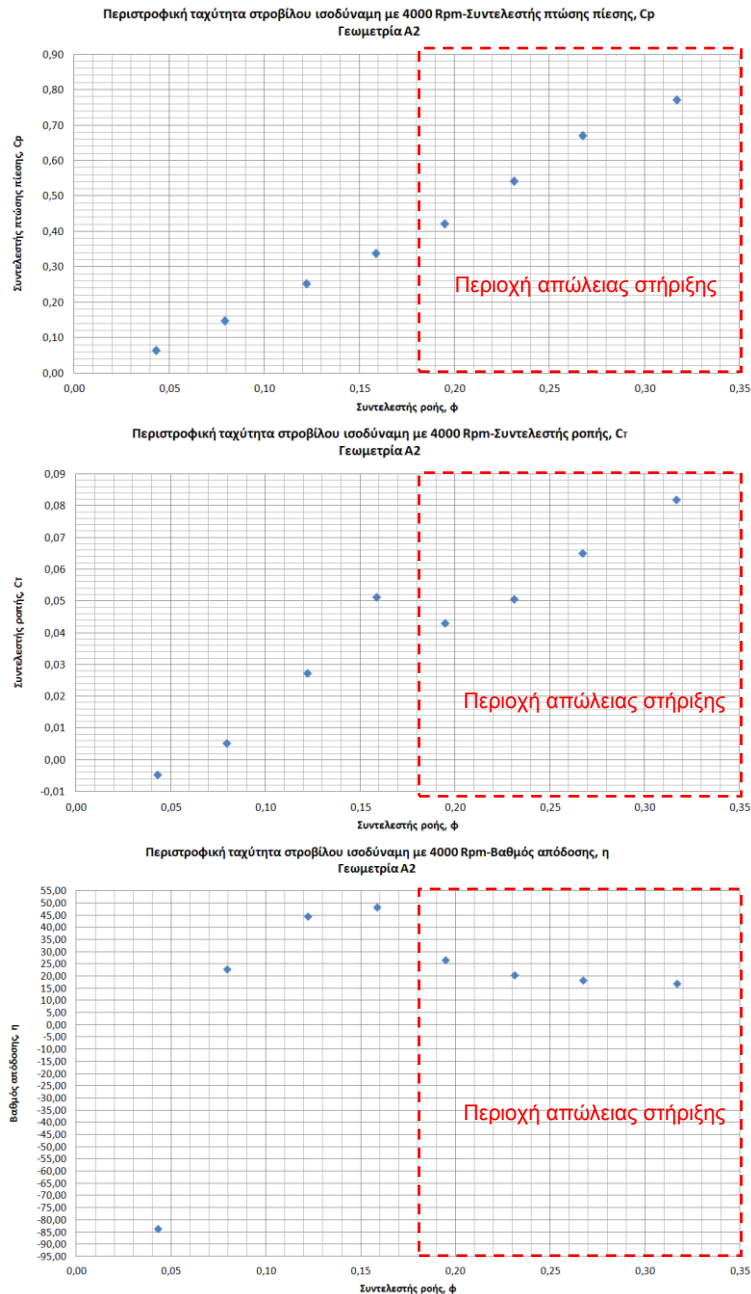
Επαγόμενες ταχύτητες:



Σχήμα 4.46: Πτώση πίεσης και επαγόμενες ταχύτητες διαμέσου του χωρίου του ρότορα

Όσον αφορά την απόδοση του στροβίλου σε όρους συντελεστή ροπής, πτώσης πίεσης και απόδοσης, μπορούν να φανούν στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.47).

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στην πρώτη ανάλυση λοιπόν, το σημείο εμφάνισης απώλειας στήριξης (stall), για τον σρόβιλο Wells ο οποίος περιστρέφεται με ισοδύναμη ταχύτητα 4000 rpm, επιτυγχάνεται για $\phi=0.158$ ενώ, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι πάλι γι' αυτόν τον συντελεστή ροής, ίσως περίπου με 48%. Τέλος, μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι για τον πρώτο συντελεστή ροής, σε συσχέτιση με όσα αναφέρθηκαν γι' αυτόν παραπάνω, η παραγόμενη ροπή και συνεπώς η απόδοση του στροβίλου, είναι αρνητική.



Σχήμα 4. 47: Συντελεστές ροπής, πίεσης και απόδοση στροβίλου για $N=4000$ rpm

4.2 Αποτελέσματα για τη Γεωμετρία B κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής

4.2.1 Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισοδύναμη με 2000 rpm

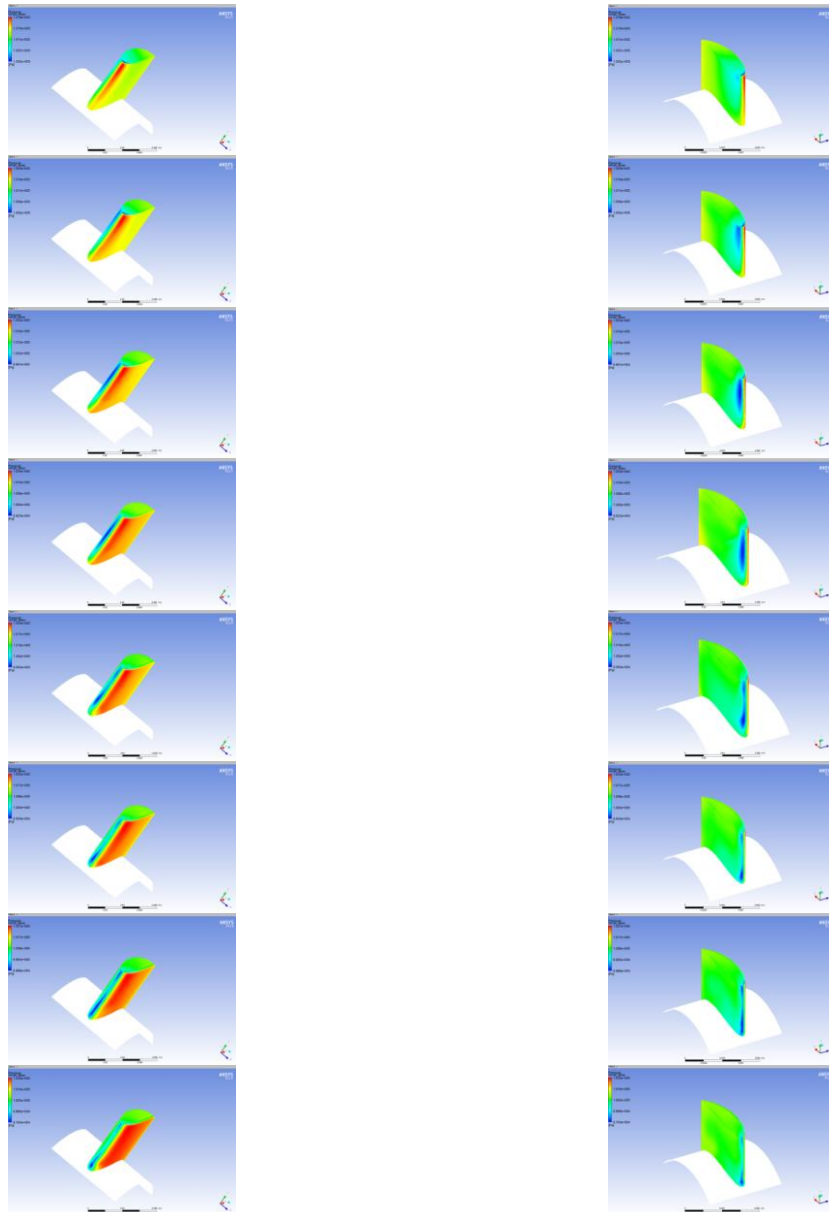
Ξεκινώντας την ανάλυση των αποτελεσμάτων της γεωμετρίας B σημειώνεται πως, οι διάφοροι συντελεστές ροής που ελέγχονται, θα παρουσιάζονται με ονομασίες αριθμών και σ' αυτήν την περίπτωση, με τον πρώτο συντελεστή ροής να είναι ο μικρότερος. Για τον λόγο αυτό καλό θα ήταν να ξαναδεί κάποιος τον αντίστοιχο πίνακα που αναφέρονται οι εν λόγω συντελεστές ροής, για περιστροφική ταχύτητα στροβίλου 2000 rpm (Πίνακας 4.2). Η

ανάλυση που θα ακολουθήσει θα είναι αντίστοιχη της αμέσως προηγούμενης καθώς, οι αλληλεπιδράσεις στην κορυφή του πτερυγίου είναι και πάλι πολύ ισχυρότερες σε σχέση με τις αλληλεπιδράσεις στη βάση.

Οι στατικές πιέσεις στις δύο πλευρές του πτερυγίου, πίεσης και ανρρόφησης, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4. 48), με ανάλογο τρόπο όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις.

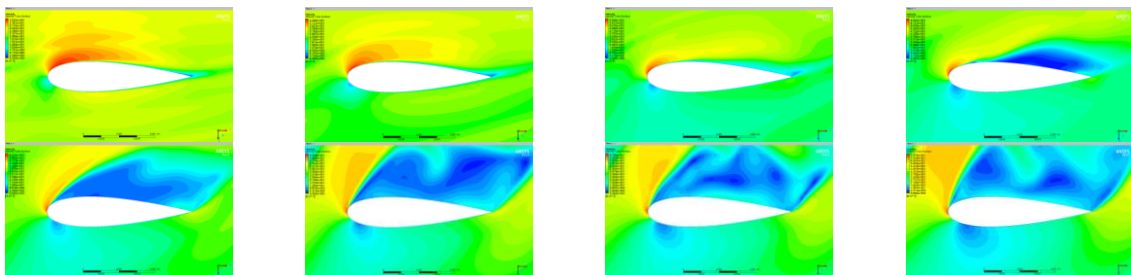
Συγκρίνοντας τις στατικές πιέσεις που αναπτύσσονται στις πλευρές του πτερυγίου, με τις στατικές πιέσεις για την γεωμετρία A2 και για την ίδια ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου, παρατηρείται υψηλότερη μέγιστη και χαμηλότερη ελάχιστη πίεση στους αντίστοιχους συντελεστές ροής. Οι συντελεστές ροής μεταξύ των εν λόγω γεωμετριών, οι οποίοι είναι υπολογισμένοι σύμφωνα με την ακτίνα στην κορυφή του πτερυγίου, δεν είναι ίδιοι αριθμητικά και δεν πρέπει να υπάρξει σύγχυση κατά την πραγματοποίηση μιας ανάλυσης η οποία θα κάνει αναφορά στα ροϊκά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας A, για την ίδια ταχύτητα περιστροφής και την ίδια ταχύτητα εισαγωγής. Λόγω αυτής της αύξησης του ύψους του πτερυγίου, επεκτείνοντας το προς την κορυφή αυξάνοντας την διάμετρο του περιβλήματος, η εφαπτομενική ταχύτητα και επομένως, η σχετική ταχύτητα αυτού στην περιοχή της κορυφής του, είναι μεγαλύτερη οπότε, είναι λογικό να επικρατούν διαφορετικές πιέσεις και βασικά μεγαλύτερη διαφορά πίεσης μεταξύ των πλευρών. Επίσης, δεν πρέπει να μπει κανείς στη διαδικασία να συγκρίνει την επίδραση του λόγου της διαμέτρου της βάσης προς της διαμέτρου της κορυφής διότι, σε μια τέτοια περίπτωση, για ένα ίδιου μεγέθους διάκενο, έπρεπε να μειωθεί η διάμετρος της βάσης, προκειμένου η σχετική ταχύτητα να παραμείνει η ίδια στην κορυφή του πτερυγίου. Συνεπώς, η αναφορά στα χαρακτηριστικά της προηγούμενης γεωμετρίας δεν αφορά την εξαγωγή συμπερασμάτων για το ποια γεωμετρία είναι καλύτερη.

Αφού έγιναν ξεκάθαρα τα παραπάνω, στην παρούσα ανάλυση παρατηρείται μια παρόμοια αύξηση της ελάχιστης πίεσης στην πλευρά αναρρόφησης, μ' αυτήν που είχε παρατηρηθεί στην περίπτωση της γεωμετρίας A2, στον πέμπτο συντελεστή ροής. Μια ακόμη διαφορά παρατηρείται και στην μετακίνηση του σημείου ανακοπής. Καθώς οι εφαπτομενικές ταχύτητες είναι μεγαλύτερες σ' ένα κομμάτι του πτερυγίου, οι γωνίες πρόσπτωσης της ροής είναι μικρότερες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σημείο ανακοπής να είναι πιο μπροστά στην πλευρά πίεσης προς την ακμή προσβολής, το οποίο με τη σειρά του, ίσως οφείλεται για την καθυστερημένη εμφάνιση των μεγάλων κλίσεων ταχύτητας που καλύπτουν όλο το ύψος του πτερυγίου.



Σχήμα 4. 48: Στατικές πιέσεις στο πτερύγιο ανά συντελεστή ροής, φ

Όσον αφορά την ακτινική θέση στο 50%, στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.49) μπορεί να δει κανείς τις επαγόμενες ταχύτητες και αποκολλήσεις που λαμβάνουν χώρα.

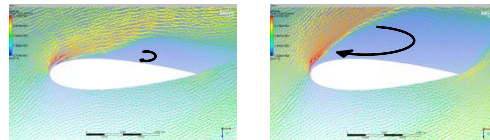


Σχήμα 4.49: Επαγόμενες ταχύτητες στη μέση ακτινική θέση του πτερυγίου

Η καθυστέρηση εμφάνισης των περιοχών αποκόλλησης είκαι ξεκάθαρη συγκριτικά με την αντίστοιχη περίπτωση της γεωμετρίας A1. Συγκεκριμένα, στον τρίτο συντελεστή ροής η περιοχή αποκόλλησης περιορίζεται πλέον μόνο στην ακμή φυγής του πτερυγίου. Η

απόσταση της μέσης ακτινικής θέσης από την κορυφή του πτερυγίου, στην γεωμετρία B είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με της γεωμετρίας A συνεπώς, οι επιδράσεις των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην κορυφή του πτερυγίου δεν γίνονται αισθητές στην παρούσα ανάλυση. Όσον αφορά τον τέταρτο συντελεστή ροής, η αποκόλληση φαίνεται να ξεκινάει οριακά λίγο πριν το μέγιστο πάχος του πτερυγίου. Στην γεωμετρία A, για την ίδια ταχύτητα περιστροφής και εισαγωγής, η αποκόλληση στο 50% είχε ξεπεράσει το μέγιστο πάχος. Υπενθυμίζεται πως η σύγκριση που γίνεται αφορά τις ανάλογες χαρακτηριστικές θέσεις του πτερυγίου και δεν γίνεται μεταξύ των διαφορετικών ταχυτήτων και γωνιών πρόσπτωσης που επικρατούν.

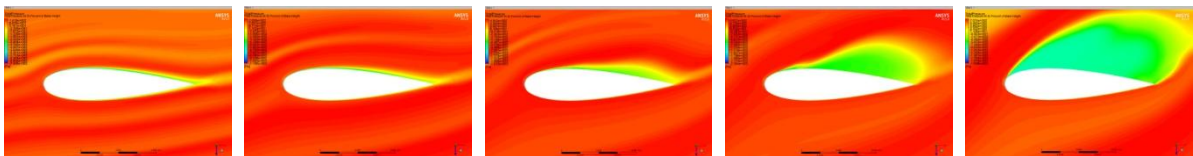
Στην συνέχεια της ανάλυσης, τα διανύσματα ταχυτήτων για τον τέταρτο και πέμπτο συντελεστή ροής φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.50), προκειμένου να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της ανακυκλοφορίας της ροής. Για τους συντελεστές ροής οι οποίοι είναι μεγαλύτεροι, δεν έχει νόημα να απεικονιστούν τα εν λόγω διανύσματα καθώς, η αποκόλληση της ροής ξεκινάει από την ακμή προσβολής ήδη από τον πέμπτο συντελεστή ροής.



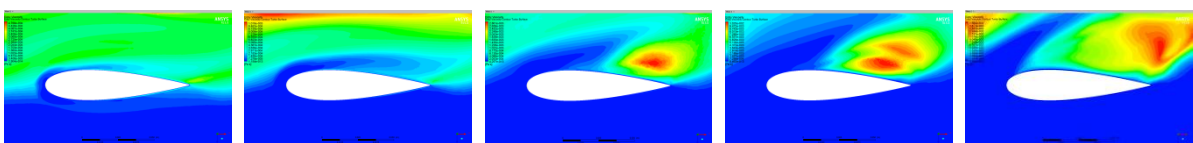
Σχήμα 4.50: Διανύσματα ταχύτητας για τον τέταρτο και πέμπτο συντελεστή ροής στη μέση ακτινική θέση

Το έντονο τυρβώδες πεδίο στον τρίτο συντελεστή μπορεί να γίνει αντιληπτό μόνο παρατηρώντας τις ολικές πιέσεις και τα επίπεδα τύρβης. Στο παρακάτω σχήμα λοιπόν (Σχήμα 4.51), παρουσιάζονται τα εν λόγω για τους πέντε πρώτους συντελεστές ροής, προκειμένου να φανεί και η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων μέσω του απόρρου. Οι συντελεστές ροής αυξάνουν από τα αριστερά προς τα δεξιά για κάθε αναφερόμενη περίπτωση. Τελικά, σημειώνεται πως για τους δύο πρώτους συντελεστές ροής, η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων είναι ορατή και δεν δημιουργεί προβλήματα. Από τον τρίτο συντελεστή ροής και μετά, η αλληλεπίδραση αυτή φαίνεται να μειώνεται.

Ολικές πιέσεις:



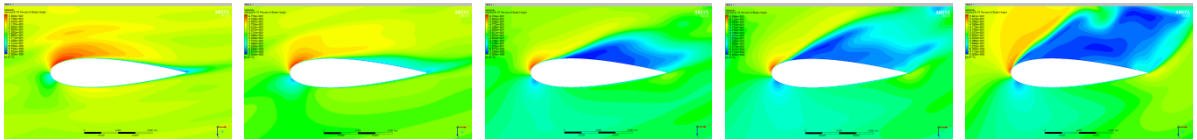
Επίπεδα τύρβης:



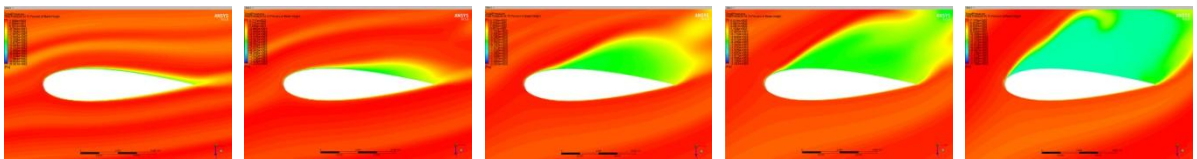
Σχήμα 4. 51: Ολικές πιέσεις και Επίπεδα τύρβης στη μέση ακτινική θέση για τους πέντε πρώτους συντελεστές ροής

Όσον αφορά την θέση στο 70% του ύψους του πτερυγίου, οι περιοχές αποκολλήσεων για τους δύο πρώτους συντελεστές ροής φαίνεται να περιορίζονται και πάλι στην ακμή φυγής, με τον δεύτερο συντελεστή ροής όμως να παρουσιάζει πολύ εντονότερα επίπεδα τύρβης καθώς η ροή απομακρύνεται από το πτερύγιο ενώ, πάνω στην επιφάνεια του πτερυγίου παρουσιάζονται τιμές υποπίεσεων, ορίζοντας το χαμηλό πεδίο ταχυτήτων. Ίσως αυτά τα επίπεδα τύρβης σε συνδυασμό με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης να οδηγούν στην έναρξη της απότομης αποκόλλησης της ροής στον τρίτο συντελεστή ϕ , που ξεκινάει από το μέγιστο πάχος του πτερυγίου. Για τον αντίστοιχο δεύτερο συντελεστή ροής στη γεωμετρία A, είχε παρουσιαστεί μια εκτενέστερη περιοχή αποκόλλησης στην αντίστοιχη ακτινική θέση. Στη συνέχεια, μετά τον τρίτο συντελεστή ροής, οι περιοχές των αποκολλήσεων επεκτείνονται προς την ακμή προσβολής, όπως είναι λογικό. Και σ' αυτήν την περίπτωση οι περιοχές των αποκολλήσεων που λάμβαναν χώρα στην αντίστοιχη θέση στη γεωμετρία A, ήταν ευρύτερες. Συνεχίζοντας, η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων φαίνεται να είναι αισθητή μόνο για τον πρώτο συντελεστή ροής. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.52) μπορούν να διακριθούν τα παραπάνω, απεικονίζοντας τα πεδία ταχυτήτων, τις ολικές πιέσεις και τα επίπεδα τύρβης για τους πέντε πρώτους συντελεστές ροής, σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα σχήματα.

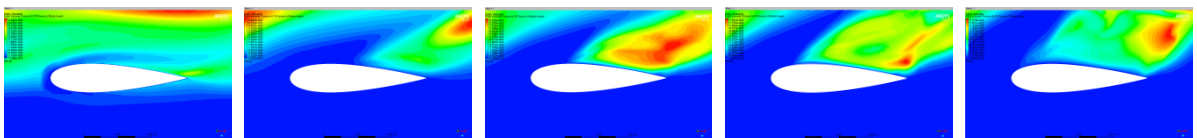
Επαγόμενες ταχύτητες:



Ολικές πιέσεις:



Επίπεδα τύρβης:



Σχήμα 4.52: Επαγόμενες ταχύτητες, Ολικές πιέσεις και Επίπεδα τύρβης στο 70% του ύψους του πτερυγίου

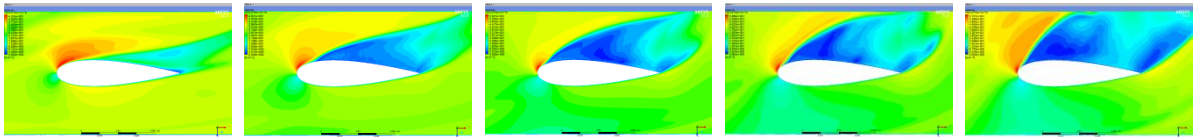
Τα διανύσματα των ταχυτήτων για τον τρίτο και τον τέταρτο συντελεστή ροής, αυξανόμενοι από τα αριστερά προς τα δεξιά, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.53).



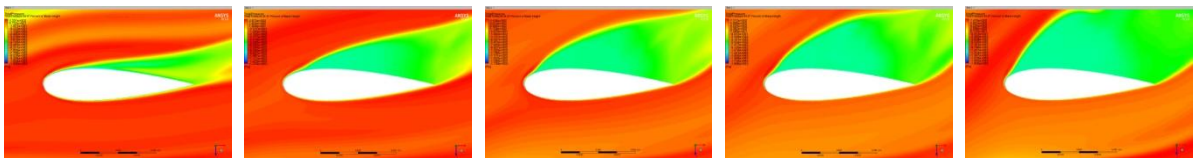
Σχήμα 4.53: Διανύσματα ταχύτητας για τον τρίτο και τον τέταρτο συντελεστή ροής στο 70% του ύψους του πτερυγίου

Όσον αφορά την ακτινική θέση στο 90%, για τον πρώτο συντελεστή ροής εμφανίζεται για πρώτη φορά μια περιοχή αποκόλλησης η οποία περιορίζεται στην ακμή φυγής του πτερυγίου ενώ, η ροή πάνω στο πτερύγιο χαρακτηρίζεται από υποπίεσεις δηλώνοντας και πάλι το χαμηλό πεδίο ταχυτήτων που επικρατεί. Οι περιοχές των αποκολλήσεων για τους υπόλοιπους συντελεστές ροής ξεκινούν μετά το μέγιστο πάχος του πτερυγίου. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πτερυγίων δεν υπάρχουν πλέον. Στην περιοχή αυτή και οι δύο γεωμετρίες παρουσιάζουν το ίδιο έντονα φαινόμενα αποκόλλησης καταδεικνύοντας πως οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ροής πάνω στο πτερύγιο και των διαρροών μέσω του διακένου είναι δύσκολο να ξεπεραστούν. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα πεδία ταχυτήτων, οι ολικές πιέσεις και τα επίπεδα τύρβης που αναπτύσσονται πάνω στο πτερύγιο για τους πέντε πρώτους συντελεστές ροής, σε αντιστοιχία με το προηγούμενο σχήμα.

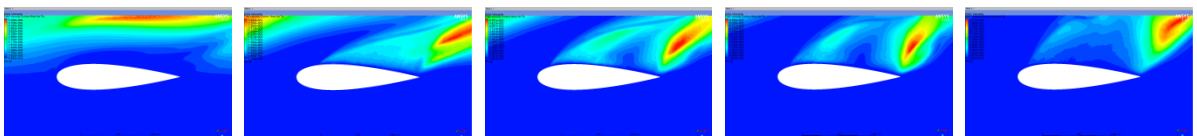
Επαγόμενες ταχύτητες:



Ολικές πιέσεις:



Επίπεδα τύρβης:

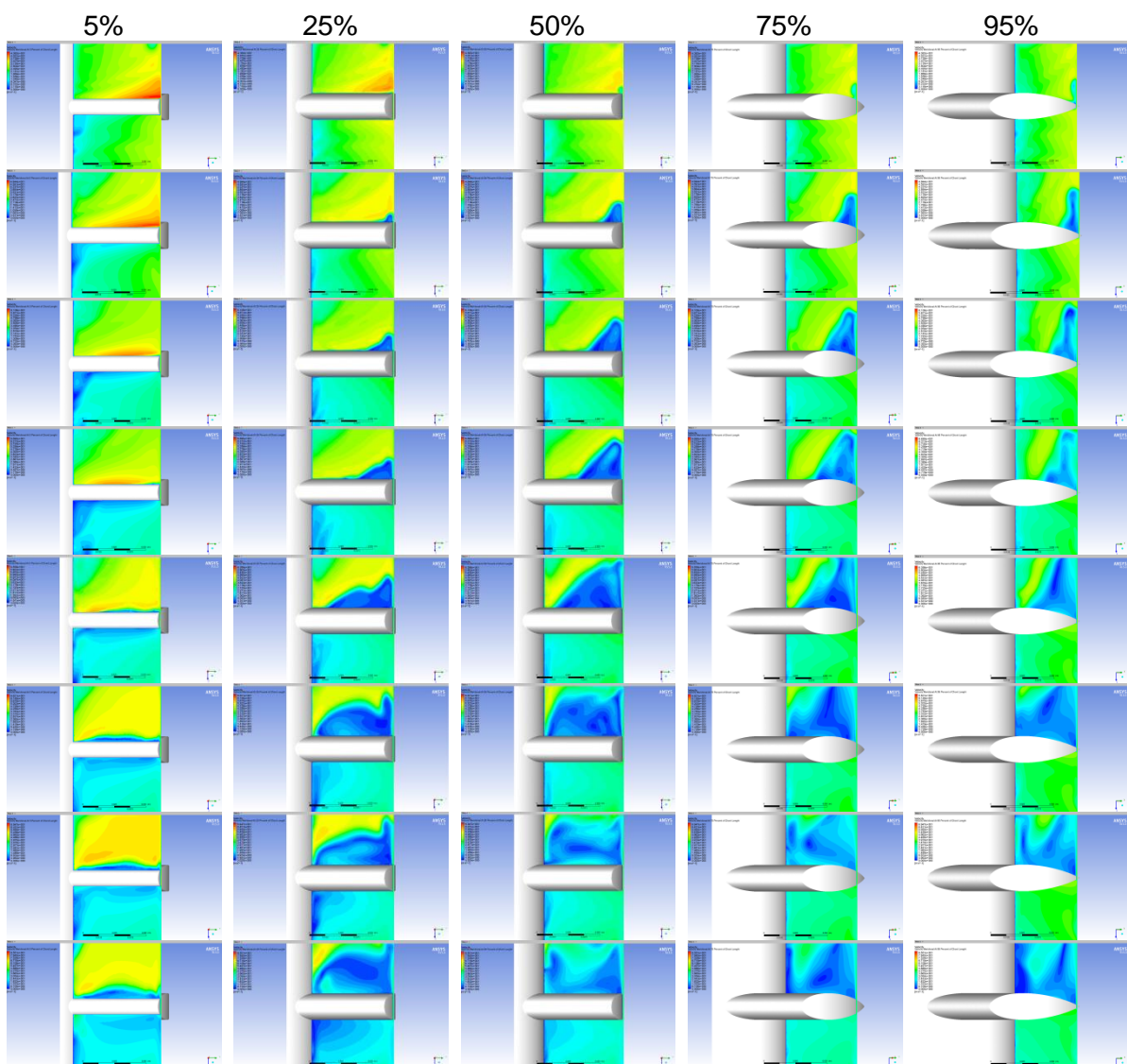


Σχήμα 4.54: Επαγόμενες ταχύτητες, Ολικές πιέσεις και Επίπεδα τύρβης στο 97% του ύψους του πτερυγίου

Ακολούθως, ο αναγνώστης μπορεί να αποκτήσει μια επιπλέον εικόνα για τη συμπεριφορά της ροής παρατηρώντας τις μεσημβρινές τομές στο 5%, στο 25%, στο 50%, στο 75% και

στο 95% του μήκους χορδής, απεικονίζοντας τα επαγόμενα πεδία ταχυτήτων στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.55).

Όπως φαίνεται λοιπόν στο εν λόγω σχήμα, στο 25% του μήκους χορδής έχουν αρχίσει να λαμβάνουν χώρα αποκολλήσεις της ροής από τον δεύτερο συντελεστή ροής. Υπενθυμίζεται πως το 25% του μήκους χορδής για μια αεροτομή NACA 0021 είναι πιο μετά από το μέγιστο πάχος της, προς την ακμή προσβολής, το οποίο βρίσκεται στο 30% του μήκους χορδής της εκάστοτε αεροτομής. Ωστόσο, αυτές οι αποκολλήσεις δεν ξεπερνάνε το 50% του ύψους του πτερυγίου. Μετά τον πέμπτο συντελεστή οι περιοχές των αποκολλήσεων της ροής αρχίζουν και καλύπτουν παραπάνω από το 50% του ύψους του πτερυγίου με αποτέλεσμα.

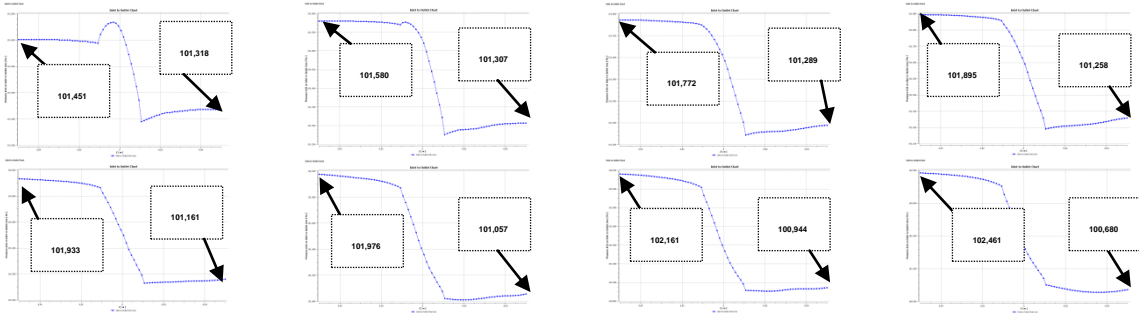


Σχήμα 4.55: Επαγόμενες ταχύτητες για τη μεσημβρινή τομή του πτερυγίου στο, 5%, 25%, 50%, 75% και 95% του μήκους χορδής

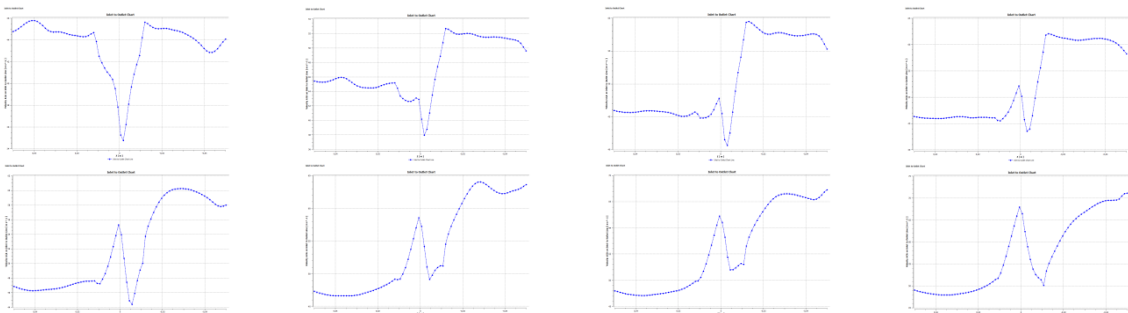
Η πτώση πίεσης και οι επαγόμενες ταχύτητες διαμέσου του στροβίλου μπορούν να φανούν σε μορφή διαγραμμάτων, στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.56). Όσον αφορά τις

ταχύτητες που αναπτύσσονται εντός του χωρίου του ρότορα, αν δει κανείς μόνο την περιοχή του πτερυγίου, μπορεί να παρατηρήσει πως από τον πέμπτο συντελεστή ροής και έπειτα, οι ταχύτητες στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου είναι αισθητά μικρότερες. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι η ύπαρξη των φαινομένων ακραίας αποκόλλησης που σχολιάστηκαν προηγουμένως.

Πτώση πίεσης:

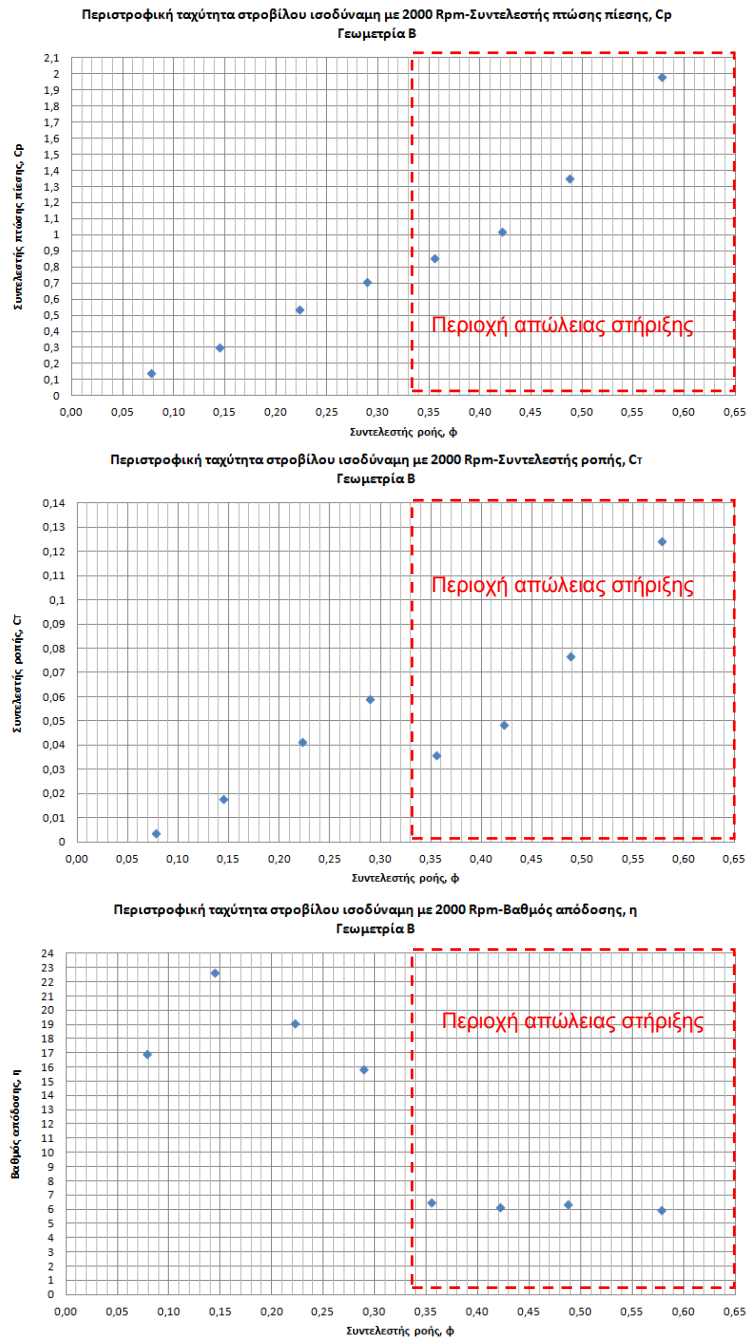


Επαγόμενες ταχύτητες:



Σχήμα 4.56: Πτώση πίεσης και επαγόμενες ταχύτητες διαμέσου του χωρίου του ρότορα

Καταλήγοντας, τα χαρακτηριστικά του εν λόγω στροβίλου Wells ο οποίος περιστρέφεται με ισοδύναμη ταχύτητα 2000 rpm μπορούν να φανούν στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.57).



Σχήμα 4.57: Συντελεστές ροπής, πίεσης και απόδοση στροβίλου για $N=2000$ rpm

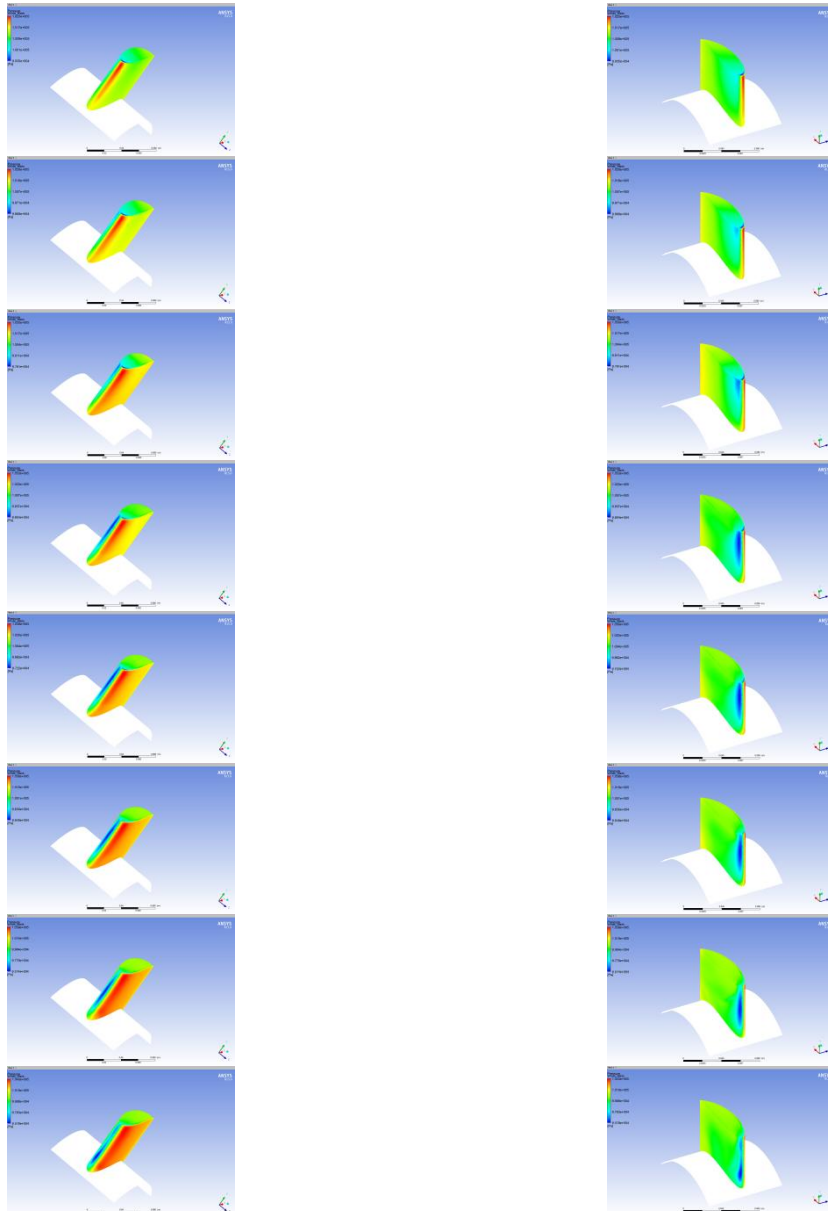
Συνεπώς, το φαινόμενο της απώλειας στήριξης επιτυγχάνεται για συντελεστή ροής $\phi=0.289$ ενώ, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του στροβίλου, ο οποίος ισούται περίπου με 23% επιτυγχάνεται για τον δεύτερο συντελεστή ροής, $\phi=0.145$.

4.2.2 Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισοδύναμη με 3000 rpm

Και στην παρούσα ανάλυση, οι διάφοροι συντελεστές ροής που ελέγχονται, θα παρουσιάζονται με ονομασίες αριθμών, με τον πρώτο συντελεστή ροής να είναι ο μικρότερος. Για τον λόγο αυτό καλό θα ήταν να ξαναδεί κάποιος τον αντίστοιχο πίνακα που αναφέρονται οι εν λόγω συντελεστές ροής, για περιστροφική ταχύτητα στροβίλου

3000 rpm (Πίνακας 4.2). Από τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν, τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην κορυφή του πτερυγίου είναι πάλι εντονότερα σε σχέση με της βάσης και συνεπώς, η περιγραφή των ροϊκών χαρακτηριστικών του στροβίλου θα γίνει και σ' αυτήν την περίπτωση για τις ακτινικές θέσεις που αφορούν το 50% και άνω.

Όπως σε κάθε ανάλυση που προηγήθηκε, έτσι και σ' αυτήν παρουσιάζονται αρχικά οι στατικές πιέσεις που υφίστανται πάνω στο πτερύγιο, για όλους τους συντελεστές ροής, στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.58).



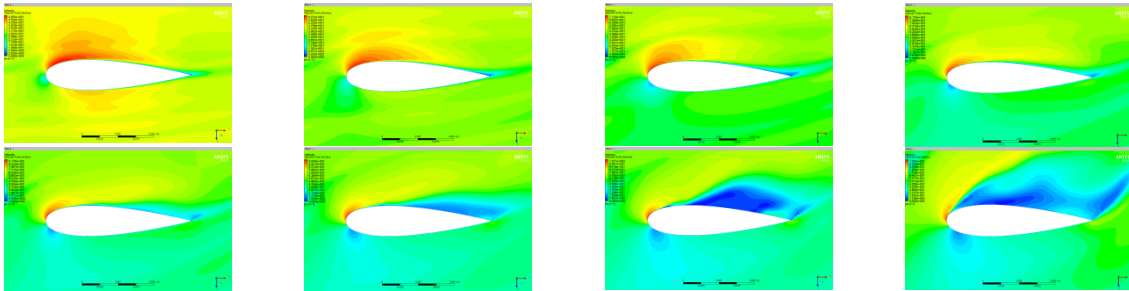
Σχήμα 4.58: Στατικές πιέσεις στο πτερύγιο ανά συντελεστή ροής, ϕ

Μια κλασική παρατήρηση πλέον είναι η αύξηση της ελάχιστης πίεσης στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου. Στην παρούσα ανάλυση η αύξηση αυτή έρχεται στον τέταρτο συντελεστή ροής. Μια αντίστοιχη αύξηση είχε επέλθει και πάλι για τον ίδιο συντελεστή ροής στην γεωμετρία A. Μετά απ' αυτόν τον συντελεστή οι κλίσεις της

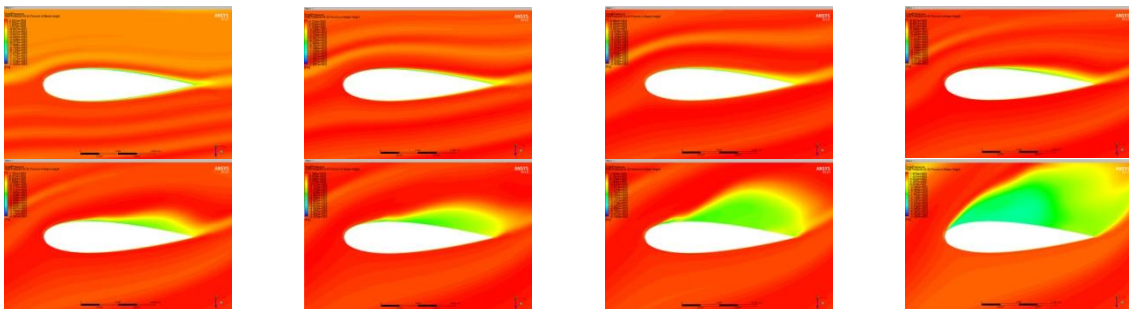
ταχύτητας στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου καλύπτουν ολοένα και μεγαλύτερο ύψος του πτερυγίου. Υπενθυμίζεται πως η σύγκριση αυτή μεταξύ των γεωμετριών δεν αφορά την εξαγωγή συμπερασμάτων για το ποια γεωμετρία είναι καλύτερη και γίνεται μόνο για να έχει ο αναγνώστης μια εικόνα για το πως συμπεριφέρεται η ροή σε μια μεγαλύτερης κλίμακας γεωμετρία.

Όσον αφορά την ακτινική θέση στο 50%, για τους τέσσερις πρώτους συντελεστές ροής μετά τον πρώτο, η περιοχή αποκόλλησης της ροής περιορίζεται στην ακμή φυγής του πτερυγίου. Για τον πρώτο συντελεστή ροής το ροϊκό πεδίο φαίνεται να παρουσιάζει μια παρόμοια κατανομή ταχυτήτων μεταξύ των δύο πλευρών του πτερυγίου. Αυτό όπως θα φανεί στο τέλος της ανάλυσης σχετίζεται με το ότι το πτερύγιο σ' αυτόν τον συντελεστή ροής δεν εναλλάσει έργο με το ρευστό. Στον έκτο συντελεστή ροής κάνει την εμφάνιση της μια περιοχή με χαμηλότερα πεδία ταχυτήτων, όπως διακρίνεται και από τις υποπίεσεις που αναπτύσσονται. Όπως είναι λογικό η ροή πάνω στο πτερύγιο επιβραδύνεται όσο αυξάνει ο συντελεστής ροής, λόγω αύξησης της γωνίας πρόσπτωσης και μετακίνησης του σημείου ανακοπής προς την πλευρά πίεσης. Από τον έβδομο συντελεστή ροής και μετά λαμβάνουν χώρα ολοένα και μεγαλύτερης έντασης ανακυκλοφορίες της ροής. Από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.59) μπορεί να δει κανείς τα εν λόγω, παρουσιάζοντας τα πεδία ταχυτήτων και τις ολικές πιέσεις για όλους τους συντελεστές ροής, με αύξουσα σειρά από τα αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω.

Επαγόμενες ταχύτητες:



Ολικές πιέσεις:



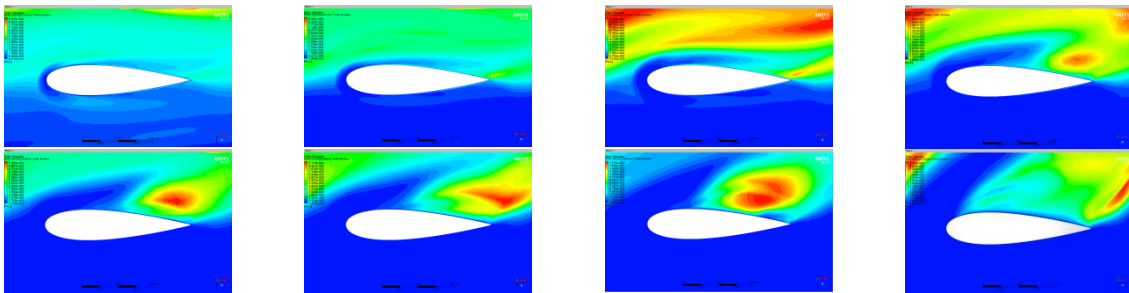
Σχήμα 4.59: Επαγόμενες ταχύτητες και Ολικές πιέσεις στο 50% του ύψους του πτερυγίου

Στην αντίστοιχη χαρακτηριστική θέση του πτερυγίου, η μικρότερη γεωμετρία Α είχε παρουσιάσει ευρύτερα πεδία χαμηλών ταχυτήτων και εκτενέστερες περιοχές

αποκολλήσεων. Κάτι τέτοιο όπως έχει αναφερθεί είναι λογικό, εξαιτίας της μεγαλύτερης αλληλεπίδρασης της ροής στη μέση ακτινική θέση με τα φαινόμενα που εκτυλίσσονται στην κορυφή του πτερυγίου αλλά και των μεγαλύτερων γωνιών πρόσπτωσης που υφίστανται σ' αυτήν την περιοχή, σε σχέση με τη μέση ακτινική θέση της παρούσας γεωμετρίας, για ίδια ταχύτητα εισαγωγής και περιστροφής του στροβίλου.

Μια σύγκριση μεταξύ της παρούσας ανάλυσης και της προηγούμενης, αναφερόμενοι στη γεωμετρία B, αποδεικνύει την αισθητά καλύτερη συμπεριφορά της ροής πάνω στο πτερύγιο, με την αύξηση των στροφών του στροβίλου. Η καθυστερημένη εμφάνιση αποκόλλησης της ροής είναι προφανής, αν παρατηρήσει κανείς τα σχήματα που απεικονίζουν τις επαγόμενες ταχύτητες πάνω στο πτερύγιο, για τις δύο περιπτώσεις.

Η χαρτογράφηση των επιπέδων τύρβης που επικρατούν γύρω από την περιοχή του πτερυγίου αναδεικνύει την αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων, μέχρι τον τέταρτο συντελεστή ροής. Η επίδραση αυτή μέσω του απόρρου του πτερυγίου φαίνεται να μειώνεται από τον πέμπτο συντελεστή ροής και μετά, όπου οι εντάσεις της τύρβης είναι συγκεντρωμένες στην περιοχή αποκόλλησης, με τη ροή να οδηγείται μακριά από την επιφάνεια του πτερυγίου. Ενδιαφέρον έχει να προσέξει κανείς, τα επίπεδα τύρβης που αναπτύσσονται κατά την έξοδο της ροής από το πτερύγιο, στον τέταρτο και πέμπτο συντελεστή ροής, όπου γι' αυτή τη θέση η ροή εμφανίζεται να έχει χαμηλές ταχύτητες χωρίς την ύπαρξη έντονης ανακυκλοφορίας, καταδεικνύοντας έτσι την αποκόλληση της ροής πάνω από την επιφάνεια του πτερυγίου. Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.60) φαίνονται τα αναφερόμενα επίπεδα τύρβης για όλους τους συντελεστές ροής, με αύξουσα σειρά από τα αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω.

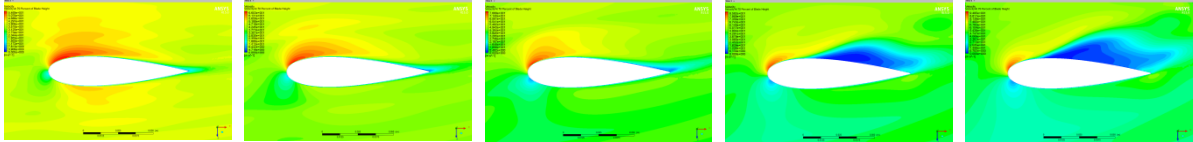


Σχήμα 4.60: Επίπεδα τύρβης στο 50% του ύψους του πτερυγίου

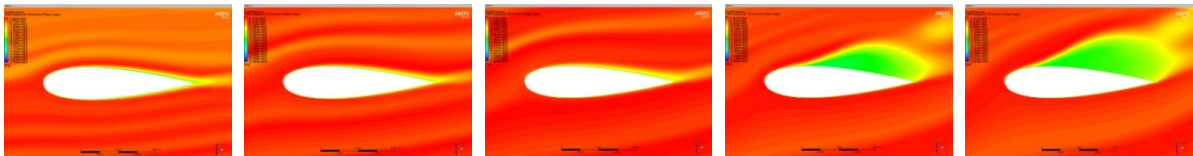
Στην ακτινική θέση στο 70%, τα χαρακτηριστικά της ροής για τον πρώτο συντελεστή ϕ παραμένουν τα ίδια. Για τους επόμενους δύο συντελεστές ροής η αποκόλληση φαίνεται να περιορίζεται και πάλι στην ακμή φυγής του πτερυγίου. Στον τέταρτο συντελεστή ροής ξεκινάει μια απότομη αποκόλληση της ροής, οριακά λίγο πριν το μέγιστο πάχος του πτερυγίου. Στους επόμενους συντελεστές ροής, η περιοχή αποκόλλησης επεκτείνεται μετά το μέγιστο αυτό πάχος. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων εξακολουθεί να υπάρχει για τους τρεις πρώτους συντελεστές ροής, με την αλληλεπίδραση στον πρώτο να

μην έχει και τόσο σημασία. Μετά την αποκόλληση της ροής στον τέταρτο συντελεστή ϕ , το τυρβώδες πεδίο εκτείνεται πέρα από την επιφάνεια του πτερυγίου. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.61), σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα, μπορεί να δει κανείς τα πεδία ταχυτήτων για τους πέντε πρώτους συντελεστές ροής, παραθέτοντας μαζί και τις ολικές πιέσεις που αναφέρονται σ αυτούς.

Επαγόμενες ταχύτητες:



Ολικές πιέσεις:

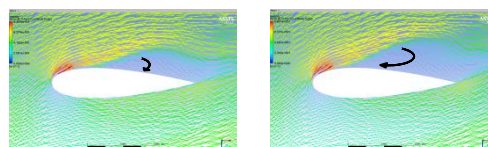


Σχήμα 4.61: Επαγόμενες ταχύτητες και Ολικές πιέσεις στο 70% του ύψους του πτερυγίου

Παρατηρώντας τα παραπάνω πεδία ταχυτήτων, μπορεί κανείς να δει πως η συμπεριφορά της ροής πάνω στο πτερύγιο έχει σχεδόν την ίδια τάση μ' αυτήν που είχε παρουσιαστεί στη γεωμετρία A, στην ίδια χαρακτηριστική θέση. Η αποκόλληση της ροής που εμφανίζεται για τον τέταρτο συντελεστή ροής, ξεκινούσε μετά το μέγιστο πάχος του πτερυγίου για τη γεωμετρία A ενώ, για τους τρεις πρώτους συντελεστές ροής είναι δύσκολο να βρεθούν διαφορές στον τρόπο ανάπτυξης της ροής πάνω στο πτερύγιο.

Αντιθέτως, συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση ανάλυσης της γεωμετρίας B, η πρώτη εμφάνιση αποκόλλησης της ροής είχε επέλθει στον τρίτο συντελεστή ϕ . Φαίνεται πως και πάλι η αύξηση των στροφών του στροβίλου επιφέρει καλύτερη συμπεριφορά της ροής πάνω στο πτερύγιο.

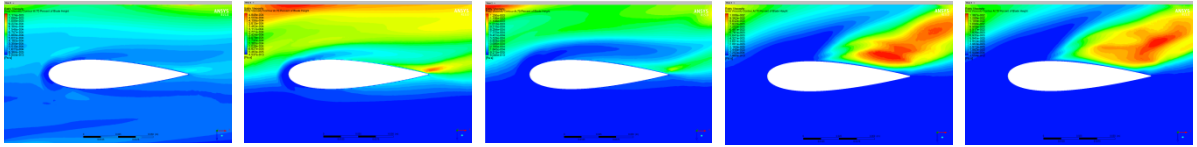
Από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4. 62) μπορεί να γίνει πιο κατανοητή η ανακυκλοφορία της ροής στον τέταρτο και πέμπτο συντελεστή ροής, παρουσιάζοντας τα διανύσματα ταχυτήτων στη περιοχή του πτερυγίου.



Σχήμα 4. 62: Διανύσματα ταχύτητας για τον τέταρτο και τον πέμπτο συντελεστή ροής στο 70% του ύψους του πτερυγίου

Στη συνέχεια, από τα επαγόμενα επίπεδα τύρβης μπορεί να δει κανείς πως η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων συνεχίζει να υπάρχει για τους τρεις πρώτους

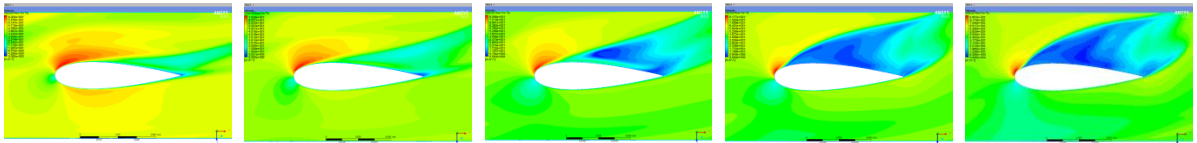
συντελεστές ροής. Η αποκόλληση που λαμβάνει χώρα στον τέταρτο συντελεστή ωθεί το τυρβώδες πεδίο της ροής μακριά από την επιφάνεια του πτερυγίου. Το επόμενο σχήμα είναι αντιπροσωπευτικό των παραπάνω, παρουσιάζοντας τους πέντε πρώτους συντελεστές ροής, σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα αντίστοιχα σχήματα (Σχήμα 4.63).



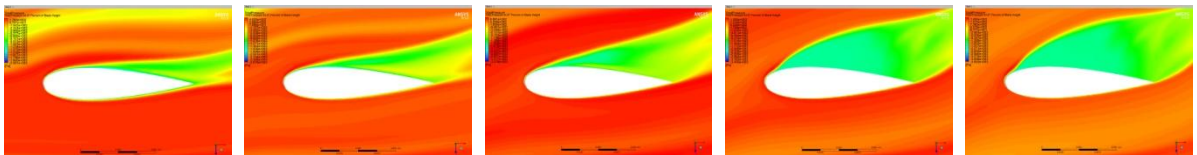
Σχήμα 4.63: Επίπεδα τύρβης στο 70% του ύψους του πτερυγίου

Τα φαινόμενα των αποκολλήσεων που λαμβάνουν χώρα στην ακτινική θέση στο 97%, όπως θα περίμενε κανείς, είναι εντονότερα. Η αποκόλληση της ροής πλέον εμφανίζεται από τον τρίτο συντελεστή ροής, χωρίς αυτή να ξεπερνάει το μέγιστο πάχος του πτερυγίου.

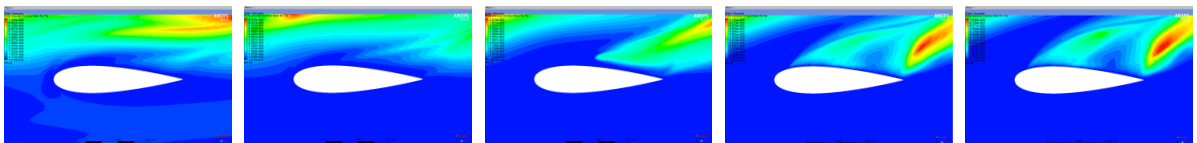
Επαγόμενες ταχύτητες:



Ολικές πιέσεις:



Επίπεδα τύρβης:

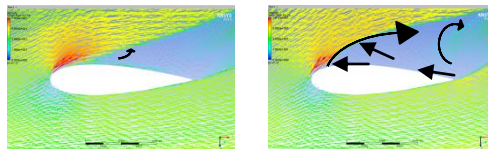


Σχήμα 4.64: Επαγόμενες ταχύτητες, Ολικές πιέσεις και Επίπεδα τύρβης στο 97% του ύψους του πτερυγίου

Αν συγκρίνει κανείς και πάλι την συμπεριφορά της ροής στην παρούσα θέση, μεταξύ των δύο περιπτώσεων της γεωμετρίας Β, θα δει πως για περιστροφική ταχύτητα στροβίλου ισοδύναμη με 2000 rpm η εμφάνιση των αποκολλήσεων ξεκινάει ήδη από τον δεύτερο συντελεστή ροής. Συγκριτικά με τη γεωμετρία Α, η συμπεριφορά της ροής είναι πανομοιότυπη, καταδεικνύοντας ότι η αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας και συνεπώς, η μείωση της γωνίας πρόσπτωσης στην κορυφή του πτερυγίου, δεν επηρεάζει τόσο τα

χαρακτηριστικά του πεδίου ροής, όσο τα ισχυρά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή αυτή. Στη συνέχεια της παρούσας ανάλυσης για τον δεύτερο συντελεστή ροής γίνεται αντιληπτό μόνο ένα πεδίο χαμηλών ταχυτήτων, το οποίο φαίνεται καθαρά από τις υποπίεσεις που αναπτύσσονται εντός του πεδίου αυτού. Όσον αφορά την αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων αυτή γίνεται ελάχιστα αντιληπτή μέχρι και τον δεύτερο συντελεστή ροής. Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 4.64), παρουσιάζονται οι εν λόγω επαγόμενες ταχύτητες, οι ολικές πιέσεις και τα επίπεδα τύρβης που αναπτύσσονται στην περιοχή της κορυφής του πτερυγίου, για τους πέντε πρώτους συντελεστές ροής σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα ανάλογα σχήματα.

Παρατηρώντας τα διανύσματα των ταχυτήτων για τον τρίτο και τέταρτο συντελεστή ροής, στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.65), μπορεί να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της ανακυκλοφορίας στον τρίτο συντελεστή ροής και της επιπλέον αντιστροφής της ροής ως προς την κύρια ροή, στον τέταρτο συντελεστή ροής.

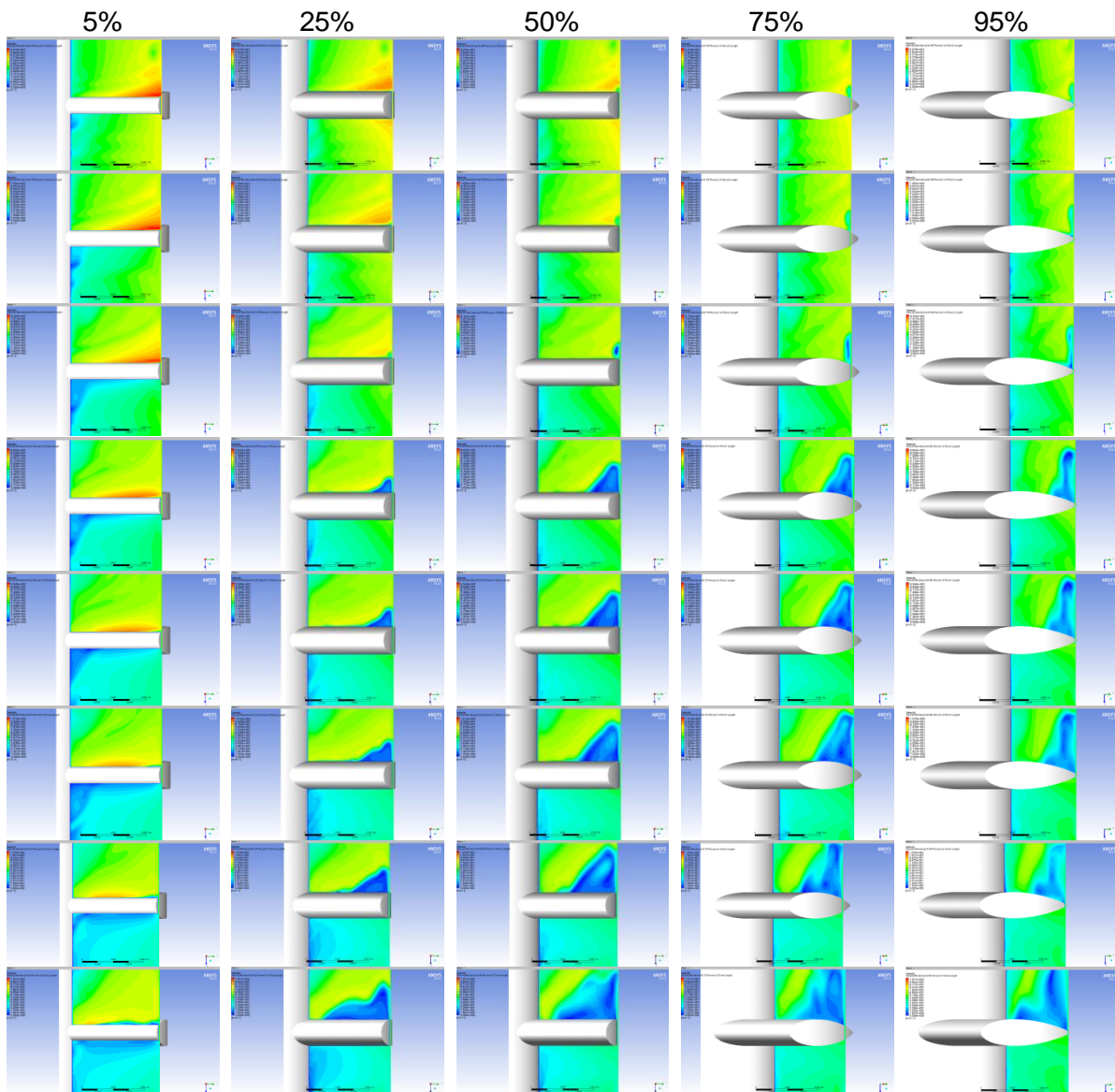


Σχήμα 4.65: Διανύσματα ταχύτητας για τον τέταρτο και τον πέμπτο συντελεστή ροής στο 97% του ύψους του πτερυγίου

Στο παραπάνω σχήμα μπορεί να παρατηρήσει κανείς μια αριστερόστροφη πορεία της ροής στον τρίτο συντελεστή φ , αντίστοιχη μ' αυτήν που είχε παρατηρηθεί στην γεωμετρία A. Ο αριστερόστροφος αυτός στροβιλισμός δεν φαίνεται να συνδέεται με το φαινόμενο της απώλειας σήριξης ενώ, αμέσως μετά τον συντελεστή αυτόν τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι ακραία.

Ακολουθως, παρατηρώντας τις μεσημβρινές τομές στο 5%, στο 25%, στο 50%, στο 75% και στο 95% του μήκους χορδής, απεικονίζοντας τα επαγόμενα πεδία ταχυτήτων στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.66), μπορεί να αποκτηθεί μια ευρύτερη εικόνα για τις επικρατούσες συνθήκες πάνω στο πτερύγιο.

Όπως φαίνεται, οι αποκολλήσεις της ροής ξεκινούν και σ' αυτή την περίπτωση από την κορυφή του πτερυγίου. Στην περιοχή μετά το μέγιστο πάχος, φαίνεται για πρώτη φορά μια περιοχή αποκόλλησης για τον τέταρτο συντελεστή ροής.

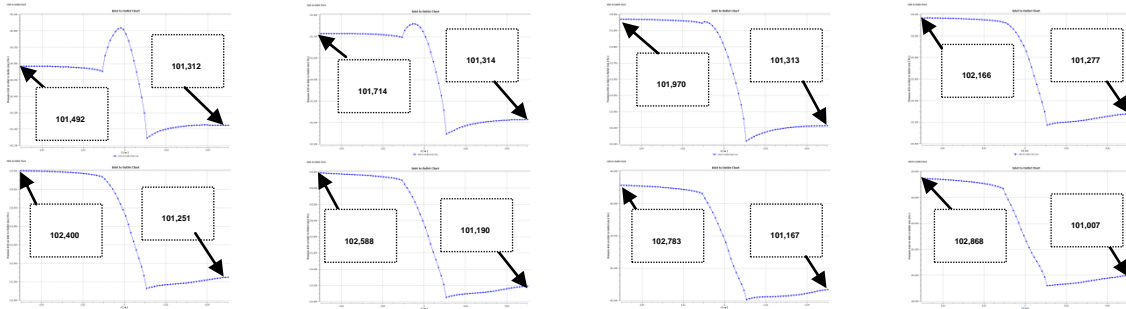


Σχήμα 4.66: Επαγόμενες ταχύτητες για τη μεσημβρινή τομή του πτερυγίου στο, 5%, 25%, 50%, 75% και 95% του μήκους χορδής

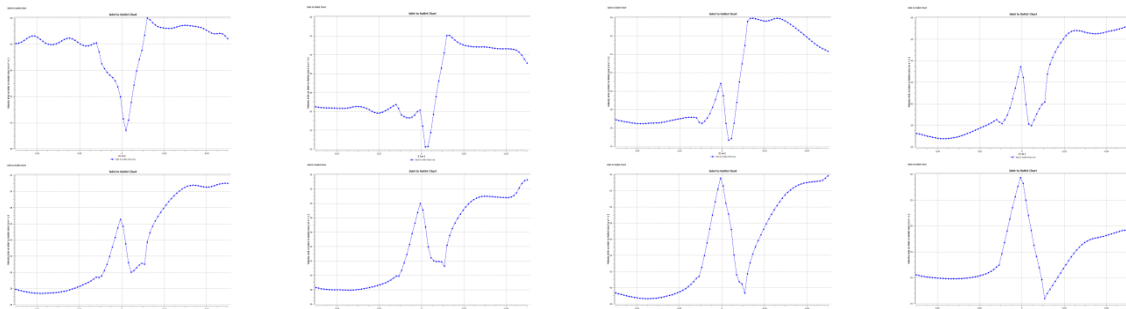
Η πτώση πίεσης και οι επαγόμενες ταχύτητες διαμέσου του στροβίλου μπορούν να φανούν σε μορφή διαγραμμάτων, στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.67).

Όσον αφορά τις ταχύτητες που αναπτύσσονται εντός του χωρίου του ρότορα, αν δει κανείς μόνο την περιοχή του πτερυγίου, μπορεί να παρατηρήσει πως από τον τέταρτο συντελεστή ροής και έπειτα, οι ταχύτητες στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου είναι μικρότερες σε σύγκριση με τους μικρότερους συντελεστές ροής. Κάτι τέτοιο, όπως έχει αναφερθεί, φαίνεται να είναι δείγμα των αποκολλήσεων που λαμβάνουν χώρα στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου.

Πτώση πίεσης:

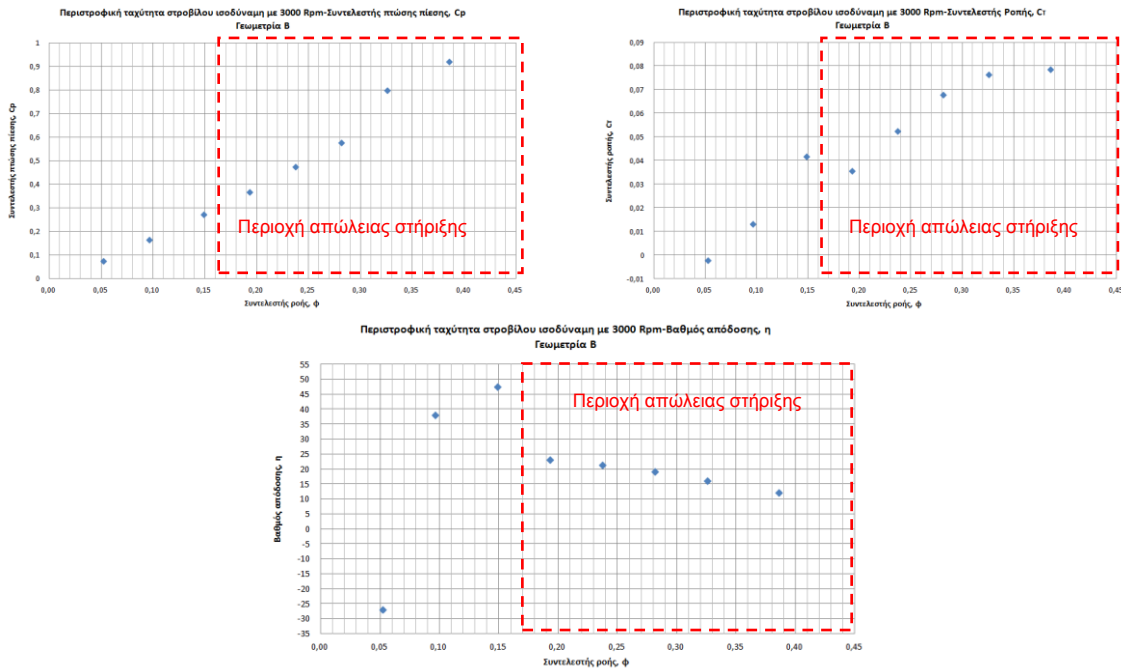


Επαγόμενες ταχύτητες:



Σχήμα 4.67: Πτώση πίεσης και επαγόμενες ταχύτητες διαμέσου του χωρίου του ρότορα

Καταλήγοντας, τα χαρακτηριστικά του εν λόγω στροβίλου Wells ο οποίος περιστρέφεται με ισοδύναμη ταχύτητα 3000 rpm μπορούν να φανούν στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.68).

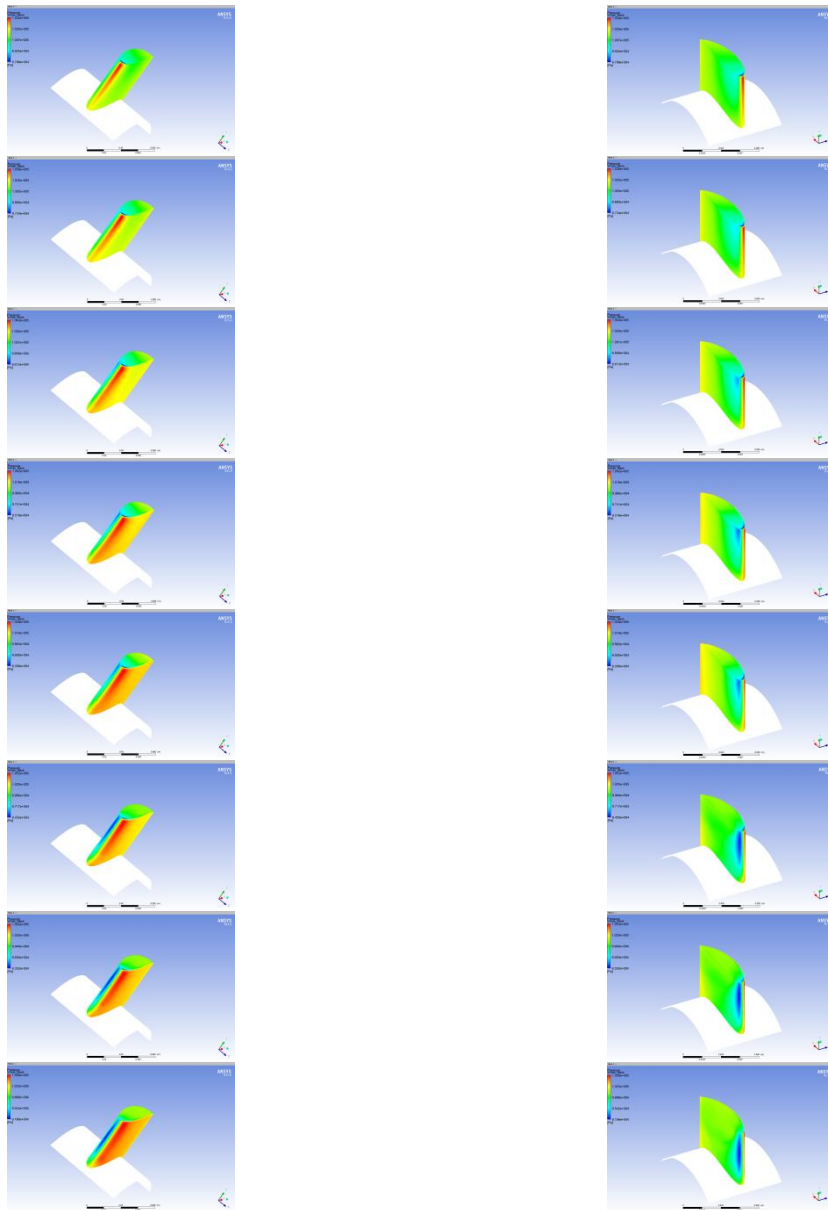


Σχήμα 4.68: Συντελεστές ροής, πίεσης και απόδοση στροβίλου για N=3000 rpm

Η απώλεια στήριξης του πτερυγίου λοιπόν, επέρχεται για συντελεστή ροής $\phi=0.149$ ενώ, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του στροβίλου, ο οποίος ισούται περίπου με 48% επιτυγχάνεται για τον ίδιο συντελεστή ροής.

4.2.2 Ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισοδύναμη με 4000 rpm

Στην παρούσα περίπτωση, η οποία αποτελεί και το τελευταίο πακέτο προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, οι διάφοροι συντελεστές ροής που ελέγχονται θα παρουσιάζονται με ονομασίες αριθμών και πάλι, με τον πρώτο συντελεστή ροής να είναι ο μικρότερος. Για τον λόγο αυτό καλό θα ήταν να ξαναδεί κάποιος τον αντίστοιχο πίνακα που αναφέρονται οι εν λόγω συντελεστές ροής, για περιστροφική ταχύτητα στροβίλου 4000 rpm (Πίνακας 4.2). Από τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν, τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην κορυφή του πτερυγίου είναι πάλι εντονότερα σε σχέση με της βάσης και συνεπώς, η περιγραφή των ροϊκών χαρακτηριστικών του στροβίλου θα γίνει και σ' αυτήν την περίπτωση για τις ακτινικές θέσεις που αφορούν το 50% και άνω.

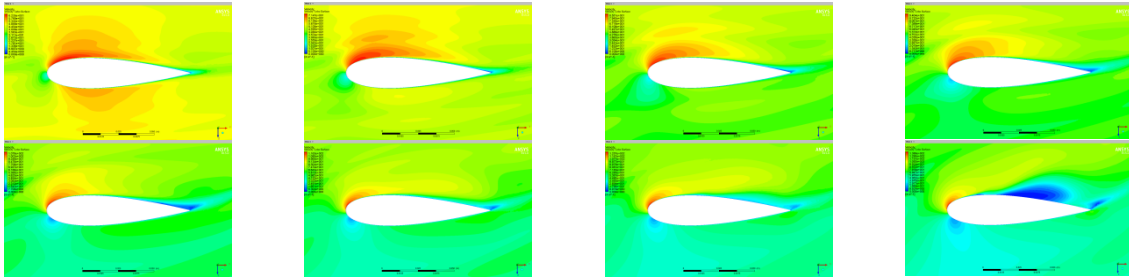
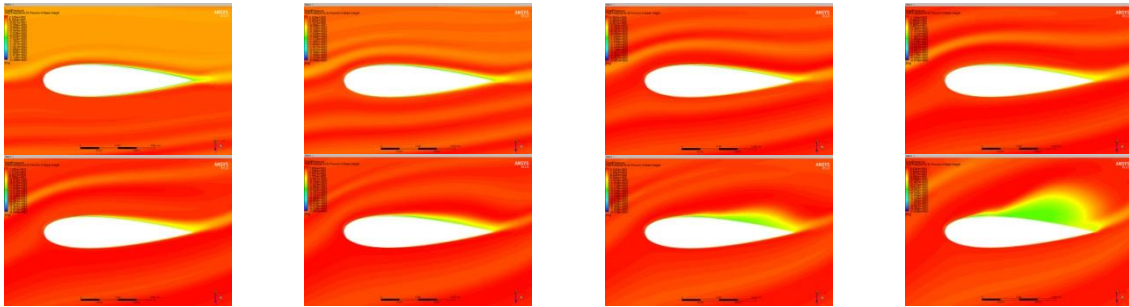
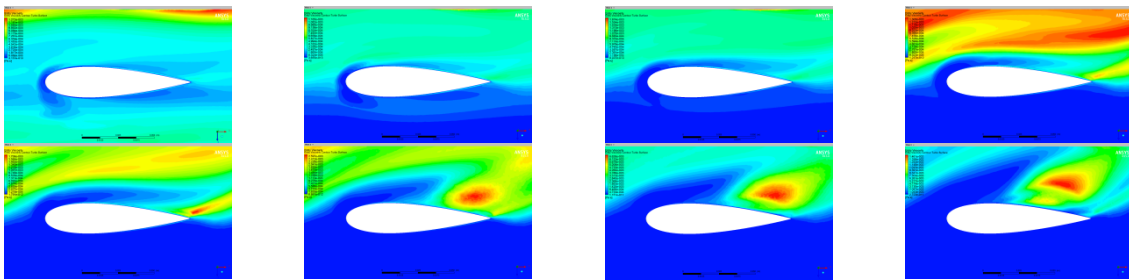


Σχήμα 4.69: Στατικές πιέσεις στο πτερύγιο ανά συντελεστή ροής, ϕ

Ξεκινώντας την περιγραφή των αποτελεσμάτων για τις παρούσες συνθήκες, παραθέεται το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 4.69) με τις αναπτυσσόμενες στατικές πιέσεις πάνω στο πτερυγίο, σε αντιστοιχία με των προηγούμενων αναλύσεων.

Στην εν λόγω ανάλυση λοιπόν, παρατηρείται πάλι μια παρόμοια αύξηση της ελάχιστης πίεσης στην πλευρά αναρρόφησης, μόνο που συγκριτικά με την αμέσως προηγούμενη περίπτωση, αυτή η αύξηση επέρχεται πλέον στον πέμπτο συντελεστή ροής. Μια αντίστοιχη αύξηση, στον πέμπτο συντελεστή ροής, είχε παρουσιαστεί και στην περίπτωση της γεωμετρίας B, για περιστροφική ταχύτητα στροβίλου ίση με 2000 rpm, καθώς και στην περίπτωση της γεωμετρίας A για περιστροφική ταχύτητα ίση με της παρούσας ανάλυσης. Μπορεί επίσης να παρατηρήσει κανείς πως μετά τον πέμπτο συντελεστή ροής οι αυξημένες κλίσεις της ταχύτητας αρχίζουν και καταλαμβάνουν ολοένα και μεγαλύτερο μέρος.

Όσον αφορά τη θέση στο 50% του ύψους του πτερυγίου, τα συμπεράσματα για τον πρώτο συντελεστή ροής, όπου παρατηρείται μια ομοιομορφία στην κατανομή των ταχυτήτων μεταξύ της πλευράς πίεσης και της πλευράς αναρρόφησης του πτερυγίου, είναι ανάλογα με της προηγούμενης ανάλυσης. Για τον πρώτο συντελεστή ροής δηλαδή, δεν παρατηρείται εναλλαγή έργου μεταξύ ρευστού και πτερυγίου. Για τους επόμενους συντελεστές ροής, η ροή φαίνεται να είναι ομαλή μέχρι και τον έβδομο συντελεστή φ , με τις περιοχές αποκόλλησης να περιορίζονται στην ακμή φυγής του πτερυγίου. Ωστόσο, τα χαμηλά πεδία ταχυτήτων επεκτείνονται πιο μπροστά, προς την ακμή προσβολής, καθώς αυξάνεται ο συντελεστής ροής, όπως εξάλλου είναι και το αναμενόμενο. Επιπλέον, η περιοχή αποκόλλησης της ροής στον όγδοο συντελεστή φ δεν παρουσιάζει έντονη ανακυκλοφορία. Μια τόσο ομαλή συμπεριφορά της ροής στη μέση ακτινική θέση του πτερυγίου δεν είχε παρουσιαστεί ξανά σε καμία από τις προηγούμενες αναλύσεις. Λόγω των συνθηκών που επικρατούν η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων παρουσιάζεται εμφανώς μέχρι και τον πέμπτο συντελεστή ροής. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί πως τα επίπεδα τύρβης στην είσοδο του πτερυγίου φαίνεται να βοηθούν την ροή να παραμείνει προσκολλημένη πάνω στην επιφάνεια του πτερυγίου, όπως έχει συζητηθεί και σε προηγούμενες συνθήκες. Στο παρακάτω σχήμα λοιπόν (Σχήμα 4.70), παρουσιάζονται τα πεδία ταχυτήτων, οι ολικές πιέσεις και τα επίπεδα τύρβης, για όλους τους συντελεστές ροής προκειμένου να γίνει ξεκάθαρη η ομαλή συμπεριφορά της ροής.

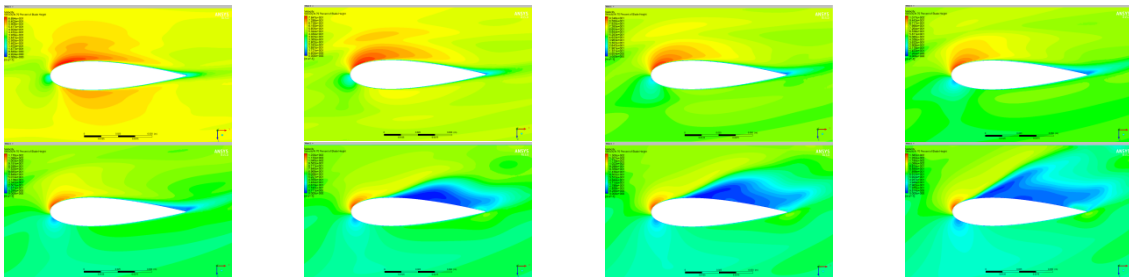
Επαγόμενες ταχύτητες:*Ολικές πιέσεις:**Επίπεδα τύρβης:*

Σχήμα 4.70: Επαγόμενες ταχύτητες, Ολικές πιέσεις και Επίπεδα τύρβης στο 50% του ύψους του πτερυγίου

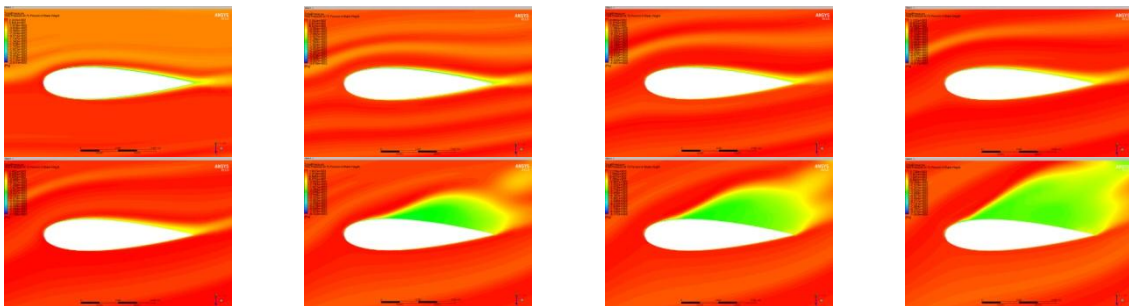
Τα συμπεράσματα για την ακτινική θέση στο 70% (Σχήμα 4.71) είναι ανάλογα μ' αυτά της μέσης ακτινικής θέσης, σ' ότι αφορά τη σύγκριση της συμπεριφοράς της ροής μεταξύ των δύο διαφορετικών γεωμετριών αλλά και μεταξύ της παρούσας ανάλυσης και αυτής που προηγήθηκε, σχετικά με τη γεωμετρία Β. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τη γεωμετρία Β για ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου ισοδύναμη με 3000 rpm, η πρώτη περιοχή αποκόλλησης είχε εμφανιστεί για τον πέμπτο συντελεστή ροής ενώ, για τις παρούσες συνθήκες η πρώτη αποκόλληση της ροής πραγματοποιείται στον έκτο συντελεστή ροής. Συγκριτικά με την γεωμετρία Α, για την ίδια ταχύτητα περιστροφής που μελετάται στην παρούσα περιγραφή, η πρώτη περιοχή αποκόλλησης είχε εμφανιστεί για τον πέμπτο συντελεστή ροής ωστόσο, είχε μικρότερη έκταση και από τις δύο περιπτώσεις που σχολιάζονται στην παρούσα παράγραφο. Επιπλέον, στη γεωμετρία Α για τον έκτο συντελεστή ροής η περιοχή της αποκόλλησης είχε ξεπεράσει το μέγιστο πάχος ενώ, για τις παρούσες συνθήκες η αποκόλληση ξεκινάει οριακά λίγο πριν το μέγιστο πάχος του πτερυγίου. Στη συνέχεια της σύγκρισης μεταξύ της γεωμετρίας Α για την ίδια ταχύτητα περιστροφής και των δύο περιστροφικών ταχυτήτων της γεωμετρίας Β, η αποκόλληση

που εμφανίζεται στα παρών αποτελέσματα για τον έβδομο συντελεστή ροής είναι παρόμοια μ' αυτήν που είχε εμφανιστεί στη γεωμετρία A για τον έκτο συντελεστή ϕ και ανάλογη μ' αυτήν που είχε παρουσιαστεί στην γεωμετρία B για τον πέμπτο συντελεστή ροής. Ομοιότητες παρατηρούνται και μεταξύ της αποκόλλησης που λαμβάνει χώρα στην παρούσα ανάλυση για τον όγδοο συντελεστή ροής μ' αυτήν που είχε εμφανιστεί στην προηγούμενη ενότητα για τον έβδομο συντελεστή ροής. Όλη αυτή η σύγκριση γίνεται για να φανεί πόσο ομαλότερες είναι οι συνθήκες που επικρατούν στην γεωμετρία B, για ταχύτητα περιστροφής ισοδύναμη με 4000 rpm. Αυτή η βελτιωμένη συμπεριφορά της ροής πάνω στο πτερύγιο θα γίνει αντιληπτή και στους βαθμούς αποδόσης που παρουσιάζονται στο τέλος του κεφαλαίου, οι οποίοι είναι εμφανώς μεγαλύτεροι και για μεγαλύτερος εύρος συντελεστών ροής. Εν συνεχεία της παρούσας ανάλυσης, για τους μικρότερους του έκτου συντελεστές ροής, η περιοχή αποκόλλησης περιορίζεται στην ακμή φυγής του πτερυγίου. Στον πρώτο συντελεστή ροής παρατηρείται και πάλι μια ομοιομορφία των κατανομών ταχύτητας μεταξύ των δύο πλευρών του πτερυγίου, οπότε δεν φαίνεται να έχει σημασία ο περαιτέρω σχολιασμός του.

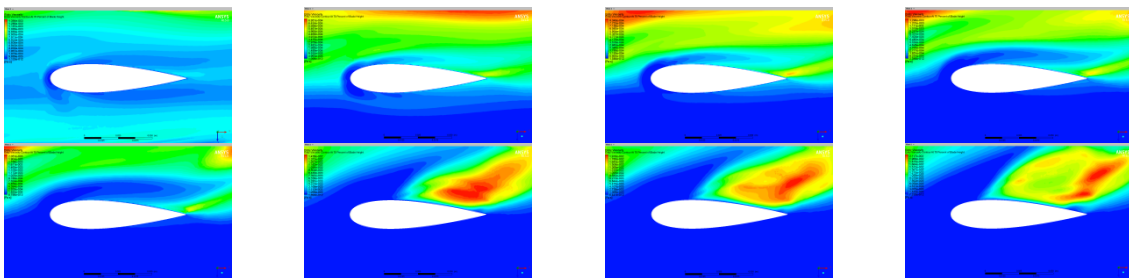
Επαγόμενες ταχύτητες:



Ολικές πιέσεις:

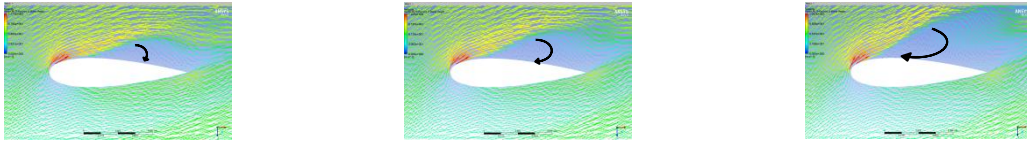


Επίπεδα τύρβης:



Σχήμα 4.71: Επαγόμενες ταχύτητες, Ολικές πιέσεις και Επίπεδα τύρβης στο 70% του ύψους του πτερυγίου

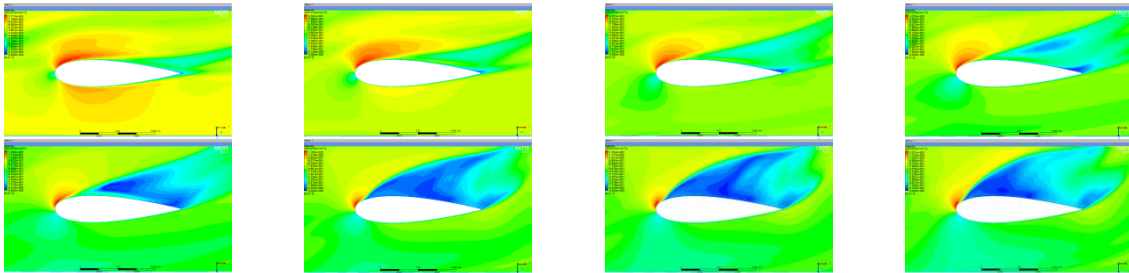
Παραθέτοντας παρακάτω τα διανύσματα ταχύτητας (Σχήμα 4.72) για τους τρεις τελευταίους συντελεστές ροής, μπορεί να γίνει πιο αντιληπτό το μέγεθος των ανακυκλοφοριών στην ακτινική θέση στο 70%.



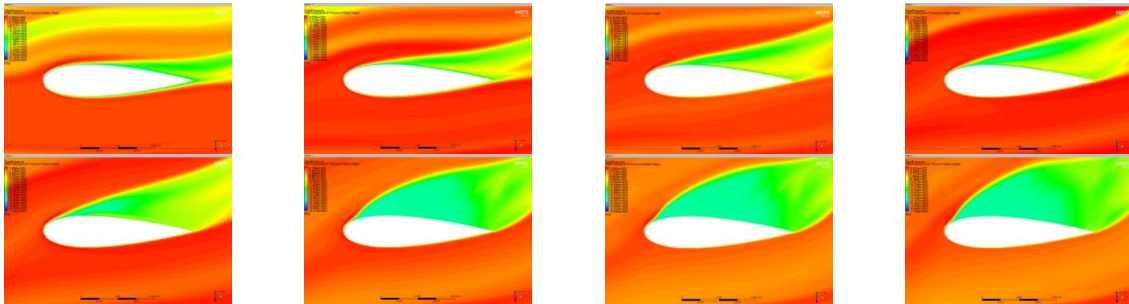
Σχήμα 4.72: Διανύσματα ταχύτητας για τρεις τελευταίους συντελεστές ροής στο 70% του ύψους του πτερυγίου

Όσον αφορά την περιοχή κοντά στην κορυφή του πτερυγίου, στο 97%, λαμβάνουν χώρα πιο έντονα φαινόμενα ομολογουμένως. Ωστόσο, το μόνο που παρατηρείται για τους πέντε πρώτους συντελεστές ροής είναι τα μεγαλύτερης έκτασης χαμηλά πεδία ταχυτήτων, τα οποία όπως φαίνεται από τα επίπεδα τύρβης αποκολλώνται λίγο μακρύτερα από την επιφάνεια του πτερυγίου.

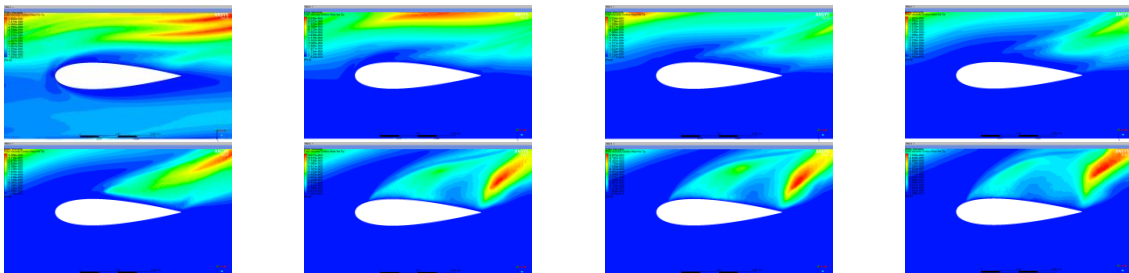
Επαγόμενες ταχύτητες:



Ολικές πιέσεις:

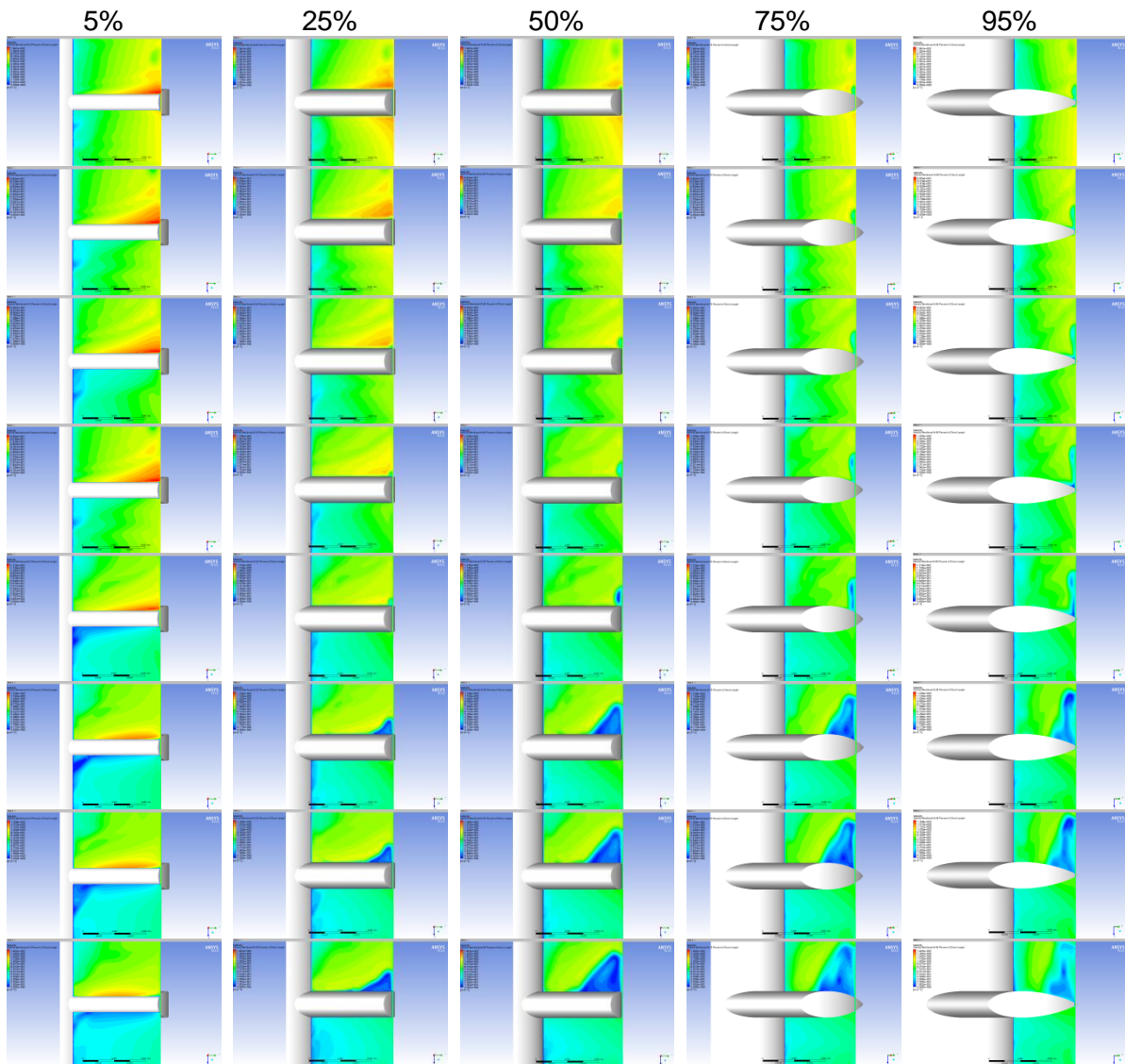


Επίπεδα τύρβης:



Σχήμα 4.73: Επαγόμενες ταχύτητες, Ολικές πιέσεις και Επίπεδα τύρβης στο 97% του ύψους του πτερυγίου

Στον έκτο συντελεστή ροής, η αποκόλληση ξεκινάει από την ακμή προσβολής του πτερυγίου. Συγκριτικά με την προηγούμενη ανάλυση της γεωμετρίας Β, η πρώτη εμφάνιση αποκόλλησης της ροής είχε επέλθει στον τέταρτο συντελεστή ροής. Όσον αφορά την αντίστοιχη περίπτωση της γεωμετρίας Α, τα πεδία ταχυτήτων φαίνονται να είναι παρόμοια, μόνο που εξελίσσονταν κατά ένα συντελεστή ροής νωρίτερα. Στη συνέχεια της παρούσας ανάλυσης, η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων είναι εμφανής πλέον μόνο μέχρι τον δεύτερο συντελεστή ροής. Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 4.73) παρουσιάζονται τα εν λόγω πεδία ταχυτήτων, οι ολικές πιέσεις, προκειμένου να γίνουν αντιληπτότερα τα χαμηλά πεδία ταχυτήτων με την έννοια των υποπίεσεων που αναπτύσσονται στη ροή πάνω στο πτερύγιο και τα πεδία τύρβης που μπορούν να δείξουν όχι μόνο την αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων αλλά και το πως εξελίσσονται τα χαμηλά πεδία ταχυτήτων πάνω από το πτερύγιο. Η απεικόνιση των παραπάνω αφορά όλους τους συντελεστές ροής, σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα ανάλογα σχήματα

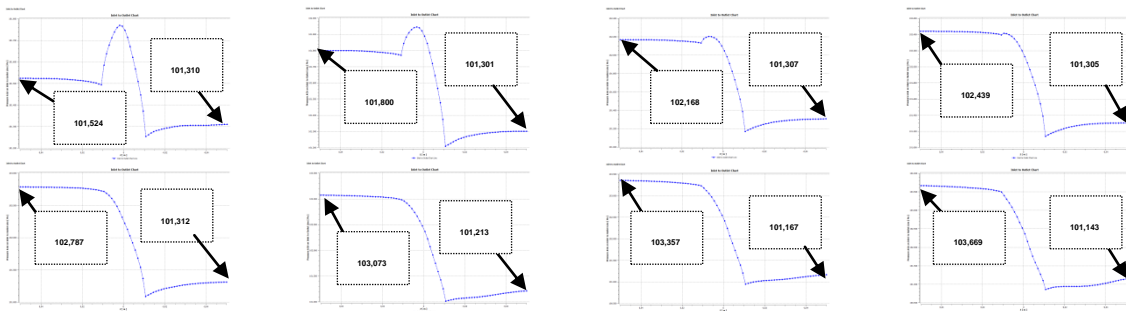


Σχήμα 4.74: Επαγόμενες ταχύτητες για τη μεσημβρινή τομή του πτερυγίου στο, 5%, 25%, 50%, 75% και 95% του μήκους χορδής

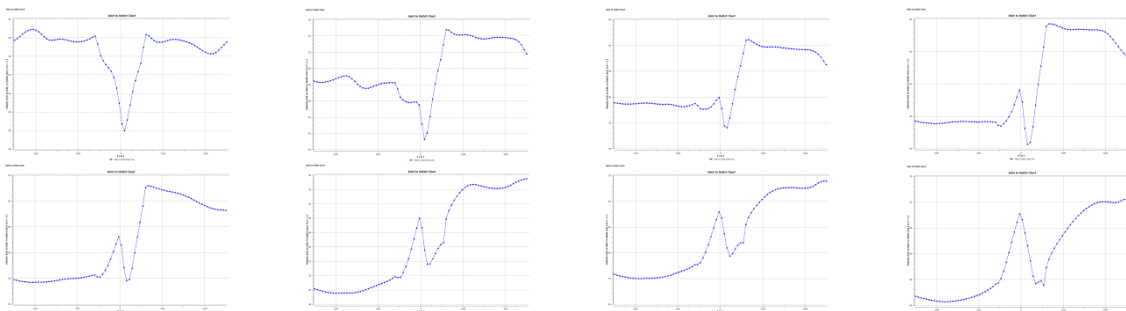
Ακολουθώντας, παρατηρώντας τις μεσημβρινές τομές στο 5%, στο 25%, στο 50%, στο 75% και στο 95% του μήκους χορδής, απεικονίζοντας τα επαγόμενα πεδία ταχυτήτων στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 4.74), μπορεί να αποκτηθεί μια ευρύτερη εικόνα για τις ευνοϊκότερες συνθήκες ροής που επικρατούν στην παρούσα περίπτωση. Από το εν λόγω σχήμα λοιπόν, μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως, η πρώτη εμφάνιση αποκόλλησης της ροής μετά το μέγιστο πάχος του πτερυγίου, επέρχεται στον έκτο συντελεστή ροής

Η πτώση πίεσης και οι επαγόμενες ταχύτητες διαμέσου του στροβίλου μπορούν να φανούν σε μορφή διαγραμμάτων, στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.75).

Πτώση πίεσης:



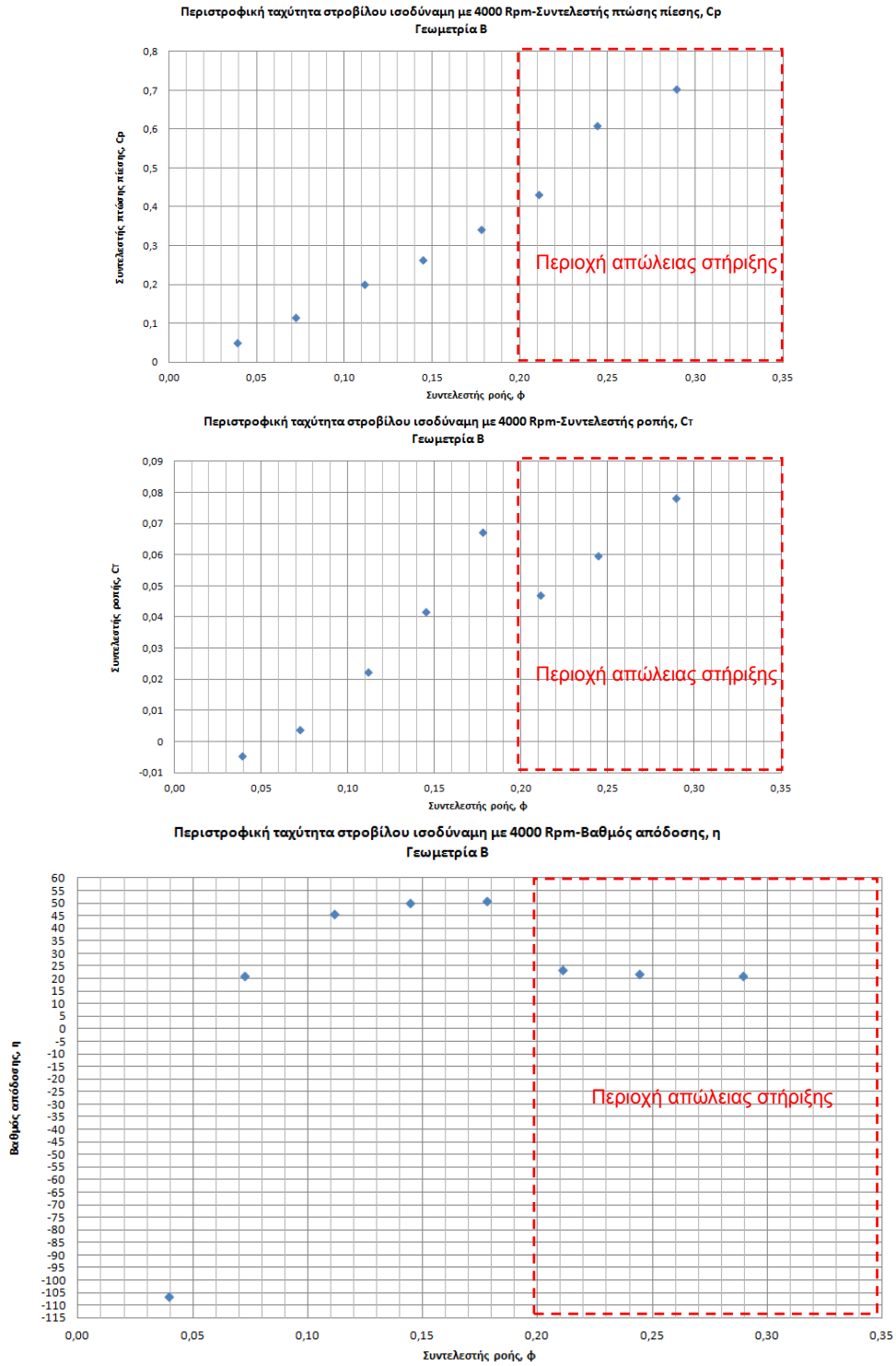
Επαγόμενες ταχύτητες:



Σχήμα 4.75: Πτώση πίεσης και επαγόμενες ταχύτητες διαμέσου του χωρίου του ρότορα

Όσον αφορά τις ταχύτητες που αναπτύσσονται εντός του χωρίου του ρότορα, αν δει κανείς μόνο την περιοχή του πτερυγίου, μπορεί να παρατηρήσει πως από τον έκτο συντελεστή ροής και έπειτα, οι ταχύτητες στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου είναι μικρότερες σε σύγκριση με τους μικρότερους συντελεστές ροής. Κάτι τέτοιο, όπως έχει αναφερθεί πολλακίς, φαίνεται να είναι δείγμα των αποκολλήσεων που λαμβάνουν χώρα στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου.

Καταλήγοντας, τα χαρακτηριστικά του εν λόγω στροβίλου Wells ο οποίος περιστρέφεται με ισοδύναμη ταχύτητα 4000 rpm μπορούν να φανούν στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.76), όπου διακρίνεται πως οι βαθμοί απόδοσης του στροβίλου είναι εμφανώς μεγαλύτεροι και για μεγαλύτερο εύρος συντελεστών ροής.

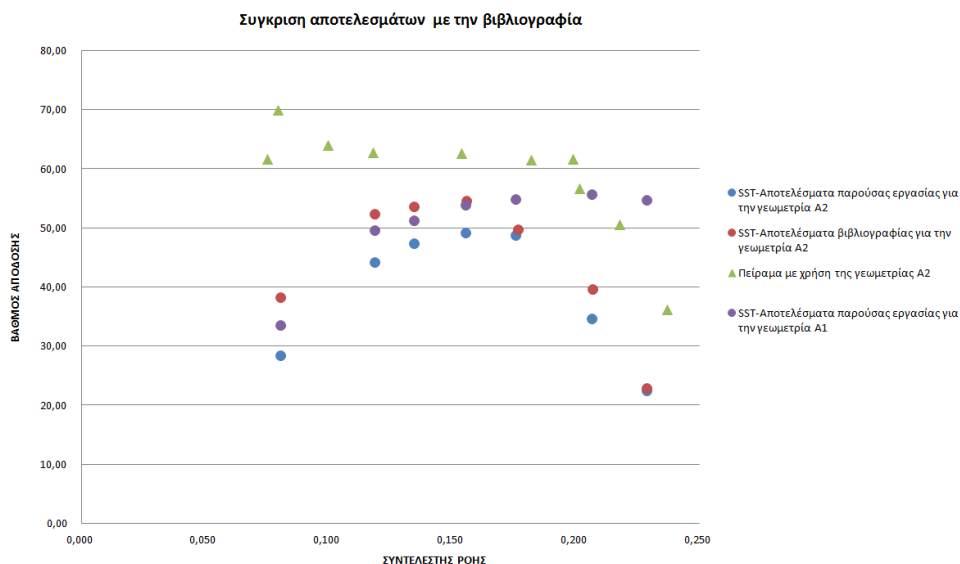


Σχήμα 4. 76: Συντελεστές ροπής, πίεσης και απόδοση στροβίλου για N=4000 rpm

Η απώλεια στήριξης του πτερυγίου λοιπόν, επέρχεται για συντελεστή ροής $\phi=0.178$ ενώ, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του στροβίλου, ο οποίος ισούται περίπου με 51% επιτυγχάνεται για τον ίδιο συντελεστή ροής.

4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων γεωμετριών A1 και A2 με βιβλιογραφίας [5,7] κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής

Όπως έχει αναφερθεί πολλάκις, η γεωμετρία A αναπαράχθηκε από τη βιβλιογραφία και συνεπώς, ήταν λογικό να γίνει μια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν, με αφορμή την παρούσα εργασία, με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Η σύγκριση αυτή υπενθυμίζεται πως έγινε στο αρχικό στάδιο πραγματοποίησης των υπολογιστικών προσομοιώσεων, για ισοδύναμη περιστροφική ταχύτητα στροβίλου ίση με 4500 rpm (Πίνακας 4.3) και ήταν ότι καλύτερο μπόρεσε να γίνει κατά την παρούσα μελέτη. Το πλέγμα της γεωμετρίας A2 σαφώς και επιδέχεται βελτίωσης και τονίζεται πως, δεν γίνεται λόγος περί μεγάλης ακρίβειας και τελειότητας αυτού. Στο παρακάτω σχήμα λοιπόν (Σχήμα 4.77), φαίνεται η εν λόγω συσχέτιση, απεικονίζοντας τόσο τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη γεωμετρία A1 όσο και από τη γεωμετρία A2, η οποία τελικά παρουσιάζει την καλύτερη συμφωνία μεταξύ αυτών. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία εξάχθηκαν στη μορφή που φαίνεται στο εν λόγω σχήμα, με τη χρήση του Matlab και με τη βοήθεια ενός εμπορικού κώδικα ονόματι Grabit. Οι ερευνητές του [7] ολοκλήρωσαν τις υπολογιστικές προσομοιώσεις με τη χρήση του ίδιου μοντέλου τύρβης μ' αυτό που επιλέχτηκε στην παρούσα εργασία οπότε, η σύγκριση που γίνεται είναι ορθή. Όσον αφορά τα πειραματικά δεδομένα [5], δεν υπάρχει ακριβής γνώση των συνθηκών που πραγματοποιήθηκαν αλλά, εφόσον είναι ευρέως αποδεκτά από πολλούς μελετητές γίνεται χρήση αυτών και στην παρούσα εργασία χωρίς κάποια αμφιβολία.



Σχήμα 4.77: Σύγκριση αποτελεσμάτων γεωμετρίας A με της βιβλιογραφίας

Από το παραπάνω σχήμα λοιπόν (Σχήμα 4.77), είναι ξεκάθαρο αρχικά πως, οι προσομοιώσεις με τη γεωμετρία A1 αποτυγχάνουν στο σύνολο τους να πιάσουν τη συμπεριφορά του στροβίλου. Συγκεκριμένα, δεν κατάφεραν να αναδείξουν ούτε το σημείο

εμφάνισης του μέγιστου βαθμού απόδοσης αλλά ούτε και το σημείο εμφάνισης της απώλειας στήριξης. Αντιθέτως, το πλέγμα της γεωμετρίας A2 κατάφερε να αναδείξει τα παραπάνω σημεία για τους ίδιους συντελεστές ροής με της βιβλιογραφίας. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης συγκεκριμένα, επιτυγχάνεται για συντελεστή ροής $\varphi=0.155$ ενώ, το σημείο απώλειας στήριξης για $\varphi=0.228$. Παρόλο που η αριθμητική συμφωνία δεν είναι και τόσο καλή ωστόσο, με το πλέγμα της γεωμετρίας A2 παρουσιάζεται μια ταυτόσημη συμπεριφορά του στροβίλου με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας. Μάλιστα, θα μπορούσε να πει κανείς πως μετά το σημείο εμφάνισης του μέγιστου βαθμού απόδοσης, η καμπύλη που εξάχθηκε από την παρούσα εργασία δεν πέφτει τόσο απότομα όσο δείχνουν τα υπολογιστικά αποτελέσματα του [7] και συνεπώς, για το σημείο λίγο μετά από το μέγιστο βαθμό απόδοσης επιτυγχάνεται καλύτερη απεικόνιση της συμπεριφοράς του στροβίλου, συγκρίνοντας με τα πειραματικά δεδομένα [5]. Από την άλλη, φαίνεται ομολογουμένως να υποεκτιμώνται τα χαρακτηριστικά του στροβίλου τόσο για μικρούς συντελεστές ροής όσο και για το σημείο εμφάνισης της απώλειας στήριξης. Η υποτίμηση αυτή ωστόσο, παρατηρείται και στα υπολογιστικά αποτελέσματα των μελετητών του [7]. Η μόνη εμφανής διαφορά μεταξύ της παρούσας εργασίας και αυτής του [7] έγκειται στο γεγονός ότι οι δεύτεροι χρησιμοποίησαν δομημένο πλέγμα, το οποίο κατά γενική ομολογία παρέχει ακριβέστερα αποτελέσματα.

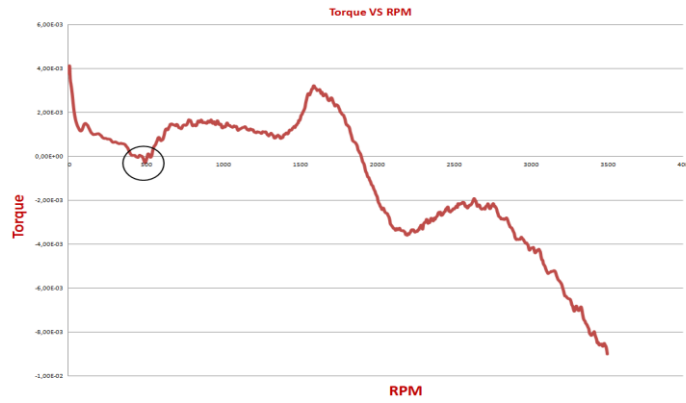
4.4 Υπολογιστικές προσομοιώσεις για τη Γεωμετρία B κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, πέρα από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις που αφορούν τον έλεγχο της συμπεριφοράς του στροβίλου Wells (Γεωμετρία A και B) κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής, στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ωφέλιμο να πραγματοποιηθούν και κάποιες προσομοιώσεις για τον έλεγχο του στροβίλου Wells γεωμετρίας B κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής. Από την μία πλευρά, οι εν λόγω υπολογιστικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με άμεσο σκοπό να γίνουν περισσότερο αντιληπτά κάποια φαινόμενα κατά τη δοκιμή του στροβίλου στην αεροσήραγγα, τα οποία έχουν παρατηρηθεί από διάφορους μελετητές της βιβλιογραφίας και τα οποία αφορούν τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου. Από την άλλη πλευρά, ολοκληρώθηκε ένα πακέτο υπολογιστικών προσομοιώσεων προκειμένου να εξαχθεί η καμπύλη της παραγόμενης ροπής του στροβίλου κάτω από την ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισαγωγής, μεταβάλλοντας το πλάτος και τη συχνότητα της εν λόγω ταλάντωσης. Τα εν λόγω πλάτη και οι συχνότητες ταλάντωσης κάτω από τις οποίες διεξάχθηκαν οι αυτές υπολογιστικές προσομοιώσεις, φαίνονται στο Σχήμα 5.20 του κεφαλαίου 5, για το λόγο του ότι ήταν πιο λογική η παράθεση τους εφόσον γίνονταν γνωστές οι διαστάσεις των αντικειμένων που τις

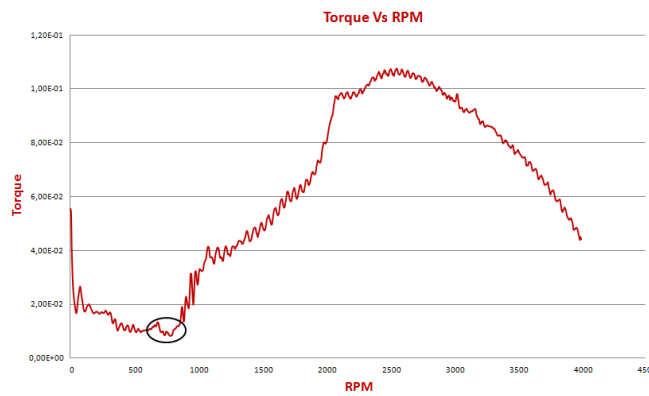
καθορίζουν. Στις δύο ενότητες που ακολουθούν λοιπόν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναφερόμενων υπολογιστικών προσομοιώσεων.

4.4.1 Χαρακτηριστικά εκκίνησης στροβίλου

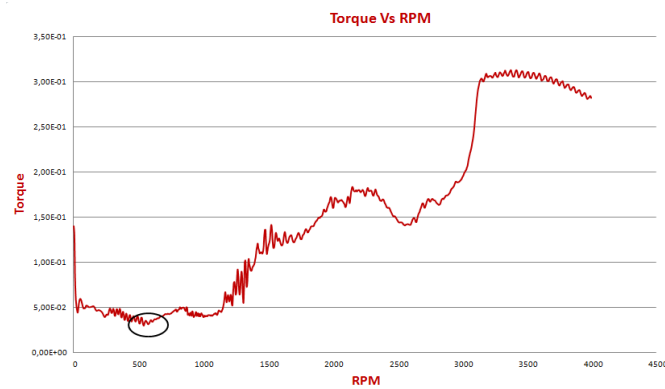
Είναι γνωστό πως οι υπολογιστικές προσομοιώσεις κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής δεν μπορούν να απεικονίσουν απόλυτα σωστά τη συμπεριφορά του στροβίλου και αυτό γιατί, δεν λαμβάνουν υπόψη τις πραγματικές συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργεί ο στρόβιλος. Συγκεκριμένα, όπως έχει αναφερθεί, κατά την επίλυση των ροϊκών χαρακτηριστικών του στροβίλου κάτω από συνθήκες μόνιμης ροής, είναι σαν η εν λόγω επίλυση να γίνεται πάνω σε μια φωτογραφία κατά την απεικόνιση της οποίας, ο στρόβιλος είχε μια συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής και ένα συγκεκριμένο αντίκτυπο στο πεδίο ροής. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει απόλυτα στην πραγματικότητα αφού, ο στρόβιλος ξεκινάει από την ακινησία και συνεπώς, πρέπει να περάσει κάποιος χρόνος μέχρι να καταφέρει να πιάσει τις συνθήκες λειτουργίας για τις οποίες επιτυγχάνεται ο μέγιστος βαθμός απόδοσης. Τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου Wells γεωμετρίας B, προέκυψαν ορίζοντας ως μόνιμη συνθήκη την ταχύτητα εισαγωγής του αέρα και ως μη μόνιμη την περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου, ορίζοντας δηλαδή την ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου ως μεταβλητή συναρτήσεως του χρόνου για κάθε προσομοίωση ώστε, να καλύπτει ένα εύρος από 0 rpm έως 4000 rpm. Οι εν λόγω υπολογιστικές προσομοιώσεις λοιπόν, πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να ελεγχθούν τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου κατά την εισαγωγή σχεδόν όλων των ταχυτήτων αέρα για τις οποίες είχαν πραγματοποιηθεί οι υπολογιστικές προσομοιώσεις κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής και οι οποίες μπορούν να φανούν στον πίνακα που δόθηκε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου (Πίνακας 4. 1). Για τη μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής (4000 rpm) και για συνθήκες μόνιμης ροής, από την εξαγόμενη καμπύλη της ροπής που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 4. 76, το σημείο εμφάνισης της απώλειας στήριξης φαίνεται να επιτυγχάνεται για τον έκτο συντελεστή ροής και συνεπώς, εφόσον δεν ξεπεράστηκε η εν λόγω περιστροφική ταχύτητα θεωρήθηκε πως είναι αναγκαίο να εξαχθούν τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου μέχρι το εν λόγω σημείο, της απώλειας στήριξης, καθώς, τα αποτελέσματα μετά απ' αυτό το σημείο δεν είναι εξάλλου και απόλυτα έμπιστα. Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4.78 - Σχήμα 4. 83) ακολουθούν τα διαγράμματα που απεικονίζουν το μέγεθος της παραγόμενης ροπής του στροβίλου, ως προς τον άξονα περιστροφής του, συναρτήσεως με την ταχύτητα περιστροφής έτσι όπως αυτή περιγράφηκε προηγουμένως, ως μεταβλητή με το χρόνο.



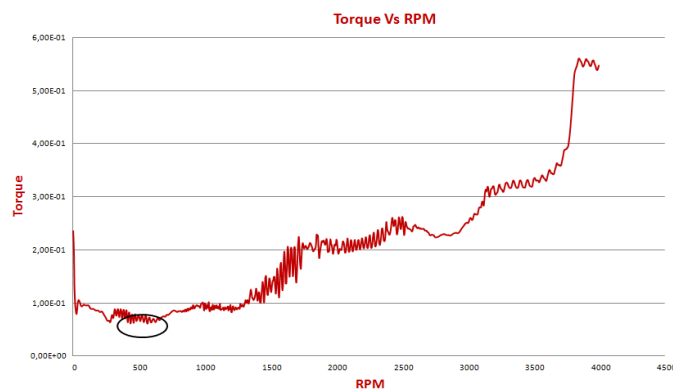
Σχήμα 4.78: Χαρακτηριστικά εκκίνησης στροβίλου για ταχύτητα εισαγωγής 2.36 m/s



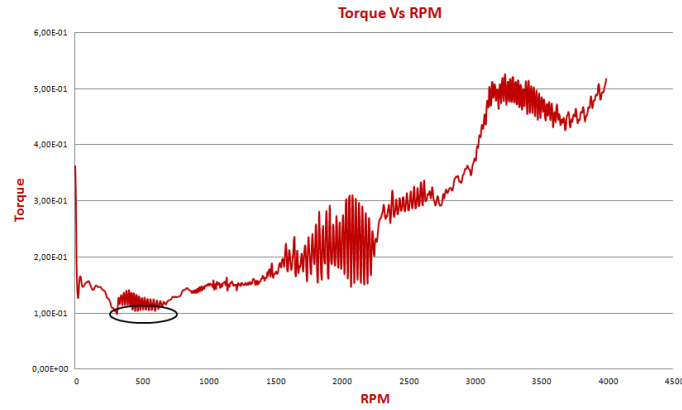
Σχήμα 4.79: Χαρακτηριστικά εκκίνησης στροβίλου για ταχύτητα εισαγωγής 4.36 m/s



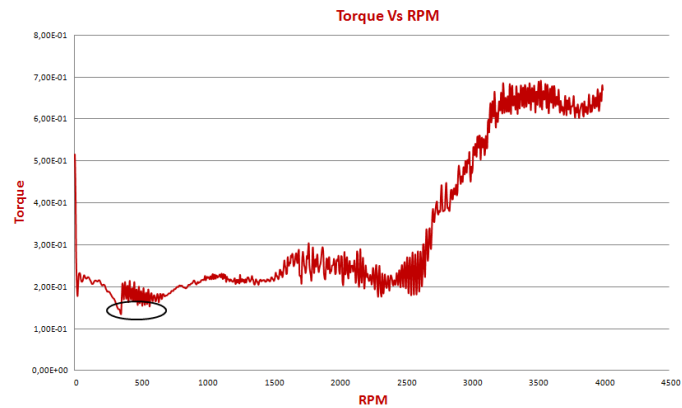
Σχήμα 4.80: Χαρακτηριστικά εκκίνησης στροβίλου για ταχύτητα εισαγωγής 6.72 m/s



Σχήμα 4.81: Χαρακτηριστικά εκκίνησης στροβίλου για ταχύτητα εισαγωγής 8.72 m/s



Σχήμα 4.82: Χαρακτηριστικά εκκίνησης στρόβιλου για ταχύτητα εισαγωγής 10.72 m/s



Σχήμα 4. 83: Χαρακτηριστικά εκκίνησης στρόβιλου για ταχύτητα εισαγωγής 12.72 m/s

Από τα παραπάνω σχήματα λοιπόν, γίνεται αντιληπτό αρχικά πως, η τιμή της παραγόμενης ροπής από τον στρόβιλο φαίνεται να είναι γενικά μικρότερη απ' αυτή που εξάχθηκε από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής ωστόσο, είναι ίδιας τάξης μεγέθους.

Επιπλέον, αν μπορεί να γίνει μια σύγκριση μεταξύ των τιμών της παραγόμενης ροπής για τη χρονική στιγμή όπου ο στρόβιλος έχει περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 4000 rpm, για ταχύτητα εισαγωγής ίση με 8.72 m/s η τιμή της ροπής φαίνεται να είναι μεγαλύτερη απ' ότι για ταχύτητα εισαγωγής ίση με 10.72 m/s. Επομένως, το σημείο απώλειας στήριξης φαίνεται να έρχεται νωρίτερα όταν ο στρόβιλος ξεκινάει από την ακινησία, σε σχέση μ' αυτό που είχαν προβλέψει οι υπολογιστικές προσομοιώσεις κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής. Αυτό κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στα εντονότερα φαινόμενα αποκόλλησης που επικρατούν στις χαμηλότερες περιστροφικές ταχύτητες του στρόβιλου, για ταχύτητα εισαγωγής ίση με 10.72 m/s, με αποτέλεσμα τα εν λόγω φαινόμενα να επηρεάζουν την ανάπτυξη του οριακού στρώματος καθώς αυξάνει η περιστροφική ταχύτητα του. Ίσως αυτός ο σχολιασμός να υποεκτιμάει τη συμπεριφορά του στρόβιλου και απλά να χρειαζόταν περισσότερος χρόνος προκειμένου να αποδώσει τη μέγιστη ροπή του ο στρόβιλος. Όσον αφορά τη χρονική στιγμή όπου ο στρόβιλος έχει περιστροφική ταχύτητα

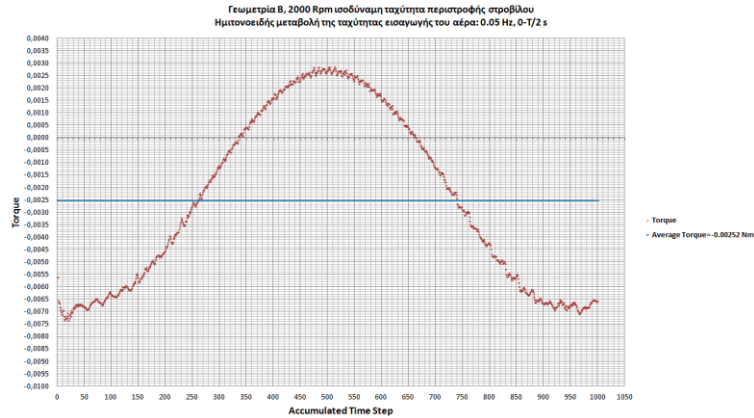
ισοδύναμη με 2000 rpm, για ταχύτητα εισαγωγής ίση με 2.36 m/s, από το Σχήμα 4.78 φαίνεται πως η τιμή της παραγόμενης ροπής από το στρόβιλο είναι αρνητική, σε αντίθεση μ' αυτό που είχαν προβλέψει οι υπολογιστικές προσομοιώσεις κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής. Αυτό σημαίνει πρακτικά πως ο στρόβιλος έχει σταματήσει να περιστρέφεται. Για 2000 rpm περιστροφική ταχύτητα στροβίλου ωστόσο, το σημείο εμφάνισης της απώλειας στήριξης φαίνεται να έρχεται για τον ίδιο συντελεστή ροής μ' αυτόν που είχε εξαχθεί από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής. Το σημείο εμφάνισης της απώλειας στήριξης γίνεται συνήθως αντιληπτό από τις έντονες διακυμάνσεις του μεγέθους της ροπής. Αντιθέτως, για τη χρονική στιγμή όπου ο στρόβιλος έχει περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 3000 rpm, το σημείο εμφάνισης της απώλειας στήριξης φαίνεται να επιτυγχάνεται δύο συντελεστές ροής αργότερα. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι, ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται το οριακό στρώμα πάνω στο περύγιο καθώς μεταβάλλεται η περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου, είναι πολύ διαφορετικός απ' αυτόν για μόνιμες συνθήκες ροής. Συνεπώς, δεν πρέπει να προκαλεί σύγχυση στον αναγνώστη η εν λόγω περιγραφή.

Στη συνέχεια, στα παραπάνω σχήματα έχει σημειωθεί με μαύρο κύκλο η περιοχή όπου παρουσιάζονται οι μικρότερες τιμές της ροπής κατά την εκκίνηση της περιστροφής του στροβίλου, για κάθε ταχύτητα εισαγωγής. Θεωρείται πως κατά το πέρασμα από τις περιοχές αυτές, ο συντελεστής της εφαπτομενικής δύναμης είναι αρνητικός και συνεπώς, στις εν λόγω περιοχές ίσως λαμβάνει χώρα το φαινόμενο crawling, όπως αυτό έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο της εισαγωγής. Για ταχύτητα εισαγωγής μάλιστα, ίση με 2.36 m/s, στην περιοχή που σημειώνεται, η τιμή της ροπής είναι αρνητική. Στα CFD, η περιοχή αυτή φαίνεται να μπορεί να ξεπεραστεί και γι' αυτό ο στρόβιλος οδηγείται στην ανάπτυξη μεγαλύτερης ταχύτητας περιστροφής. Όπως θα φανεί και στο κεφάλαιο 5, όπου θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις από τις δοκιμές του στροβίλου στην αεροσήραγγα, οι περιοχές αυτές εν τέλει δεν φαίνεται να είναι τυχαίες. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα εισαγωγής του αέρα, μειώνεται και η ροπή εκκίνησης του στροβίλου ενώ, οι τιμές της ροπής στις αναφερόμενες περιοχές, δεν είναι πλέον τόσο μικρές.

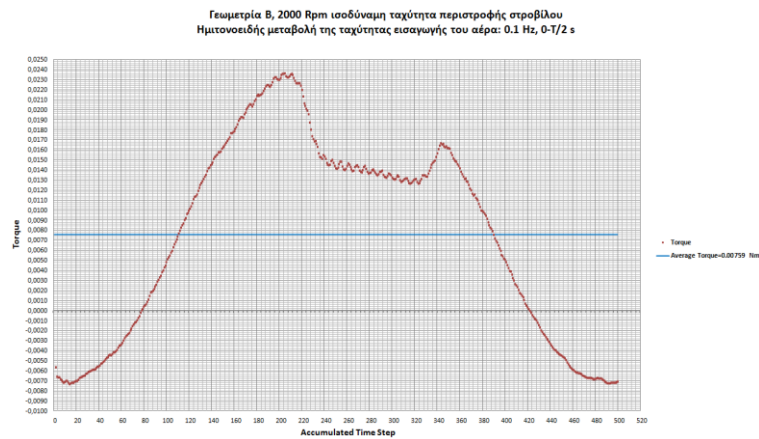
4.4.2 Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4.84-Σχήμα 4.91) απεικονίζεται η χρονικά μεταβαλλόμενη παραγόμενη ροπή του στροβίλου (Γεωμετρίας Β), ως προς τον άξονα περιστροφής του, κάτω από την ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα, για χρονικό διάστημα μισής περιόδου. Ο χρόνος ολοκλήρωσης των υπολογιστικών προσομοιώσεων κάτω από τις συνθήκες που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα, ήταν πολύ μεγάλος. Για τον λόγο αυτό, αποφασίστηκε αρχικά να πραγματοποιηθούν για χρόνο $T/2$ s, με σκοπό κυρίως την καταγραφή των φαινομένων υστέρησης που λαμβάνουν χώρα. Οι

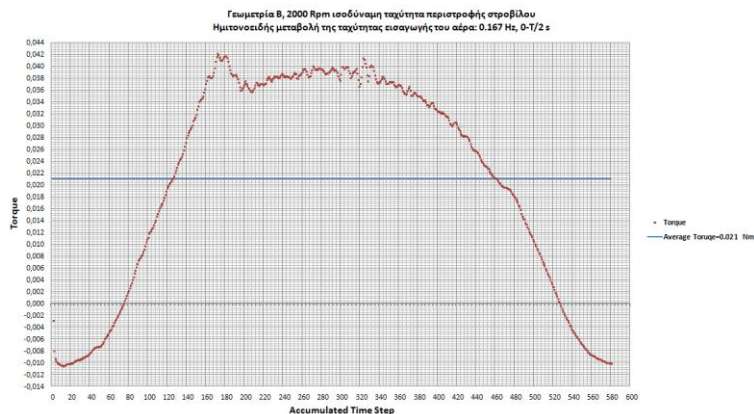
συχνότητες και τα πλάτη ταλάντωσης σύμφωνα με τα οποία ολοκληρώθηκαν οι εν λόγω υπολογιστικές προσομοιώσεις, όπως σχολιάστηκε και παραπάνω, δίνονται στο Σχήμα 5.20. Στα παρακάτω σχήματα με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η παραγόμενη ροπή συναρτήσει του χρόνου και με μπλέ χρώμα η μέση τιμή της.



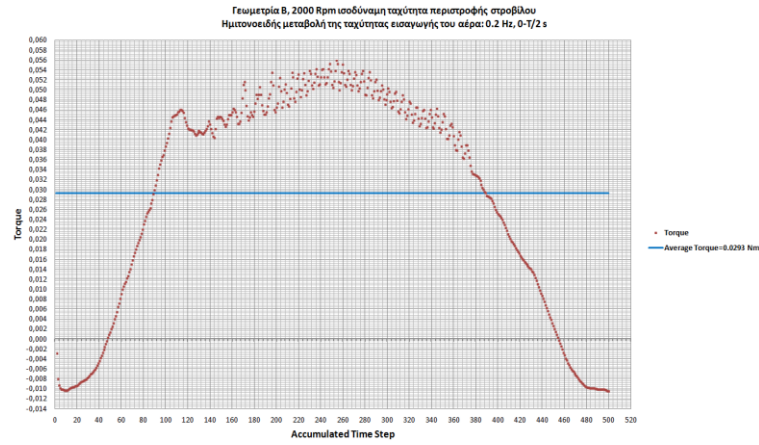
Σχήμα 4.84: Παραγόμενη ροπή στροβίλου γεωμετρίας B με ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής 2000 Rpm- Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.05 Hz-Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s



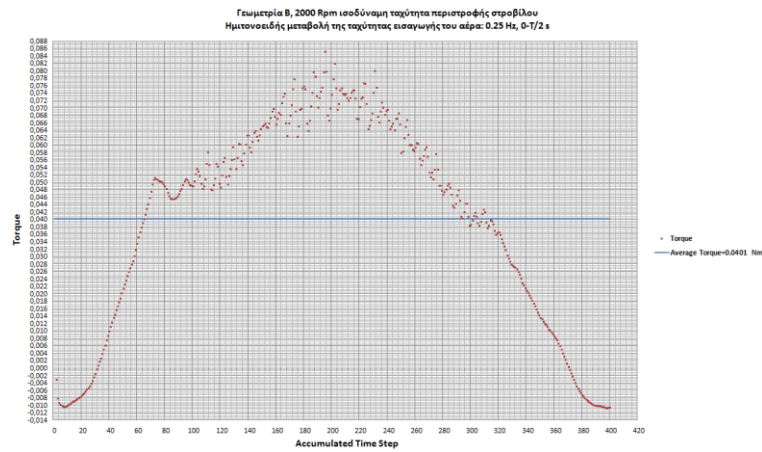
Σχήμα 4.85: Παραγόμενη ροπή στροβίλου γεωμετρίας B με ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής 2000 Rpm- Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.1 Hz-Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s



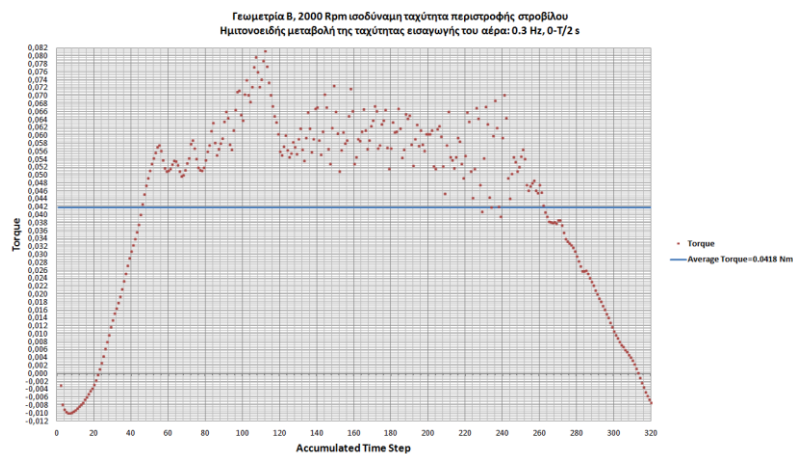
Σχήμα 4.86: Παραγόμενη ροπή στροβίλου γεωμετρίας B με ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής 2000 Rpm- Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.167 Hz-Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s



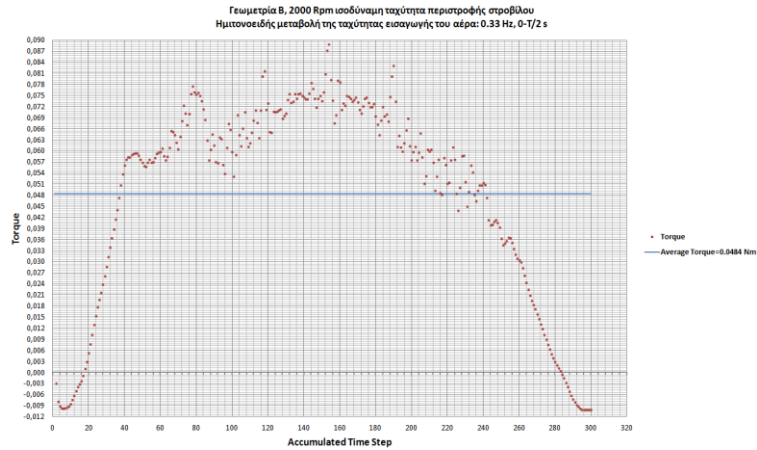
Σχήμα 4.87: Παραγόμενη ροπή στροβίλου γεωμετρίας Β με ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής 2000 Rpm- Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.2 Hz-Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s



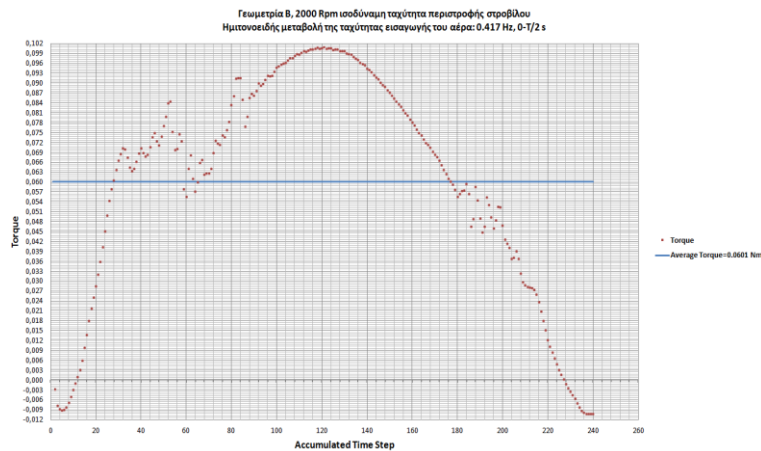
Σχήμα 4.88: Παραγόμενη ροπή στροβίλου γεωμετρίας Β με ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής 2000 Rpm- Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.25 Hz-Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s



Σχήμα 4.89: Παραγόμενη ροπή στροβίλου γεωμετρίας Β με ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής 2000 Rpm- Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.3 Hz-Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s



Σχήμα 4.90: Παραγόμενη ροπή στροβίλου γεωμετρίας B με ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής 2000 Rpm- Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.33 Hz-Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s

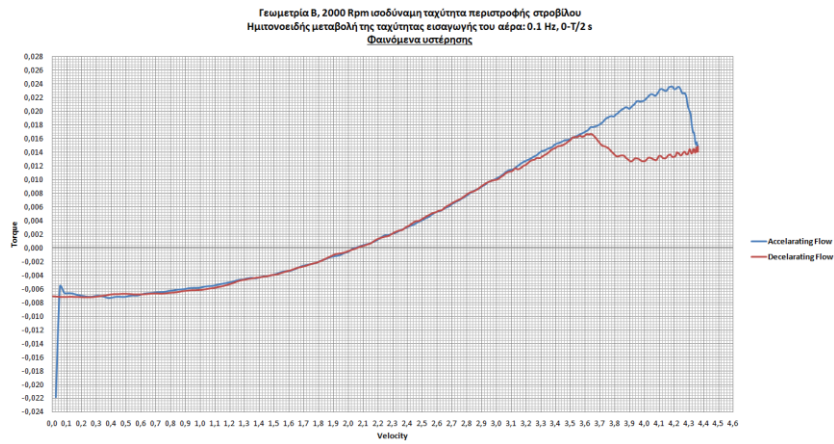


Σχήμα 4.91: Παραγόμενη ροπή στροβίλου γεωμετρίας B με ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής 2000 Rpm- Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.417 Hz-Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s

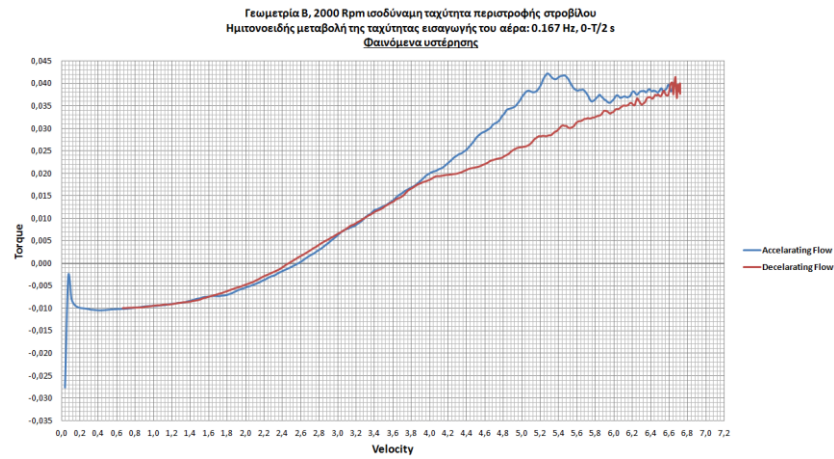
Μπορεί κανείς να παρατηρήσει λοιπόν πως, ο στρόβιλος Wells παράγει μια μέση θετική ροπή για συχνότητες μεγαλύτερες από 0.05 Hz. Ωστόσο, για συχνότητες μεγαλύτερες από 0.167 Hz παρατηρείται μεγάλη διασπορά των σημείων που καθορίζουν την καμπύλη της ροπής. Όπως έχει ήδη σχολιαστεί, αυτό μπορεί να συσχετιστεί με την εμφάνιση φαινομένων ακραίας αποκόλλησης.

Στη συνέχεια, στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4.92-Σχήμα 4.98) απεικονίζονται τα φαινόμενα υστέρησης που λαμβάνουν χώρα κάτω από την ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα. Τα εν λόγω φαινόμενα παρατηρήθηκαν με την καταγραφή της χρονικά μεταβαλλόμενης παραγόμενης ροπής, όπως αυτή παρουσιάστηκε παραπάνω, συναρτήσει της ταχύτητας εισόδου του αέρα. Τα φαινόμενα υστέρησης γίνονται αντιληπτά κατά την εναλλαγή της κατάστασης της ροής του αέρα από επιταχυνόμενη (accelarating flow) σε επιβραδυνόμενη (decelarating flow). Στα παρακάτω σχήματα λοιπόν, για χρόνο μισής περιόδου, η επιταχυνόμενη ροή σημειώνεται με μπλέ χρώμα και η επιβραδυνόμενη με κόκκινο. Όπως σχολιάστηκε παραπάνω, για συχνότητα ταλάντωσης του αέρα ίση με 0.05 Hz, ο στρόβιλος Wells παράγει μια μέση αρνητική ροπή

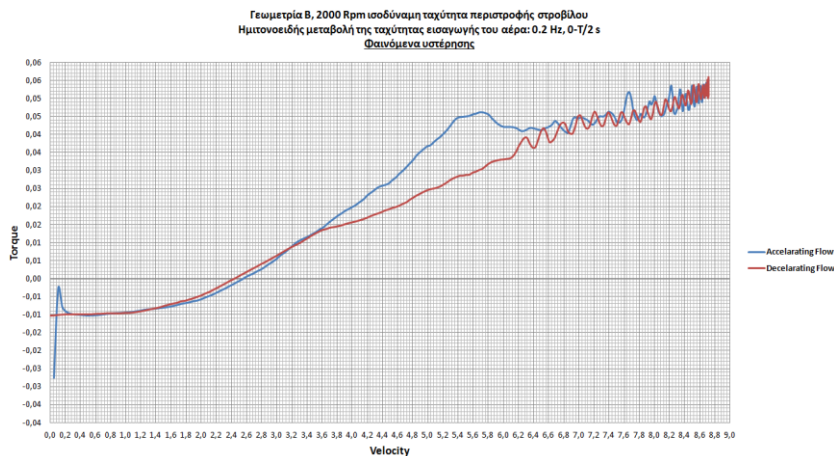
και για το λόγο αυτό, δε θα σχολιαστούν τα φαινόμενα υστέρησης σ' αυτήν την περίπτωση.



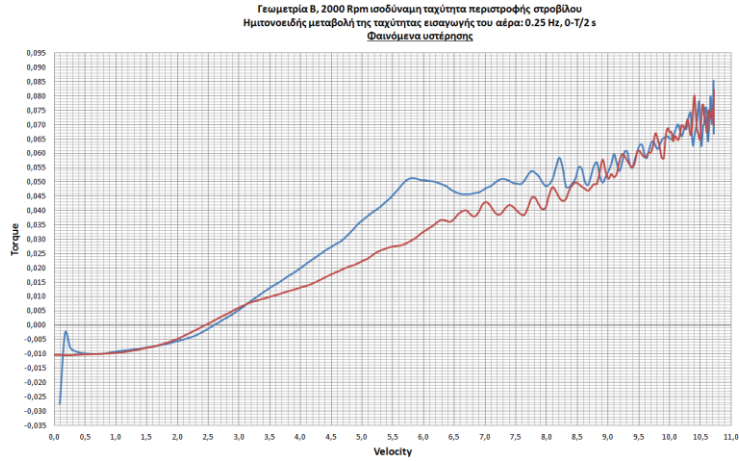
Σχήμα 4.92: Φαινόμενα υστέρησης-Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.1 Hz- Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s



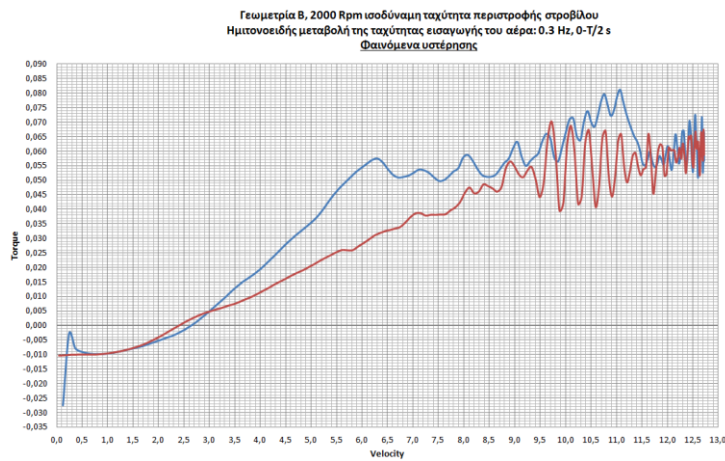
Σχήμα 4.93: Φαινόμενα υστέρησης-Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.167 Hz- Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s



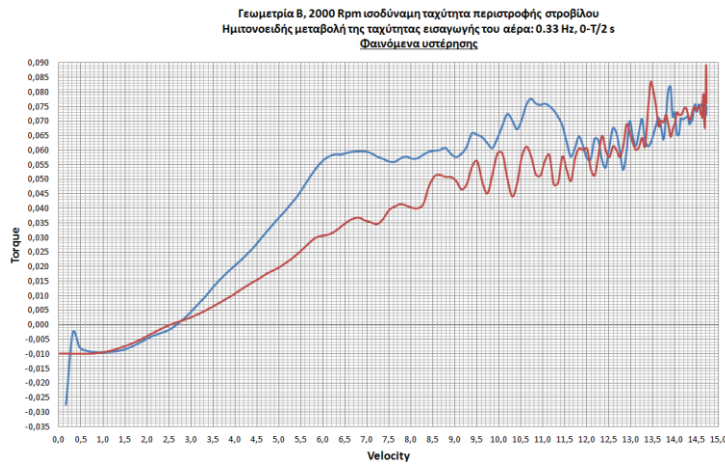
Σχήμα 4.94: Φαινόμενα υστέρησης-Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.2 Hz- Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s



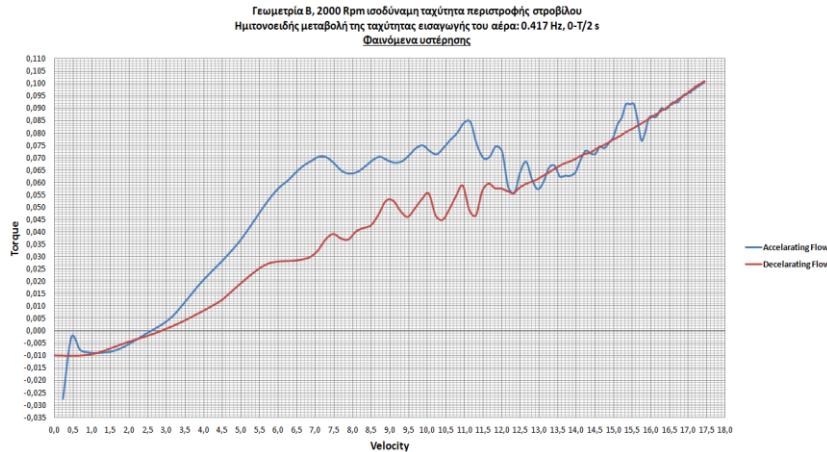
Σχήμα 4.95: Φαινόμενα υστέρησης-Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.25 Hz- Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s



Σχήμα 4.96: Φαινόμενα υστέρησης-Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.3 Hz- Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s



Σχήμα 4.97: Φαινόμενα υστέρησης-Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.33 Hz- Χρονικό διάστημα: 0-T/2 s



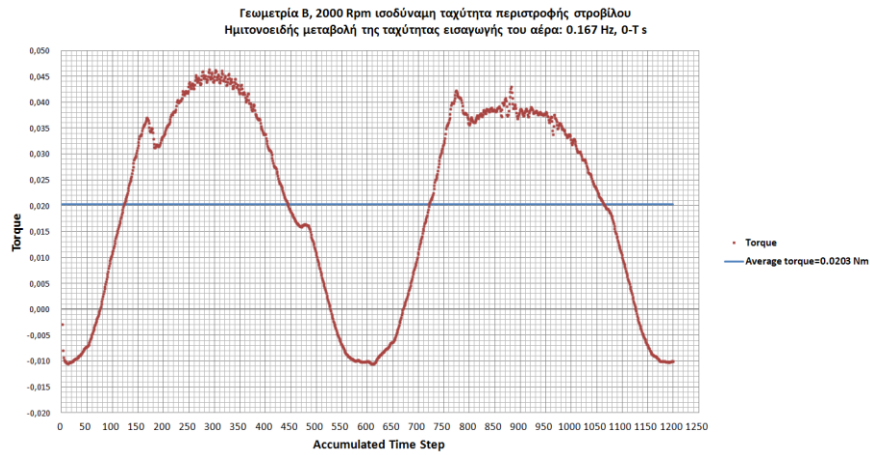
Σχήμα 4.98: Φαινόμενα υστέρησης-Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.417 Hz- Χρονικό διάστημα: 0-Τ/2 s

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει λοιπόν πως, για όλες τις συνθήκες που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα, κατά τη μετάβαση της ροής του αέρα από επιταχυνόμενη σε επιβραδυνόμενη κατάσταση, παρουσιάζεται μια δεξιόστροφη κλειστή διαδρομή, η οποία συνδέεται άμεσα με την ύπαρξη φαινομένων αποκόλλησης καθώς και με την εμφάνιση του φαινομένου της απώλειας στήριξης του πτερυγίου. Στη βιβλιογραφία ωστόσο, έχει παρατηρηθεί πολλάκις και αντίστοιχη αριστερόστροφη κλειστή διαδρομή, η οποία δε συνδέεται άμεσα με την εμφάνιση φαινομένων ακραίας αποκόλλησης, σύμφωνα με τους διάφορους μελετητές, αλλά με τον ιδιαίτερο τρόπο με τον οποίο αναπτύσσεται το οριακό στρώμα πάνω στο πτερύγιο.

Στη συνέχεια της μελέτης της συμπεριφοράς του στροβίλου Wells κάτω από την ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα, η ικανότητα του στροβίλου να λειτουργεί κάτω από συνθήκες αντιστρεπτής ροής παράγοντας εν τέλει μια μέση θετική ροπή σ' έναν κύκλο ταλάντωσης, μπορεί να αποδειχτεί άμεσα από το Σχήμα 4.99. Στο συγκεκριμένο σχήμα καταγράφεται η χρονικά μεταβαλλόμενη παραγόμενη ροπή, κάτω από την ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.167 Hz, σε αντιστοιχία με το Σχήμα 4.86, μόνο που αυτή τη φορά η μελέτη της συμπεριφοράς του στροβίλου γίνεται για χρόνο μιας περιόδου. Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις κάτω απ' αυτές τις συνθήκες απαιτούσαν ακόμα περισσότερο χρόνο και γι' αυτό δεν υπήρχε η δυνατότητα να ολοκληρωθούν για όλες τις συχνότητες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.20.

Επιπλέον, όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.99), οι καμπύλες που δημιουργούνται δεν είναι ίδιες μεταξύ τους. Η αριστερή καμπύλη, η οποία προκύπτει από την ροή του αέρα ανάντη του ρότορα, έχει μεγαλύτερο μέγιστο από τη δεξιά καμπύλη, η οποία προκύπτει από την ροή του αέρα κατάντη του ρότορα. Θεωρητικά οι δύο καμπύλες έπρεπε να είναι πανομοιότυπες όμως, πρακτικά, η αδράνεια του αέρα και ο τρόπος με τον

οποίο αναπτύσσεται το οριακό στρώμα πάνω στα πτερύγια δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα.



Σχήμα 4.99: Παραγόμενη ροπή στροβίλου γεωμετρίας B με ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής 2000 Rpm- Ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου του αέρα με συχνότητα 0.167 Hz-Χρονικό διάστημα: 0-T s

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Ανάπτυξη πρότυπης συσκευής και πειραματική διερεύνηση

Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις μπορεί να είναι ένα εργαλείο το οποίο στις μέρες μας χρήζει ευρείας εφαρμογής, και αυτό γιατί η εγκατάσταση μιας πειραματικής διάταξης είναι όχι μόνο κοστοβόρα αλλά και χρονοβόρα ωστόσο, κανείς δεν μπορεί να αμφισβητήσει το γεγονός ότι η πειραματική διαδικασία γενικά τείνει στο τέλος να δώσει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Η λιγοστή εμπειρία στις υπολογιστικές προσομοιώσεις ειδικά, μπορεί να υποεκτιμήσει κατά πολύ τα πραγματικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη προβλήματος. Ακόμη και μια βέλτιστη υπολογιστική διαδικασία έχει δείξει πως δεν αρκεί για τη μελέτη των διάφορων προβλημάτων αφού, σε εικονικό περιβάλλον δεν λαμβάνονται υπόψη οι απόλυτα πραγματικές συνθήκες που επικρατούν. Βέβαια και η εγκατάσταση μιας πειραματικής διάταξης κρύβει πολλές δυσκολίες, οι οποίες τελικά μπορούν να οδηγήσουν σε όχι και τόσο έμπιστες μετρήσεις.

Έχοντας λοιπόν ολοκληρώσει τις βασικές υπολογιστικές προσομοιώσεις, οι οποίες αφορούν την εξαγωγή των χαρακτηριστικών του στροβίλου Wells κάτω από μόνιμες και μη μόνιμες συνθήκες ροής, υπήρξε η δυνατότητα κατασκευής της γεωμετρίας B προκειμένου να μελετηθεί και πειραματικά. Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, συμφωνήθηκε η πειραματική διάταξη στο σύνολο της να μπορεί να πραγματοποιήσει και τον έλεγχο του στροβίλου Wells κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής. Για τον λόγο αυτό, η πραγματοποίηση των πειραμάτων χωρίστηκε σε δύο σκέλη. Το πρώτο σκέλος αφορά τον έλεγχο του στροβίλου με τη δοκιμή του σε αεροσήραγγα κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής ενώ, το δεύτερο σκέλος αναφέρεται στον έλεγχο του στροβίλου κάτω από σχεδόν ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου και συνεπώς, η εν λόγω μελέτη αφορά μη μόνιμες συνθήκες ροής.

Η κατασκευή της συνολικής πειραματικής διάταξης προσαρμόστηκε σύμφωνα με τις δυνατότητες του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας να στηρίξει μια τέτοια προσπάθεια αλλά και με τις δυνατότητες που είχε η βιομηχανία να κατασκευάσει σε ένα προσιτό ποσό τα απαραίτητα αντικείμενα που απαρτίζουν την πειραματική διάταξη. Ακόμα και στα μεγαλύτερα μηχανουργεία η κατασκευή μερικών, δύσκολα κατεργάσιμων, αντικειμένων είναι είτε αδύνατη και έτσι, πρέπει να προσαρμόζονται μερικά χαρακτηριστικά των εκάστοτε αντικειμένων, προκειμένου να κατασκευαστούν τα εν λόγω με ευκολότερο τρόπο, είτε οικονομικά απρόσιτη. Με βάση τα παραπάνω και με γνώμονα την κατασκευή

της πειραματικής διάταξης με όσο γίνεται χαμηλότερο κόστος, τελικά ολοκληρώθηκε η εγκατάσταση της στο εργαστήριο στροβιλομηχανών του Πανεπιστημίου.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως, στην παρούσα πειραματική διάταξη συναντάται μια καινοτομία, με την έννοια ότι μερικά χαρακτηριστικά της δεν εμφανίζονται σε πειραματικές εγκαταστάσεις της βιβλιογραφίας. Όλα τα παρελκόμενα του στροβίλου Wells μαζί με τον ίδιο, κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τον τρισδιάστατο εκτυπωτή που διαθέτει το Πανεπιστήμιο. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής παίρνει ως εισαγωγή τα σχέδια που έχουν εξαχθεί από το πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκε, που στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας όπως έχει αναφερθεί είναι το λογισμικό Solidworks, και τα εκτυπώνει με πολύ υψηλή διαστατική ακρίβεια. Η αρχική σκέψη ήταν να εκτυπωθεί μόνο ο ρότορας και τα πτερύγια αλλά στη συνέχεια, λόγω οικονομικού κόστους, συμφωνήθηκε πως είναι οικονομικά επικερδές να εκτυπωθούν και τα αντικείμενα που πλαισιώνουν τον στρόβιλο. Ωστόσο, η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν είναι ούτε απλή διαδικασία ούτε γρήγορη καθώς, μπορεί να πάρει αρκετές μέρες προκειμένου να δημιουργηθούν τα αντικείμενα ενώ, μέσα σ' αυτές τις μέρες μπορούν να προκύψουν κάποια προβλήματα που βάζουν σε αναμονή την όλη διαδικασία. Παρόλ' αυτά, εκ του αποτελέσματος αξίζει να εφαρμόζεται μια τέτοια μέθοδος, η οποία παρέχει εντυπωσιακά αντικείμενα έτοιμα προς λειτουργία.

Στη συνέχεια, η κατασκευή των υπόλοιπων αντικειμένων που απαιτούνταν, έγινε σε ένα ξυλουργείο και σε δύο μηχανουργεία. Συγκεκριμένα, η ξύλινη κατασκευή αφορά ένα κουτί μέσα στο οποίο θα κινείται ένα ξύλινο έμβολο, τα οποία σχεδιάστηκαν με σκοπό τον έλεγχο της συμπεριφοράς του στροβίλου σε μη μόνιμες συνθήκες ροής ενώ, σε μηχανουργεία κατασκευάστηκαν τα αντικείμενα που θα κινούν το ξύλινο έμβολο καθώς και ο διαχύτης που τοποθετήθηκε στην έξοδο του σωλήνα, ο οποίος με τη σειρά του είναι από plexiglass.

Όλα τα παραπάνω αντικείμενα που αποτελούν την πειραματική διάταξη θα αναλυθούν πρώτα στο παρόν κεφάλαιο ενώ στο τέλος, θα παρουσιαστούν τα πειραματικά αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων.

5.1 Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης

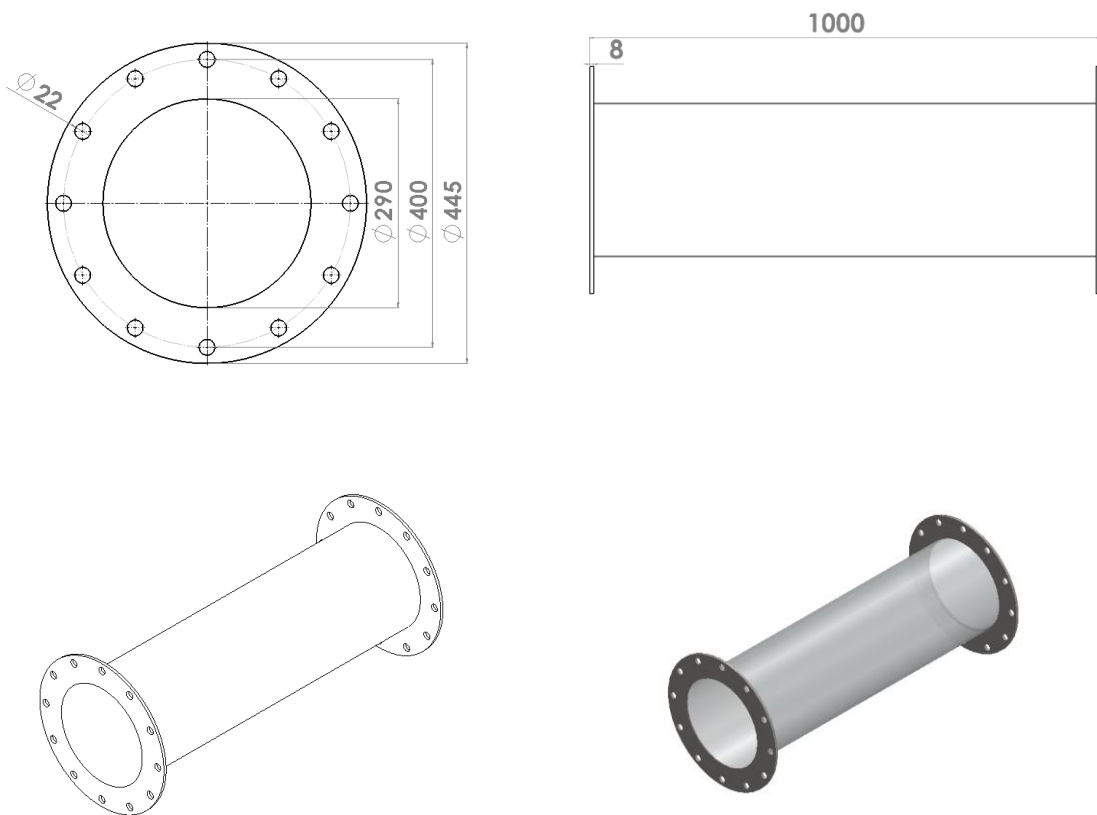
5.1.1 Σχεδιασμός κελύφους

Όπως είχε σχολιαστεί στο κεφάλαιο 3, η επιλογή της κλίμακας της γεωμετρίας που θα μελετηθεί είχε γίνει βάσει της δυνατότητας του Πανεπιστημίου να στηρίξει οικονομικά την κατασκευή της πειραματικής διάταξης. Έτσι, εξ αρχής είχε γίνει μια συμφωνία πως το καταλληλότερο και οικονομικά συμφέρον μέγεθος ήταν αυτό που είχε παρουσιαστεί στο

κεφάλαιο 3 (Πίνακας 3.1) και το οποίο είχε εξαχθεί για μια διάμετρο κελύφους 290 mm. Όσον αφορά τον τρόπο απόκτησης του σωλήνα με τη συγκεκριμένη διάμετρο, πρέπει να σημειωθεί πως υπήρχαν ελάχιστες εναλλακτικές λύσεις. Αυτό γιατί, η αναζήτηση γινόταν με γνώμονα την ακρίβεια και την ομοιομορφία της διαμέτρου της σ' όλο το μήκος του καθώς, η απόσταση της κορυφής του περυγίου από το τοίχωμα του έπρεπε να είναι 1 mm. Γενικά, η απαίτηση μιας τέτοιου μεγέθους ακρίβειας είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί και πολλά μηχανουργεία αρνούνται να πάρουν το ρίσκο κατασκευής του ή ζητούσαν τεράστια χρηματικά ποσά. Το μήκος του σωλήνα αρχικά ήταν περίπου ίσο με 2 m ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν ήταν εφικτό, τουλάχιστον σε ότι αφορά την κατασκευή του με κάποιου είδους κατεργασία. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερος είναι ο σωλήνας τόσο πιο δύσκολα θα μπορούσε να σταθεροποιηθεί ο στρόβιλος με τα παρελκόμενα του εντός του.

Σε ότι αφορά το υλικό που θα κατασκευαζόταν το κέλυφος, οι επιλογές ήταν τρεις. Η πρώτη ήταν η κατασκευή του από σίδηρο με κατεργασία στον τόρνο, προκειμένου να αποκτήσει την επιθυμητή κυλινδρική διατομή. Σ' αυτήν την περίπτωση το μήκος του σωλήνα είχε πέσει στο 1 m, προκειμένου να γίνει ελάφρυνση της όλης διαδικασίας. Παρόλ' αυτά, ήταν και πάλι πολύ δύσκολο για το μηχανουργείο να πραγματοποιήσει μια τέτοια κατεργασία στο μήκος αυτό. Έτσι, ο σωλήνας έπρεπε να γίνει αποσπώμενος με κάποιου είδους ένωση, τύπου φλάτζας. Η ακρίβεια που έδινε το μηχανουργείο μ' αυτόν τον τρόπο κατεργασίας ήταν 0.01 mm, το οποίο ήταν προφανώς το ελάχιστο. Ωστόσο, το ποσό ήταν υπέρογκο και ο χρόνος που απαιτούνταν, για την ολοκλήρωση της κατασκευής του, ήταν πολύ μεγάλος. Συνεπώς, ακολούθησε η δεύτερη εναλλακτική επιλογή του υλικού, η οποία αφορούσε την κατασκευή του σωλήνα από λαμαρίνα. Η λαμαρίνα ως υλικό θα μπορούσε να κοπεί και να γυριστεί στον κύλινδρο αλλά η επιθυμητή ακρίβεια είναι δύσκολο να επιτευχθεί και θέλει ιδιαίτερη προσοχή από τον τεχνήτη. Επιπλέον, κατά την κόλληση της λαμαρίνας, ακόμα και για το μεγαλύτερο πάχος αυτής, η όποια ακρίβεια θα χανόταν καθώς, θα στράβωνε σε σημεία. Έχοντας απορρίψει τις παραπάνω επιλογές, η τελευταία λύση ήταν η αγορά ενός σωλήνα ο οποίος έχει κατασκευαστεί από plexiglass. Ο έμπορος είχε διαβεβαιώσει το Πανεπιστήμιο πως, ο σωλήνας θα έχει εσωτερική διάμετρο ακριβώς ίση με 290 mm. Ως εκ τούτου, πραγματοποιήθηκε η αγορά του σωλήνα από plexiglass. Τελικά όμως, ο σωλήνας παρουσίαζε πάρα πολλές ανομοιομορφίες στο εσωτερικό του με αποτέλεσμα, η πειραματική διαδικασία να εξελιχτεί με πολλά προβλήματα, τα οποία θα παρουσιαστούν παρακάτω. Η αγορά ενός σωλήνα από plexiglass ήταν η δεύτερη οικονομικότερη λύση. Τα σχέδια του σωλήνα ήταν πολύ απλά ενώ, τελικά, έχει μήκος 1 m με δύο φλάτζες στα πρόσωπα αυτού. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.1) μπορεί κανείς να δει τα εν λόγω σχέδια μαζί με τις σημειωμένες διαστάσεις

των φλατζών, οι οποίες τοποθετήθηκαν στον σωλήνα με σκοπό τη σύνδεση του με το κουτί και τον διαχύτη, τα σχέδια των οποίων θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.



Σχήμα 5.1: Σχέδια κελύφους

Οι διαστάσεις στο παραπάνω σχήμα είναι προφανώς όλες σε mm. Όσον αφορά την φλάτζα αποφασίστηκε να έχει δώδεκα οπές διαμέτρου 22 mm η καθεμία. Όπως έγινε αντιληπτό στη συνέχεια, οι οπές αυτές τόσο σε αριθμό όσο και σε διάμετρο ήταν υπερβολικές αλλά, δεν δημιούργησαν κάποιο πρόβλημα. Οι οπές αυτές έγιναν σε διάμετρο ίση με 400 mm. Το πάχος της φλάτζας ήταν το μέγιστο που μπορούσε να φτιάξει ο έμπορος, από τον οποίο έγινε η αγορά του σωλήνα και των φλατζών και το οποίο ισούται με 8 mm. Το σχήμα στο οποίο θα φαίνεται ο σωλήνας όπως αγοράστηκε θα παρουσιαστεί προς το τέλος του κεφαλαίου, με την εγκατάσταση του στροβίλου εντός του.

5.1.2 Σχεδιασμός ρότορα και πτερυγίων

Όπως μπορεί κανείς να φανταστεί, ο σχεδιασμός του στροβίλου με σκοπό την εισαγωγή του στο λογισμικό ANSYS διαφέρει από τον βιομηχανικό σχεδιασμό του στροβίλου, ο οποίος πρόκειται να συναρμολογηθεί εκ του μηδενός, με τελικό σκοπό την άρτια λειτουργία του. Ο σχεδιασμός του στροβίλου συνολικά αποτελούνταν από επτά αντικείμενα, τα δύο αποσπώμενα μέρη του ρότορα, τα τέσσερα πτερύγια, τα οποία θα στηρίζονταν εντός του ρότορα και ένα επιπλέον κομμάτι που θα σχολιαστεί παρακάτω.

Όλα τα εν λόγω αντικείμενα κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Όσον αφορά τα δύο αποσπώμενα μέρη του ρότορα, είναι ίσα σε πάχος ως προς τις μεγαλύτερες διαμέτρους τους. Ο τρόπος σύνδεσης των δύο αποσπόμενων μερών του ρότορα έγινε χρησιμοποιώντας συνολικά οχτώ βίδες και αντίστοιχα παξιμάδια, δύο σε κάθε περιοχή όπου τοποθετούνταν ένα πτερύγιο. Για τον σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν οχτώ οπές, διαμέτρου 5mm, σε κάθε ένα αποσπώμενο κομμάτι του ρότορα. Στη συνέχεια, εντός του ρότορα, προκειμένου να αφαιρεθεί υλικό και συνεπώς, να μειωθεί το κόστος της τρισδιάστατης εκτύπωσης, σχεδιάστηκαν κάποιου είδους αυλακώσεις χωρίς αυτές να έχουν κάποιον επιπλέον λειτουργικό ρόλο. Σε ότι αφορά το κόστος της τρισδιάστατης εκτύπωσης, αυτό υπολογίζεται βάσει του όγκου, σε μονάδες cm^3 , του υλικού που εκτυπώνεται. Προκειμένου να μειωθεί αυτό το κόστος έγιναν κι άλλες ενέργειες, οι οποίες αφορούν τα υπόλοιπα αντικείμενα που εκτυπώθηκαν και οι οποίες θα συζητηθούν παρακάτω. Οι διαφορές μεταξύ των δύο αποσπόμενων μερών του ρότορα έγκειται στο ότι το μπροστινό κομμάτι είχε μια κυλινδρική προέκταση, προκειμένου να εισχωρήσει σ' αυτή το πίσω κομμάτι του ρότορα. Επιπλέον, επάνω στην αυτή κυλινδρική προέκταση σχεδιάστηκε μια ακόμα οπή, διαμέτρου πάλι 5 mm, με σκοπό η βίδα που θα περάσει να κρατάει σταθερό τον άξονα που θα χρησιμοποιηθεί και ο οποίος στην ουσία μεταφέρει το μηχανικό έργο λόγω της περιστροφής του στροβίλου στην έξοδο του σωλήνα και συνεπώς, θα αποτελέσει την περιοχή των μετρήσεων, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της ροπής και της ταχύτητας περιστροφής. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως στο τέλος του άξονα δεν τοποθετήθηκε κάποιου είδους γεννήτρια καθώς, η προβλεπόμενη παραγώμενη ισχύς φαινόταν να είναι ανίκανη να περιστρέψει το δρομέα της γεννήτριας ή και σε περίπτωση που το έκανε θα υπήρχαν μεγάλες απώλειες, λόγω του μεγαλύτερου φορτίου.

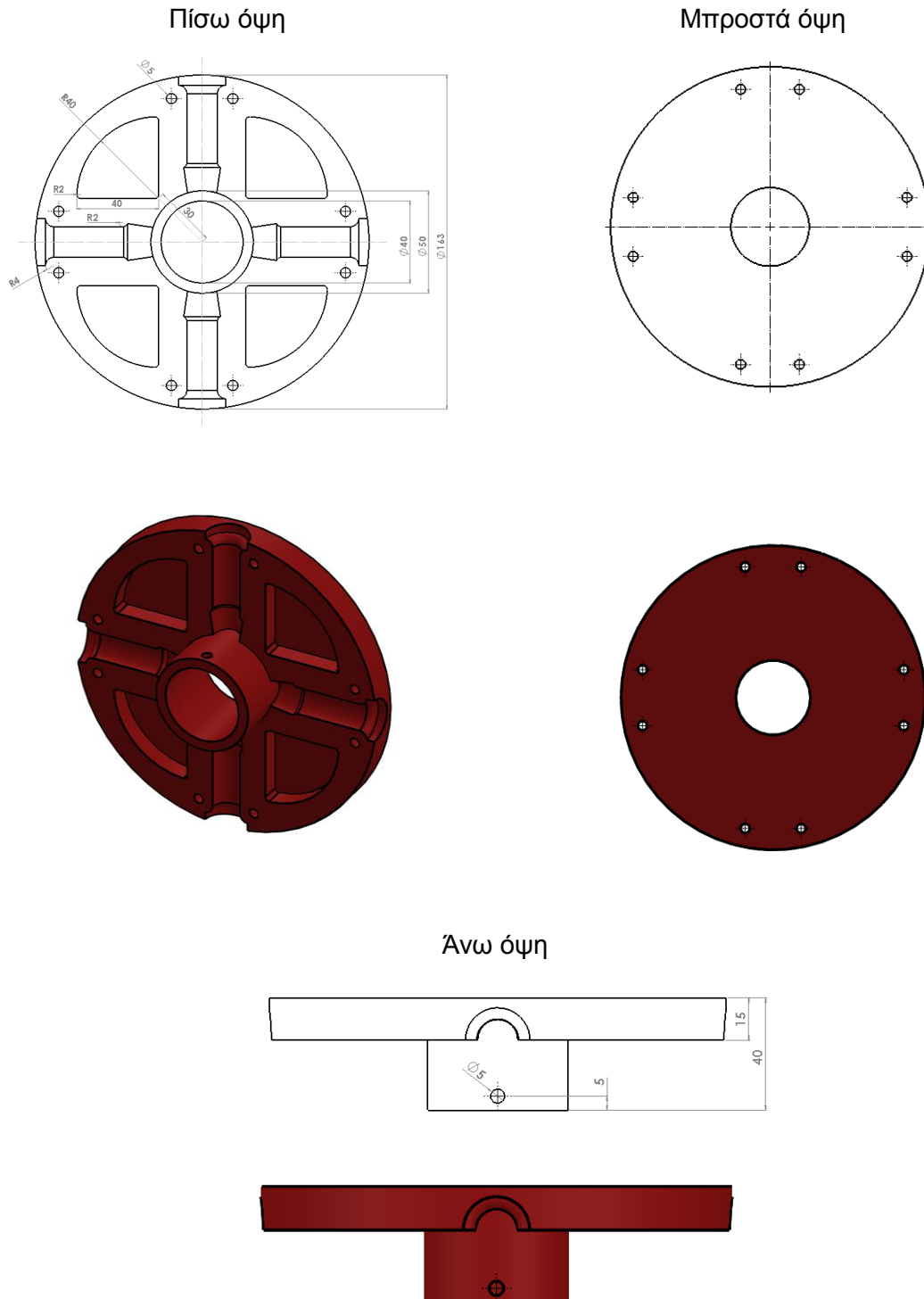
Αναφορικά με τον άξονα, στην αρχή είχε επιλεχτεί να είναι μεγάλης διαμέτρου, 40 mm, κυλινδρικής μορφής ενώ, ήταν από βαρύ μέταλλο. Όπως ίσως αντιλαμβάνεται κανείς, η ροπή αδράνειας του συγκεκριμένου άξονα θα ήταν αρκετά μεγάλη, συγκριτικά με την ικανότητα που θα είχε ο στρόβιλος να τον περιστρέψει. Η επιλογή ενός τέτοιου μεγέθους άξονα λοιπόν, ακόμα και αν ο στρόβιλος κατάφερνε να γυρίσει τελικά, θα οδηγούσε σε μεγάλες απώλειες και σε λανθασμένα συμπεράσματα. Όσον αφορά την ικανότητα του στροβίλου να παράγει ένα συγκεκριμένο μέγεθος ροπής, ως προς τον άξονα περιστροφής του, είχε ληφθεί μια πρώτη άποψη από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις οι οποίες παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρόλο που είχε αποκτηθεί λοιπόν, μια πρώτη εικόνα του μεγέθους της παραγώμενης ροπής από το στρόβιλο, δεν λήφθηκε υπόψη εξ' αρχής η ροπή αδράνειας του άξονα. Έτσι, αρχικά όλες οι διαστάσεις που

αφορούν το πέρασμα του άξονα από αντικείμενα όπως, ο ρότορας ή όπως θα φανεί παρακάτω οι βάσεις στήριξης του άξονα και ο ένας εκ των δύο αεροδυναμικών κώνων, σχεδιάστηκαν με την εν λόγω διάμετρο άξονα, των 40 mm. Αυτή η λανθασμένη επιλογή έγινε αντιληπτή και προκειμένου να διορθωθεί πραγματοποιήθηκαν κάποιες επιπλέον εκτυπώσεις μικρών κομματιών, προκειμένου να προσαρμοστεί η νέα διάμετρος του καινούργιου άξονα που επιλέχτηκε, ο οποίος τελικά έχει διάμετρο 10 mm και είναι από αλουμίνιο, το οποίο είναι περίπου τρεις φορές ελαφρύτερο από τον προηγούμενο άξονα σιδήρου. Στην παρούσα ενότητα, όπου παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του στροβίλου θα σχολιαστεί μόνο το ένα επιπλέον τεμάχιο, το οποίο χρειάστηκε να μπει στην κυλινδρική διατομή του. Σχετικά με τον σχεδιασμό του συγκεκριμένου επιπρόσθετου τεμαχίου, πραγματοποιήθηκε αφαίρεση μεγάλου μέρους του εσωτερικού του προκειμένου να μειωθεί το κόστος της τρισδιάστατης εκτύπωσης, το οποίο σχολιάστηκε προηγουμένως.

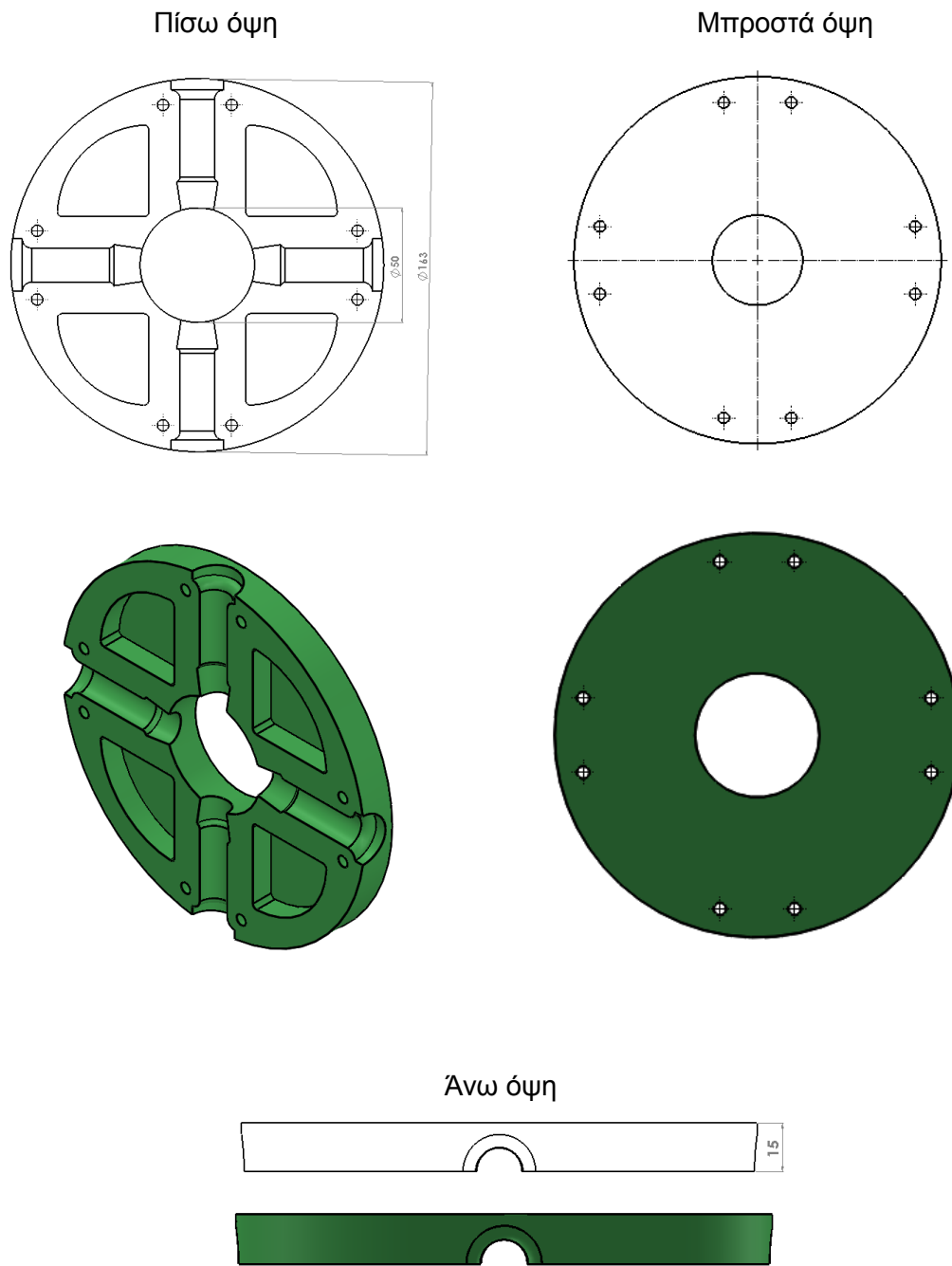
Όσον αφορά τα πτερύγια, έπρεπε προφανώς να σχεδιαστεί κάποιου είδους βάση η οποία θα στεγαστεί εντός των τεμαχίων του ρότορα. Με τη βάση των πτερυγίων εντός των αποσπώμενων μερών του ρότορα και την σύνδεση των τελευταίων με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω, τα πτερύγια θα είναι απόλυτα σταθερά και θα λειτουργούν όπως πρέπει. Για να γίνουν τα παραπάνω, τέσσερις ακόμα αυλακώσεις σχεδιάστηκαν με σκοπό την άρτια τοποθέτηση των πτερυγίων. Η βάση αυτή των πτερυγίων είχε συνολικό μήκος 55 mm. Η μισή βάση του πτερυγίου στεγάζεται στο ένα τεμάχιο του ρότορα και η άλλη μισή στο άλλο οπότε, τα πτερύγια που έχουν διανεμηθεί σε ίσες αποστάσεις, συμμετρικά ως προς το ρότορα, έχουν τοποθετηθεί στο κέντρο του συνολικού πάχους των μεγαλύτερων διαμέτρων του ρότορα. Η τοποθέτηση των πτερυγίων έγινε με τις γωνίες που σχηματίζουν η ακμή προσβολής και η ακμή φυγής του πτερυγίου ως προς την ακτινική γραμμή που περνάει από το μέσο του μήκους χορδής του πτερυγίου να είναι ίσες ($g/c = 0$, [1.3.3.6 Τοποθέτηση πτερυγίου στον ρότορα](#))

Στα παρακάτω σχήματα ([Σχήμα 5.2](#), [Σχήμα 5.3](#), [Σχήμα 5.4](#), [Σχήμα 5.5](#), [Σχήμα 5.6](#), [Σχήμα 5.7](#)) διακρίνονται όλες οι διαστάσεις του ρότορα όπως αυτές δόθηκαν στο κεφάλαιο 3 ([Πίνακας 3.1](#)) αλλά και οι επιπλέον διαστάσεις που αφορούν την κατασκευή του πειραματικού στροβίλου σύμφωνα με όσα συζητήθηκαν παραπάνω ενώ, δίνεται και ο σχεδιασμός του επιπρόσθετου κομματιού που έγινε λόγος. Επίσης, απεικονίζονται οι διαστάσεις των πτερυγίων και της βάσης αυτών. Επειδή στην ουσία οι αυλακώσεις στα τεμάχια του ρότορα, που σκοπό έχουν την τοποθέτηση των πτερυγίων, σχεδιάστηκαν παίρνοντας το αποτύπωμα της βάσης των πτερυγίων, οι διαστάσεις αυτών των αυλακώσεων θα απεικονιστούν στο σχήμα που παρουσιάζεται το πτερύγιο. Επιπλέον, λόγω του ότι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα δύο αποσπώμενα μέρη του ρότορα διαφέρουν μόνο στην κυλινδρική προέκταση του ενός, οι διαστάσεις που αφορούν το

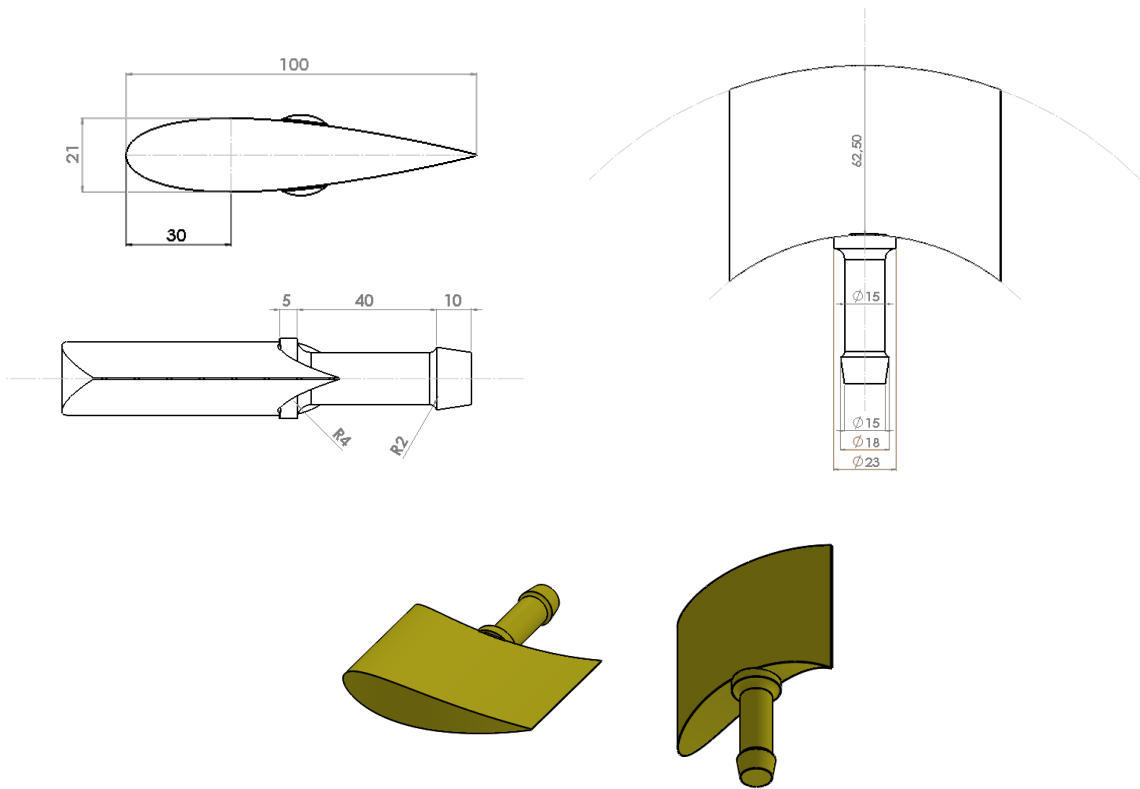
πίσω μέρος των μερών αυτών θα απεικονιστούν μια φορά. Επίσης, όλες οι αυλακώσεις που έγιναν είναι συμμετρικές ως προς κάποιον άξονα και για το λόγο αυτό θα σημειωθούν μια φορά. Οι όψεις ονομάζονται για κάθε τεμάχιο ξεχωριστά ενώ, για τα μέρη του ρότορα συγκεκριμένα δεν υπάρχει στην ουσία μπροστά και πίσω μέρος αφού, ο στρόβιλος Wells έχει την δυνατότητα να δέχεται τη ροή και από τις δύο μεριές του, περιστρεφόμενος προς την ίδια φορά.



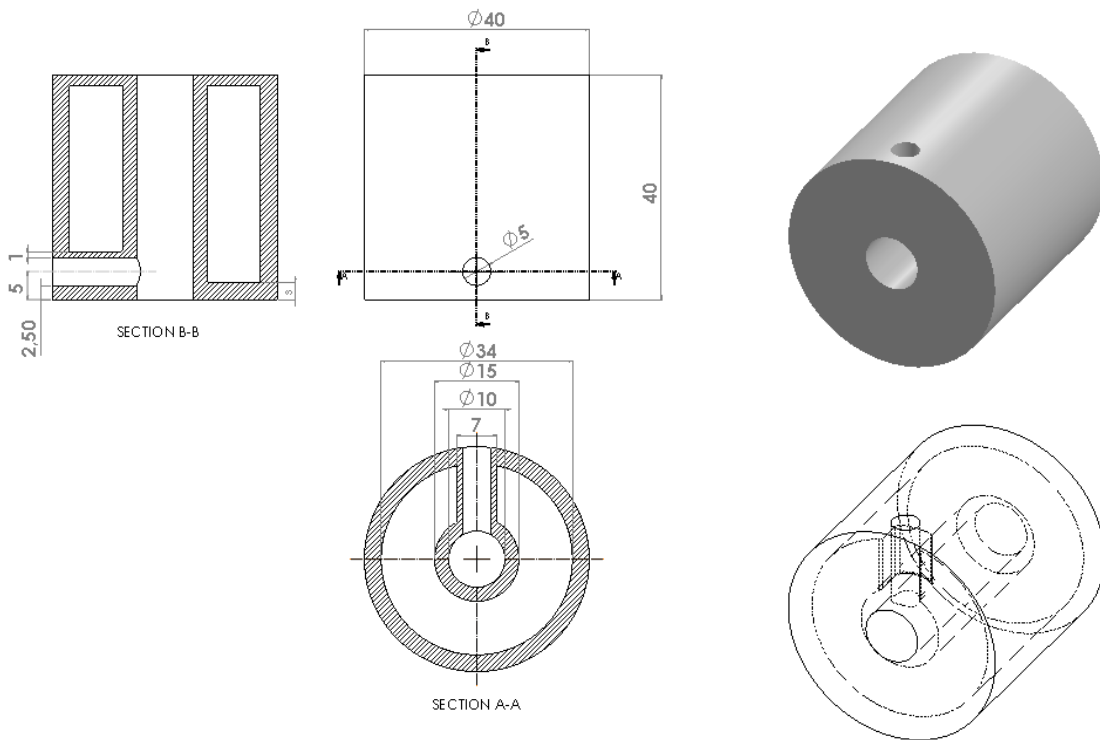
Σχήμα 5.2: Πρώτο αποσπώμενο μέρος ρότορα - Μπροστά μέρος ρότορα



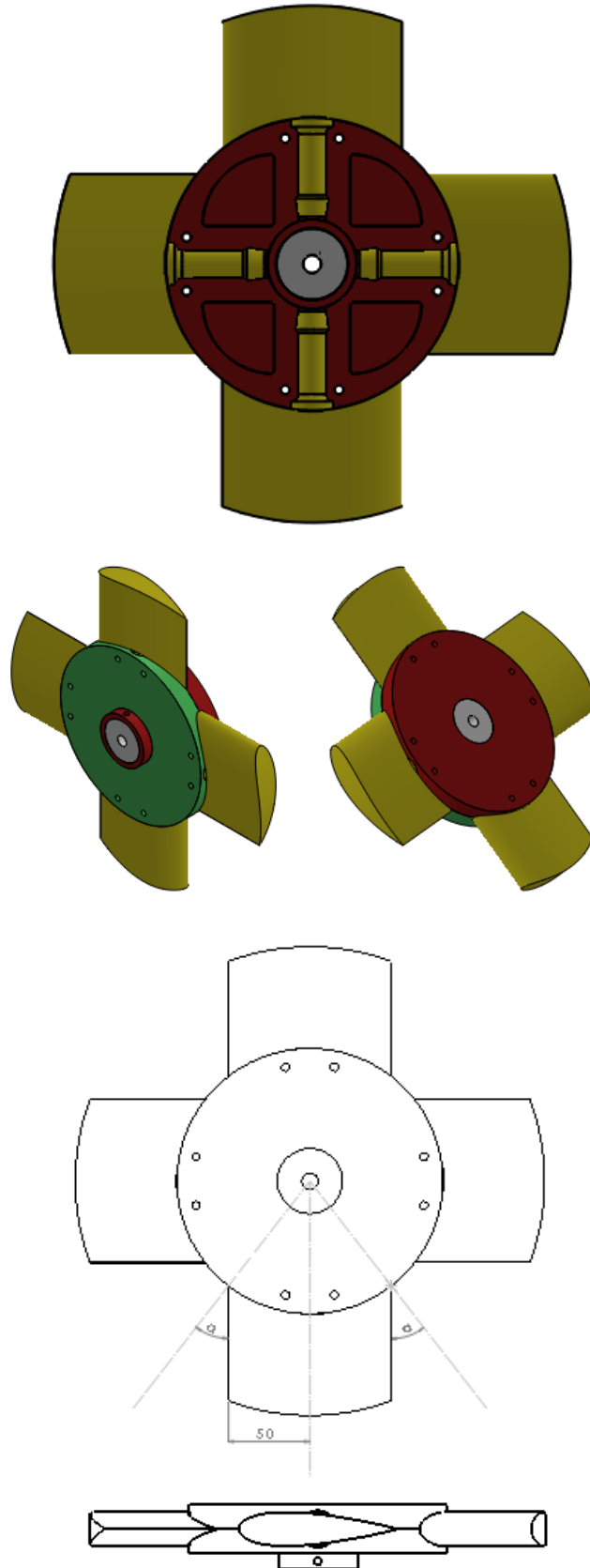
Σχήμα 5.3: Δεύτερο αποσπώμενο μέρος ρότορα - Πίσω μέρος ρότορα



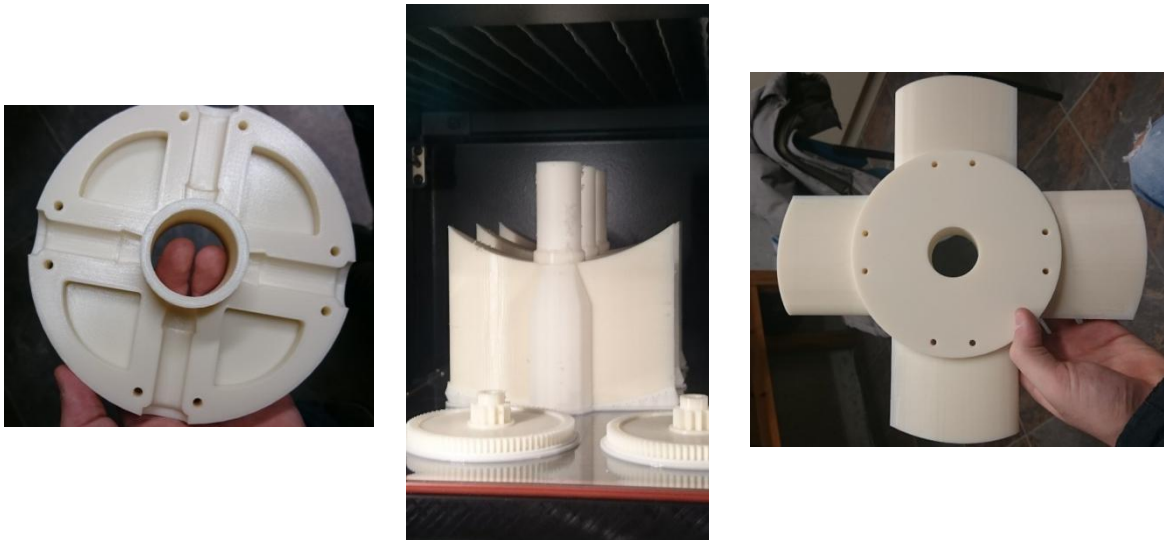
Σχήμα 5.4: Πτερόγιο



Σχήμα 5.5: Επιπλέον αντικείμενο για προσαρμογή νέου άξονα



Σχήμα 5. 6: Συναρμολόγηση ρότορα



Σχήμα 5.7: Τρισδιάστατη εκτύπωση ρότορα και πτερυγίων

5.1.3 Σχεδιασμός αεροδυναμικών κώνων

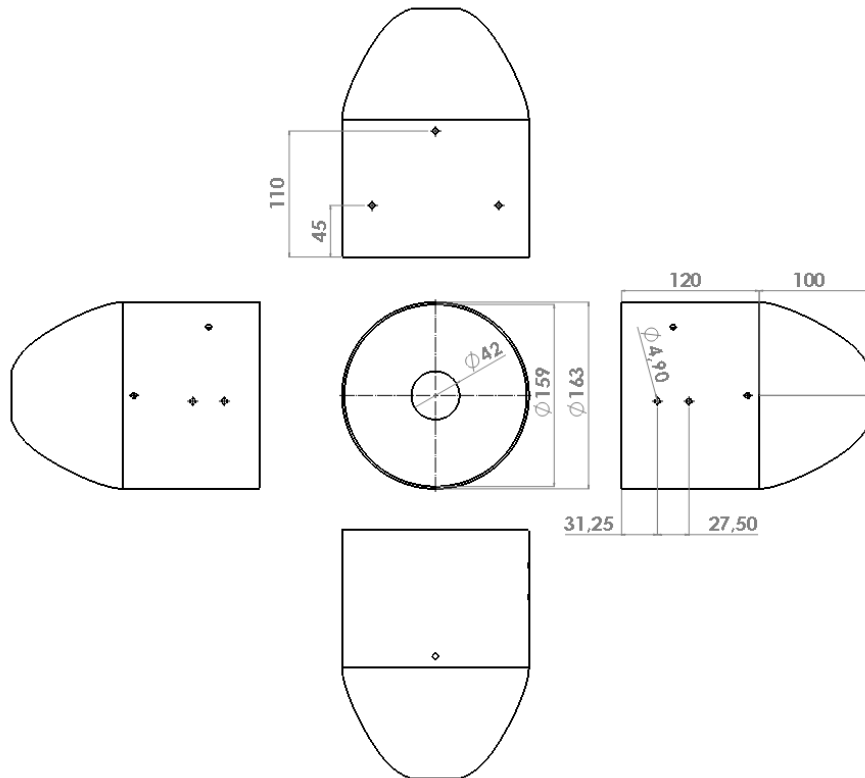
Καθώς έχει σχεδιαστεί ο στρόβιλος, το επόμενο βήμα είναι να σχεδιαστούν δύο αεροδυναμικές γεωμετρίες οι οποίες θα τοποθετηθούν μπροστά και πίσω από τον στρόβιλο, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες που θα προέκυπταν από την πρόσκρουση του ρευστού πάνω στο ρότορα. Οι αεροδυναμικές αυτές γεωμετρίες κατασκευάστηκαν με τη χρήση του τρισδιάστατου εκτυπωτή. Έχουν τη μορφή κώνου και στην ουσία μειώνουν βαθμιαία τη διατομή που ρέει το ρευστό έτσι ώστε, να περνάει μόνο από τη διατομή που ορίζουν τα πτερύγια και το διάκενο μεταξύ της κορυφής αυτών και του τοιχώματος του σωλήνα. Οι δύο αυτοί αεροδυναμικοί κώνοι έχουν και έναν ακόμη σκοπό, ο οποίος είναι η στέγαση των βάσεων στήριξης του άξονα, ο σχεδιασμός των οποίων θα παρουσιαστεί στην επόμενη ενότητα. Η στήριξη τους γίνεται με τέσσερα σίδερα (ντίτζες), για κάθε κώνο, στο τοίχωμα του σωλήνα. Η ενσωμάτωση των βάσεων στήριξης του άξονα εντός των κώνων προσφέρει τη δυνατότητα στήριξης όλου του συστήματος στην περιοχή του στρόβιλου. Οι δύο κώνοι δεν διαφέρουν σε διαστάσεις και η μόνη τους διαφορά βρίσκεται στον κώνο απ' όπου πρέπει να περνάει ο άξονας προκειμένου να οδηγείται στο τέλος της διάταξης. Η διαφορά αυτή αφορά μια οπή διαμέτρου 42 mm. Όπως ειπώθηκε προηγουμένως η λανθασμένη επιλογή άξονα οδήγησε σ' αυτούς τους σχεδιασμούς. Τα επιπρόσθετα 2 mm σε σχέση με τη διάμετρο του αρχικού άξονα αποτελούν τη χάρη που χρειαζόταν για να μην ακουμπάει ο άξονας. Ωστόσο, η διόρθωση που απαιτούνταν προκειμένου να μην έχει τόσο μεγάλο κενό η τοποθεσία στην οπή, επιτεύχθηκε με πολύ απλό τρόπο προσθέτοντας κολλητική ταινία.

Ως γνωστόν, καθώς το ρευστό κινείται από μια επιφάνεια A1 σε μια μικρότερη επιφάνεια A2, από την εξίσωση της συνέχειας προκύπτει πως το ρευστό θα επιταχυνθεί προκειμένου η παροχή μάζας να παραμείνει η ίδια μεταξύ των δύο επιφανειών. Στις

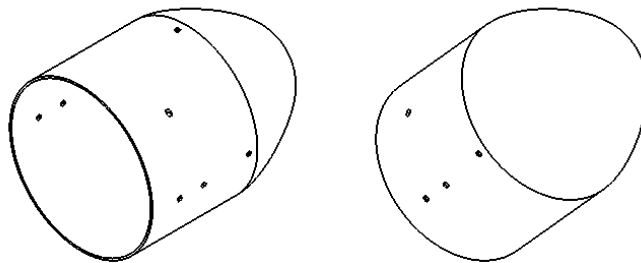
υπολογιστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, το ρευστό έρεε καθόλη την διάρκεια ελέγχου στην μικρότερη επιφάνεια A2, η οποία είχε καθοριστεί από τη διατομή που ορίζουν τα πτερύγια και το διάκενο μεταξύ της κορυφής αυτών και του τοιχώματος του σωλήνα. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό στην πραγματικότητα και συνεπώς, η ροή του άερα κατά το πείραμα κινείται από την μεγαλύτερη διατομή του σωλήνα (A1) προς την διατομή A2. Παρόλ' αυτά, δεν υπάρχει κάποιος λόγος ανησυχίας για το τι ταχύτητα πρέπει να εισαχθεί στην είσοδο του σωλήνα καθώς, η ταχύτητα του ρευστού μετρείται με όργανο μέτρησης (pitot) έτσι ώστε, οι ταχύτητες εισόδου μεταξύ υπολογιστικών προσομοιώσεων και πειράματος να είναι οι ίδιες, με την έννοια ότι λαμβάνεται υπόψη η επιπλέον επιτάχυνση λόγω των αεροδυναμικών κώνων.

Όσον αφορά το σχεδιασμό των συγκεκριμένων γεωμετριών, έγινε με γνώμονα να μην διαταράσσεται η ροή καθώς προσκρούει σ' αυτές δηλαδή, ο σχεδιασμός αφορούσε γεωμετρίες που δεν θα έδιναν στο ρευστό κάποια στροβιλότητα. Για σιγουριά πραγματοποιήθηκε και έλεγχος με τη χρήση των υπολογιστικών προσομοιώσεων για την πιο ακραία ταχύτητα εισαγωγής που μελετάτε.

Παρακάτω παραθέτονται τα αρχικά σχέδια των κώνων (Σχήμα 5.8, Σχήμα 5.9) καθώς, προέκυψε κάποιο πρόβλημα κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση και συνεπώς, έπρεπε στη συνέχεια να γίνει κάποιος επανασχεδιασμός τους, ο οποίος θα παρουσιαστεί ακολούθως. Οι διαστάσεις θα παρουσιαστούν μόνο στο ένα κομμάτι καθώς, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μόνη διαφορά είναι στην οπή που ανοίχτηκε στο ένα τεμάχιο για να περάσει ο άξονας. Επίσης, οι διαστάσεις της καμπύλης του κώνου δεν έχει νόημα να σημειωθούν αφού, έγιναν με έναν σχεδόν τυχαίο τρόπο. Όσον αφορά τις επιπλέον οπές που σημειώνονται, σχεδιάστηκαν προκειμένου να στηριχτούν οι βάσεις στήριξης του άξονα αλλά και για να περαστούν τα σίδηρα που θα κρατήσουν σταθερούς τους κώνους με τη στήριξη που αναφέρθηκε παραπάνω. Όλες οι οπές αυτές έγιναν με την διάμετρο των ντιζών που υπήρχαν στο εργαστήριο στροβιλομηχανών, η οποία είναι ίση με 4.9 mm. Το πάχος του κώνου είναι ίσο με 2 mm και αυτό γιατί έπρεπε να μειωθεί αρκετό υλικό προκειμένου να γίνει οικονομικά συμφέρουσα η εκτύπωση των υλικών συγκριτικά με την προσφορά που έκανε το μηχανουργείο για την κατασκευή αυτών των γεωμετριών.



Σχήμα 5.8: Αεροδυναμικός κώνος που τον διαπερνά ο άξονας

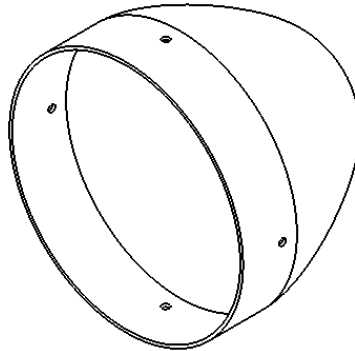


Σχήμα 5.9: Αεροδυναμικός κώνος που δεν τον διαπερνά ο άξονας

Όσον αφορά το πάχος των κώνων, έγινε στατικός έλεγχος της κατασκευής τους πρώτου εκτυπωθούν, προκειμένου να εξακριβωθεί ότι αντέχουν το βάρος που θα τους επιβληθεί. Ο στατικός έλεγχος έγινε εντός του περιβάλλοντος του Solidworks, το οποίο για τέτοιες απλές προσομοιώσεις θεωρείται αξιόπιστο. Στους δύο κώνους μαζί με τις βάσεις στήριξης του άξονα εντός τους, επιβλήθηκε ένα ακραίο φορτίο ισοδύναμο με 50 kg, το οποίο βάρος δεν πρόκειται να επιβληθεί ποτέ στην πράξη, και παρόλ' αυτά καμία τάση διαρροής των υλικών αυτών δεν ξεπεράστηκε ενώ, η παραμόρφωση τους ήταν αμελητέα. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε κατά βάση για τις εκτυπώσεις είναι το πλαστικό ABS ενώ, στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε και πολυκαρβονικό πλαστικό λόγω έλλειψης του πρώτου. Το

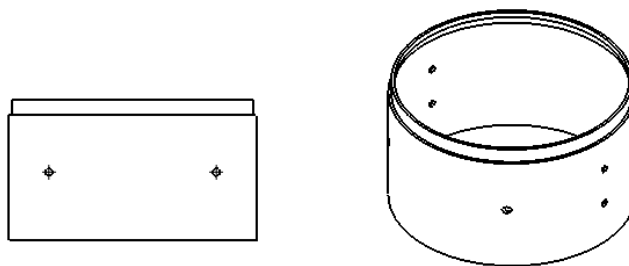
πολυκαρβονικό πλαστικό έχει μεγαλύτερη αντοχή από το πλαστικό ABS οπότε, δεν υπήρχε λόγος ανησυχίας για το αν θα αντέχει το βάρος που θα του επιβληθεί.

Στη συνέχεια, όπως ειπώθηκε παραπάνω, κατά τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης υπήρξε ένα πρόβλημα και οι κώνοι δεν ήταν εφικτό να βγούν απευθείας όπως σχεδιάστηκαν εξ' αρχής. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής ολοκλήρωσε την κατασκευή και των δύο γεωμετριών μέχρι το σημείο που διακρίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.10). Στον κώνο από τον οποίο θα διαπεράσει ο άξονας έγινε και η σπή.



Σχήμα 5.10: Πρώτο μέρος κώνου λόγω σφάλματος του εκτυπωτή

Συνεπώς, προκειμένου να μην πάει χαμένο το υλικό που εκτυπώθηκε έπρεπε να σχεδιαστεί το υπόλοιπο μέρος που έλειπε. Και για τους δύο κώνους το υπολειπόμενο μέρος ήταν το ίδιο. Το μόνο που έπρεπε να προστεθεί ήταν κάποιου είδους διαμόρφωση κουμπώματος, με σκοπό να συνδεθούν τα δύο αποσπώμενα μέρη του κάθε κώνου. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.11) μπορεί να φανεί ο σχεδιασμός του εν λόγω τεμαχίου. Οι διαστάσεις δεν σημειώθηκαν ούτε στο παραπάνω σχήμα αλλά ούτε στο επόμενο διότι έχουν αναφερθεί ήδη.



Σχήμα 5.11: Δεύτερο μέρος κώνου λόγω σφάλματος του εκτυπωτή

Όσον αφορά το δεύτερο μέρος του κώνου το οποίο δημιουργήθηκε λόγω σφάλματος του εκτυπωτή, κατασκευάστηκε από πολυκαρβονικό πλαστικό και η διαφορά θα φανεί στο χρώμα αυτού κατά την μετέπειτα απεικόνιση τους, αφού παρουσιαστούν και οι βάσεις στήριξης του άξονα και γίνει η συνδεσμολογία μεταξύ τους.

5.1.4 Σχεδιασμός βάσεων στήριξης άξονα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο άξονας που χρησιμοποιήθηκε τελικά είναι διαμέτρου 10 mm από αλουμίνιο. Η χρησιμότητα του άξονα, πέραν της μεταφοράς του μηχανικού έργου που παράγεται από τον στρόβιλο, είναι η στήριξη του ρότορα με τα πτερύγια. Ο στρόβιλος είναι ένα περιστρεφόμενο μέρος το οποίο στην ουσία αιωρείται και συνεπώς, δεν είναι εφικτή μια στήριξη του όπως αυτή των κώνων. Έτσι, στηρίζεται στον άξονα. Ο άξονας όμως, καθώς εκτείνεται προς την έξοδο του σωλήνα δεν στηρίζεται κάπου και συνεπώς, ούτε ο άξονας ούτε ο στρόβιλος είναι στη θέση που πρέπει. Μπορεί να καταλάβει κανείς πως εφόσον ο σωλήνας έχει μήκος 1 m, εάν προστεθεί και το μήκος του διαχύτη το οποίο ισούται με 0.8 m, όπως θα συζητηθεί παρακάτω, καθώς και το μήκος που απαιτείται προκειμένου να γίνουν εφικτές οι μετρήσεις της ροπής και των στροφών του άξονα και το οποίο αποφασίστηκε να είναι περίπου ίσο με 0.7 m τότε, το μήκος ολόκληρου του άξονα είναι περίπου 2.5 m. Συνεπώς, για την στήριξη του άξονα και την ανεμπόδιστη και σωστή λειτουργία του στροβίλου έπρεπε να γίνουν αρκετές ενέργειες. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν μόνο οι στηρίξεις που αφορούν την περιοχή κοντά στο στρόβιλο.

Η μόνη λύση ήταν να ενσωματωθούν κάποιου είδους στηρίξεων εντός των κώνων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Όπως μπορεί να αντιληφθεί κανείς, η αρχική στήριξη του άξονα και του στροβίλου θα γινόταν μέσω δύο βάσεων στήριξης, πριν και μετά τον στρόβιλο. Σχεδιάστηκαν αρκετές γεωμετρίες, άλλες πιο απλές και άλλες λίγο πιο σύνθετες. Θεωρήθηκε όμως πως θα ήταν καλύτερο οι βάσεις στήριξης να μπαίνουν σφηνωτά στους κώνους, για επιπλέον στήριξη αυτών και του όλου συστήματος. Έτσι, ο σχεδιασμός των βάσεων στήριξης έγινε σε κύκλο διαμέτρου ίσης με την εσωτερική διάμετρο των κώνων, η οποία με τη σειρά της ισούται με 159 mm.

Πέραν των παραπάνω, έπρεπε να ληφθούν υπόψη και κάποιες άλλες παράμετροι. Οι βάσεις στήριξης του άξονα στην ουσία δεν είναι αυτές που τον κρατάνε σταθερό, επιτρέποντας του να περιστρέφεται. Εντός των βάσεων στήριξης έπρεπε να εγκατασταθούν κάποιου είδους ρουλεμάν, συνδέοντας έτσι τις ακίνητες βάσεις στήριξης με τον περιστρεφόμενο άξονα. Όσον αφορά το είδος του ρουλεμάν, λόγω του ότι οι δυνάμεις που θα δέχονται είναι πολύ μικρές, η πιο λογική λύση ήταν η χρήση απλών ένσφαιρων ρουλεμάν. Οι διαστάσεις των ρουλεμάν, όπως και της θέσης στην οποία θα γινόταν η εγκατάστασή τους, προέκυψαν από τα διαθέσιμα ρουλεμάν που υπάρχουν στο εμπόριο. Η αρχική λανθασμένη επιλογή άξονα διαμέτρου 40 mm καθόρισε και τις αρχικές διαστάσεις των βάσεων στήριξης και των δύο ρουλεμάν που θα χρησιμοποιούντουσαν. Έτσι, χρειάστηκε η επιπλέον εκτύπωση μερικών κομματιών για την προσαρμογή του άξονα διαμέτρου 10 mm και των ρουλεμάν που επιλέχτηκαν μετέπειτα για αυτή τη διάσταση του άξονα. Για να ενσωματωθούν τα ρουλεμάν εντός των βάσεων στήριξης,

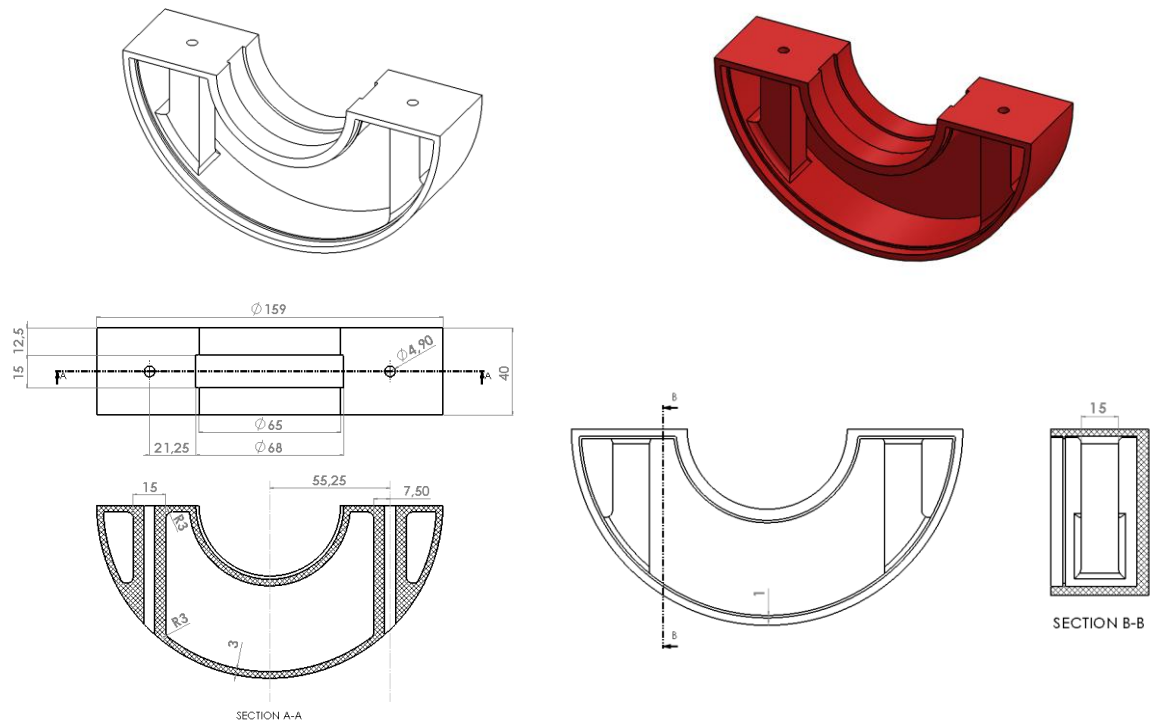
έπρεπε αυτές να είναι αποσπώμενες, όπως είναι λογικό. Οι διαστάσεις των ρουλεμάν θα γίνουν αντιληπτές από τις διαστάσεις που θα απεικονιστούν στα επόμενα σχήματα.

Επίσης, έγιναν ενέργειες αφαίρεσης υλικού προκειμένου να μειωθεί το κόστος της εκτύπωσης και συνεπώς, η κατασκευή αυτών να γίνει οικονομικά πιο συμφέρουσα σε σχέση με την προσφορά του μηχανουργείου που θα τις κατασκεύαζε. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω έγινε στατική μελέτη προκειμένου να διαπιστωθεί εάν αντέχουν το φορίο που θα τους επιβληθεί, μοντελοποιώντας για μια ακραία φόρτιση ισοδύναμη με 50 kg εντός του περιβάλλοντος του Solidworks. Στο σχήμα που θα ακολουθήσει στην ενότητα συναρμολόγησης των βάσεων στήριξης και των αεροδυναμικών κώνων (Σχήμα 5.18), φαίνεται η στοιχειώδη ανάλυση που έγινε στο κάτω μέρος της βάσης, η οποία θα πάρει το συνολικό βάρος μεταξύ των δύο αποσπώμενων μερών, αλλά και σε όλη την συνδεσμολογία μεταξύ της βάσης στήριξης και των κώνων. Οι μετατοπίσεις που απεικονίζονται δεν είναι πραγματικές και σκοπό έχουν να καταδείξουν στον χρήστη σε ποιο μέρος επιτυγχάνονται οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Όπως σημειώθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι εν λόγω παραμορφώσεις είναι αμελητέες.

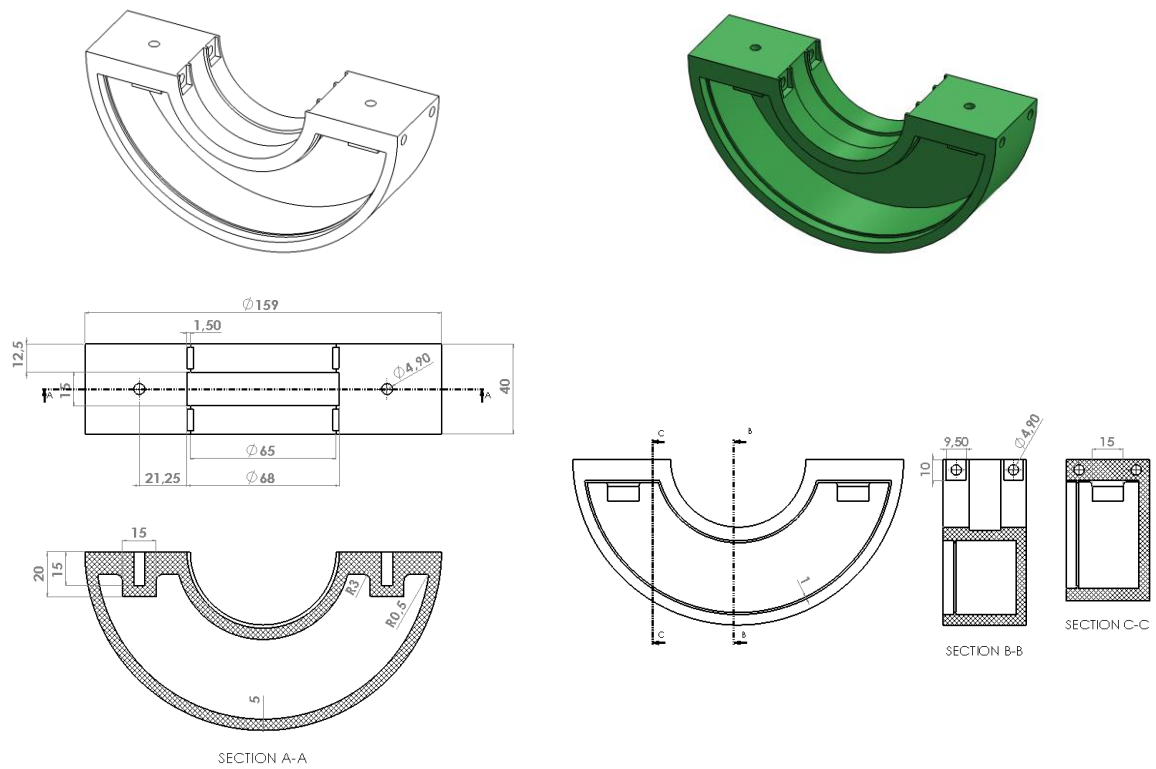
Στα παρακάτω σχήματα ακολουθούν τα σχέδια των βάσεων στήριξης (Σχήμα 5.12) και των επιπλέον αντικειμένων που ήταν απαραίτητα (Σχήμα 5.14). Θα παρουσιαστεί μόνο η μια βάση στήριξης καθώς η άλλη είναι απλό αντίγραφο. Το προταίρημα του να χρησιμοποιεί κανείς τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι πως, ότι σχεδιάσει και είναι εφικτό θα κατασκευαστεί με απόλυτη ακρίβεια ενώ, οι κατασκευαστές στα μηχανουργεία δεν μπορούν να πετύχουν τις λεπτομέρειες που έχουν σχεδιαστεί.

Όπως μπορεί να δει κανείς, το πάνω μέρος των βάσεων σχεδιάστηκε με πάχος 3 mm ενώ το κάτω με 5mm. Αυτό γιατί το πάνω μέρος δεν θα παίρνει τις φορτίσεις του κάτω και συνεπώς, η αφαίρεση υλικού μπορούσε να είναι μεγαλύτερη. Επίσης, στα δύο μέρη των βάσεων σχεδιάστηκαν κάποιου είδους πύργοι από όπου θα περνάνε οι ντίζες για την ένωση των δύο και την στήριξη τους ως ένα κομμάτι. Αυτοί οι πύργοι έγιναν κυρίως ώστε, σε περίπτωση που η στατική ανάλυση ήταν λανθασμένη και τα δύο αντικείμενα δεν μπορούσαν να ανταπεξέλθουν στις φορτίσεις, οι ντίζες να έμεναν ανέπαφες και ελεύθερες κατά την αποσυναρμολόγηση αφού, η επόμενη λύση ήταν να προστεθεί επιπλέον υλικό εντός των βάσεων προκειμένου να τους δώσει την απαραίτητη αντοχή. Για τον ίδιο λόγο η μία πλευρά σε κάθε μέρος των βάσεων έμεινε ανοιχτή, με σκοπό να μπορεί να προστεθεί το εν λόγω επιπρόσθετο υλικό, το οποίο τελικά δεν χρειάστηκε.

Πάνω μέρος βάσης στήριξης:



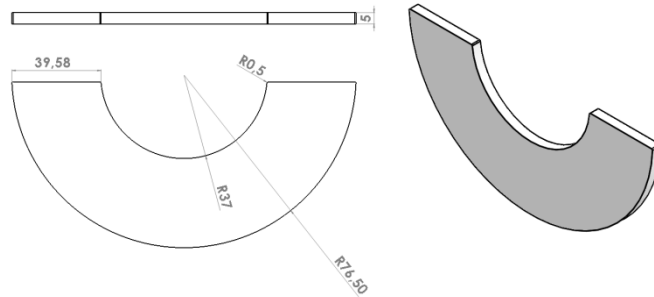
Κάτω μέρος βάσης:



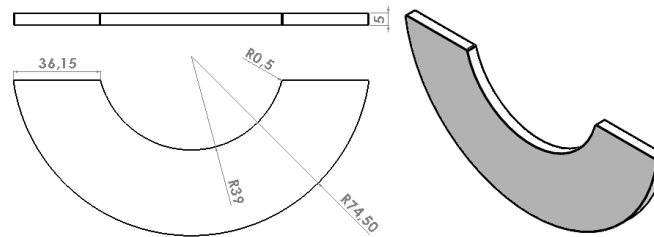
Σχήμα 5.12: Πάνω και κάτω μέρος βάσεων στήριξης

Προκειμένου να μην παραμείνουν ανοιχτές οι πλευρές αυτές, κατά τη διάρκεια του πειράματος, σχεδιάστηκαν καπάκια, τα οποία απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 5.13). Για τη σωστή στερέωση των καπακιών αυτών, σχεδιάστηκε μια πατούρα πάχους και ύψους 1 mm, καθόλη τη διατομή των μερών της βάσης. Η πατούρα αυτή αφήνει τόσο χώρο μπροστά της όσο είναι το πάχος των καπακιών.

Καπάκι του πάνω μέρους της βάσης:



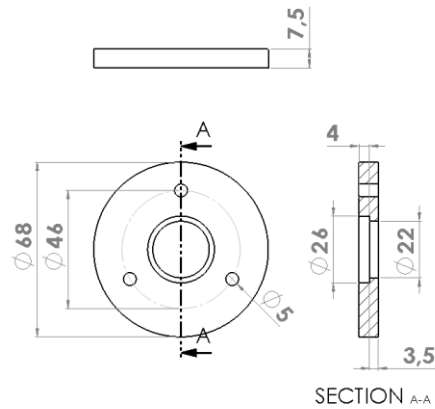
Καπάκι του κάτω μέρους της βάσης:



Σχήμα 5.13: Καπάκια βάσεων στήριξης

Επιπλέον, από το Σχήμα 5.12 μπορεί να γίνει αντιληπτό πως, οι αρχικές διαστάσεις των ρουλεμάν ήταν ίσες με: 68 mm εξωτερική διάμετρο, 40 mm εσωτερική διάμετρο και 15 mm πάχος. Η διάμετρος που σχεδιάστηκε ίση με 65 mm εμποδίζει στην ουσία τα ρουλεμάν να φύγουν από τη βάση στήριξης, κρατώντας τα σταθερά. Ωστόσο, τα ρουλεμάν για τον άξονα που τελικά χρησιμοποιήθηκε ήταν προφανώς πιο μικρά. Η εσωτερική διάμετρος των τελευταίων ρουλεμάν έπρεπε να είναι ίση με 10 mm και προφανώς, δεν υπήρχε ρουλεμάν με τέτοια εσωτερική διάμετρο και με εξωτερική ίση με 68 mm. Οπότε, έπρεπε να σχεδιαστούν κάποια επιπλέον κούμπωματα τα οποία θα στεγάζουν τα εν λόγω ρουλεμάν. Κάθε τέτοιο κούμπωμα αποτελείται από δύο μέρη, προκειμένου να μπορεί να μπει το ρουλεμάν εντός τους, και η σύνδεσή τους γίνεται με τρεις μικρές ντίζες και παξιμάδια από κάθε πλευρά τους. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.14) απεικονίζονται οι διαστάσεις τους ενώ, γίνονται αντιληπτές και οι διαστάσεις των ρουλεμάν που τελικά χρησιμοποιήθηκαν. Λόγω του ότι τα αποσπώμενα μέρη των κουμπωμάτων που κατασκευάστηκαν είναι ακριβώς τα ίδια μεταξύ τους ενώ ταυτόχρονα, δεν διαφέρουν μεταξύ των βάσεων

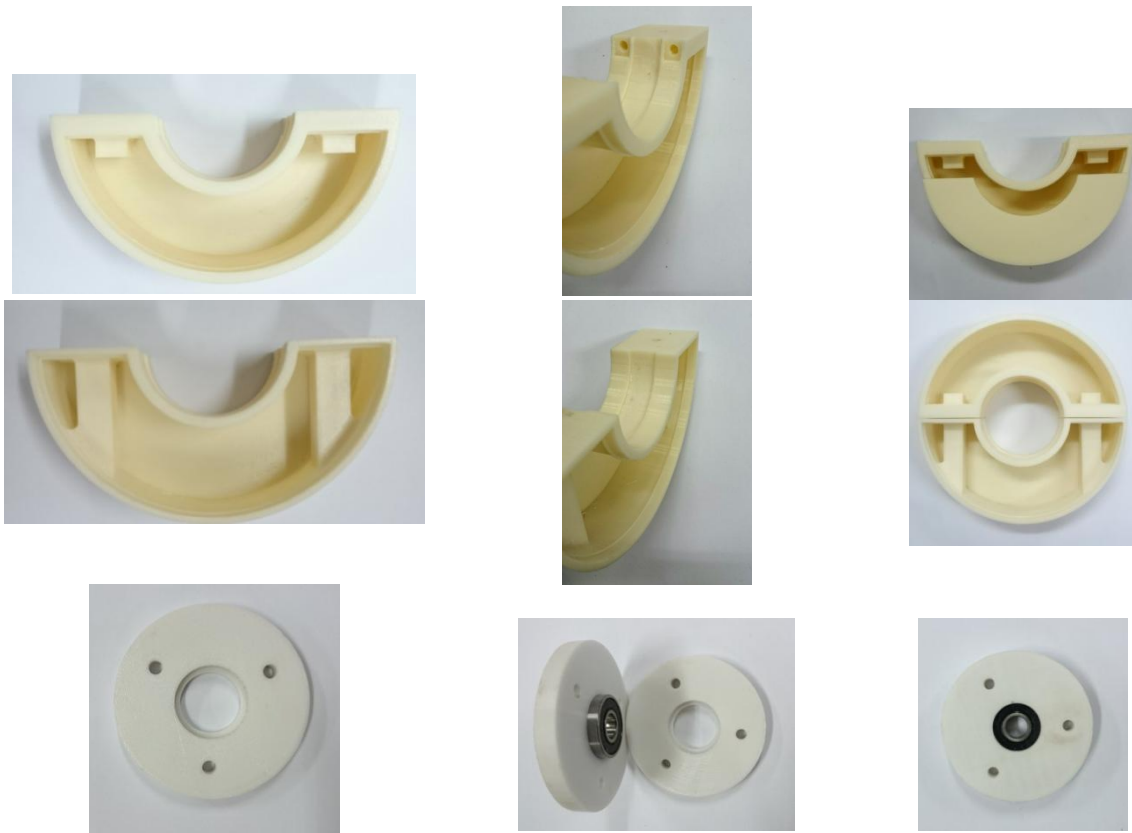
στήριξης, θα παρουσιαστεί μόνο το ένα από τα συνολικά τέσσερα. Τα κουμπώματα αυτά εκτυπώθηκαν από πολυκαρβονικό πλαστικό.



Σχήμα 5.14: Επιπρόσθετο κούμπωμα για τα ρουλεμάν του τελικού άξονα

Όσον αφορά το κάτω μέρος της βάσης που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5.12, στο εσωτερικό της σχεδιάστηκαν κάποιου είδους πατούρες προκειμένου να εισαχθούν παξιμάδια ώστε, η σύνδεση με τον αεροδυναμικό κώνο να είναι ακόμα πιο σταθερή.

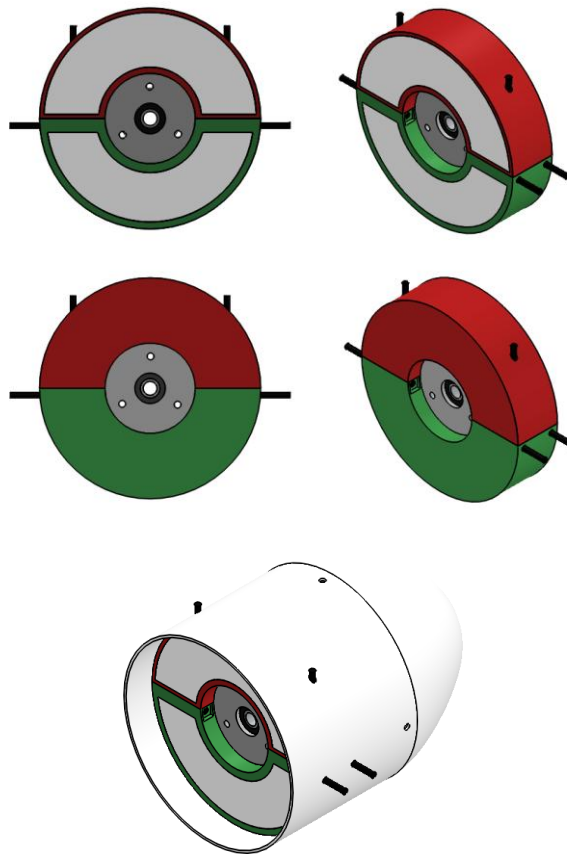
Παρακάτω ακολουθεί ένα σχήμα που δείχνει τα εκτυπωμένα αντικείμενα που σχολιάστηκαν στην παρούσα ενότητα (Σχήμα 5.15).



Σχήμα 5.15: Εκτυπωμένα αντικείμενα βάσης στήριξης

5.1.5 Συναρμολόγηση βάσεων στήριξης και αεροδυναμικών κώνων

Όπως είχε αναφερθεί παραπάνω, στους αεροδυναμικούς κώνους είχαν γίνει οι απαραίτητες οπές προκειμένου να μπορούν να στηριχτούν εντός τους οι βάσεις στήριξης. Στα σχήματα που ακολουθούν λοιπόν, φαίνεται η συναρμολόγηση των αντικειμένων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες δύο ενότητες, τόσο στο σχεδιαστικό περιβάλλον του Solidworks (Σχήμα 5.16) όσο και μετά την εκτύπωση αυτών (Σχήμα 5.17). Στην συναρμολόγηση αυτών στο σχεδιαστικό περιβάλλον έχει προστεθεί και η γεωμετρία του ρουλεμάν, με τις διαστάσεις που σημειώθηκαν. Τα επιπλέον αντικείμενα που φαίνονται, μάρου χρώματος, αντιπροσωπεύουν τις ντίζες που θα χρησιμοποιηθούν.

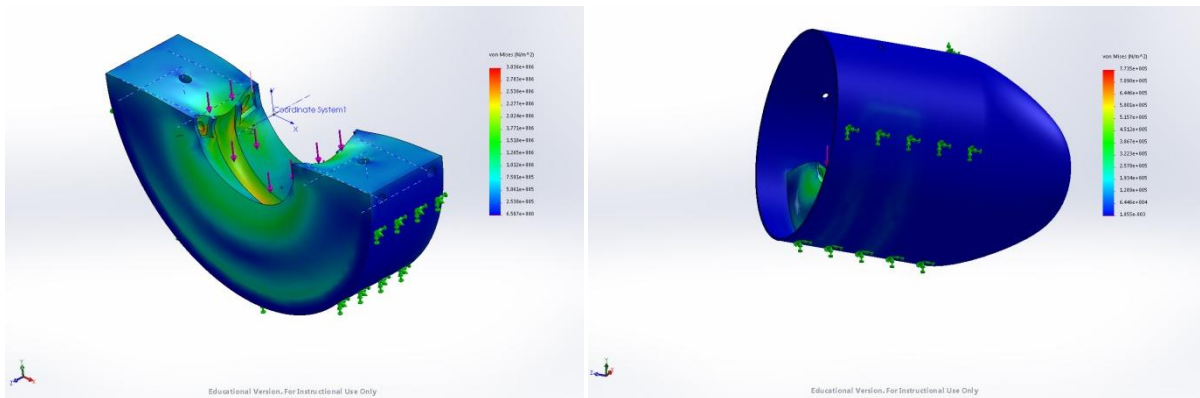


Σχήμα 5.16: Συναρμολόγηση βάσεων στήριξης με τους αεροδυναμικούς κώνους στο Solidworks



Σχήμα 5.17: Συναρμολόγηση βάσεων στήριξης με τους αεροδυναμικούς κώνους μετά την εκύπτωση

Εφόσον έγιναν αντιληπτά τα αντικείμενα που αφορούν τους αεροδυναμικούς κώνους και τον τρόπο στήριξης του άξονα στην περιοχή κοντά στον στρόβιλο, παρουσιάζεται η στατική μελέτη που έγινε σ' αυτά, αναφορικά με όσα ειπώθηκαν στις προηγούμενες δύο ενότητες (Σχήμα 5.18). Το πόρισμα της ανάλυσης είναι πως τα αντικείμενα που εκτυπώθηκαν έχουν την επιθυμητή αντοχή.



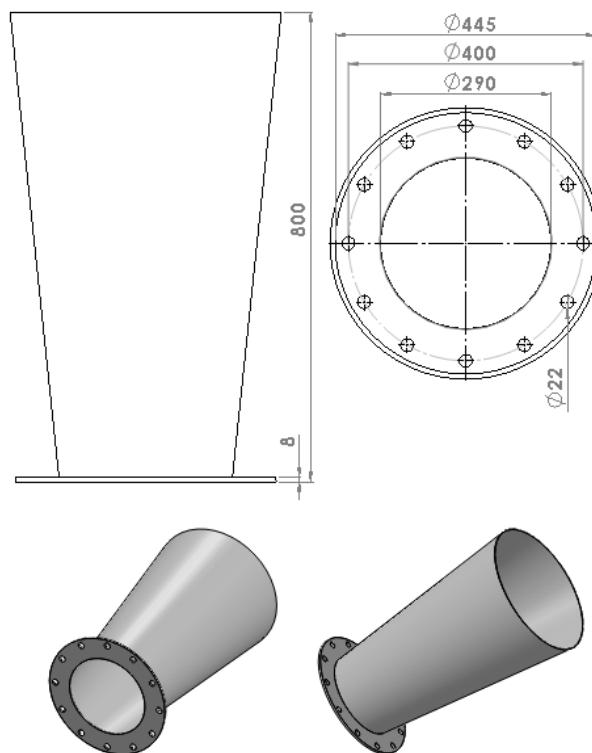
Σχήμα 5.18: Στατική ανάλυση κάτω μέρους βάσης μαζί με τον αεροδυναμικό κώνο

5.1.6 Σχεδιασμός διαχύτη

Ως γνωστόν, καθώς ρέει το ρευστό προς τον στρόβιλο έχοντας μια ικανοποιητική ενέργεια, η εν λόγω ενέργεια του ρευστού μετατρέπεται μερικώς σε μηχανικό έργο του άξονα, περιστρέφοντας τον στρόβιλο. Το ποσό της κινητικής ενέργειας του ρευστού το οποίο δεν θα καταφέρει να εκτονωθεί και να μετατραπεί σε μηχανικό έργο του άξονα, θεωρείται απώλεια στις διατάξεις στροβιλομηχανών. Για να μειωθούν οι απώλειες αυτές τοποθετείται ο διαχύτης στο τέλος της διάταξης. Χρησιμοποιώντας τον διαχύτη γίνεται ανάκτηση της πίεσης στην έξοδο του ρευστού από τη διάταξη, μειώνοντας την κινητική του ενέργεια και συνεπώς τις απώλειες, αυξάνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης του συστήματος. Ωστόσο, η ανάκτηση πίεσης με τη χρήση του διαχύτη έχει κάποιο ανώ όριο, με την έννοια ότι η μεγάλη επιβράδυνση του ρευστού μπορεί να οδηγήσει κάτω από συνθήκες στην αποκόλληση του από τα τοιχώματα του διαχύτη και στην ανακυκλοφορία του. Κάτι τέτοιο δεν είναι επιθυμητό και συνεπώς, καθώς η επιβράδυνση του ρευστού

καθορίζεται από τη γωνία κλίσης του διαχύτη, η εν λόγω γωνία των τοιχωμάτων του πρέπει να επιλεγεί με σκοπό την αποφυγή τέτοιων φαινομένων. Από την άλλη, η επιλογή μιας πολύ μικρής γωνίας συνεπάγεται μεγάλο μήκος του διαχύτη προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή αύξηση της πίεσης του ρευστού. Συνδυάζοντας τα παραπάνω, αποφασίστηκε πως μια ικανοποιητική γωνία κλίσης των τοιχωμάτων του διαχύτη είναι ίση με 6° ενώ, το μήκος αυτού είναι ίσο με 800 mm.

Η αναζήτηση μηχανουργείου προκειμένου να κατασκευαστεί ο διαχύτης ήταν πολύ χρονοβόρα καθώς, δεν υπήρχε κατασκευαστής που να μπορεί να πιάσει εύκολα την ακρίβεια της γωνίας του διαχύτη και έτσι, οι περισσότεροι αρνούνταν να το ριψοκινδυνεύσουν. Επομένως, στην παρούσα κατασκευή έπρεπε να μειωθούν οι απαιτήσεις για ακρίβεια, όσον αφορά την γωνία. Το μηχανουργείο που συμφώνησε να κατασκευάσει τον διαχύτη μπόρεσε να κόψει το προφίλ του με την απαιτούμενη γωνία αλλά, καθώς η κατασκευή έγινε από λαμαρίνα, κατά το γύρισμα της στον κύλινδρο ίσως υπήρξαν οι αποκλίσεις που αναμένονταν. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.19) μπορεί κανείς να δει τα σχέδια του διαχύτη. Στο πρόσωπο του διαχύτη τοποθετήθηκε μια φλάτζα αντίστοιχη αυτής που είχε σχεδιαστεί για τον σωλήνα ώστε, να μπορεί να συνδεθεί στο τέλος της διάταξης. Το πάχος της φλάτζας στην περίπτωση αυτή είναι ίσο με 8 mm ενώ, το πάχος του διαχύτη είναι ίσο με 2 mm, το οποίο προτάθηκε από τον κατασκευαστή προκειμένου να μπορεί να γυρίσει την λαμαρίνα ευκολότερα στον κύλινδρο.



Σχήμα 5.19: Διαχύτης

5.1.7 Σχεδιασμός για προσομοίωση κυμάτων

Όσα αντικείμενα παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες αρκούν προκειμένου ο στρόβιλος να μελετηθεί κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί, ο σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης συμφωνήθηκε να αφορά την επιπλέον προσομοίωση και τον έλεγχο της συμπεριφοράς του στρόβιλου Wells κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής. Οι μη μόνιμες συνθήκες ροής αναφέρονται στην προσομοίωση της κίνησης των κυμάτων της θάλασσας. Όπως έχει σημειωθεί στο κεφάλαιο της εισαγωγής, σε μια πραγματική συσκευή εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, η ενέργεια των κυμάτων μετατρέπεται σε παλινδρομική κίνηση του αέρα εντός του θαλάμου των συσκευών OWC, η οποία εξαναγκάζεται με τη σειρά της να περάσει διαμέσου του στρόβιλου Wells. Ο αέρας εκτονώνεται στον στρόβιλο παράγοντας μηχανικό έργο στον άξονα. Αντιλαμβάνεται κανείς πως στην παρούσα εργασία η πειραματική διάταξη δεν αφορά μια συσκευή OWC στον πυθμένα της οποίας προσκρούουν τα κύματα. Η προσομοίωση της κίνησης των κυμάτων γίνεται παράγοντας απευθείας μια παλινδρομική κίνηση του αέρα εντός του σωλήνα όπου βρίσκεται ο στρόβιλος. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η αυτή παλινδρομική κίνηση του αέρα συμπεριφέρεται ως μια ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας του αέρα. Στην ουσία δηλαδή, οι μελέτες που αφορούν την κίνηση των κυμάτων, κάτω από σχετικά ήρεμες συνθήκες, έχουν αναδείξει μια σχεδόν ημιτονοειδή συμπεριφορά αυτών. Οι μελέτες αυτές έχουν δείξει επίσης πως, η συχνότητα ταλάντωσης κυμάτων τέτοιας μορφής δεν ξεπερνά το 1 Hz.

Η απευθείας παραγωγή της παλινδρομικής κίνησης του αέρα επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους. Τα αντίστοιχα πειράματα που έχουν γίνει και τα οποία βρίσκονται στη βιβλιογραφία, χρησιμοποιούσαν πολύ ακριβές τεχνικές. Στην παρούσα πειραματική διάταξη έπρεπε να βρεθεί ένας πιο οικονομικός τρόπος. Έτσι, η εν λόγω δημιουργία της παλινδρομικής κίνησης του αέρα, η οποία θα εισάγεται απευθείας μέσα στον σωλήνα όπου είναι εγκατεστημένος ο στρόβιλος, πραγματοποιείται με τη χρήση ενός ξύλινου εμβόλου το οποίο θα κινείται μέσα σε ένα ξύλινο κουτί συγκεκριμένων διαστάσεων. Η επιθυμητή κίνηση του εμβόλου επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συστήματος παρόμοιας λογικής μ' αυτό του στροφαλοφόρου άξονα ενός εμβολοφόρου οχήματος, το οποίο με τη σειρά του περιστρέφεται από έναν κινητήρα.

Προκειμένου να βρεθούν οι διαστάσεις του κουτιού και άρα του εμβόλου, καθώς και τα χαρακτηριστικά του κινητήρα που θα περιστρέφει το σύστημα που θα κινεί το έμβολο, έπρεπε να γίνει μια πρωταρχική μελέτη. Βασικό ρόλο στη μελέτη αυτή έχει η χρήση της εξίσωσης της συνέχειας. Καταρχήν, η λογική λέει πως για να επιτευχθεί μια ταχύτητα εντός του κουτιού, το έμβολο πρέπει να κινηθεί επίσης μ' αυτήν την ταχύτητα. Η ταχύτητα με την οποία κινείται το έμβολο, λαμβάνοντας υπόψη τη διατομή του σωλήνα που

χρησιμοποιήθηκε, θα καθορίσει τις επικρατούσες ταχύτητες εντός του σωλήνα. Οι ταχύτητες εντός του κουτιού προέκυψαν από τη μέγιστη επιθυμητή ταχύτητα εντός του σωλήνα. Στο σημείο αυτό έγινε η παραδοχή πως, η μέγιστη αυτή ταχύτητα αφορά τις ταχύτητες εισαγωγής για τις οποίες ελέγχθηκε η συμπεριφορά του στροβίλου (Πίνακας 4.1). Έτσι, το μέγιστο πλάτος της ημιτονοειδούς μεταβολής της ταχύτητας εντός του κουτιού θεωρήθηκε πως έπρεπε μέσω της εξίσωσης της συνέχειας να ωθεί τη ροή εντός του σωλήνα με τρόπο τέτοιο ώστε, να επιτυγχάνεται μια από τις ταχύτητες εισαγωγής που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4. Στον σχεδιασμό του κουτιού λήφθηκε υπόψη και η μείωση της διατομής εντός του σωλήνα, λόγω της ύπαρξης των αεροδυναμικών κώνων. Οπότε, όταν γίνεται λόγος για την ταχύτητα εισαγωγής εντός του σωλήνα, σημειώνεται πως υπολογίζεται βάσει της διατομής που καθορίζεται από τα πτερύγια.

Στη συνέχεια, ανάλογα με τη διατομή του εμβόλου που θα επιλεγεί, θα καθοριστούν κατά μια έννοια και οι απαιτούμενες ταχύτητες που θα επικρατούν εντός του κουτιού και συνεπώς, εντός του σωλήνα. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή του κουτιού τόσο μικρότερες είναι οι εν λόγω ταχύτητες που θα χρειάζεται να παράγονται μέσω της κίνησης του εμβόλου. Η κίνηση του εμβόλου είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη συχνότητα της παλινδρομικής κίνησης του αέρα. Επιλέγοντας μια πολύ μικρή διατομή εμβόλου, έπρεπε η αντίστοιχη κίνηση αυτού εντός του κουτιού να είναι πολύ μεγάλη, προκειμένου να επιτευχθεί η παραδοχή που σχολιάστηκε παραπάνω, με αποτέλεσμα οι συχνότητες κίνησης του να ξεπερνούν το 1 Hz που αναφέρθηκε προηγουμένως. Ο έλεγχος της συχνότητας που θα παλινδρομεί το έμβολο καθορίζεται από την περιστροφική ταχύτητα που θα δίνει ο κινητήρας και από τις διαστάσεις του στροφαλοφόρου άξονα και του διωστήρα.

Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω, προκειμένου να γίνουν πιο κατανοητά, οι παράμετροι που πρέπει να ελεγχθούν ώστε να επιτευχθεί το ζητούμενο είναι, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, το μήκος του διωστήρα, οι διαστάσεις του στροφαλοφόρου άξονα και η διατομή του εμβόλου. Οι διαστάσεις του στροφαλοφόρου άξονα και το μήκος του διωστήρα στην ουσία είναι αυτές που καθορίζουν τη διαδρομή του εμβόλου μέσα στο κουτί. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τον στροφαλοφόρο άξονα, η διάσταση που παίζει καθοριστικό ρόλο είναι η ακτίνα του.

Όπως γίνεται αντιληπτό, έχοντας επιπλέον τέσσερις αγνώστους δεν μπορεί να βρεθεί το ζητούμενο. Επομένως, η λύση προέκυψε με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος. Αρχικά, προκειμένου να μειωθούν οι άγνωστοι παράμετροι, ελέχθηκαν πολλές διατομές εμβόλου με σκοπό να παρατηρηθούν οι ταχύτητες που πρέπει να επικρατούν, ώστε να επιτευχθεί η παραδοχή που σημειώθηκε παραπάνω. Θεωρήθηκε πως ήταν απαραίτητη η κατασκευή του εμβόλου με μια αρκετά μεγάλη διατομή. Συγκεκριμένα, επελέγει η μεγαλύτερη διατομή

που ήταν βολικό να κατασκευαστεί και η οποία δε θα ήταν αδύνατο να μεταφερθεί στο εργαστήριο αλλά ούτε θα καταλάμβανε τεράστιο όγκο. Η εν λόγω διατομή του εμβόλου είναι 1 m^2 . Στη συνέχεια, μη γνωρίζοντας την απαιτούμενη διαδρομή που πρέπει να καλύψει το έμβολο, δοκιμάστηκαν αρχικά πολλές αποστάσεις. Όσο μικρότερη είναι η απόσταση που θα διανύει το έμβολο, τόσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα παλινδρομικής κίνησης του εμβόλου. Ο έλεγχος των αποστασεων αυτών έγινε με την μεταβολή των τιμών, της ακτίνας του στροφαλοφόρου άξονα, του μήκους του διωστήρα και της περιστροφικής ταχύτητας του κινητήρα. Η μεταβολή των τιμών αυτών γινόταν μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$C_{(\text{εμβόλου})} = \frac{r\omega \sin(\omega t) \cos(\omega t)}{\sqrt{l_0^2 - \sin^2(\omega t)} + 1}$$

όπου, r η ακτίνα του στροφαλοφόρου άξονα, l_0 ο λόγος της ακτίνας του στροφαλοφόρου άξονα προς το μήκος του διωστήρα και ω η ταχύτητα περιστροφής που δίνει ο κινητήρας. Όπως αντιλαμβάνεται κανείς, εισάγοντας στις παραπάνω μεταβλητές μια τιμή, προκύπτει η ταχύτητα του εμβόλου. Έτσι, γνωρίζοντας το εύρος της συχνότητας ταλάντωσης του εμβόλου, γινόταν ο απαιτούμενος έλεγχος προκειμένου το αποτέλεσμα αυτής της εξίσωσης να συνάδει με τα αποτελέσματα που είχαν προκύψει από την εξίσωση της συνέχειας για την ταχύτητα του εμβόλου. Οι εν λόγω ταχύτητες, οι οποίες υπενθυμίζεται αφορούν το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης σύμφωνα με την παραδοχή που έγινε, μπορούν να φανούν στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1).

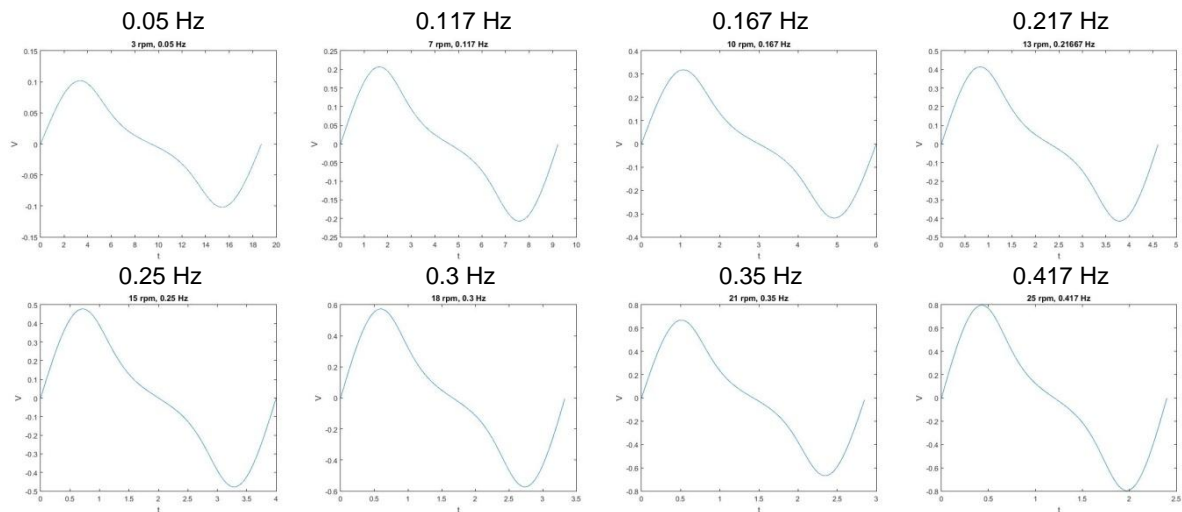
Πίνακας 5.1: Μέγιστο πλάτος ταλάντωσης εμβόλου

Μέγιστο πλάτος ταλάντωσης εμβόλου (m/s)	Μέγιστη ταχύτητα εντός του σωλήνα (m/s)
0.11	2.36
0.20	4.36
0.30	6.72
0.40	8.72
0.48	10.72
0.58	12.72
0.67	14.72
0.79	17.44

Αποδείχτηκε λοιπόν, πως με τη χρήση, ενός εμβόλου διατομής ίσης με 1 m^2 , μιας ακτίνας στροφαλοφόρου άξονα ίσης με 247.5 mm και ένα μήκος διωστήρα ίσο με 370 mm , ήταν εφικτό να επιτευχθούν οι συχνότητες και οι ταχύτητες που απαιτούνται. Οι διαστάσεις που αφορούν την ακτίνα του στροφαλοφόρου άξονα και το μήκος του διωστήρα, αναφέρονται στις ωφέλιμες διαστάσεις, αυτές δηλαδή που καθορίζουν τα όσα αναφέρθηκαν

παραπάνω. Οι συχνότητες που εξάχθηκαν με τις παραπάνω διαστάσεις καλύπτουν ένα εύρος από 0.05 Hz έως 0.417 Hz και σύμφωνα μ' αυτές θα πραγματοποιηθεί η μελέτη της συμπεριφοράς του στροβίλου Wells για μια σχεδόν ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας. Ωστόσο, όπως θα φανεί και στα σχέδια που θα ακολουθήσουν, η συχνότητα αυτή μπορεί να μεταβάλλεται και σε άλλα εύρη κατά τη διάρκεια του πειράματος. Αυτό γιατί, η ακτίνα του στροφαλοφόρου άξονα μπορεί να μεταβάλλεται. Επιπλέον, ο κινητήρας που αγοράστηκε μπορεί να δώσει μεγαλύτερες περιστροφικές ταχύτητες από τις απαιτούμενες.

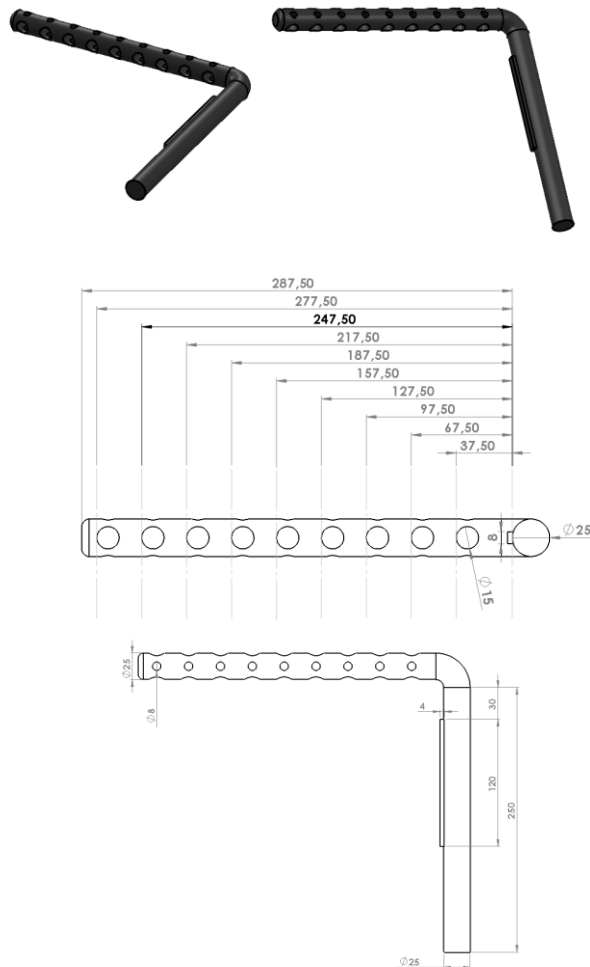
Οι ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα και συνεπώς, οι συχνότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορούν να φανούν στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.20) με τις αντίστοιχες ταχύτητες του εμβόλου, οι οποίες καθορίζουν το πλάτος της ταλάντωσης σε κάθε περίπτωση. Τα διαγράμματα εξάχθηκαν με τη χρήση του Matlab, γράφοντας έναν πολύ απλό κώδικα.



Σχήμα 5.20: Εύρη συχνοτήτων σχεδιασμού

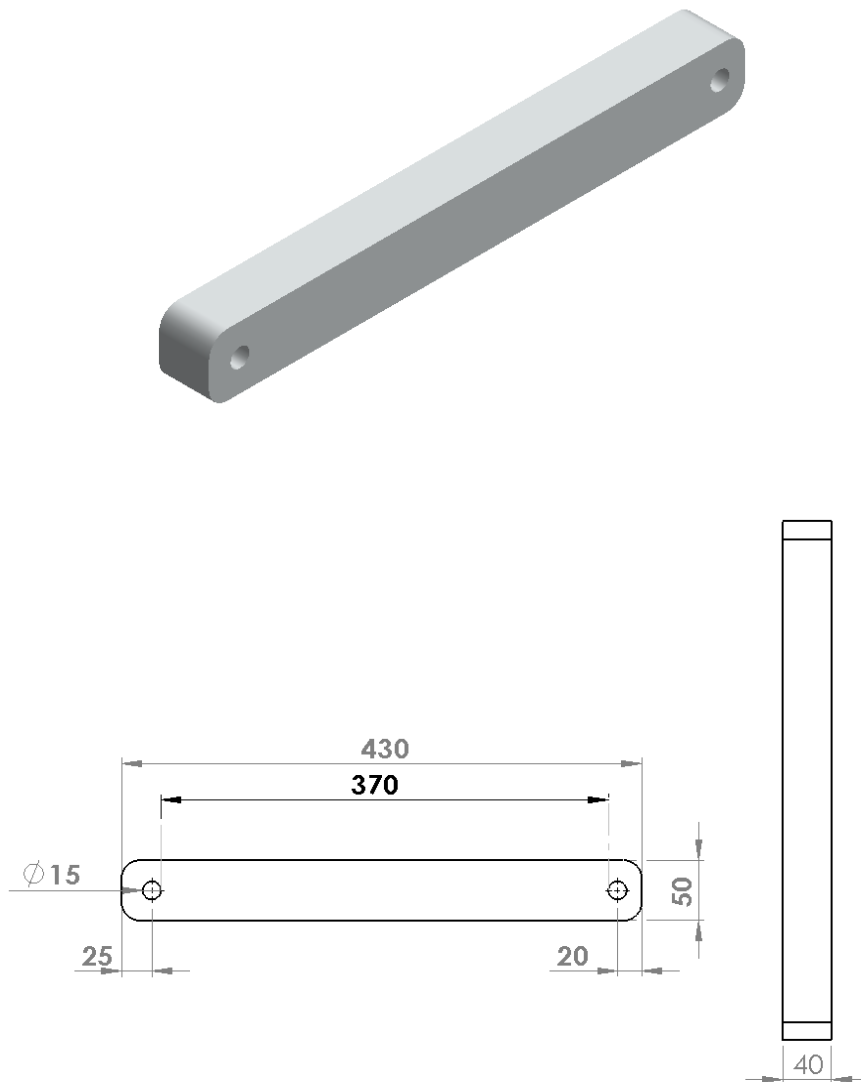
Όσον αφορά την απόσταση που θα διανύει το έμβολο, προκύπτει από το άθροισμα του μήκους του διωστήρα με την ακτίνα του στροφαλοφόρου άξονα μείον την απόσταση που έχει σχεδιαστεί να απέχει το κέντρο του άξονα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα από το κέντρο της οπής στην οποία στηρίζεται ο διωστήρας και μέσω της οποίας συνδέεται με το έμβολο. Η τελευταία απόσταση εξάγεται κατά την φάση όπου το μήκος του διωστήρα και η ακτίνα του στροφαλοφόρου άξονα βρίσκονται στην ίδια ευθεία και το ένα δεν αποτελεί προέκταση του άλλου. Για να προκύψει το απαιτούμενο μήκος του κουτιού προστίθεται επιπλέον η απόσταση της άκρης της οπής που συνδέεται ο διωστήρας με το έμβολο, προς τη μεριά του κινητήρα, από την μπροστινή πλευρά του εμβόλου, λαμβάνοντας υπόψη και το πάχος του ξύλου που χρησιμοποιήθηκε. Έτσι, εξάχθηκε ένα μήκος κουτιού ίσο με 650 mm. Το μήκος του κουτιού αυτού λειτουργεί με ασφάλεια για όλες τις ακτίνες του στροφαλοφόρου άξονα που θα παρουσιαστούν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα σχέδια που αφορούν το σύστημα που σχολιάστηκε σ' αυτήν

την ενότητα. Όσον αφορά τον διωστήρα και τον στροφαλοφόρο άξονα, μαζί με κάποιους επιπλέον πύρους που χρειάστηκαν για την μεταξύ τους σύνδεση αλλά και για τη σύνδεση με το έμβολο, κατασκευάστηκαν σε μηχανουργείο. Ο στροφαλοφόρος άξονας είναι από σίδηρο ενώ, τα υπόλοιπα αντικείμενα είναι από αλουμίνιο. Ο κινητήρας που αγοράστηκε είναι γωνιακός με μειωτήρα και επιπρόσθετο inverter, προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές χαμηλές ταχύτητες περιστροφής. Τέλος, όσον αφορά το κουτί και το έμβολο, τα οποία όπως σημειώθηκε είναι από ξύλο, σχεδιάστηκαν με γνώμονα τη δυνατότητα που είχε ο ξυλουργός να τα κατασκευάσει. Αναφορικά με τον τρόπο κίνησης του εμβόλου μέσα στο κουτί, προτάθηκαν αρκετές ιδέες για την ομαλή και σταθερή ευθύγραμμη κίνηση του με μειωμένες τριβές, αλλά ήταν αδύνατο να εφαρμοστούν. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν ροδάκια στις πλευρές του εμβόλου, προκειμένου να ικανοποιηθούν τα εν λόγω. Η σύνδεση του διωστήρα με το έμβολο έγινε μέσω ενός πύρου ο οποίος στερεώνεται σε μια επιπλέον μικρή ξύλινη κατασκευή, η οποία είναι πακτωμένη στην πίσω πλευρά του εμβόλου. Το πάχος του εμβόλου και του κουτιού είναι 16 mm.



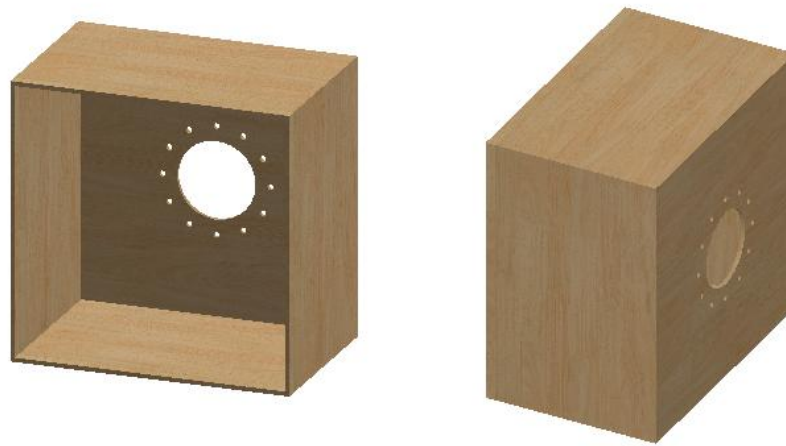
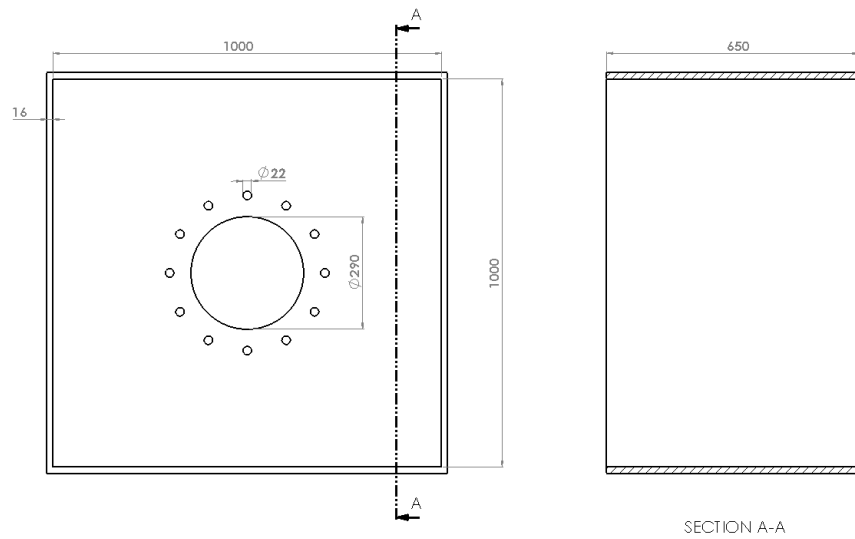
Σχήμα 5.21: Λειτουργία στροφαλοφόρου άξονα

Στο παραπάνω σχήμα λοιπόν (Σχήμα 5.21) γίνεται αντιληπτό πως η ακτίνα του στροφαλοφόρου άξονα μπορεί να μεταβάλλεται, με σκοπό τον έλεγχο διαφορετικών συχνοτήτων αλλά και ταχυτήτων. Η πατούρα που φαίνεται στα παραπάνω σχέδια σχεδιάστηκε προκειμένου να γίνει αντιληπτό στον μηχανουργό ότι σ' εκείνο το σημείο θα πρέπει να μπει σφήνα, με σκοπό να γίνει σταθερή η σύνδεση του στροφαλοφόρου άξονα με τον κινητήρα. Όσον αφορά την καμπύλη που διακρίνεται, δεν σημειώθηκαν διαστάσεις διότι, ήταν πολύ δύσκολο κατασκευαστικά να επιβληθεί κάποιος συγκεκριμένος τρόπος δημιουργίας της.



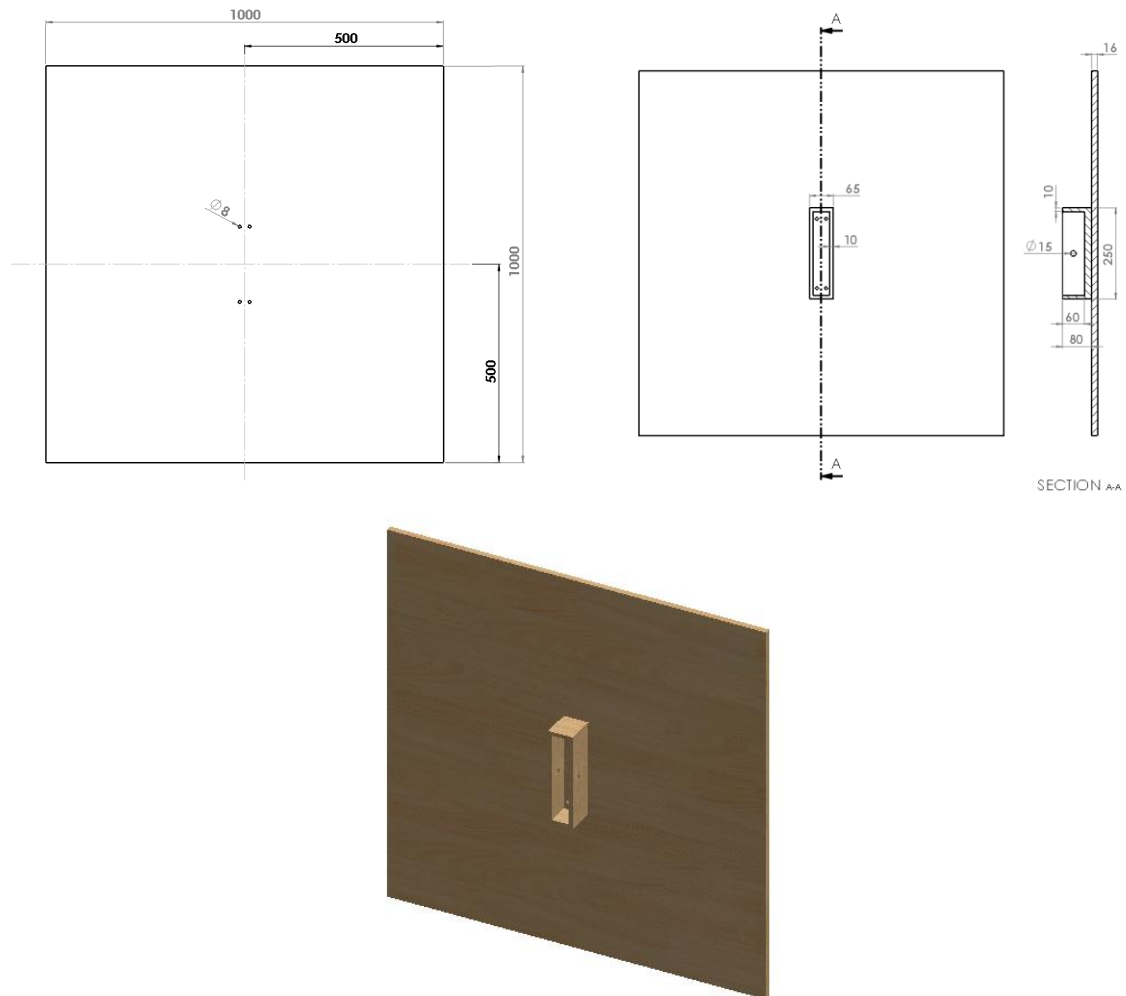
Σχήμα 5.22: Διωστήρας

Όπως γίνεται κατανοητό από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 5.22), ο διωστήρας είναι ιδιαίτερα απλή γεωμετρία, ορθογωνικής διατομής.



Σχήμα 5.23: Κουτί

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 5.23) φαίνεται πως στο κουτί έχει σχεδιαστεί αντίστοιχη φλάτζα με του σωλήνα, προκειμένου να μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους. Η ροή του αέρα στην έξοδο του κουτιού, οδηγείται απευθείας στην είσοδο του σωλήνα.



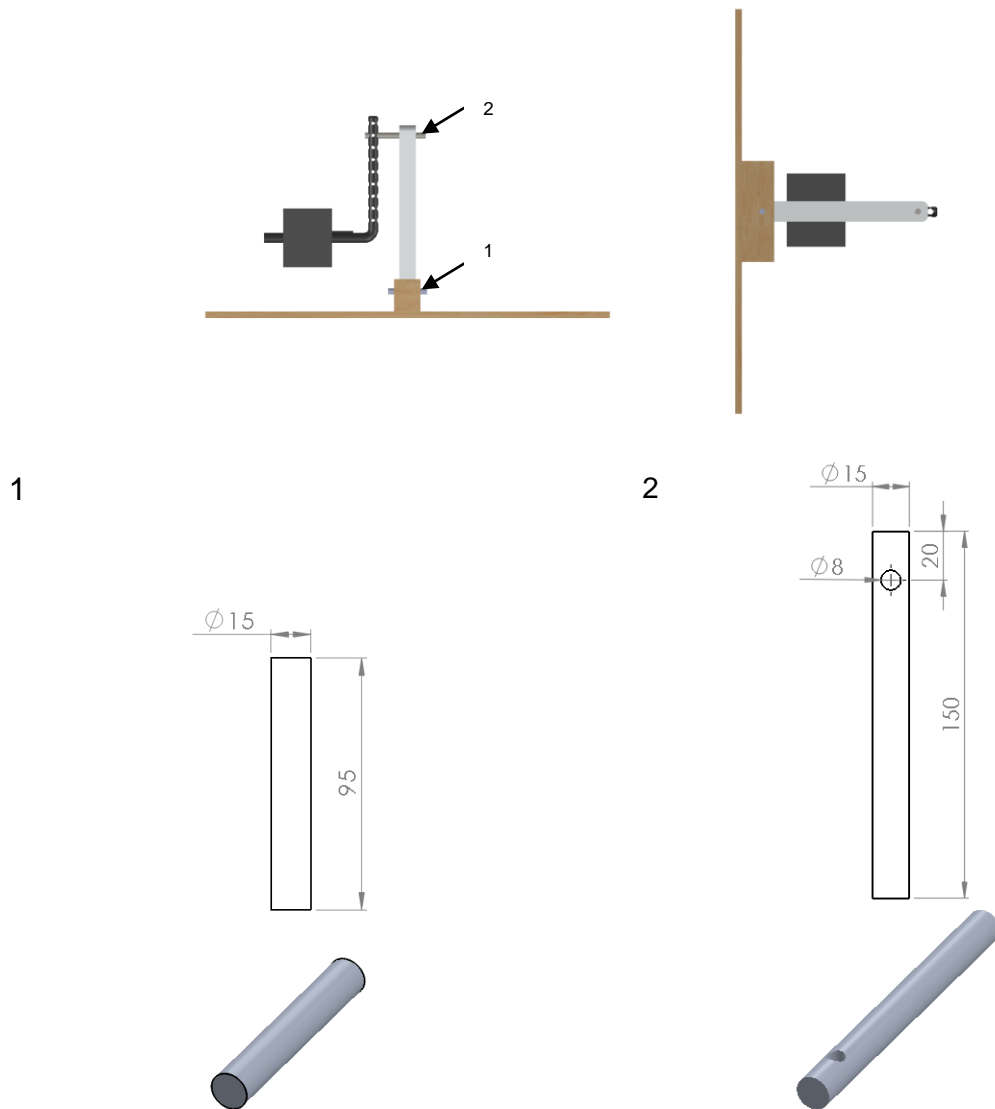
Σχήμα 5.24: Έμβολο

Όσον αφορά το επιπρόσθετο κουτί που βιδώθηκε στο έμβολο (Σχήμα 5.24), προκειμένου να γίνει η σύνδεση με τον διωστήρα, σχεδιάστηκε βάσει του διωστήρα αλλά και της μέγιστης γωνίας του τελευταίου κατά τη φάση της ταλάντωσης. Η μέγιστη αυτή γωνία, φ , εξάγεται από την σχέση:

$$\varphi = \frac{r \sin \alpha}{l}$$

όπου, r και l η ακτίνα του στροφαλοφόρου άξονα και το μήκος του διωστήρα αντίστοιχα και $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$. Υπολογίζοντας λοιπόν τη μέγιστη γωνία, με τη βοήθεια του Matlab, εξάγεται και το ύψος που πρέπει να έχει το πρόσθετο κουτί για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, μέσω της σχέσης:

$$\text{Ελάχιστο ύψος} = \sin(\varphi) \cdot l$$



Σχήμα 5.25: Συνδεσμολογία εμβόλου και πύροι σύνδεσης

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 5.25) όπου φαίνεται η συνδεσμολογία για τη λειτουργία του εμβόλου, το μαύρο τετράγωνο κουτί αντιπροσωπεύει τον κινητήρα. Με τους αριθμούς 1 και 2, σημειώνονται οι πύροι που χρειάστηκαν για τη σύνδεση του διωστήρα με το επιπρόσθετο κουτί και του διωστήρα με τον στροφαλοφόρο άξονα. Η τελευταία ένωση γίνεται με τη χρήση βίδας διαμέτρου 8 mm, η οποία βιδώνει στον στροφαλοφόρο άξονα.

Καταλήγοντας, στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 5.26) παρουσιάζονται μερικές φωτογραφίες από τα αντικείμενα που σχολιάστηκαν σ' αυτήν την ενότητα, μετά την κατασκευή τους.

Στροφαλοφόρος άξονας



Διωστήρας



Συνδεσμολογία διωστήρα με στροφαλοφόρο άξονα



Κουτί και Έμβολο



Κινητήρας και inverter



Σχήμα 5.26: Κασκευασμένα αντικείμενα για την μοντελοποίηση της παλινδρομικής κίνησης του αέρα

5.1.8 Εγκατάσταση πειραματικής διάταξης

Κατά τη διαδικασία εγκατάστασης της πειραματικής διάταξης προέκυψαν αρκετά προβλήματα. Η πηγή των προβλημάτων κατά το μεγαλύτερο ποσοστό, έγκειται στην ανομοιομορφία του σωλήνα που αγοράστηκε. Αντί ο σωλήνας να έχει κυκλική διατομή καθόλο το μήκος του, παρουσίαζε πάρα πολλές ανομοιομορφίες, με αποτέλεσμα να μοιάζει περισσότερο σε οβάλ διατομή. Μάλιστα, η διάμετρος του σωλήνα σε σημεία ήταν κάτω από 288 mm και συνεπώς, ήταν αδύνατον να μπει ο στρόβιλος καθώς, υπενθυμίζεται πως το διάκενο μεταξύ της κορυφής των πτερυγίων και του τοιχώματος του σωλήνα ήταν μόλις 1 mm (διάμετρος κορυφής πτερυγίου= 288 mm). Επιπλέον, το κέντρο του σωλήνα δεν ήταν στο σημείο που αναμενόταν εξαιτίας της αυτής σχεδόν οβάλ διατομής. Συνεπώς, έπρεπε να γίνουν δύο ενέργειες. Η πρώτη αφορούσε τη μείωση του ύψους του πτερυγίου και η δεύτερη τον τρόπο τοποθέτησης του στροβίλου και των παρελκομένων του εντός του σωλήνα.

Όσον αφορά τη μείωση του ύψους των πτερυγίων, αυτή επιτεύχθηκε με τη χρήση γυαλόχαρτου. Όλα τα πτερύγια προφανώς, έπρεπε να έχουν το ίδιο ύψος ως τελικό αποτέλεσμα. Επιπλέον, προσοχή ήθελε η καμπύλη στην κορυφή των πτερυγίων, ώστε να μην παραμορφωθεί και να έχει τη μορφή με την οποία σχεδιάστηκε. Με τη χρήση του παχύμετρου και με πολύ αργούς ρυθμούς, προκειμένου να μη γίνει κάποιο λάθος, το ύψος των πτερυγίων μειώθηκε στα 61 mm. Το τελικό αυτό ύψος των πτερυγίων αποφασίστηκε κατά τη διαδικασία της μείωσης με τον παράλληλο έλεγχο της τοποθέτησης του στροβίλου εντός του σωλήνα.

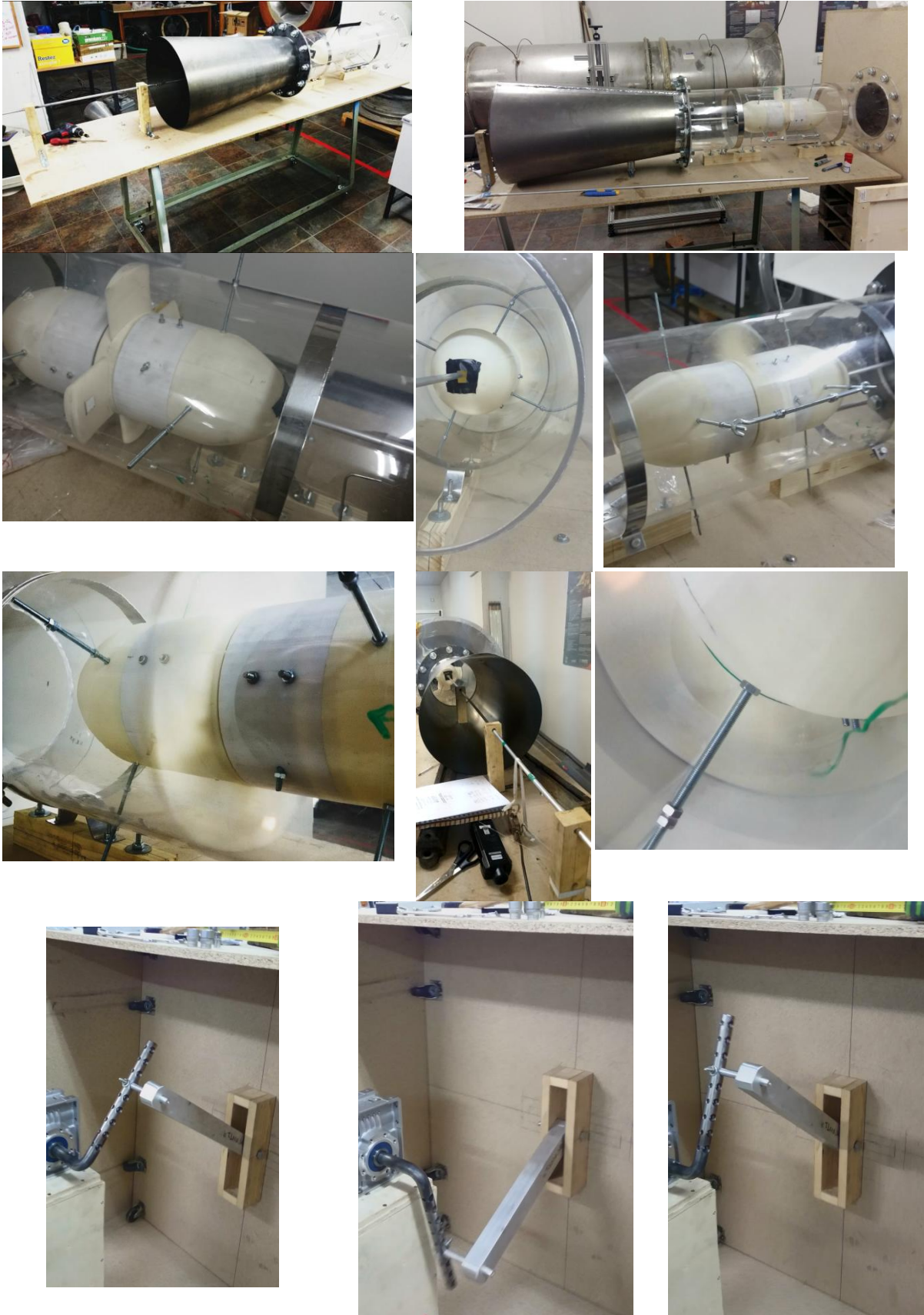
Στη συνέχεια, αφού ο στρόβιλος έμπαινε μέσα στον σωλήνα, έπρεπε να βρεθεί κάποιος τρόπος ώστε να κεντραρισθεί εντός του. Η διαδικασία εύρεσης του κέντρου του σωλήνα ήταν αρκετά δύσκολη. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο σωλήνας έχει σχεδόν οβάλ διατομή. Αυτό σημαίνει ότι σε μερικές θέσεις, δύο συγγραμικά σημεία πάνω στο τοίχωμα του σωλήνα δεν είχαν την ίδια απόσταση από το κέντρο. Άρα, δεν ήταν ούτε οβάλ η εν λόγω διατομή. Συνεπώς, κατά την περιστροφή του στροβίλου, έχοντας βρεί το υποτιθέμενο κέντρο του σωλήνα, δύο αντιδιαμετρικά σημεία του απήχαν διαφορετική απόσταση από την κορυφή του πτερυγίου, με αποτέλεσμα τα πτερύγια καθώς περνάνε από το σημείο που έχει ελάχιστο διάκενο να ακουμπάνε στο τοίχωμα. Επομένως, έπρεπε να γίνει με διαφορετικό τρόπο η τοποθέτηση του στροβίλου. Κύριο μέλημα ήταν η όσο γίνεται τοποθέτηση του στροβίλου με τέτοιο τρόπο ώστε, το διάκενο μεταξύ της κορυφής του πτερυγίου και του σωλήνα να προσεγγίζει το 1 mm. Ο έλεγχος του διακένου γινόταν με τη χρήση φύλλων αλουμινίου τα οποία έχουν διάφορα πάχη, από 0.05 mm έως 1 mm (Σχήμα 5.27). Τελικά, ο στρόβιλος τοποθετήθηκε σταθερά εντός του σωλήνα και κατά την περιστροφή του δεν εντοπίζονταν δυσκολίες, τουλάχιστον στον έλεγχο με χαμηλές

ταχύτητες περιστροφής του. Ως γνωστόν στις στροβιλομηχανές, το διάκενο παίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά της ροής κοντά στην κορυφή του πτερυγίου, στα χαρακτηριστικά εκκίνησης και λειτουργίας του στροβίλου και τελικά, στο παραγόμενο έργο και στην απόδοση αυτού. Τα διαφορετικά διάκενα προέκυψαν αναγκαστικά και δεν μπορούσε να γίνει κάτι καλύτερο.



Σχήμα 5.27: Φύλλα αλουμινίου για τον υπολογισμό του διακένου

Εφόσον λύθηκαν κατά βάση τα παραπάνω προβλήματα, έπρεπε να γίνει η σύνδεση του διαχύτη με τον σωλήνα και του σωλήνα με το κουτί. Αποφασίστηκε ο σωλήνας με τον διαχύτη να στηριχτούν πάνω σ' έναν ξύλινο πάγκο. Ο σωλήνας υψώθηκε επιπλέον ώστε, το άνοιγμα του διαχύτη να καταλήγει πάνω στην επιφάνεια του πάγκου. Ο σωλήνας στηρίχθηκε στο συγκεκριμένο ύψος πάνω σε ξύλα, βιδώνοντας δύο δακτύλιους σ' αυτά. Οι εν λόγω δακτύλιοι αγκαλιάζουν όλη την περιφέρεια του, κρατώντας τον σταθερό. Κατά την αγορά του πάγκου, κόπηκαν και κάποια επιπλέον τεμάχια ξύλου. Η στήριξη του άξονα μέχρις στιγμής, βασιζόταν μόνο στις βάσεις στήριξης στην περιοχή κοντά στο στρόβιλο. Όπως είχε αναφερθεί, είναι αδύνατον ένας άξονας μήκους 2.5 m να στηρίζεται μόνο σε δύο σημεία τα οποία βρίσκονται στο πρώτο 1/5 του μήκους του. Συνεπώς, τα επιπλέον τεμάχια ξύλου χρησιμοποιήθηκαν για την περαιτέρω στήριξη του άξονα. Στα εν λόγω ξύλα ανοίχτηκαν οπές, μέσα στις οποίες εγκαταστάθηκαν αντίστοιχα ρουλεμάν μ' αυτά των βάσεων στήριξης. Το ένα τεμάχιο ξύλου έπρεπε να μπει κοντά στην έξοδο του σωλήνα. Έτσι, ανοίχτηκε μια κατάλληλη διατομή στον διαχύτη προκειμένου να περάσει το ξύλο. Τα επόμενα δύο τεμάχια ξύλου τοποθετήθηκαν μετά τον διαχύτη. Η στήριξη του άξονα δηλαδή, γίνεται σε πέντε σημεία πλέον. Μια απεικόνιση των εν λόγω ενεργειών φαίνεται σε παρακάτω σχήμα ([Σχήμα 5.28](#)).



Σχήμα 5.28: Πειραματική διάταξη

5.2 Πειραματικές μετρήσεις με τη δοκιμή του στροβίλου σε αεροσήραγγα

Κατά τη δοκιμή του στροβίλου στην αεροσήραγγα, που στην ουσία ήταν και ο πρώτος έλεγχος της συμπεριφοράς του στροβίλου γεωμετρίας B, η πρώτη παρατήρηση αφορούσε την ταχύτητα περιστροφής του. Η ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου μετρήθηκε με ένα ταχύμετρο από τον άξονα του (πράσινη με φωσφορίζουσα ταινία,). Ο στρόβιλος δεν ήταν ικανός να πιάσει τις στροφές για τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι υπολογιστικές προσομοιώσεις. Συγκεκριμένα, τα CFD είχαν δείξει πως ο στρόβιλος παράγει θετική ροπή και στις 4000 rpm, όπου μάλιστα παρουσίαζε το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και το μεγαλύτερο εύρος συντελεστών ροής με μεγάλο βαθμό απόδοσης, συγκριτικά με τις άλλες δύο ταχύτητες περιστροφής που ελέγχθηκαν (2000, 3000 rpm). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται σε τρεις λόγους.

Οι δύο πιο προφανείς λόγοι αφορούν το πείραμα αυτό καθ' εαυτό και τον τρόπο με τον οποίο έγινε η εγκατάσταση του. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το διάκενο μεταξύ κορυφής πτερυγίου και περιβλήματος δεν ήταν ομοιόμορφα κατανομημένο και ίσο με 1 mm, όπως είχε σχεδιαστεί εξ' αρχής και κατά τις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Η ανομοιόμορφη κατανομή του διακένου περιφερειακά του στροβίλου, αρχικά αφαιρεί, κατά ένα μεγάλο ποσοστό, τη δυνατότητα που έχει ο οποιοσδήποτε μελετητής να συγκρίνει τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα υπολογιστικά της παρούσας εργασίας. Συνεπώς, δεν μπορεί να υπάρχει ούτε η απαίτηση ο στρόβιλος να μπορεί να πιάσει τις συγκεκριμένες στροφές για τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι υπολογιστικές προσομοιώσεις. Κατά δεύτερο λόγο, η αδυναμία του στροβίλου να αναπτύξει τις ταχύτητες που προβλέπονταν, μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι υπήρχαν ταλαντώσεις στο σύνολο της κατασκευής. Βέβαια, οι εν λόγω ταλαντώσεις ήταν πολύ μικρής εντάσεως για ταχύτητες εισαγωγής κάτω από 6 m/s, με την έννοια ότι τα αποτελέσματα των ταλαντώσεων αυτών δεν έγιναν άμεσα αντιληπτά. Μετά απ' αυτήν την ταχύτητα εισαγωγής ωστόσο, οι ταλαντώσεις ήταν έντονα αισθητές, τόσο λόγω της μεγαλύτερης περιστροφικής ταχύτητας του στροβίλου όσο και λόγω των υψηλών ταχυτήτων ανέμου που έπνεαν μέσα στον σωλήνα. Σημειώνεται μάλιστα πως, για μη περιστρεφόμενο στρόβιλο και ταχύτητες εισαγωγής πάνω από 6 m/s, παρατηρήθηκαν έντονες ταλαντώσεις σ' όλο το σύστημα. Σε συνδυασμό με τις ταλαντώσεις λόγω περιστροφής του στροβίλου, το αποτέλεσμα ήταν τα πτερύγια να χτυπάνε στο σωλήνα. Συνεπώς, ακόμα και αν ο στρόβιλος μπορούσε να πιάσει τις επιθυμητές ταχύτητες περιστροφής κατά τις μεγαλύτερες ταχύτητες εισαγωγής, οι ταλαντώσεις περιόριζαν δραματικά αυτήν του την ικανότητα.

Ο τρίτος λόγος που μπορεί να εξηγήσει την εν λόγω αδυναμία του στροβίλου να πιάσει τις επιθυμητές ταχύτητες περιστροφής, είναι αυτός που αναφέρθηκε ως φαινόμενο crawling στο κεφάλαιο της εισαγωγής (1.3.3.11 Χαρακτηριστικά εκκίνησης στροβίλου Wells). Ακόμα και αν η εγκατάσταση του στροβίλου ήταν ιδανική και δεν παρουσίαζε ταλαντώσεις ενώ παράλληλα, το διάκενο ήταν ομοιόμορφα κατανομημένο περιφερειακά του στροβίλου, τα εξαγόμενα αποτελέσματα από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής, αναφορικά με τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου (4.4.1 Χαρακτηριστικά εκκίνησης στροβίλου), μπορούν να δείξουν πως για μια περιοχή όπου ο στροβίλος έχει συγκεκριμένες ταχύτητες περιστροφής κατά την εκκίνηση αυτού, ο συντελεστής της εφαιπτομενικής δύναμης φαίνεται να είναι αρνητικός, αναγκάζοντας τον στροβίλο στην ουσία να ελαττώσει ταχύτητα. Τα εν λόγω CFD δείχνουν πως ο στροβίλος καταφέρνει να ξεπεράσει αυτή την περιοχή και να αναπτύξει αξιοσημείωτη ταχύτητα περιστροφής στη συνέχεια. Ωστόσο, το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιούνται οι υπολογιστικές προσομοιώσεις είναι ιδανικό και δεν λαμβάνουν υπόψη τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν κατά την πραγματοποίηση του αντίστοιχου πειράματος. Συνεπώς, δεν πρέπει να προκαλεί έκπληξη η αδυναμία του στροβίλου να πιάσει τις προβλεπόμενες ταχύτητες περιστροφής, πόσο μάλλον εάν κατά τον πειραματικό έλεγχο υφίστανται και τα δύο προηγούμενα φαινόμενα.

Κατά τον πρωταρχικό πειραματικό έλεγχο λοιπόν, λόγω των ταλαντώσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω και το χτύπημα των πτερυγίων στον σωλήνα, δεν υπήρχε λόγος να αυξηθεί η ταχύτητα εισαγωγής πάνω απ' αυτή για την οποία παρατηρούνταν οι εν λόγω ταλαντώσεις, τουλάχιστον όχι κατά τη δοκιμή του στροβίλου χωρίς κάποιο επιβαλλόμενο φορτίο, με το οποίο θα υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης των στροφών και επομένως, ο εν μέρη έλεγχος των ταλαντώσεων λόγω της περιστροφής του στροβίλου. Σκοπός του πειραματικού ελέγχου ήταν να παρθούν κάποιες μετρήσεις και όχι να διακινδυνευτεί η ασφάλεια του συστήματος. Έτσι, ο αρχικός έλεγχος χωρίς κάποιο επιβαλλόμενο φορτίο έγινε προκειμένου να γίνει αντιληπτό το μέγεθος των στροφών που μπορούσε να αναπτύξει ο στροβίλος, μέχρι το σημείο εμφάνισης των πρώτων ταλαντώσεων. Επειδή οι εν λόγω ταλαντώσεις εμφανίζονταν στην τρίτη ταχύτητα εισαγωγής, θεωρήθηκε πως έπρεπε να ελεγχθούν ταχύτητες εισαγωγής με μικρότερο βήμα αύξησης. Στον παρακάτω πίνακα λοιπόν (Πίνακας 5.2), σημειώνονται μερικές από τις ταχύτητες εισαγωγής και οι αντίστοιχες περιστροφικές ταχύτητες του στροβίλου, όπως αυτές μετρήθηκαν από το όργανο pitot και το ταχύμετρο αντίστοιχα. Στο σημείο αυτό να αναφερθεί πως, το όργανο pitot έδειχνε πάντα δύο τιμές για την ταχύτητα εισαγωγής του αέρα, με διαφορά στο πρώτο δεκαδικό και συνεπώς, στον παρακάτω πίνακα οι ταχύτητες εισαγωγής θα απεικονιστούν με τον τρόπο αυτό. Στη συνέχεια των πειραματικών

μετρήσεων, όπου θα ακολουθήσουν οι εξαγόμενες καμπύλες της ροπής, οι υπολογισμοί που απαιτούνταν, έγιναν παίρνοντας τον μέσο όρο των τιμών αυτών.

Πίνακας 5.2: Πειραματικές μετρήσεις κατά τον έλεγχο του στροβίλου με ελεύθερο φορτίο

Ταχύτητα εισαγωγής αέρα (m/s)	Περιστροφική ταχύτητα στροβίλου (rpm)
2.4-2.5	380
2.7-2.8	463
3.2-3.3	571
3.3-3.4	596
3.5-3.6	646
3.8-3.9	700
4.1-4.2	761
4.5-4.6	837
5.1-5.2	963
5.4-5.5	1030
5.8-5.9	1085
6.0-6.1	1100

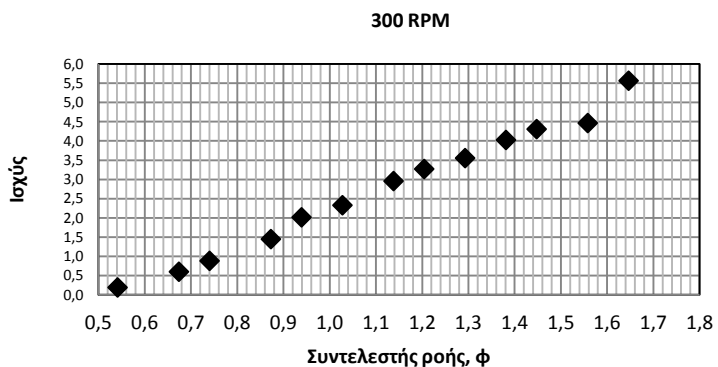
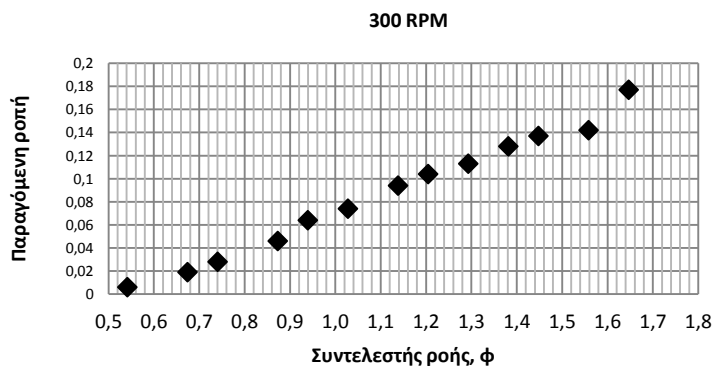
Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα λοιπόν, για τις δύο πρώτες ταχύτητες εισαγωγής για τις οποίες παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου στο κεφάλαιο 4 ([Σχήμα 4.78](#) και [Σχήμα 4.79](#) αντίστοιχα), φαίνεται τελικά πως, οι περιοχές που σημειώθηκαν με μαύρους κύκλους έχουν κάποια σημασία αφού, οι ταχύτητες περιστροφής του στροβίλου που μετρήθηκαν πειραματικά βρίσκονται εντός αυτών. Η εγκατάσταση του στροβίλου δεν ήταν η ιδανική, όπως έχει ειπωθεί, και γι' αυτό σημειώνεται πως υπάρχει μια επιφύλαξη στην εν λόγω αιτιολόγηση. Συγκεκριμένα, για την πρώτη ταχύτητα εισαγωγής, η παραγόμενη ροπή από το [Σχήμα 4.78](#) φαίνεται να είναι σχεδόν μηδενική για περιστροφική ταχύτητα στροβίλου ισοδύναμη με 210 rpm ενώ, γίνεται αρνητική για ένα εύρος στροφών από 440-540 rpm και ξανά θετική με σχεδόν μηδενική τιμή για ένα εύρος στροφών από 545-625 rpm. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν πως, ακόμα και αν η λειτουργία του στροβίλου ήταν έτσι όπως είχε σχεδιαστεί εξ' αρχής, ο στρόβιλος μπορεί να μην ξεπερνούσε την περιοχή αυτή κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και συνεπώς, να διατηρούσε μια ταχύτητα περιστροφής στα παραπάνω εύρη τιμών που αναφέρθηκαν. Τα ίδια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και για τη δεύτερη ταχύτητα εισαγωγής, όπου η παραγόμενη ροπή φαίνεται να είναι μικρότερη για ένα εύρος στροφών από 705-805 rpm. Τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου δείχνουν πως, οι περιοχές με τις χαμηλότερες τιμές ροπής επιδρούν λιγότερο όσο αυξάνει η ταχύτητα εισαγωγής και συνεπώς, ο στρόβιλος έχει την ικανότητα να ξεπεράσει πιο εύκολα το εμπόδιο αυτό και να αναπτύξει μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής. Ωστόσο, στην παρούσα πειραματική διάταξη, αναφορικά με τον έλεγχο του στροβίλου με ελεύθερο φορτίο, δεν υπήρξε η δυνατότητα ελέγχου της συμπεριφοράς του στροβίλου για μεγαλύτερες από 6 m/s ταχύτητες εισαγωγής, λόγω της εμφάνισης των ταλαντώσεων που σχολιάστηκαν προηγουμένως. Επομένως, δεν ήταν εφικτός ο περαιτέρω σχολιασμός του

φαινομένου αυτού, με τον τρόπο που έγινε παραπάνω και συνεπώς, δεν υπάρχει κάποια πληροφορία για το αν τελικά ο στρόβιλος θα κατάφερνε να επιταχυνθεί μέχρι τις επιθυμητές ταχύτητες περιστροφής.

Στη συνέχεια, έχοντας καταγράψει τα μεγέθη των ταχυτήτων περιστροφής που μπορεί να αναπτύξει ο στρόβιλος κάτω από τις παρούσες συνθήκες, επιβλήθηκε φορτίο στον άξονα με τον οποίο συνδέεται, με άμεσο σκοπό την απεικόνιση της καμπύλης της ροπής και της ισχύος για ταχύτητες περιστροφής από 300-900 rpm, με βήμα 100 rpm και για τις ταχύτητες εισαγωγής που παρουσιάστηκαν στον παραπάνω πίνακα. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως, για μερικές ταχύτητες περιστροφής ελέγχθηκαν και παραπάνω ταχύτητες εισαγωγής, αφού με την επιβολή φορτίου σε κάποιες περιπτώσεις, η εμφάνιση των ταλαντώσεων δεν ήταν άμεσα αντιληπτές. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι εξαγόμενες καμπύλες ροπής και ισχύος (Σχήμα 5.29 - Σχήμα 5.35). Για κάθε μία ταχύτητα περιστροφής θα σημειώνονται και οι ταχύτητες εισαγωγής για τις οποίες ελέγχθηκε η συμπεριφορά του στροβίλου ενώ, με κόκκινο χρώμα θα σημειώνονται οι ταχύτητες εισαγωγής για τις οποίες παρατηρούνταν χτυπήματα των πτερυγίων στον σωλήνα, σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Η ροπή μετρήθηκε με το ροπόμετρο που ήταν διαθέσιμο και του οποίου η ανάλυση ήταν 0.2 Nm ενώ, είχε ακρίβεια ένα δεκαδικό. Η παραγόμενη ισχύς υπολογίστηκε σε Watt από τη σχέση $P=T\omega$ όπου, T η παραγόμενη ροπή και ω η ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου σε rad/s.

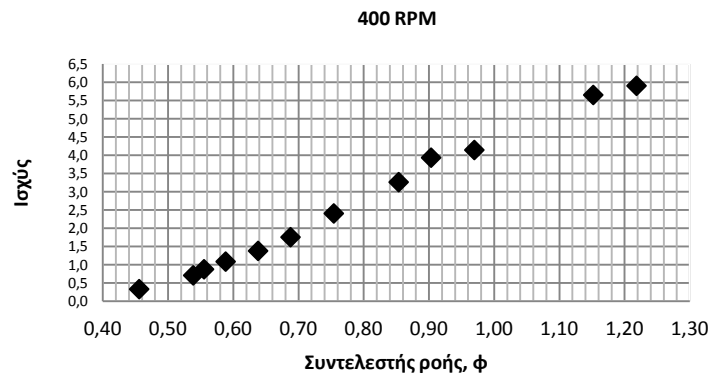
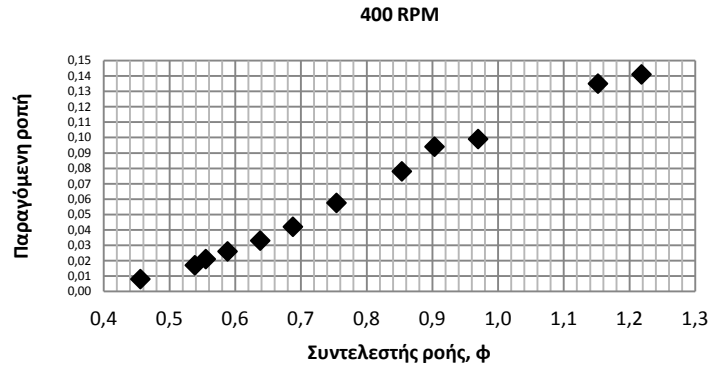
Ταχύτητες εισαγωγής (m/s)

2.4-2.5
3.0-3.1
3.3-3.4
3.9-4.0
4.2-4.3
4.6-4.7
5.1-5.2
5.4-5.5
5.8-5.9
6.2-6.3
6.5-6.6
7.0-7.1
7.4-7.5



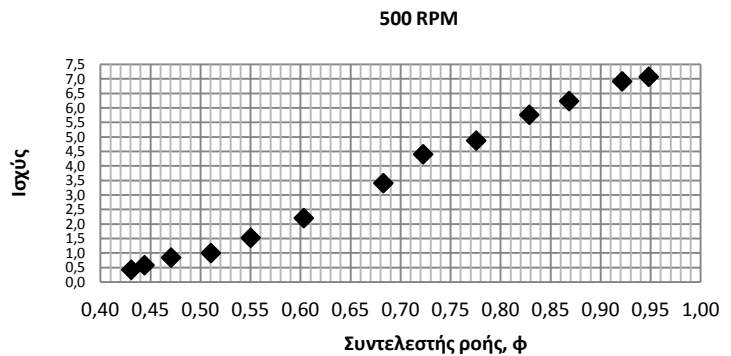
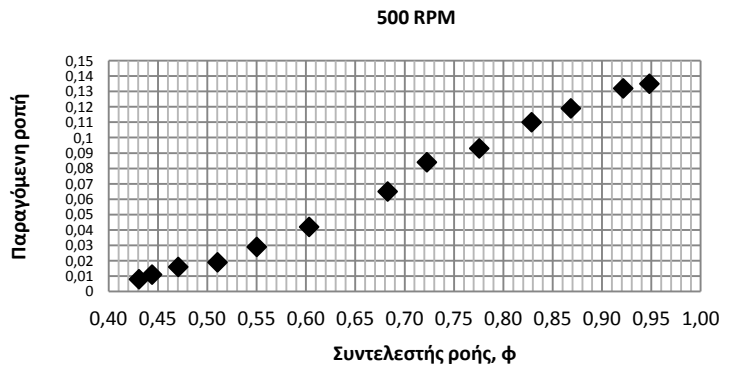
Σχήμα 5.29: Παραγόμενη ροπή και ισχύς για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 300 rpm

Ταχύτητες εισαγωγής (m/s)
2.7-2.8
3.2-3.3
3.3-3.4
3.5-3.6
3.8-3.9
4.1-4.2
4.5-4.6
5.1-5.2
5.4-5.5
5.8-5.9
6.9-7.0
7.3-7.4



Σχήμα 5.30: Παραγόμενη ροπή και ισχύς για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 400 rpm

Ταχύτητες εισαγωγής (m/s)
3.2-3.3
3.3-3.4
3.5-3.6
3.8-3.9
4.1-4.2
4.5-4.6
5.1-5.2
5.4-5.5
5.8-5.9
6.2-6.3
6.5-6.6
6.9-7.0
7.1-7.2

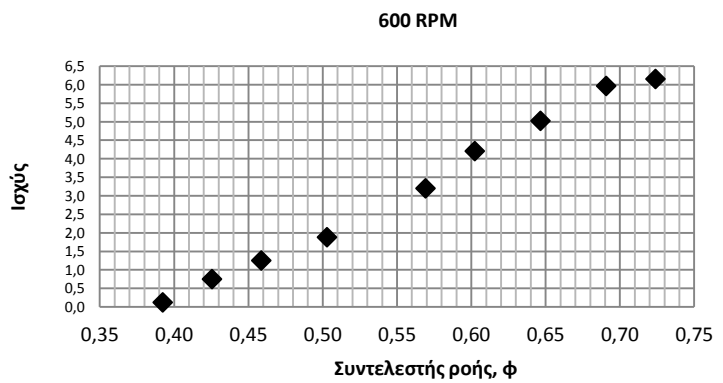
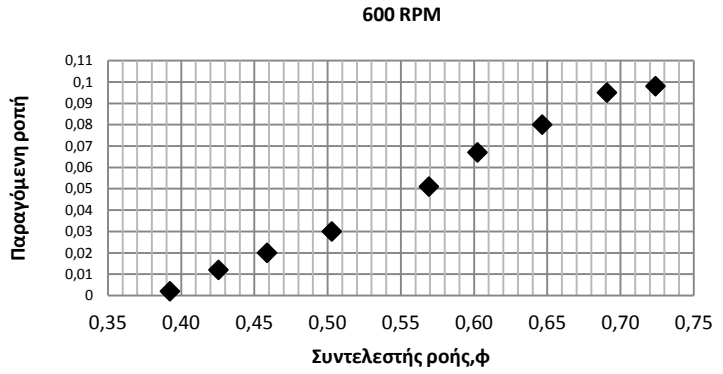


Σχήμα 5.31: Παραγόμενη ροπή και ισχύς για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 500 rpm

Ταχύτητες εισαγωγής (m/s)

3.5-3.6
3.8-3.9
4.1-4.2
4.5-4.6

5.1-5.2
5.4-5.5
5.8-5.9
6.2-6.3
6.5-6.6

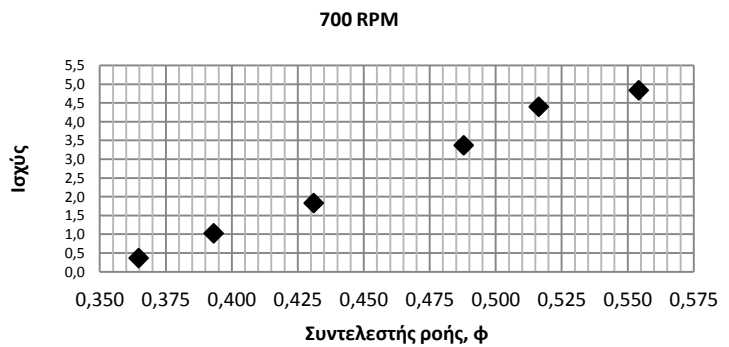
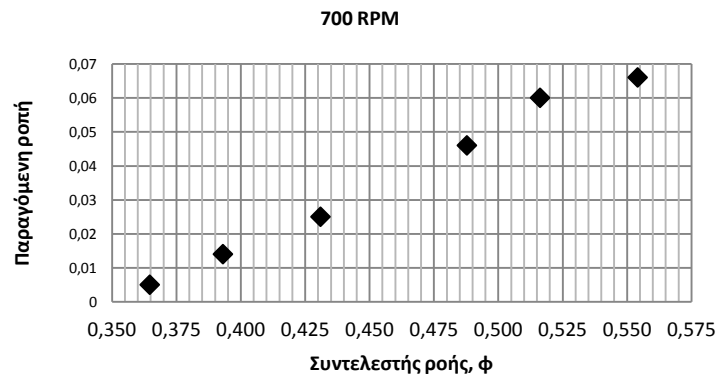


Σχήμα 5.32: Παραγόμενη ροπή και ισχύς για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 600 rpm

Ταχύτητες εισαγωγής (m/s)

3.8-3.9
4.1-4.2
4.5-4.6
5.1-5.2
5.4-5.5

5.8-5.9



Σχήμα 5.33: Παραγόμενη ροπή και ισχύς για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 700 rpm

Ταχύτητες εισαγωγής (m/s)

4.5-4.6

5.1-5.2

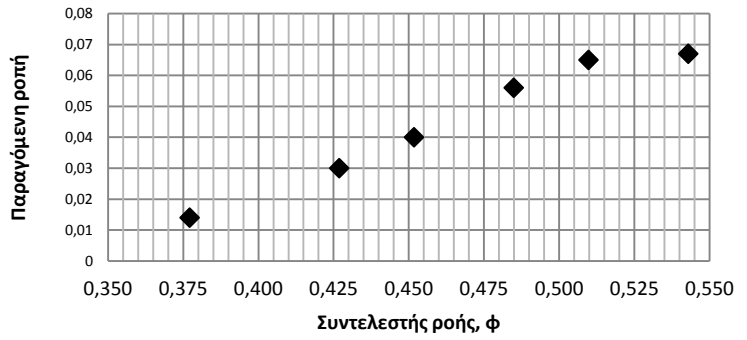
5.4-5.5

5.8-5.9

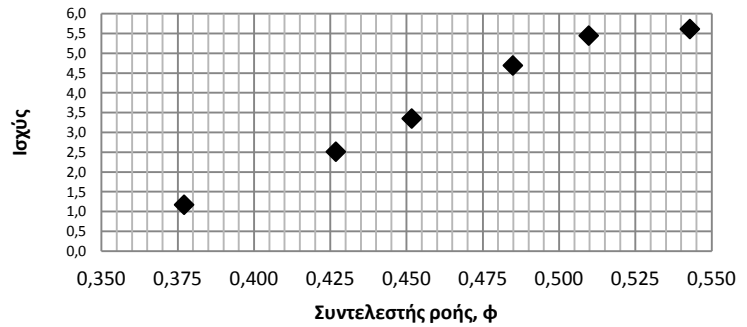
6.1-6.2

6.5-6.6

800 RPM



800 RPM



Σχήμα 5.34: Παραγόμενη ροπή και ισχύς για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 800 rpm

Ταχύτητες εισαγωγής (m/s)

5.1-5.2

5.4-5.5

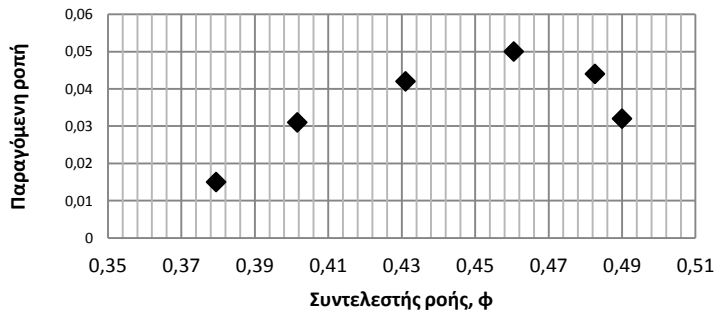
5.8-5.9

6.2-6.3

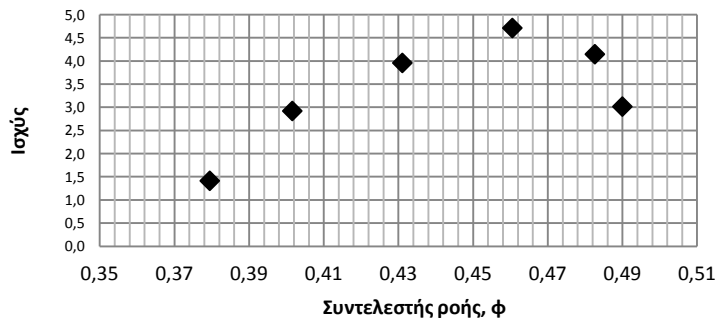
6.5-6.6

6.6-6.7

900 RPM



900 RPM



Σχήμα 5.35: Παραγόμενη ροπή και ισχύς για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 900 rpm

Τα παραπάνω σχήματα δημιουργήθηκαν σε αντιστοιχία με το συντελεστή ροής, ϕ , όπως αυτός είχε οριστεί στην αρχή του κεφαλαίου 4. Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα λοιπόν, μπορεί να δει κανείς αρχικά την αυξητική τάση της καμπύλης της ροπής. Από την καμπύλη της ισχύος φαίνεται πως παράγονται ποσά ενέργειας ωστόσο, είναι εξαιρετικά χαμηλά. Δυστυχώς, λόγω των ταλαντώσεων που επικρατούσαν κατά τον πειραματικό έλεγχο, δεν ήταν εφικτό να επισημανθεί το σημείο εμφάνισης της απώλειας στήριξης, αναφερόμενοι στο σύνολο των πειραματικών μετρήσεων, αν και από τη μορφή των καμπυλών φαίνεται πως τείνει να επιτευχθεί η αναμενόμενη συμπεριφορά. Μάλιστα, για περιστροφική ταχύτητα στροβίλου ισοδύναμη με 900 RPM φαίνεται πως το φαινόμενο της απώλειας στήριξης λαμβάνει χώρα για $\phi=0.48$ ωστόσο, κρίνεται πως δεν είναι απόλυτα έμπιστο το εν λόγω συμπέρασμα καθώς, από αυτόν τον συντελεστή ροής και μετά ήταν έντονα αισθητή η παρουσία ταλαντώσεων στο σύστημα. Παρόλ' αυτά, λόγω του ότι οι ταλαντώσεις και τα χτυπήματα των πτερυγίων στον σωλήνα εμφανίζονται σε μεγάλο αριθμό περιπτώσεων για διαφορετικές ταχύτητες εισαγωγής, εξαιτίας της διαφορετικής επίδρασης της ταχύτητας περιστροφής του στροβίλου σ' αυτές, θα μπορούσε να οδηγηθεί κανείς στο συμπέρασμα πως, η παρουσία των εν λόγω ταλαντώσεων ίσως τελικά συνδέεται και με την εμφάνιση του φαινομένου της απώλειας στήριξης, διατηρώντας όμως μια επιφύλαξη για τον σχολιασμό αυτό.

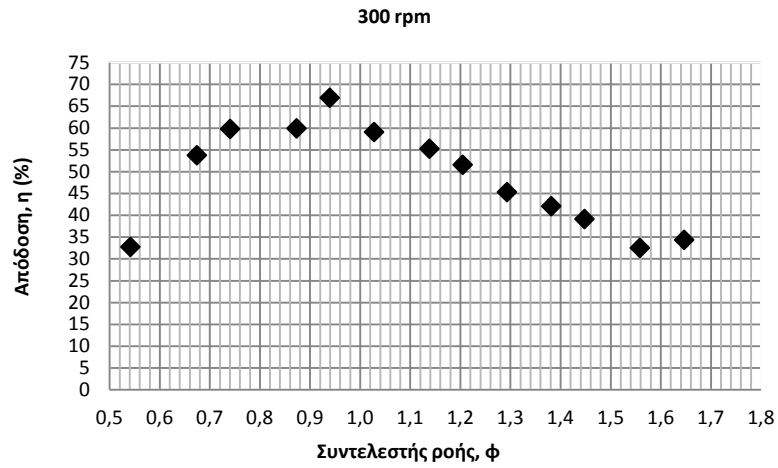
Στο σημείο αυτό, προκειμένου να εξαχθεί μια καμπύλη της απόδοσης του στροβίλου, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση της ισχύος του ανέμου για εξωτερικές ροές, η οποία τονίζεται πως δε λαμβάνει υπόψιν τις απώλειες που υφίστανται στις παρούσες συνθήκες, λόγω της ανάπτυξης του οριακού στρώματος στα τοιχώματα του σωλήνα και συνεπώς, αναμένεται να υποεκτιμήσει την εν λόγω απόδοση του στροβίλου, υπερεκτιμώντας την ενέργεια που έχει ο άνεμος ανάντη του ρότορα. Η σχέση που δίνει τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να φέρει ο άνεμος είναι η ακόλουθη:

$$P_{\text{ανέμου}} = \frac{1}{2} \rho C^3 A$$

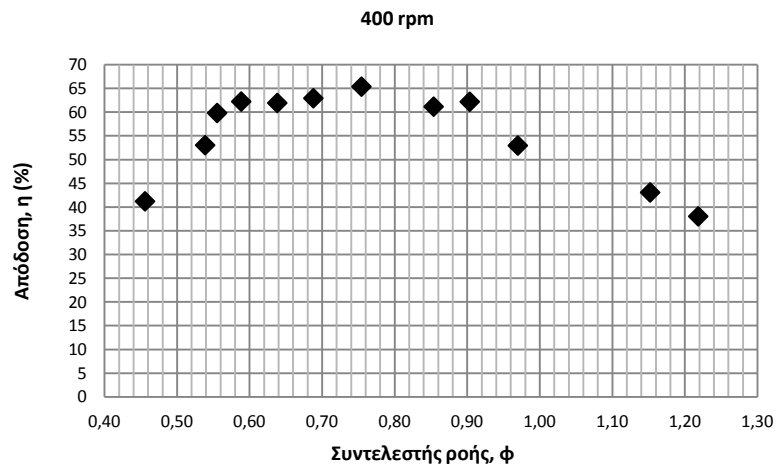
όπου, ρ η πυκνότητα του αέρα, C η ταχύτητα εισαγωγής του ανέμου και A η διατομή που ορίζεται από τη διάμετρο του σωλήνα. Οπότε, οι εν λόγω αποδόσεις του στροβίλου, σε αντιστοιχία με το μέγεθος της παραγόμενης ισχύος (P) που δόθηκε για κάθε περίπτωση στα παραπάνω σχήματα, προκύπτει από τη σχέση:

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{ανέμου}}}$$

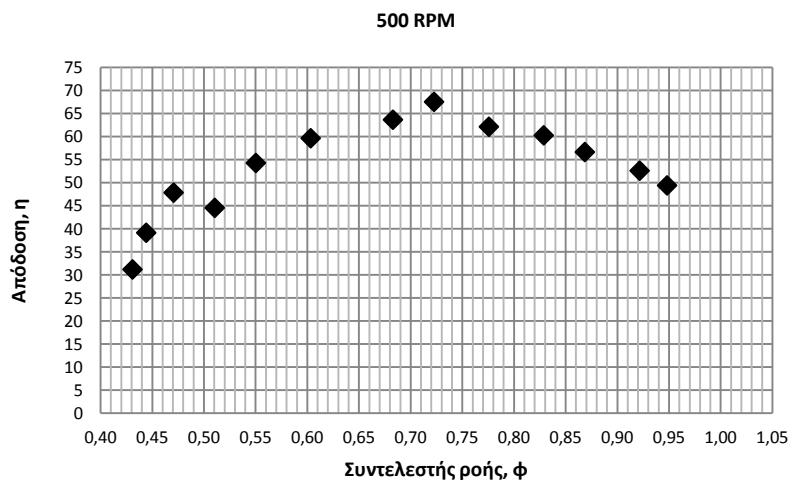
Στα παρακάτω σχήματα λοιπόν (Σχήμα 5.36 - Σχήμα 5.42), παρουσιάζονται τα εξαγόμενα διαγράμματα που απεικονίζουν τις αποδόσεις του πειραματικού στροβίλου, για κάθε ταχύτητα περιστροφής που ελέγχθηκε προηγουμένως.



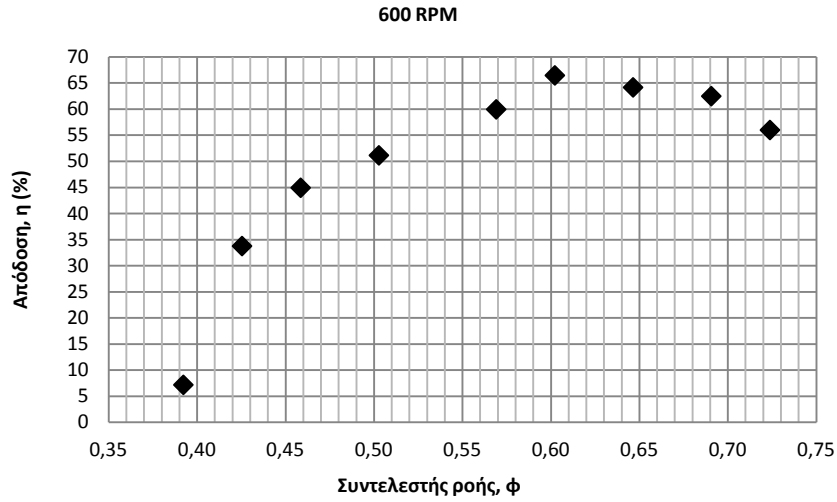
Σχήμα 5.36: Απόδοση στροβίλου για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 300 rpm



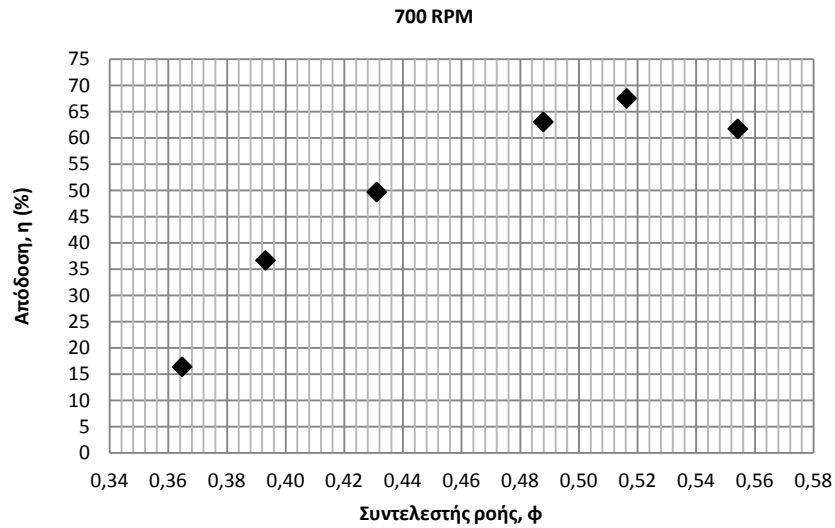
Σχήμα 5.37: Απόδοση στροβίλου για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 400 rpm



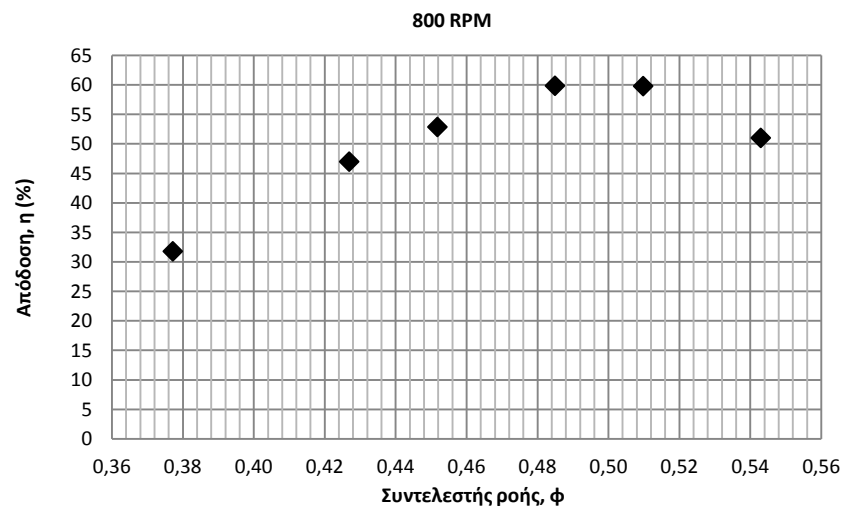
Σχήμα 5.38: Απόδοση στροβίλου για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 500 rpm



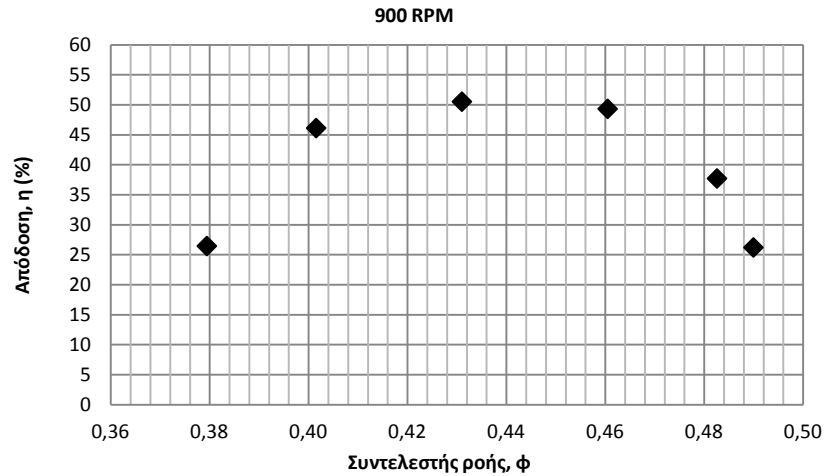
Σχήμα 5.39: Απόδοση στροβίλου για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 600 rpm



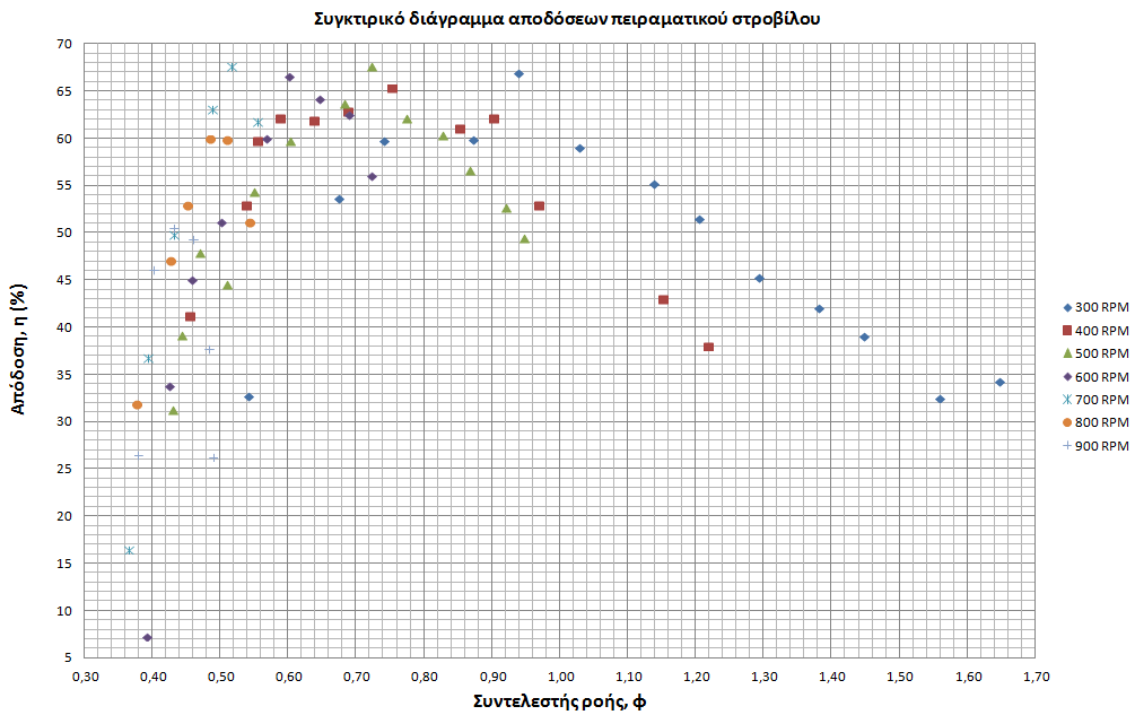
Σχήμα 5.40: Απόδοση στροβίλου για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 700 rpm



Σχήμα 5.41: Απόδοση στροβίλου για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 800 rpm



Σχήμα 5.42: Απόδοση στροβίλου για σταθερή περιστροφική ταχύτητα ισοδύναμη με 900 grm



Σχήμα 5.43: Συγκριτικό διάγραμμα αποδόσεων στροβίλου

Μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως, οι μέγιστοι βαθμοί απόδοσης που επιτυγχάνονται είναι περίπου 65-68%. Συγκεκριμένα, για ταχύτητες περιστροφής του στροβίλου ισοδύναμες με 500 και 700 RPM επιτυγχάνεται το ποσοστό του 68%. Επίσης, για ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου η οποία ισοδυναμεί με 300 RPM, φαίνεται να εξάγεται το μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας (Σχήμα 5.43) με μέγιστο βαθμό απόδοσης περίπου ίσο με 67%. Οι εν λόγω αποδόσεις γενικά συμφωνούν με τις αποδόσεις στροβίλων που έχουν εξαχθεί κατά καιρούς από διάφορες πειραματικές μελέτες. Δεν πρέπει να αμελείτε το γεγονός ότι οι υπολογισμοί που έγιναν υποεκτιμούν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργεί ο στρόβιλος.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκαν εκ του μηδενός δύο διαφορετικές γεωμετρίες αεροστροβίλου τύπου Wells, προκειμένου να ελεγχθεί η συμπεριφορά τους υπολογιστικά αλλά και πειραματικά με την κατασκευή της μιας γεωμετρίας. Στη σχεδίαση τους βοήθησαν τα λογισμικά SolidWorks και Matlab ενώ, για τις υπολογιστικές προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS με επιλυτή τον CFX.

Όσον αφορά τις υπολογιστικές προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν υποδεικνύουν την ικανότητα του στροβίλου Wells να παράγει αξιοσημείωτα ποσά ενέργειας, ελέγχοντας τη συμπεριφορά του κάτω από μόνιμες και μη μόνιμες συνθήκες ροής. Συγκεκριμένα, η μέγιστη παραγόμενη ισχύς κάτω από τη μοντελοποίηση για μόνιμες συνθήκες ροής είναι ίση με περίπου 150 W για τη γεωμετρία A2 ενώ, για τη γεωμετρία B ίση με περίπου 250 W. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης που επιτεύχθηκε είναι περίπου ίσος με 48% για τη γεωμετρία A2 (4000 RPM) και με 51% για τη γεωμετρία B (4000 RPM), με τη γεωμετρία B να παρουσιάζει μάλιστα μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας. Γενικά, όσον αφορά το εύρος λειτουργίας του στροβίλου Wells, ομολογουμένως δεν είναι τόσο μεγάλο, όπως εξάλλου αναμενόταν από τη μελέτη της βιβλιογραφίας. Επιπλέον, αποδείχτηκε πως τα εν λόγω αποτελέσματα έχουν μια σχετική ακρίβεια ωστόσο, η κάλυψη των ελλείψεων, η διόρθωση των λαθών που έγιναν κατά την πορεία και η βελτιστοποίηση της υπολογιστικής μοντελοποίησης κρίνεται απαραίτητη. Αναφορικά με τις υπολογιστικές προσομοιώσεις κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής, ο στροβίλος Wells φαίνεται να λειτουργεί όπως αναμενόταν για ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισαγωγής, παράγοντας μια χρονικά μεταβαλλόμενη ροπή, με μια μέση θετική τιμή ενώ, τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου αποδείχτηκαν πολύ χρήσιμα για την επεξήγηση των φαινομένων που λάμβαναν χώρα κατά την πειραματική διαδικασία. Τα φαινόμενα υστέρησης που μελετήθηκαν από τη βιβλιογραφία, φαίνεται να υφίστανται και στις προσομοιώσεις της εν λόγω εργασίας.

Κατά την πειραματική διαδικασία προέκυψαν πολλά προβλήματα. Το βασικό πρόβλημα που οδήγησε κατά βάση και στα επόμενα, ήταν η ανομοιομορφία του εσωτερικού του σωλήνα. Το κεντράρισμα του στροβίλου και των παρελκομένων του ήταν καθοριστικής σημασίας ενώ, ήταν αυτό που σε μεγάλο βαθμό κατέστησε αδύνατη τη σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, η οποία ήταν και ο πρωταρχικός στόχος της παρούσας εργασίας. Πέρα απ' αυτή την ιδιομορφία του σωλήνα, ο τρόπος με τον οποίο στηρίχτηκαν, τα παρελκόμενα του στροβίλου, ο ίδιος ο σωλήνας και ο άξονας ο οποίος στην ουσία στήριζε το στρόβιλο, χρήζει βελτίωσης και μελέτης, προκειμένου να αποφευχθούν στη συνέχεια τα δυναμικά φαινόμενα που λάμβαναν χώρα. Παρόλ' αυτά, με

την ολοκλήρωση του πειραματικού ελέγχου αποδείχτηκε η ικανότητα του στροβίλου να παράγει ποσά ενέργειας. Το ότι παράγονται μικρά ποσά ενέργειας δεν είναι κάτι αρνητικό. Παρά τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν, εάν παρατηρήσει κανείς τις αποδόσεις που εξάγονται για την εν λόγω λειτουργία του στροβίλου, φαίνεται πως το όλο σύστημα είναι εξαιρετικά λειτουργικό και αποδοτικό, συγκριτικά με τις αποδόσεις που έχουν καταγραφεί κατά καιρούς από διάφορες πειραματικές μελέτες. Υπενθυμίζεται μάλιστα πως, υποεκτιμήθηκαν οι υπολογισμοί των αποδόσεων του συστήματος, λόγω της υπερεκτίμησης της ενέργειας που φέρει ο άνεμος. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης που παρατηρήθηκε και ο οποίος ισούται με 68%, θα πλησιάζει κατά πάσα πιθανότητα ακόμα περισσότερο το μέγιστο βαθμό απόδοσης που έχει εμφανιστεί για τον στρόβιλο Wells, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και ο οποίος ισούται με 75%. Καταλήγοντας, παρόλο που δεν ήταν εφικτό να γίνει ένας ανάλογος έλεγχος της συμπεριφοράς του στροβίλου Wells μ' αυτόν των υπολογιστικών προσομοιώσεων, τα πειραματικά δεδομένα που εξάχθηκαν είναι αρκετά ενθαρρυντικά αφού, αποδεδειγμένα ένα πολύ ικανοποιητικό μέρος της ενέργειας του ανέμου που εισάγεται στον σωλήνα.

Περαιτέρω εργασία και μελέτη

Όπως γίνεται αντιληπτό, υπάρχουν ατέλειες τόσο στο υπολογιστικό όσο και στο πειραματικό κομμάτι.

Όσον αφορά τις υπολογιστικές προσομοιώσεις, για τη διόρθωση των εν λόγω ατελειών προτείνονται τα εξής:

- Δημιουργία καλύτερου υπολογιστικού πλέγματος και κατά προτίμηση δομημένου (εξάεδρα και οχτάεδρα κελιά), το οποίο κατά γενική ομολογία δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Μοντελοποίηση με διαφορετικά μοντέλα τύρβης. Συγκεκριμένα, εάν στο μέλλον υπάρχει η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται, θα ήταν ενδιαφέρον να ελεγχθεί η συμπεριφορά του στροβίλου με κάποιο από τα μοντέλα Reynolds Stresses. Έτσι, μπορεί να υπάρξει και μια αξιολόγηση των εν λόγω μοντέλων, τα οποία θεωρητικά δίνουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Από την άλλη, για τη διόρθωση των ατελειών στην πειραματική διάταξη πρέπει να γίνουν κάποιες παραπάνω ενέργειες:

- Δυναμική μελέτη και μοντελοποίηση του συστήματος, με σκοπό την καλύτερη στήριξη του, ώστε να αποφευχθούν όσο γίνεται περισσότερο οι ταλαντώσεις.
- Ακριβέστερο κεντράρισμα του στροβίλου και των παρελκομένων του.
- Μελέτη για βελτιστοποίηση της κίνησης του εμβόλου με σκοπό την πιο ομαλή παλινδρόμηση του.

Αναφορικά με τις επιπλέον μελέτες που θα ακολουθήσουν σχετικά με τον έλεγχο της συμπεριφοράς του στροβίλου Wells που κατασκευάστηκε και του οποίου η εγκατάσταση έγινε στο εργαστήριο στροβιλομηχανών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, προτείνονται τα εξής:

- Μελέτη διαφορετικών συχνοτήτων παλινδρόμησης του εμβόλου.
- Έλεγχος διαφορετικών ταχυτήτων περιστροφής στροβίλου.
- Ακριβέστερη μελέτη φαινομένων υστέρησης.
- Αλλαγή της γωνίας διάταξης του πτερυγίου και ανάλυση της επίδρασης της στη συμπεριφορά του στροβίλου κάτω από ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισαγωγής.

Σχετικά με τις μελέτες που θα μπορούσαν να συνεχιστούν στον τομέα του στροβίλου Wells, με τη ανάλυση διαφορετικής γεωμετρίας, προτείνονται τα εξής:

- Μελέτη συμπεριφοράς στροβίλου με διαφορετικό αριθμό πτερυγίων και διαφορετικό μήκος χορδής (διαφορετική στερεότητα).
- Μελέτη συμπεριφοράς στροβίλου για διαφορετικό λόγο διαμέτρου βάσης προς διάμετρο κορυφής (διαφορετικός λόγος h) με τον έλεγχο διαφορετικών μεγεθών διακένου (διαφορετικό ύψος πτερυγίου) και ανάλυση της επίδρασης τους στη συμπεριφορά του στροβίλου (μελέτη επίδρασης tip clearance).
- Μελέτη συμπεριφοράς στροβίλου με διαφορετική γωνία συστροφής και τοποθέτησης πτερυγίων στο ρότορα (διαφορετικός λόγος g/c).
- Μελέτη συμπεριφοράς στροβίλου με τη χρήση διαφορετικών συμμετρικών αεροτομών.
- Εισαγωγή οδηγητικών πτερυγίων

Βιβλιογραφία

- [1] L. M. C. Gato, A. F.O. Falcao: Aerodynamics of the Wells turbine (1988).
- [2] S. Raghunathan: The Wells air turbine for wave energy conversion (1995).
- [3] Antonio F.O. Falcao, Joao C.C. Henriques: Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review.
- [4] Thakker, A., Abdulhadi, R.: The performance of Wells turbine under bi-directional airflow, *Renewable Energy*, 33 (2008).
- [5] Dhanasekaran, T.S., Govardhan, M.: Computational analysis of performance and flow investigation on wells turbine for wave energy conversion, *Renewable Energy*, 30 (2005).
- [6] Govardhan M, Chauhan VS. Numerical studies on performance improvement of self-rectifying air turbine for wave energy conversion. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 2007;1(1):57_70.
- [7] Z. Carija, L. Kranjcevic, V. Banic, M. Cavrak: Numerical analysis of Wells turbine for wave power conversion (2012).
- [8] Torresi, M., Camporeale, S.M., Strippoli, P.D.,Pascazio, G.: Accurate numerical simulation of a high solidity Wells turbine, *Renewable Energy*, 33 (2008).
- [9] Torresi, M., Camporeale, S.M., Strippoli, P.D.,Pascazio, G: Detailed CFD analysis of the steady flow in a Wells turbine under incipient and deep stall conditions.
- [10] Watterson JK, Raghunathan S. Computed effects of solidity on Wells turbine performance. *JSME International Journal, Series B* 1998;41(1):199_205.
- [11] Kinoue, Y., Kim, T.H., Setoguchi, T., Mohammad, M., Kaneko, K., Inoue, M.: Hysteretic characteristics of monoplane and biplane Wells turbine for wave power conversion. *Energy Conversion and Management*, 45 (2004).
- [12] Zahari Taha, Sugiyono, Tatsuo Sawada: A comparison of computational and experimental results of Wells turbine performance for wave energy conversion (2010).
- [13] Kim TH, Setoguchi T, Kinoue Y, Kaneko K. Effects of blade geometry on performance of Wells turbine for wave power conversion. *Journal of Thermal Science* 2001;10(4):293_300.
- [14] Thakker, A. and Dhanasekaran, T. S., 2003, Computed effects of tip clearance on performance of impulse turbine for wave energy conversion, *Renew. Energy*, 29, pp.529–547.

- [15] Taha Z, Sugiyono Tuan YTMYS, Sawada T. Numerical investigation on the performance of Wells turbine with non-uniform tip clearance for wave energy conversion. *Appl Ocean Res* 2011;33(4):321e31.
- [16] Kim, T. H., Setoguchi, T., Kaneko, K., and Raghunathan, S., 2002, "Numerical investigation on the effect of blade sweep on the performance of Wells turbine," *Renew. Energy*, 25, pp. 235–248.
- [17] Mohamed MH, Shaaban S. Optimization of blade pitch angle of an axial turbine used for wave energy conversion. *J Energy* 2013;56:229e39.
- [18] Shaaban S, Abdel HA. Effect of duct geometry on Wells turbine performance. *J Energy Convers Manag* 2012;61:51e8.
- [19] Paresh Halder, Abdus Samad , Jin-Hyuk Kim, Young-Seok Choi: High performance ocean energy harvesting turbine design-A new casing treatment scheme.
- [20] Paresh Halder, Abdus Samad: Casing Treatment of a Wave Energy Extracting Turbine, International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE 2015).
- [21] Huang XD, Chen HX, Shi K, Song FU. An analysis of the circumferential grooves casing treatment for transonic compressor flow. *Science China physics. Mech Astronomy* 2010;53(2):353e9.
- [22] Jian H, Hu W. Numerical investigation of inlet distortion on an axial flow compressor rotor with circumferential groove casing treatment. *Chin J Aeronautics* 2008;21(6):496e505.
- [23] Paresh Halder, Abdus Samad: Wave energy harvesting turbine: Performance enhancement 8th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2015)
- [24] L.M.C Gato João C Henriques: Optimization of symmetrical profiles for the Wells turbine rotor blades Conference paper · July 1996.
- [25] Manabu Takao, Ajit Thakker, Rahil Abdulhadi, Toshiaki Setoguchi Effect of blade profile on the performance of a large-scale Wells turbine for wave energy conversion.
- [26] Raghunathan and C. P. Tan: Effect of blade profile on the performance of Wells self rectifying air turbine.
- [27] Katsuya Takasaki, Manabu Takao, Toshiaki Setoguchi: Effect of blade shape on the performance of Wells turbine for wave energy conversion.
- [28] Taeho Kim, Toshiaki Setoguchi, Yoichi Kinoue, Kenji Kaneko: Effect of blade geometry on performance of Wells turbine for wave energy power conversion.

- [29] Takao M, Setoguchi T, Kinoue Y, Kaneko K. Wells turbine with end plates for wave energy conversion. *Ocean Eng* 2007;34:1790e5.
- [30] Suzuki M, Arakawa C. Guide vanes effect of Wells turbine for wave power generator. In: *Proceedings of the ninth international offshore and polar engineering conference brest*, Vol. I; 1999, ISBN 1-880653-40-0. France, May 30-June 4.
- [31] Govardhan M, Dhanasekaran TS. Effect of guide vane on the performance of a variable chord self-rectifying air turbine. *J. Therm Sci* 1998;7(4).
- [32] Setoguchi T, Santhakumar S, Takao M, Kim TH, Kaneko K. A modified Wells turbine for wave energy conversion. *J Renew Energy* 2003;28(1):79e91.
- [33] Paderi M, Puddu P. Experimental investigation in a Wells turbine under bi-directional flow. *J Renew Energy* 2013;57:570e6.
- [34] Shaaban S. Insight analysis of biplane Wells turbine performance. *J Energy Convers Manag* 2012;59:50e7.
- [35] S. Raghunathan, O. O. Ombaka: Effect of frequency of air flow on the performance of the Wells turbine.
- [36] Mashiro Inoue, Kenji Kaneko, Toshiaki Setoguchi, Katsumi Shimamoto: *Studiew on Wells turbine for wave power generator (Starting and Running Characteristics)*.
- [37] Mashiro Inoue, Kenji Kaneko, Toshiaki Setoguchi, Tetsurou Saruwatari: *Studies on wells turbine for wave power generator (Turbine Characteristics and Design Parameter for Irregular Wave)*.
- [38] T. Ghisu, P. Puddu, F. Cambuli: Numerical analysis of a Wells turbine at different non-dimensional piston frequencies.
- [39] Torresi M, Camporeale SM, Pascazio G, Fortunato B.: Fluid dynamic analysis of a low solidity Wells turbine. In: *591 Congresso ATI, Genova, Italy; 2004*.
- [40] Kim TH, Kinoue Y, Setoguchi T, Kaneko K. Effects of hub-to-tip ratio and tip clearance on hysteretic characteristics of Wells turbine for wave power conversion. *Journal of Thermal Science* 2002;11(3):207_13.
- [41] Setoguchi T, Kinoue Y, Kim TH, Kaneko K, Inoue M. Hysteretic characteristics of Wells turbine for wave power conversion. *Renewable Energy* 2003;28: 2113_27.
- [42] M. Mamun, Y. Kinoue, T. Setoguchi, T.H. Kim, K. Kaneko, M. Inoue: *Hysteretic flow characteristics of biplane Wells turbine*.

- [43] Florian R. Menter: Improved two-equation k - ω turbulence models for aerodynamic flows. NASA Technical Memorandum 103975 (1992)
- [44] Απόστολος Κ. Γούλας: Βασικές αρχές Στροβιλομηχανών. Εκδόσεις Γιαχούδη.
- [45] Απόστολος Πολυζάκης: Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Παραγωγή ενέργειας-Πρώθηση, Θεωρία.
- [46] Απόστολος Κ. Γούλας: Μηχανική ρευστών. Εκδόσεις Γιαχούδη.
- [47] Σωκράτης Τσαγγάρης: Μηχανική ρευστών. Εκδόσεις Συμεών.
- [48] H.K Versteeg, W Malalasekera: An introduction to computational fluid dynamics-The finite volume method.
- [49] Dominique Thevenin, Cabor Janiga: Optimization and computational fluid dynamics.
- [50] Manuals of Ansys CFX 5.0.