



Διπλωματική Εργασία

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ ΡΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗ

Επιβλέπων:

Καθηγητής Β. Ριζιώτης

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**



**EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL ANALYSIS OF SMALL
WIND TURBINES EFFICIENCY**

Diploma Thesis by

ALEXANDROS RONTOGIANNIS

Supervised by

Professor V. Riziotis

Ευχαριστίες...

Στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας συνέβαλλαν πολλοί, στους οποίους οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ.

Πρώτα από όλους ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον καθηγητή μου κ. Β. Ριζιώτη που μου έδωσε την ευκαιρία να δουλέψω μαζί του. Τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου όσο και στη διάρκεια των μαθημάτων δημιούργησε κλίμα συνεργασίας με τους φοιτητές ενώ ταυτόχρονα είχε τη διάθεση να επιλύσει την όποια απορία.

Προφανώς, δεν θα μπορούσα να παραλείψω την καθοριστική συνεισφορά του Κ. Λατούφη για τις πολύτιμες συμβουλές του αλλά και για το χρόνο που συστηματικά αφιέρωνε για την επίλυση των όποιων προβλημάτων ανέκυπταν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης θερμές ευχαριστίες οφείλω στον καθηγητή Γ. Βοσνιάκο, ο οποίος ήταν πρόθυμος να βοηθήσει με τη σάρωση του πτερυγίου.

Τέλος, δε θα μπορούσα να ξεχάσω την οικογένειά μου που τόσα χρόνια με στηρίζει στις επιλογές μου και μου δίνει τη δυνατότητα να υλοποιήσω τους εκάστοτε στόχους μου.

ΠΕΡΙΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.1 ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	3
1.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	4
1.3 ΜΙΚΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	7
1.3.1 Η Ανεμογεννήτρια του HughPiggott	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	11
2.1 ΟΑΝΕΜΟΣ	11
2.1.1 Διακύμανση Ανέμου	12
2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	15
2.3 ΤΜΗΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΗΣ	19
2.4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΜΙΚΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	35
3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	35
3.1.1 Σύστημα προσανατολισμού (yaw)	35
3.1.2 Σύστημα Ελέγχου Ισχύος (furling)	36
3.1.3 Πτερύγια	37
3.1.4 Τύπος Γεννήτριας	37
3.1.5 Πύργος Α/Γ	38
3.2 ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΙΚΡΩΝ Α/Γ	38
3.3 ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΜΙΚΡΩΝ Α/Γ	39

3.3.1 Λειτουργία ανεμογεννητριών σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds	40
3.3.1.1 Το φαινόμενο του θύλακα αποκόλλησης	40
3.3.1.2 Αεροτομές για λειτουργία σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds	48
3.3.2 Εκκίνηση	49
3.3.3 Σύστημα προσανατολισμού δρομέα (yaw) και ελέγχου ισχύος (furling)	51
3.3.3.1 Σύστημα προσανατολισμού δρομέα (yaw)	51
3.3.3.2 Σύστημα ελέγχου ισχύος (furling)	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ	55
4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	55
4.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ	57
4.2.1 Σάρωση πτερυγίων	57
4.2.2 Απεικόνιση και επεξεργασία γεωμετρίας	59
4.2.3 Αεροδυναμική μελέτη αεροτομών	61
4.2.3.1 Περιγραφή αριθμητικής μεθόδου του XFOIL	61
4.2.3.2 Έλεγχος αξιοπιστίας XFOIL σε μικρούς αριθμούς Reynolds	64
4.2.3.2.1 Πειραματικά αποτελέσματα	64
4.2.3.2.2 Αποτελέσματα XFOIL και σύγκριση με τα πειραματικά	67
4.2.3.3 Αξιοποίηση του XFOIL για τις αεροτομές του πτερυγίου	69
4.2.3.3.1 Διακριτοποίηση της γεωμετρίας των αεροτομών	69
4.2.3.3.2 Καθορισμός παραμέτρων XFOIL	69
4.2.3.3.3 Αποτελέσματα	71
4.2.3.3.4 Επαναπροσδιορισμός του tripping	72
4.2.3.3.5 Προεκβολή καμπυλών σε μεγάλες γωνίες	72
4.2.4 Υπολογισμός απόδοσης δρομέα	74
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ / ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΙΚΡΗΣ Α/Γ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ	87
5.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΜΙΚΡΗΣ Α/Γ ΤΟΥ RIGGOTT	87
5.1.1 Πειραματική διάταξη	87
5.1.2 Περιγραφή διαδικασίας μετρήσεων	90
5.1.3 Καθορισμός συνθηκών λειτουργίας και εκτέλεσης του πειράματος	92
5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ	93
5.2.1 Σύγκριση με υπολογιστικά αποτελέσματα	97
5.2.2 Σύγκριση με άλλες πειραματικές μετρήσεις	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	151
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	155
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	191
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	201

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός της καμπύλης απόδοσης δρομέα μικρών ανεμογεννητριών και η πιστοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων μέσω υπολογιστικών αναλύσεων. Οι πειραματικές μετρήσεις μικρής ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα διεξήχθησαν στην αεροσήραγγα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στο εργαστήριο Αεροδυναμικής.

Αρχικά, γίνεται μια γενική αναφορά στις ανεμογεννήτριες, στα είδη και στον τρόπο λειτουργίας τους, εστιάζοντας στα βασικά θεωρητικά εργαλεία που διαθέτουμε για τη μελέτη τους και τα οποία χρησιμοποιούμε στη συνέχεια για τον υπολογισμό των καμπυλών απόδοσης της μικρής ανεμογεννήτριας.

Επιπλέον, εντοπίζονται και αναλύονται συνοπτικά ορισμένες ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν οι μικρές μηχανές σαν αυτή που εξετάζεται. Δίνεται μεγαλύτερη προσοχή στις ιδιαιτερότητες που αφορούν τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων των μικρών ανεμογεννητριών και πιο συγκεκριμένα, των φαινομένων που συνοδεύουν τη λειτουργία μιας αεροτομής όταν βρίσκεται σε ροή χαμηλού αριθμού Reynolds.

Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των καμπυλών C_p - λ με χρήση κατάλληλων λογισμικών. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται, ερμηνεύονται και συγκρίνονται εν τέλει, με πειραματικά αποτελέσματα που έχουν προκύψει από αντίστοιχη εργασία για τον ίδιο δρομέα.

Ακολούθως, καταγράφεται βήμα βήμα η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την εγκατάσταση της πειραματικής διάταξης και τη λήψη των μετρήσεων. Οι πειραματικές καμπύλες που προκύπτουν συγκρίνονται τόσο με τα αποτελέσματα της υπολογιστικής διαδικασίας που προηγήθηκε, όσο και με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις που έχουν ληφθεί από άλλη εργασία για τον ίδιο δρομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

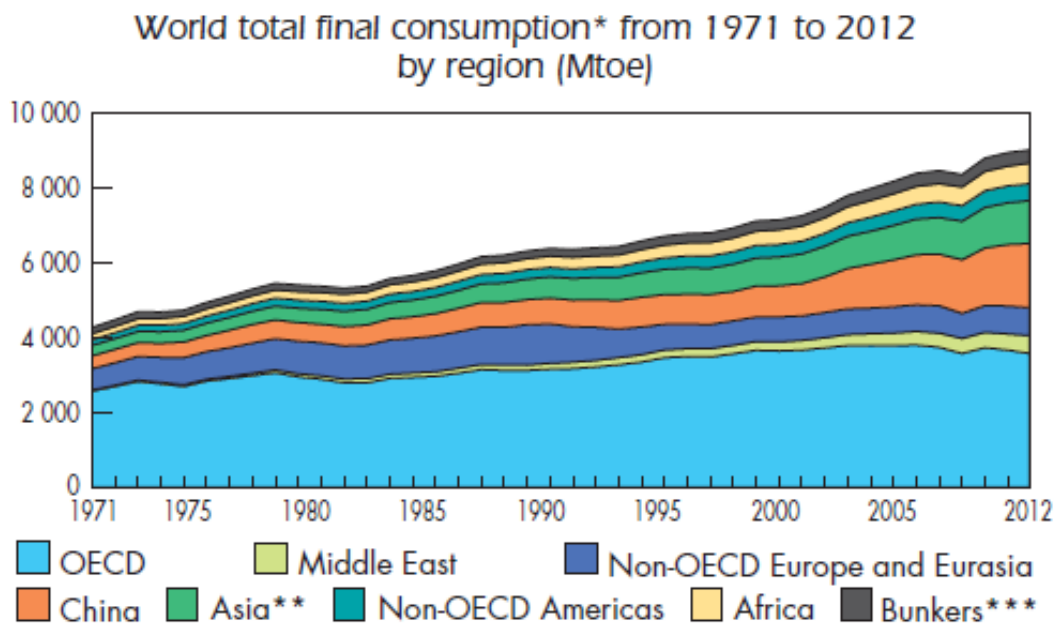
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Τα τελευταία χρόνια οι ενδείξεις που μαρτυρούν ότι το υπάρχον ενεργειακό μοντέλο δομείται πάνω σε μια εύθραυστη και προβληματική ισορροπία πληθαίνουν. Ερωτήματα όπως “τι παράγουμε”, “με ποιο κόστος”, “πως το διανέμουμε” και “πως το καταναλώνουμε” μοιάζει να μην μπορούν να απαντηθούν στη βάση του υπάρχοντος ενεργειακού υποδείγματος εξασφαλίζοντας παράλληλα ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον. Οι λόγοι που συντρέχουν σε αυτό είναι αρκετοί.

Η βασικότερη πηγή για την παραγωγή ενέργειας είναι τα ορυκτά καύσιμα (περίπου το 80% της παραγόμενης ενέργειας παγκοσμίως προέρχεται από αυτά [1]) των οποίων η εξόρυξη αλλά και η χρήση απαιτεί τη ρύπανση της ατμόσφαιρας, τη διαταραχή των οικοσυστημάτων και την ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Επίσης, η σχέση εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα δημιουργεί κινδύνους ασφάλειας εφοδιασμού και οικονομικής σταθερότητας για κάθε χώρα λόγω της ανισοκατανομής τους πάνω στον πλανήτη, ενώ δεδομένο είναι ότι τα αποθέματά τους είναι περιορισμένα. Επιπλέον, το βιομηχανικού τύπου συγκεντρωτικό μοντέλο που διέπει τον τρόπο της παραγωγής και της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω του υψηλού κόστους που προϋποθέτουν αυτές οι επενδύσεις, θέτει το ζήτημα της άνισης κατανομής του δικαιώματος της πρόσβασης στην ενέργεια πάνω στον πλανήτη (πάνω από 1.3 δισεκατομμύρια άνθρωποι στο πλανήτη δεν έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια) [2]. Με άλλα λόγια, σε πολλές αναπτυσσόμενες και τριτοκοσμικές χώρες, οι επενδύσεις μεγάλης κλίμακας είναι οικονομικά αδύνατο να πραγματοποιηθούν με αποτέλεσμα μεγάλο κομμάτι του πληθυσμού να ζει σε συνθήκες πλήρους φτώχειας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω αλλά και την επικείμενη εξάντληση των ορυκτών καυσίμων που στις μέρες μας συνδυάζεται, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.1**, με μια έντονη αύξηση της ζήτησης για ενέργεια (ιδίως από τις ανεπτυγμένες χώρες), οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο αυτό που επικράτησε στο παρελθόν και κυριαρχεί σήμερα κάθε άλλο παρά εγγυάται ένα βιώσιμο μέλλον για τον άνθρωπο και τη φύση εν γένει.

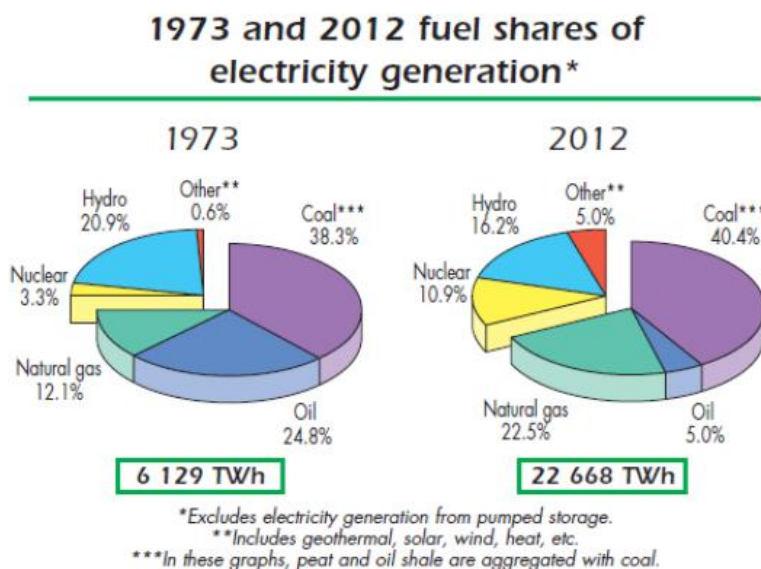
Έτσι, η ανάγκη να απαλλαχθούμε από αυτό το αδηφάγο μοντέλο, οδήγησε την ανθρωπότητα να επικεντρωθεί στην αναζήτηση ενεργειακών πόρων μη εξαντλήσιμων, περισσότερο ισομερώς καταμερισμένων και φιλικών προς το περιβάλλον. Αυτοί οι πόροι είναι ο ήλιος, ο αέρας, το νερό, η ενέργεια στο εσωτερικό της γης και η βιομάζα, γνωστές όλες και σαν Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.



Σχήμα 1.1: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά περιοχή από το 1971 μέχρι το 2012 (IEA 2012).

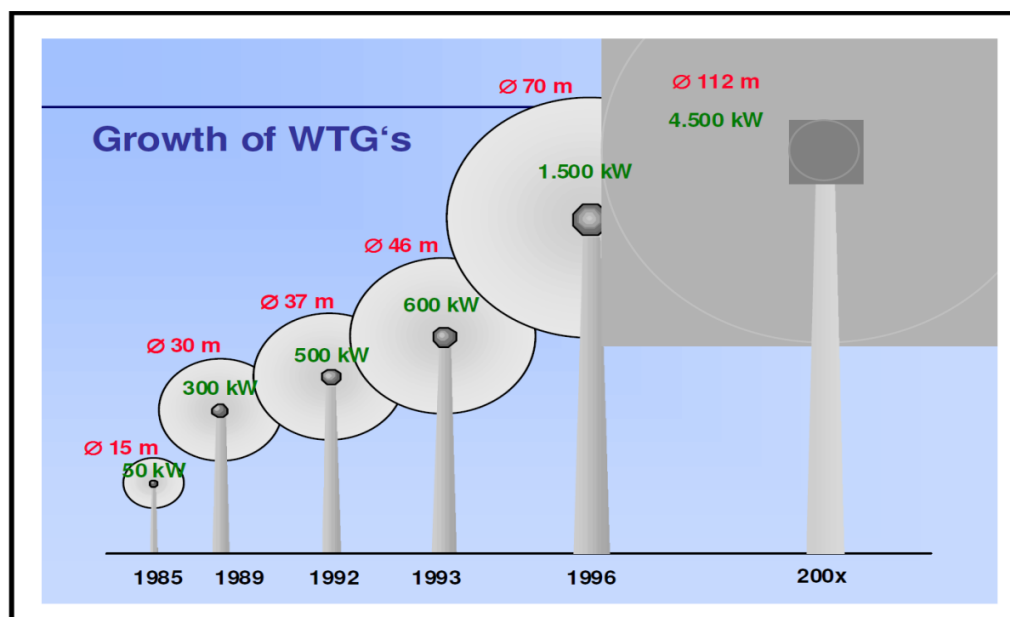
1.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ)

Οι διάφορες μορφές ΑΠΕ έχουν καταφέρει τα τελευταία χρόνια να γνωρίσουν σημαντική άνθηση σε σχέση με παλιότερα. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.2** το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ (ειδικά αν σε αυτές συμπεριλάβουμε και την πυρηνική ενέργεια) στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει μια αυξητική τάση τα τελευταία 40 χρόνια. Η διεθνής ενεργειακή πολιτική, προσανατολισμένη στην κατεύθυνση ενός εναλλακτικού τρόπου παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ενέργειας, έχει οδηγήσει, κυρίως από την ενεργειακή κρίση της δεκαετίας του '70 και έπειτα, στην ανάπτυξη νέων και συνεχώς αποδοτικότερων τεχνολογιών ΑΠΕ.



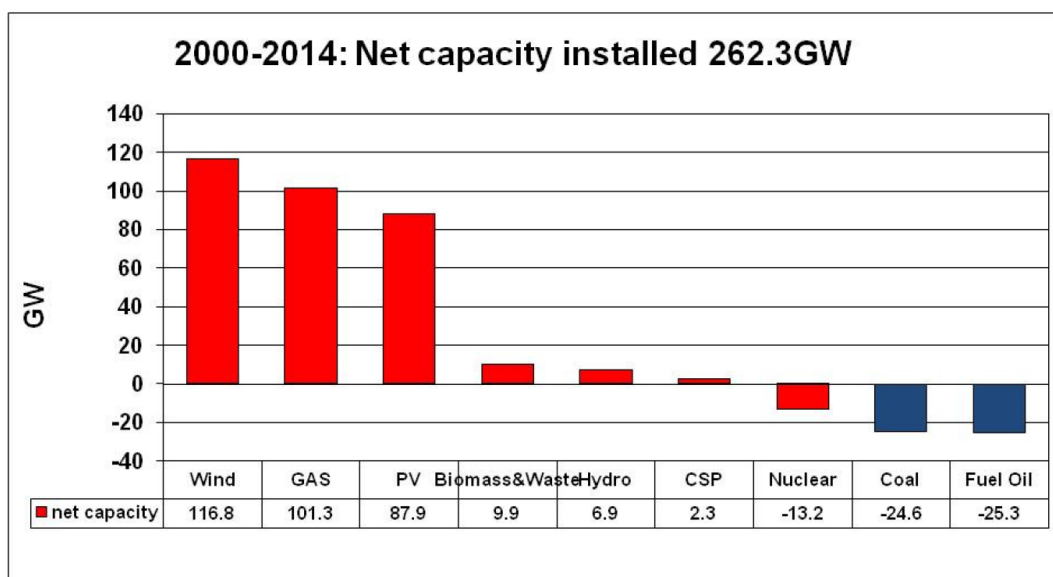
Σχήμα 1.2: Ποσοστό συμμετοχής των καυσίμων στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (IEA 2012).

Συγκεκριμένα σε ότι αναφορά την αιολική ενέργεια που μας ενδιαφέρει στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, η αξιοποίησή της έχει γνωρίσει μια ταχύτατη ανάπτυξη σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι πρώτες εφαρμογές αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού εμφανίστηκαν πριν από περίπου 20 χρόνια και όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.3** η πρόοδος της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας έχει ραγδαίους ρυθμούς.



Σχήμα 1.3: Μέσο μέγεθος εγκατεστημένης Α/Γ από το 1985 μέχρι τη δεκαετία του 2000 (EWEA 2015).

Στην Ευρώπη, η οποία θεωρείται πρωτοπόρος στον τομέα της αιολικής ενέργειας, οι στόχοι που είχαν τεθεί έως τώρα έχουν εκπληρωθεί (Λευκή Βίβλος για τις ΑΠΕ). Το 2014 στην Ευρωπαϊκή Ένωση είχαμε εγκατεστημένη ισχύ 128.8GW, ενώ ο μέσος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης τα τελευταία 5 χρόνια είναι περίπου 13,5%, το οποίο μεταφράζεται σε κάλυψη του 10% των αναγκών για κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας [3]. Πλέον, όπως μαρτυρά και το **Σχήμα 1.4** η αιολική ενέργεια θεωρείται από τις πιο αξιόπιστες εναλλακτικές λύσεις για ένα καθαρό περιβάλλον και μια αειφόρο ανάπτυξη.



Source: Platts, EWEA

Σχήμα 1.4: Τελικές εγκαταστάσεις ανά καύσιμο στην ΕΕ από το 2000 μέχρι το 2014 (EWEA 2015).

1.3 ΜΙΚΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Η εξέλιξη που έχει πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια στο τομέα της αιολικής ενέργειας μαζί με την ανάγκη για ηλεκτροδότηση απομονωμένων από το δίκτυο περιοχών, έχει τροφοδοτήσει την ιδέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μικρές ανεμογεννήτριες. Σε περιοχές του αναπτυσσόμενου κόσμου και εν γένει, σε περιοχές όπου η πρόσβαση στο δίκτυο ηλεκτρισμού δεν είναι εφικτή, η χρήση τοπικά κατασκευασμένων ανεμογεννητριών από φθηνά υλικά για την παραγωγή ενέργειας μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη λύση προκειμένου οι τοπικές κοινωνίες να μπορέσουν εκμεταλλευόμενες τους δικούς τους φυσικούς πόρους να ξεφύγουν από την κατάσταση ενεργειακής φτώχειας στην οποία βρίσκονται. Συνήθως οι ανεμογεννήτριες αυτές συνδέονται σε αυτόνομα συστήματα μικρής ή μεγάλης κλίμακας, αλλά μπορούν επίσης να συνδεθούν και απευθείας σε δίκτυο χαμηλής τάσης.

Μια τέτοια μικρή ανεμογεννήτρια κατασκευάστηκε αρχικά το 2006 από τον Hugh Piggott. Από τότε εκατοντάδες τέτοιες μηχανές έχουν κατασκευαστεί βασισμένες στα σχέδια του Piggott περιλαμβάνοντας αρκετές βελτιώσεις και τροποποιήσεις. Πλήθος

οργανισμών μη κερδοσκοπικών, ερευνητικών ομάδων, επιχειρήσεων και άλλων φορέων από όλο τον κόσμο έχουν καταφέρει να δημιουργήσουν ένα ευρύ δίκτυο επικοινωνίας και ανταλλαγής εμπειριών με σκοπό την εξέλιξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Η πρόσβαση μάλιστα στα σχέδια της μηχανής και ολόκληρης της εγκατάστασης είναι ελεύθερη προκειμένου να διευκολύνεται η ανταλλαγή γνώσης και η εξέλιξη της τεχνολογίας αυτής .

Ο σχεδιασμός της συγκεκριμένων ανεμογεννητριών έχει βασιστεί σε συγκεκριμένες αρχές προκειμένου να εξυπηρετείται ο αρχικός σκοπός κατασκευής τους ([4]). Οι αρχές αυτές μπορούν να συμπυκνωθούν στα εξής:

- Απαιτούν μικρό αρχικό κεφάλαιο ώστε να μπορούν να υλοποιηθούν σε περιοχές μεγάλης οικονομικής φτώχειας.
- Δίνουν έμφαση στην χρήση τοπικών πρώτων υλών, έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος και τα προβλήματα ανεφοδιασμού.
- Είναι δυνατή η κατανόηση της λειτουργίας τους, ο έλεγχός τους και η συντήρησή τους από τους ανθρώπους που χρησιμοποιούν την τεχνολογία χωρίς εξειδικευμένη εκπαίδευση.
- Μπορεί να παραχθεί η τεχνολογία σε μικρές βιοτεχνίες ή εργαστήρια χωριών και κοινοτήτων, χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένος ή πολύπλοκος εξοπλισμός.
- Προϋποθέτουν τη συλλογική εργασία της κοινότητας για τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης.
- Προσφέρουν ευκαιρίες για τη συμμετοχή του τοπικού πληθυσμού σε αλλαγές και βελτιώσεις της τεχνολογίας και της διαδικασίας παραγωγής της. Οι κατασκευαστές της Α/Γ έχουν τη δυνατότητα να εξοικειωθούν με τις βασικές έννοιες λειτουργίας και σχεδιασμού γεννητριών, αεροδυναμικής και με τη χρήση βασικών μηχανουργικών εργαλείων και τεχνικών κατασκευής. Έτσι, αποκτάται η δυνατότητα τροποποίησης του σχεδιασμού της Α/Γ, όπως και βελτίωσης της διαδικασίας κατασκευής.
- Είναι ευέλικτες και μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικά μέρη και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Η Α/Γ μπορεί να σχεδιαστεί για σύνδεση σε AC ή DC σύστημα και για διαφορετικές τιμές ονομαστικής ισχύος. Επίσης, υπάρχει μια πληθώρα εναλλακτικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως π.χ.. ο κέδρος για την κατασκευή των πτερυγίων, δίνοντας έτσι έμφαση σε τοπικά υλικά που βρίσκονται σε αφθονία.

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή χωρίς να προκαλούν βλάβες στο περιβάλλον. Η χρήση και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μία ανανεώσιμη πηγή, όπως είναι ο άνεμος, μειώνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές ρυπογόνες μορφές. Βέβαια, κατά την παραγωγή ορισμένων υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της Α/Γ, προκαλούνται ρύποι (π.χ. στην παραγωγή χάλυβα) και επίσης χρησιμοποιούνται ορισμένα χημικά υλικά και παράγωγα πετρελαίου, όπως η πολυεστερική ρητίνη.



Σχήμα 1.5: Κατασκευή των πτερυγίων μικρής ανεμογεννήτριας από τους ίδιους τους χρήστες της σε μια κοινότητα της Αιθιοπίας.

1.3.1 Η Ανεμογεννήτρια του Hugh Piggott

Η συγκεκριμένη Α/Γ που εξετάζεται σε αυτή την εργασία είναι κατασκευασμένη με βάση τα σχέδια του Hugh Piggott όπως περιγράφονται στο εγχειρίδιο "Hugh Piggott: A Wind Turbine Recipe Book-The Axial Flux Windmill Plans-2009" [5]. Ο δρομέας έχει διάμετρο 1200mm και έχει κατασκευαστεί από ξύλο. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ξύλο σουηδικού πεύκου το οποίο είναι ελαφρύ, εύκολο στην επεξεργασία, έχει καλή αντοχή και δεν παρουσιάζει προβλήματα κόπωσης, οπότε ενδείκνυται για μικρές κατασκευές που πραγματοποιούνται χωρίς καλούπια. Χρησιμοποιώντας εργαλεία ξυλουργικής δόθηκε το επιθυμητό αεροδυναμικό σχήμα στα πτερύγια. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε από ξύλο μηχανή χειρός για την περιέλιξη των πηνίων, πραγματοποιήθηκαν οι περιελίξεις και η κατάλληλη συνδεσμολογία. Τα πηνία τοποθετήθηκαν σε καλούπι που κατασκευάστηκε από κόντρα πλακέ. Έγινε έγχυση μείγματος πολυεστερικής ρητίνης, καταλύτη και ταλκ ώστε να σχηματιστεί η πλάκα του στάτη, η οποία ενισχύθηκε με φύλλα από υαλονήματα. Ο δρομέας αποτελείται από δύο χαλύβδινους δίσκους περιμετρικά των οποίων είναι τοποθετημένοι μόνιμοι μαγνήτες. Παρακείμενοι μαγνήτες έχουν αντίθετη πολικότητα όπως και αντικριστοί μαγνήτες στους απέναντι δίσκους. Για επιπλέον μηχανική αντοχή οι χαλύβδινοι δίσκοι τοποθετήθηκαν σε καλούπια και έγινε έγχυση ρητίνης.

Το βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας είναι η δυνατότητα ιδιοκατασκευής της χρησιμοποιώντας υλικά όπως ξύλο, χάλυβα, χαλκό και απλά εργαλεία, χωρίς να προϋποθέτει κάποια εξειδικευμένη γνώση ή εμπειρία. Επίσης, λόγω της απουσίας πυρήνα στο στάτη, έχει υψηλή απόδοση και μηδενική ροπή ευθυγράμμισης, κάτι που της επιτρέπει να εκκινεί σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Το τελευταίο είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό για τις μικρές ανεμογεννήτριες, αν αναλογιστεί κανείς ότι στις περιοχές εγκατάστασής τους οι ταχύτητες ανέμου είναι μικρές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Η αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου και η μετατροπή της σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική επιτυγχάνεται με τις ανεμογεννήτριες. Το κεφάλαιο αυτό κάνει μια γενική αναφορά στις μηχανές αυτές και περιγράφει ολόκληρη τη διαδικασία παραγωγής ενέργειας ξεκινώντας από το πρώτο στάδιο που είναι ο προσδιορισμός του αιολικού δυναμικού.

2.1 Ο ΑΝΕΜΟΣ

Οι άνεμοι δεν είναι τίποτα περισσότερο από αέριες μάζες που βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια της γης στο επίπεδο της ατμόσφαιρας και κινούνται διαρκώς εξαιτίας των διαφορετικών θερμοκρασιών τους. Γενεσιουργός δύναμη αυτής της διαφοράς θερμοκρασιών είναι η άνιση θέρμανση των αερίων μαζών από την επιφάνεια της γης είτε λόγω γεωγραφικού πλάτους είτε λόγω της μορφολογίας του εδάφους. Η σχετική γεωγραφική θέση επομένως ως προς τη διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και η μορφολογία του εδάφους παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας των αερίων μαζών και εν συνεχεία-εξαιτίας του φαινομένου της άνωσης λόγω διαφοράς πυκνοτήτων- στην ένταση της κίνησής τους. Βέβαια, πέρα από τις ανωστικές δυνάμεις λόγω της διαφοράς θερμοκρασιών, οι αέριες μάζες δέχονται ακόμη τις δυνάμεις Coriolis και τις φυγόκεντρες δυνάμεις λόγω περιστροφής της γης. Ωστόσο, η επίδραση αυτών των δυνάμεων είναι λιγότερο σημαντική σε σχέση με την επίδραση των ανωστικών δυνάμεων, άρα μπορούμε να πούμε ότι η αιολική ενέργεια δεν είναι παρά μια έμμεση μορφή αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στη γη.

Οι άνεμοι που οφείλονται σε διαφορά της θερμοκρασίας της γης λόγω διαφορετικού γεωγραφικού πλάτους είναι φαινόμενα σχεδόν σταθερά και εξαρτώνται από τη σχετική θέση της γης ως προς τον ήλιο στη διάρκεια ενός έτους (εξαρτώνται δηλαδή από τις εποχές). Μπορούμε λοιπόν να εξάγουμε μια εικόνα για την κίνηση των ανέμων πάνω στο πλανήτη, από την παραδοχή ότι από τον ισημερινό όπου στη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους έχουμε υψηλότερες θερμοκρασίες, οι αέριες μάζες κινούνται προς τους πόλους όπου κατά μέσο όρο οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες στη διάρκεια ενός έτους

Αυτή όμως η εικόνα σε επίπεδο πλανήτη αλλάζει όταν εξετάσουμε τοπικά τη μορφολογία του εδάφους της γης. Διαπιστώνουμε λοιπόν ότι λόγω της ανομοιομορφίας του εδάφους και τα ιδιαίτερα τοπικά χαρακτηριστικά που μπορεί να έχει η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι και αυτή ανομοιόμορφη. Έτσι, εντοπίζουμε σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε θάλασσες ή λίμνες, λόγω της διαφοράς θερμοχωρητικότητας νερού και στεριάς, να αναπτύσσονται ισχυροί άνεμοι. Το ίδιο συμβαίνει σε ορεινές περιοχές όπου τα ρεύματα αέρα κοντά στις πλαγιές των βουνών, λόγω τις σχετικής θέσης των τελευταίων ως προς την ηλιακή ακτινοβολία, ζεσταίνονται γρηγορότερα σε σχέση με τα αέρια ρεύματα πάνω από τις κοιλάδες με αποτέλεσμα να δημιουργούνται και εκεί τοπικοί ισχυροί άνεμοι. Η ισχύς τους βέβαια μεταξύ των άλλων εξαρτάται από την ώρα της ημέρας και από την εποχή του χρόνου.

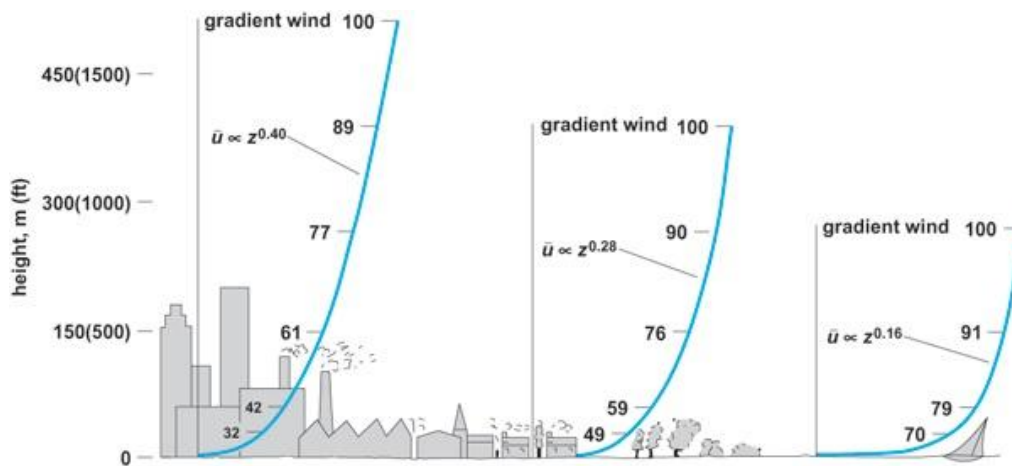
Τέλος, η τοπογραφία του εδάφους επηρεάζει την ένταση του ανέμου, όχι μόνο λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας που μπορεί να συνεπάγεται, αλλά και λόγω της μεταβολής του στερεού ορίου γύρω από το οποίο κινείται ο άνεμος. Έτσι, δεν είναι τυχαίο που τα περισσότερα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε μεγάλα υψόμετρα όπου λόγω της στένωσης της διατομής της ελεύθερης ροής η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει.

2.1.1 Διακύμανση Ανέμου

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η εκτίμηση πεδίου ροής του ανέμου και του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, πράγμα θεμελιώδους σημασίας για την απόδοση μιας Α/Γ, δεν είναι εύκολη διαδικασία όταν πρόκειται για μια σύνθετη τοπογραφία. Η διαδικασία αυτή υπολογισμού των χαρακτηριστικών του πνέοντος ανέμου γίνεται ακόμη πιο δύσκολη αν συμπεριλάβουμε τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του συναρτήσει του ύψους, του χρόνου (συχνότητα εμφάνισης του ανέμου) και των επιπέδων τύρβης που επικρατούν.

Ειδικά όταν αναφερόμαστε σε μικρές Α/Γ σαν αυτή που εξετάζουμε πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη ότι οι μηχανές αυτές τοποθετούνται συνήθως κοντά στις καταναλώσεις. Συνήθως η τοπογραφία των περιοχών αυτών συνδυάζεται με έντονα δομημένο περιβάλλον (υψηλά επίπεδα τύρβης) και χαμηλές ταχύτητες ανέμου για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης, οι μηχανές αυτές τοποθετούνται συνήθως σε χαμηλά σε σχέση με το έδαφος ύψη, πράγμα που σημαίνει ότι ο δρομέας βλέπει ταχύτητες που επικρατούν στις κατώτερες στοιβάδες του οριακού στρώματος.

Καθώς ο άνεμος κινείται πάνω από το έδαφος, λόγω του ιξώδους του, δημιουργείται μια περιοχή κατά ύψος στην οποία ο άνεμος επιβραδύνεται εξαιτίας των διατμητικών τάσεων του εδάφους, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια κατανομή ταχυτήτων η οποία έχει οριακές τιμές 0 στην επιφάνεια της γης και την τιμή της ταχύτητας ελεύθερης ροής στο τέλος της περιοχής αυτής. Η περιοχή αυτή ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα και οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν το ύψος της είναι η κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας και η μορφή του στερεού ορίου του εδάφους. Από το τελευταίο καταλαβαίνουμε ότι σε περιοχές έντονης ανωμαλίας του εδάφους (π.χ. αστικό περιβάλλον με υψηλά κτίρια ή δέντρα) λόγω αυξημένων διατμητικών τάσεων τριβής το ύψος του οριακού στρώματος αυξάνει (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Επίδραση της μορφής του στερεού ορίου στα επίπεδα τύρβης του ανέμου και στην ανάπτυξη οριακού στρώματος.

Σήμερα για τον υπολογισμό της κατανομής της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας κατά ύψος χρησιμοποιούνται είτε ο εκθετικός είτε ο λογαριθμικός νόμος, δηλαδή:

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^{\frac{1}{a}} \quad (\text{εκθετικός νόμος})$$

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{λογαριθμικός νόμος})$$

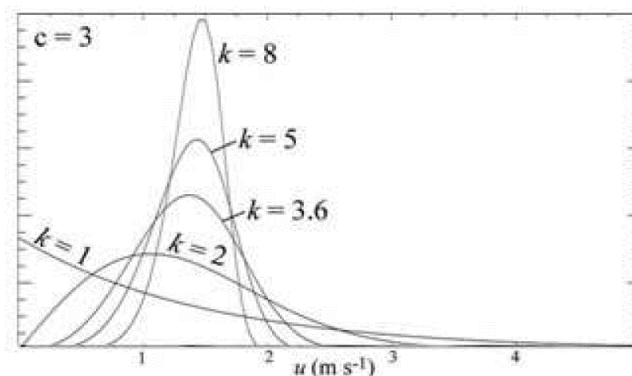
όπου U, U_1, U_2 η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας στα ύψη z, z_1, z_2 αντίστοιχα, u_* η ταχύτητα τριβής, $\frac{1}{a}$ ο εκθέτης του εκθετικού νόμου και k η σταθερά von Karman (=0.35).

Δεδομένου ότι η συχνότητα αλλαγής της έντασης και της διεύθυνσης του πνέοντος ανέμου είναι καθοριστικοί παράγοντες τόσο για την απόδοση της μηχανής όσο και για τον υπολογισμό της αντοχής της, η ανάγκη υπολογισμού τους είναι επιτακτική. Χαρακτηριστικό μέγεθος για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής είναι η μέση ταχύτητα ανέμου η οποία προσδιορίζεται έπειτα από μετρήσεις αρκετών ετών. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί σήμερα χάρτες αιολικού δυναμικού (Wind Atlas) κάθε περιοχής. Ωστόσο, αυτό το μέγεθος δεν είναι αρκετό για τον υπολογισμό της αιολικής ενέργειας που είναι διαθέσιμη σε μια περιοχή, καθώς η ισχύς του ανέμου μεταβάλλεται εποχιακά. Χρειάζονται λοιπόν στατιστικά δεδομένα μέτρησης της συχνότητας της κάθε ταχύτητας ανέμου για την περιοχή, τα οποία βέβαια για να είναι αξιόπιστα απαιτούνται ανεμολογικές μετρήσεις τουλάχιστον 10 χρόνων.

Σε περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις αυτές δεν υπάρχουν καταγεγραμμένες χρησιμοποιείται η καμπύλη Weibull για την θεωρητική εκτίμηση της πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας ανέμου. Η αναλυτική έκφραση της καμπύλης είναι:

$$f(u) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k} \quad (1)$$

όπου u η εκάστοτε ταχύτητα ανέμου, k παράμετρος που καθορίζει το ύψος της κατανομής και c παράμετρος που επηρεάζει την κατανομή στον οριζόντιο άξονα (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Μεταβολή της μορφής της καμπύλης Weibull συναρτήσει της παραμέτρου k .

Οι παράμετροι k και c μπορούν να προσδιοριστούν με προσέγγιση της αναλυτικής σχέσης στα ανεμολογικά δεδομένα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι, θα έχουμε υπολογίσει την καμπύλη Weibull και από αυτή, τη μέση ετήσια τιμή της ισχύος του ανέμου στην περιοχή από τον τύπο:

$$P_{\text{mean}} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho u^3 f(u) du \quad (2)$$

Οι μετρήσεις συνήθως λαμβάνονται σαν μέσες τιμές ταχυτήτων σε χρονικό διάστημα 10 λεπτών. Ωστόσο, λόγω της τύρβης του ανέμου κάθε στιγμιαία τιμή ταχύτητας έχει μια δικιά της κατανομή με μέση τιμή και τυπική απόκλιση, η οποία αντιστοιχεί στην τυρβώδη συνιστώσα της ταχύτητας. Η εκτίμηση του επιπέδου της τύρβης στον άνεμο, αν και δύσκολο να υπολογισθεί, εν τούτοις χρήζει μεγάλης προσοχής κατά τη διαδικασία επιλογής τοποθεσίας για την Α/Γ. Αυτό γιατί σε περιοχές με ριπές ανέμου όπου η τύρβη της ροής είναι υψηλή, τόσο η μηχανική καταπόνηση των πτερυγίων όσο και η καταπόνηση του ηλεκτρικού μέρους της μηχανής μπορεί να αυξηθούν επικίνδυνα. Εν γένει, οι παράγοντες που καθορίζουν το επίπεδο τύρβης είναι η μέση τιμή της ταχύτητας, η τραχύτητα του εδάφους (δηλαδή η παρουσία εμποδίων κατά κύριο λόγο) και η ευστάθεια της ατμόσφαιρας.

2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Λέγεται ότι μέχρι σήμερα έχουν επινοηθεί και εφαρμοστεί στην πράξη περισσότεροι τύποι ανεμοκινητήρων από οποιοδήποτε άλλο τύπο εφεύρεσης (Μπεργελές 2005). Τα χαρακτηριστικά που τους διαφοροποιούν λοιπόν είναι αρκετά. Τα πιο βασικά κριτήρια ταξινόμησης είναι η διεύθυνση του άξονα περιστροφής του δρομέα και το μέγεθος της μηχανής.

Ως προς το μέγεθος του δρομέα τους οι Α/Γ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μεγάλες, μεσαίες και μικρές. Οι τελευταίες είναι αυτές οι οποίες αφορούν το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-2, μικρές ανεμογεννήτριες είναι αυτές των οποίων η επιφάνεια σάρωσης του δρομέα είναι κάτω από 200m^2 , το οποίο αντιστοιχεί περίπου σε 75kW ισχύος. Περαιτέρω κατηγοριοποίηση των μικρών Α/Γ γίνεται πάλι με κριτήριο την επιφάνεια σάρωσης, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 2.1**.

	Micro	Πολύ μικρές	Μικρές
Επιφάνεια σάρωσης	$A \leq 3.5m^2$	$3.5m^2 < A \leq 40m^2$	$40m^2 < A \leq 200m^2$
Διάμετρος Στροφείου	$D \leq 2.1m$	$2.1m < D \leq 7m$	$7m < D \leq 16m$
Ονομαστική Ισχύς	$P \leq 1kW$	$1kW < P \leq 10kW$	$10kW < P \leq 75kW$

Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση μικρών Α/Γ σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-2

Με κριτήριο τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής οι Α/Γ κατατάσσονται σε οριζοντίου άξονα και κατακορύφου.

Οριζοντίου άξονα

Μία τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα απεικονίζεται στο **Σχήμα 2.4**. Ο δρομέας έχει τη μορφή έλικας (συνήθως 3 πτερυγίων) που περιστρέφεται γύρω από άξονα παράλληλο στην διεύθυνση του πνέοντος ανέμου. Ο πύργος της μηχανής μπορεί να βρίσκεται είτε μπροστά (προσήνεμη Α/Γ) είτε πίσω (υπήνεμη) από το δρομέα.



Σχήμα 2.4: Α/Γ οριζοντίου άξονα

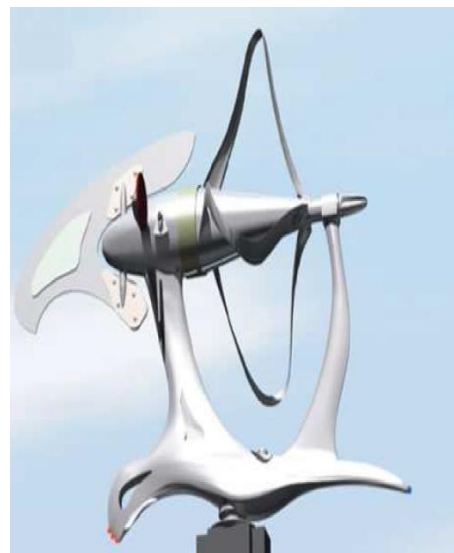
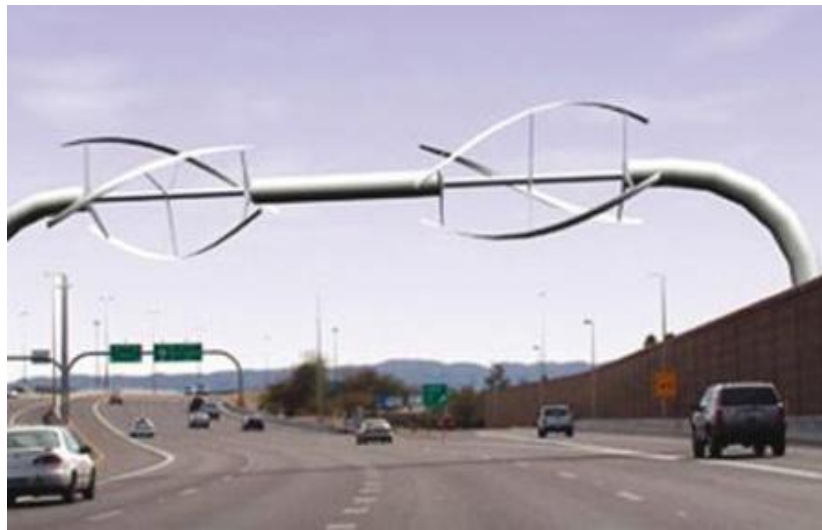
Κατακορύφου άξονα

Τα πτερύγια του δρομέα περιστρέφονται γύρω από άξονα κάθετο στην επιφάνεια της γης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ανεμογεννήτριας κατακορύφου άξονα απεικονίζεται στο **Σχήμα 2.5**.



Σχήμα 2.5: Α/Γ κατακορύφου άξονα

Πέρα από αυτούς τους δυο τύπους, στην κατηγορία των μικρών Α/Γ υπάρχουν και άλλοι λιγότερο διαδεδομένοι όπως αυτοί που φαίνονται στο **Σχήμα 2.6**.



Σχήμα 2.6: Άλλοι τύποι ανεμογεννητριών

Ωστόσο, η πλειοψηφία των Α/Γ είναι οριζοντίου άξονα και μάλιστα προσήνεμες, ενώ λιγότερο διαδεδομένες είναι οι κατακορύφου άξονα. Το βασικό πλεονέκτημα των πρώτων έγκειται στο μεγαλύτερο αεροδυναμικό συντελεστή που αποδίδει ο δρομέας τους, ο οποίος μπορεί να φτάνει μέχρι και 45% τη στιγμή που στις μηχανές κατακορύφου άξονα φτάνει κοντά στο 20%. Με άλλα λόγια, οι οριζοντίου άξονα μπορούν να εκμεταλλεύονται καλύτερα την ενέργεια του ανέμου από ότι οι κατακορύφου. Το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να μεταφραστεί και ως εξής: για την ίδια παραγόμενη ισχύ, η επιφάνεια που απαιτεί μια Α/Γ οριζοντίου άξονα είναι μικρότερη από αυτή που απαιτεί μια Α/Γ κατακορύφου (περίπου το 1/3). Έτσι, οι

μηχανές οριζοντίου είναι συνήθως λιγότερο βαριές και ογκώδεις και άρα οικονομικά αποδοτικότερες. Επίσης, λόγω των χαμηλών ταχυτήτων περιστροφής τους, οι μηχανές κατακορύφου άξονα χρειάζονται αρκετά υψηλές ταχύτητες ανέμου για να αρχίσουν να παράγουν ισχύ.

Από την άλλη πλευρά, στα πλεονεκτήματα των Α/Γ κατακορύφου άξονα καταγράφεται η απλούστερη κατασκευή των πτερυγίων σε σχέση με τις οριζοντίου και η απουσία ανάγκης προσανατολισμού του δρομέα, αφού αυτός δέχεται τον αέρα από όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό τις κάνει καταλληλότερες σε περιοχές όπου ο αέρας δεν είναι σταθερός ή όπου περιβάλλονται από κάποια εμπόδια (με αισθητή μείωση στην απόδοση όμως). Επιπλέον, λόγω του απλούστερου σχεδιασμού της μηχανής (ελλείπει μηχανισμού προσανατολισμού και πολυπλοκότητας των πτερυγίων) το κόστος των μηχανών κατακορύφου άξονα μπορεί να μειωθεί σημαντικά, ενώ ακόμη, ο κίνδυνος αστοχίας των πτερυγίων λόγω και των χαμηλών ρυθμών περιστροφής είναι περιορισμένος. Τέλος, σαν μειονέκτημα των Α/Γ οριζοντίου και άρα πλεονέκτημα των κατακορύφου μπορεί να θεωρηθεί ο έντονος θόρυβος των πρώτων λόγω της λειτουργίας τους σε υψηλές στροφές.

2.3 ΤΜΗΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΗΣ

Επειδή όπως αναφέρθηκε πιο πάνω οι μεγάλες Α/Γ οριζοντίου άξονα είναι αυτές που έχουν επικρατήσει στην αγορά, θα επικεντρωθούμε στα χαρακτηριστικά αυτού του τύπου μηχανών. Τα βασικά στοιχεία λοιπόν από τα οποία αποτελείται μια τέτοια μηχανή είναι τα εξής:

Δρομέας

Ο δρομέας είναι το σημαντικότερο τμήμα της μηχανής, αφού σε αυτόν μετατρέπεται ένα μέρος της αιολικής ενέργειας σε μηχανική. Ο σχεδιασμός του δρομέα αφορά στην ουσία το βέλτιστο συνδυασμό των εξής παραγόντων: της ταχύτητας περιστροφής του, της διαμέτρου του, του πλήθους των πτερυγίων του και της γεωμετρίας των πτερυγίων του, δηλαδή της κατανομής του πλάτους (χορδής), της γωνίας συστροφής, του μέσου γεωμετρικού βήματος και της επιλογής των κατάλληλων αεροτομών κατά μήκος της ακτίνας. Κριτήρια για το συνδυασμό όλων αυτών είναι η μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας και η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής της.

Η στιγμιαία ισχύς που περιέχεται σε ένα ρεύμα ανέμου που διέρχεται από μια επιφάνεια A και έχει ταχύτητα V και πυκνότητα ρ δίνεται από τη σχέση:

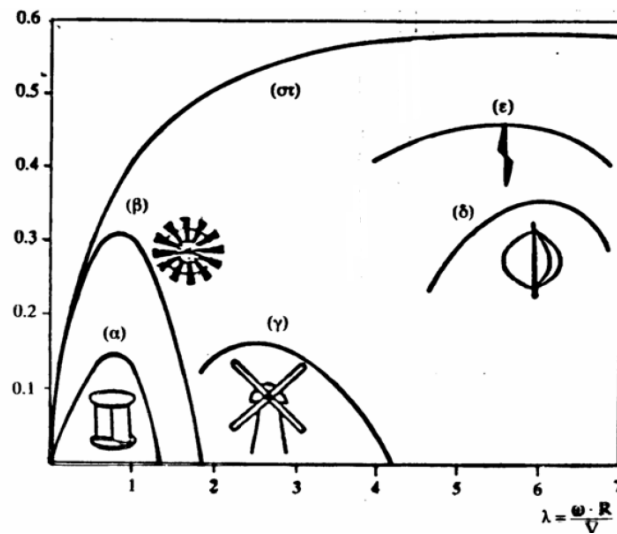
$$P = \frac{\rho}{2} V^3 A \quad (3)$$

Ωστόσο, η ισχύς που δεσμεύει ο δρομέας είναι ένα ποσοστό της ισχύος αυτής. Το ποσοστό αυτό προσδιορίζεται από την εξίσωση

$$C_p = \frac{P_{A/K}}{\frac{\rho}{2} V^3 A} \quad (4)$$

Ο συντελεστής C_p ονομάζεται συντελεστής ισχύος και δεν μπορεί να θεωρηθεί αυστηρά σαν βαθμός απόδοσης του δρομέα. Αυτό γιατί όπως θεωρητικά έχει αποδείξει ο Betz και αναφέρεται στο κεφάλαιο 2.4, η ισχύς που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε από τον άνεμο έχει ένα συγκεκριμένο άνω όριο το οποίο ισχύει ακόμη και για έναν ιδανικό δρομέα. Η μέγιστη αυτή τιμή ονομάζεται όριο του Betz και δίνεται από τη σχέση $C_p = 16/27$. Στην πραγματικότητα ο συντελεστής ισχύος θα είναι ακόμη μικρότερος από το όριο αυτό λόγω φαινομένων συνεκτικότητας, πεπερασμένου αριθμού πτερυγίων και λόγω της συστροφής που υπάρχει πίσω από το δρομέα, η οποία στην ουσία αποτελεί απώλεια ενέργειας λόγω μη μετατροπής της σε πίεση.

Για κάθε δρομέα λοιπόν υπάρχει ένα συγκεκριμένο διάγραμμα που δίνει πληροφορίες για την απόδοσή του σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Αυτό είναι το διάγραμμα του συντελεστή ισχύος C_p με το λόγο λ της περιφερειακής ταχύτητας ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου. Στο Σχήμα φαίνονται έξι διαφορετικές τέτοιες καμπύλες για έξι διαφορετικούς τύπους δρομέων. Επομένως, η επιλογή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα γίνεται έτσι ώστε ο παράγοντας λ να βρίσκεται στην περιοχή τιμών όπου σύμφωνα με το διάγραμμα $C_p - \lambda$ ο συντελεστής ισχύος να γίνεται μέγιστος.



Σχήμα 2.7: Τυπικές καμπύλες C_p - λ για διάφορους τύπους δρομέων

Όσο αναφορά τη διάμετρο των πτερυγίων, αυτή θα εξαρτηθεί από την ονομαστική ισχύ της μηχανής και λαμβάνοντας υπόψη το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασής της ώστε η μηχανή να λειτουργεί για αρκετά μεγάλο εύρος ταχυτήτων και να παράγει την απαιτούμενη ετήσια ενέργεια. Το πλάτος των πτερυγίων προκύπτει από την αεροδυναμική βελτιστοποίηση του δρομέα ενώ το πλήθος των πτερυγίων καθορίζεται από το είδος της εφαρμογής του κινητήρα και σε συνάρτηση με το οικονομικό κόστος. Αν και παλιότερα είχαν χρησιμοποιηθεί δρομείς με πολλά λεπτά πτερύγια, εν τούτοις η χαμηλή απόδοση αυτών οδήγησε στη χρήση δρομέων με λίγα πτερύγια, συνήθως 3. Τα χαρακτηριστικά των πρώτων είναι η μικρή διάμετρος, η μικρή περιστροφική ταχύτητα και η μεγάλη ροπή. Οι δρομείς με λίγα πτερύγια χαρακτηρίζονται από αρκετά υψηλούς αριθμούς C_p και μάλιστα σε μεγάλο εύρος τιμών του συντελεστή λ . Επίσης είναι ταχύστροφοι, ελαφρώς οικονομικότεροι και συναρμολογούνται πιο εύκολα. Γενικά, ο τρίπτερος δρομέας είναι κατά 5% περισσότερο αποδοτικός από το δίπτερο και τα φορτία που ενεργούν σε κάθε πτερύγιο είναι μικρότερα, ωστόσο έχει μεγαλύτερο κόστος. Αντίθετα ο μονόπτερος δρομέας είναι φθηνότερος, έχει 10% μικρότερη ενεργειακή απόδοση από το δίπτερο, αλλά έχει θορυβώδη λειτουργία και η ζυγοστάθμισή του δημιουργεί σοβαρά προβλήματα.

Σε σχέση με τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων, μπορούμε να πούμε ότι δεν είναι απόλυτα καθορισμένα και ότι εξαρτώνται από το μέγεθος της μηχανής. Οι βασικές ιδιότητες που πρέπει να έχουν είναι η σκληρότητα, ώστε να είναι δύσκαμπτα, μικρή πυκνότητα ώστε να είναι ελαφριά κι αντοχή στη διάρκεια του χρόνου ώστε να μη

σπάνε σε μεγάλα φορτία και να αντέχουν για αρκετά χρόνια. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι φυσικά όπως το ξύλο ή τεχνητά όπως διάφορα σύνθετα υλικά (υαλονήματα, ανθρακονήματα κ.α.).

Σύστημα ελέγχου ισχύος

Η ανάγκη ελέγχου της παραγόμενης ισχύος της μηχανής ούτως ώστε να μην υπερφορτίζεται η εγκατάσταση καλύπτεται με ένα σύστημα μηχανικής ρύθμισης της ισχύος. Συγκεκριμένα, στις μηχανές μεταβλητού βήματος (pitch control), τα πτερύγια έχουν τη δυνατότητα μέσω ενός σερβομηχανισμού να μεταβάλλουν το προσανατολισμό είτε ολόκληρου είτε μέρους του πτερυγίου (ακροπτερύγιο) ως προς τη διεύθυνση του ανέμου. Έτσι, μόλις η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ταχύτητα για την οποία παράγεται η ονομαστική ισχύς, η αεροδυναμική απόδοση των πτερυγίων παραμένει σταθερή ώστε να παράγεται και σταθερή μηχανική και ηλεκτρική ισχύς. Επίσης, η δυνατότητα μεταβολής της γωνίας βήματος διευκολύνει αρκετά την εκκίνηση της Α/Γ στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Στις μηχανές που δεν έχουν τη δυνατότητα μεταβολής της γωνίας βήματος των πτερυγίων, η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται είτε με μηχανική πέδηση στον άξονα του δρομέα, είτε με έλεγχο αποκόλλησης (stall control), με τη διαφορά ότι στην τελευταία περίπτωση η παραγόμενη ισχύς δεν παραμένει σταθερή αλλά μειώνεται μόλις ξεπεράσει την ονομαστική τιμή.

Η προστασία της μηχανής από καταστάσεις υπερτάχυνσης (είτε λόγω απουσίας κατανάλωσης είτε λόγω βλάβης είτε ακόμα λόγω πολύ υψηλής ταχύτητας ανέμου) επιτυγχάνεται με τη χρήση αεροδυναμικών φρένων στα άκρα των πτερυγίων ή με στροφή του δρομέα ώστε το επίπεδο περιστροφής να είναι παράλληλο με τη διεύθυνση του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες με πτερύγια μεταβλητού βήματος, αν και αποδίδουν 5-10% μεγαλύτερη ισχύ και προσφέρουν μικρότερη καταπόνηση και μεγαλύτερη ασφάλεια της μηχανής, εν τούτοις λόγω της πολυπλοκότητάς τους είναι ακριβότερες.

Σύστημα μετάδοσης κίνησης

Ο σχεδιασμός του συστήματος μετάδοσης κίνησης δεν αφορά άμεσα το σχεδιασμό της μηχανής, καθώς λόγω της μεγάλης ποικιλίας και καλής ποιότητας που υπάρχει στο εμπόριο ο σχεδιαστής της μηχανής δε χρειάζεται να προβληματιστεί αρκετά. Στόχος του συστήματος αυτού είναι η αύξηση των στροφών περιστροφής του δρομέα στις στροφές που απαιτεί το φορτίο (συνήθως γεννήτρια) με όσο το δυνατό λιγότερους κραδασμούς. Τα βασικά εξαρτήματα που το αποτελούν είναι ο κύριος άξονας του δρομέα, τα ρουλεμάν και το κιβώτιο ταχυτήτων. Στις μικρές Α/Γ σαν

αυτή που εξετάζουμε ο μηχανισμός αυτός αποτελείται μόνο από τον άξονα σύνδεσης της ηλεκτρικής γεννήτριας με το δρομέα, τα ρουλεμάν και τις φλάντζες πρόσδεσης.

Σύστημα προσανατολισμού

Στις μηχανές όπου ο δρομέας βρίσκεται κατάντι του πύργου δεν υπάρχει ανάγκη προσανατολισμού του. Στις ανάντι μηχανές, ωστόσο, υπάρχει η ανάγκη ο δρομέας να περιστρέφεται γύρω από τον πύργο ώστε το επίπεδο περιστροφής του να βρίσκεται συνεχώς κάθετο στη διεύθυνση του πνέοντος ανέμου. Στις μεγάλες μηχανές η περιστροφή αυτή του δρομέα επιτυγχάνεται με κάποιο σερβομηχανισμό ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου. Όταν πρόκειται για μικρές μηχανές η διαδικασία αυτή γίνεται με καθαρά μηχανικό τρόπο, όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.1.1.

Ηλεκτρική γεννήτρια

Παράγει την ηλεκτρική ενέργεια όταν υπάρχει ικανοποιητικός αέρας για να περιστρέψει τα πτερύγια. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στο επόμενο στάδιο (είτε για αποθήκευση, είτε στο σύστημα διανομής, είτε για άμεση χρήση) χρησιμοποιώντας καλωδίωση. Υπάρχουν δύο δυνατές λύσεις, σύγχρονη ή ασύγχρονη γεννήτρια. Ο άξονας της γεννήτριας συνδέεται με την έξοδο του κιβωτίου ταχυτήτων μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Η θέση τοποθέτησης της είναι στην κορυφή του πύργου της Α/Γ.

Συνήθως χρησιμοποιείται η ασύγχρονη γεννήτρια λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει όσον αφορά στο κόστος, στο βάρος, στην απλότητα κατασκευής, στην αξιοπιστία, στις ανάγκες συντήρησης, στην καλύτερη ποιότητα ισχύος και στις μεμονωμένες μηχανικές καταπονήσεις. Η σύγχρονη γεννήτρια, η οποία μειονεκτεί στα παραπάνω, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου δεν υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο, δηλαδή σε αυτόνομα συστήματα με συσσωρευτές για την αποθήκευση της ενέργειας, αφού η προτιμώμενη ασύγχρονη γεννήτρια χρειάζεται να παίρνει ρεύμα μαγνήτισης από το δίκτυο. Το τελευταίο είναι και ο λόγος που στις Α/Γ σαν αυτή που εξετάζουμε προτιμάται η επιλογή της σύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής.

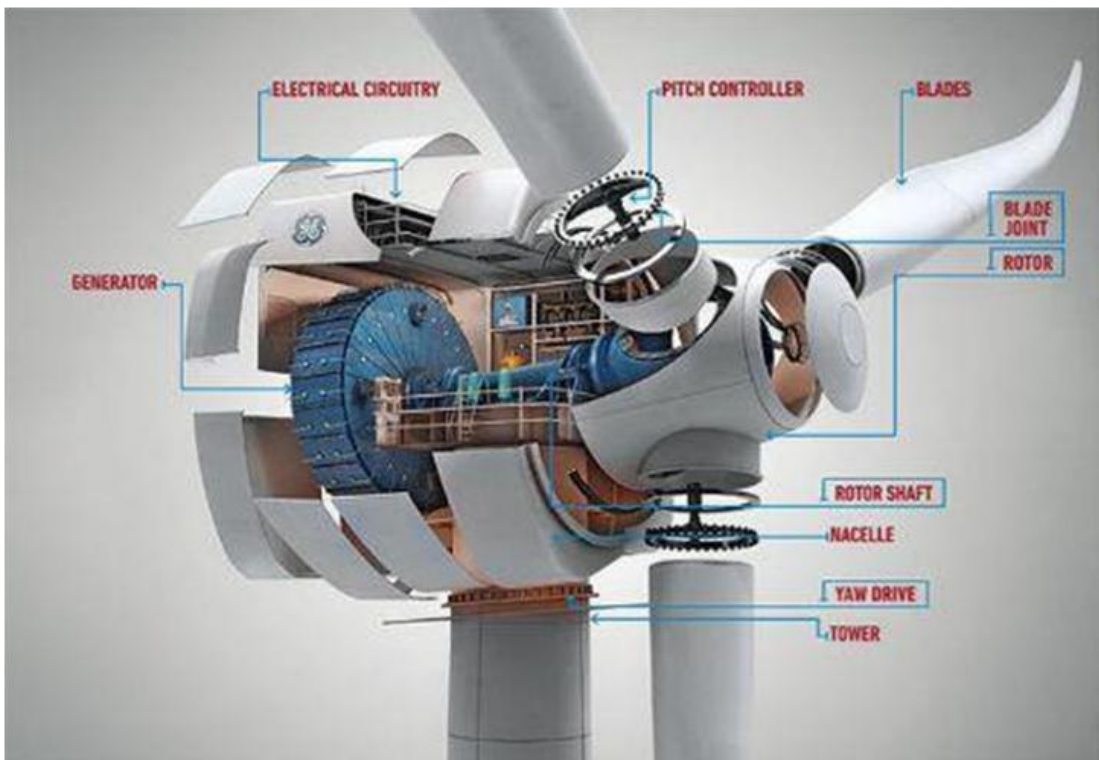
Πύργος

Ο πύργος είναι υπεύθυνος για τη στήριξη της νασέλας και ολόκληρου του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που περιγράφηκε πιο πάνω. Τα είδη πύργων που χρησιμοποιούνται είναι δύο:

- Πύργος τύπου δικτυώματος
- Σωληνωτός Πύργος

Ο πύργος τύπου δικτυώματος είναι ευκολότερος στη συναρμολόγηση, ελαφρύτερος, φθηνότερος και η διαδικασία γαλβανίσματος είναι πιο απλή. Ο σωληνωτός πύργος μπορεί να φιλοξενήσει στο εσωτερικό του όλα τα όργανα της μηχανής και να περιλαμβάνει ασανσέρ ή σκάλα για την εύκολη πρόσβαση στη νασέλα. Το μειονέκτημά του είναι η δυσκολία στη μεταφορά και την ανέγερσή του, καθώς και στη διαδικασία γαλβανίσματος και η χαμηλή ιδιοσυχνότητα που έχει με αποτέλεσμα να δημιουργεί προβλήματα συντονισμού κατά την εκκίνηση. Βέβαια, όσο μικραίνει το μέγεθος της μηχανής τόσο πιο μικρός και ελαφρύς είναι ο πύργος στήριξης και άρα τόσο πιο εύκολη η μεταφορά και εγκατάστασή του. (βλ. ενότητα 3.1.5)

Στο **Σχήμα 2.6** φαίνονται τα διάφορα τμήματα της μηχανής όπως αναφέρθηκαν παραπάνω για μια τυπική Α/Γ οριζοντίου άξονα.



Σχήμα 2.6: Τμήματα μηχανής μιας τυπικής Α/Γ οριζοντίου άξονα

2.4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η ανάγκη ύπαρξης κάποιας συστηματικής μεθοδολογίας για το σχεδιασμό των ελίκων οδήγησε το 1870 στην ανάπτυξη της θεωρίας του δίσκου ενέργειας. Η θεωρία αυτή χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα με αρκετές διορθώσεις και τροποποιήσεις είτε για τη σχεδίαση είτε για την πρόβλεψη της αεροδυναμικής απόδοσης των ελίκων.

Θεωρία του δίσκου όρμη

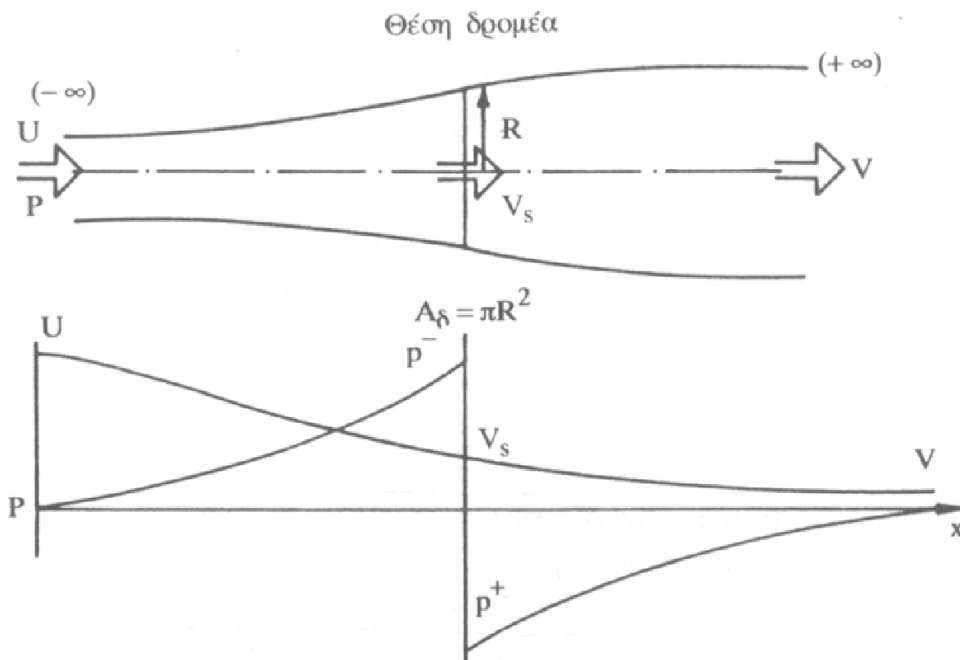
Θεωρούμε ροϊκό σωλήνα μέσα από τον οποίο διέρχεται ο άνεμος και οι διαστάσεις του οποίου καθορίζονται από τη διάμετρο του δρομέα (Σχήμα2.7). Στα πλαίσια αυτής της θεωρίας κάνουμε τις εξής παραδοχές:

- Η ροή του αέρα είναι αξονοσυμμετρική με άξονα συμμετρίας αυτό του δρομέα.

- Ο δρομέας προσδιορίζεται σαν δίσκος ο οποίος δεσμεύει την ενέργεια του ρευστού μετατρέποντάς την σε μηχανική και μάλιστα η εναλλαγή αυτή ενέργειας γίνεται με ιδεατό τρόπο (ιδανικός δίσκος).
- Ο ροϊκός σωλήνας αποτελεί ρεύμα ολίσθησης (slip stream), πράγμα που σημαίνει ότι σε κάθε διατομή του σωλήνα οι κατανομές πίεσης και ταχύτητας είναι σταθερές και ότι η επιφάνεια του σωλήνα αποτελεί όριο ασυνέχειας της ταχύτητας.
- Η φόρτιση πάνω σε ολόκληρο το δίσκο είναι σταθερή.
- Η συστροφή του ρευστού στον ομόρρο του δρομέα είναι μηδενική. Η υπόθεση αυτή αναιρείται στην πράξη. Λόγω της αλληλεπίδρασης του ρεύματος αέρα και του δρομέα υπάρχει συστροφή η οποία δεν έχει μετατραπεί σε πίεση στο δρομέα και άρα αποτελεί απώλεια ενέργειας.

Ο αέρας πολύ μακριά ανάντι από το δίσκο (στο άπειρο) έχει πίεση περιβάλλοντος P και ταχύτητα U . Κατάντι και σε μεγάλη απόσταση από το δίσκο όπου η πίεση έχει αποκατασταθεί και είναι επίσης P η ταχύτητα του ρεύματος αέρα θα είναι V . Δεδομένου ότι ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον άνεμο, θα ισχύει $V < U$. Επίσης προκειμένου να διατηρείται η παροχή μάζας πριν και μετά τη διατομή του δίσκου, θα πρέπει η διατομή του σωλήνα να αυξηθεί μετά το δρομέα.

Όσον αφορά τη στατική πίεση του ρεύματος, αυτή αυξάνεται κατά μήκος του σωλήνα, με εξαίρεση τη διατομή του δίσκου όπου επειδή η αξονική ταχύτητα λίγο πριν και λίγο μετά τη διατομή παραμένει σταθερή για λόγους διατήρησης της παροχής και επειδή η ενέργεια του ρευστού μετά τη διατομή είναι μικρότερη σε σχέση με πριν, η στατική πίεση στα κατάντι θα είναι μικρότερη από αυτή στα ανάντι του δίσκου. Έτσι, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.7**, όπου με p^- και p^+ συμβολίζεται η στατική πίεση λίγο πριν και λίγο μετά το δίσκο και με V_s η αξονική ταχύτητα του ανέμου στη διατομή του δίσκου, ο δίσκος αποτελεί μια επιφάνεια ασυνέχειας της πίεσης και συνέχειας της ταχύτητας.



Σχήμα 2.7: Ροϊκός σωλήνας και κατανομή ταχύτητας και πίεσης κατά μήκος του.

Παρακάτω περιγράφονται οι εξισώσεις που εφαρμόζονται για την μελέτη του αεροδυναμικού πεδίου.

Διατήρηση παροχής

Η παροχή μάζας κατά μήκος του σωλήνα διατηρείται σταθερή. Αυτό εκφράζεται από τη σχέση

$$\dot{m} = \rho A_{\delta} V_s = \rho \pi R^2 V_s \quad (5)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, A_{δ} η επιφάνεια του δίσκου ακτίνας R και V_s η ταχύτητα του ρευστού διαμέσου του δίσκου.

Διατήρηση της ορμής

Για την εφαρμογή του θεωρήματος της ορμής θεωρούμε κυλινδρικό όγκο ελέγχου που περιβάλλει το ροϊκό σωλήνα **Σχήμα 2.8**. Έξω από τον όγκο αυτό η στατική πίεση είναι όση η πίεση περιβάλλοντος p . Η παροχή Q που διέρχεται από την παράπλευρη επιφάνεια του κυλινδρικού όγκου προκύπτει από εξίσωση συνέχειας

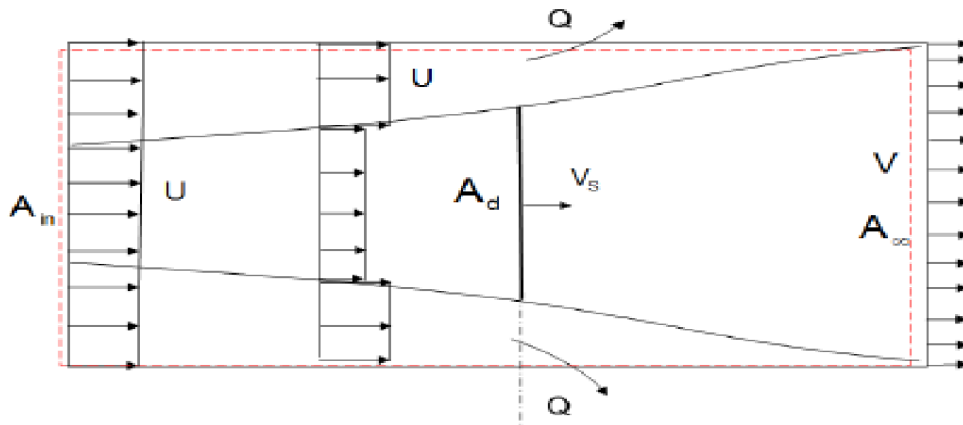
$$Q = \rho A_{\infty} U - \rho A_{\delta} V_s \quad (6)$$

και εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης ορμής για τον όγκο ελέγχου παίρνουμε για τη δύναμη ώσης πάνω στο δίσκο

$$T = \rho U^2 A_{\infty} - \rho A_{\delta} V_s V - Q U \quad (7)$$

ή βάσει της σχέσης (6)

$$T = \rho A_{\delta} V_s (U - V) \quad (8)$$



Σχήμα 2.8: Όγκος ελέγχου για την εφαρμογή του θεωρήματος ορμής.

Ενεργειακός ισολογισμός

Εφαρμόζοντας εξίσωση Bernoulli από μακριά ανάντι μέχρι λίγο πριν από το δρομέα και από αμέσως μετά μέχρι μακριά κατόντι από αυτόν παίρνουμε τις παρακάτω εξισώσεις

$$p + \frac{\rho}{2} U^2 = p^- + \frac{\rho}{2} V_s^2 \quad (9)$$

$$p + \frac{\rho}{2} V^2 = p^+ + \frac{\rho}{2} V_s^2 \quad (10)$$

από τις οποίες αφαιρώντας κατά μέλη παίρνουμε

$$p^- - p^+ = \frac{\rho}{2}(U^2 - v^2) \quad (11)$$

Επίσης για τη φόρτιση του δίσκου ισχύει

$$\frac{T}{A_\delta} = \Delta p = p^- - p^+ \quad (12)$$

Αντικαθιστώντας τώρα στην σχέση (8) της δύναμης ώσης τις σχέσεις (11) και (12) προκύπτει για την ταχύτητα πάνω στο δίσκο

$$v_s = \frac{1}{2}(U + v) \quad (13)$$

Εισάγουμε τον συντελεστή αξονικής επαγωγής ως $\alpha = (U - v_s)/U$, ο οποίος εκφράζει τη ποσοστιαία επιβράδυνση του αέρα πάνω στο δίσκο, οπότε έχουμε $v_s = U(1 - \alpha)$ και $v = U(1 - 2\alpha)$. Έτσι, μπορούμε να εκφράσουμε τη δύναμη ώσης και την παραγόμενη ισχύ του δίσκου συναρτήσει του συντελεστή αξονικής επαγωγής και της ταχύτητας του αέρα ανάντι ως:

$$T = 2\rho A_\delta U^2 \alpha(1 - \alpha) \quad (14)$$

$$P = 2\rho A_\delta U^3 \alpha(1 - \alpha)^2 \quad (15)$$

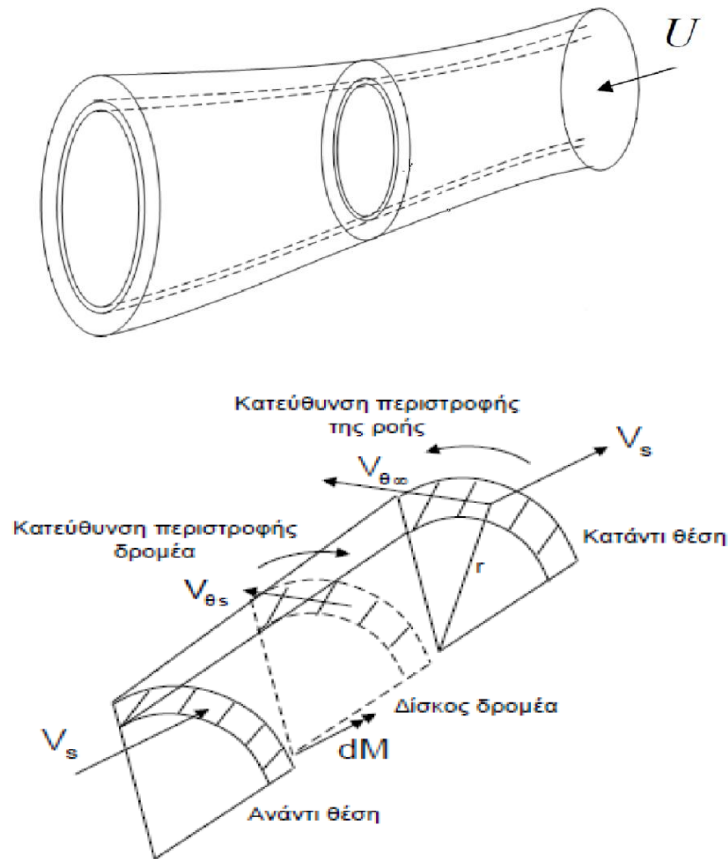
και αντίστοιχα ορίζονται οι συντελεστές ώσης και ισχύος ως

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_\delta} = 4\alpha(1 - \alpha) \quad (16)$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A_\delta} = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (17)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις με παραγωγή προκύπτει ότι το άνω όριο του συντελεστή ισχύος είναι για $\alpha=1/3$ και $C_{p,max} = 16/27 = 59\%$ (όριο Betz).

Διατήρηση της ροπής της ορμής (συστροφής)



Σχήμα 2.9: Δακτυλιοειδής όγκος ακτίνας r και πάχους dr .

Εφαρμόζουμε το θεώρημα διατήρησης της ροπής της ορμής στον δακτυλιοειδή όγκο του **Σχήματος 2.9** ακτίνας r και πάχους dr . Προκύπτει

$$dM = \rho 2\pi r V_s [(V_{\theta} r)_{\infty} - (V_{\theta} r)_{-\infty}] dr \quad (18)$$

όπου dM η ροπή που ασκείται από το ρευστό πάνω στη δακτυλιοειδή επιφάνεια του δίσκου ενέργειας και V_{θ} η περιφερειακή ταχύτητα του ρευστού σε κάθε θέση (πριν πάνω και μετά το δίσκο). Επειδή το ρευστό ανάнти του δρομέα είναι αστρόβιλο,

$(V_{\theta r})_{-\infty} = 0$. Ορίζουμε α' το συντελεστή περιφερειακής επαγωγής ως $\alpha' = V_{\theta s} / \Omega R$. Υποθέτοντας ότι $V_{\theta\infty} = 2V_{\theta s}$ προκύπτει $V_{\theta\infty} = 2\alpha'\Omega r$. Τελικώς προκύπτει για τη στοιχειώδη ποσότητα ροπής

$$dM = \rho 4\pi r \alpha' (1 - \alpha) \Omega r^2 U dr \quad (19)$$

Ορίζεται επίσης ο τοπικός συντελεστής ροπής C_M ως

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho U^2 \pi R^3} \quad (20)$$

ή

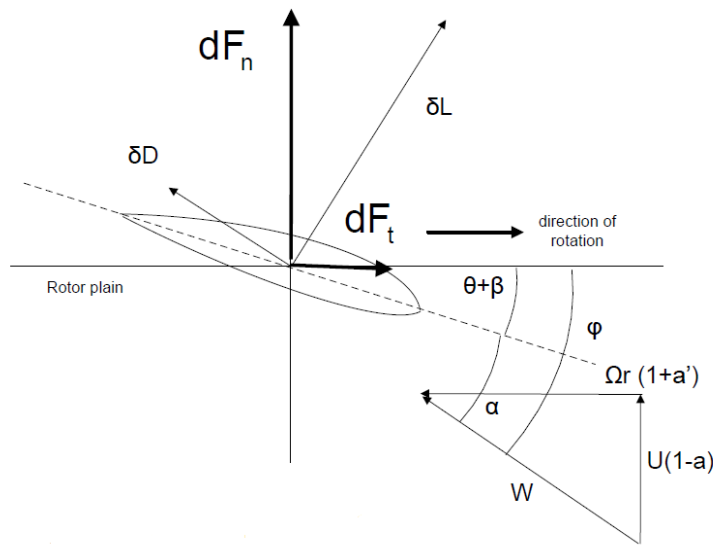
$$C_M = 4\alpha' (1 - \alpha) \frac{\Omega r}{U} \quad (21)$$

Το θεώρημα ορμής εφαρμοζόμενο επίσης σε δακτυλιοειδή όγκο καταλήγει σε παρόμοια σχέση για τη στοιχειώδη αξονική δύναμη που ασκείται σε ένα δακτυλίδι πλάτους dr . Η τελική σχέση είναι:

$$dT = \rho 4\pi r \alpha (1 - \alpha) U^2 dr \quad (22)$$

Θεωρία στοιχείων πτερύγωσης

Οι δυνάμεις και ροπές στο δακτυλίδι εύρους dr που υπολογίσθηκαν παραπάνω θα είναι ίσες με τις δυνάμεις και ροπές που ασκούνται στα N στοιχεία των πτερυγίων που βρίσκονται εντός αυτού του δακτυλιδιού. Ο "επιμερισμός" αυτός γίνεται με βάση τη θεωρία των στοιχείων πτερύγωσης, η οποία στην ουσία εντοπίζει τα ίχνη του δακτυλιοειδούς ροϊκού σωλήνα πάνω στα πτερύγια του δρομέα ως αεροτομές. Στο **Σχήμα 2.10** απεικονίζεται σε κάτοψη το ανάπτυγμα της κυλινδρικής επιφάνειας του ροϊκού σωλήνα με το ίχνος της τομής της με ένα πτερύγιο του δρομέα.



Σχήμα 2.10: Αεροτομή (στοιχείο περύγωσης) ευρισκόμενη σε ρεύμα αέρα.

Ένας παρατηρητής που βρίσκεται πάνω στο περύγιο βλέπει το ρεύμα αέρα να κινείται με μια ταχύτητα W ως προς αυτόν, της οποίας η αξονική συνιστώσα έχει τιμή $U(1-a)$ και η περιφερειακή $\Omega r(1+a')$. Η γωνία πρόσπτωσης είναι α , η γωνία συστροφής του περυνγίου στην εξεταζόμενη ακτίνα r είναι θ , η γωνία βήματος είναι β και ϕ είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου περιστροφής και της ταχύτητας W . Οι δυνάμεις άνωσης (Lift) και αντίστασης (Drag) σύμφωνα με τα γνωστά από την αεροδυναμική δίνονται αντίστοιχα από τους τύπους

$$\delta L = C_l \frac{\rho}{2} W^2 C \delta r \quad (23)$$

$$\delta D = C_d \frac{\rho}{2} W^2 C \delta r \quad (24)$$

Αναλύοντας τις δυνάμεις αυτές σε μια αξονική και μια περιφερειακή κατεύθυνση μπορούμε να υπολογίσουμε τις στοιχειώδεις δυνάμεις σε κάθε περύγιο ώσης και την περιφερειακή δύναμη που δημιουργεί τη ροπή από τις σχέσεις (25) και (26) αντίστοιχα

$$dF_n = (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) \frac{\rho}{2} W^2 C dr \quad (25)$$

$$dF_t = (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) \frac{\rho}{2} W^2 C dr \quad (26)$$

καθώς και τους αντίστοιχους συντελεστές ώσης και περιφερειακής δύναμης

$$C_n = C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi \quad (27)$$

$$C_t = C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi \quad (28)$$

Η παραγόμενη στοιχειώδης ροπή προκύπτει βάσει ορισμού και χρησιμοποιώντας τη σχέση (26) ως

$$dM = NdF_r r = N(C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) \frac{\rho}{2} W^2 c r dr \quad (29)$$

Εξισώνοντας τις σχέσεις (25) και (29) με τις σχέσεις (19) και (22) αντίστοιχα προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις

$$\frac{a}{1-a} = \frac{BcC_l}{8\pi r \tan \varphi \sin \varphi} [1 + \varepsilon \tan \varphi] \quad (30)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{BcC_l}{8\pi r \cos \varphi} [1 - \varepsilon \cot \varphi] \quad (31)$$

$$\tan \varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} \quad (32)$$

$$W = \sqrt{(U(1-a))^2 + \Omega r(1+a')^2} \quad (33)$$

$$a = \varphi - (\theta + \beta) \quad (34)$$

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_l} \quad (35)$$

Με βάση αυτές τις σχέσεις μπορούμε για δεδομένη τη γεωμετρία του στοιχείου πτερύγωσης να υπολογίσουμε την αεροδυναμική συμπεριφορά του και εν τέλει τον τοπικό συντελεστή ισχύος C_p . Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για όλα τα στοιχεία πτερύγωσης υπολογίζουμε την ισχύ που παράγεται σε όλα τα στοιχεία πτερύγωσης δηλαδή σε ολόκληρο το πτερύγιο από τη σχέση

$$P = \int \rho 2\pi r \frac{U^3}{2} C_p dr \quad (36)$$

Τέλος υπολογίζουμε το συντελεστή ισχύος του δρομέα

$$C_{p,rotor} = \frac{P}{\rho \pi R^2 \frac{U^3}{2}} \quad (37)$$

Δεδομένου ότι το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης εξαρτάται μόνο από την παράμετρο λ , μπορούμε επαναλαμβάνοντας την πιο πάνω διαδικασία για διάφορες τιμές του λ να καταλήξουμε στην καμπύλη λειτουργίας του δρομέα $C_p - \lambda$.

Στις παραπάνω σχέσεις εισάγονται επίσης κάποιες διορθώσεις εξαιτίας της αστοχίας της θεωρίας του δίσκου ενέργειας να συμπεριλάβει ορισμένες περιπτώσεις που συναντάμε σε καταστάσεις πραγματικής ροής. Έτσι, έχουμε δυο διορθώσεις της θεωρίας:

- Διόρθωση του συντελεστή C_T

Προκειμένου να αποφευχθεί η περίπτωση βάσει της θεωρίας δίσκου ενέργειας που ένας μεγάλος συντελεστής αξονικής επαγωγής ($\alpha > 0.5$) θα έδινε αρνητικές τιμές ταχυτήτων μακριά κατάντη του δρομέα, ο Glauert πρότεινε την εξής πειραματικά προκύπτουσα διόρθωση του συντελεστή C_T

$$C_T = 4a(1-a) \text{ για } a < 0.4 \text{ και}$$

$$C_T = 1 - 8a^2 - 0.65a + 0.84 \text{ για } 0.4 < a < 1$$

- Διόρθωση ακροπτερυγίων- διόρθωση Prandtl

Μια άλλη παραδοχή της θεωρίας που βάλλεται από φαινόμενο της εκροής στροβίλων από τα ακροπτερύγια το οποίο το συναντάμε σε συνθήκες πραγματικών ροών ανέμου, είναι η παραδοχή της ομοιόμορφης ροής διαμέσου κάθε δακτυλίου. Αυτό στην πράξη δεν ισχύει καθώς οι στροβιλισμοί που εκρέουν από τα tipstwon πτερυγίων επάγουν ένα πεδίο ταχύτητας το οποίο δεν είναι ομοιόμορφο και μεταβάλλεται περιοδικά γύρω από κάθε δακτύλιο.

Ο Prandtl λοιπόν προσπάθησε να προσεγγίσει αυτές τις απώλειες λόγω των δινών προτείνοντας τη διόρθωση του συντελεστή C_T από τις παρακάτω σχέσεις:

$$F(r) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f})$$

$$f(r) = \frac{N}{2} \frac{R-r}{r \sin \varphi}$$

$$C_T = 4a(1-a)F \text{ για } a \leq a_T \text{ και } C_T = (0.425 + 1.39a)F \text{ για } a \geq a_T$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΙΚΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι μικρές Α/Γ παρουσιάζουν κάποιες ιδιαιτερότητες σε σχέση με τις μεγάλες σε πολλούς τομείς όπως στο σχεδιασμό και στην τεχνολογία (διαφορετικός τρόπος λειτουργίας), στις χρήσεις και στις περιοχές εγκατάστασης, στα υλικά κατασκευής, στον αριθμό και το σχέδιο των πτερυγίων, στο σύστημα ελέγχου καθώς και σε άλλα δευτερεύοντα ζητήματα. Οι ιδιαιτερότητες αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια εκτενέστερα.

3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

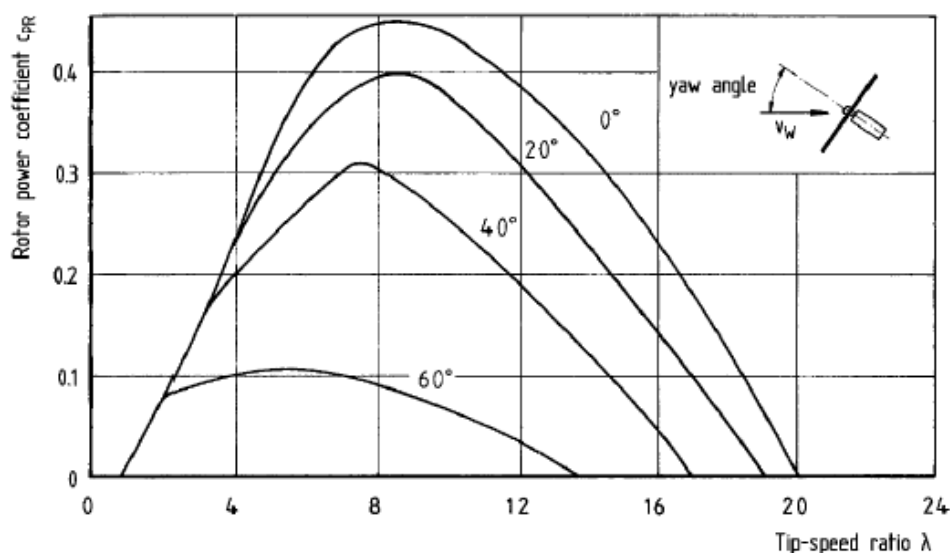
Σήμερα υπάρχουν πάνω από 200 κατασκευαστές μικρών Α/Γ στο κόσμο και πάνω από 400 διαφορετικά είδη μικρών μηχανών εργοστασιακής παραγωγής. Επίσης, είναι εφικτό να κατασκευάζονται μεμονωμένα από τους ίδιους τους χρήστες-καταναλωτές υπό τη μορφή της ενδιάμεσης τεχνολογίας βάσει της οποίας είναι σχεδιασμένη κι η Α/Γ που μελετάμε στην παρούσα διπλωματική εργασία ή ακόμα και με πιο απλούς τρόπους, με χρήση κινητήρων (μοτέρ) από παλιές μηχανές ή από ψυγεία, τρόποι που εμφανίζονται κυρίως στον αναπτυσσόμενο κόσμο. Βέβαια όπως και αν κατασκευάζονται οι μικρές Α/Γ, η ανάγκη για απλότητα στην κατασκευή τους και η ανάγκη να είναι οικονομικά συμφέρουσες, έχει οδηγήσει σε ορισμένες παραλλαγές στη δομή τους σε σχέση με αυτή των μεγάλων μηχανών.

3.1.1 Σύστημα προσανατολισμού (yaw)

Για παράδειγμα, το σύστημα προσανατολισμού του δρομέα στις μικρές Α/Γ δεν είναι όπως αυτό που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.2. Στην ουσία αποτελείται από μια ουρά, στο άκρο της οποίας υπάρχει ένα πτερύγιο σε σχήμα "Δ" και το οποίο είναι συνδεδεμένο με κάποιο μηχανισμό πάνω στη νασέλα (yaw). Όταν ο άνεμος αλλάξει κατεύθυνση το πτερύγιο αυτό δέχεται δυνάμεις που τείνουν να επαναφέρουν τον άξονα της ουράς παράλληλα στη διεύθυνση του ανέμου και το επίπεδο περιστροφής του δρομέα κάθετο στον άνεμο. Αυτός ο μηχανισμός αν και είναι πιο απλός και φθηνός από το σύστημα σερβομηχανισμού που έχουν οι μεγάλες μηχανές, εν τούτοις δεν είναι τόσο ακριβής και δημιουργεί ζητήματα που έχουν να κάνουν με τη δυναμική συμπεριφορά του και παρουσιάζονται πιο κάτω.

3.1.2 Σύστημα ελέγχου ισχύος (furling)

Επίσης διαφορετικό είναι και το σύστημα ελέγχου της ισχύος της μηχανής. Σε αντίθεση με της μεγάλες ο έλεγχος γίνεται με παθητικό τρόπο μέσω του συστήματος furling. Η λογική του συστήματος αυτού είναι ουσιαστικά να απομακρύνει την ανεμογεννήτρια από το μέτωπο του ανέμου όταν ο άνεμος αυξάνεται επικίνδυνα. Το σύστημα furling θα μπορούσε να θεωρηθεί μέρος του συστήματος yaw. Ανάλογα με το βάρος και την κατασκευή του συστήματος αυτού, για συγκεκριμένους (άνω των ονομαστικών) ανέμους ενεργοποιείται το σύστημα furling που πλέον απομακρύνει τη φτερωτή από τον άνεμο κατά τη γωνία yaw. Ο περιορισμός της ισχύος φαίνεται στο **Σχήμα 3.1**.



Σχήμα 3.1: Μεταβολή της καμπύλης C_p - λ συναρτήσει της γωνίας yaw.

Όπως και για το σύστημα yaw έτσι και για το furling μπορούμε να πούμε ότι παρά την απλότητα και το χαμηλό κόστος κατασκευής του, η αδυναμία ακριβούς προσδιορισμού της λειτουργίας του κάνει πιο πολύπλοκη τη διαδικασία υπολογισμού της παραγόμενης ισχύος.

3.1.3 Πτερύγια

Για μικρές Α/Γ χρησιμοποιούνται συνήθως φθηνά υλικά όπως ξύλο, πολυουρεθάνη ή υαλόνημα, τα οποία όμως δεν είναι αρκετά ανθεκτικά στην εναλλασσόμενη φόρτιση που υποβάλλονται κατά τη λειτουργία της μηχανής.

Το ξύλο είναι το πιο συνηθισμένο ιδίως σε ιδιοκατασκευές. Παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι βρίσκεται στη φύση και είναι εύκολα επεξεργάσιμο. Υπάρχει δηλαδή το ακατέργαστο φυσικό ξύλο, αλλά και το εμποτισμένο με ρητίνη ξύλο που χρησιμοποιείται αρκετά. Επιπλέον, είναι ένα φυσικό προϊόν το οποίο παρουσιάζει αρκετά καλή σκληρότητα, κάνοντας το πιο κατάλληλο για τις μικρές ανεμογεννήτριες ιδιαίτερα όταν τα ξύλα ενισχύονται με ίνες κυτταρίνης. Για μεγαλύτερα πτερύγια δεν παρουσιάζει τόσο μεγάλη δυσκαμψία, με αποτέλεσμα να μην αναιρούνται οι ελαστικές αποκλίσεις για πιο ογκώδη πτερύγια. Σημαντικό, όμως, χαρακτηριστικό του ξύλου είναι η χαμηλή του πυκνότητα που προσφέρει ελαφρότητα στα πτερύγια, με αποτέλεσμα την καλύτερη επιτάχυνση τους από τον άνεμο. Ακόμη, παρουσιάζει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, αφού δεν καταπονείται ακόμα και σε πολύ μεγάλες πιέσεις κι η εσωτερική του δομή το βοηθά να απορροφά τους κραδασμούς κι άρα να τους αποσβήνει. Το εσωτερικό του αποτελείται από επάλληλα στρώματα ξύλου τα οποία λειτουργούν όπως κι οι αναρτήσεις στο σύστημα αναρτήσεων των αυτοκινήτων. Βεβαίως, γίνονται έρευνες και δοκιμές για διαφορετικά είδη ξύλων ως προς τις αντοχές τους. Επιπροσθέτως, η τιμή του είναι πολύ ελκυστική σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά κατασκευής πτερυγίων, ενώ σε χώρες κυρίως του αναπτυσσόμενου κόσμου φαντάζει ως μόνη λύση για την κατασκευή πτερυγίων. Παρόλα αυτά επειδή αποτελεί φυσικό προϊόν είναι δύσκολη η επεξεργασία του και η υψηλή ποιότητα αεροδυναμικού του σχεδιασμού. Τέλος, τα ξύλινα πτερύγια είναι ευαίσθητα στην υγρασία και στη βροχή, αλλά με κατάλληλη και συχνή συντήρηση, μπορούν να ανταπεξέλθουν για αρκετά χρόνια, δίχως να παρουσιάσουν ιδιαίτερα προβλήματα.

3.1.4 Τύπος Γεννήτριας

Όσο αφορά τη γεννήτρια της μηχανής, συνήθως αυτή στις μικρές Α/Γ είναι γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMG) και λιγότερο συχνά γεννήτρια επαγωγής (IG). Βασικά πλεονεκτήματα των πρώτων είναι η υψηλή απόδοση σε χαμηλές στροφές, η απουσία ανάγκης για κιβώτιο ταχυτήτων, ο απλός σχεδιασμός και ο εύκολος έλεγχός τους. Στα μειονεκτήματά τους είναι το υψηλότερο κόστος τους (που βέβαια εξισορροπείται από την έλλειψη κιβωτίου ταχυτήτων) και η γήρανση και μη αποδοτικότητα του υλικού του μαγνήτη μετά από περίπου 20 χρόνια ζωής.

Αντίστοιχα οι γεννήτριες επαγωγής αν και πιο φθηνές λόγω μαζικής παραγωγής, εν τούτοις η απόδοσή τους σε μικρά μεγέθη και σε μερικά φορτία δεν είναι πολύ καλή.

3.1.5 Πύργος Α/Γ

Τέλος, εμφανίζονται διάφορες παραλλαγές πύργων, πάνω στους οποίους τοποθετούνται οι μικρές Α/Γ. Ο κλασικός σωληνοειδής ιστός μπορεί να είναι υποστηριζόμενος από συρματόσχοινα ή είναι δυνατόν να έχει μεγαλύτερη διατομή, ώστε να στηρίζεται μόνο στη βάση του. Ομοίως, υπάρχουν πλεγματοειδείς ιστοί που συνδέονται με συρματόσχοινα και πιο ογκώδεις πλεγματοειδείς κατασκευές που προσδένονται με το έδαφος μόνο στη βάση τους.

3.2 ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΙΚΡΩΝ Α/Γ

Οι περιπτώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικρές Α/Γ είναι αρκετές, σε αντίθεση με τις μεγάλες. Οι τελευταίες υπό τη μορφή χερσαίων ή θαλάσσιων (offshore) αιολικών πάρκων συνδέονται σε διασυνδεδεμένα συστήματα είτε στη Μέση (ΜΤ) είτε στην Υψηλή τάση (ΥΤ) ή ακόμα και στην Υπερυψηλή τάση (ΥΥΤ) όταν πρόκειται για αιολικά πάρκα τάξεως 1GW κι άνω. Ακόμα, οι μεγάλες Α/Γ μπορούν να συνδεθούν σε μεγάλα αυτόνομα συστήματα απομακρυσμένων περιοχών (δίκτυα νησιών) αποτελώντας κομμάτι ενός υβριδικού συστήματος, όπως στο παράδειγμα της Ικαρίας, αποθηκεύοντας ενέργεια υπό τη μορφή δυναμικής ενέργειας του νερού (αντλησιοταμίευση) σε μεγάλες φυσικές ή τεχνητές δεξαμενές (ταμιευτήρες) και εκμετάλλευσης της μέσω υδροστροβίλων όταν το φορτίο του συστήματος δεν καλύπτεται από την παραγωγή των Α/Γ (αιχμές φορτίου ή μέρες με χαμηλά μποφόρ). Βεβαίως, σε αυτόνομα συστήματα μικρότερης κλίμακας όμως (απομονωμένα χωριά ή πόλεις), μπορεί να γίνει χρήση και μικρών ανεμογεννητριών με παράλληλη χρήση φωτοβολταϊκών.

Εκτός των μικρών υβριδικών συστημάτων, οι χρήσεις των μικρών Α/Γ ποικίλλουν και βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς. Μπορούν, λοιπόν, να εγκατασταθούν σε μη διασυνδεδεμένες με το ηλεκτρικό δίκτυο περιοχές σε εφαρμογές όπως είναι οι μετεωρολογικοί και οι τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί που βρίσκονται σε κορυφές βουνών, σε συστήματα φωτισμού εθνικών οδών που διασχίζουν ακατοίκητες περιοχές και σε μικροδίκτυα (απομακρυσμένα χωριά), όπως αναφέρθηκε λίγο παραπάνω, με συνδυασμό συμβατικών πηγών ενέργειας (ντιζελογεννήτριες) κι άλλων μορφών ΑΠΕ (φωτοβολταϊκά και μικρά υδροηλεκτρικά) με αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας σε συστήματα μπαταριών. Ακόμη σε περιοχές του τρίτου

κόσμου όπου ο ηλεκτρισμός δεν έχει φτάσει ποτέ, οι μικρές ανεμογεννήτριες παίζουν πλέον καθοριστικό ρόλο και αποτελούν κυρίαρχη επιλογή για την ηλεκτροδότηση τέτοιων περιοχών.

Επιπλέον, μπορούν να εγκατασταθούν σε offshore εφαρμογές, όπως σε συστήματα αφαλάτωσης του νερού ή σε πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου, αλλά και τηλεπικοινωνιακούς σταθμούς που βρίσκονται χιλιόμετρα μακριά από κάποια κοντινή ακτή, όπως και σε πλωτούς φάρους. Επιπροσθέτως, micro μηχανές, της τάξεως των 500 Watt τοποθετούνται πλέον και σε ιστιοπλοϊκά για κάλυψη των μικρών φορτίων που διαθέτουν (φωτισμός, ψυγεία, τηλεοράσεις, κτλ.), με μεγάλη ενεργειακή παραγωγή μάλιστα, αφού οι φτερωτές τους "βλέπουν" μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου από αυτή που επικρατεί στην πραγματικότητα, λόγω της ταυτόχρονης κίνησης του ιστιοπλοϊκού. Στην ύπαιθρο η εγκατάσταση τους μπορεί να γίνει στον προαύλιο χώρο μικρών βιομηχανιών, κτηνοτροφικών μονάδων, κλινικών, σχολείων, κτλ. ή ακόμα στους κήπους εξοχικών κατοικιών ή μονοκατοικιών σε ημιαστικές περιοχές και προάστια πόλεων. Μικρές ή ακόμη και micro Α/Γ τοποθετούνται ακόμα και σε αστικό περιβάλλον, στις οροφές κτιρίων, υπό την αυστηρή τήρηση νομοθετικών διατάξεων και εγκεκριμένων προδιαγραφών όσον αφορά τους κανόνες ασφαλείας που απαιτείται να πληρούν. Τέλος, είναι δυνατόν να ενσωματωθούν και στην αρχιτεκτονική ενός κτιρίου.

3.3 ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΜΙΚΡΩΝ Α/Γ

Οι μικρές Α/Γ παρά το γεγονός ότι έκαναν την εμφάνισή τους αρκετά παλιά, ακόμη δεν υπάρχουν λογισμικά για την ανάλυση και σχεδίασή τους που να δίνουν αρκετά ακριβή αποτελέσματα. Τα υπολογιστικά πακέτα που υπάρχουν σήμερα είναι βασισμένα σε εμπειρικούς κανόνες, επιβεβαιωμένους από πειράματα και μετρήσεις σε Α/Γ μεγάλης ισχύος, για χρήση σε αιολικά πάρκα. Αν και οι μικρές Α/Γ, όσον αφορά την εμφάνιση τους αποτελούν μία μικρογραφία των μεγαλύτερων, εμφανίζουν ορισμένες ιδιαιτερότητες που σχετίζονται με το πεδίο εφαρμογής τους, την αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων τους, το κόστος και τον τρόπο κατασκευής τους. Ενώ λοιπόν, οι βασικές αρχές λειτουργίας παραμένουν ίδιες και ανεξάρτητες του μεγέθους, οι ιδιαιτερότητες αυτές ανοίγουν ένα νέο πλαίσιο μελέτης και έρευνας. Στον **Πίνακα 3.1** φαίνεται η εξάρτηση ορισμένων βασικών παραμέτρων της λειτουργίας Α/Γ από την ακτίνα των πτερυγίων.

Parameter	Power law dependence on R
Blade angular velocity	-1
Centrifugal blade loads	-1
Reynolds number	1
Gearbox ratio	1
Power output	2
Noise output	2
Brake torque (high speed side)	2
Brake torque (low speed side)	3
Starting torque	3
Blade mass	2-3
Gyroscopic moments	3-4
Inertia of blades	4-5

Πίνακας 3.1: Εξάρτηση μεγεθών από την ακτίνα των πτερυγίων (*Analysis Design, Application, David Wood 2011*).

3.3.1 Λειτουργία ανεμογεννητριών σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι μικρές Α/Γ τοποθετούνται συνήθως κοντά στα σημεία των καταναλώσεων, δηλαδή κοντά σε αστικές ή αγροτικές περιοχές, όπου λόγω της τοπολογίας ή εμποδίων που μπορεί να υπάρχουν, επικρατούν συνθήκες οριακού στρώματος και μάλιστα τυρβώδους. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του ανέμου U_T που "βλέπει" η ανεμογεννήτρια είναι αρκετά μικρή σε σχέση με τις ταχύτητες ανέμου σε τοποθεσίες με καλύτερο αιολικό δυναμικό. Επιπλέον, λόγω του μικρού μεγέθους των πτερυγίων αυτών των Α/Γ, η χορδή τους c είναι επίσης μικρή, με αποτέλεσμα το γινόμενο U_{TC} και άρα οι αριθμοί Re στους οποίους λειτουργεί η μηχανή να φτάνουν μέχρι και 10.000, όταν στις μεγάλες μηχανές η χαμηλότερη τιμή φτάνει περίπου 500.000. Η ιδιαιτερότητα αυτή, των μικρών αριθμών Reynolds, έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση των πτερυγίων.

3.3.1.1 Το φαινόμενο του θύλακα αποκόλλησης

Κατά τη ροή του αέρα γύρω από μια αεροτομή διαμορφώνεται μια κατανομή στατικών πιέσεων και ταχυτήτων. Υπάρχει ένα σημείο στην αεροτομή στο οποίο η κινητική ενέργεια του αέρα μηδενίζεται και η στατική πίεση γίνεται μέγιστη (σημείο ανακοπής). Καθώς ο αέρας διέρχεται από την πάνω πλευρά της αεροτομής (πλευρά υποπίεσης) λόγω της καμπυλότητας της αεροτομής η πίεση μειώνεται (αρνητική κλίση πίεσης) και η ταχύτητα αυξάνει. Η μείωση της ταχύτητας στις χαμηλότερες στοιβάδες του οριακού στρώματος αντισταθμίζεται από τη γενικότερη αύξηση της ταχύτητας στην περιοχή αυτή. Μετά το σημείο όπου η πίεση γίνεται ελάχιστη και η ταχύτητα μέγιστη, η ροή

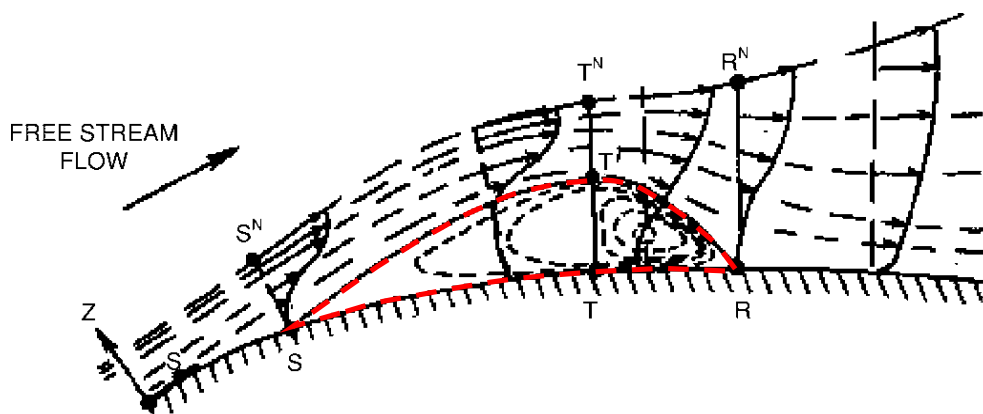
αρχίζει να επιβραδύνεται και η πίεση να αυξάνεται (θετική κλίση πίεσης). Αν αυτή η αύξηση της πίεσης είναι αρκετά μεγάλη (ανάστροφη κλίση πίεσης-ADP), τότε είναι δυνατόν η ταχύτητα του ρευστού σε μια περιοχή του οριακού στρώματος να μηδενιστεί σε κάποιο σημείο και στη συνέχεια, να αντιστραφεί με φορά προς τα εμπρός και να δημιουργηθούν μικρές δίνες. Τότε έχουμε το φαινόμενο της αποκόλλησης του ρευστού από το στερεό όριο.

Στις μεγάλες ανεμογεννήτριες όπου επικρατούν μεγάλοι αριθμοί Reynolds, πάνω από 10^6 , η τυρβώδης ροή καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της αεροτομής. Λόγω των στροβιλισμών και των διαταραχών της τυρβώδους ροής, ρευστό υψηλής ορμής που βρίσκεται πάνω από το οριακό στρώμα αναμειγνύεται με ρευστό του διατμητικού οριακού στρώματος που έχει επιβραδυνθεί και αυξάνει την ταχύτητά του. Έτσι, δύναται να υπερνικηθεί η ανάστροφη κλίση πίεσης, να γίνει η μετάβαση της ροής σε τυρβώδη και στη συνέχεια να γίνει η αποκόλληση του τυρβώδους οριακού στρώματος. Η αποκόλληση της τυρβώδους ροής σημαίνει και μια ήπια μεταβολή του συντελεστή C_i της αεροτομής στις γωνίες που συμβαίνει η αποκόλληση.

Στην περίπτωση όμως μικρών αριθμών Reynolds, όπως είναι η περίπτωση πτερυγίων μικρών Α/Γ, όπου το στρωτό οριακό στρώμα καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση πάνω στην καμπύλη της αεροτομής, η αποκόλληση της ροής συμβαίνει πριν τη μετάβασή της σε τυρβώδη. Μετά την αποκόλληση η ροή μπορεί να γίνει τυρβώδης και υπό συγκεκριμένες συνθήκες να επανατοποθετηθεί στην αεροτομή, σχηματίζοντας έτσι μια ζώνη ανακυκλοφορίας, γνωστή και ως θύλακας αποκόλλησης (laminar separation bubble). Ο θύλακας αποκόλλησης αλλάζει το ενεργό σχήμα της αεροτομής αυξάνοντας έτσι το πάχος του οριακού στρώματος. Συνέπεια είναι η αύξηση της οπισθέλκουσας δύναμης και η μείωση της άνωσης, κάτι που ενισχύεται και από την ύπαρξη τυρβώδους οριακού στρώματος μετά το θύλακα αποκόλλησης αντί για στρωτού, πράγμα που σημαίνει μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις.

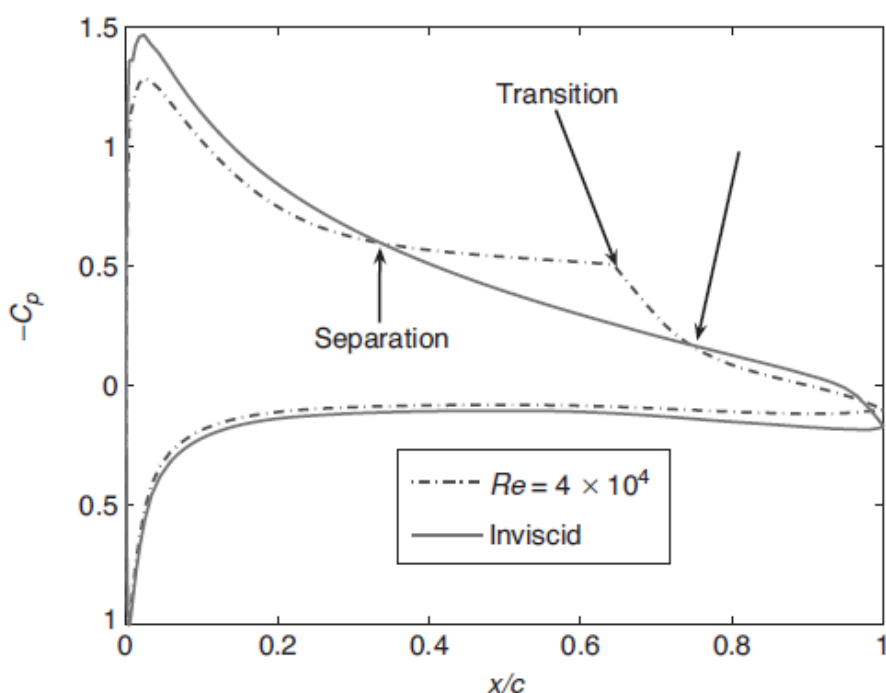
Εκτός αυτού, ο σχηματισμός θυλάκων αποκόλλησης είναι ανεπιθύμητος γιατί ακόμη και μια ήπια ανάστροφη κλίση πίεσης που συνοδεύει μια μικρή μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης, είναι αρκετή ώστε ο θύλακας να σπάσει και να έχουμε αποκόλληση στρωτού οριακού στρώματος. Το σπάσιμο αυτό του θύλακα συνεπάγεται μια απότομη πτώση του C_i της αεροτομής στις γωνίες αποκόλλησης.

Η πρώτη καταγεγραμμένη πειραματική παρατήρηση του θύλακα αποκόλλησης αυτής έγινε από τον Jones το 1938. Ένας τέτοιος θύλακας αποκόλλησης φαίνεται στο **Σχήμα 3.2**.



Σχήμα 3.2: Σχηματισμός θύλακα αποκόλλησης.

Μετά την αποκόλληση η στρωτή ροή σχηματίζει ένα οριακό στρώμα στρωτό και απομακρυσμένο από το στερεό όριο. Στο σχήμα η περιοχή αυτή βρίσκεται μεταξύ της γραμμής $S''T''$, που είναι και το εξωτερικό όριο της συνεκτικής περιοχής και της γραμμής ροής που ST' , η οποία οριοθετεί την επιφάνεια του θύλακα αποκόλλησης. Κατάντι του σημείου T η τύρβη του ρευστού μπορεί μέσω του μηχανισμού της διάχυσης (Roberts, 1980) να αναμείξει ρευστό υψηλής ορμής με ρευστό που λόγω του θύλακα αποκόλλησης η ορμή του έχει μειωθεί, επανατοποθετώντας στη συνέχεια ένα τυρβώδες οριακό στρώμα πάνω στην αεροτομή. Αυτό το τυρβώδες οριακό στρώμα φαίνεται στο σχήμα μεταξύ των γραμμών $T''R''$ και $T'R$, ενώ η δημιουργούμενη ζώνη ανακυκλοφορίας περικλείεται από τις γραμμές $ST'R$ και STR . Ακριβώς μετά το σημείο αποκόλλησης σχηματίζεται μια περιοχή στην οποία η ταχύτητα ανακυκλοφορίας του αέρα είναι αρκετά μικρότερη από την ταχύτητα ελεύθερης ροής, οπότε το ρευστό μπορεί να θεωρηθεί ακίνητο. Επειδή το οριακό στρώμα μετά την αποκόλληση είναι στρωτό και άρα ο μηχανισμός διάχυσης πρακτικά δεν υπάρχει, η ταχύτητα μεταξύ του σημείου αποκόλλησης και του σημείου μετάβασης σε τυρβώδη ροή μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν σταθερή (Roberts, 1980). Αυτό αποτυπώνεται και στην κατανομή της πίεσης στην περιοχή αυτή, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.3**.



Σχήμα 3.3: Κατανομή πιέσεων σε κατά μήκος αεροτομής.

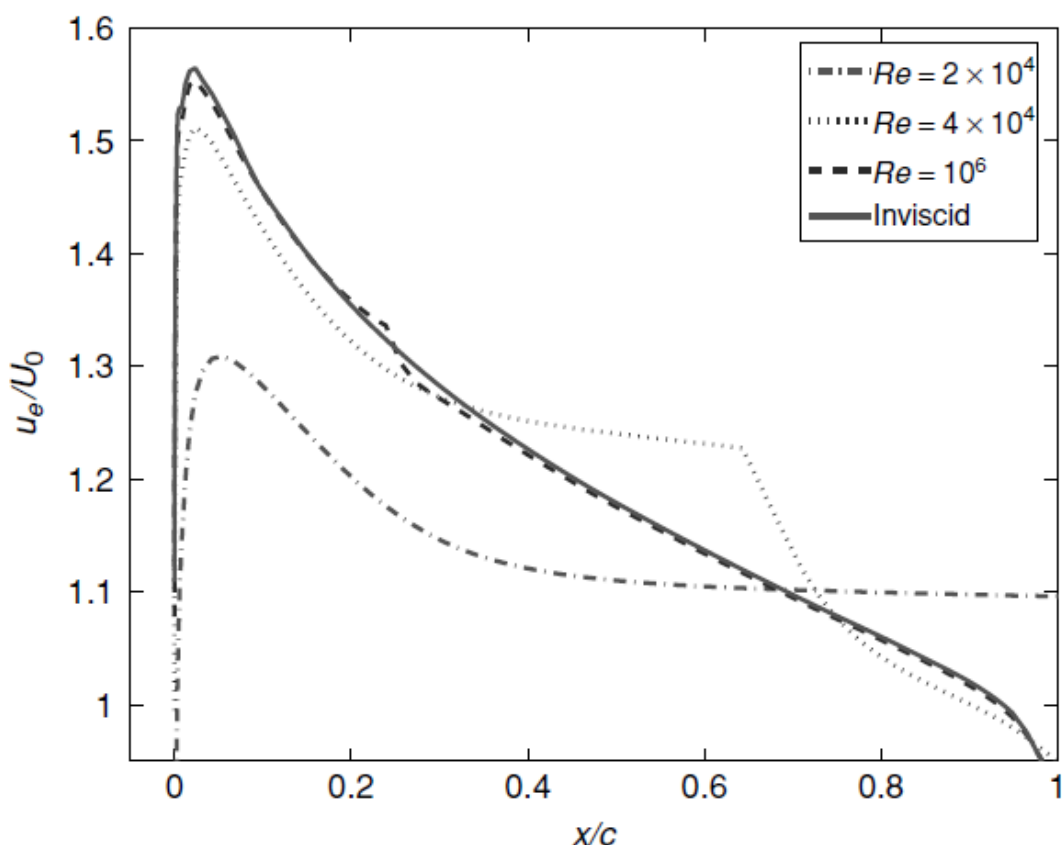
Με κριτήριο την επίδραση στην κατανομή της ταχύτητας και της πίεσης, οι θύλακες αποκόλλησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μεγάλους και μικρούς (Tani, 1964). Ένας μικρός θύλακας αποκόλλησης καλύπτει ένα μικρό ποσοστό της επιφάνειας της αεροτομής και έχει μικρή επίδραση στις κατανομές πίεσης και ταχύτητας. Η κατανομή της πίεσης σε αυτή την περίπτωση ακολουθεί αρκετά πιστά την κατανομή της μη συνεκτικής ροής μέχρι και το σημείο όπου εκδηλώνεται ο θύλακας αποκόλλησης. Αντίθετα ένας μεγάλος θύλακας αποκόλλησης καλύπτει μεγάλο μέρος της επιφάνειας της αεροτομής και κάνει την κατανομή της πίεσης να αποκλίνει αρκετά από αυτή της μη συνεκτικής ροής, ενώ μεταβάλλει σημαντικά τη μέγιστη ταχύτητα. Το αποτέλεσμα είναι μια μείωση της άνωσης και αύξηση της οπισθέλκουσας.

Η αεροδυναμική του φαινομένου του θύλακας αποκόλλησης εξαρτάται από την τιμή του αριθμού Reynolds, την κατανομή της πίεσης, τη γεωμετρία της αεροτομής, την τραχύτητα της επιφάνειας και το επίπεδο τύρβης της ελεύθερης ροής. Ένας εμπειρικός κανόνας του Carmichael (1981) λέει ότι αν ο Reynolds-ορισμένος με βάση την ταχύτητα της ελεύθερης ροής και την απόσταση του σημείου αποκόλλησης από το σημείο μετάβασης- είναι μικρότερος από 5×10^4 η ροή θα αποκολληθεί χωρίς να επανατοποθετηθεί στην αεροτομή, ενώ αν είναι ελαφρώς

μεγαλύτερος θα σχηματιστεί μεγάλο θύλακας. Ωστόσο αυτός ο κανόνας δε μπορεί να θεωρηθεί απολύτως ασφαλής, καθώς η διαδικασία της μετάβασης και της επανατοποθέτησης δε μπορεί να καθοριστεί μόνο από τον αριθμό Reynolds. Όσο ο Reynolds μειώνεται, η απόσβεση λόγω συνεκτικότητας αυξάνει και είτε περιορίζεται η μετάβαση της ροής σε τυρβώδη είτε η επανατοποθέτηση του ρευστού καθυστερείται. Η ροή δεν επανατοποθετείται στην αεροτομή αν:

1. ο αριθμός Re είναι αρκετά χαμηλός ώστε η ροή να παραμείνει στρωτή, ή
2. η κλίση πίεσης είναι πολύ μεγάλη και άρα η επανατοποθέτηση είναι αδύνατη.

Έτσι, χωρίς επανατοποθέτηση η ροή αποκολλάται οριστικά και ο θύλακας αποκόλλησης δε σχηματίζεται.



Σχήμα 3.4: Συμπεριφορά του θύλακα αποκόλλησης για διάφορους αριθμούς Reynolds.

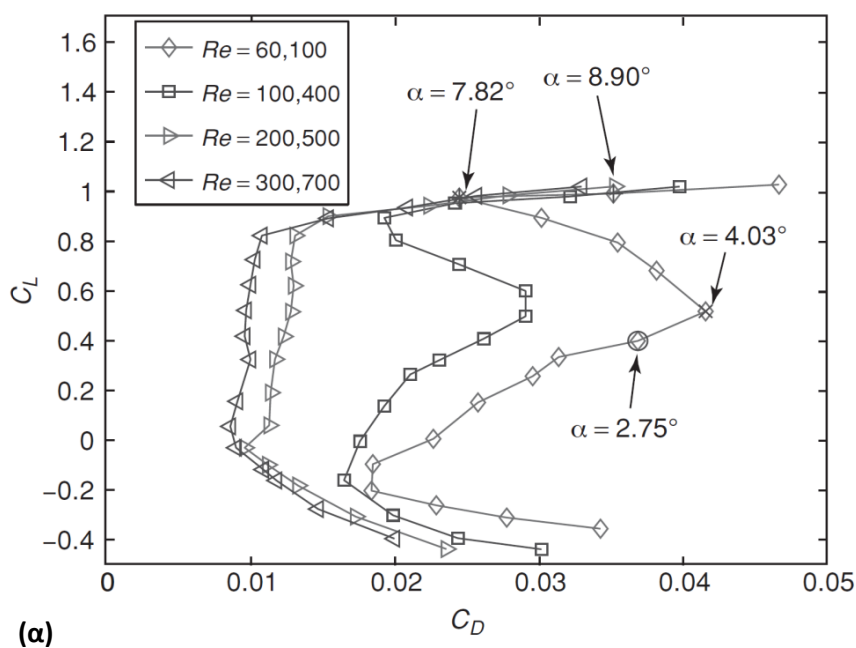
Το **Σχήμα 3.4** δείχνει τη συμπεριφορά ενός θύλακα αποκόλλησης για διάφορους αριθμούς Reynolds για μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης. Η ανάλυση αυτή έγινε με χρήση του προγράμματος XFOIL (Drela, 1989) για την αεροτομή SD7003. U_e είναι η ταχύτητα στο άκρο του οριακού στρώματος και U_0 η ταχύτητα της ελεύθερης ροής. Παρατηρούμε ότι για $Re=10^6$ σχηματίζεται μικρός θύλακας αποκόλλησης ο οποίος επηρεάζει λίγο και τοπικά μόνο την κατανομή της ταχύτητας. Για $Re=4 \times 10^4$ ο μικρός θύλακας αποκόλλησης “σκάει” σχηματίζοντας ένας μεγαλύτερος και παρατηρείται μια αισθητή μείωση του μεγίστου της ταχύτητας σε σχέση με τη μη συνεκτική ροή. Το “σκάσιμο” του θύλακα αποκόλλησης εν γένει, μπορεί να συμβαίνει όταν αλλάζουν κάποια χαρακτηριστικά της ροής, όπως ο Re ή η κλίση της πίεσης ή ακόμη μπορεί να οφείλεται και στο υψηλό επίπεδο διαταραχών και τύρβης που έχει η ελεύθερη ροή στο σημείο πρόσπτωσης. Σίγουρα πάντως είναι ανεπιθύμητο, αφού με το “σκάσιμο” του θύλακα μεταβάλλεται απότομα η κατανομή των πιέσεων και δημιουργούνται ισχυρές δυνάμεις που προκαλούν ταλαντώσεις και θόρυβο. Καθώς ο Re μικραίνει κι άλλο, στα 2×10^4 , η ροή αποκολλάται πλήρως χωρίς να σχηματίζεται θύλακας αποκόλλησης, ενώ το μέγιστο της ταχύτητας και η κυκλοφορία μειώνονται σημαντικά. Το τελευταίο οφείλεται στη μείωση της κλίσης πίεσης λόγω αποκόλλησης. Μια μικρότερη κλίση πίεσης μετριάζει την ενίσχυση των διαταραχών στο στρωτό οριακό στρώμα, επιμηκώνοντας έτσι το οριακό στρώμα πάνω από το θύλακα αποκόλλησης και καθυστερώντας τη μετάβαση σε τυρβώδη ροή. Σε αυτόν τον αριθμό Re η ροή δεν επανατοποθετείται στην αεροτομή και οι μικρές μεταβολές της τιμής του Re δεν επηρεάζουν αισθητά.

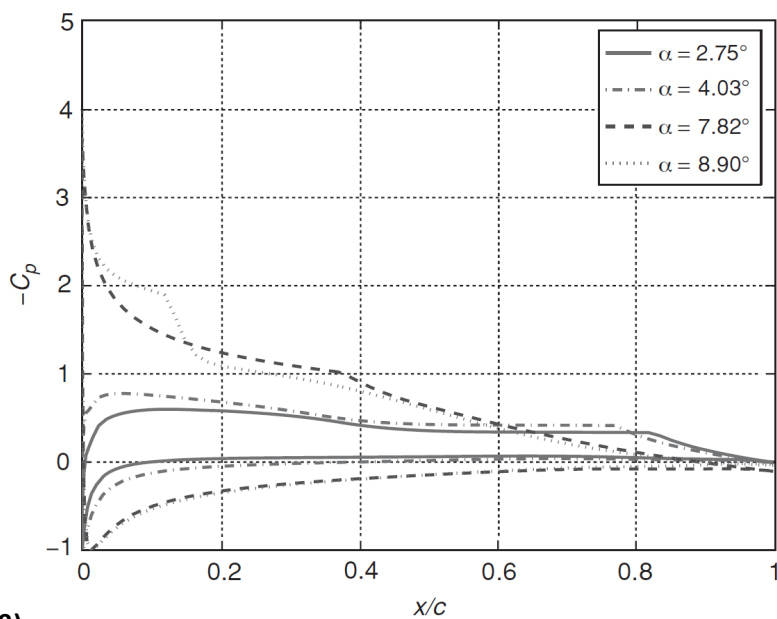
Η γωνία πρόσπτωσης για σταθερό αριθμό Re μεταβάλλει την κλίση της πίεσης που επικρατεί στην περιοχή κατάντι του σημείου μεγιστοποίησης της ταχύτητας, αλλάζοντας έτσι τα χαρακτηριστικά του θύλακα αποκόλλησης. Επομένως η αλλαγή της γωνίας ισοδυναμεί, όσο αναφορά την εκδήλωση του φαινομένου, με αλλαγή του Re .

Το **Σχήμα 3.5** παρουσιάζει τα διαγράμματα των συντελεστών άνωσης-οπισθέλκουσας (Lift-to-Drag) για διάφορους Re και για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης και την κατανομή του συντελεστή πίεσης C_p κατά μήκος της χορδής για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης, όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση στο πρόγραμμα XFOIL για την αεροτομή EpplerE374 (Drela,1989). Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- 1) Σε χαμηλές γωνίες πρόσπτωσης (π.χ. 2.75°) σχηματίζεται μεγάλος θύλακας αποκόλλησης ο οποίος καλύπτει μεγάλο μέρος της αεροτομής και οδηγεί σε αύξηση της οπισθέλκουσας.

- 2) Καθώς πηγαίνουμε σε μεγαλύτερη γωνία (από 4.03° σε 7.82°) αυξάνεται η ανάστροφη κλίση πίεσης και ισχυροποιείται η εμφάνιση των κυμάτων Tollmen-Schichting, οπότε η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή γίνεται γρήγορα. Έτσι, σχηματίζεται πιο μικρός θύλακας και ένα μεγαλύτερο μέρος της πλευράς υποπίεσης καλύπτεται από το τυρβώδες οριακό στρώμα που έχει επανατοποθετηθεί. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης.
- 3) Όταν η γωνία αυξηθεί κι άλλο (πέρα από 7.82°) το ρευστό αποκολλάται και μεταβαίνει σε τυρβώδη ροή. Όμως η αποκόλληση είναι τόσο έντονη που ο μηχανισμός της διάχυσης της τύρβης δε μπορεί να επαναφέρει τις μάζες ρευστού πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής. Έτσι, δε σχηματίζεται θύλακας αποκόλλησης, ενώ η αύξηση της οπισθέλκουσας δύναμης σε σχέση με αυτή της ανωστικής είναι τεράστια.





(β)

Σχήμα 3.5:(α) Διαγράμματα συντελεστών άνωσης/οπισθέλκουσας ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds και της γωνίας πρόσπτωσης α για την αεροτομή EpplerE374, **(β)** Διαγράμματα C_p - x για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης της αεροτομής EpplerE374

Το ζγκ-ζαγκ που παρατηρείται στις δυο καμπύλες του **Σχήματος 3.5 (α)** είναι χαρακτηριστικό των διαγραμμάτων C_L - C_D σε μικρούς αριθμούς Re. Όπως φαίνεται στο ίδιο διάγραμμα, για αρκετά υψηλούς Re η καμπύλη έχει το συνηθισμένο σχήμα "C".

Έρευνες πάνω στο φαινόμενο του θύλακα αποκόλλησης και κυρίως σχετικές με υδροδυναμικά φαινόμενα αστάθειας γινόνταν από τη δεκαετία του '50. Με τη ραγδαία εξέλιξη των αριθμητικών μεθόδων, τα επόμενα χρόνια και μέχρι σήμερα, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα προσομοίωσης του στρωτού αποκολλημένου οριακού στρώματος τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του φαινομένου και τη σχετική με αυτό μεταβατική ροή. Δισδιάστατες προσομοιώσεις του θύλακα αποκόλλησης πραγματοποιήθηκαν πρώτη φορά από τον Pauley et al, ενώ λίγο αργότερα οι Pauley και Rist πραγματοποίησαν τις πρώτες τρισδιάστατες μελέτες. Ωστόσο, το φαινόμενο της μετάβασης σε τυρβώδη ροή δεν επιλύθηκε λόγω των περιορισμένων τεχνολογικών δυνατοτήτων της εποχής. Πρόσφατα, προκειμένου να επιλυθεί η ροή μετάβασης του θύλακα αποκόλλησης σε τύρβη χρησιμοποιήθηκε από τους Spalart & Strelets και Alam & Sandham η μέθοδος της άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης (DNS). Με την εξέλιξη πειραματικών μεθόδων όπως η Laser-Doppler-Anemometry (LDA) και η Particle-Image-Velocity (PIV) μπορούμε σήμερα να ποσοτικοποιήσουμε

την ανάπτυξη ασταθών δομών όπως αυτή του θύλακα αποκόλλησης σε ένα πεδίο ροής. Παρά όμως τα σημαντικά επιτεύγματα του κλάδου αυτού τα τελευταία χρόνια, τόσο το φαινόμενο του θύλακα αποκόλλησης όσο και αυτό της μετάβασης χρειάζονται περαιτέρω έρευνα. Η πολυπλοκότητα της έρευνας αυτής συνίσταται στην συνεχή παρουσία φαινομένων αποκόλλησης και στην αλληλεπίδρασή τους με την διαδικασία μετάβασης σε τυρβώδη.

3.3.1.2 Αεροτομές για λειτουργία σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds

Βασικός στόχος κατά το σχεδιασμό αεροτομών χαμηλών Re , δηλαδή για $Re < 500.000$ είναι η αποφυγή του φαινομένου του θύλακα αποκόλλησης. Για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγονται οι μεγάλες τιμές υποπίεσης στο χείλος προσβολής και αντίξοης βαθμίδας πίεσης στην πλευρά υποπίεσης, κάτι που οδηγεί το σχεδιαστή σε πιο λεπτές αεροτομές από αντίστοιχες που λειτουργούν σε υψηλούς Re . Καταφέρνουμε έτσι λόγω της λιγότερο απότομης κλίσης πίεσης να αποφεύγουμε φαινόμενα αποκόλλησης της ροής. Ο Laitone πρότεινε για $Re < 500.000$ αεροτομές πολύ λεπτές με πάχος 2.5% και καμπυλότητα 5% επί της χορδής, ενώ οι Giguere και Selig εξέτασαν και έφτιαξαν ένα αρχείο δεδομένων με αρκετές αεροτομές για πτερύγια μικρών Α/Γ. Ωστόσο το πάχος μπορεί να είναι σημαντικό πρόβλημα για το κατασκευαστή, λόγω των μεγάλων φυγόκεντρων φορτίων που αναπτύσσονται σε μικρές Α/Γ. Έτσι, από τη μια βελτιώνεται η αεροδυναμική απόδοση του πτερυγίου με τη μείωση του πάχους της αεροτομής, αλλά από την άλλη μπαίνουν περιορισμοί που αφορούν την αντοχή του πτερυγίου, κυρίως κοντά στον ομφαλό.

Ένας άλλος τρόπος βελτιστοποίησης της αεροτομής για να λειτουργεί αποδοτικά σε χαμηλούς Re είναι η αύξηση της ακτίνας στο χείλος προσβολής και η "όξυνση" του χείλους εκφυγής. Αυξάνοντας την ακτίνα στο χείλος προσβολής μειώνουμε την κλίση πίεσης στην πλευρά υποπίεσης, ενώ κάνοντας το χείλος εκφυγής πιο αιχμηρό αυξάνουμε την αεροδυναμική φόρτιση στην περιοχή αυτή της αεροτομής. Οι Selig και McGranahan πρότειναν τέτοιες αεροτομές για μικρές Α/Γ. Δοκίμασαν 6 αεροτομές στην περιοχή Re 100.000-500.000 από τις οποίες οι δυο (SH3055 και FX63-137) είχαν αιχμηρό άκρο εκφυγής και απέδιδαν περίπου $C_l=1.8$. Παρομοίως οι Henriques και Silva ανέπτυξαν με τη βοήθεια του προγράμματος XFOIL αεροτομές υψηλής άνωσης με αιχμηρό άκρο εκφυγής. Αυτές οι τελευταίες απέδιδαν συντελεστές C_l γύρω στο 2, για ένα εύρος Re από 60.000-1.000.000.

Μια άλλη μέθοδος βελτιστοποίησης της απόδοσης αεροτομών σε χαμηλούς Re είναι η τοποθέτηση μιας ταινίας "σκαλοπατιών" (trip wire devices) ή turbulators κατά μήκος της ακτίνας του πτερυγίου στο χείλος προσβολής, επιδιώκοντας έτσι την

αύξηση της τραχύτητας. Αυτά τα σκαλοπάτια ενισχύουν τις διαταραχές στη ροή διευκολύνοντας έτσι τη μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη με αποτέλεσμα να αποφεύγεται ο σχηματισμός του θύλακα και η ροή να μην αποκολλάται ακόμη και σε υψηλές γωνίες πρόσπτωσης. Ασφαλώς με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η οπισθέλκουσα δύναμη αφού αυξάνεται το πάχος του οριακού στρώματος. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις η διάταξη αυτή είναι συμφέρουσα, εφόσον η αύξηση της οπισθέλκουσας δύναμης δεν είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα είχαμε αν αναπτυσσόταν το φαινόμενο του θύλακα αποκόλλησης.

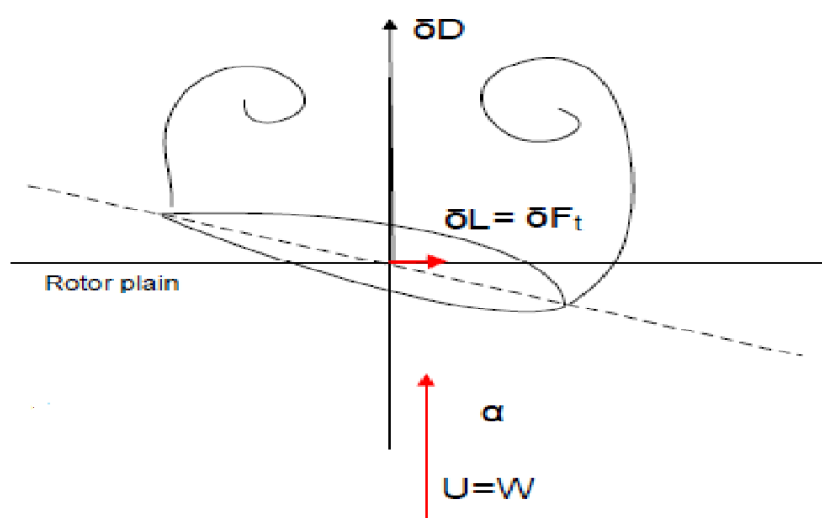
Τέλος, σχετικά με τη τραχύτητα της επιφάνειας μπορούμε να πούμε ότι σε ροές μικρών αριθμών Re η επίδραση της στην αεροδυναμική συμπεριφορά του πτερυγίου δεν είναι τόσο σημαντική όσο σε υψηλών Re ροές. Και αυτό γιατί το πάχος του οριακού στρώματος είναι αντιστρόφως ανάλογο του αριθμού Re , που σημαίνει ότι σε μικρούς Re , το οριακό στρώμα είναι παχύτερο από ότι σε υψηλούς Re . Άρα, η επίδραση της τραχύτητας μιας επιφάνειας στην κατανομή των ταχυτήτων του οριακού στρώματος θα είναι πιο αισθητή στην δεύτερη περίπτωση (των υψηλών Re) παρόλο που θα έχει την ίδια τιμή και στις δυο περιπτώσεις.

3.3.2 Εκκίνηση

Κατά την εκκίνηση το ζητούμενο είναι η αεροδυναμική ροπή που παράγεται στα πτερύγια να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιταχύνει την αδράνεια του ίδιου του δρομέα, της γεννήτριας και του μηχανισμού μετάδοσης κίνησης (ρουλεμάν, κιβώτιο ταχυτήτων αν υπάρχει, μηχανισμός περιστροφής του άξονα του δρομέα κ.τ.λ.) και να υπερνικήσει τη στατική τριβή στα κινούμενα αυτά τμήματα καθώς και τη ροπή ευθυγράμμισης της γεννήτριας που δημιουργεί αντίθετης φοράς ροπή. Μόλις ο δρομέας καταφέρει να μπει σε κίνηση η παραγόμενη ενέργεια γίνεται κινητική ενέργεια αυτών των τμημάτων της μηχανής, αλλά και ενέργεια που καταναλώνεται στις μηχανικές τριβές.

Κατά το σχεδιασμό του πτερυγίου μιας Α/Γ, βασικό κριτήριο για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας του πτερυγίου είναι η μεγιστοποίηση της ισχύος που παίρνουμε από τον άνεμο. Ωστόσο, η αποκλειστικότητα αυτού του κριτηρίου μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές ταχύτητες ανέμου για την εκκίνηση της μηχανής (starting speed), πράγμα ανεπιθύμητο αφού σημαίνει ότι η μηχανή θα παράγει ισχύ μόνο για υψηλές ταχύτητες ανέμου και δε θα είναι συμφέρουσα η λειτουργία της. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι μικρές Α/Γ, λόγω του μικρού μεγέθους τους, μπορεί να μην είναι σε θέση να παράγουν την απαιτούμενη ροπή για την εκκίνηση για να υπερνικήσουν τη ροπή αντίστασης. Ακόμη, η μεγάλη ροπή αντίστασης μπορεί να

οδηγήσει και σε μεγάλο χρονικό διάστημα βραδείας λειτουργίας κατά την εκκίνηση (idling period). Με άλλα λόγια, η επιτάχυνση του δρομέα μέχρι τις στροφές για τις οποίες η μηχανή ξεκινάει να παράγει ενέργεια θα είναι μικρή και η μηχανή θα βρίσκεται για μεγάλο χρονικό διάστημα σε κατάσταση αστάθειας και μηδενικής παραγωγής ισχύος. Έτσι, οι παράμετροι που επηρεάζουν την παραγόμενη ροπή στα πτερύγια όπως είναι το προφίλ του στοιχείου πτερύγωσης, οι ακτινικές κατανομές χορδής και γωνίας συστροφής, η ακτίνα και το πλήθος των πτερυγίων και η επιλογή της βέλτιστης ταχύτητας ακροπτερυγίου, επικαθορίζονται από τον προσδιορισμό της ταχύτητας ανέμου για την οποία ο δρομέας ξεκινάει να παράγει έργο.



Σχήμα 3.6: Τρίγωνο ταχυτήτων κατά την εκκίνηση.

Στο **Σχήμα 3.6** φαίνεται το τρίγωνο ταχυτήτων για μια τυχαία αεροτομή για ταχύτητες ανέμου μικρότερες και ίσες της ταχύτητας εκκίνησης. Δεδομένου ότι ο δρομέας δεν περιστρέφεται, η περιφερειακή ταχύτητα είναι μηδέν και η γωνία πρόσπτωσης αρκετά μεγάλη ώστε ο η δύναμη άνωσης δL να είναι πολύ μικρή και η δύναμη αντίστασης δD να είναι μεγάλη. Το αποτέλεσμα είναι η παραγόμενη ροπή στο στατικό πτερύγιο να μην είναι αρκετά μεγάλη για να το επιταχύνει. Στις μηχανές που έχουν μηχανισμό ελέγχου βήματος, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται αλλάζοντας τη γωνία βήματος των πτερυγίων και άρα τη γωνία πρόσπτωσης της ταχύτητας έτσι ώστε να αυξηθεί η άνωση σε βάρος της οπισθέλκουσας και να επιταχυνθεί το πτερύγιο. Στις μικρές Α/Γ όμως, λόγω του χαμηλού κόστους τους ο μηχανισμός αυτός δεν υπάρχει. Άρα το ζήτημα της χαμηλής ροπής εκκίνησης είναι καθοριστικής σημασίας για το σχεδιαστή της μικρής Α/Γ. Πόσο μάλλον όταν στις

τοποθεσίες εγκατάστασης αυτών των μηχανών η ένταση του ανέμου είναι συνήθως μικρή και άρα επικρατούν χαμηλοί αριθμοί Reynolds και επομένως μικρότερες τιμές των συντελεστών άνωσης.

Επίσης, η παραγόμενη ροπή κατά την εκκίνηση έχει εξάρτηση 3ου βαθμού από την ακτίνα ($\sim R^3$), ενώ γνωρίζουμε ότι η ροπή αντίστασης μεταβάλλεται λιγότερο απότομα συναρτήσει της ακτίνας R . Συγκεκριμένα μεταβάλλεται αναλογικά με την ονομαστική ροπή. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι μικρές Α/Γ, λόγω του μικρού μεγέθους τους, μπορεί να μην είναι σε θέση να παράγουν την απαιτούμενη ροπή για την εκκίνηση για να υπερνικήσουν τη ροπή αντίστασης. Ακόμη, η μεγάλη ροπή αντίστασης μπορεί να οδηγήσει και σε μεγάλο χρονικό διάστημα βραδείας λειτουργίας κατά την εκκίνηση (idling period). Με άλλα λόγια, η επιτάχυνση του δρομέα μέχρι τις στροφές για τις οποίες η μηχανή ξεκινάει να παράγει ενέργεια θα είναι μικρή και η μηχανή θα βρίσκεται για μεγάλο χρονικό διάστημα σε κατάσταση αστάθειας και μηδενικής παραγωγής ισχύος. Έτσι, πολλές φορές στις πολύ μικρές Α/Γ τοποθετούνται περισσότερα από 3 πτερύγια ώστε να διευκολυνθεί η εκκίνηση. Το πρόβλημα αυτό είναι σαφώς περιορισμένο στις μεγάλες Α/Γ.

3.3.3 Σύστημα προσανατολισμού δρομέα (γaw) και ελέγχου ισχύος ($furling$)

Όπως περιγράφηκε και προηγουμένως, ο προσανατολισμός του δρομέα ως προς την κατεύθυνση του ανέμου και ο έλεγχος της ταχύτητας ισχύος της γεννήτριας που επιβάλλεται για λόγους αντοχής σε κάθε Α/Γ, γίνεται με διαφορετικό τρόπο στις μικρές μηχανές σε σχέση με τις μεγαλύτερες.

3.3.3.1 Σύστημα προσανατολισμού δρομέα (γaw)

Δεδομένου ότι στα σημεία που τοποθετούνται οι πολύ μικρές Α/Γ η ροή του αέρα είναι ασταθής για αρκετό χρονικό διάστημα, επιβάλλεται να εξετάσουμε τη δυναμική συμπεριφορά του μηχανικού συστήματος προσανατολισμού (γaw). Κατά την αλλαγή της διεύθυνσης του πνέοντος ανέμου, ασκείται μια δύναμη στο φτερό της ουράς του γaw . Αυτή η δύναμη σε συνδυασμό με τη δύναμη που ασκείται στο δρομέα στη διεύθυνση του ανέμου, δημιουργούν ροπή ως προς το κατακόρυφο άξονα περιστροφής της νασέλας, η οποία καταφέρνει να στρίψει το δρομέα ούτως ώστε να επιτευχθεί μια νέα θέση ισορροπίας. Στην καινούρια αυτή θέση ισορροπίας, βέβαια, μικρές αποκλίσεις του δρομέα από την ταχύτητα του ανέμου θα υπάρχουν λόγω των ριπών ανέμου ή της τυρβώδους ροής που μπορεί να έχουμε. Επίσης, τέτοιες αποκλίσεις (σφάλματα γaw) προκύπτουν κατά την κίνηση του μηχανισμού γaw . Επομένως, η γωνία θ μεταξύ του άξονα του δρομέα και της

διεύθυνσης ανέμου δεν γίνεται ποτέ ακριβώς μηδέν, αλλά υπάρχει κάποια απόκλιση. Ωστόσο, οι τιμές της γωνίας θ είναι αρκετά μεγάλες για να μειώσουν την παραγόμενη ισχύ της γεννήτριας σημαντικά. Και αυτό γιατί η ισχύς μειώνεται προσεγγιστικά κατά τον παράγοντα $\cos^2\theta$. Είναι λοιπόν σημαντικό η λειτουργία του γ_{aw} να επιτρέπει την ελαχιστοποίηση της γωνίας θ .

Επίσης, προβλήματα προκύπτουν από το γεγονός ότι η συμπεριφορά του γ_{aw} στις πολύ μικρές A/G δεν περιλαμβάνει ενεργητικό έλεγχο της γωνιακής ταχύτητας της ουράς, όπως γίνεται στις μεγάλες. Για παράδειγμα, η κίνηση εκτροπής του δρομέα από τη θέση που βρίσκεται σε συνδυασμό με την περιστροφική κίνηση που εκτελεί, δημιουργεί σημαντικά περιοδικά γυροσκοπικά φορτία τόσο στη βάση των πτερυγίων όσο και στο άξονα του δρομέα. Το μέτρο ενός τέτοιου φορτίου δίνεται από τον τύπο $M=k_N J \Omega \omega$, όπου M το φορτίο (ροπή), k_N ένας αριθμητικός συντελεστής που εξαρτάται από το πλήθος των πτερυγίων, J η ροπή αδρανείας των πτερυγίων, Ω γωνιακή συχνότητα του ασκούμενου φορτίου (σε rad/sec) και ω η γωνιακή ταχύτητα του γ_{aw} (σε rad/sec). Παρατηρούμε ότι το μέγεθος του φορτίου αυξάνει με την ταχύτητα του γ_{aw} . Επομένως, για να προστατέψουμε τα πτερύγια από αυτή τη καταπόνηση πρέπει το φτερό της ουράς να σχεδιαστεί έτσι ώστε να εμποδίζει τη γεννήτρια να ακολουθεί τις υψηλές συχνότητες αλλαγής της κατεύθυνσης του ανέμου, αλλά παράλληλα να ακολουθεί τις ήπιες αλλαγές της προκειμένου να μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς.

Παρά την απλότητα του μηχανισμού, η συμπεριφορά και η αποτελεσματικότητα του γ_{aw} εξαρτάται κυρίως από τις δυνάμεις που ασκούνται στο φτερό της ουράς και στα πτερύγια του δρομέα. Ειδικά κατά την εκκίνηση του δρομέα που οι δυνάμεις των πτερυγίων δεν είναι σταθερές, η αεροδυναμική συμπεριφορά του φτερού της ουράς παίζει πρωταρχικό ρόλο. Συνήθως τα φτερά είναι “τύπου-Δ” λόγω της ευκολίας στην κατασκευή και των καλών αεροδυναμικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζει. Το βασικότερο από αυτά είναι οι υψηλές γωνίες αποκόλλησης που επιτρέπουν την ανάπτυξη υψηλών δυνάμεων στο φτερό, ακόμα και όταν η γωνία γ_{aw} μπορεί να φτάσει τις 40° , με αποτέλεσμα την γρήγορη απόκριση του συστήματος. Σίγουρο πάντως είναι ότι χρειάζεται προσεκτική ανάλυση της αεροδυναμικής των φτερών “τύπου-Δ” και της λειτουργίας τους σε υψηλές γωνίες πρόσπτωσης. Προσοχή επίσης χρειάζεται από το σχεδιαστή της ουράς και του φτερού, όσον αφορά την δυναμική απόκριση του ταλαντευόμενου συστήματος καθώς αυτό κινείται από μια θέση σε μια άλλη. Ειδικά κατά την εκκίνηση, όπου ο δρομέας είναι αρχικά ακίνητος και άρα η σταθεροποίηση του γ_{aw} από τα πτερύγια αμελητέα, η απόκριση του συστήματος ουρά-φτερό είναι καθοριστικής σημασίας. Πόσο μάλλον όταν η εκκίνηση συνδυάζεται με χαμηλές ταχύτητες ανέμου, δηλαδή συνήθως πιο έντονες αλλαγές στην κατεύθυνση του ανέμου.

Όταν όμως η μηχανή παράγει ισχύ, η λειτουργία του yaw εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την “σταθεροποιητική” τάση των πτερυγίων και άρα η επίδραση της ουράς στην απόκριση του yaw δεν είναι τόσο μεγάλη. Η σταθεροποιητική αυτή τάση του δρομέα προέρχεται από τη συμβολή της δύναμης της ώσης και της ροπής που δημιουργεί αυτή στο δρομέα κατά τη διάρκεια του yaw. Η ροπή αυτή τείνει κατά κάποιο τρόπο να λειτουργεί ως απόσβεση στη δυναμική συμπεριφορά του φτερού της ουράς, με αποτέλεσμα να σταθεροποιεί κάπως την απόκρισή του. Η απόσβεση ενισχύεται στη περίπτωση που τα πτερύγια του δρομέα είναι “λυγισμένα” προς την κατεύθυνση του ανέμου. Βέβαια η αποσβεστική ικανότητα του συστήματος μπορεί να μειωθεί όταν έχουμε μεγάλες ταχύτητες του yaw στη νέα θέση ισορροπίας.

Παρά τις δυσκολίες σχεδιασμού και αυστηρού ελέγχου της συμπεριφοράς του, το σύστημα αυτό της ουράς με το φτερό μειώνει σημαντικά το κόστος της μηχανής και κάνει ευκολότερη τη συντήρησή της.

3.3.3.2 Σύστημα ελέγχου ισχύος (*furling*)

Ένα βασικό πρόβλημα που δημιουργείται λόγω του μηχανισμού *furling* είναι το γεγονός ότι η απόκρισή του επηρεάζει και τη συμπεριφορά του yaw. Συγκεκριμένα σε καταστάσεις όπου η επικρατούν ριπές ανέμου έντασης κοντά στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου, η ουρά μπορεί να διπλώνει και να ξεδιπλώνει διαρκώς. Το αποτέλεσμα είναι λόγω αυτής της ασταθούς κατάστασης να έχουμε μεγάλες ταχύτητες του άξονα yaw, πράγμα ανεπιθύμητο για την ασφάλεια και την ευστάθεια της μηχανής.

Επίσης, ο σχεδιασμός του συστήματος *furling* ώστε να λειτουργεί με ένα συγκεκριμένο τρόπο είναι δύσκολο να γίνει με βάσει θεωρητικούς υπολογισμούς κι αυτό γιατί το *furling* πρέπει να λειτουργεί σωστά σε δυο διαφορετικές καταστάσεις. Η μια περίπτωση είναι όταν η μηχανή παράγει την ονομαστική ισχύ και η ταχύτητα ανέμου αυξάνει οπότε ο συντελεστής ώσης είναι μονάδα. Η άλλη περίπτωση είναι αυτή που η μηχανή για κάποιο λόγο έχει χάσει το φορτίο της και η ταχύτητα ανέμου είναι τόσο μεγάλη που τα πτερύγια καταπονούνται κοντά στο όριο θραύσης τους οπότε και ο συντελεστής ώσης είναι αρκετά μεγαλύτερος. Τελικώς, η καταλληλότερη μέθοδος για το σχεδιασμό του συστήματος είναι αυτή των δοκιμών-σφαλμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των καμπυλών απόδοσης μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας παρουσιάζονται και σχολιάζονται στο τέλος, ενώ ακόμη συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των João P. Monteiro, Miguel R. Silvestre, Hugh Piggott, Jorge C. André [17].

4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Ο υπολογισμός της καμπύλης C_p -λ για την υπό εξέταση ανεμογεννήτρια γίνεται με τη χρήση κάποιων προγραμμάτων προσομοίωσης και αεροδυναμικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα στην παρούσα εργασία η διαδικασία που ακολουθήθηκε έχει ως εξής:

- 3-διάστατη σάρωση (3-DScanning) του ενός από τα τρία πτερύγια της Α/Γ με τεχνολογία δομημένου φωτός.
- Απεικόνιση και επεξεργασία της γεωμετρίας των πτερυγίων στα προγράμματα Netfabb και Solidworks.
- Δημιουργία τομών κατά μήκος της ακτίνας των πτερυγίων και αποθήκευση των προκυπτουσών αεροτομών με τη μορφή σημείων συντεταγμένων x,y .
- Εισαγωγή των αρχείων συντεταγμένων των αεροτομών στο πρόγραμμα XFOIL, μέσω του οποίου έγινε η προσομοίωση της ροής του ανέμου για τις επιθυμητές συνθήκες ροής και υπολογίσθηκαν τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά για κάθε αεροτομή κάθε πτερυγίου (διαγράμματα C_l - α , C_d - α , C_m - α).
- Με τα παραπάνω διαγράμματα και τη γεωμετρία των πτερυγίων ως δεδομένα έγινε χρήση του υπολογιστικού κώδικα RAFT για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος και του συντελεστή ισχύος C_p σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή σε ορισμένη ταχύτητα ανέμου U και γωνιακή ταχύτητα περιστροφής Ω που σημαίνει σε ορισμένη τιμή του λ . Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας προέκυψε η καμπύλη C_p - λ .

Η αλλαγή των συνθηκών λειτουργίας έγινε με δυο τρόπους:

- 1) κρατώντας σταθερή γωνιακή ταχύτητα περιστροφής Ω για κάθε καμπύλη και μεταβάλλοντας την ταχύτητα U του ανέμου από σημείο σε σημείο της καμπύλης.
- 2) διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα του ανέμου U για κάθε καμπύλη και αλλάζοντας την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής Ω για κάθε σημείο της καμπύλης.

Έτσι, προέκυψαν δυο διαγράμματα (ένα για κάθε τρόπο) καθένα από τα οποία αναπαριστά 4 καμπύλες C_p -λ.

Ο συνδυασμός των U και Ω που χρησιμοποιήθηκε στις δυο περιπτώσεις φαίνεται στους Πίνακες 4.1 (α) και Πίνακα 4.1 (β) αντίστοιχα.

	U (m/sec)												
1 ^η καμπύλη $\Omega = 600$ RPM	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			
2 ^η καμπύλη $\Omega = 700$ RPM	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
3 ^η καμπύλη $\Omega = 800$ RPM	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
4 ^η καμπύλη $\Omega = 900$ RPM	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

(α)

	Ω (RPM)												
1 ^η καμπύλη $U = 4$ m/s	225	255	287	300	320	350	370	400	500	575			
2 ^η καμπύλη $U = 7$ m/s	400	445	470	500	535	600	640	700	800	900	1000	1100	
3 ^η καμπύλη $U = 10$ m/s	500	600	700	732	800	844	900	1000	1100	1270			
4 ^η καμπύλη $U = 13$ m/s	621	745	828	931	993	1076	1160	1242	1450	1656			

(β)

Πίνακας 4.1: Συνθήκες λειτουργίας που χρησιμοποιήθηκαν κατά (α) τον πρώτο τρόπο, και (β) το δεύτερο τρόπο υπολογισμού της απόδοσης της Α/Γ.

Οι τιμές των U και Ω επιλέχθηκαν σε κάθε μια περίπτωση έτσι ώστε το εύρος των παραγόντων λ να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να περιλαμβάνει το διάστημα 4 έως 8, καθώς σε αυτές τις τιμές λ λειτουργεί η συγκεκριμένη Α/Γ.

Στη συνέχεια γίνεται μια πιο εκτενής περιγραφή της διαδικασίας και των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν.

4.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

4.2.1 Σάρωση πτερυγίων

Η σάρωση των πτερυγίων πραγματοποιήθηκε στο "Εργαστήριο Κατεργασιών του Ε.Μ.Π." με το σύστημα δομημένου φωτός IScanM300 της Imetric (**Σχήμα 4.1**).



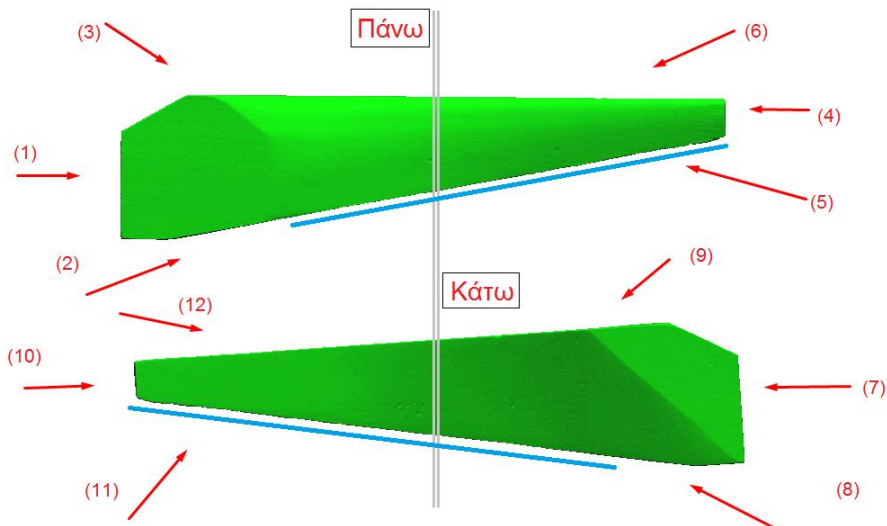
Σχήμα 4.1: Σύστημα προτζέκτορα-καμερών του 3D Scanner.

Η διάταξη αποτελείται από μια κυκλική βάση πάνω στην οποία τοποθετείται το πτερύγιο και ένα σύστημα προτζέκτορα-καμερών που βλέπει προς τη βάση. Ο προτζέκτορας ρίχνει το δομημένο φως πάνω στο αντικείμενο που πρόκειται να σαρωθεί και οι κάμερες δέχονται την αντανάκλαση του φωτός παραμορφωμένη αφού βρίσκονται σε διαφορετική οπτική γωνία σε σχέση με τον προτζέκτορα. Έτσι, επεξεργάζοντας το σήμα των καμερών μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του 3-διάστατου αντικειμένου.

Επειδή το πτερύγιο ήταν σχετικά μεγάλο για τη συγκεκριμένη διάταξη, το πάνω και το κάτω μέρος χωρίστηκαν στα δύο. Έγιναν τέσσερα σκετ τριών λήψεων, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.2** και στο τέλος του σκαναρίσματος είχαμε 4 πλέγματα (mesh) που αναπαριστούσαν στην ουσία τις 4 σαρωμένες επιφάνειες. Όλα αυτά στο λογισμικό της Imetric.

Το post-processing, δηλαδή η επεξεργασία των 4 επιφανειών μετά τη σάρωση ώστε να καταλήξουμε σε ένα ενιαίο πτερύγιο, έγινε μέσω του λογισμικού Rapidform ΧΟR3 και τα βασικά του βήματα ήταν τα εξής:

- ενώθηκαν τα 4 mesh
- καλύφθηκαν κάποια κενά (σαν τρύπες) που παρουσιάστηκαν εκεί που στο **Σχήμα 4.2** είναι υπογραμμισμένα με μπλε. Το σκάνερ δεν αποτύπωσε τόσο καλά τα συγκεκριμένα σημεία λόγω της γεωμετρίας του αντικειμένου (πολύ μεγάλη γωνία). Γι αυτόν το λόγο το 3D μοντέλο διαφέρει κάπως από το πραγματικό σε αυτό τα σημεία.
- τέλος διορθώθηκαν κάποιες μικρο-ατέλειες και έγινε και μια ελαφρά επανατριγωνοποίηση του συνολικού mesh.



Σχήμα 4.2: Πάνω και κάτω όψη των σαρωμένων πτερυγίων.

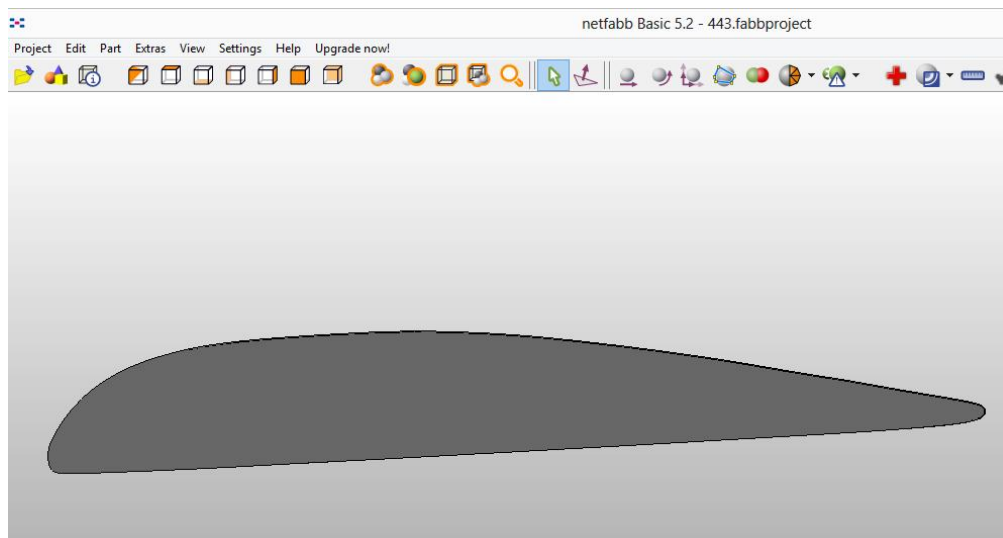
Τελικά, καταλήξαμε σε ένα αρχείο πλέγματος με τη μορφή .STL αρχείου (Standard-Tesselation-Languagefile), το οποίο εισάγαμε στο πρόγραμμα Netfabb για την αναπαράσταση της γεωμετρίας ολόκληρου του πτερυγίου.

4.2.2 Απεικόνιση και επεξεργασία γεωμετρίας

NETFABB

Το Netfabb είναι ένα πρόγραμμα για την επεξεργασία αρχείων πλέγματος, νέφους σημείων και άλλων αρχείων που σχετίζονται με την αναπαράσταση της γεωμετρίας ενός αντικειμένου. Συνήθως χρησιμοποιείται σε διαδικασίες 3-Dprinting καθώς διευκολύνει την επικοινωνία μηχανών (printers) και υπολογιστών (σχέδια CAD).

Εδώ χρησιμοποιήθηκε για την απόσπαση τομών από την επιφάνεια του πτερυγίου. Πιο συγκεκριμένα, αφού εισάγαμε το αρχείο .STL και εξακριβώσαμε ότι η προκύπτουσα γεωμετρία προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική γεωμετρία του πτερυγίου, κάναμε 8 τομές σε διάφορες ακτινικές θέσεις. Η πρώτη ακτινική θέση είναι λίγο μετά την ακτίνα που ξεκινάει το αεροδυναμικό κομμάτι του πτερυγίου, ενώ τελευταία θέση είναι αυτή της ακτίνας στο tip. Οι ενδιάμεσες θέσεις κατανεμήθηκαν έτσι ώστε να έχουμε περισσότερες τομές εκεί που η γεωμετρία του πτερυγίου μεταβάλλεται έντονα. Μια τέτοια τομή στην ακτινική θέση $r=443\text{mm}$ φαίνεται στο **Σχήμα 4.3**. Στο Παράρτημα Α στα **Σχήματα 1** έως **8** παρουσιάζονται όλες οι τομές του πτερυγίου. Οι προκύπτουσες αεροτομές οδηγήθηκαν στη συνέχεια στο πρόγραμμα Solidworks πάλι με τη μορφή αρχείων πλέγματος .STL.



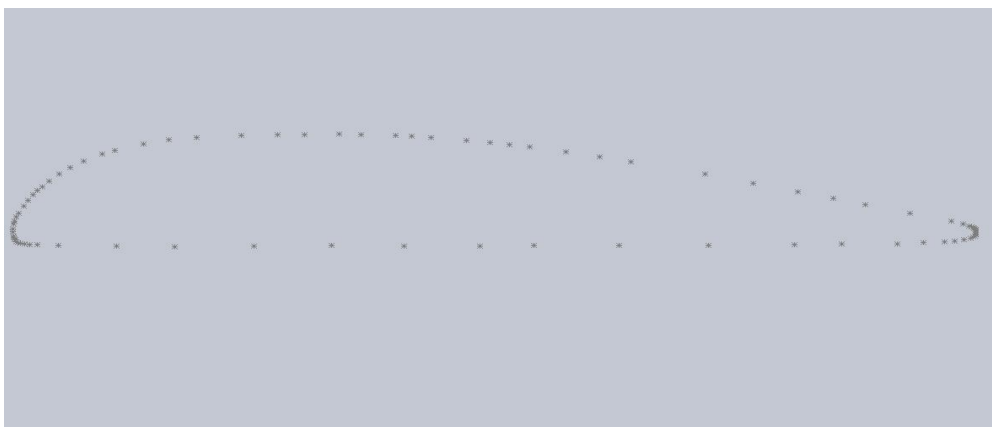
Σχήμα 4.3: Τομή του πτερυγίου σε ακτίνα 443mm στο πρόγραμμα NETFABB.

SOLIDWORKS

Το πρόγραμμα Solidworks είναι ένα πακέτο τύπου CAD (Computer Aided Design) της εταιρείας Dassault Systèmes Solid Works Corp, θυγατρική της Dassault Systèmes, S.A. και χρησιμοποιείται κυρίως για το σχεδιασμό μηχανολογικών εξαρτημάτων. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα το χρησιμοποιούν πάνω από 1,3 εκατομμύρια μηχανικοί και σχεδιαστές στον κόσμο και περισσότερες από 130.000 εταιρίες παγκοσμίως. Η ευρεία χρήση του οφείλεται στην πληθώρα δυνατοτήτων που παρέχει στο σχεδιαστή μηχανολογικών εξαρτημάτων.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση των αεροτομών και την προσέγγιση των καμπυλών τους με σημεία καρτεσιανών συντεταγμένων, οι οποίες στη συνέχεια θα εισαχθούν στο πρόγραμμα XFOIL για να γίνει η αεροδυναμική μελέτη κάθε αεροτομής. Για κάθε τομή λοιπόν που εισάγεται στο Solidworks με τη μορφή πλέγματος .STL αρχείου, τοποθετούμε στο περίγραμμά της ένα πλήθος σημείων (περίπου 100) πυκνώνοντας τα σημεία κοντά στις περιοχές του leading edge (LE) και του trailing edge (TE). Έπειτα σχεδιάζουμε τη χορδή της – αποτελούμενης από σημεία πλέον- αεροτομής και ορίζουμε ένα νέο σύστημα συντεταγμένων με αρχή των αξόνων το LE. Ακολούθως, οι νέες συντεταγμένες των σημείων αποθηκεύονται σε ένα αρχείο .xlsx του προγράμματος MICROSOFT EXCEL, όπου εκεί γίνεται η κανονικοποίηση τους, δηλαδή η διαίρεση των x και y συντεταγμένων με το μήκος της χορδής και τοποθετούνται με την κατάλληλη σειρά την οποία απαιτεί το XFOIL για τα αρχεία εισόδου του. Τέλος, τα αρχεία .xlsx αποθηκεύονται με τη μορφή .dat και είναι έτοιμα για χρήση στο XFOIL.

Στο **Σχήμα 4.4** παρουσιάζεται η καμπύλη της αεροτομής στην ακτινική θέση $r=443\text{mm}$ αποτελούμενη από σημεία όπως αυτά προέκυψαν μετά την κανονικοποίηση.



Σχήμα 4.4: Αεροτομή στη θέση $r=443\text{mm}$ στο πρόγραμμα SOLIDWORKS.

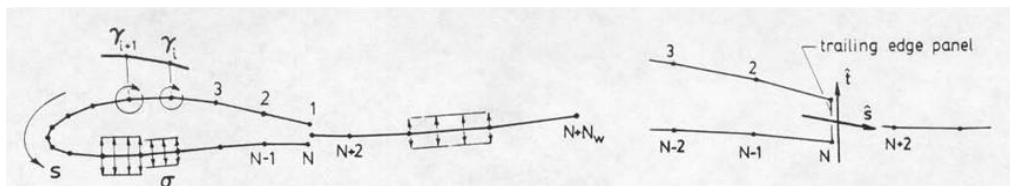
4.2.3 Αεροδυναμική μελέτη αεροτομών

XFOIL

Το XFOIL σχεδιάστηκε από τον Mark Drela στο Τεχνολογικό Ίδρυμα Μασαχουσέτης των ΗΠΑ (Massachusetts Institute of Technology - MIT). Είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και επιτρέπει τόσο το σχεδιασμό αεροτομών όσο και την επίλυση υποηχητικών ροών γύρω από αεροτομές.

4.2.3.1 Περιγραφή αριθμητικής μεθόδου του XFOIL

Οι διάφοροι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για την ανάλυση ή/και το σχεδιασμό αεροτομών διακρίνονται με βάση δυο διαφορετικές προσεγγίσεις: η μια προσέγγιση είναι αυτή της επίλυσης των αδιάστατων εξισώσεων Navier-Stokes και η άλλη αυτή της μεθόδου συνεκτικής-μη συνεκτικής αλληλεπίδρασης. Δεδομένου ότι επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes απαιτεί μεγάλες υπολογιστικές δυνατότητες χωρίς να εξασφαλίζει σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια από τη μέθοδο συνεκτικής-μη συνεκτικής αλληλεπίδρασης, κώδικες που χρησιμοποιούν την τελευταία μέθοδο είναι αυτοί που έχουν καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια [20]. Τέτοιοι κώδικες είναι ο GBK των Garabedian, Bauer, Korn [21], ο GRUNFOIL των Melnik, R.E., Chow, R. R., και Mead, H. R. και ο κώδικας ISES [22] των Drela και Gilest. Ο τελευταίος είναι αυτός, κάπως τροποποιημένος προκειμένου να μειωθούν οι υπολογιστικές απαιτήσεις του, πάνω στον οποίο αναπτύχθηκε το XFOIL, καθώς είναι ο μόνος που μπορεί να προβλέπει ικανοποιητικά το σχηματισμό φυσαλίδων αποκόλλησης στη ροή και άρα είναι κατάλληλος για πεδία ροής χαμηλών αριθμών Reynolds ($Re < 500.000$) [22].



Σχήμα 4.5: Διακριτοποίηση του πλέγματος και μοντελοποίηση του δισδιάστατου πεδίου ροής με κατανομές πηγών και δινών.

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθεί ο κώδικας για την επίλυση της ροής. Η βασική ιδέα περιλαμβάνει αρχικά την επίλυση της μη συνεκτικής ροής και στη συνέχεια αξιοποίηση των αποτελεσμάτων αυτής για την επίλυση της συνεκτικής ροής. Έπειτα, η λύση της συνεκτικής ροής συνδυαζόμενη με τις συνθήκες

ισοδυναμίας μας δίνει ένα νέο πεδίο ταχυτήτων για την ισοδύναμη αυτή τη φορά μη συνεκτική ροή. Αναλυτικότερα:

Μη συνεκτική ροή

Για την επίλυση της μη συνεκτικής ροής ενός δισδιάστατου πεδίου (Σχήμα 4.5) ο κώδικας αυτός χρησιμοποιεί τη μέθοδο συνοριακών στοιχείων μιας γραμμικής κατανομής δινών. Η ροϊκή συνάρτηση του πεδίου ροής προσδιορίζεται από την υπέρθεση μιας ελεύθερης ροής, μιας κατανομής δινών και πηγών πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής και μια κατανομή πηγών στον ομόρρο. Σε κάθε πάνελ της επιφάνειας αεροτομής η στροβιλότητα κατανέμεται γραμμικά, ενώ σε κάθε πάνελ της επιφάνειας της αεροτομής και του ομόρρου η ένταση της πηγής είναι σταθερή. Για τη μη συνεκτική ροή οι εντάσεις των πηγών στον ομόρρο θεωρούνται ίσες με μηδέν, λόγω της ισχύος της εξίσωσης Kutta στην ακμή εκφυγής. Ακόμη, τοποθετείται ένα πάνελ στο κενό του trailing edge για το οποίο η τιμή τόσο της έντασης της πηγής όσο και αυτή της δίνης είναι συγκεκριμένη και καθοριζόμενη από τη γεωμετρία της επιφάνειας στο σημείο αυτό. Η εξίσωση της ροϊκής συνάρτησης αναπτυσσόμενη σε όλα τα N πάνελ της επιφάνειας μαζί με τη συνθήκη Kutta για τη συσχέτιση των εντάσεων των δινών στο πρώτο και το τελευταίο πάνελ, μας δίνει ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων $(N+1) \cdot (N+1)$. Αυτό επιλύεται με τη μέθοδο απαλοιφής κατά Gauss υπολογίζοντας έτσι τις τιμές της ροϊκής συνάρτησης και επομένως της ταχύτητας σε ολόκληρο το μη συνεκτικό πεδίο ροής.

Συνεκτική ροή

Για το συνεκτικό πεδίο ροής χρησιμοποιείται ένα σχήμα αποτελούμενο από τις ολοκληρωματικές εξισώσεις του οριακού στρώματος ορμής και ενέργειας. Στις εξισώσεις αυτές προστίθεται μια εξίσωση για τον προσδιορισμό των τάσεων Reynolds του τυρβώδους οριακού στρώματος. Αυτή η διαφορική εξίσωση υπολογίζει το συντελεστή διατμητικών τάσεων λόγω τύρβης προσομοιώνοντας την υστέρηση που αυτός παρουσιάζει στην απόκρισή του κατά την αλλαγή των εξωτερικών συνθηκών. Επίσης, στο τμήμα της στρωτής ροής, η προηγούμενη εξίσωση αντικαθίσταται από μια εξίσωση για τον υπολογισμό του σημείου μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με βάση το κριτήριο e^n . Η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι η μετάβαση σε τύρβη συμβαίνει όταν το πιο ασταθές Tollmien-Schlichting κύμα στο οριακό στρώμα αυξάνει κατά ένα συντελεστή (N_{crit}) που συνήθως λαμβάνεται ίσος με 9. Ο παράγοντας αυτός εκφράζει τα επίπεδα τύρβης που επικρατούν στη ροή. Για το “κλείσιμο” του συστήματος εξισώσεων χρησιμοποιούνται μοντέλα τύρβης βασισμένα σε εμπειρικούς κανόνες που αναφέρονται στο [22].

Στο τμήμα του ομόρρου θεωρείται η ύπαρξη δυο οριακών στρωμάτων, ένα στην πάνω και ένα στην κάτω πλευρά. Επιλύονται και πάλι οι ολοκληρωματικές εξισώσεις του οριακού στρώματος με την παραδοχή ότι δεν έχουμε διατμητικές τάσεις λόγω στερεού ορίου.

Ισοδύναμη μη συνεκτική ροή

Οι σχέσεις (38) και (39) αποτελούν τις εξισώσεις συνέχειας της συνεκτικής και της μη συνεκτικής ροής αντίστοιχα.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{συνεκτική ροή}) \quad (38)$$

$$\frac{\partial u_e}{\partial x} + \frac{\partial v_e}{\partial y} = 0 \quad (\text{ισοδύναμη μη συνεκτική ροή}) \quad (39)$$

Προκειμένου η μη συνεκτική ροή να είναι ισοδύναμη με τη συνεκτική, οι εξισώσεις αυτές αφαιρούνται κατά μέλη και η προκύπτουσα σχέση μετά από πράξεις (σχέση (40)) εξασφαλίζει ότι οι παροχές μάζας θα είναι ίδιες και στις δυο περιπτώσεις ροών.

$$v_e = \frac{d(u_e \delta^*)}{dx} \quad (40)$$

Εφαρμόζουμε την ίδια διαδικασία για τις εξισώσεις ορμής και ενέργειας των δυο ροών και υπολογίζουμε εν τέλει και την ταχύτητα u_e της ισοδύναμης μη συνεκτικής ροής, αφού οι τιμές των θ και δ^* είναι γνωστές από την επίλυση της συνεκτικής ροής.

Η αξιοπιστία του XFOIL για ροές γύρω από αεροτομές μεγάλων A/Γ είναι διαπιστευμένη. Όταν όμως πρόκειται για αεροτομές μικρών A/Γ , λόγω του χαμηλού αριθμού Reynolds, οι απαιτήσεις της μεθόδου αυξάνουν. Κι αυτό γιατί, όχι μόνο πρέπει να περιληφθούν τα πολύπλοκα φυσικά φαινόμενα που ακολουθούν το φαινόμενο του θύλακα αποκόλλησης, αλλά επίσης, ο αλγόριθμος πρέπει να μπορεί να χειρίζεται την πολύ ισχυρή και μη γραμμική σύνδεση μεταξύ της συνεκτικότητας, της μετάβασης και των μη-συνεκτικών σχηματισμών/αναπτυγμάτων που συντρέχουν κατά το φαινόμενο του θύλακα αποκόλλησης.

Έτσι, χρειάστηκε να ελεγχθεί η αξιοπιστία του προγράμματος για την ιδιαίτερη αυτή περίπτωση που είναι και αυτή που μας ενδιαφέρει στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

4.2.3.2 Έλεγχος αξιοπιστίας XFOIL σε μικρούς αριθμούς Reynolds

Για να εξακριβωθεί η αξιοπιστία του προγράμματος XFOIL επιχειρήθηκε η σύγκριση των αποτελεσμάτων του με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Τα τελευταία προέκυψαν από μετρήσεις που ελήφθησαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας “Πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς ταινιών αποκόλλησης και στροβιλογεννητριών” (Δημήτρης Τουλούπης, Οκτώβριος 2014, [16]) για κάποιο συγκεκριμένο περύγιο. Στη συνέχεια, επιλύθηκε μέσω του XFOIL η ροή γύρω από την αεροτομή αυτού του ίδιου περυγίου και έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Παρακάτω περιγράφεται λεπτομερέστερα η διαδικασία.

4.2.3.2.1 Πειραματικά αποτελέσματα

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας “Πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς ταινιών αποκόλλησης και στροβιλογεννητριών” (Δημήτρης Τουλούπης, Οκτώβριος 2014, [16]) μελετήθηκαν δυο πτέρυγες, μία με προφίλ NACA 63-418 και μία με προφίλ FFAW3-241. Και στις δύο έγιναν μετρήσεις πιέσεων στην επιφάνεια τους, αλλά και μετρήσεις ολικών πιέσεων στον ομόρρου για να προσδιοριστούν τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά τους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε να συγκριθούν με τα αποτελέσματα του λογισμικού XFOIL μόνο τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν την αεροτομή NACA63-418.

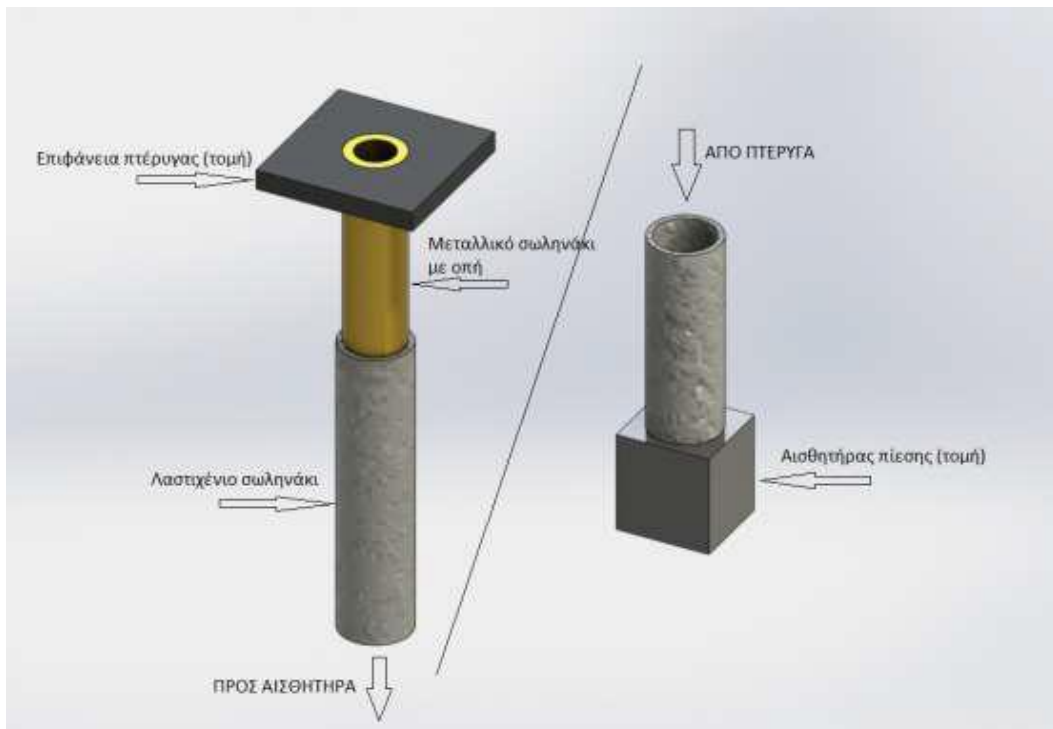
Η πειραματική μελέτη έλαβε μέρος στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου αεροδυναμικής του Ε.Μ.Π.. Η αεροσήραγγα είναι κλειστού τύπου και τα επίπεδα τύρβης της ελεύθερης ροής στο πειραματικό τμήμα, οκταγωνικής διατομής διαστάσεων 1.4x1.8m (ύψος x πλάτος) και μήκους 3.75m, είναι 0.2%. Επίσης όλα τα πειράματα διεξήχθησαν για αριθμούς Reynolds από $Re = 100.000$ μέχρι $Re = 600.000$ και έγιναν μετρήσεις σε γωνίες πρόσπτωσης από -15° μέχρι και 20° για όλες τις περιπτώσεις

Πάνω στην επιφάνεια της πτέρυγας (στην πάνω και στην κάτω πλευρά) υπάρχουν 60 μικρές οπές για τον υπολογισμό της στατικής πίεσης. Οι οπές αυτές (pressure taps) συνδέονται με αισθητήρες πίεσης (pressure transducers, εταιρεία Pressure Systems, μοντέλο ESP-32HD), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.7**, με σωληνάκια διαμέτρου 1mm. Ακόμη, για τον υπολογισμό των δυναμικών πιέσεων στον ομόρρου της πτέρυγας χρησιμοποιείται μια διάταξη (**Σχήμα 4.6**) αποτελούμενη από 44 σωλήνες Pitot τοποθετημένους παράλληλα στην ροή. Οι σωλήνες αυτοί μετρούν την ολική πίεση κατά πλάτος του ομόρρου και υπάρχουν άλλοι 3 σωλήνες στατικής πίεσης τοποθετημένοι σε διαφορετικό επίπεδο. Η διάταξη έχει συνολικά πλάτος 39.1cm και

βρίσκεται σε απόσταση 1.8 φορές το μήκος της χορδής κατάντι της πτέρυγας, ενώ μπορεί να μετακινείται πάνω κάτω.



Σχήμα 4.6: Διάταξη ομόρρου (wake rake)



Σχήμα 4.7: Σωλήνες Pitot και αισθητήρες πίεσης.

Όταν η ροή αναπτυχθεί πλήρως γύρω από την πτέρυγα, μέσα στα σωληνάκια της πτέρυγας επικρατεί η τοπική στατική πίεση, ενώ στα σωληνάκια του ομόρρου η

τοπική ολική πίεση, οι οποίες έτσι φτάνουν μέχρι τους αισθητήρες πίεσης. Έτσι, στους αισθητήρες φτάνουν οι 60 στατικές πιέσεις, οι 44 ολικές πιέσεις του ομόρρου, καθώς επίσης η ολική και στατική πίεση της ελεύθερης ροής μετρούμενες από ένα σωλήνα Pitot, αλλά και τρεις ακόμα στατικές πιέσεις από τον ομόρρου, τις οποίες χρησιμοποιούμε για να βρούμε τη δυναμική πίεση στον ομόρρου κατά τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στο Παράρτημα Β. Όλες οι πιέσεις έπειτα μεταφέρονται παράλληλα στον καταγραφέα των δεδομένων (Data Acquisition, εταιρεία Chell, μοντέλο ScanDAQ 8000, τύπος CSD8000) , με τη μορφή διαφορών της μετρούμενης πίεσης μείον τη στατική πίεση της ελεύθερης ροής.

Ύστερα από την καταγραφή των μετρήσεων, αυτές επεξεργάζονται με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού κώδικα γραμμένου στο λογισμικό MATLAB. Ο κώδικας αυτός δέχεται σαν είσοδό του κάποια αρχεία .txt που περιέχουν τις μετρήσεις των πιέσεων πάνω στην επιφάνεια της πτέρυγας και στον ομόρρου για το εύρος γωνιών πρόσπτωσης -15° μέχρι και 20° με βήμα 1° και για αριθμούς Reynolds από 100.000 μέχρι και 600.000 με βήμα 100.000. Στην έξοδό του επιστρέφει τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της αεροτομής NACA63-418. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζουμε:

- την κατανομή στατικής πίεσης γύρω από την αεροτομή για γωνίες πρόσπτωσης από -10° μέχρι 10° με βήμα 5° και για κάθε τιμή του αριθμού Reynolds (διάγραμμα C_p -x για κάθε α και για κάθε Reynolds).
- τις τιμές του συντελεστή άνωσης της αεροτομής για κάθε γωνία πρόσπτωσης και για κάθε τιμή του αριθμού Reynolds (διάγραμμα C_l - α για κάθε Reynolds)
- τις τιμές του συντελεστή αντίστασης της αεροτομής για κάθε γωνία πρόσπτωσης και για κάθε τιμή του αριθμού Reynolds (διάγραμμα C_d - α για κάθε Reynolds)
- τις τιμές του συντελεστή ροπής της αεροτομής για κάθε γωνία πρόσπτωσης και για κάθε τιμή του αριθμού Reynolds (διάγραμμα C_m - α για κάθε Reynolds)

Στο Παράρτημα Β περιγράφεται λεπτομερέστερα η διαδικασία υπολογισμού των αεροδυναμικών συντελεστών όπως αυτή πραγματοποιείται στον κώδικα MATLAB.

Απομένει ο υπολογισμός των αντίστοιχων με τα παραπάνω διαγραμμάτων, αλλά αυτή τη φορά επιλύοντας την εκάστοτε ροή γύρω από την ίδια αεροτομή μέσω του προγράμματος XFoil, ούτως ώστε να κάνουμε την τελική σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

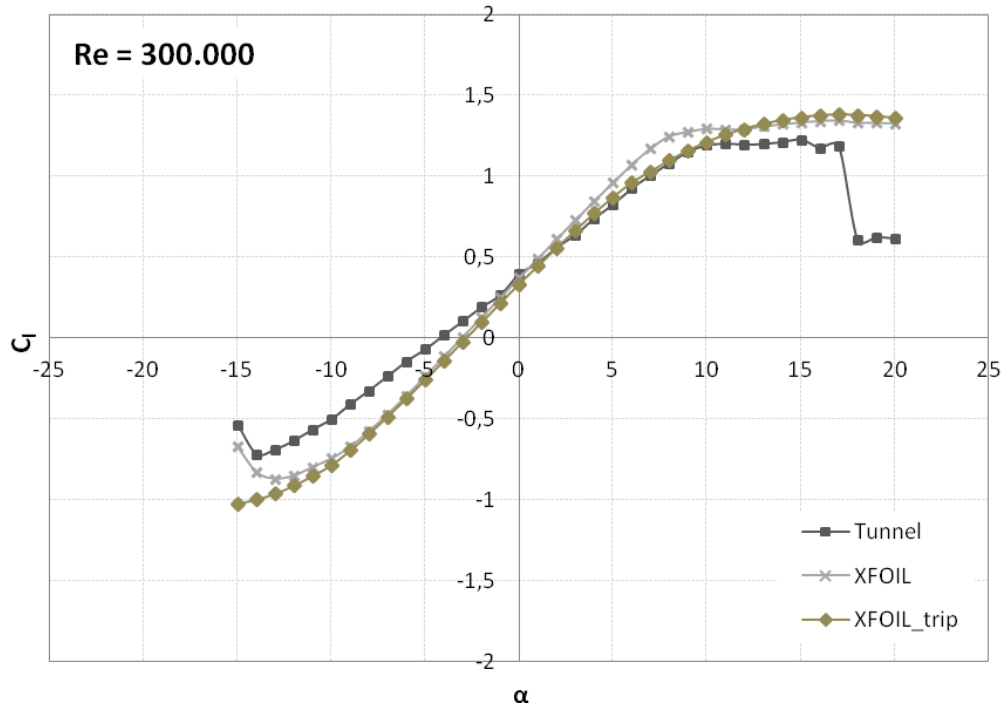
4.2.3.2.2 Αποτελέσματα XFOIL και σύγκριση με τα πειραματικά

Με δεδομένη τη γεωμετρία της αεροτομής NACA63-418 στην είσοδο του προγράμματος και με παραμέτρους την τιμή του αριθμού Reynolds, την τιμή του αριθμού Mach για κάθε Reynolds και τη γωνία πρόσπτωσης α , επιλύουμε τη ροή γύρω από την αεροτομή και παίρνουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα με αυτά που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

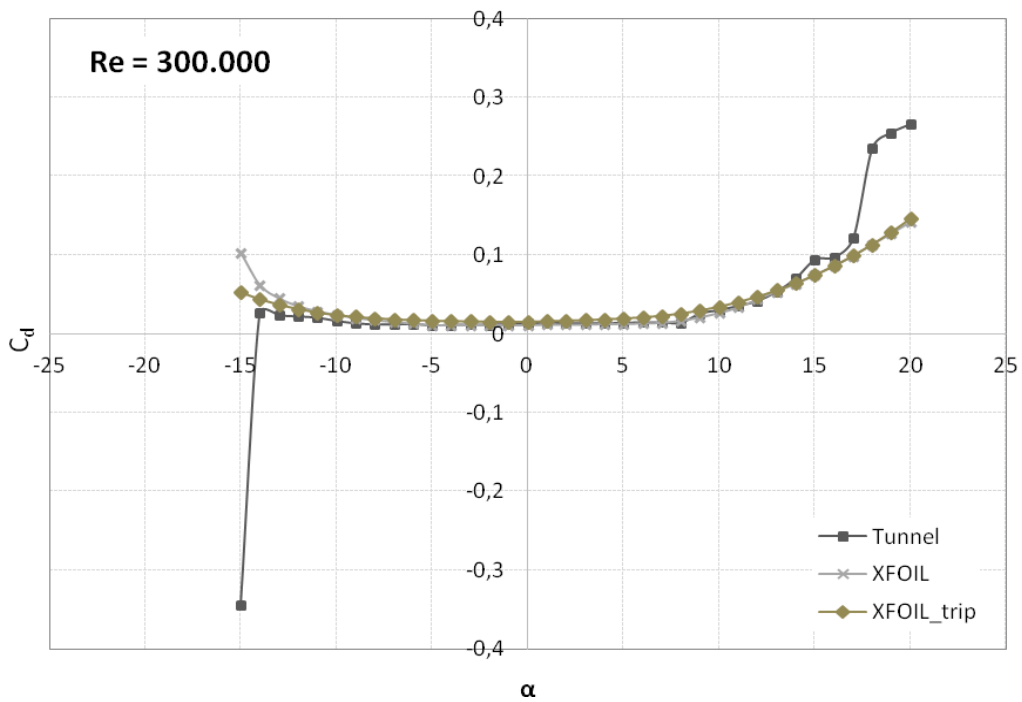
Το XFOIL απαιτεί από τον ίδιο το χρήστη να καθορίσει αν η μετάβαση της ροής σε τυρβώδη θα γίνει σε σημείο που επιλέγει ο χρήστης ή αν το σημείο θα καθοριστεί από τον ίδιο τον κώδικα. Στην πρώτη περίπτωση, ο χρήστης καλείται να δώσει τιμές στις παραμέτρους Toptrip και Bottomtrip που αντιστοιχούν στα σημεία μετάβασης στην πάνω και κάτω πλευρά αντίστοιχα. Στη δεύτερη περίπτωση ο χρήστης απλώς καθορίζει την τιμή του παράγοντα ενίσχυσης Ncrit. Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε επιλέχθηκαν τα

Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε αρχικά δοκιμάσαμε ελεύθερη μετάβαση, κάνοντας μια παραμετρική ανάλυση ως προς τον παράγοντα Ncrit, προκειμένου να βρούμε αυτή την τιμή που προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα. Παρατηρήσαμε όμως ότι η απόκλιση των προκυπτουσών αποτελεσμάτων και συγκεκριμένα της καμπύλης C_l - α από τα πειραματικά δεδομένα ήταν αρκετά μεγάλη ιδίως στις μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης (περίπου για $\alpha > 6^\circ$) για όλες τις δοκιμασμένες τιμές του Ncrit. Έτσι, δεδομένου ότι η πρόλεξη του κώδικα για το σημείο μετάβασης σε τυρβώδη ροή σε μικρούς αριθμούς Reynolds δεν είναι αξιόπιστη και προκειμένου παράλληλα να έχουμε και μια όσο το δυνατό πιο πιστή προσέγγιση της πραγματικής ροής τόσο για θετικές όσο και για αρνητικές γωνίες, δοκιμάσαμε να καθορίσουμε εμείς τα σημεία μετάβασης σε τύρβη. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται boundary layer tripping και στην ουσία είναι η μετατόπιση του σημείου μετάβασης πιο μπροστά στην αεροτομή, ώστε να αυξάνει ο συντελεστής αντίστασης C_d και να μειώνεται ο συντελεστής άνωσης C_l και τα αποτελέσματα να είναι πιο συντηρητικά σε σχέση με αυτά της ελεύθερης πρόλεξης (free tripping).

Συγκεκριμένα, για τις αρνητικές γωνίες πρόσπτωσης επιβάλλαμε η μετάβαση να γίνεται στην πάνω πλευρά της αεροτομής στο 20% της χορδής και στην κάτω πλευρά στο 1%. Αντίθετα για τις θετικές γωνίες επιλέξαμε το σημείο μετάβασης της πάνω πλευράς να είναι στο 1% και της κάτω στο 20%. Το αποτέλεσμα, όπως φαίνεται και στα **Σχήματα 4.8** και **4.9**, είναι τόσο η καμπύλη C_l - α όσο και η C_d - α που προκύπτουν από το XFOIL βρίσκονται σημαντικά πιο κοντά στην πειραματική καμπύλη και μάλιστα για μεγαλύτερο εύρος γωνιών.



Σχήμα 4.8: Καμπύλες C_l - α με *trip*, χωρίς *trip* και πειραματική για $Re=300.000$.



Σχήμα 4.9: Καμπύλες C_d - α με *trip*, χωρίς *trip* και πειραματική.

Στο Παράρτημα Γ στα **Σχήματα 1** έως **4** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που φαίνονται στα **Σχήματα 4.8 και 4.9**, αλλά για αριθμούς Reynolds 100.000 και 200.000 αντίστοιχα.

4.2.3.3 Αξιοποίηση του XFOIL για τις αεροτομές του πτερυγίου

Αφού ελέγξαμε και εξασφαλίσαμε την αξιοπιστία του XFOIL (δηλαδή του υπολογιστικού πακέτου XFOIL) για τους μικρούς αριθμούς Reynolds που μας ενδιαφέρουν στην παρούσα εργασία, ήρθε η ώρα να υπολογίσουμε τις αεροδυναμικές επιδόσεις των αεροτομών που εξάγαμε από το SOLIDWORKS.

4.2.3.3.1 Διακριτοποίηση της γεωμετρίας των αεροτομών

Τα αρχεία .dat που εξάγαμε από το SOLIDWORKS για κάθε μια αεροτομή με τις συντεταγμένες του προφίλ τους εισάγονται στο XFOIL όπου αρχικά γίνεται κάνουμε τη διακριτοποίηση του πλέγματος του στερεού ορίου της αεροτομής. Συγκεκριμένα, για κάθε αεροτομή, αυξάνουμε την πυκνότητα των πάνελ στις περιοχές LE και TE και έπειτα ρυθμίζουμε το TE Gap να μην είναι ούτε πολύ μικρό αλλά ούτε και πολύ μεγάλο για να διευκολύνεται η επίλυση της ροής. Επίσης, επαναδιακριτοποιούμε το πλέγμα ώστε κάθε αεροτομή να αποτελείται συνολικά από 160 πάνελ, αρκετά ώστε να εξασφαλίζεται μια ικανοποιητική σύγκλιση και ακρίβεια του κώδικα.

4.2.3.3.2 Καθορισμός παραμέτρων XFOIL

Εκ πρώτης όψεως, το πρόβλημα υπολογισμού των διαγραμμάτων C_l -α, C_d -α και C_m -α για μια αεροτομή στο XFOIL μοιάζει να είναι πρόβλημα πολλών παραμέτρων (αριθμός Reynolds, αριθμός Mach, Ncrit, Toptrip, Bottomtrip). Ωστόσο, μετά από όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2.3.2.2 γίνεται αντιληπτό ότι για δεδομένη τη γεωμετρία της αεροτομής και την τιμή του αριθμού Reynolds οι είσοδοι που απαιτεί ο κώδικας έχουν οριστεί μονοσήμαντα.

Αρχικά, θεωρούμε σταθερές συνθήκες πυκνότητας και θερμοκρασίας του αέρα ίσες με $\rho=1.205 \text{ kg/m}^3$ και $T=20^\circ\text{C}$. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ικανοποιητική αφού τα μεγέθη αυτά δε μεταβάλλονται σημαντικά με αλλαγή του αριθμού Reynolds. Επομένως, αν γνωρίζουμε τον αριθμό Reynolds της ροής μπορούμε να προσδιορίσουμε τον αριθμό Mach. Οι παράμετροι Toptrip και Bottomtrip, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2.3.2.2, παίρνουν τιμές 20% και 1% για αρνητικές γωνίες αντίστοιχα και αντίστροφα για θετικές γωνίες.

Προέχει λοιπόν ο υπολογισμός των αριθμών Reynolds της ροής μπροστά από κάθε αεροτομή και για όλες τις συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή για κάθε συνδυασμό της ταχύτητας ανέμου U που βλέπει η Α/Γ και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της Ω . Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε ένα αρχείο Excel στο οποίο με δεδομένες τις U και Ω και τους συντελεστές αξονικής και περιφερειακής επαγωγής a και a' (οι οποίοι μάλιστα λόγω του μεγέθους της συγκεκριμένης μηχανής θεωρήθηκαν ίσοι με μηδέν), υπολογίζεται αρχικά στις ακτινικές θέσεις των αεροτομών η σχετική ταχύτητα W που βλέπει η εκάστοτε αεροτομή με βάση τη σχέση (33) και στη συνέχεια ο αριθμός Reynolds ως προς τη χορδή c της αεροτομής από τη γνωστή σχέση $Re = \frac{Wc}{\nu}$, όπου ν η κινηματική συνεκτικότητα του αέρα. Έχουμε έτσι την κατανομή του Reynolds κατά μήκος της ακτίνας του πτερυγίου και μπορούμε τώρα να προχωρήσουμε στον υπολογισμό των αεροδυναμικών επιδόσεων των αεροτομών για τις συνθήκες λειτουργίας των **Πινάκων 4.1(α)** και **4.1(β)**

Για τον 1^ο τρόπο υπολογισμού των καμπυλών C_p -λ όπου δηλαδή για κάθε καμπύλη η ταχύτητα περιστροφής Ω είναι σταθερή, παρατηρούμε ότι ο αριθμός Reynolds δε διαφοροποιείται πολύ για τις τιμές της U που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 (α). Αυτό είναι λογικό αφού ο αριθμός Reynolds μεταβάλλεται πιο έντονα με την μεταβολή της Ω παρά με τη μεταβολή της U . Επίσης, παρατηρήσαμε ότι όσο μικρότερες τιμές έπαιρνε η μέση τιμή κατά μήκος της ακτίνας των αριθμών Reynolds, τόσο μικρότερο ήταν το εύρος της κατανομής, δηλαδή η διαφοροποίηση του Reynolds από ακτίνα σε ακτίνα. Επιπλέον, οι τιμές της Ω του **Πίνακα 4.1 (α)** δεν είναι αρκετά μεγάλες ώστε η μέση τιμή κατά μήκος της ακτίνας των αριθμών Reynolds να είναι μεγάλη. Βάσει των παραπάνω οδηγηθήκαμε στις εξής παραδοχές:

1. ότι από σημείο σε σημείο λειτουργίας για κάθε καμπύλη ο αριθμός Reynolds που βλέπουν τα πτερύγια δε μεταβάλλεται, αφού δε μεταβάλλεται η ταχύτητα Ω .
2. ότι όλες οι αεροτομές “βλέπουν” τον ίδιο αριθμό Reynolds. Αυτός μάλιστα λήφθηκε ίσος με τη μέση τιμή των Reynolds που “βλέπουν” οι αεροτομές που βρίσκονται σε ακτίνα του 70% της συνολικής ακτίνας R και πάνω, αφού σε αυτό το τμήμα του πτερυγίου παράγεται το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος.

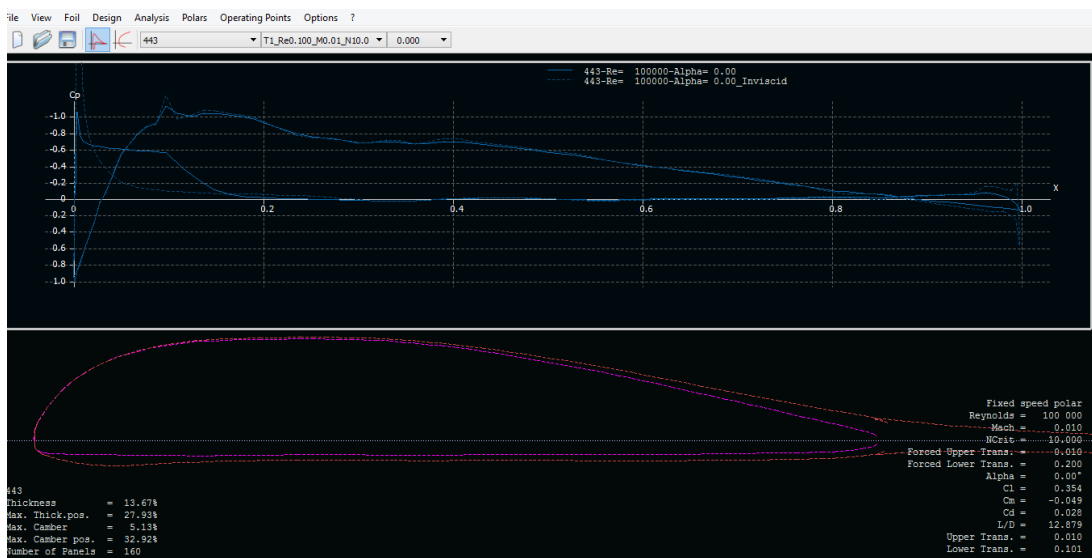
Πρέπει να σημειωθεί ότι ο 1ος τρόπος υπολογισμού σκόπευε να αποτελέσει μια πρώτη προσέγγιση των καμπυλών απόδοσης της μηχανής, αρκετά χονδρική. Κατά αυτή την έννοια, η προσέγγιση που πραγματοποιείται είναι αρκετά απλοϊκή και τα αποτελέσματα στερούνται ακρίβειας.

Κατά το 2^ο τρόπο υπολογισμού όπου η τιμή του Ω μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο, το εύρος των τιμών της είναι μεγαλύτερο από αυτό του 1ου τρόπου

(προκειμένου να πετύχουμε τιμές για το λ από 4 έως 8). Η σημαντική αυτή διαφοροποίηση του Reynolds κατά μήκος τη ακτίνας αλλά και από σημείο σε σημείο της κάθε καμπύλης μας οδήγησε να πραγματοποιήσουμε τις αναλύσεις της ροής στο XFOIL σε ένα μεγάλο εύρος τιμών του Reynolds. Έτσι, για κάθε σημείο λειτουργίας η ροή γύρω από κάθε αεροτομή επιλύθηκε για τον αριθμό Reynolds που μας υποδεικνύει το αρχείο Excel με τις ακτινικές κατανομές του Reynolds. Για την ακρίβεια, για οικονομία χρόνου, η τιμή του Reynolds για την οποία “τρέχαμε” την κάθε αεροτομή στο XFOIL κινούνταν σε ένα εύρος 5000 με 10000 από την τιμή του αρχείου Excel, διαφορά η οποία δεν επηρέαζε σημαντικά τα αποτελέσματα.

4.2.3.3.3 Αποτελέσματα

Αφού καθορίσαμε και τις παραμέτρους και τις μεταβλητές του προβλήματος (Reynolds, Mach, Ncrit, Tortrip, Bottomtrip) ξεκινάμε την επίλυση της ροής. Για κάθε αεροτομή τρέχουμε αναλύσεις για τον εκάστοτε αριθμό Reynolds με τη γωνία να μεταβάλλεται από -10° μέχρι 15° με βήμα 0.2° . Το βήμα επιλέχθηκε τόσο μικρό ώστε να εξασφαλίζεται η σύγκλιση του κώδικα σε γωνίες $\alpha > 6^\circ$, καθώς όπως παρατηρήθηκε και στην ενότητα 4.2.3.2.2 η σύγκλιση γίνεται πιο δύσκολη σε μεγάλες γωνίες. Στο **Σχήμα 4.11** βλέπουμε την οπτικοποίηση του οριακού στρώματος της ροής καθώς και το διάγραμμα C_p -x της συνεκτικής και της μη συνεκτικής ροής για την αεροτομή σε ακτίνα $r=443\text{mm}$ σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης ($\alpha=0^\circ$), όπως αυτά παρουσιάζονται στο γραφικό περιβάλλον του XFOIL.



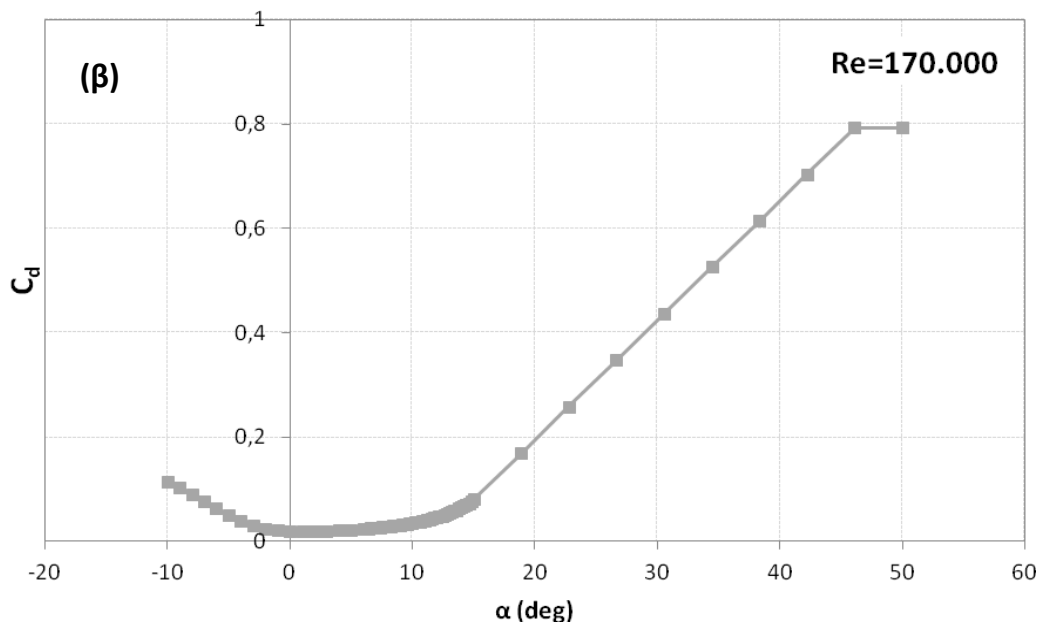
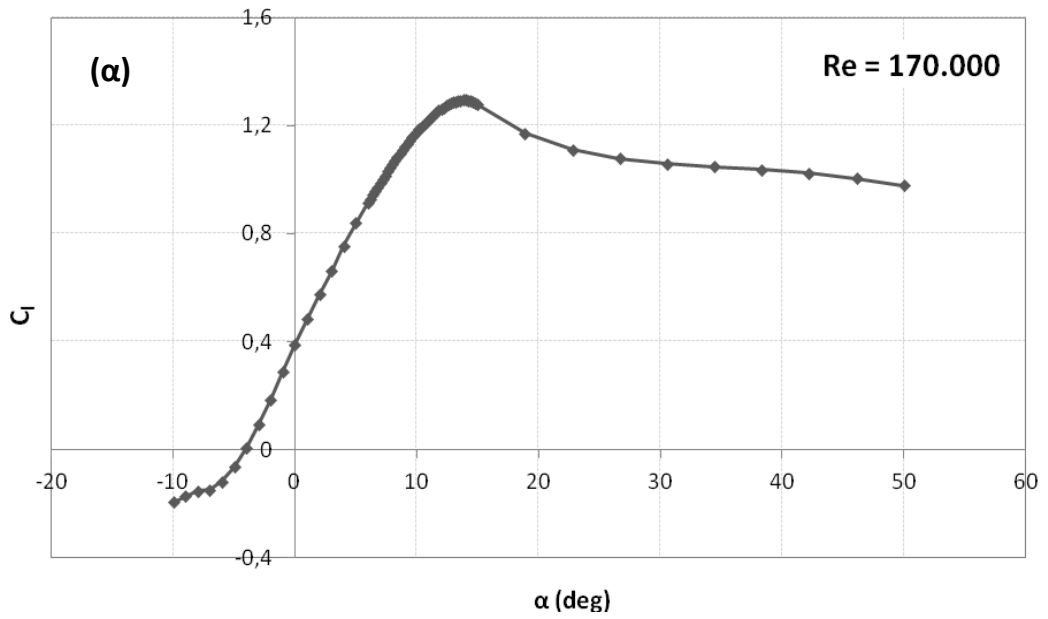
Σχήμα 4.11: Προσομοίωση ροής γύρω από την αεροτομή στη θέση $r=443\text{mm}$ για $\alpha=0^\circ$ και $Re=100.000$.

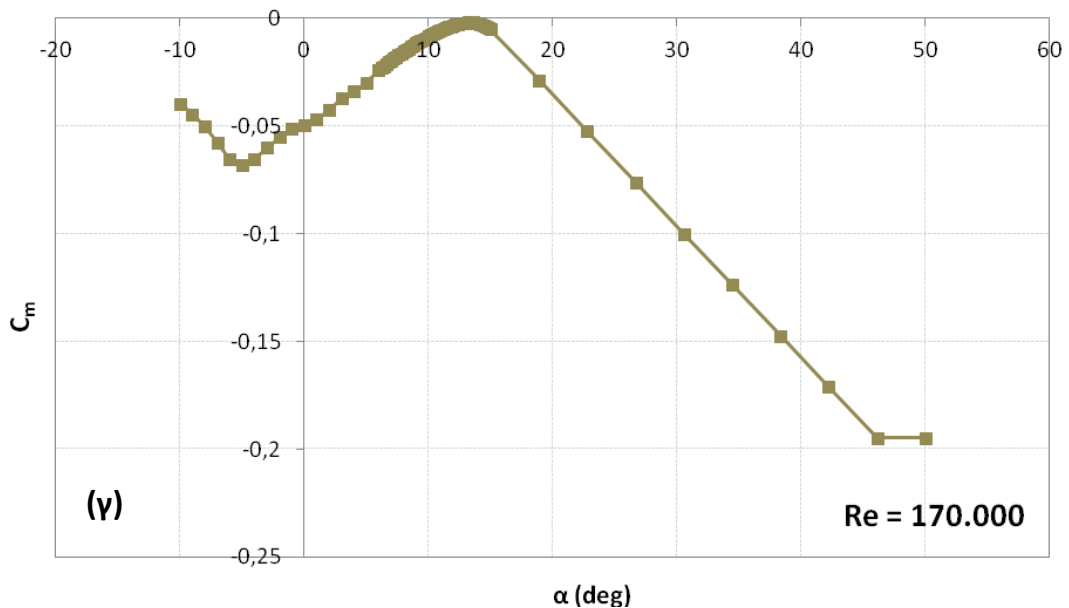
4.2.3.3.4 Επαναπροσδιορισμός του tripping

Παρατηρείται βέβαια στα αποτελέσματα η εμφάνιση ενός “σκαλοπατιού” στα διαγράμματα C_i -α, C_d -α και C_m -α σε μια περιοχή γωνιών γύρω από τις 0° . Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της απότομης αλλαγής των σημείων μετάβασης σε τύρβη στις δυο πλευρές από τις 0° στη 1° με αποτέλεσμα να αλλάζει απότομα και η αεροδυναμική συμπεριφορά της αεροτομής και η κλίση των καμπυλών των διαγραμμάτων στις 0° . Για να αποφύγουμε αυτό το “σκαλοπάτι” αρχικά κρατάμε μόνο τα αποτελέσματα των ακέραιων τιμών γωνιών που είναι μικρότερες από 6° και όλων των υπολοίπων γωνιών από 6° έως 15° . Με τον τρόπο αυτό, αυξάνοντας δηλαδή το βήμα των γωνιών -κατά την εμφάνιση και όχι κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων- η αλλαγή της κλίσης στις καμπύλες στη γωνία 0° γίνεται λιγότερο έντονη. Έπειτα, για μια περιοχή κοντά στις 0° (από -2° έως 2° περίπου) ξανά επιλύουμε τη ροή μεταβάλλοντας το tripping ομαλά από γωνία σε γωνία με σκοπό τα σημεία μετάβασης σε τυρβώδη ροή να μεταβάλλονται σταδιακά σε αυτή την περιοχή και να εξομαλύνεται έτσι πάλι η κλίση των καμπυλών και άρα να αποφεύγεται η εμφάνιση σκαλοπατιού στην περιοχή αυτή.

4.2.3.3.5 Προεκβολή καμπυλών σε μεγάλες γωνίες

Τα δεδομένα που προκύπτουν μετά από αυτή την επεξεργασία δεν είναι ακόμη έτοιμα να εισαχθούν στον κώδικα RAFT για τον υπολογισμό της απόδοσης ολόκληρου του πτερυγίου. Οι γωνίες της ταχύτητας ανέμου που βλέπουν ορισμένες αεροτομές σε κάποιες συνθήκες λειτουργίας μπορεί να ξεπερνάνε τις 40° . Οι αναλύσεις του XFOIL όμως φτάνουν σε γωνίες μέχρι 15° . Χρειάζεται επομένως να προεκταθούν οι καμπύλες των διαγραμμάτων C_i -α, C_d -α και C_m -α σε γωνίες μεγαλύτερες των 15° . Αυτό γίνεται με ένα κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, ο οποίος δέχεται ως είσοδο τις καμπύλες C_i -α και C_d -α που προέκυψαν μετά την επεξεργασία των καμπυλών του XFOIL και ακόμη δυο καμπύλες που προσεγγίζουν την απόδοση μιας οποιασδήποτε τυπικής αεροτομής σε γωνίες μεγαλύτερες των 50° και μικρότερες των -60° . Ο κώδικας αυτός παρεμβάλλει με $srlines$ δυο καμπύλες στην περιοχή γωνιών 15° έως 50° και -10° έως -60° (περιοχή αδιάφορη για την παρούσα εργασία αφού οι μικρότερες γωνίες που βλέπει το πτερύγιο φτάνουν περίπου στις -5°) αφήνοντας στο χρήστη την ευχέρεια να ρυθμίσει την κλίση της παρεμβαλλόμενης καμπύλης στην αρχή και το τέλος της.





Σχήμα 4.12 (α), (β), (γ): Διαγράμματα αεροδυναμικών συντελεστών της αεροτομής σε ακτίνα $r=443\text{mm}$ για $Reynolds=170.000$.

Τελικώς, έχουμε για κάθε αεροτομή σε κάθε αριθμό Reynolds που μας ενδιαφέρει ένα αρχείο με τις τιμές των αεροδυναμικών συντελεστών C_l, C_d, C_m για τιμές γωνιών από -10° έως 50° . Τα αρχεία αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως είσοδο στον κώδικα RAFT. Στο **Σχήμα 4.12(α), (β) και (γ)** παρουσιάζονται τα διαγράμματα των 3 αεροδυναμικών συντελεστών, όπως προέκυψαν από την προαναφερθείσα διαδικασία για την αεροτομή σε ακτίνα 443mm σε ροή αριθμού $Reynolds=170.000$.

4.2.4 Υπολογισμός απόδοσης δρομέα

RAFT

RAFT είναι ένας κώδικας μεθόδου συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method), που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Αεροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. [Βουτσινάς Σ.Γ., κ.ά., 1996]. Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς δρομέα Α/Γ και προτιμάται καθώς παρέχει ιδιαίτερα ικανοποιητικές προβλέψεις φορτίων με πολύ χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της παραγόμενης ισχύος και των φορτίων του τρίπτερου δρομέα που εξετάζουμε.

Η λειτουργία του κώδικα συνίσταται στην επαναληπτική επίλυση των εξισώσεων (30)-(34) για κάθε ένα από τα N στοιχεία περύγωσης στα οποία χωρίζεται το περύγιο έχοντας ως δεδομένη τη γεωμετρία του περυγίου. Πιο συγκεκριμένα τα βήματα έχουν ως εξής:

- 1) Επιλογή τιμών εκκίνησης για τους συντελεστές a και a' .
- 2) Υπολογισμός της γωνίας ϕ από τη σχέση (32) με γνωστές τις ταχύτητες U και Ω .
- 3) Υπολογισμός της γωνίας πρόσπτωσης α από τη σχέση (33) με γνωστές τις γωνίες ϕ , β και θ .
- 4) Από τα αποτελέσματα του XFOIL και τη μετέπειτα επεξεργασία τους με δεδομένη τη γωνία α υπολογίζουμε τους συντελεστές C_l , C_d .
- 5) Από τις σχέσεις (30)-(31) υπολογίζουμε νέες τιμές για τους συντελεστές a και a' .
- 6) Επαναλαμβάνουμε μέχρι να συγκλίνει η διαδικασία.

Παρακάτω αναφέρονται τα αρχεία που ο κώδικας παίρνει σαν εισόδους και αυτά που εξάγει σαν αποτελέσματα.

-aero.in.inp

Από το αρχείο αυτό ο κώδικας διαβάζει πληροφορίες που αφορούν τις συνθήκες της ροής του ανέμου (ταχύτητα, πυκνότητα, ταχύτητα του ήχου), πληροφορίες για το δρομέα (ταχύτητα περιστροφής, πλήθος περυγίων, γωνία βήματος του περυγίου, ακτίνα ομφαλού, ακτίνα ακροπερυγίου, ακτίνα αεροδυναμικού τμήματος, πλήθος στοιχείων περύγωσης) καθώς και αρχικές τιμές για τους συντελεστές αξονικής και περιφερειακής επαγωγής a και a' .

Με εξαίρεση τις τιμές της ταχύτητας ανέμου και της ταχύτητας περιστροφής, οι υπόλοιπες τιμές είναι σταθερές για όλα τα σημεία των καμπυλών C_p -λ και είναι αυτές που φαίνονται στο **Σχήμα 4.13**.


```

-- AERO input file for RWT5 blade
10      ! VELHUB
1.225   ! AIRDEN
340.0   ! SSPEED

      3   ! NBLADE
83.73   ! OMEGA (rad/s)
0.0000  ! Collective Pitch
0.1     ! RROOT
0.14    ! RAERO
0.597   ! RTIP
40      ! NSTRIP
1       ! ITIPLOS |
0       ! IHUBLOS
0       ! a
0       ! a'

1 "geomb.inp" "profilb.inp"
2 "geomb.inp" "profilb.inp"
3 "geomb.inp" "profilb.inp"

```

Σχήμα 4.13: Αρχείο *aero.inp*

-geomb.inp

Περιγράφει τη βασική γεωμετρία του πτερυγίου της Α/Γ, δηλαδή τη κατανομή συστροφής και χορδής κατά μήκος της ακτίνας. Το αρχείο αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14.

```

-- Input geometry for 5MW Reference wind turbine
9      ! NSPANB
r      chord  twist  xaer  zaer
0.106  0.139  9.632  0     0
0.142  0.132  14.196  0     0
0.208  0.12   13.263  0     0
0.265  0.105  10.931  0     0
0.318  0.093  8.69    0     0
0.37   0.082  6.18    0     0
0.443  0.072  3.989   0     0
0.516  0.057  2.588   0     0
0.597  0.041  0        0     0

```

Σχήμα 4.14: Αρχείο *geomb.inp*

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο λόγος που η γωνία βήματος στο αρχείο *aero.inp* τέθηκε μηδέν, είναι το γεγονός ότι αυτή συμπεριλήφθηκε στη γωνία συστροφής που μετρήσαμε στο πτερόνιο για κάθε αεροτομή.

-airfoilfilename_xx

Σε αυτό περιλαμβάνονται οι πίνακες με τις τιμές των α , C_l , C_d και C_m για κάθε αεροτομή που αναφέρεται στο αρχείο proflib.inp σχετικού πάχους "xx". Ένα τμήμα ενός τέτοιου αρχείου φαίνεται στο **Σχήμα 4.15** για την αεροτομή στην ακτινική θέση $r=443\text{mm}$ για $Re=170.000$. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στις τιμές του α , ενώ οι υπόλοιπες τρεις στους συντελεστές C_l , C_d και C_m αντίστοιχα οι οποίες επαναλαμβάνονται στις τρεις τελευταίες για λόγους που απαιτεί η αλγοριθμική υλοποίηση του κώδικα.

α	C_l	C_d	C_m	C_l	C_d	C_m
0	0.8					
71	!	NANGB				
-10	-0.1944	0.11521	-0.0397	-0.1944	0.11521	-0.0397
-9	-0.1726	0.10294	-0.0446	-0.1726	0.10294	-0.0446
-8	-0.1542	0.09047	-0.0503	-0.1542	0.09047	-0.0503
-7	-0.148	0.0776	-0.0575	-0.148	0.0776	-0.0575
-6	-0.1187	0.06368	-0.0654	-0.1187	0.06368	-0.0654
-5	-0.0638	0.05059	-0.0679	-0.0638	0.05059	-0.0679
-4	0.0078	0.03944	-0.0652	0.0078	0.03944	-0.0652
-3	0.0913	0.03069	-0.06	0.0913	0.03069	-0.06
-2	0.1863	0.02441	-0.055	0.1863	0.02441	-0.055
-1	0.2875	0.02089	-0.0514	0.2875	0.02089	-0.0514
0	0.3899	0.02058	-0.0495	0.3899	0.02058	-0.0495
1	0.4861	0.02024	-0.0469	0.4861	0.02024	-0.0469
2	0.5741	0.02004	-0.0422	0.5741	0.02004	-0.0422
3	0.6619	0.02048	-0.0371	0.6619	0.02048	-0.0371
4	0.7537	0.02155	-0.0339	0.7537	0.02155	-0.0339
5	0.8393	0.02281	-0.0298	0.8393	0.02281	-0.0298
6	0.9132	0.02427	-0.0241	0.9132	0.02427	-0.0241
6.2	0.9279	0.02462	-0.0231	0.9279	0.02462	-0.0231
6.4	0.9428	0.02499	-0.0221	0.9428	0.02499	-0.0221
6.6	0.9577	0.02538	-0.0212	0.9577	0.02538	-0.0212
6.8	0.9725	0.02579	-0.0203	0.9725	0.02579	-0.0203
7	0.9872	0.02622	-0.0195	0.9872	0.02622	-0.0195
7.2	1.0016	0.02667	-0.0187	1.0016	0.02667	-0.0187
7.4	1.0159	0.02714	-0.0178	1.0159	0.02714	-0.0178
7.6	1.0298	0.02763	-0.017	1.0298	0.02763	-0.017
7.8	1.0436	0.02814	-0.0162	1.0436	0.02814	-0.0162
8	1.0572	0.02868	-0.0155	1.0572	0.02868	-0.0155
8.2	1.0705	0.02924	-0.0147	1.0705	0.02924	-0.0147
8.4	1.0836	0.02982	-0.0139	1.0836	0.02982	-0.0139
8.6	1.0964	0.03043	-0.0132	1.0964	0.03043	-0.0132
8.8	1.1088	0.03108	-0.0125	1.1088	0.03108	-0.0125
9	1.1209	0.03175	-0.0117	1.1209	0.03175	-0.0117
9.2	1.1327	0.03245	-0.011	1.1327	0.03245	-0.011

Σχήμα 4.15: Αρχείο "foil443_14"

-proflib.inp

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.16**, το αρχείο περιλαμβάνει μια λίστα με τα ονόματα των αεροτομών που αποτελούν το πτερύγιο όπως αυτά ορίζονται από τα αρχεία airfoilfilename_xx καθώς και την ακτινική θέση στην οποία αυτές βρίσκονται.

```

|-- Input geometry for 5MW Reference wind turbine
9      ! NSPANB
      r      profil
0.106  "foil106_28"
0.142  "foil142_22"
0.208  "foil208_15"
0.265  "foil265_14"
0.318  "foil318_14"
0.370  "foil370_13"
0.443  "foil443_14"
0.516  "foil516_14"
0.597  "foil597_14"
    
```

Σχήμα 4.16: Αρχείο *profilb.inp*.

Όσον αφορά την αεροτομή "foil106_28" αυτή βρίσκεται πριν το αεροδυναμικό κομμάτι του πτερυγίου και λίγο μετά την ακτίνα ομφαλού. Τοποθετήθηκε στο αρχείο *profilb.inp* επειδή το RAFT απαιτεί την ύπαρξη μιας αεροτομής στο τμήμα αυτό του πτερυγίου (τμήμα "κυλίνδρου" σε μεγάλα πτερύγια), ενώ οι αεροδυναμικές επιδόσεις της τέθηκαν ίδιες με αυτές της αμέσως επόμενης αεροτομής. Αυτό γιατί η ιδιαίτερη γεωμετρία της, ήταν δύσκολο να οδηγήσει σε σύγκλιση τον κώδικα του XFOIL και δεδομένου ότι οι επιδόσεις των δυο τελευταίων αεροτομών είναι αρκετά χαμηλές, θεωρήθηκε ότι αυτή η προσέγγιση δε θα επηρεάζει σημαντικά τα τελικά αποτελέσματα.

-raft.exe

Είναι το εκτελέσιμο αρχείο, το οποίο αφού εκτελεστεί ανοίγει δυο αρχεία:

-loads.dat, στο οποίο αναγράφεται η παραγόμενη η ταχύτητα ανέμου U , ο παράγοντας λ , παραγόμενη ισχύς P , η παραγόμενη στο δρομέα ώση T , η γωνία βήματος β η οποία για εμάς είναι μηδέν και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ω (**Σχήμα 4.17**).

Κεφάλαιο 4: Προσδιορισμός της Καμπύλης Απόδοσης Υπολογιστικά

5.00000	9.99736	-0.01047	0.02136	0.00000	83.73000
6.00000	8.33113	0.02441	0.02859	0.00000	83.73000
7.00000	7.14097	0.06926	0.03635	0.00000	83.73000
8.00000	6.24835	0.12609	0.04440	0.00000	83.73000
9.00000	5.55409	0.19562	0.05273	0.00000	83.73000
10.00000	4.99868	0.27793	0.06122	0.00000	83.73000
11.00000	4.54426	0.37307	0.06947	0.00000	83.73000
12.00000	4.16557	0.47886	0.07737	0.00000	83.73000
13.00000	3.84514	0.58046	0.08366	0.00000	83.73000
14.00000	3.57049	0.67576	0.08882	0.00000	83.73000
15.00000	3.33245	0.74861	0.09225	0.00000	83.73000
16.00000	3.12418	0.76478	0.09192	0.00000	83.73000
17.00000	2.94040	0.75897	0.09224	0.00000	83.73000

Σχήμα 4.17: Αρχείο loads.dat

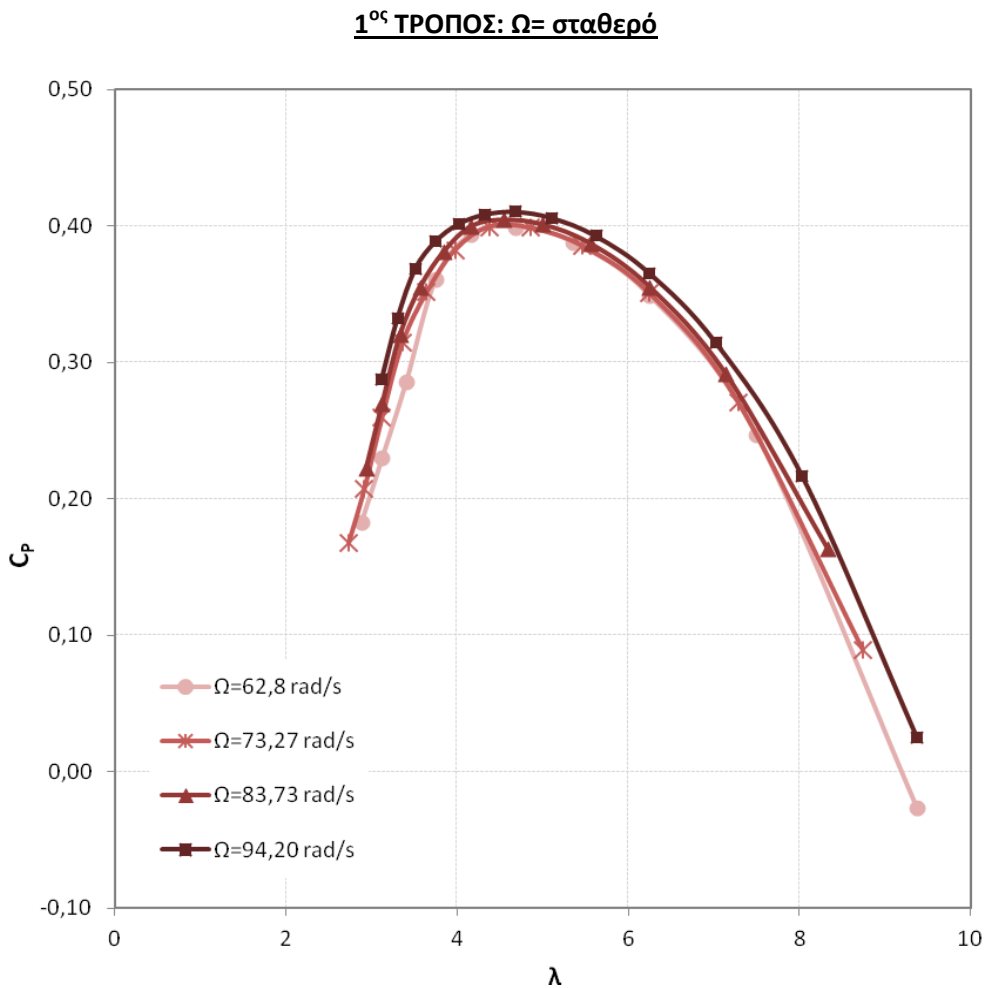
-strip.dat, το οποίο μας δίνει για κάθε στοιχείο περύγωσης την ακτίνα στην οποία βρίσκεται R, την φαινόμενη γωνία και ταχύτητα α_{eff} και W_{eff} , τους συντελεστές αξονικής και περιφερειακής επαγωγής a και a' και τις ασκούμενες δυνάμεις F_t και F_n . (Σχήμα 4.18).

0.10667	52.56763	8.93120	17.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.12000	48.00853	10.04760	17.00000	0.00000	0.00000	37.54661	13.56862
0.13333	43.60960	11.16400	17.00000	0.00000	0.00000	39.07347	12.45775
0.14618	33.13441	12.23929	17.00000	0.16985	0.06507	30.53254	8.41981
0.15853	31.20628	13.27347	17.00000	0.16586	0.06206	32.46585	9.48391
0.17088	29.36830	14.30765	17.00000	0.16334	0.06024	34.53947	10.71914
0.18323	27.61985	15.34183	17.00000	0.16213	0.05930	36.77726	12.13886
0.19558	25.96495	16.37600	17.00000	0.16199	0.05895	39.17781	13.73352
0.20793	24.40266	17.41018	17.00000	0.16275	0.05902	41.74967	15.50483
0.22028	23.55347	18.44436	17.00000	0.15986	0.05361	43.51037	15.82963
0.23264	22.77343	19.47854	17.00000	0.15750	0.04900	45.29500	16.14552
0.24499	22.07013	20.51272	17.00000	0.15532	0.04491	47.03652	16.40928
0.25734	21.43925	21.54690	17.00000	0.15327	0.04125	48.72355	16.61886
0.26969	20.87238	22.58108	17.00000	0.15163	0.03797	50.43571	16.77492
0.28204	20.36022	23.61525	17.00000	0.15067	0.03505	52.25814	16.88748
0.29439	19.90549	24.64943	17.00000	0.14982	0.03241	54.04930	16.95426
0.30674	19.50448	25.68361	17.00000	0.14908	0.03001	55.79741	16.97204
0.31909	19.16223	26.71779	17.00000	0.14835	0.02781	57.47203	16.93395
0.33145	18.95174	27.75197	17.00000	0.14709	0.02571	58.88384	16.80409
0.34380	18.78324	28.78615	17.00000	0.14591	0.02380	60.21126	16.62861
0.35615	18.65396	29.82033	17.00000	0.14478	0.02204	61.44383	16.40558
0.36850	18.55120	30.85450	17.00000	0.14403	0.02050	62.69098	16.19753
0.38085	18.10089	31.88868	17.00000	0.14928	0.02077	66.10216	17.25310
0.39320	17.65243	32.92286	17.00000	0.15509	0.02106	69.66158	18.31659
0.40555	17.25213	33.95704	17.00000	0.16073	0.02117	73.06308	19.22127
0.41791	16.89367	34.99122	17.00000	0.16630	0.02116	76.30384	19.98081
0.43026	16.57091	36.02540	17.00000	0.17190	0.02106	79.38248	20.60746
0.44261	16.27783	37.05958	17.00000	0.17769	0.02091	82.29869	21.11203
0.45496	15.91998	38.09376	17.00000	0.18218	0.02046	84.42201	21.24495
0.46731	15.57670	39.12793	17.00000	0.18705	0.02004	86.32491	21.28459
0.47966	15.24439	40.16211	17.00000	0.19258	0.01967	88.01991	21.24350
0.49201	14.91594	41.19629	17.00000	0.19905	0.01939	89.50131	21.12554
0.50436	14.58051	42.23047	17.00000	0.20695	0.01922	90.77097	20.93616
0.51672	14.23927	43.26465	17.00000	0.21668	0.01917	91.71882	20.64580
0.52907	14.12742	44.29883	17.00000	0.22384	0.01872	90.51450	19.72941
0.54142	13.93844	45.33301	17.00000	0.23573	0.01865	89.19147	18.81936
0.55377	13.59566	46.36718	17.00000	0.25634	0.01920	87.87750	17.95327

Σχήμα 4.18: Αρχείο strip.dat

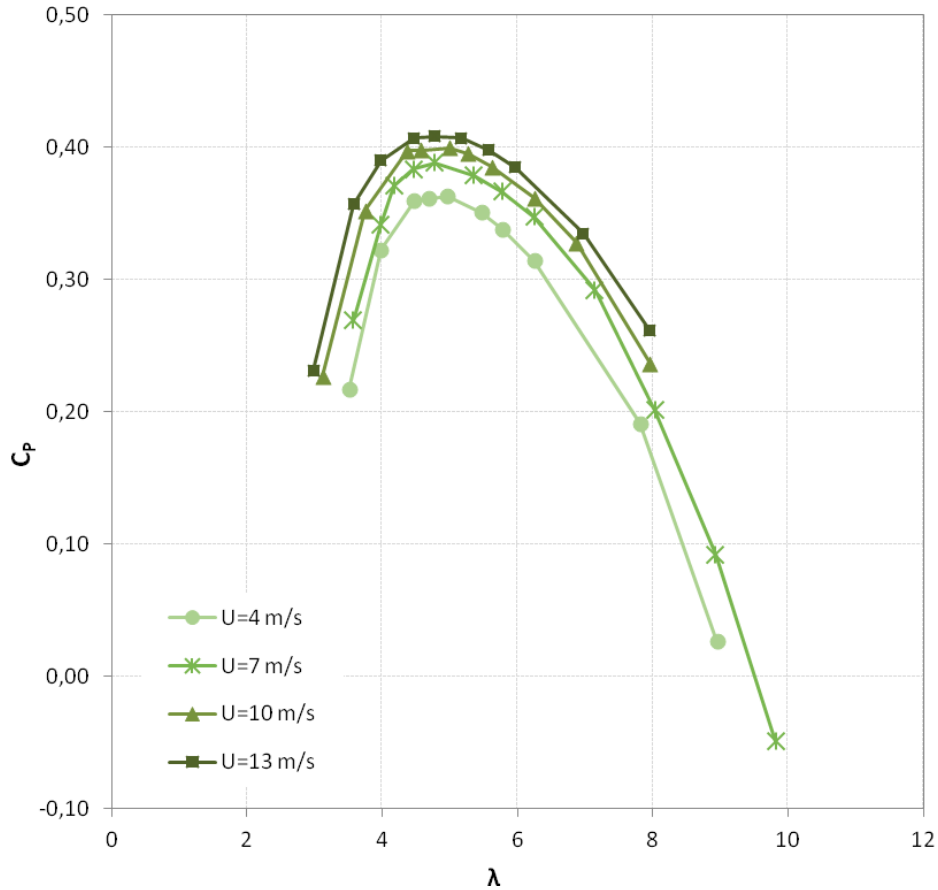
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ/ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υπολογιστικής διαδικασίας που περιγράφηκε στις ενότητες 4.1 και 4.2. Από τη διαδικασία αυτή λοιπόν προκύπτουν οι καμπύλες C_p - λ οι οποίες μας δείχνουν την απόδοση της Α/Γ σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, υπολογισμένες με τους δυο διαφορετικούς τρόπους που αναφέρονται στην ενότητα 4.1. Στα **Σχήματα 4.19** και **4.20** παρουσιάζονται οι καμπύλες αυτές. Επίσης, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν για την ίδια Α/Γ από τους João P. Monteiro, Miguel R. Silvestre, Hugh Piggott, Jorge C. André [17].



Σχήμα 4.19: 4 καμπύλες C_p - λ για 4 διαφορετικές ταχύτητες Ω .

2^{ος} ΤΡΟΠΟΣ: U= σταθερό



Σχήμα 4.20: 4 καμπύλες C_p - λ για 4 διαφορετικές ταχύτητες U

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα οδηγούμαστε στα εξής σχόλια-συμπεράσματα:

- Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή του C_p βρίσκεται κοντά στο $C_{pmax}=0.4$ και την επιτυγχάνουμε για $\lambda=4.8$ περίπου.
- Επίσης ισχύει ως κοινή παρατήρηση και για τα δυο διαγράμματα ότι καθώς ο αριθμός Reynolds αυξάνεται, η καμπύλη μετατοπίζεται προς τα επάνω και συνήθως σε μεγαλύτερο εύρος τιμών του λ . Η μετατόπιση αυτή των καμπυλών προς τα επάνω καθώς η ταχύτητα του ανέμου U αυξάνεται ήταν κάτι αναμενόμενο, αφού αύξηση του U για το ίδιο λ σημαίνει και αύξηση του Ω και άρα του αριθμού Reynolds. Ως γνωστό δε, οι καμπύλες C_l/C_d - α των αεροτομών μετατοπίζονται επίσης προς τα επάνω με αύξηση του Reynolds, πράγμα που σημαίνει ότι τα πτερύγια έχουν καλύτερη απόδοση σε

υψηλότερους Reynolds και άρα για τα αντίστοιχα σημεία (που έχουν δηλαδή ίδιο λ) παίρνουμε μεγαλύτερες τιμές του C_p .

- Αν και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο τρόπων υπολογισμού δε μπορεί να γίνει με ξεκάθαρο τρόπο, λόγω των διαφορετικών παραδοχών που θεωρήθηκαν στον καθέναν, εν τούτοις μπορούμε να αιτιολογήσουμε κάποιες ποιοτικές διαφορές που εντοπίζονται στα αποτελέσματα.

Μια πρώτη παρατήρηση που μπορεί να προκύψει από τη σύγκριση των δυο διαγραμμάτων έχει να κάνει με την μετατόπιση που υπάρχει από καμπύλη σε καμπύλη. Παρατηρούμε ότι στο 1^ο διάγραμμα οι καμπύλες βρίσκονται αρκετά κοντά η μια με την άλλη και μάλιστα σε ορισμένα σημεία ταυτίζονται. Αντίθετα, στο 2^ο διάγραμμα η απόσταση μεταξύ των καμπυλών είναι μεγαλύτερη και μάλιστα σε όλο το εύρος των τιμών του λ .

Για να δικαιολογήσουμε αυτή την παρατήρηση θα εξετάσουμε την αεροτομή στην ακτινική θέση $r=443\text{mm}$ για τις δυο περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, στον **Πίνακα 4.3** καταγράφονται οι τιμές του αριθμού Reynolds της ροής που βλέπει η αεροτομή όταν λειτουργεί σε $\lambda=6,25$ για καθεμιά από τις δυο περιπτώσεις.

1 ^ο τρόπος			2 ^ο τρόπος			
$\lambda=6.25$	U (m/s)	Re ₄₄₃	$\lambda=6.25$	Ω (rad/s)	Re ₄₄₃	
	$\Omega=62.8 \text{ rad/s}$	6	120000	U=4 m/s	41,67	84000
	$\Omega=73.27 \text{ rad/s}$	7	138000	U=7 m/s	72,92	145000
	$\Omega=83.73 \text{ rad/s}$	8	157000	U=10 m/s	104,17	205000
	$\Omega=94.20 \text{ rad/s}$	9	177000	U=13 m/s	135,42	267000

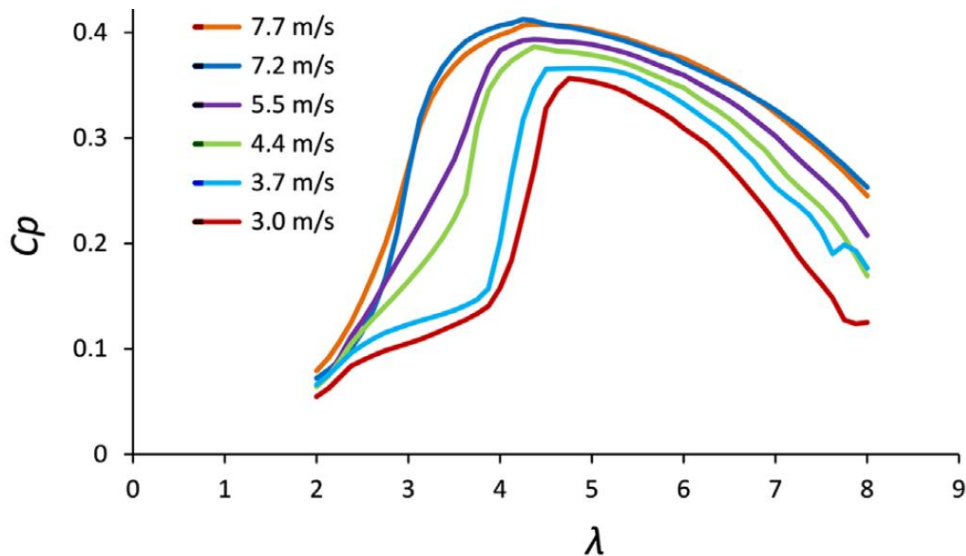
Πίνακας 4.3: Αριθμοί Reynolds για την αεροτομή σε ακτίνα $r=4443\text{mm}$ για $\lambda=6,25$ και για τους δυο τρόπους υπολογισμού.

Βλέπουμε ότι για τον 1^ο τρόπο υπολογισμού ο Reynolds που “βλέπει” η αεροτομή μεταβάλλεται από καμπύλη σε καμπύλη κατά περίπου 20.000. Για τον 2^ο τρόπο υπολογισμού όμως, η μεταβολή του Reynolds από καμπύλη σε καμπύλη μεταβάλλεται κατά πολύ περισσότερο (περίπου 60.000). Αυτή η μεγαλύτερη διαφοροποίηση του Reynolds από τον ένα τρόπο στον άλλο είναι ικανή ώστε οι

καμπύλες C_l/C_d - α της αεροτομής κατά τον 2^ο τρόπο να έχουν μεταξύ τους μεγαλύτερη μετατόπιση σε σχέση με αυτές που προκύπτουν κατά τον 1^ο τρόπο υπολογισμού. Το ίδιο συμβαίνει και στις υπόλοιπες αεροτομές. Το αποτέλεσμα είναι στις τελικές καμπύλες C_p - λ να παρατηρούμε κατά τον 2^ο τρόπο υπολογισμού τους μεγαλύτερη μετατόπιση από καμπύλη σε καμπύλη σε σχέση με τον 1^ο τρόπο.

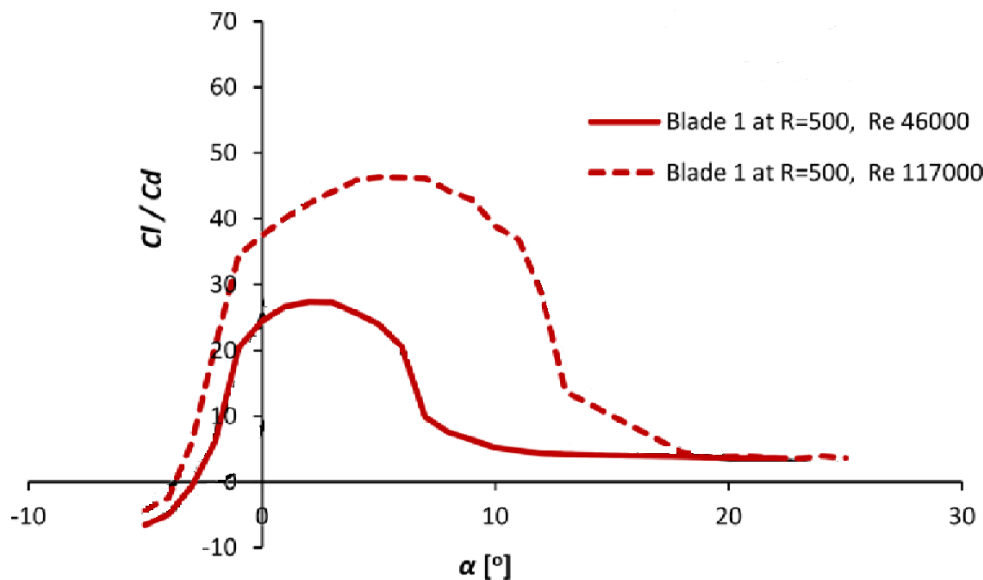
Στη συνέχεια επιχειρείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσης εργασίας με αυτά που προέκυψαν από την εργασία των João P. Monteiro, Miguel R. Silvestre, Hugh Piggott, Jorge C. André [17]. Στη μελέτη αυτή αναλύθηκε υπολογιστικά και πειραματικά η απόδοση ενός δρομέα ίδιου με αυτόν που εξετάζουμε (δρομέας Piggott διαμέτρου 1,2m), με όποιες μικροδιαφορές μπορεί να υπάρχουν στη γεωμετρία των πτερυγίων λόγω των ατελειών που συνεπάγεται η κατασκευή τους στο χέρι με απλά ξυλουργικά εργαλεία. Η γενική μεθοδολογία σε γενικές γραμμές δε διαφέρει ιδιαίτερα με αυτή που ακολουθήσαμε, ωστόσο υπάρχουν διαφορές στα χρησιμοποιηθέντα υπολογιστικά προγράμματα, στις παραμέτρους που ορίστηκαν σε αυτά, καθώς και στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.

Στο **Σχήμα 4.21** παρουσιάζονται οι καμπύλες απόδοσης της μηχανής όπως αυτές υπολογίστηκαν μέσω του κώδικα Qblade. Ο κώδικας αυτός έχει ενσωματωμένο τον κώδικα του XFOIL για την αεροδυναμική ανάλυση των αεροτομών.

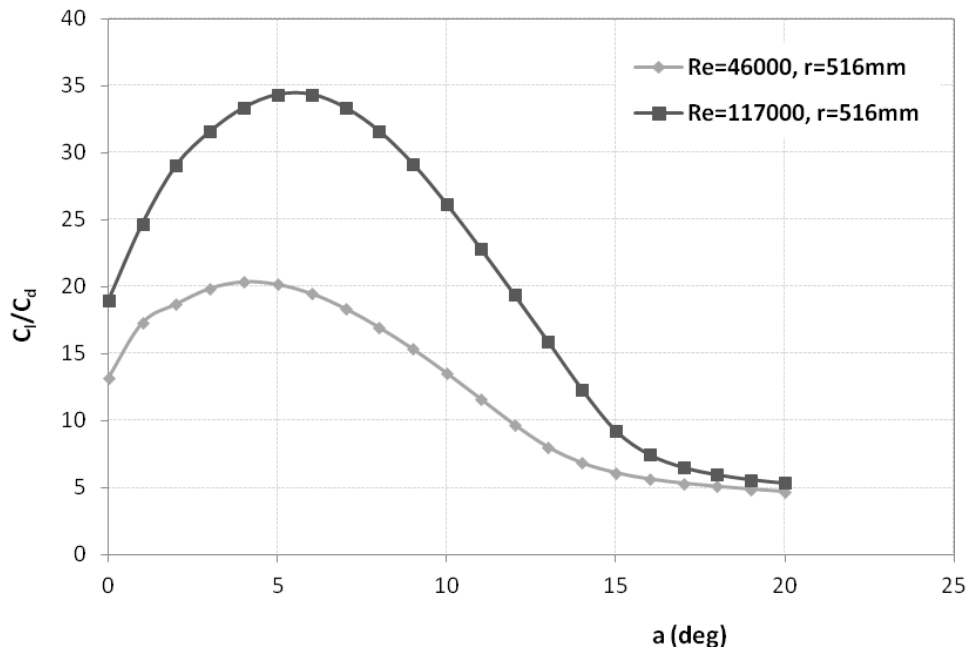


Σχήμα 4.21: Καμπύλες απόδοσης όπως υπολογίστηκαν στο πρόγραμμα Qblade.

Συγκρίνοντας τα **Σχήματα 4.20** και **4.21** μια πρώτη διαφορά που εντοπίζεται έχει να κάνει με την περιοχή της αποκόλλησης. Στην περιοχή της αποκόλλησης αριστερά του C_{pmax} , οι καμπύλες του **Σχήματος 4.21** είναι πιο απότομες σε σχέση με αυτές του **Σχήματος 4.20**. Με άλλα λόγια, φαίνεται η αποκόλληση όπως υπολογίζεται στις αναλύσεις του Qblade να έχει πιο έντονη επίδραση στις καμπύλες C_i -α και C_d -α των αεροτομών του πτερυγίου. Αυτό μοιάζει να δικαιολογείται από το γεγονός ότι κατά τις αναλύσεις στο Qblade δεν εφαρμόστηκε η διαδικασία του boundary layer tripping που αναφέραμε στην ενότητα 4.2.3.2.2. Το σημείο μετάβασης της ροής σε τυρβώδη γύρω από τις αεροτομές καθορίστηκε από τον ίδιο τον κώδικα θέτοντας τις παραμέτρους $Tortrip$ και $Bottomtrip$ ίσους με τη μονάδα. Το αποτέλεσμα, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.22** είναι τα διαγράμματα C_i/C_d -α των αεροτομών να έχουν μεγάλη κλίση στις γωνίες που γίνεται η αποκόλληση, σε αντίθεση με τα αντίστοιχα διαγράμματα που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία με χρήση εξαναγκασμένης μετάβασης της ροής (**Σχήμα 4.23**). Στα τελευταία η αποκόλληση συμβαίνει με πιο ομαλό τρόπο, κάτι το οποίο αποτυπώνεται εν τέλει και στις καμπύλες C_p -λ.



Σχήμα 4.22: Καμπύλες C_i/C_d -α για την αεροτομή σε ακτίνα $r=500mm$ όπως υπολογίστηκαν από τον κώδικα Qblade χωρίς τη χρήση tripping για δυο διαφορετικούς Reynolds.



Σχήμα 4.23: Καμπύλες C_l/C_d - a για την αεροτομή σε ακτίνα $r=516mm$ όπως υπολογίστηκαν από τον κώδικα XFLR5 με τη χρήση tripping για δυο διαφορετικούς Reynolds.

Επίσης, αισθητή είναι και η μείωση του λόγου C_l/C_d με τη χρήση εξαναγκασμένης μετάβασης σε τυρβώδη ροή, κάτι το οποίο οδηγεί και σε ελαφρώς χαμηλότερες τιμές του $C_{p,max}$ στις τελικές καμπύλες. Η συγκεκριμένη αναλογία tripping που χρησιμοποιήσαμε οδηγεί το σημείο μετάβασης σε τυρβώδη ροή πιο μπροστά στην αεροτομή, κάτι το οποίο συνοδεύεται από μείωση του λόγου C_l/C_d , μείωση της απόδοσης των αεροτομών και τελικώς ελαφρώς χαμηλότερη τιμή των C_p .

Τέλος, μια εμφανής διαφορά που εντοπίζεται στις καμπύλες C_p - λ των **Σχημάτων 4.20** και **4.21** αφορά τη μετατόπιση των καμπυλών του **Σχήματος 4.21** σε μεγαλύτερες τιμές του λ καθώς η ταχύτητα U μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό μπορεί και πάλι να εξηγηθεί κοιτάζοντας τα **Σχήματα 4.22** και **4.23**. Παρατηρούμε ότι καθώς η ταχύτητα του ανέμου U και αντίστοιχα ο Reynolds μειώνονται, η τιμή $C_l/C_{d,max}$ των αεροτομών μικραίνει και μετατοπίζεται σε χαμηλότερες γωνίες. Η μετατόπιση αυτή στην εργασία των João P. Monteiro, Miguel R. Silvestre, Hugh Piggott, Jorge C. André [17] είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή που προκύπτει από τις αναλύσεις της παρούσης εργασίας, λόγω της απουσίας tripping κατά τις αναλύσεις της ροής. Είναι επομένως λογικό να εμφανίζεται μεγαλύτερη και η μετατόπιση της τιμής $C_{p,max}$ σε μεγαλύτερα λ .

Η επιλογή βέβαια του free tripping, όπως φάνηκε στην ενότητα 4.2.3.2.2, οδηγεί πιθανότατα σε σημαντική απόκλιση των αποτελεσμάτων από τα πραγματικά, λόγω της αδυναμίας του κώδικα XFOIL να προβλέψει με ακρίβεια το πεδίο της στρωτής ροής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΙΚΡΗΣ Α/Γ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία πειραματικής μέτρησης της απόδοσης του δρομέα της μικρής Α/Γ του Hugh Piggott που περιγράφεται στην ενότητα 1.3.1. Επίσης, οι προκύπτουσες καμπύλες C_p - λ συγκρίνονται με αυτές που μετρήθηκαν από τους João P. Monteiro, Miguel R. Silvestre, Hugh Piggott, Jorge C. André [17] για την ίδια μηχανή.

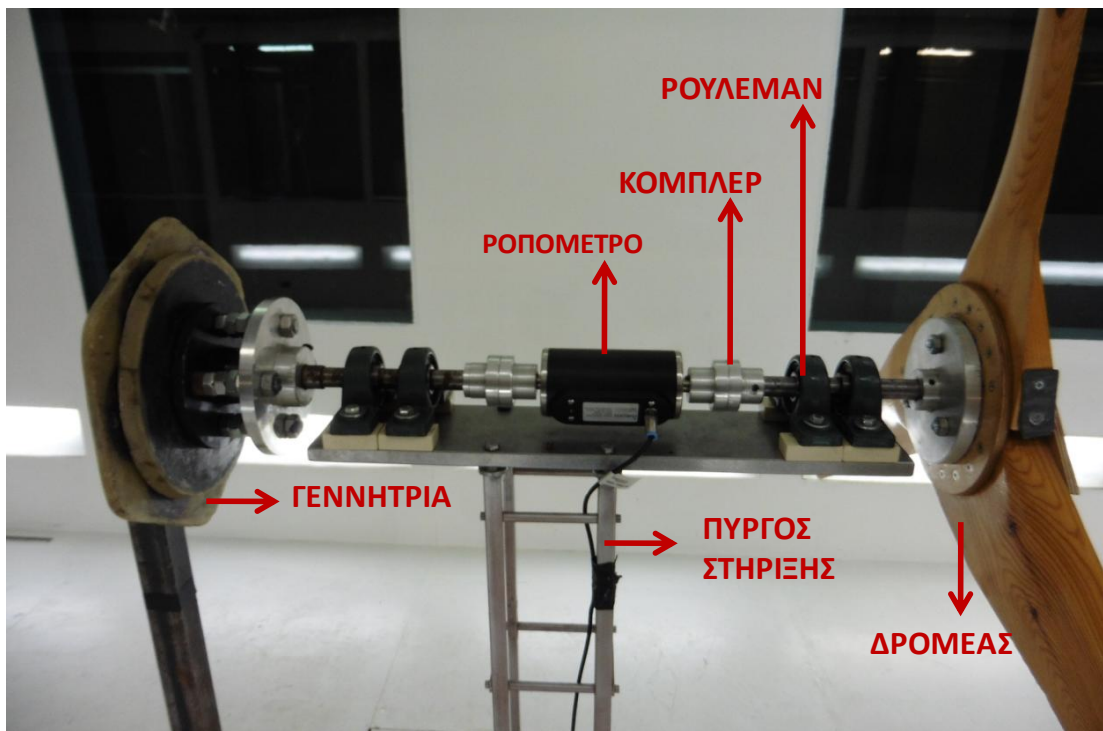
5.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΜΙΚΡΗΣ Α/Γ ΤΟΥ PIGGOTT

5.1.1 Πειραματική διάταξη

Οι πειραματικές μετρήσεις καμπύλης ισχύος της μικρής Α/Γ πραγματοποιήθηκαν στην αεροδυναμική σήραγγα, η οποία βρίσκεται στο εργαστήριο Αεροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Η εν λόγω σήραγγα είναι κλειστού κυκλώματος με συνολικό μήκος περίπου 32 m και τρεις διακριτούς τομείς (θέσεις) δοκιμών. Στη θέση δοκιμών στην οποία μετρήθηκε η Α/Γ οι διαστάσεις της σήραγγας ήταν 3.5m x 2.5 m και το μήκος του θαλάμου ήταν 10.8m. Η Α/Γ τοποθετήθηκε έτσι ώστε το κέντρο του δρομέα να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά με το κέντρο της διατομής της αεροδυναμικής σήραγγας κι ευθυγραμμίστηκε στη διατομή της αεροσήραγγας, ώστε ο άνεμος να προσκρούει κάθετα στην επιφάνεια του δρομέα. Η δημιουργία ρεύματος αέρα μέσα στη σήραγγα επιτυγχάνεται με τη χρήση ανεμιστήρα διαμέτρου 3.5 m με 7 πτερύγια από ξύλο. Μετά τον ανεμιστήρα, κατά την διεύθυνση της ροής του αέρα υπάρχουν οδηγία πτερύγια, τα οποία κατά βάση δεσμεύουν τυχόν περιττά σωματίδια της ροής και δεύτερον εξομαλύνουν την ροή από τυρβώδη φαινόμενα. Σε κατάλληλες θέσεις κατά μήκος της σήραγγας έχουν τοποθετηθεί επιπλέον φορητές δικτυωτές διατομές των οποίων κύριος ρόλος είναι η εξομάλυνση της ροής. Ο ανεμιστήρας τροφοδοτείται με ισχύ από έναν ηλεκτρικό κινητήρα τύπου Thuristor Controlled, ισχύος 257.5 kW και ρυθμιζόμενων στροφών με ανώτατο όριο 1500 RPM.

Η διάταξη φαίνεται στο **Σχήμα 5.1**. Διακρίνεται η φλάντζα πρόσδεσης της φτερωτής πάνω στον άξονα περιστροφής της, το ροπόμετρο που βρίσκεται περίπου στη μέση του άξονα και συνδέεται με αυτόν μέσω των συνδέσμων (κόμπλερ), τα ρουλεμάν στήριξης του άξονα πάνω στη βάση του, κάποιοι ξύλινοι αποστάτες για την

ανύψωση του δρομέα και την ευθυγράμμισή του με το κέντρο της διατομής της σήραγγας, η σύγχρονη ηλεκτρική γεννήτρια στο πίσω μέρος του άξονα και η βάση στήριξης όλων αυτών. Φαίνεται ακόμη ο δικτυωτός ιστός στήριξης της μηχανής, ο οποίος στηρίζονταν σε βάση που βρισκόταν κάτω από την επιφάνεια της σήραγγας κι η οποία με τη σειρά της ήταν τοποθετημένη πάνω σε δυο μεταλλικές βάσεις πακτωμένες με το έδαφος (**Σχήμα 5.1**). Το κέντρο του δρομέα βρισκόταν σε απόσταση 4m περίπου από τη διατομή εισόδου του αέρα στη σήραγγα.

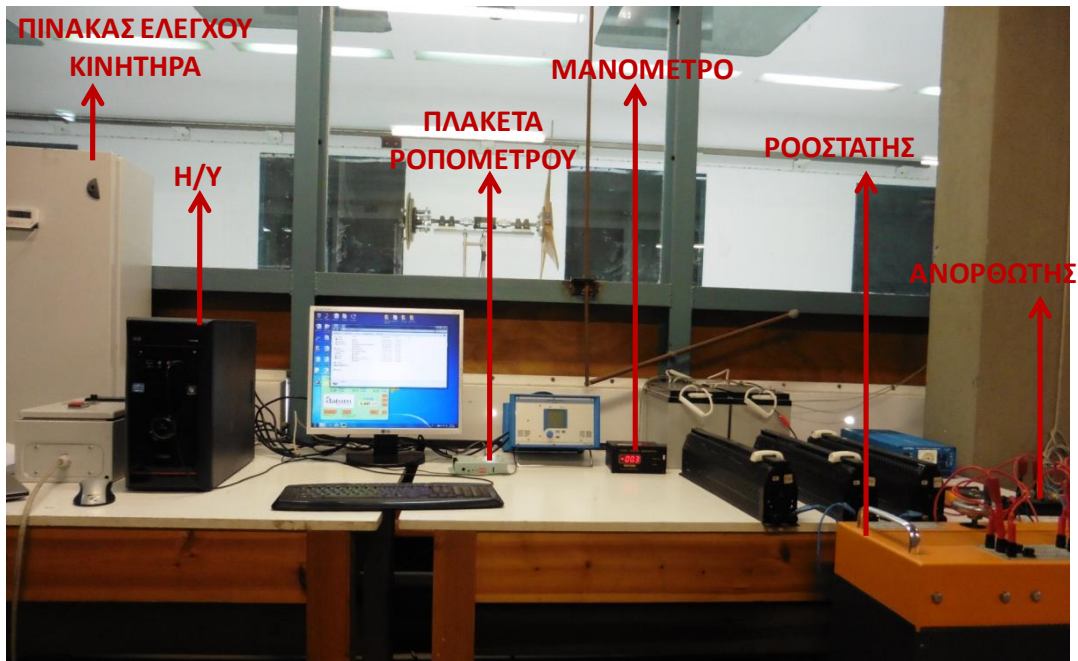


Σχήμα 5.1: Πειραματική διάταξη μέσα στην αεροσήραγγα.

Στο **Σχήμα 5.2** παρουσιάζονται και οι μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν. Αυτές ήταν οι εξής:

1. Πίνακας ελέγχου του κινητήρα της αεροσήραγγας με ενσωματωμένο σύστημα χειροκίνητης αλλαγής στροφών του.
2. Ηλεκτρονικό μανόμετρο εύρους ± 199.9 Pascal κι ακρίβειας ενός δεκαδικού ψηφίου, το οποίο συνδεόταν με έναν σωλήνα Pitot, τοποθετημένο σε απόσταση 3m από το επίπεδο περιστροφής του δρομέα.
3. Ηλεκτρονικό θερμοστοιχείο του οποίου ο αισθητήρας βρισκόταν στο εσωτερικό της σήραγγας.

4. Ροπόμετρο τοποθετημένο πάνω στον άξονα της μηχανής με ρυθμός δειγματοληψίας για τη ροπή 102 samples/sec ενώ για την ταχύτητα περιστροφής 60 pulses/rev. Το εύρος μετρούμενης τάσης ήταν 0V-10Vdc, το οποίο αντιστοιχούσε σε ροπές 0Nm-20Nm και στροφές 0RPM-1500RPM.
5. Ηλεκτρονική πλακέτα ψηφιοποίησης και καταγραφής του σήματος του ροπομέτρου συνδεδεμένη σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η χρησιμοποιούμενη ανάλυση ήταν στα 24bits.
6. Τρεις ηλεκτρικές τριφασικές αντιστάσεις μεταβλητού μήκους (ροοστάτες) συνδεδεμένες παράλληλα. Η σύνδεση αυτή μας επιτρέπει ανώτατη τιμή ρεύματος τα 15A και εύρος τιμών αντίστασης 3Ω με 60Ω.
7. Ανορθωτή για τη μετατροπή του εναλασσόμενου ρεύματος της γεννήτριας σε συνεχές ρεύμα στις αντιστάσεις
8. Ηλεκτρονικό υπολογιστή συνδεδεμένο με την πλακέτα του ροπομέτρου για την καταγραφή και επεξεργασία των μετρήσεων με το κατάλληλο λογισμικό.



Σχήμα 5.2: Μετρητικός εξοπλισμός

5.1.2 Περιγραφή διαδικασίας μετρήσεων

Στόχος του πειράματος ήταν ο υπολογισμός του συντελεστή ισχύος του δρομέα C_p για διάφορες συνθήκες λειτουργίας, πράγμα που σημαίνει για διαφορετικές τιμές του λόγου ταχυτήτων στο ακροπτερύγιο. Για το σκοπό αυτό έπρεπε να μπορούμε ανά πάσα στιγμή να ρυθμίζουμε και να μετράμε την παραγόμενη μηχανική ισχύ από το δρομέα P_{rotor} , την ταχύτητα του ανέμου μπροστά από το δρομέα U και τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του Ω .

Ο έλεγχος της ταχύτητας U έγινε μέσω συστήματος ελέγχου των στροφών του κινητήρα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την δημιουργία ροής αέρα στην αεροσήραγγα. Η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου πραγματοποιήθηκε μέσω της μέτρησης της δυναμικής πίεσης του με το μανόμετρο. Από τη σχέση

$$\rho = \frac{P_{atm}}{R_o(273 + T)} \quad (41)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, P_{atm} η ατμοσφαιρική πίεση ($P_{atm} = 101325$ Pa), R_o η σταθερά του ξηρού αέρα ($R_o = 287,05$ J/kg·K) και T η θερμοκρασία (°C) και μετρώντας με το ηλεκτρικό θερμοστοιχείο την θερμοκρασία T του αέρα, υπολογίζαμε την πυκνότητα για τις εκάστοτε συνθήκες ροής. Έπειτα από τη σχέση ορισμού της δυναμικής πίεσης

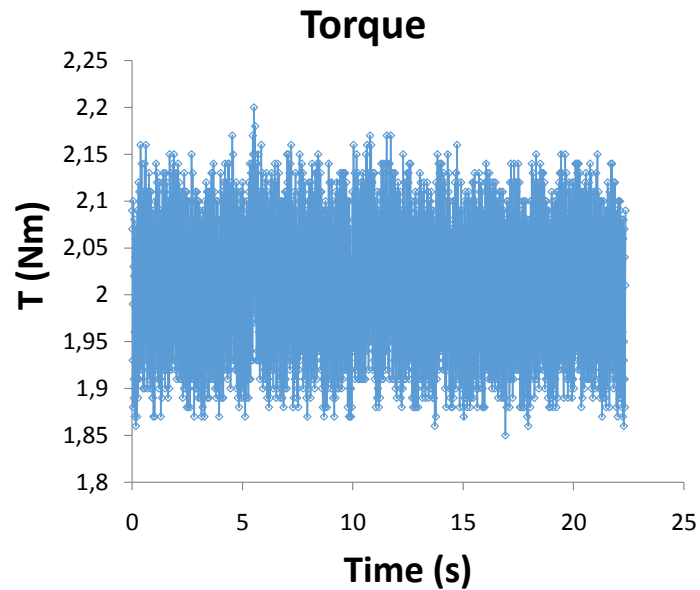
$$P_{dynamic} = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (42)$$

όπου $P_{dynamic}$ η δυναμική πίεση της ροής στο άπειρο που μας έδινε το μανόμετρο, υπολογίζαμε την ταχύτητα U του αέρα. Έτσι, για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα της αεροσήραγγας, υπολογίζαμε την ταχύτητα του ανέμου στην οποία αντιστοιχούσε.

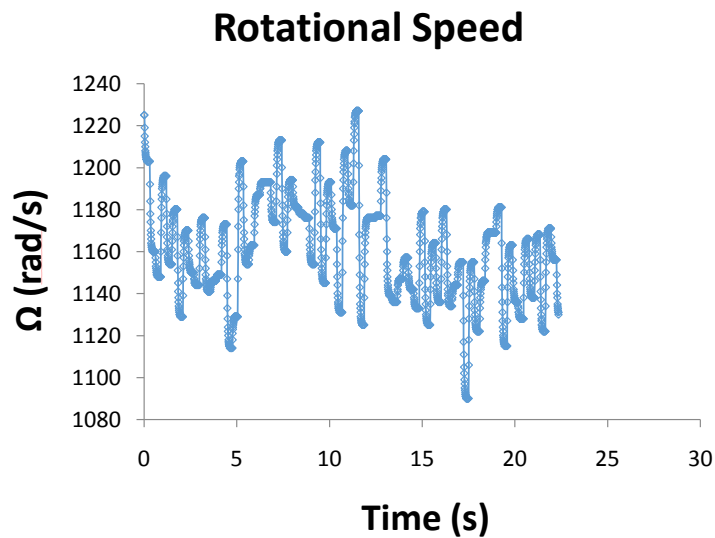
Για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής Ω του δρομέα χρησιμοποιήθηκαν οι 3 τριφασικές αντιστάσεις μεταβλητού μήκους συνδεδεμένες παράλληλα, ώστε να επιτευχθούν όσο το δυνατόν περισσότερες τιμές στροφών περιστροφής. Η γεννήτρια συνδέοταν με έναν ανορθωτή και από εκεί με τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Ο έλεγχος στηρίχτηκε στην απλή λογική της μείωσης του ρεύματος, άρα και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, με την αύξηση της αντίστασης. Επομένως, και λόγω της αντίστροφης σχέσης ρεύματος - ταχύτητας περιστροφής, αυξάνοντας την αντίσταση, επιτυγχάνοταν αύξηση των στροφών και προφανώς αύξηση της τερματικής τάσης. Η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα πραγματοποιήθηκε μέσω του ροπομέτρου που ήταν συνδεδεμένο στον άξονα. Μέσω του ροπομέτρου μετρούσαμε επίσης και τη ροπή M του άξονα και υπολογίζοντας το γινόμενο ροπής και στροφών παίρναμε την παραγόμενη μηχανική ισχύ από το άξονα. Προφανώς, η τελική ισχύς

που υπολογίζονταν σε κάθε μέτρηση συμπεριλάμβανε τις μηχανικές απώλειες στα ρουλεμάν.

Στα Σχήματα 5.3 (α) και (β) παρουσιάζονται ενδεικτικά μια χρονοσειρά δειγματοληψίας για την ροπή T (Nm) αι μια για την ταχύτητα περιστροφής Ω (rad/s).



(α)



(β)

Σχήμα 5.3: Χρονοσειρές μετρούμενων τιμών της ροπής (α) και της ταχύτητας περιστροφής (β) του δρομέα.

5.1.3 Καθορισμός συνθηκών λειτουργίας και εκτέλεσης του πειράματος

Οι τιμές των ταχυτήτων U και Ω υπό τις οποίες εκτελέστηκε το πείραμα καταγράφονται στον **Πίνακα 5.1**.

	Ω (rad/s)								
U=7 m/s	298	347	449	574	709	768	829		
U=8 m/s	335	434	537	649	750	843			
U=9 m/s	386	593	704	804	904	974			
U=10 m/s	579	693	807	842	904	1004			
U=11 m/s	409	516	598	721	825	905	913	1082	1266
U=12 m/s	687	804	908	975	1161	1255			
U=13 m/s	674	728	783	911	1013	1126	1179	1310	

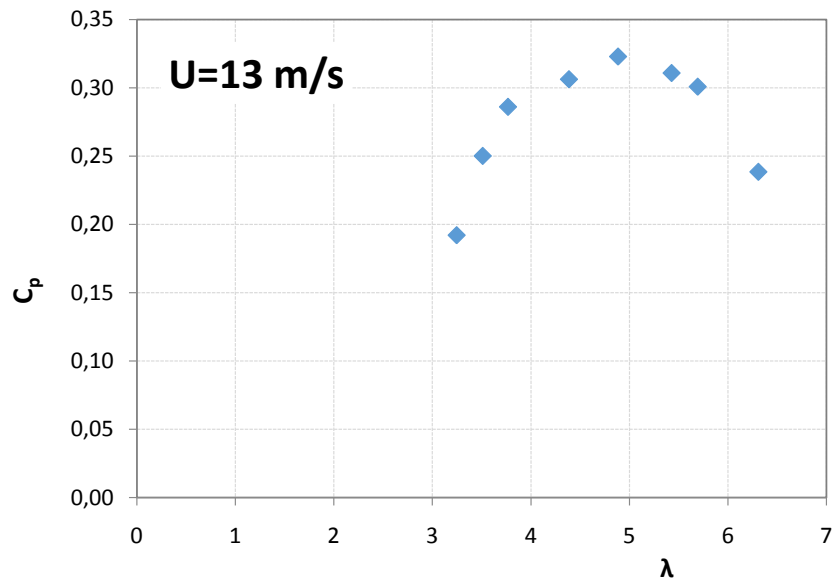
Πίνακας 5.1: Πειραματικές συνθήκες λειτουργίας της μηχανής.

Οι ταχύτητες επιτροφοής Ω υπολογίσθηκαν σαν μέσος όρος των τιμών που παίρναμε από το ροπόμετρο για περίπου 30sec. Για κάθε ταχύτητα ανέμου υπήρχαν δυο όρια της Ω που μπορούσαμε να υπερβούμε. Το κάτω όριο έχει να κάνει με τη συχνότητα συντονισμού της μηχανής που εντοπίζονταν για ταχύτητες μικρότερες από αυτές της 1^{ης} στήλης του **Πίνακα 5.1**. Το άνω όριο επιβάλλόταν από τον περιορισμό της μέγιστης ώμικής αντίστασης που διαθέταμε (60 Ω).

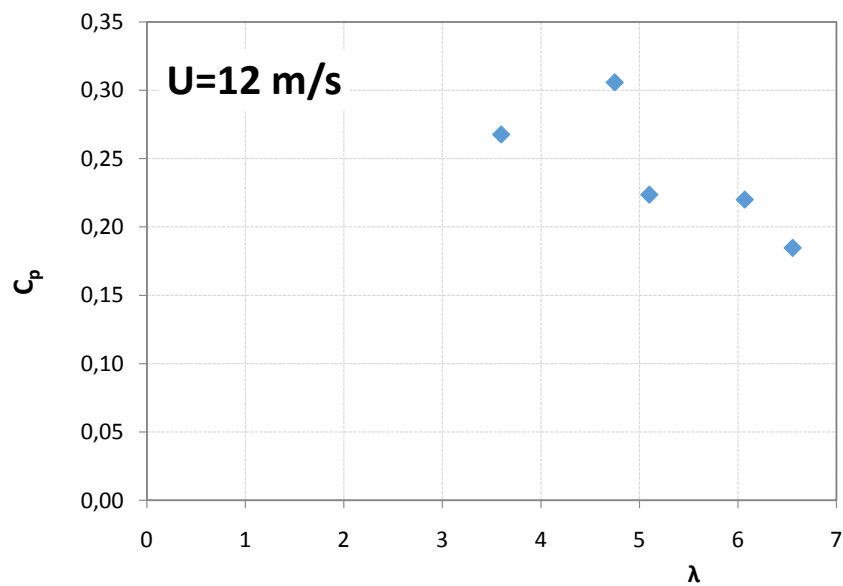
Οι ταχύτητες του ανέμου U στην πράξη διέφεραν από τις αναγραφόμενες στον **Πίνακα 5.1** κατά ± 0.06 m/s, αλλά για λόγους απλότητας και καλύτερης κατανόησης παρουσιάζονται οι ακέραιες τιμές τους. Για μικρότερες από τα 7 m/s ταχύτητες ανέμου, ο δρομέας επιβραδυνόταν, αφού η ροπή που παρήγαγε δε μπορούσε να υπερνικήσει την αδράνεια της γεννήτριας και όλου του κινούμενου τμήματος. Έτσι, ο δρομέας σταματούσε με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η μέτρηση της απόδοσης της μηχανής.

5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

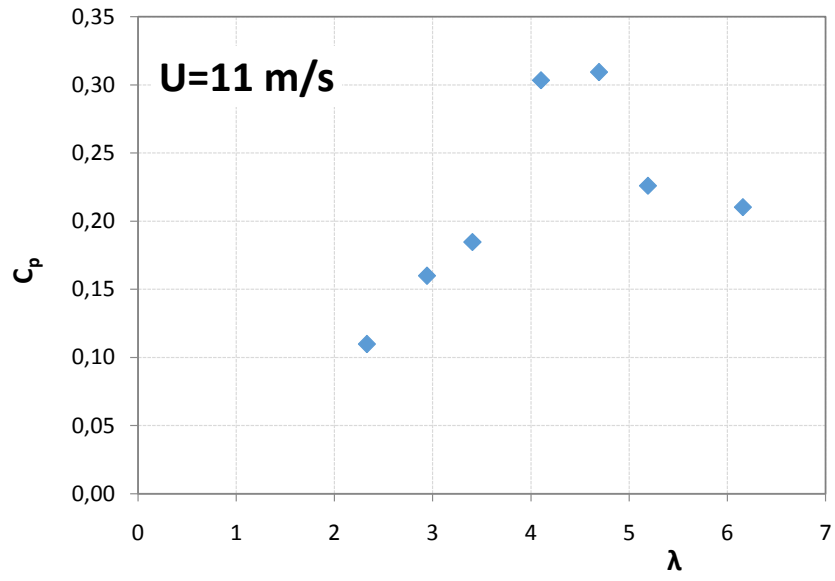
Οι καμπύλες C_p - λ που προέκυψαν από τις μετρήσεις της μικρής Α/Γ φαίνονται στα **Σχήματα 5.4 (α) έως (η)**. Συνολικά έχουμε 7 καμπύλες (μια για κάθε ταχύτητα ανέμου U) και καθεμιά έχει τόσα σημεία όσα μας επέτρεψαν να πάρουμε οι περιορισμοί της ταχύτητας Ω .



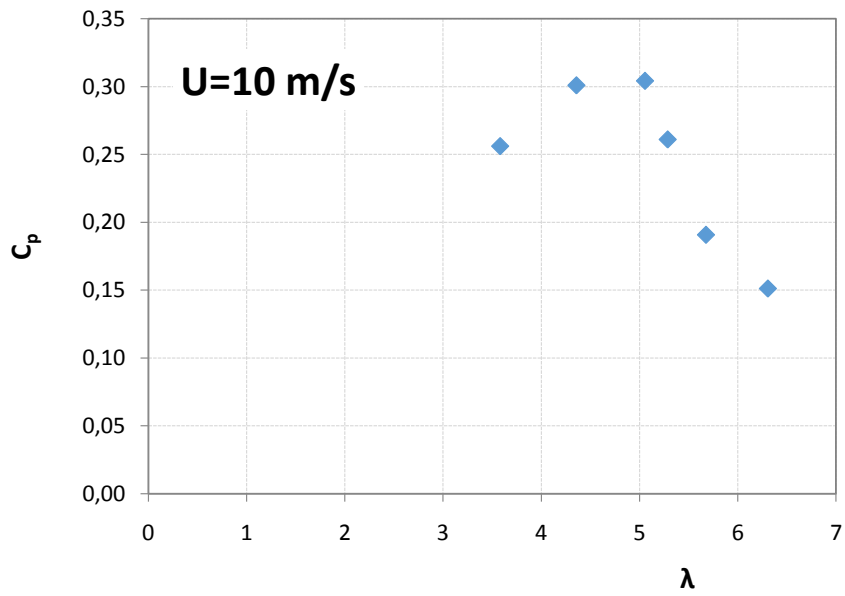
(α)



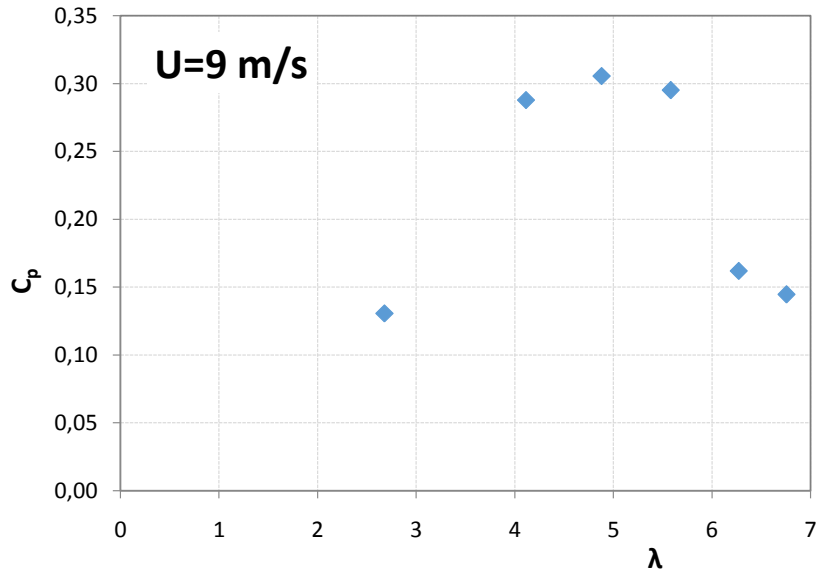
(β)



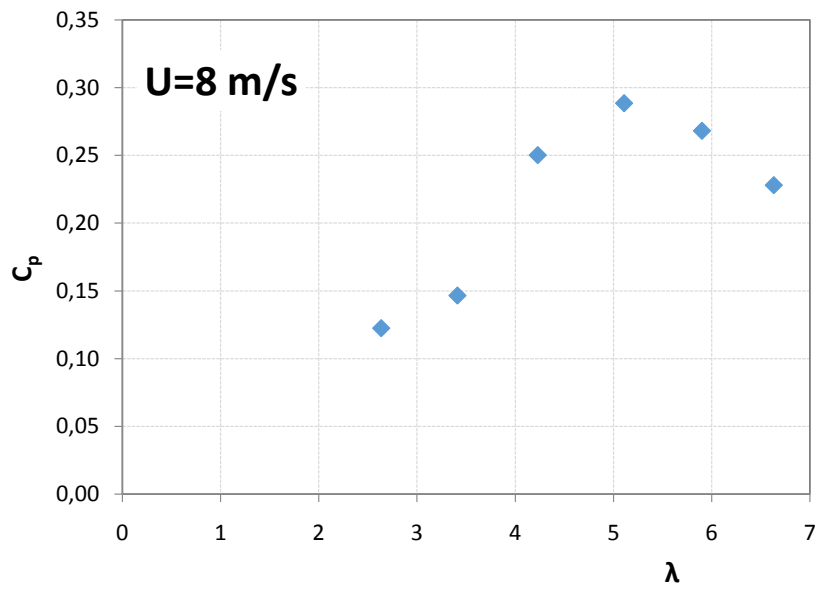
(γ)



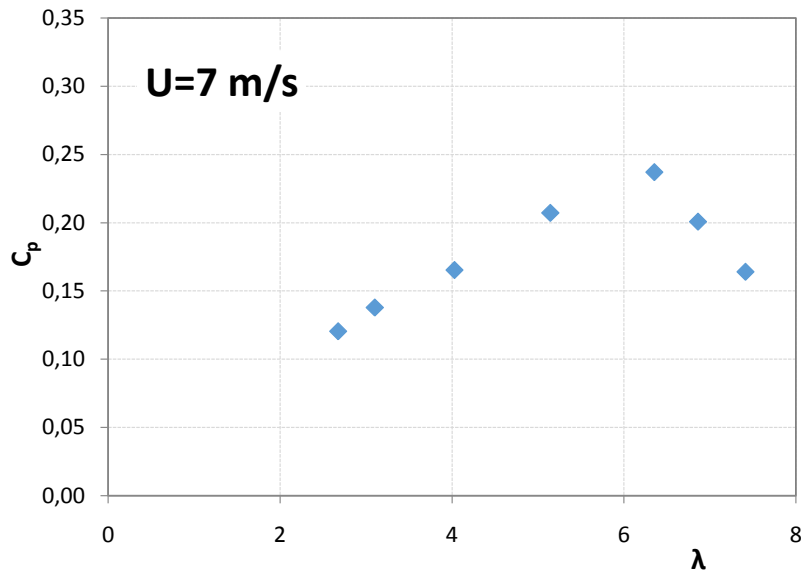
(δ)



(ε)



(ζ)



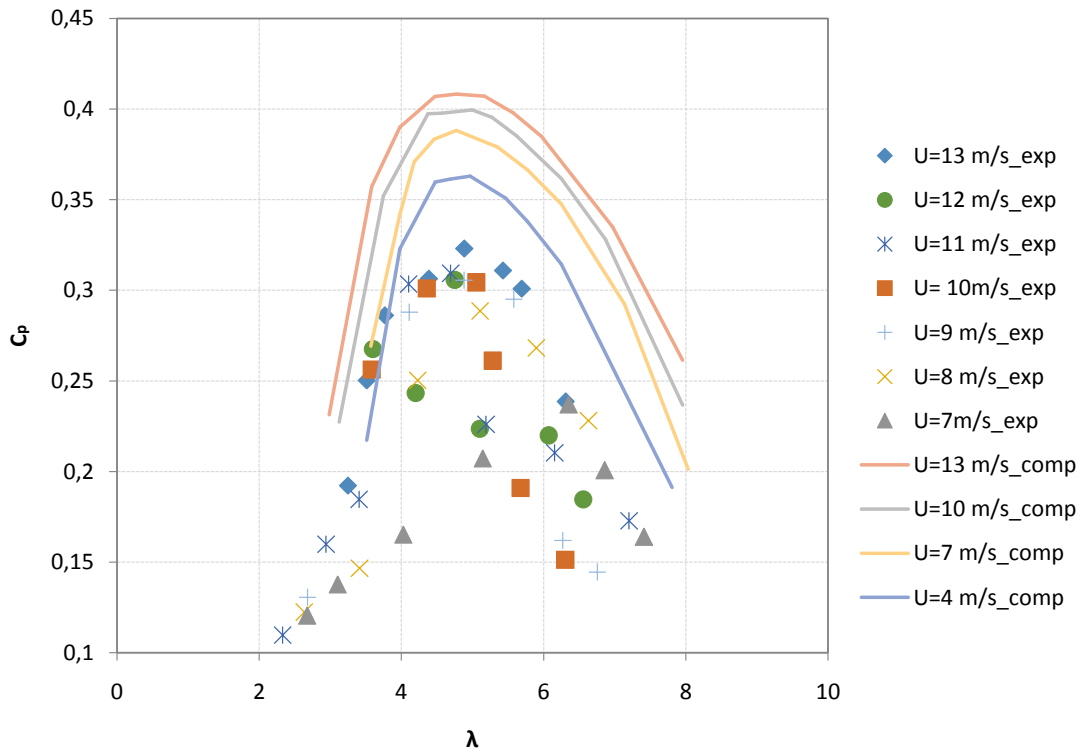
(η)

Σχήμα 5.4 (α)-(η): 7 πειραματικές καμπύλες C_p - λ για 7 ταχύτητες ανέμου

Παρατηρώντας τα **Σχήματα 5.4 (α) έως (η)** παρατηρούμε ότι στις καμπύλες $U=12\text{m/s}$, $U=11\text{m/s}$, $U=10\text{m/s}$ και $U=9\text{m/s}$ υπάρχει μια απότομη πτώση του C_p μετά την τιμή $C_{p\text{max}}$ καθώς κινούμαστε σε μεγαλύτερα λ . Η απότομη αυτή κλίση της καμπύλης πιθανώς μπορεί να αιτιολογηθεί από τα φαινόμενα μικρών ταλαντώσεων που παρουσιάζονται στην πειραματική διάταξη σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής του δρομέα.

Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο βάσει των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, παρατηρείται μια μετατόπιση των καμπυλών σε χαμηλότερες τιμές C_p καθώς η ταχύτητα U μειώνεται. Η μετατόπιση αυτή οφείλεται, όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 4.3, στην μείωση του αριθμού Reynolds που βλέπουν οι αεροτομές του πτερυγίου και άρα στην αντίστοιχη μετατόπιση των καμπυλών C_i/C_{d-a} σε χαμηλότερες τιμές.

5.2.1 Σύγκριση με υπολογιστικά αποτελέσματα



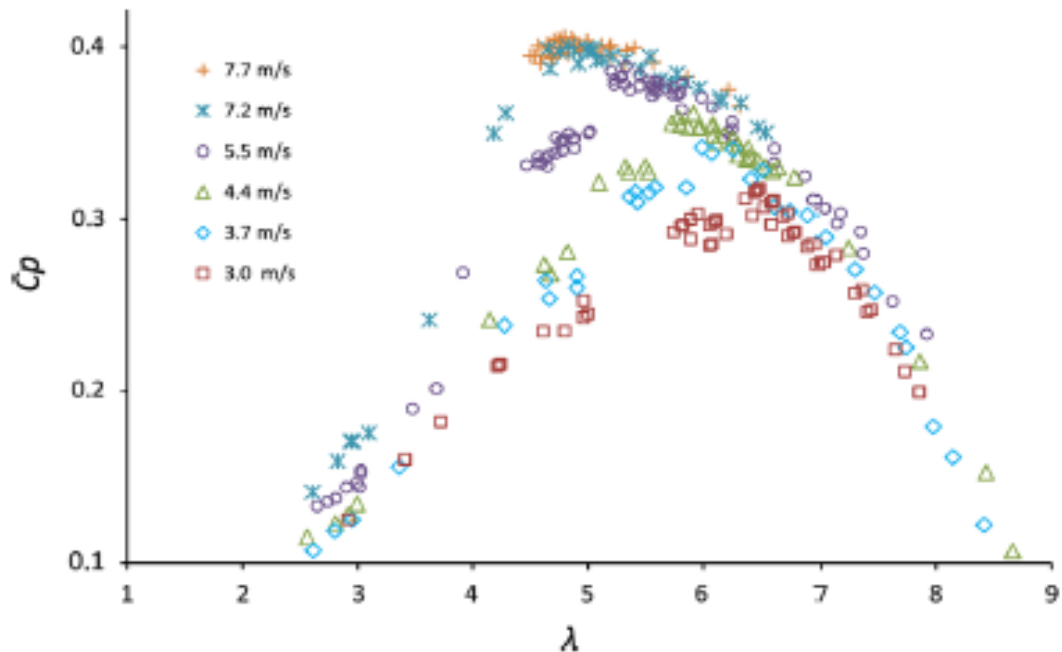
Σχήμα 5.5 : Πειραματικές καμπύλες C_p - λ της μικρής Α/Γ.

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται όλες μαζί οι πειραματικές καμπύλες και αυτές που προέκυψαν από την υπολογιστική διαδικασία. Όπως είναι εμφανές οι αποκλίσεις των τιμών του C_p αρκετά μεγάλες σε όλο το εύρος των τιμών του λ . Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις της ισχύος που λήφθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία είναι εμωμένες σε σχέση με τις τιμές ισχύος που παράγει ο ρομεάς κατά τις μηχανικές απώλειες λόγω τριβών στα ρουλεμάν. Εκτιμάται ωστόσο, ότι η τιμή των απωλειών αυτών δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μειωθούν σημαντικά οι μεγάλες αποκλίσεις που φαίνονται σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

5.2.2 Σύγκριση με άλλες πειραματικές μετρήσεις

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των João P. Monteiro, Miguel R. Silvestre, Hugh Piggott, Jorge C. André [17] για τον ίδιο δρομέα με αυτόν που εξετάσαμε. Η χρήση ηλεκτρικού κινητήρα ως πέδη (αντί των ωμικών αντιστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία) διευκόλυνε τη λήψη

μετρήσεων σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, αφού έτσι ο δρομέας δε σταματούσε σε αυτές τις ταχύτητες. Για το λόγο αυτό, οι τιμές των ταχυτήτων U που εξετάστηκαν σε κάθε πείραμα είναι διαφορετικές. Ωστόσο, μπορούν να γίνουν κάποιες συγκρίσεις μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων των δυο εργασιών και να εξαχθούν κάποια ποιοτικά συμπεράσματα.



Σχήμα 5.6: Καμπύλες C_p - λ που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις των João P. Monteiro, Miguel R. Silvestre, Hugh Piggott, Jorge C. André [60]

Παρατηρώντας λοιπόν τα **Σχήματα 5.6** και **5.5**, μπορούμε να εντοπίσουμε εύκολα τις μεγάλες διαφορές μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων στις τιμές των C_{pmax} των καμπυλών. Επίσης, με εξαίρεση τις καμπύλες $U=7m/s$ και $U=8m/s$ στα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας, οι υπόλοιπες καμπύλες παρουσιάζουν την ίδια τιμή λ_{max} (τιμή του λ για την οποία έχουμε το C_{pmax}). Αντίθετα, στις καμπύλες του **Σχήματος 5.6**, υπάρχει η μετατόπιση των καμπυλών προς μεγαλύτερα λ καθώς η ταχύτητα U μειώνεται, κατά αντιστοιχία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Ένα κοινό στοιχείο ωστόσο των δυο διαγραμμάτων έχει να κάνει με την περιοχή μεγάλων τιμών του λ . Εκεί οι καμπύλες και των δυο διαγραμμάτων παρουσιάζουν έντονη κλίση στενεύοντας έτσι το εύρος λειτουργίας της μηχανής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] International Energy Agency. CO2 emissions from fossil fuel combustion. Paris: IEA; 2012 [accessed 28.04.14], <http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>
- [2] International Energy Agency. World energy outlook. Paris: IEA; 2011 [accessed 03.05.14], http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2011_WEB.pdf
- [3] EWEA 2015, "Wind in Power: 2014 European Statistics"
- [4] Consortium for Sustainable Village-Based Development, http://www.villageearth.org/pages/Appropriate_Technology/ATSourcebook/Introduction.php
- [5] Hugh Piggott, "A Wind Turbine Recipe Book-The Axial Flux Windmill Plans-2009"
- [6] Αρθούρος Ζερβός, "Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας", 2008
- [7] Γεώργιος Μπεργελές, "Ανεμοκινητήρες", 2005
- [8] Αθανάσιος Ι. Γκράβας, " Μέτρηση της καμπύλης ισχύος μικρών ανεμογεννητριών και βελτιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενέργειας για εφαρμογές χαμηλού κόστους", Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π. 2011
- [9] Κοτσαμπόπουλος Π., "Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής", Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2010.

[10] Αθανάσιος Ζαρόγιαννης, “ Σχεδίαση, βελτιστοποίηση και προσομοίωση μικρών ανεμογεννητριών για εφαρμογές χαμηλού κόστους για σύνδεση στο δίκτυο.”, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π. 2012.

[11] Wei Shyy, Yongsheng Lian, Jian Tang, Dragos Vileru, Hao Liu, “Aerodynamics.of.low.reynolds.number.flyers-www.rahauav.com”, 2008

[12] Phellipe Giguere and Michael S. Selig, “Aerodynamic Effects of Leading-Edge Tape on Airfoils at Low Reynolds Numbers”, 1999

[13] J.B. Barlow, W.H. Rae, A. Pope, Low-speed wind tunnel testing, John Wiley & Sons, New York, 1999

[14] David Wood, ‘Analysis Design,Application , 2011

[15] Sonid K. Singh, M. Rafiuddin Ahmed, “ Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind”, 2012

[16] Δημήτρης Τουλούπης, “Πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς ταινιών αποκόλλησης και στροβιλογεννητριών”, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π. 2014

[17] João P. Monteiro, Miguel R. Silvestre, Hugh Piggott, Jorge C. André, “ Wind tunnel testing of a horizontal axis wind turbine rotor and”, 2013

[18] Γ.Π. Μητανίδης, “Δοκιμές στην αεροσήραγγα σε πτερυγιο και δρομέα ανεμογενήτριας”, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π. 2010

[19] Mark Drela, “An analysis and design system for low Reynolds number airfoils”

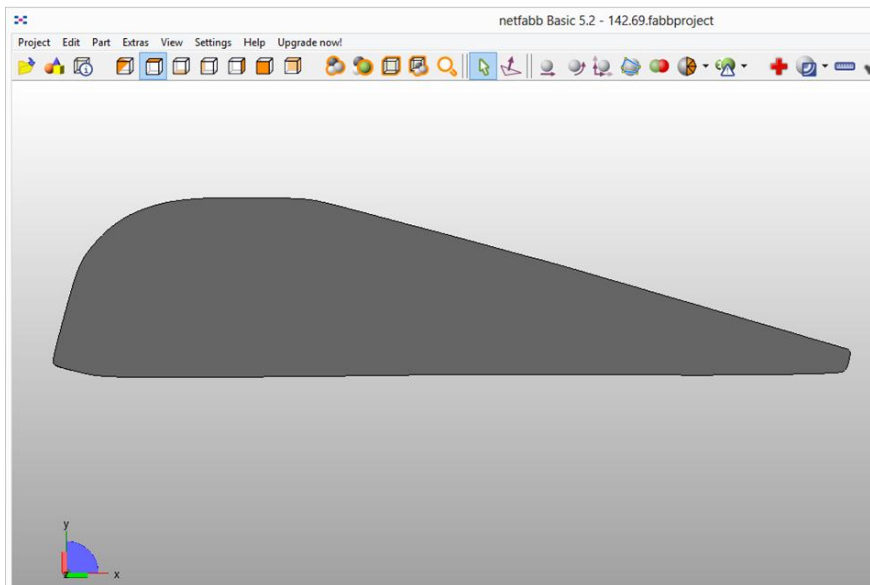
[20] F. Bauer, B. Garabedian, D. Korn and A. Jameson "Supercritical wing sections I, II, III. In *"Lecture Notes in Economics and Mathematics Systems"*, Springer-Verlag, New York 1972, 1975, 1977

[21] R. E. Melnik, R. R. Chow and H. R. Mead. "Theory of Viscous Transonic Flow over Airfoils at High Reynolds Number". AIAA-77-680, Jun 1977.

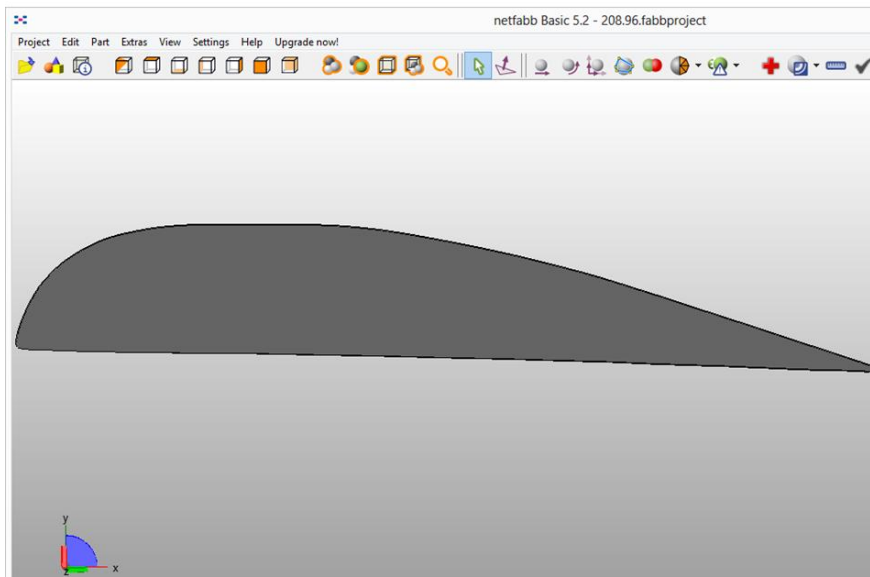
[22] M. Drela and M. B. Giles. "ISES: A two-dimensional viscous aerodynamic design and analysis code.". AIAA-87-0424, Jan 1987.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

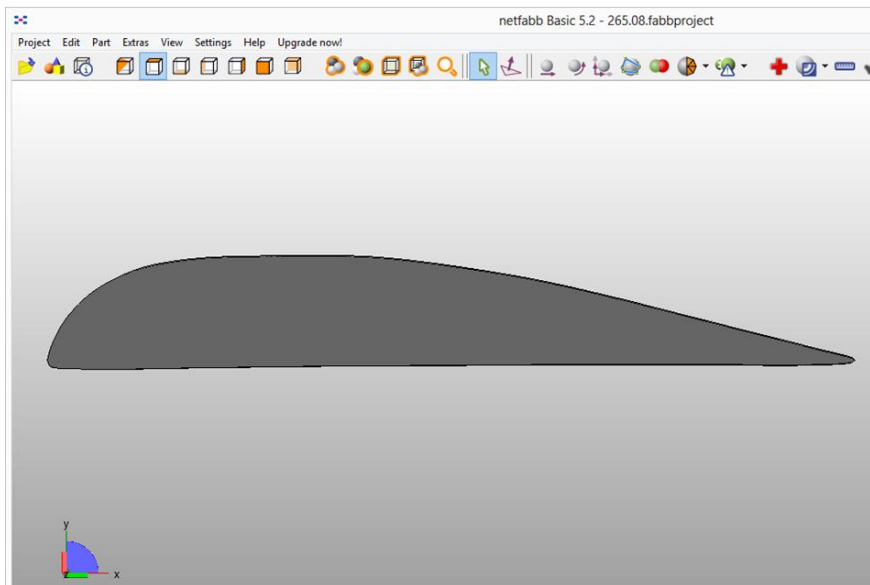
ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ ΤΟΥ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ



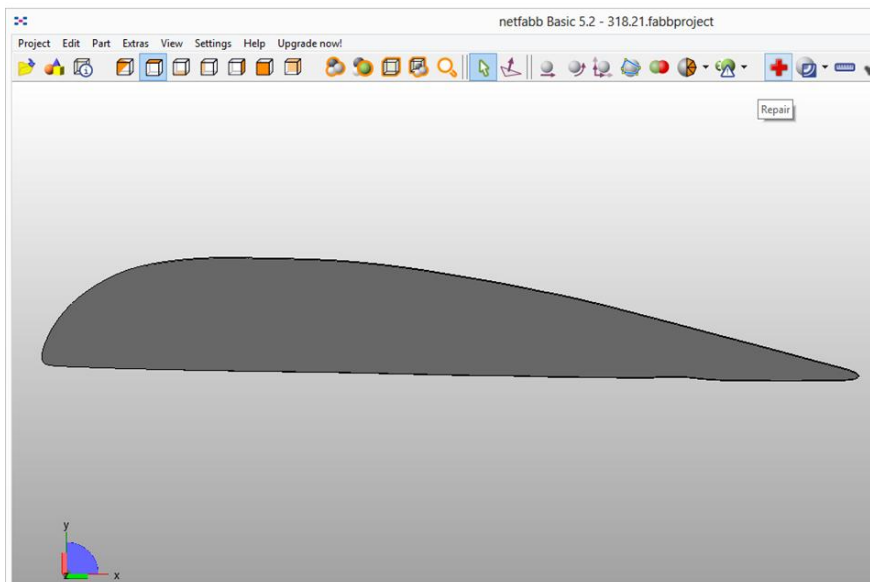
Σχήμα 1: Αεροτομή στη θέση $r=142mm$



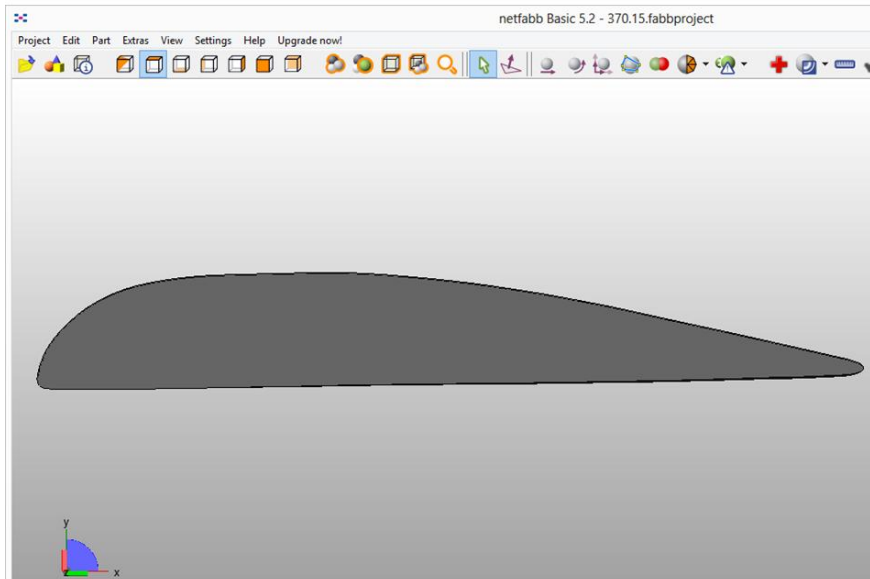
Σχήμα 2: Αεροτομή στη θέση $r=208mm$



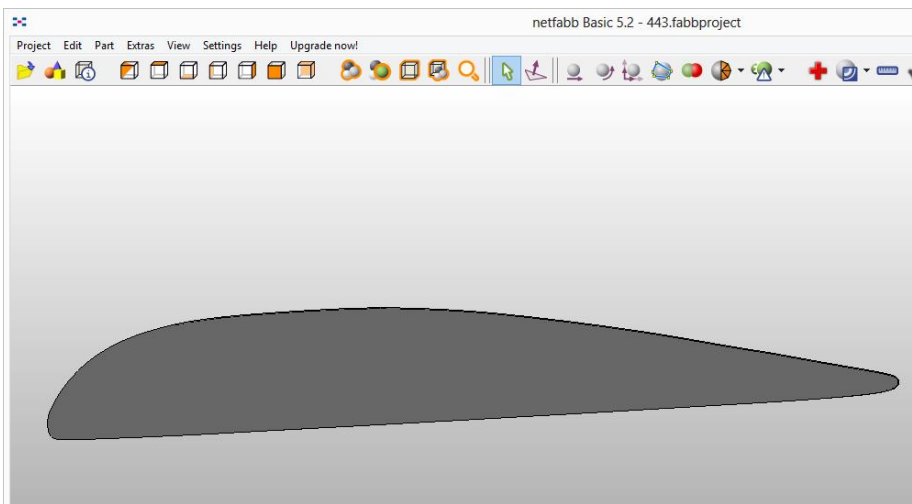
Σχήμα 3: Αεροτομή στη θέση $r=265mm$



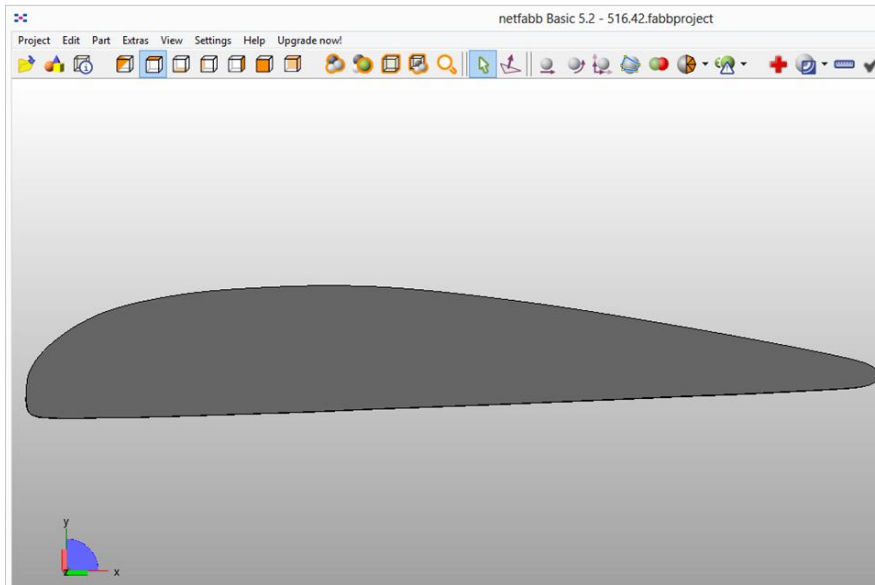
Σχήμα 4: Αεροτομή στη θέση $r=318mm$



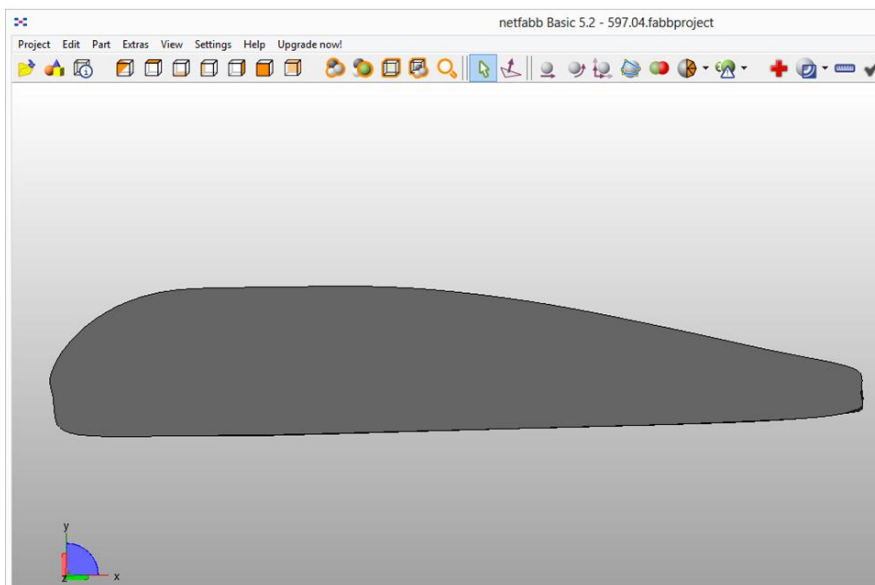
Σχήμα 5: Αεροτομή στη θέση $r=370\text{mm}$



Σχήμα 6: Αεροτομή στη θέση $r=443\text{mm}$



Σχήμα 7: Αεροτομή στη θέση $r=516mm$



Σχήμα 8: Αεροτομή στη θέση $r=597mm$ (tip).

Να σημειωθεί ότι η αεροτομή που φαίνεται στο **Σχήμα 8** απέχει αρκετά από τη γεωμετρία της αεροτομής στο tip του πτερυγίου. Για το λόγο αυτό, αφού εισάγαμε στο XFLR5 τη συγκεκριμένη αεροτομή, στη συνέχεια προσεγγίστηκε η καμπύλη της με splines μέσω της αντίστοιχης εντολής που διαθέτει το πρόγραμμα XFLR5. Στόχος ήταν η τελική καμπύλη να είναι πιο απότομη στην περιοχή του Trailing Edge και πιο ομαλή στην περιοχή του Leading Edge, φροντίζοντας ωστόσο να υπάρχει παράλληλα μια αναλογία της γεωμετρίας με τις υπόλοιπες αεροτομές.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ
NACA63-418 ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ**

Το προφίλ της αεροτομής διακριτοποιείται σε 60 πεπερασμένα στοιχεία (πάνελ), όσα δηλαδή και το πλήθος των στατικών πιέσεων που έχουμε μετρήσει πάνω στην αεροτομή. Η κατανομή της πίεσης είναι ομοιόμορφη μέσα σε κάθε πάνελ.

Με δεδομένες τις συντεταγμένες του προφίλ της αεροτομής (x,y) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης, φτιάχνουμε μέσω του μητρώου στροφής τις συντεταγμένες (x_{rot}, y_{rot}) για κάθε νέα γωνία πρόσπτωσης.

$$\begin{bmatrix} x_{rot} \\ y_{rot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Μπορούμε τώρα να προσδιορίσουμε τις συντεταγμένες των κέντρων των πάνελ καθώς και τις συντεταγμένες των καθέτων διανυσμάτων σε κάθε πάνελ (**Σχήμα 1**), τα οποία χρησιμεύουν για τον προσδιορισμό της δύναμης άνωσης και αντίστασης από την κατανομή πίεσης.

Αφού κάναμε τη διακριτοποίηση του χώρου προχωράμε στον υπολογισμό των συντελεστών πίεσης. Από κάθε μετρούμενη στατική πίεση αφαιρούμε την στατική πίεση της ελεύθερης ροής και προκύπτει μια διαφορική πίεση η οποία διαιρούμενη με τη δυναμική πίεση της ελεύθερης ροής μας δίνει τους συντελεστές πίεσης για κάθε μία από τις 60 οπές μέτρησης

$$Cp_i = \frac{p_{st,i} - p_{st,\infty}}{Q_\infty}, i = 1 \dots 60$$

Έπειτα ο υπολογισμός του συντελεστή πίεση στο κέντρο κάθε πάνελ γίνεται με τον απλό τύπο

$$Cp_{panel,i} = \frac{cp_{i+1} - cp_i}{2}, i = 1 \dots 59$$

Έχοντας τους συντελεστές πίεσης μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή άνωσης ως εξής

$$C_l = \sum_{i=1}^{59} Cp_{panel,i} \cdot n_{y,i} \cdot ds_i$$

όπου $n_{y,i}$ είναι το κάθετο στην επιφάνεια του πάνελ i διάνυσμα και το οποίο εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης, ενώ ds_i είναι το μήκος του πάνελ i .

Ο υπολογισμός του συντελεστή ροπής (θετικός όταν τείνει να αυξήσει τη γωνία πρόσπτωσης) γίνεται ως προς το σημείο αναφοράς $(x_{ref}, y_{ref}) = (0.25, 0)$ σύμφωνα με τη σχέση

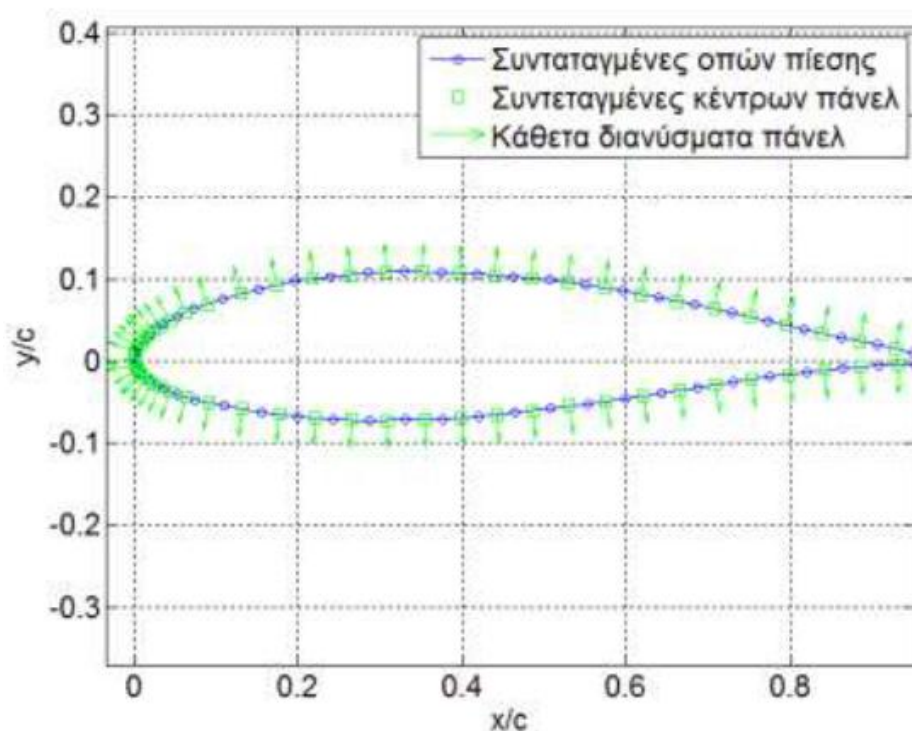
$$C_m = \sum_{i=1}^{59} \left[-C_{p_{panel,i}} \cdot n_{y,i} \cdot ds_i \cdot (x_{panel,rot,i} - x_{ref}) + C_{p_{panel,i}} \cdot n_{x,i} \cdot ds_i \cdot (y_{panel,rot,i} - y_{ref}) \right]$$

Όπου αντίστοιχα με πριν τα διανύσματα $n_{x,i}$ είναι παράλληλα στην επιφάνεια του πάνελ και εξαρτώνται και αυτά από τη γωνία πρόσπτωσης.

Ο τρόπος υπολογισμού του συντελεστή αντίστασης εξαρτάται από το αν η ροή γύρω από την αεροτομή είναι αποκολλημένη ή όχι. Αυτό γίνεται γιατί η μέθοδος του ομόρρου (wake rake) στην περίπτωση αποκολλημένης ροής δε μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης λόγω της ανακυκλοφορίας που συμβαίνει. Στην περίπτωση λοιπόν αποκολλημένης ροής, ο υπολογισμός του συντελεστή αντίστασης γίνεται μέσω του υπολογισμού της κατανομής πίεσης πάνω στην πτέρυγα.

Για τις γωνίες πρόσπτωσης στις οποίες έχουμε αποκόλληση της ροής, ο συνολικός συντελεστής αντίστασης ισούται πρακτικά με τον συντελεστή αντίστασης μορφής, αφού αυτός είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από τον συντελεστή αντίστασης λόγω συνεκτικότητας, δηλαδή $C_d = C_{dp}$. Έτσι, για τις γωνίες αυτές ο συντελεστής αντίστασης υπολογίζεται κατά αντιστοιχία με τον συντελεστή άνωσης από τον τύπο

$$C_{dp} = \sum_{i=1}^{59} C_{p_{panel,i}} \cdot n_{x,i} \cdot ds_i$$



Σχήμα 1: Διακριτοποίηση και κάθετα διανύσματα στην επιφάνεια της αεροτομής NACA 63-418.

Για τις γωνίες πρόσπτωσης στις οποίες δεν συμβαίνει αποκόλληση της ροής, ο συνολικός συντελεστής αντίστασης (λόγω πιέσεων και λόγω συνεκτικότητας) υπολογίζεται με τη βοήθεια του rake στον ομόρρου. Η διαδικασία έχει ως εξής:

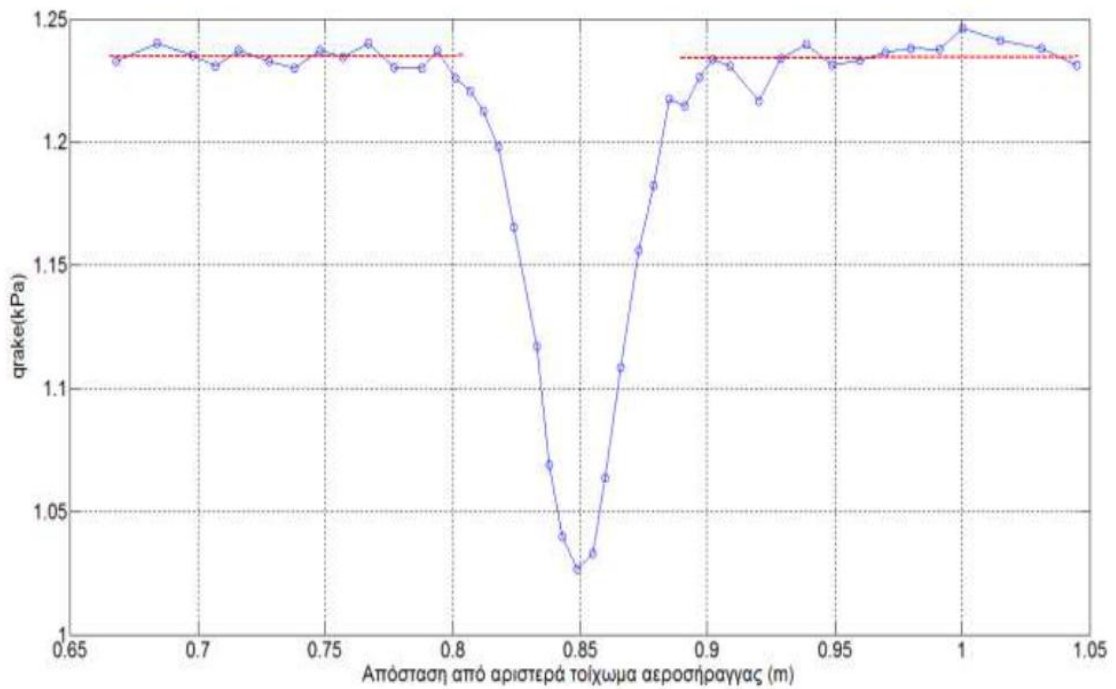
Υπολογίζουμε αρχικά μια ενιαία τιμή διαφορικής στατικής πίεσης για τον ομόρρου ως το ημίθροισμα των διαφορικών στατικών πιέσεων δεξιά και αριστερά του rake, λαμβάνοντας υπόψη και τη στατική πίεση κοντά στο τοίχωμα της αεροσήραγγας, δηλαδή

$$p_{st,rake} - p_{st,\infty} = \frac{(p_{st,rake,left} - p_{st,\infty}) + (p_{st,rake,right} - p_{st,\infty})}{2} - \left[(p_{st,rake,right} - p_{st,\infty}) - (p_{st,rake,wall} - p_{st,\infty}) \right]$$

Η τιμή αυτή της στατικής πίεσης του ομόρρου αφαιρούμενη από κάθε μια από τις 44 ολικές πιέσεις που έχουμε μετρήσει μας δίνει τις τιμές των δυναμικών πιέσεων, δηλαδή

$$(p_{tot, rake, i} - p_{st, \infty}) - (p_{st, rake} - p_{st, \infty}) = p_{tot, rake, i} - p_{st, rake} = q_{rake, i}, i = 1 \dots 44$$

Προκύπτει λοιπόν μία κατανομή δυναμικών πιέσεων q_{rake} όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2**.



Σχήμα 2: Κατανομή δυναμικών πιέσεων στον ομόρρο της NACA 63-418 για γωνία πρόσπτωσης 8° .

Από το σχήμα φαίνεται ότι η παρουσία της πτέρυγας στη ροή (solid blockage) επιφέρει μια απότομη μείωση της δυναμικής πίεσης στον ομόρρο. Μάλιστα, όσο απομακρυνόμαστε από τη μηδενική γωνία πρόσπτωσης η επιφάνεια του solidblockage που βρίσκεται μέσα στη ροή αυξάνει και η μείωση της δυναμικής πίεσης είναι ακόμη μεγαλύτερη. Σύμφωνα με τους JewelB. Barlow, WilliamH. Rae και AlanPope, για να υπολογίσουμε το συντελεστή αντίστασης πρέπει να κανονικοποιήσουμε τις δυναμικές πιέσεις με τη μέση τιμή των δυναμικών πιέσεων που βρίσκονται έξω από το solid blockage. Προκύπτουν έτσι οι αδιάστατες πιέσεις q_{norm} . Τελικώς, ο συντελεστής αντίστασης υπολογίζεται από τη σχέση

$$C_{d0} = \frac{1}{c} \int_{z_{left}}^{z_{right}} 2 \cdot (\sqrt{q_{norm}} - q_{norm}) \cdot dz$$

η οποία στην περίπτωσή μας γίνεται

$$C_{d0} = \sum_{i=1}^{44} 2 \cdot (\sqrt{q_{norm,i}} - q_{norm,i}) \cdot dz_i/c$$

Οι αεροδυναμικοί συντελεστές που προκύπτουν από τους πιο πάνω υπολογισμούς με ολοκλήρωση της κατανομής πιέσεων πάνω στην πτέρυγα δεν λαμβάνουν υπόψη τους την επίδραση της αεροσήραγγας στις τιμές των μετρούμενων πιέσεων. Σύμφωνα λοιπόν με [22], πρέπει να γίνουν οι εξής διορθώσεις στις τιμές των αεροδυναμικών συντελεστών και των γωνιών πρόσπτωσης:

-Υπολογίζουμε τον συντελεστή
$$\sigma = \frac{\left(\frac{c}{h}\right)^2}{48}$$

όπου c η χορδή και h η απόσταση του αεροδυναμικού κέντρου της πτέρυγας από το τοίχωμα της αεροσήραγγας (εδώ $h=1.8m$).

-Υπολογίζουμε το συντελεστή solidblockage

$$e_{sb} = \frac{k_1 \cdot V_m}{A^{3/2}}$$

όπου $k_1=0.52$ συντελεστής,

$$V_m = l \times w \times h = 0.5 \times 0.18 \cdot 0.5 \times 1, NACA 63 - 418$$

ο όγκος του μοντέλου της πτέρυγας και A η επιφάνεια της διατομής του testsection της αεροσήραγγας

- Για κάθε γωνία πρόσπτωσης υπολογίζουμε τον συντελεστή wakeblockage

$$e_{wb,i} = \frac{c \cdot C_{d,i}}{2h}$$

άρα και τον συνολικό συντελεστή $e_i = e_{sb} + e_{wb,i}$

- Τα διορθωμένα μεγέθη προκύπτουν από τις σχέσεις:

Γωνία πρόσπτωσης: $\alpha_{\text{corr},i} = \alpha_i + \frac{57.3 \cdot \sigma \cdot (C_{l,i} + 4C_{m,i})}{2\pi}$

Συντελεστής άνωσης: $C_{l,\text{corr},i} = C_{l,i} \cdot (1 - \sigma - 2e_i)$

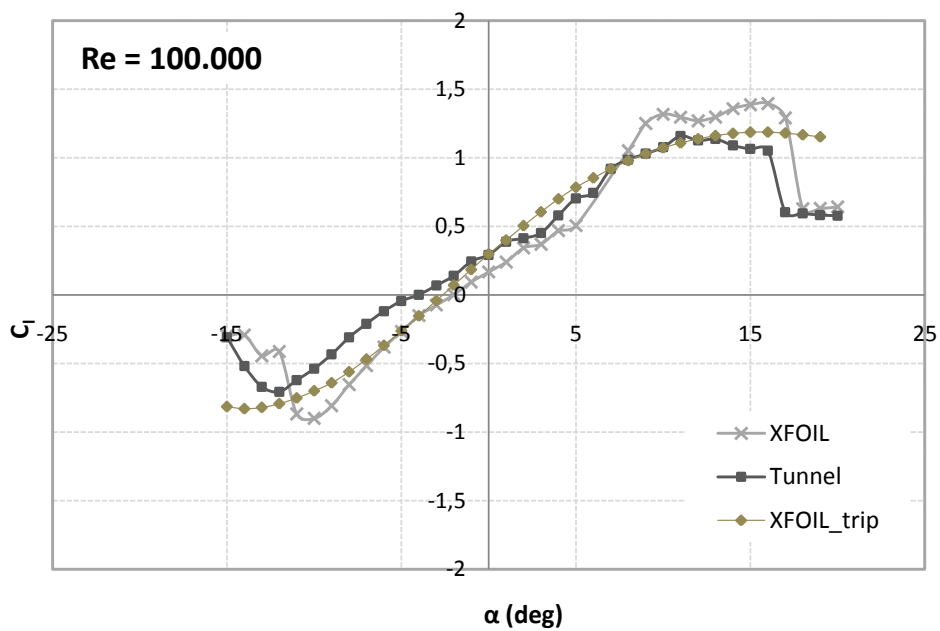
Συντελεστής αντίστασης: $C_{d,\text{corr},i} = C_{d,i} \cdot (1 - 3e_{sb} - 2e_{wb,i})$

Συντελεστής ροπής: $C_{m,\text{corr},i} = C_{m,i} \cdot (1 - 2e_1) + 0.25 \cdot \sigma \cdot C_{l,\text{corr},i}$

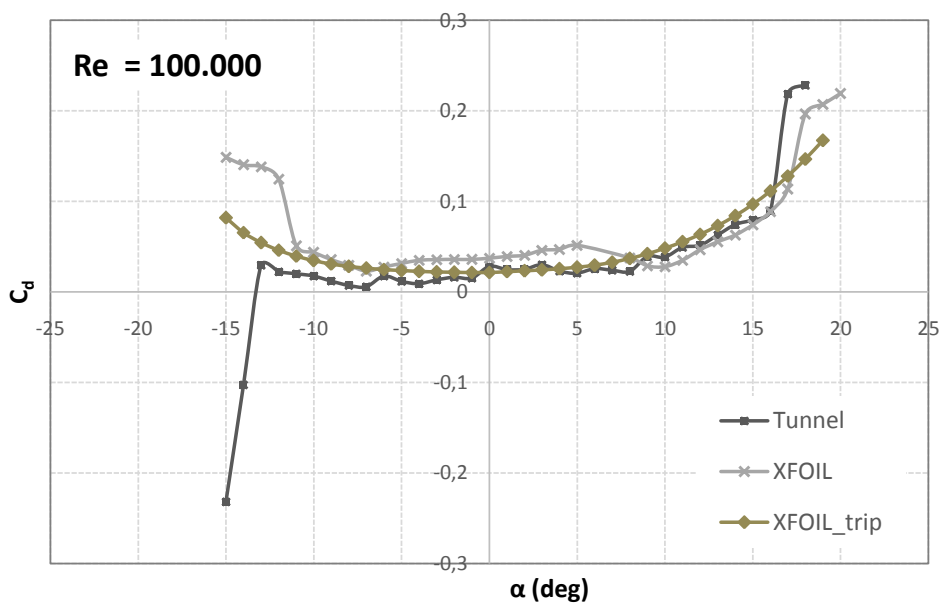
Οι παραπάνω υπολογισμοί (προσδιορισμός συντελεστών και διορθώσεις) επαναλαμβάνονται για κάθε γωνία πρόσπτωσης και για κάθε αριθμό Reynolds. Έτσι στο τέλος έχουμε υπολογίσει τα διαγράμματα C_p - α , C_l - α , C_d - α και C_m - α για κάθε Reynolds.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

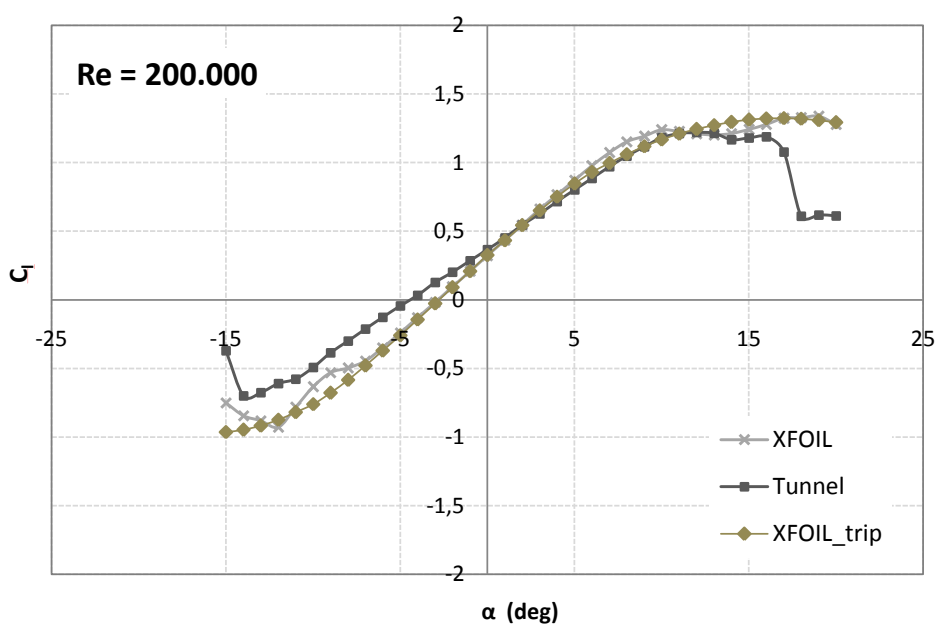
ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ TRIPPING



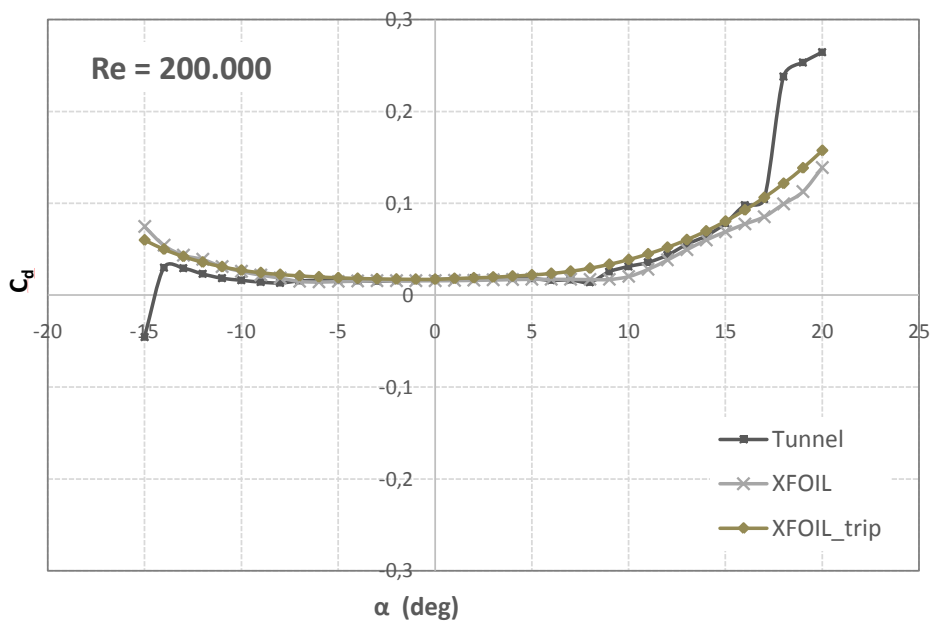
Σχήμα 1: Καμπύλες C_l - α με trip, χωρίς trip και πειραματική για $Re=100.000$.



Σχήμα 2: Καμπύλες C_d - α με trip, χωρίς trip και πειραματική για $Re=100.000$.



Σχήμα 3: Καμπύλες C_l - α με trip, χωρίς trip και πειραματική για $Re=200.000$.



Σχήμα 4: Καμπύλες C_d - α με trip, χωρίς trip και πειραματική για $Re=200.000$.

