

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ –
ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ (ΒΕΜ) ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ**

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ

Αρ. Μητρώου: 2

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Διπλωματική Εργασία του φοιτητή Αποστολόπουλου Νικόλαου. Εκπονήθηκε στο πλαίσιο των υποχρεώσεων που απορρέουν από τις σπουδές του στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας, με τίτλο: «Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας». Στην παρούσα εργασία γίνεται υπολογιστική μελέτη μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα με την μέθοδο στοιχείου πτερυγίου (BEM) και τελικός σκοπός είναι η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της.

Στα πρώτα Κεφάλαια της εργασίας γίνεται μια γενική εισαγωγή στην αιολική ενέργεια και στις ανεμογεννήτριες, στους μηχανισμούς που ευθύνονται για την παραγωγή ισχύος της ανεμογεννήτριας και σε κάποιες βασικές αρχές της αεροδυναμικής. Στη συνέχεια αναλύεται η μονοδιάστατη θεωρία στοιχείου - πτερυγίου (Blade Element Method – BEM), η οποία χρησιμοποιείται για να υπολογίσει την ισχύ μιας ανεμογεννήτριας σαν συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου. Τέλος, με τη βοήθεια του Matlab υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς από μια ανεμογεννήτρια, με δεδομένα λειτουργικά χαρακτηριστικά και δεδομένη αεροτομή.

Για την ολοκλήρωση της εργασίας ήταν πολύτιμη η βοήθεια του Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Νικόλαου Σχοινά, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., τον οποίο ευχαριστώ θερμά.

Αποστολόπουλος Νικόλαος
Πάτρα 2016

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο φοιτητής
Αποστολόπουλος Νικόλαος

.....
(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν πόνημα αποτελεί την διπλωματική εργασία του φοιτητή Αποστολόπουλου Νικόλαου. Εκπονήθηκε στο πλαίσιο των υποχρεώσεων που απορρέουν από τις σπουδές του στο τμήμα Μηχανολόγων του Ανώτατου Τεχνολογικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδος. Σκοπός της Διπλωματικής αυτής εργασίας είναι να αναλύσει τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα, πιο συγκεκριμένα η ανάλυση των δυνάμεων που δημιουργούνται λόγω της ροής του ανέμου διαμέσου του ρότορα της ανεμογεννήτριας και ανάλυση των φορτίων που προκύπτουν. Η εργασία στηρίζεται σε βασικές αρχές τόσο της Φυσικής όσο και της Τεχνολογίας που αφορούν στην εκμετάλλευση της Αιολικής Ενέργειας και χωρίζεται σε επτά κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική εισαγωγή στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας και στις ανεμογεννήτριες, καθώς επίσης και μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση με τα πιο βασικά επιτεύγματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της αεροδυναμικής. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τις αεροτομές, δίνονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αεροτομής και σχολιάζεται η τυποποίησή τους. Στη συνέχεια σχολιάζονται οι αεροτομές που θα χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, η NACA 0012, η NACA 63₂-615 και η S809.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται το προφίλ του συστήματος στροβίλων που δημιουργείται κατά την κίνηση των πτερυγίων, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι στρόβιλοι αυτοί τη ροή και τις πτέρυγες της ανεμογεννήτριας.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναλύει τις θεωρίες υπολογισμού των ανεμογεννητριών, οι οποίες είναι η θεωρία του δίσκου δράσης, η θεωρία του βέλτιστου δίσκου δράσης για ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (Glauert), η θεωρία αξονικής ορμής (Rankine-Froude Theory), η γενική θεωρία ορμής με περιστρεφόμενο απόρρευμα, η θεωρία στοιχείου – πτερυγίου και η μέθοδος των πλαισίων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα και στο έκτο κεφάλαιο τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση στο Matlab. Μελετήθηκαν δίπτερες και τρίπτερες ανεμογεννήτριες, με πτερύγια από αεροτομές NACA 0012, S809 και NACA 63₂-615 για ταχύτητες ανέμου 8 m/s, 9m/s και 10m/s.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα συμπεράσματα. Συμπερασματικά, προέκυψε πως την καλύτερη απόδοση την έχει η αεροτομή S809, τόσο σε διπτέρυγη όσο και σε τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια και πως οι ανεμογεννήτριες που ο ρότορας τους αποτελείται από τρία πτερύγια έχουν μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	v
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	vii
1 ΓΕΝΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	1
1.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	1
1.3 ΤΑ ΟΦΕΛΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	3
1.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	4
1.5 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	4
2 ΒΑΣΙΚΗ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ.....	9
2.1 ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ	9
2.1.1 ΒΑΣΙΚΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ.....	9
2.1.1.1 Τυποποίηση αεροτομών.....	10
2.2 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	13
2.2.1 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ.....	14
3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ.....	23
4 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ	27
4.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	27
4.2 ΘΕΩΡΙΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	28
4.2.1 ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ΔΡΑΣΗΣ.....	29
4.2.2 ΘΕΩΡΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ.....	29
4.2.3 ΘΕΩΡΙΑ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΟΡΜΗΣ Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ RANKINE-FROUDE....	33
4.2.4 ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΟΡΜΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΑΠΟΡΕΥΜΑ	35
4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ-ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ (ΒΕΜ).....	39
4.3.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΑΚΡΟΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΤΟΥ PRANDTL (TIP-LOSS FACTOR).....	47
4.3.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΟΥ GLAUERT ΓΙΑ ΥΨΗΛΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ A 48	
5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΡΟΤΟΡΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ... ΑΞΟΝΑ.....	51
5.1 ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ	51
5.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	64
5.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	67

6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΤΛΑΒ.....	77
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	91
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	95

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αιολική ενέργεια αποτελεί αναμφίβολα μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική μορφή ενέργειας. Δεδομένου ότι τα αποθέματα των συμβατικών καυσίμων είναι πλέον φανερό ότι έχουν ημερομηνία λήξης, η αξιοποίησή της αιολικής ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη ανεξαρτητοποίηση από την περπατημένη πετρελαϊκή οδό. Επιπλέον κίνητρα για την εφαρμογή της αποτελούν ο φιλικός ως προς το περιβάλλον χαρακτήρας της καθώς και η ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας που βοηθά στη μέγιστη αξιοποίησή της.

Η κατανόηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής θα έχει πάντα ένα χαρακτήρα στοχαστικό. Έτσι, η απόδοση της ισχύος παρόλες τις στατιστικές μελέτες γίνεται μόνο όταν η φύση το επιτρέπει. Αυτό, σε συνδυασμό με τους κατασκευαστικούς περιορισμούς και το όριο το οποίο καθορίστηκε από τον Betz, το οποίο δηλώνει πως το μέγιστο ποσοστό της συνολικής ισχύος του ανέμου που μπορεί να συλλεχθεί μηχανικά είναι της τάξεως του 59%, δεν επιτρέπουν στην αιολική ενέργεια να καταστεί πρωτοπόρα τεχνολογία στον ενεργειακό τομέα.

Από κατασκευαστικής άποψης, η ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα βασίζεται στην εκμετάλλευση της δύναμης της άνωσης για την παραγωγή ισχύος. Η ταχύτητα του ανέμου V_0 και η επιφάνεια του ρότορα A είναι τα δύο βασικά μεγέθη από τα οποία εξαρτάται η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας. Συνεπώς, το πρώτο πράγμα που πρέπει να εκτιμηθεί στην τοποθεσία ενδιαφέροντος είναι το προφίλ του αιολικού δυναμικού.

Ο ρότορας της ανεμογεννήτριας είναι το βασικό αντικείμενο τεχνολογικού ενδιαφέροντος μέχρι και σήμερα και είναι το τμήμα της εγκατάστασης που έχει δεχθεί την μεγαλύτερη εξέλιξη στο πέρασμα των χρόνων. Ξεχωριστοί κλάδοι επιστήμης που αποσκοπούν στη βελτίωση της απόδοσης των ανεμογεννητριών παρουσιάζουν συνεχώς υλικά και νέα τεχνολογικά επιτεύγματα που αφορούν στον σχεδιασμό των αεροτομών και των πτερυγίων.

1 ΓΕΝΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Προτού ξεκινήσει η ανάλυση θα γίνει μια γενική εισαγωγή στα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών. Θα γίνει μια ιστορική αναδρομή της αιολικής ενέργειας δίνοντας μερικά ιστορικά χαρακτηριστικά και παραδείγματα για την εκμετάλλευση του ανέμου.

1.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Από το πέρασμα ενός τυφώνα ή ενός κυκλώνα και από το μέγεθος των καταστροφών που επέρχονται είναι φανερό ότι η ισχύς του ανέμου μπορεί να είναι πολύ μεγάλη. Πριν την ανακάλυψη των ατμομηχανών και μηχανών εσωτερικής καύσης οι άνθρωποι αξιοποίησαν αυτή την ισχύ. Η σημαντικότερη εφαρμογή της ήταν η κίνηση των πλοίων με τη βοήθεια πανιών. Έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την προστασία από πλημμύρες σε περιοχές που βρίσκονταν κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, στους ανεμόμυλους για την άλεση του σιταριού και για την άντληση νερού με σκοπό την ύδρευση. Αργότερα, κατά τον 20^ο αιώνα, ξεκίνησε να χρησιμοποιείται η ηλεκτρική ενέργεια και οι ανεμόμυλοι εξελίχθηκαν σε ανεμογεννήτριες.

Επειδή τα πρώτα ηλεκτρικά δίκτυα αποτελούνταν από καλώδια χαμηλής τάσης συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος, παρουσίαζαν μεγάλες ενεργειακές απώλειες. Συνεπώς, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας θα έπρεπε να γίνει κοντά στην περιοχή όπου θα καταναλωθεί, γεγονός που βοήθησε την εγκατάσταση μικρών ανεμογεννητριών σε αγροτικές εκτάσεις. Σταδιακά όμως η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γινόταν από μηχανές diesel και ατμομηχανές. Η αιολική ενέργεια άνησε ξανά κατά τη διάρκεια των παγκοσμίων πολέμων, επειδή εκείνη την περίοδο ήταν δύσκολη η προμήθεια καυσίμου.

Ωστόσο, μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, έγιναν σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη αποδοτικότερων ανεμογεννητριών από πολλές χώρες όπως η Γερμανία, η Γαλλία, η Αγγλία και η Δανία. Στη Δανία συγκεκριμένα, στα μέσα του 1950, ο Johannes Juul κατασκεύασε την διάσημη ανεμογεννήτρια Gedser και εισήγαγε αυτό που αργότερα ονομάστηκε Δανικό πρότυπο ανεμογεννητριών. Αυτή η ανεμογεννήτρια ήταν συνδεδεμένη σε μία ασύγχρονη γεννήτρια μη συνεχούς ρεύματος, το ρότορα της αποτελούνταν από τρία πτερύγια τα οποία ήταν προσανατολισμένα αντίθετα στη κατεύθυνση του ανέμου και κινούνταν με συνεχή ταχύτητα περιστροφής.

Αργότερα, με την πετρελαϊκή κρίση το 1973, πολλές χώρες που ήθελαν να γίνουν λιγότερο εξαρτημένες πετρελαϊκά προσανατολίστηκαν ξανά στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Τότε ξεκίνησαν διεθνή προγράμματα, με σκοπό την έρευνα σχετικά με τις χρήσεις της αιολικής ενέργειας. Για αυτό το σκοπό

κατασκευάστηκαν υπερμεγέθη πρωτότυπα για να αξιολογηθούν οι οικονομικοί παράγοντες καθώς και για να μετρηθούν τα φορτία στις ανεμογεννήτριες.

Οι ετήσιες εισπράξεις από τις ανεμογεννήτριες μετά την πετρελαϊκή κρίση, συγκεκριμένα κατά την δεκαετία του 1990, ξεπέρασαν τα 1×10^9 δολάρια. Στα τέλη του 1990, οι ανεμογεννήτριες γίνονταν όλο και μεγαλύτερες, και το ετήσιο εισόδημα αυξανόταν περίπου κατά 20% το χρόνο.

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι χρονιές σταθμοί της πορείας εξέλιξης του ανεμόμυλου.

1200 μΧ	Ανεμόμυλοι οριζοντίου άξονα χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη για το άλεσμα του σιταριού.
1500	Στα πεδινά της Ολλανδίας εμφανίζονται οι πρώτοι ανεμόμυλοι. Ο Don Quixote τους φέρνει στην Ισπανία.
1600	Άποικοι κατασκευάζουν ανεμόμυλους ευρωπαϊκού τύπου στα ανατολικά παράλια τη Αμερικής.
1700	Οι ατμομηχανές αρχίζουν να αντικαταστούν τους ανεμόμυλους.
1860	Οι Αμερικανοί κατασκευάζουν πολυπτερυγους ανεμόμυλους (multi-Bladed), για να χρησιμοποιηθούν στην κίνηση αντλιών.
1870	Το Σικάγο γίνεται κέντρο βιομηχανικής παραγωγής ανεμόμυλων.
1900	Οι Δανοί παράγουν ηλεκτρισμό από τον άνεμο.
1920	Ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής χρησιμοποιούνται στην Αμερική.
1930	Οι ανεμόμυλοι στις αγροτικές περιοχές αντικαθίστανται από την επέκταση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.
1940	Στο Vermont (Η.Π.Α.) κατασκευάζεται για πρώτη φορά πειραματική ανεμογεννήτρια αρκετά μεγάλης ισχύος με δύο πτερύγια.
1950	Η ατομική ενέργεια μειώνει το ενδιαφέρον για χρησιμοποίηση της αιολικής ενέργειας.
1960	Η μόλυνση του περιβάλλοντος από τις υπάρχουσες πηγές ενέργειας (άνθρακας - πετρέλαιο) αρχίζει να γίνεται έντονη.
1970	Η έλλειψη καυσίμων αναζωογονεί το ενδιαφέρον για αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου.
1976	Τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες διαθέτουν για πρώτη φορά μεγάλο ύψος χρημάτων για προγράμματα γύρω από την τεχνοοικονομική διερεύνηση των ανεμογεννητριών.
1983	Κατασκευή ανεμογεννητριών ισχύος 3 MW.
1990	Κατασκευή ανεμογεννητριών ισχύος 7 MW.

Πίνακας 1.1: Χρονιές σταθμοί της πορείας εξέλιξης του ανεμόμυλου

1.3 ΤΑ ΟΦΕΛΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όταν χρησιμοποιούνται εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως η αιολική ενέργεια μία χώρα ή μία περιοχή, αυτή γίνεται πιο αυτόνομη παρόλο που ενεργειακά βασίζεται στην εισαγωγή πετρελαίου. Επιπροσθέτως, οι ανεμογεννήτριες δεν δημιουργούν ρύπους όπως το CO_2 επομένως δεν συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η αιολική ενέργεια με την λειτουργία της δημιουργεί επιπρόσθετες νέες θέσεις εργασίας.

Σε απομακρυσμένες περιοχές η αιολική ενέργεια σε συνδυασμό με μία μηχανή diesel (Υβριδικό Σύστημα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση μπαταριών ή την απευθείας τροφοδότηση ενός αδύναμου ηλεκτρικού δικτύου. Επιπλέον σε περιοχές της Μέσης Ανατολής οι ανεμογεννήτριες μπορούν να συμβάλλουν στην αφαλάτωση του νερού και την αύξηση των αποθεμάτων των περιοχών αυτών. Σε περιοχές όπου πνέουν έντομοι άνεμοι, τόσο η τιμή όσο και η ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την αιολική ενέργεια, μπορεί να συγκριθεί με την ενέργεια που παράγεται από τις παραδοσιακές και πιο ρυπογόνες μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Βέβαια, για να γίνει η αιολική ενέργεια πιο ανταγωνιστική, οι κατασκευαστές προσανατολίζονται στη μείωση του κόστους της ίδιας της ανεμογεννήτριας. Παράγοντες όπως τα επιτόκια, η αξία της γης και ο αναμενόμενος άνεμος στην περιοχή εγκατάστασης επηρεάζουν το κόστος της παραγόμενης ενέργειας. Γνωρίζοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας και το προσδοκώμενο αιολικό δυναμικό της περιοχής είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε την ετήσια ενεργειακή παραγωγή στη συγκεκριμένη περιοχή.

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών είναι ο θόρυβος. Οι κατασκευαστές κατάφεραν να μειώσουν το μηχανικό θόρυβο καθώς και το θόρυβο κατά την περιστροφή των πτερυγίων. Με αυτό τον τρόπο αναπτύχθηκαν πιο φιλικές ανεμογεννήτριες με απώτερο σκοπό την χρησιμοποίησή τους κοντά σε κατοικημένες περιοχές.

Σε περίπτωση τοποθέτησης μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών σε ένα χώρο ή σε μια κατοικημένη περιοχή υπάρχει η άποψη ότι οι ανεμογεννήτριες χαλάνε την αισθητική. Όμως επειδή με την πάροδο των ετών αυξάνεται η απόδοση τους παράλληλα με το μέγεθος τους, θα πρέπει οι μηχανές αυτές να γίνουν αποδεκτές από τους κατοίκους των περιοχών αυτών. Για την επίτευξη αυτού του στόχου θα πρέπει να δοθούν κάποια κίνητρα όπως η παραχώρηση στους κατοίκους μέρους της εγκατάστασης και μέρος του συνολικού εισοδήματος. Με αυτό τον τρόπο ο υπάρχον θόρυβος και η ακαλαισθησία των μηχανών αυτών στο μέλλον θα γίνουν λιγότερο σημαντικά.

Το κυριότερο όμως πρόβλημα είναι ότι η αιολική ενέργεια μπορεί να παραχθεί μόνον όταν η φύση το επιτρέπει με αποτέλεσμα περιοχές με αυτόνομα αιολικά δίκτυα να ενδέχεται να αντιμετωπίσουν προβλήματα ηλεκτροδότησης. Αυτό δε συμβαίνει όμως στις περιπτώσεις που οι περιοχές αυτές είναι συνδεδεμένες σε μεγάλα ηλεκτρικά δίκτυα, επειδή σε περίπτωση απουσίας ανέμου μπορούν να προμηθευτούν ηλεκτρισμό από το δίκτυο.

Εξαιτίας της μείωσης των ρυπογόνων ενεργειακών αποθεμάτων και της αύξησης των ρύπων η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κατά περίπτωση της ηλεκτρικής ενέργειας από την αιολική είναι μια χρήσιμη προσθήκη

στο ενεργειακό ισοζύγιο που ταλαντεύεται ανάμεσα στον σύγχρονο τρόπο ζωής και την ενεργειακή απομάστευση του πλανήτη.

1.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Σε μία ανεμογεννήτρια μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική και στο τέλος σε ηλεκτρική. Μέγιστη διαθέσιμη ισχύ P_{max} έχουμε όταν η ταχύτητα του ανέμου, εξερχόμενη από το ρότορα, γίνεται μηδέν. Η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς δίνεται από την σχέση:

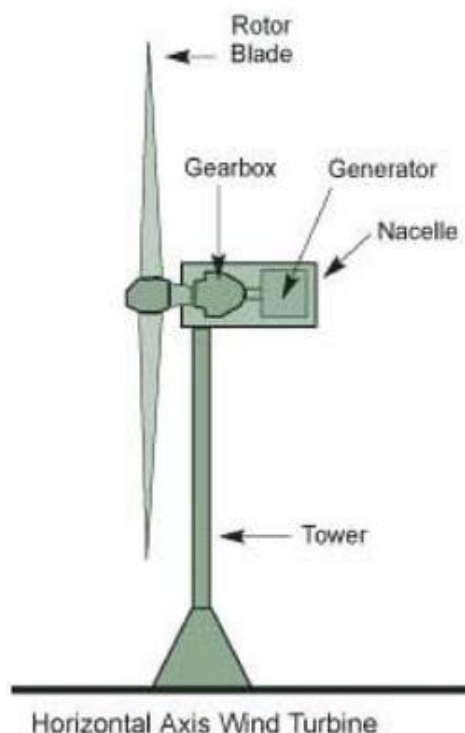
$$P_{max} = \frac{1}{2} \dot{m} V_0^2 = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 \quad (1.1)$$

όπου \dot{m} η παροχή μάζας, V_0 η ταχύτητα του ανέμου, ρ η πυκνότητα του αέρα και A η επιφάνεια προσβολής. Η σχέση αυτή μας λέει ότι η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς συνδέεται γραμμικά με την πυκνότητα και την επιφάνεια και είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ανέμου στον κύβο. Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές πως για συγκεκριμένη χρονική περίοδο και πριν την έναρξη της κατασκευής της εγκατάστασης, η διαθέσιμη ταχύτητα του ανέμου στη συγκεκριμένη περιοχή τοποθέτησης είναι το πρώτο πράγμα που πρέπει να εκτιμηθεί.

Ο συντελεστής ισχύος C_p ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ισχύος προς την μέγιστη γιατί στην πράξη η ελάττωση της ταχύτητας του ανέμου στο μηδέν δεν είναι εφικτή. Ο μέγιστος θεωρητικός συντελεστής ισχύος C_p , ο οποίος είναι γνωστός και ως όριο του Betz, είναι ο $C_{pmax} = 16/27 = 0.593$. Πολλές ανεμογεννήτριες λειτουργούν κοντά σε αυτό το όριο με τιμές του C_p περίπου μέχρι και 0.5. Ωστόσο η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται και από τη τοποθέτηση των ανεμογεννητριών.

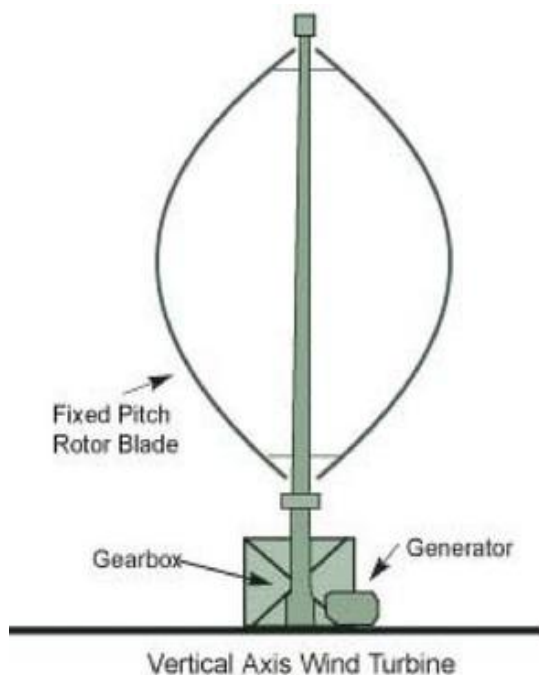
1.5 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Έχει παρατηρηθεί ότι για την ώθηση των πλοίων η άνωση έχει το πλεονέκτημα έναντι της δύναμης της αντίστασης (οπισθέλκουσας) του ανέμου. Είναι εύκολο να αποδείξουμε θεωρητικά ότι η άνωση η οποία έχει κατεύθυνση κάθετη στην ταχύτητα του ανέμου είναι πιο αποδοτική η χρήση της για την απομάστευση της ισχύος του ανέμου παρά η αντίσταση η οποία είναι παράλληλη με αυτόν. Συνεπώς τα πτερύγια σε σχήμα προπέλας έχουν κυριαρχήσει σε όλες τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (Horizontal Axis Wind Turbines – HAWT) (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα

Στην περίπτωση ανεμογεννήτριας τύπου κατακόρυφου άξονα (Vertical Axis Wind Turbines – VAWT) (Εικόνα 1.2) τα πτερύγια είναι συνδεδεμένα σε άξονα κάθετο στη ροή του ανέμου, ενώ στην ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα τα πτερύγια συνδέονται σε άξονα παράλληλο στη ροή του αέρα. Επειδή επικρατέστερος είναι ο δεύτερος τύπος θα επικεντρωθούμε σε αυτόν στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 1.2: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα

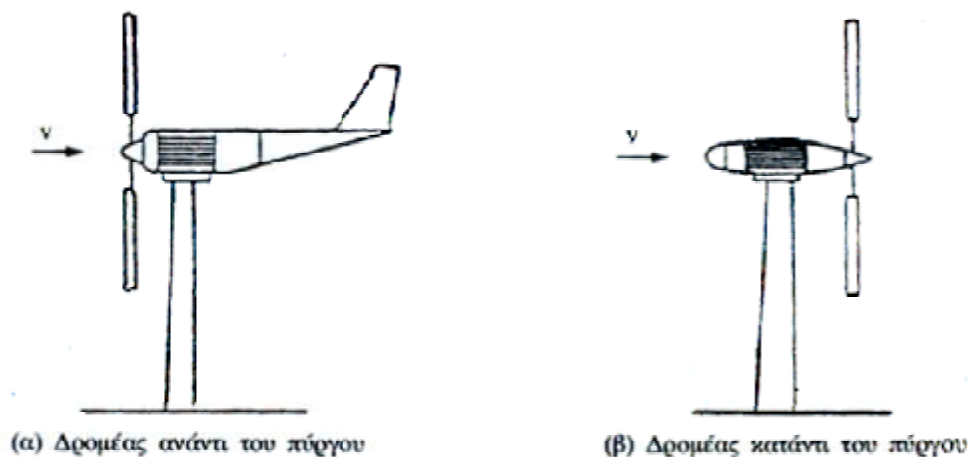
Το ύψος του πύργου, η διάμετρος του ρότορα, η ονομαστική ισχύς, ο αριθμός των πτερυγίων και το σύστημα ελέγχου είναι τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη σε μια ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα. Το ύψος του πύργου είναι πολύ σημαντικό διότι η προσδοκώμενη ταχύτητα και η ποιότητα της ροής του αέρα αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το έδαφος. Η διάμετρος του ρότορα είναι εξίσου σημαντική διότι από αυτή καθορίζεται η επιφάνεια προσβολής A που είναι ο παράγοντας της σχέσης της αποδιδόμενης ισχύος P_{max} .

Ο λόγος της διαμέτρου του ρότορα D προς την απόσταση του άξονα περιστροφής του ρότορα από το έδαφος H , πλησιάζει συχνά τη μονάδα. Σε περίπτωση δυνατών ανέμων το σύστημα ελέγχου θα πρέπει να διασφαλίζει ότι η ονομαστική ισχύς είναι η μέγιστη ισχύς που θα επιτραπεί από τη γεννήτρια της ανεμογεννήτριας και αυτή δεν θα πρέπει να ξεπεραστεί.

Ο ρότορας των ανεμογεννητριών σύγχρονου τύπου αποτελείται συνήθως από δύο ή τρία πτερύγια. Η ανεμογεννήτρια δύο πτερυγίων περιστρέφεται με μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα και είναι φθηνότερη επειδή έχει ένα πτερύγιο λιγότερο, ενώ η τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια είναι ακριβότερη, φαντάζει πιο σταθερή και είναι περισσότερο προσιτή από το ανθρώπινο μάτι λόγω της μικρότερης ταχύτητας περιστροφής.

Από αεροδυναμικής απόψεως, η τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια έχει υψηλότερη απόδοση από την διπτέρυγη. Για το λόγο αυτό οι διπτέρυγες ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως το ρότορα τοποθετημένο πίσω από τον πύργο, με άλλα λόγια κατάντη (Εικόνα 1.3). Επιπλέον, η σύνδεση του ρότορα με τον άξονα γίνεται μέσω ενός ελαστικού συνδέσμου, ο οποίος συνήθως είναι από καουτσούκ, για την απορρόφηση των κραδασμών και την αποφυγή μεταφοράς των ροπών κάμψης από τον ρότορα στον άξονα.

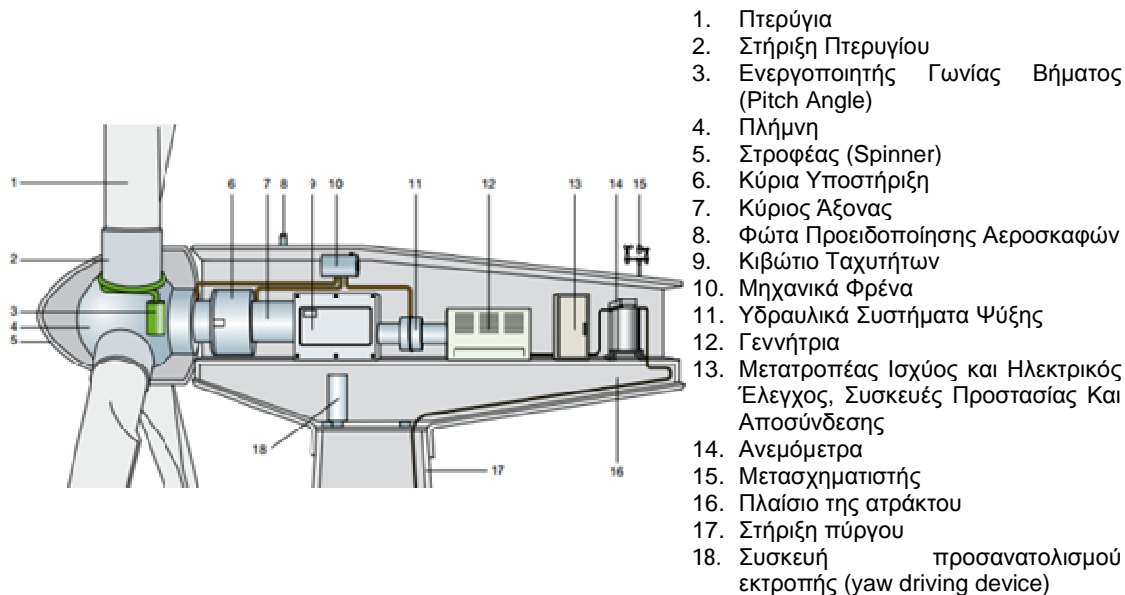
Μια τέτοια κατασκευή είναι πιο ελαστική αν συγκριθεί με τον τριπτέρυγο άκαμπτο ρότορα, με αποτέλεσμα, να μπορεί να μειωθεί το κόστος του συνόλου της ανεμογεννήτριας, επειδή ορισμένα από τα εξαρτήματα της πτερωτής μπορούν να φτιαχτούν μικρότερα και πιο ελαφριά. Εάν γίνει όμως αυτό, θα πρέπει ταυτόχρονα να εξασφαλισθεί η ευστάθεια του ελαστικού ρότορα.



Εικόνα 1.3: Θέση ρότορα ως προς πύργο.

Οι κατάντη ανεμογεννήτριες παράγουν πιο πολύ θόρυβο από τους ανάντη καθώς, σε μια περιστροφή κάθε πτερυγίου κατά 360° , παράγεται ένας θόρυβος χαμηλής συχνότητας που ακολουθεί το απόρρευμα πίσω από τον πύργο. Η ταχύτητα περιστροφής των περισσότερων γεννητριών αρχίζει από 1000 έως και 3000 rpm ενώ

του ρότορα κυμαίνεται από 20 έως 50 rpm. Εξαιτίας αυτής της διαφοράς επιβάλλεται η τοποθέτηση ενός κιβωτίου ταχυτήτων ανάμεσα στον άξονα του ρότορα και τον άξονα της γεννήτριας. Υπάρχουν ωστόσο και ανεμογεννήτριες των οποίων ο άξονας στρέφεται με αρκετά μικρή ταχύτητα ώστε να μην χρειάζεται κιβώτιο επειδή είναι εξοπλισμένες με πολυπολικές γεννήτριες. Η διάταξη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.4.



1. Πτερύγια
2. Στήριξη Πτερυγίου
3. Ενεργοποιητής Γωνίας Βήματος (Pitch Angle)
4. Πλήμνη
5. Στροφέας (Spinner)
6. Κύρια Υποστήριξη
7. Κύριος Άξονας
8. Φώτα Προειδοποίησης Αεροσκαφών
9. Κιβώτιο Ταχυτήτων
10. Μηχανικά Φρένα
11. Υδραυλικά Συστήματα Ψύξης
12. Γεννήτρια
13. Μετατροπέας Ισχύος και Ηλεκτρικός Έλεγχος, Συσκευές Προστασίας Και Αποσύνδεσης
14. Ανεμόμετρα
15. Μετασχηματιστής
16. Πλαίσιο της ατράκτου
17. Στήριξη πύργου
18. Συσκευή προσανατολισμού εκτροπής (yaw driving device)

Εικόνα 1.4: Διάταξη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας

Η ιδανική ανεμογεννήτρια έχει προσανατολισμένο το ρότορα πάντα κάθετα προς τον άνεμο. Έτσι, προσαρμόζεται στις ανεμογεννήτριες ένας ανεμοδείκτης για να μετράται η κατεύθυνση του ανέμου και ενδεχόμενες αλλαγές του. Για τον προσανατολισμό των ανεμογεννητριών μικρής ισχύος γίνεται χρήση ενός πτερυγίου κατεύθυνσης, ενώ στις ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος χρησιμοποιείται το σήμα από τον ανεμοδείκτη και κατευθύνει την ανεμογεννήτρια με τη βοήθεια σερβομηχανισμού.

Τα τελευταία χρόνια, το τμήμα της ανεμογεννήτριας που έχει εξελιχθεί περισσότερο είναι ο ρότορας. Επειδή οι γωνίες προσβολής που δέχονταν τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας είναι πολύ μεγάλες, οι αεροτομές που πρωτοχρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τους είχαν αναπτυχθεί αρχικά για αεροσκάφη, επομένως δεν ήταν ιδανικές. Αν και οι κατασκευαστές πτερυγίων έχουν αρχίσει πλέον να χρησιμοποιούν αεροτομές ειδικά σχεδιασμένες για πτερύγια ανεμογεννητριών, παραμένει ακόμα δημοφιλές το παλαιωμένο πια πρότυπο αεροτομών NACA63-4XX. Στις μέρες μας τα περισσότερα πτερύγια κατασκευάζονται από fibreglass, έχουν χρησιμοποιηθεί όμως και διαφορετικά υλικά για την κατασκευή τους, τα οποία έχουν υψηλή αντοχή και είναι άκαμπτα, συνδιάζοντας υψηλό όριο αντοχής και χαμηλό κόστος.

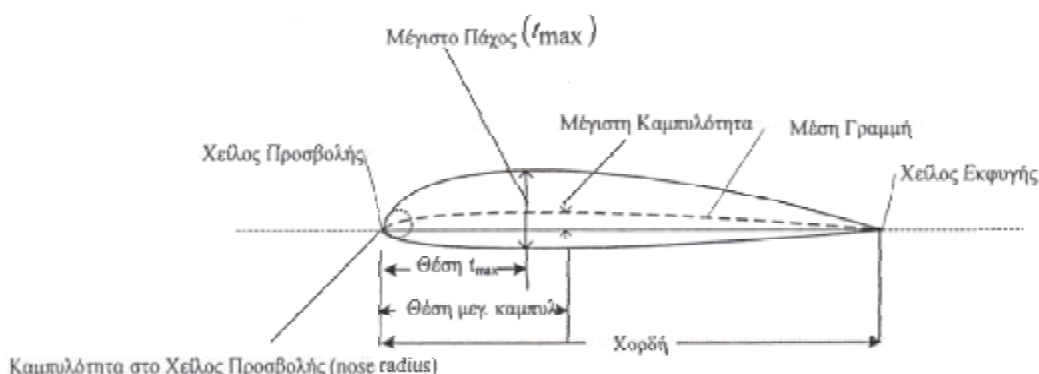
2 ΒΑΣΙΚΗ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

2.1 ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ

2.1.1 ΒΑΣΙΚΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ

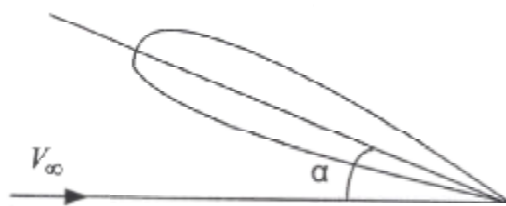
Η γεωμετρία μιας αεροτομής χαρακτηρίζεται από τις συντεταγμένες της άνω και της κάτω επιφάνειας. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη για το σχεδιασμό μιας αεροτομής παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.1 και είναι:

- Μέση γραμμή της αεροτομής (Mean Camber Line): ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που ισαπέχουν από την πάνω και την κάτω επιφάνεια της αεροτομής.
- Χείλος προσβολής της αεροτομής (Leading Edge): το μπροστινό σημείο της αεροτομής και συνήθως το πρώτο σημείο της που έρχεται σε επαφή με το ρευστό μέσο.
- Χείλος εκφυγής της αεροτομής (Trailing Edge): το τελευταίο σημείο της αεροτομής.
- Χορδή της αεροτομής (Chord): η ευθεία γραμμή που συνδέει το χείλος προσβολής με το χείλος εκφυγής.
- Μέγιστη καμπυλότητα της αεροτομής (Camber): η μέγιστη απόσταση μεταξύ της χορδής και της μέσης γραμμής.
- Πάχος της αεροτομής (Thickness): η απόσταση μεταξύ της άνω και της κάτω επιφάνειας, μετρούμενη κάθετα στην αεροτομή.



Εικόνα 2.1: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά αεροτομής (Μάργαρης, 2008)

Η γωνία που σχηματίζει η χορδή της αεροτομής με τη διεύθυνση της ελεύθερης ροής ταχύτητας V_∞ , όπως απεικονίζεται η Εικόνα 2.2, είναι η γωνία προσβολής (α). Από την καμπυλότητα της αεροτομής εξαρτάται η μορφή της αεροτομής και η γωνία μηδενικής άνωσης ($\alpha_L = 0$), δηλαδή η γωνία κατά την οποία δεν παράγεται άνωση ($L=Lift$) στην αεροτομή.



Εικόνα 2.2: Ορισμός της γωνίας προσβολής (Καλλιντέρης, 2012)

2.1.1.1 Τυποποίηση αεροτομών

Αμέσως μετά την πτήση του πρώτου αεροσκάφους των αδελφών Ράιτ το 1903 αναπτύχθηκε ραγδαία η Αεροδυναμική στις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες Γερμανία, Αγγλία, Γαλλία και Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το σχεδιασμό πλήθους αεροτομών με διαφορετικά γεωμετρικά και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά, οι οποίες έπρεπε να τυποποιηθούν. Γνωστότερες παγκοσμίως είναι οι σειρές τυποποίησης της NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), που βασίστηκαν κατ' αρχάς στις γερμανικές σειρές Goettingen, ενώ άλλες σειρές αεροτομών είναι οι αεροτομές του Eppler. Κάθε μια σειρά αεροτομών έχει τα δικά της χαρακτηριστικά.

Οι σειρές αεροτομών SERI των ΗΠΑ διαθέτουν υψηλότερο δείκτη αντίστασης και έναν ορισμένο ανώτατο συντελεστή άνωσης, ενώ η απόδοση δεν εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειάς τους όταν φτάσουν σε απώλεια στήριξης. Οι σειρές αεροτομών NREL (National Renewable Energy Laboratory) μπορούν να μειώσουν αποτελεσματικά τις επιπτώσεις της τραχύτητας της επιφάνειας του πτερυγίου στην απόδοση της ανεμογεννήτριας, αυξάνοντας έτσι την ισχύ και τον έλεγχο ισχύος.

Η RIS, μια σειρά από αεροτομές της Δανίας, έχει τη μέγιστη αναλογία άνωσης - αντίστασης κοντά στη γωνία απώλειας στήριξης και δεν επηρεάζεται από την τραχύτητα του χείλους εκφυγής της αεροτομής. Η σειρά αεροτομής FFA-W της Σουηδίας, διαθέτει επίσης υψηλό συντελεστή άνωσης και συντελεστή αντίστασης και καλή αεροδυναμική απόδοση κοντά στη γωνία απώλειας στήριξης. Ως ο μεγαλύτερος κατασκευαστής των πτερυγίων ανεμογεννητριών στον κόσμο, η LM Corporation της Δανίας, έχει χρησιμοποιήσει τη νέα, ειδική FFA-W αεροτομή σε μεγάλης κλίμακας ανεμογεννήτριες, το οποίο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη νέα σχεδίαση της πτέρυγας της ανεμογεννήτριας.

Η ανάπτυξη αεροτομών ειδικού σκοπού για ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWTs) ξεκίνησε το 1984, μια κοινή προσπάθεια μεταξύ του Εθνικού Εργαστηρίου Ανανεώσιμης Ενέργειας (NREL), πρώην Ερευνητικό Ινστιτούτο Ηλιακής Ενέργειας (SERI), και Airfoils Incorporated. Από εκείνη τη στιγμή εννέα οικογένειες αεροτομών έχουν σχεδιαστεί για ρότορες διαφόρων μεγεθών χρησιμοποιώντας το σχεδιασμό Eppler Airfoil. Μια γενική απαίτηση από την απόδοση των νέων οικογενειών αεροτομών είναι να παρουσιάζουν ένα μέγιστο συντελεστή άνωσης (C_{lmax}), ο οποίος είναι ανεξάρτητος από τις επιδράσεις της τραχύτητας. Κατά την τελευταία δεκαετία, οι οικογένειες αεροτομών που χρησιμοποιήθηκαν σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWTs) έχουν περιλάβει τις σειρές αεροτομών NACA 44XX, NACA 23XXX, NACA 63XXX, NASA LS. Σε όλες αυτές τις αεροτομές μειώνεται η απόδοση από την επίπτωση της τραχύτητας του χείλους προσβολής.

Η πλέον εμπειριστατωμένη περιγραφή και καταγραφή στοιχείων των αεροτομών τύπου NACA περιέχεται στο βιβλίο Theory of Wing Sections (Abbot and von Doenhoff, 1959).

Αεροτομή NACA 0012

Η NACA 0012 είναι μια από τις κοινές αεροτομές 4 ψηφίων (Εικόνα 2.3). Τα τέσσερα αυτά ψηφία ορίζουν τη γεωμετρία της αεροτομής. Το πρώτο ψηφίο περιγράφει τη μέγιστη ποσοστιαία καμπυλότητα της χορδής, η οποία είναι 0%. Το δεύτερο ψηφίο περιγράφει την απόσταση του σημείου με τη μέγιστη καμπυλότητα από το χείλος προσβολής σε δεκάδες εκατοστών της χορδής, εδώ είναι $0 \times c$ από το χείλος προσβολής. Τα τελευταία δύο ψηφία περιγράφουν το ποσοστιαίο μέγιστο πάχος της αεροτομής. Στη NACA 0012 είναι 12% της χορδής c .

Η συγκεκριμένη αεροτομή έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορα είδη κατασκευών όπως ελικόπτερα, αεροπλάνα και ανεμογεννήτριες κατακόρυφου και οριζοντίου άξονα, επομένως υπάρχουν άφθονα πειραματικά δεδομένα για την αεροδυναμική συμπεριφορά της από ελέγχους σε αεροσήραγγες.

Η σχέση που δίνει το σχήμα μιας συμμετρικής αεροτομής είναι:

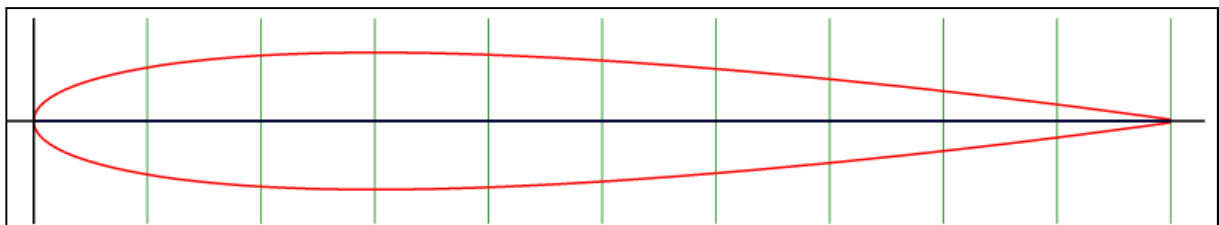
$$y = \frac{t}{0,2} c \left[0,2969 \times \sqrt{\frac{x}{c}} - 0,1260 \left(\frac{x}{c}\right) - 0,3537 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + \right. \\ \left. + 0,2843 \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0,1015 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right] \quad (2.1)$$

όπου c είναι το μήκος της χορδής, x είναι η θέση ενός τυχαίου σημείου κατά μήκος της χορδής, y είναι το μισό πάχος σε μια δεδομένη θέση x και t είναι το μέγιστο πάχος ως κλάσμα της χορδής (έτσι, $100t$ δίνει τα τελευταία 2 ψηφία της ονομασίας της χορδής).

Το χείλος προσβολής προσεγγίζει έναν κύλινδρο ακτίνας:

$$r = 1,1019t^2 \quad (2.2)$$

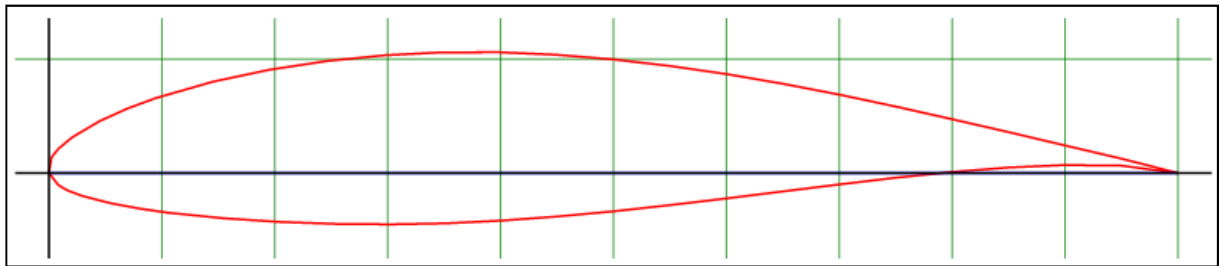
Έτσι, οι συντεταγμένες (x_U, y_U) της άνω επιφάνειας και (x_L, y_L) της κάτω επιφάνειας είναι: $x_U = x_L = x$, $y_U = +y$ και $y_L = -y$.



Εικόνα 2.3: Αεροτομή NACA 0012 (AirfoilTools, 2016)

Αεροτομή NACA 63₂-615

Η αεροτομή NACA 63₂-615 (Εικόνα 2.4) έχει μέγιστο πάχος 15% της χορδής, στο 34.8% της χορδής. Η θέση της μέγιστης καμπυλότητας βρίσκεται στο κέντρο της χορδής (50%) και είναι 3.3%.

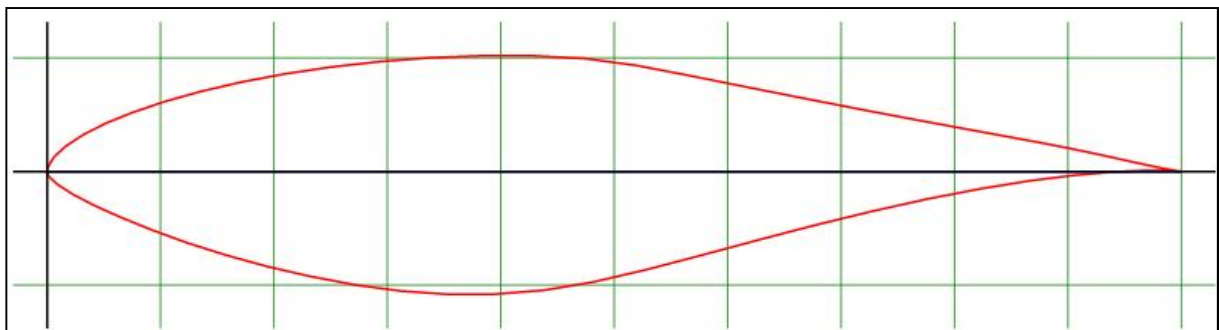


Εικόνα 2.4: Αεροτομή NACA 63₂-615 (AirfoilTools, 2016)

Αεροτομή S809

Η αεροτομή S809 (Εικόνα 2.5) κατασκευάστηκε για να χρησιμοποιηθεί σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, υπηρετώντας συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως τη βελτιστοποίηση του συντελεστή άνωσης που προσφέρει, τον περιορισμό της εξάρτησης του συντελεστή άνωσής της από το επίπεδο τραχύτητάς της καθώς και το μειωμένο συντελεστή αντίστασης.

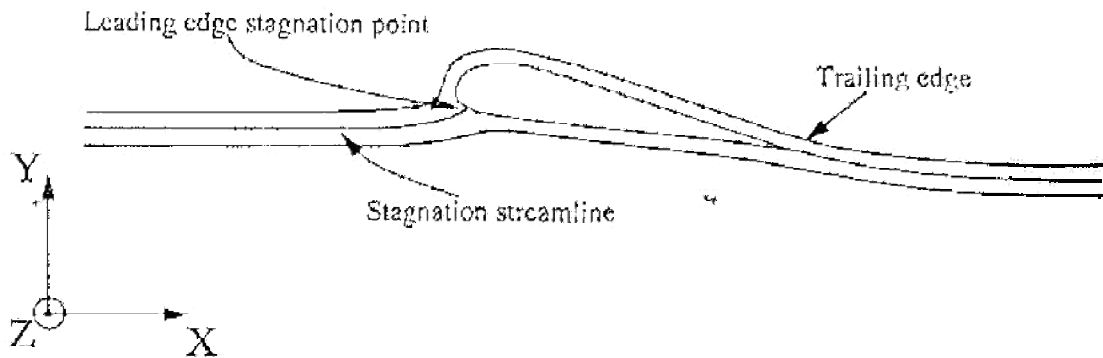
Είναι μία αεροτομή που αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '80 και μελετήθηκε για πρώτη φορά το 1986 στην αεροσήραγγα του Ολλανδικού πανεπιστημίου Delft University (Somers, 1997). Σχεδιάστηκε με βάση τον κώδικα εξισώσεων για το σχεδιασμό αεροτομών του Eppler. Η S809 έχει πάχος 21% και είναι σχεδιασμένη να εργάζεται εντός στρωτής ροής σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Ο σκοπός ήταν να δημιουργηθεί μια πτέρυγα που να μεγιστοποιεί το συντελεστή άνωσης με ταυτόχρονη μείωση του συντελεστή αντίστασης.



Εικόνα 2.5: Αεροτομή S809 (AirfoilTools, 2016)

2.2 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

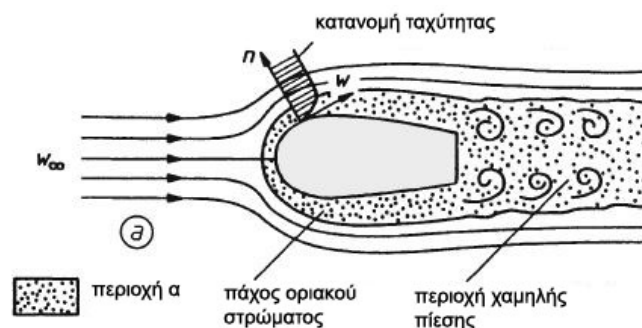
Η δισδιάστατη ροή είναι περιορισμένη στο επίπεδο, και εάν το επίπεδο περιγράφεται από σύστημα συντεταγμένων όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6, η συνιστώσα της ταχύτητας w στον z άξονα είναι μηδέν.



Εικόνα 2.6: Ροϊκές γραμμές γύρω από αεροτομή

Για την κατανόηση της δισδιάστατης ροής θεωρούμε μία αεροτομή πτέρυγας απείρου μήκους. Σε ένα πραγματικό πτερύγιο η διατομή και η στρέβλωση αλλάζουν κατά μήκος του πτερυγίου. Το σχήμα του ξεκινά από το κυλινδρικό κεντρικό μέρος του άξονα περιστροφής και καταλήγει σε ένα ακροπτερύγιο. Η συνιστώσα της ταχύτητας κατά μήκος της πτέρυγας για μακριές λεπτές πτέρυγες, όπως σε ανεμόπτερα και ανεμογεννήτριες, είναι μικρότερη σε σχέση με την συνιστώσα της ταχύτητας κατά μήκος του πεδίου ροής.

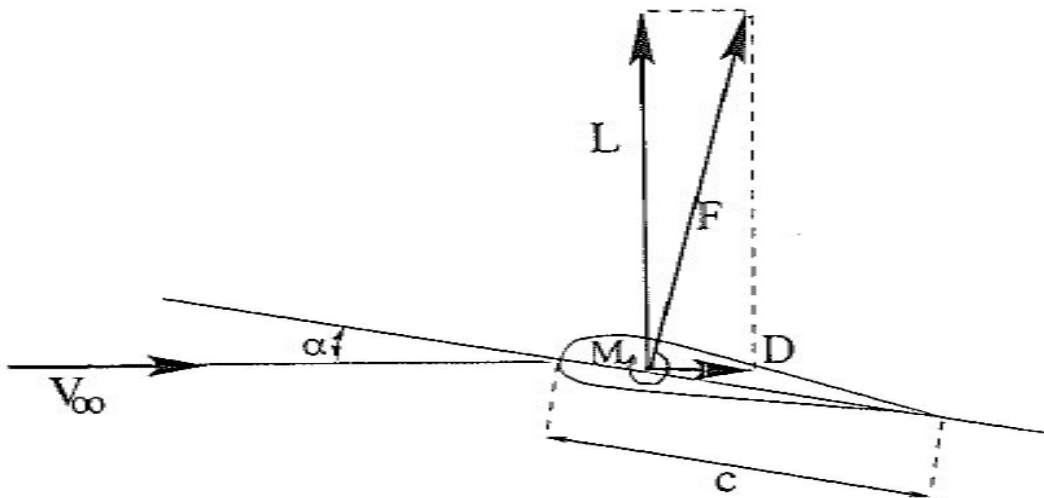
Ο Prandtl έδειξε ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν τοπικές δισδιάστατες μετρήσεις για δυνάμεις εάν η γωνία προσβολής προσαρμοστεί ανάλογα με τις επερχόμενες δίνες πίσω από την πτέρυγα (Prandtl, 1918). Αυτές οι επιδράσεις θα αντιμετωπιστούν αργότερα στην τρισδιάστατη αεροδυναμική, αλλά είναι φανερό ότι η δισδιάστατη αεροδυναμική παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον αν και υπάρχει δυσκολία στην πλήρη κατανόησή της.



Εικόνα 2.7: Ανάλυση του πεδίου ροής

2.2.1 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

Η Εικόνα 2.7 δείχνει το σημείο ανακοπής στο χείλος προσβολής της αεροτομής. Η δύναμη αντίδρασης F από τη ροή αναλύεται σε κατεύθυνση κάθετη στην ταχύτητα αδιατάρακτης ροής και σε κατεύθυνση παράλληλη σε αυτή. Προκύπτουν έτσι οι δυνάμεις της άνωσης (Lift – L), η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση της ταχύτητας, και της αντίστασης η αλλιώς οπισθέλκουσας (Drag – D) η οποία είναι παράλληλη στη διεύθυνση της ταχύτητας. Η άνωση και η αντίσταση παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.8.



Εικόνα 2.8: Άνωση και αντίσταση

Στην περίπτωση που η αεροτομή είναι σχεδιασμένη για αεροσκάφος, είναι προφανές πως ο λόγος L/D θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί. Η άνωση είναι η δύναμη που χρησιμοποιείται για να υπερνικήσει τη βαρύτητα, και όσο μεγαλύτερη η μάζα που μπορεί να ανυψωθεί τόσο πιο μεγάλη θα πρέπει να είναι και η άνωση. Για να διατηρηθεί μία σταθερή ταχύτητα, η αντίσταση πρέπει να εξισορροπηθεί από τη δύναμη ώθησης που παρέχεται από τον κινητήρα, και όσο πιο μικρή είναι η αντίσταση τόσο πιο μικρός και ο απαιτούμενος κινητήρας. Οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης C_l και C_d προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 c} \quad (2.3)$$

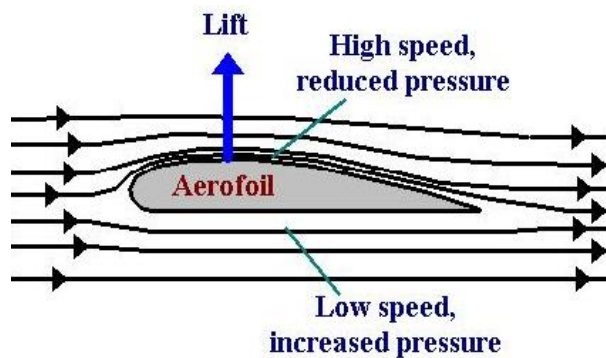
Και

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 c} \quad (2.4)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, δηλαδή του αέρα, και c το μήκος της αεροτομής γνωστό και ως χορδή. Η χορδή ορίζεται ως η ευθεία που ενώνει το χείλος προσβολής με το χείλος εκφυγής (Εικόνα 2.8).

Για την περιγραφή των δυνάμεων σε μια αεροτομή είναι απαραίτητη η γνώση της ροπής M σε ένα σημείο της αεροτομής. Αυτό το σημείο συχνά ορίζεται σε απόσταση $c/4$ από το χείλος προσβολής. Εάν το μέγεθος της ροπής είναι θετικό τότε τείνει να γυρίσει την αεροτομή ωρολογιακά, και ο συντελεστής ροπής ορίζεται ως:

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 c} \quad (2.5)$$



Εικόνα 2.9: Εξήγηση του φυσικού φαινομένου της άνωσης

Η εξήγηση του φυσικού φαινομένου της άνωσης πηγάζει από το γεγονός ότι το σχήμα της αεροτομής ως γεωμετρικό αναγκάζει τις ροϊκές γραμμές να καμπυλώσουν γύρω από τη γεωμετρία της, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.9. Από γνώσεις βασικής ρευστομηχανικής, είναι γνωστό ότι για να καμπυλώσουν οι ροϊκές γραμμές, είναι απαραίτητη η μεταβολή της πίεσης, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{V^2}{r} \quad (2.6)$$

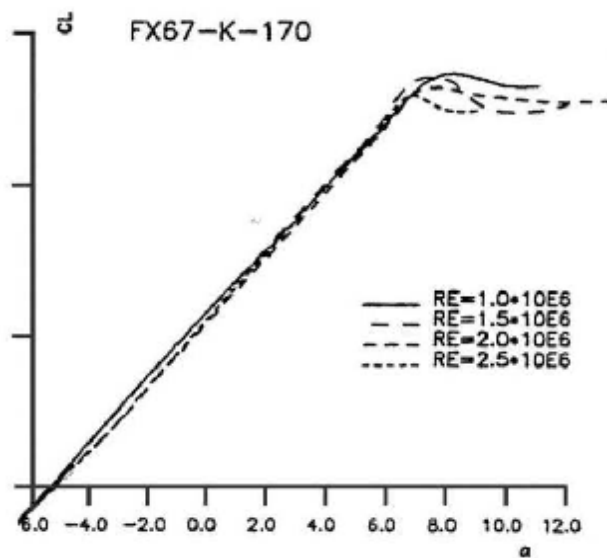
όπου V είναι η ταχύτητα και r η ακτίνα καμπυλότητας της ροϊκής γραμμής. Η μεταβολή της πίεσης συμπεριφέρεται σαν κεντρομόλος δύναμη. Εφόσον υπάρχει η ατμοσφαιρική πίεση p_o μακριά από την αεροτομή, θα πρέπει να επικρατεί πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής στο κάτω μέρος και πίεση μικρότερη της ατμοσφαιρικής στο επάνω μέρος της αεροτομής. Αυτή η διαφορά πίεσης ευθύνεται για τη δημιουργία άνωσης πάνω στην αεροτομή.

Όταν η αεροτομή ευθυγραμμιστεί με τη ροή, η δύναμη αντίστασης που δημιουργείται οφείλεται κυρίως στη τριβή του αέρα και το οριακό στρώμα παραμένει επικολλημένο.

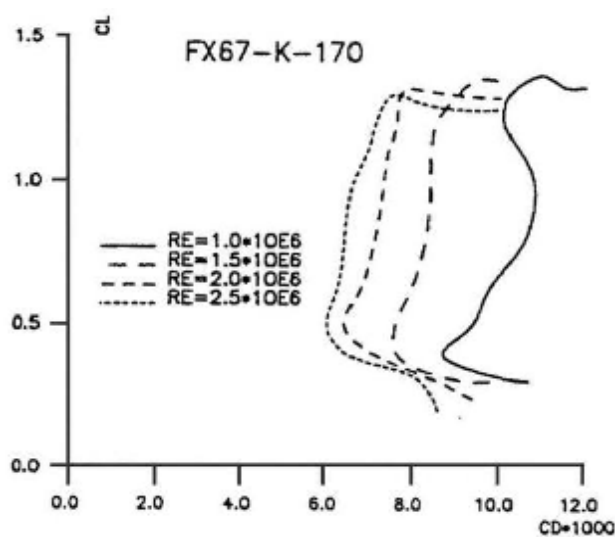
Οι αεροδυναμικοί συντελεστές C_l , C_d και C_m εξαρτώνται από την γωνία προσβολής α , που είναι η γωνία ανάμεσα στην χορδή και στο φορέα της V_∞ , του αριθμού Reynolds, Re , που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{cV_{\infty}}{\nu} \quad (2.7)$$

όπου ν είναι το κινηματικό ιξώδες, και του αριθμού Mach, Ma , που είναι η αναλογία μεταξύ της V_{∞} και της ταχύτητας του ήχου. Για μια ανεμογεννήτρια, όπως επίσης και για ένα αεροσκάφος μικρών ταχυτήτων, οι συντελεστές άνωσης, αντίστασης και ροπής είναι μονάχα συναρτήσεις των α και Re . Για μία δεδομένη αεροτομή, η συμπεριφορά των C_l , C_d και C_m μπορεί να μετρηθεί ή να υπολογιστεί, και να απεικονιστεί πολικό διάγραμμα. Ένα παράδειγμα πολικού που προκύπτει από μετρήσεις για την αεροτομή FX67-K-170 δίνεται στις Εικόνες 2.10 και 2.11.



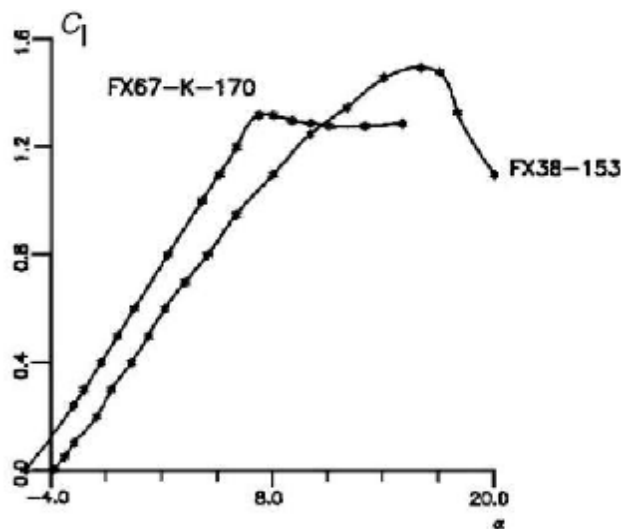
Εικόνα 2.10: Συντελεστής άνωσης της αεροτομής FX67-K-170 συναρτήσει της γωνίας προσβολής



Εικόνα 2.11: Συντελεστής αντίστασης της αεροτομής FX67-K-170 συναρτήσει της γωνίας προσβολής

Ο συντελεστής άνωσης C_l αυξάνεται γραμμικά με τη γωνία προσβολής α με κλίση κατά προσέγγιση $2\pi/rad$ μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή του α στην οποία ο C_l γίνεται μέγιστος. Από αυτό το σημείο και μετά έχουμε «απώλεια στήριξης» (stall) δηλαδή η αεροτομή τίθεται σε υπολειτουργία. Με άλλα λόγια η δύναμη της άνωσης φθίνει, και ο συντελεστής C_l μειώνεται με γεωμετρική πρόοδο. Για μικρές γωνίες προσβολής ο συντελεστής αντίστασης C_d είναι σχεδόν σταθερός αλλά αυξάνεται ραγδαία κατά την απώλεια στήριξης. Η εξάρτηση από τον αριθμό Reynolds παρουσιάζεται επίσης στις Εικόνες 2.10 και 2.11. Καθώς ο αριθμός Reynolds φθάνει σε μία συγκεκριμένη τιμή, η εξάρτησή του, κυρίως από την αντίσταση, γίνεται όλο και μικρότερη. Αυτή η εξάρτηση σχετίζεται και με το σημείο εκείνο πάνω στην αεροτομή όπου γίνεται η μετάβαση του οριακού στρώματος από στρωτό σε τυρβώδες.

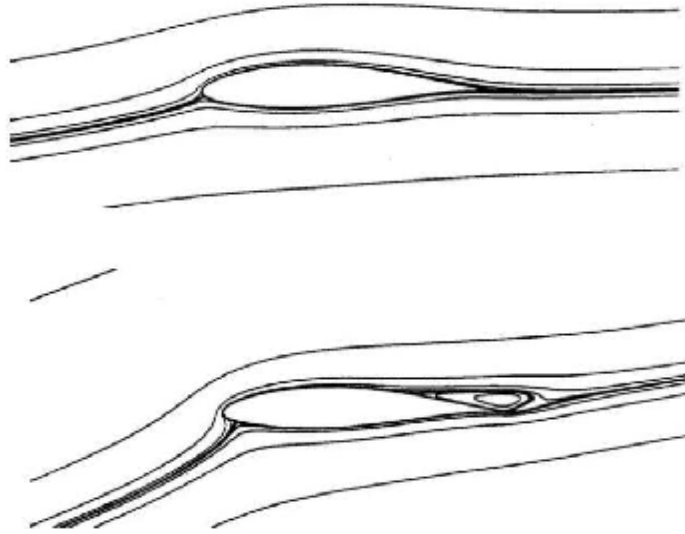
Η γεωμετρία της αεροτομής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο με τον οποίο μπαίνει η αεροτομή σε κατάσταση απώλειας στήριξης. Γενικά. Οι λεπτές αεροτομές με αιχμηρό χείλος προσβολής τείνουν να χάνουν στήριξη πιο απότομα από τις αεροτομές των οποίων το χείλος προσβολής είναι πιο καμπύλο. Η Εικόνα 2.12 παρουσιάζει τη μεταβολή του συντελεστή άνωσης C_l συναρτήσει της γωνίας προσβολής α για δύο διαφορετικές αεροτομές. Η αεροτομή FX38-153 παρουσιάζει απώλεια στήριξης πιο ραγδαία από την FX64-K-170. Η επεξήγηση για αυτό το φαινόμενο βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο το οριακό στρώμα αποκολλάται από το πάνω μέρος της αεροτομής. Αν η αποκόλληση ξεκινά από το χείλος εκφυγής της αεροτομής και αυξάνεται με αργό ρυθμό με την αύξηση της γωνίας προσβολής, παρατηρείται μια ομαλή μετάβαση σε απώλεια στήριξης. Αν ή αποκόλληση ξεκινά από το χείλος προσβολής της αεροτομής τότε ολόκληρο το οριακό στρώμα μπορεί να αποκολληθεί σχεδόν ταυτόχρονα με μία απότομη απώλεια άνωσης.



Εικόνα 2.12: Μεταβολή του συντελεστή άνωσης C_l συναρτήσει της γωνίας προσβολής α για δύο διαφορετικές αεροτομές

Η καμπυλότητα της αεροτομής, ο αριθμός Reynolds, η τραχύτητα της επιφάνειας και, για υψηλές ταχύτητες, και ο αριθμός Mach, ευθύνονται για την πολύπλοκη συμπεριφορά του τυρβώδους οριακού στρώματος. Η Εικόνα 2.13 δείχνει το ροϊκό πεδίο που προέκυψε από υπολογισμούς για την αεροτομή NACA 63-415

και για γωνία προσβολής 5° και 15° αντίστοιχα. Για $\alpha=15^\circ$ παρατηρήθηκε αποκόλληση στο χείλος εκφυγής.



Εικόνα 2.13: Ροϊκό πεδίο γύρω από την αεροτομή NACA63-415 και για γωνία προσβολής 5° (επάνω) και 15° (κάτω)

Η κατανομή της πίεσης $p(x)$ και η τριβή της επιφάνειας με τον αέρα έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία διατμητικής τάσης πάνω στην αεροτομή, η οποία είναι:

$$\tau_{u'}(x) = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{y=0} \quad (2.8)$$

όπου μ είναι το δυναμικό ιξώδες και (x, y) το σύστημα συντεταγμένων της επιφάνειας. Ενώ οι δυνάμεις πίεσης δίνουν συνιστώσες τόσο άνωσης όσο και αντίστασης, η τριβή επιφάνειας συμβάλλει κυρίως στην αντίσταση. Η συνιστώσα της αντίστασης λόγω της κατανομής της πίεσης ονομάζεται αντίσταση τριβής, και αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό όταν η αεροτομή βρίσκεται σε κατάσταση απώλειας στήριξης. Το φαινόμενο της απώλειας στήριξης είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το φαινόμενο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος. Συνεπώς, βασικός κανόνας για τη μείωση της αντίστασης είναι η αποφυγή της αποκόλλησης.

Κοντά στην αεροτομή και λόγω της συνθήκης της μηδενικής ταχύτητας πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής, το οριακό στρώμα είναι τυρβώδες. Το πάχος του οριακού στρώματος ορίζεται ως η κάθετη απόσταση $\delta(x)$ από την επιφάνεια, όπου ισχύει:

$$\frac{u(x)}{U(x)} = 0.99 \quad (2.9)$$

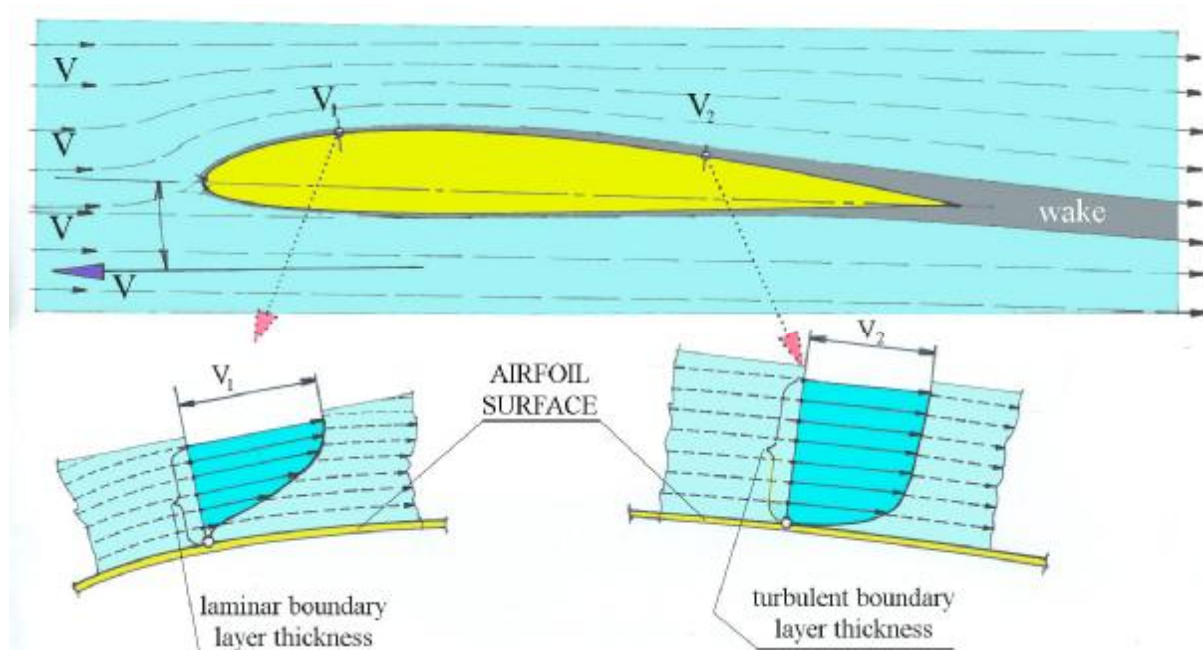
όπου $u(x)$ είναι η κατανομή ταχύτητας μέσα στο οριακό στρώμα, και $U(x)$ η ταχύτητα αδιατάρακτης ροής. Επιπλέον, το πάχος μετάθεσης οριακού στρώματος $\delta^*(x)$, το

πάχος απώλειας ορμής $\theta(x)$ και ο συντελεστής μορφής $H(x)$, ορίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\delta^*(x) = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (2.10)$$

$$\theta(x) = \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (2.11)$$

$$H(x) = \frac{\delta^*(x)}{\theta(x)} \quad (2.12)$$



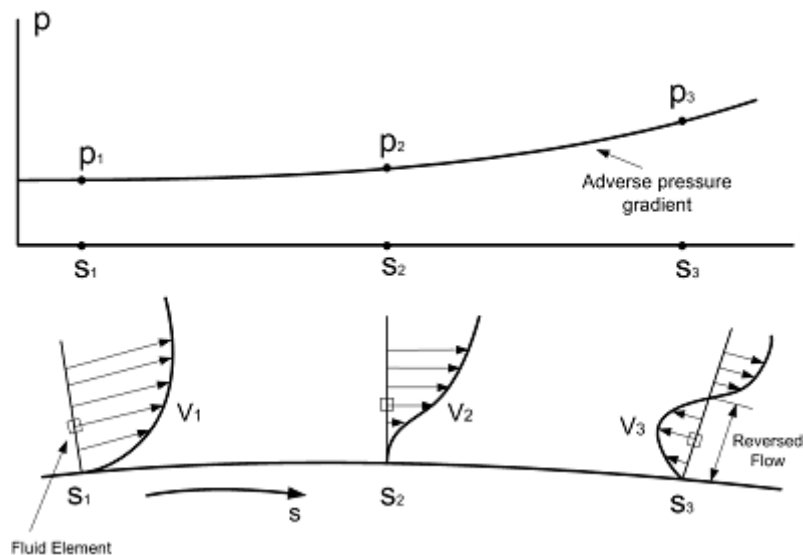
Εικόνα 2.14: Κατανομή στρωτού και τυρβώδους οριακού στρώματος πάνω στην αεροτομή

Το σύστημα συντεταγμένων (x,y) είναι ένα τοπικό σύστημα το σημείο $x=0$ ορίζεται στο σημείο ανακοπής του χείλους προσβολής, και y είναι η κάθετη απόσταση από την επιφάνεια της αεροτομής. Ένα τυρβώδες οριακό στρώμα αποκολλάται όταν το H παίρνει τιμές μεταξύ 2 και 3. Η ροϊκή γραμμή του σημείου ανακοπής, είναι η γραμμή η οποία διαχωρίζει το ρευστό που ρέει πάνω από την αεροτομή από το ρευστό που ρέει κάτω από αυτή. Στο σημείο ανακοπής η ταχύτητα είναι μηδέν και το πάχος του οριακού στρώματος μικρό. Το ρευστό που ρέει πάνω από την αεροτομή επιταχύνει καθώς προσπερνά το χείλος προσβολής, και επειδή το χείλος προσβολής είναι κοντά στο σημείο ανακοπής η ροή είναι επιταχυνόμενη και το οριακό στρώμα λεπτό.

Είναι γνωστό από τη θεωρία του τυρβώδους οριακού στρώματος ότι η πίεση είναι σχετικά σταθερή από την επιφάνεια μέχρι το σημείο που τελειώνει το οριακό στρώμα, δηλαδή ισχύει $\partial p / \partial y = 0$. Στα σημεία έξω από το οριακό στρώμα ισχύει η εξίσωση Bernoulli, και επειδή η ροή επιταχύνεται, η πίεση μειώνεται, ισχύει δηλαδή $\partial p / \partial x < 0$. Στην κάτω πλευρά της αεροτομής η μεταβολή της πίεσης είναι πολύ μικρότερη επειδή η καμπυλότητα της επιφάνειας είναι μικρή συγκριτικά με το χείλος προσβολής. Επειδή στο χείλος εκφυγής η πίεση πρέπει να είναι ίση και στις δύο πλευρές (συνθήκη Kutta), η πίεση πρέπει να αυξηθεί, δηλαδή $\partial p / \partial x > 0$, από μία ελάχιστη τιμή σε κάποιο σημείο του επάνω μέρους της αεροτομής στη μέγιστη τιμή που αποκτάται στο χείλος εκφυγής. Ενδεχόμενη αποκόλληση μπορεί να συμβεί όταν η μεταβολή της πίεσης είναι θετική, δηλαδή όταν $\partial p / \partial x > 0$. Εάν εφαρμοσθούν οι εξισώσεις Navier – Stokes πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής όπου η ταχύτητα είναι μηδενική, προκύπτει η σχέση:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.13)$$

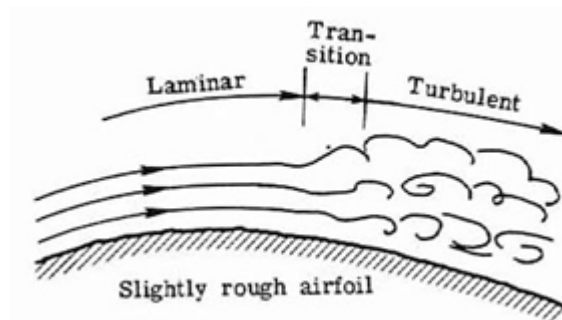
Ο παράγοντας πίεσης $\partial p / \partial x$ επηρεάζει την καμπυλότητα της κατανομής της ταχύτητας u . Ακόμα γνωρίζουμε ότι για $y = \delta$ ισχύει πως $\partial u / \partial y > 0$ και επομένως η κατανομή της ταχύτητας u για θετική μεταβολή της πίεσης $\partial p / \partial x > 0$ έχει σχήμα S και είναι πιθανό να συμβεί αποκόλληση. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν $\partial p / \partial x < 0$, η κατανομή έχει κυρτό σχήμα σε όλη την έκταση του οριακού στρώματος και δε συμβαίνει αποκόλληση (Εικόνα 2.15). Επειδή η αντίσταση τριβής μεγαλώνει σε μεγάλο βαθμό κατά την αποκόλληση του οριακού στρώματος, είναι μέγιστης σημασίας ο έλεγχος του παράγοντα της πίεσης για την απόδοση μιας αεροτομής.



Εικόνα 2.15: Μορφή του οριακού στρώματος για θετικές και αρνητικές μεταβολές της πίεσης (Anderson, 1985)

Η ροή παραμένει στρωτή για μικρές τιμές της απόστασης x , ενώ από ένα συγκεκριμένο x_{trans} και μετά το στρωτό οριακό στρώμα γίνεται ασταθές και σχηματίζεται μία περιοχή μετάβασης της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Στο x_T η

ροή είναι πλέον τυρβώδης (Εικόνα 2.16). Επειδή η διαδικασία της μετάβασης είναι πολύπλοκη, δεν έχει κατανοηθεί πλήρως ακόμη.



Εικόνα 2.16: Διαδικασία μετάβασης του οριακού στρώματος από στρωτό σε τυρβώδες

Ανάμεσα στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται συχνά για υπολογισμούς πάνω σε αεροτομές συγκαταλέγεται η one – step method του Michel. Η μέθοδος αυτή προβλέπει την μετάβαση όταν ισχύει:

$$Re_{\theta} = 2.9Re_x^{0.4} \quad (2.14)$$

Όπου $Re_{\theta} = U(x)\theta(x)/\nu$ και $Re_x = U(x)x/\nu$.

Σε περιοχές όπου η μεταβολή της πίεσης είναι θετική και για απότομη κλίση του οριακού στρώματος από την επιφάνεια, η τυρβώδης ροή είναι χαρακτηριστικό ότι έχει μεγαλύτερη ευστάθεια. Η θετική μεταβολή της πίεσης είναι ωφέλιμη γιατί καθυστερεί την απώλεια στήριξης της αεροτομής, σε αντίθεση με την απότομη κλίση του οριακού στρώματος από την επιφάνεια, η οποία αυξάνει την τριβή επιφάνειας και συνεπώς και την αντίσταση. Τα δύο αυτά φαινόμενα παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό στρωτών αεροτομών υψηλής απόδοσης. Μία στρωτή αεροτομή, χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο κομμάτι του οριακού στρώματος το οποίο είναι στρωτό και παραμένει προσκολλημένο σε όλο το μήκος για το οποίο έχει σχεδιαστεί. Σχεδιάζοντας μία τέτοια αεροτομή, είναι απαραίτητο να καθοριστεί η μέγιστη γωνία προσβολής για την οποία το οριακό στρώμα στην αεροτομή κατά ένα μεγάλο ποσοστό θα είναι στρωτό. Έτσι, κατασκευάζεται η αεροτομή με τέτοιο τρόπο ώστε η ταχύτητα στο τέλος του οριακού στρώματος $U(x)$ να παραμένει σταθερή. Είναι γνωστό από τη θεωρία του οριακού στρώματος ότι ο παράγοντας της πίεσης εκφράζεται ως προς τον παράγοντα της ταχύτητας εκτός του οριακού στρώματος και δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dp}{dx} = -\rho U(x) \frac{dU(x)}{dx} \quad (2.15)$$

Για τέτοιες γωνίες, οι παράγοντες της πίεσης είναι μηδέν και δε συμβαίνει αποκόλληση. Για μικρότερες γωνίες η ταχύτητα αδιατάρακτης ροής $U(x)$ θα αυξηθεί, και ο παράγοντας dp/dx θα γίνει αρνητικός, το οποίο οδηγεί με την σειρά του στην

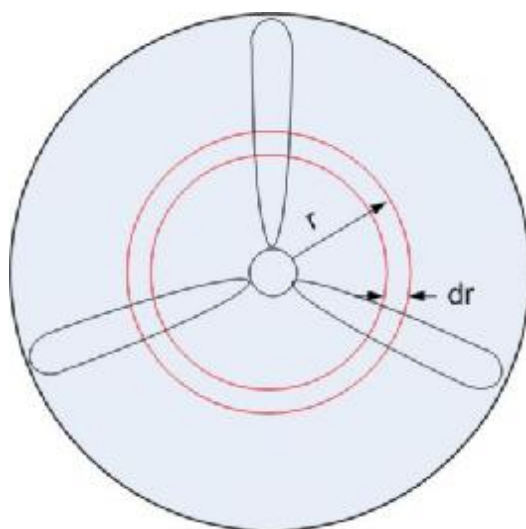
αποφυγή αποκόλλησης καθιστώντας ευσταθές το στρωτό οριακό στρώμα και καθυστερώντας με αυτόν τον τρόπο τη μετάβαση. Ωστόσο, σε κάποιο μήκος x στο πάνω μέρος της αεροτομής πρέπει να επιβραδυνθεί η ροή έτσι ώστε να ικανοποιήσει τη συνθήκη Kutta. Υπάρχει βέβαια πιθανότητα αποκόλλησης αν η επιβράδυνση ξεκινήσει σε ένα μήκος όπου το οριακό στρώμα είναι στρωτό. Οι δυνάμεις πίεσης που οδηγούν σε αποκόλληση μπορούν να αντισταθμιστούν εάν αμέσως μετά τη μετάβαση από στρωτό σε τυρβώδες οριακό στρώμα, η ορμή κοντά στην επιφάνεια είναι αρκετά μεγάλη και το πάχος του στρώματος είναι σχετικά λεπτό.

Η ικανότητα του οριακού στρώματος να αντιστέκεται στις δυνάμεις της πίεσης εξασθενεί καθώς συνεχίζεται η επιβράδυνση όσο η ροή πλησιάζει το χείλος εκφυγής, και για να αποφευχθεί η αποκόλληση πρέπει να μειωθεί αυτή η επιβράδυνση. Είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλισθεί ότι το οριακό στρώμα θα είναι τυρβώδες πριν το αναμενόμενο σημείο όπου η ταχύτητα μειωθεί σε $U(x)$, και για να γίνει αυτό, η τυρβώδης μετάβαση μπορεί να ενεργοποιηθεί με την τοποθέτηση ενός σύρματος σκοντάμματος πριν από το σημείο αυτό.

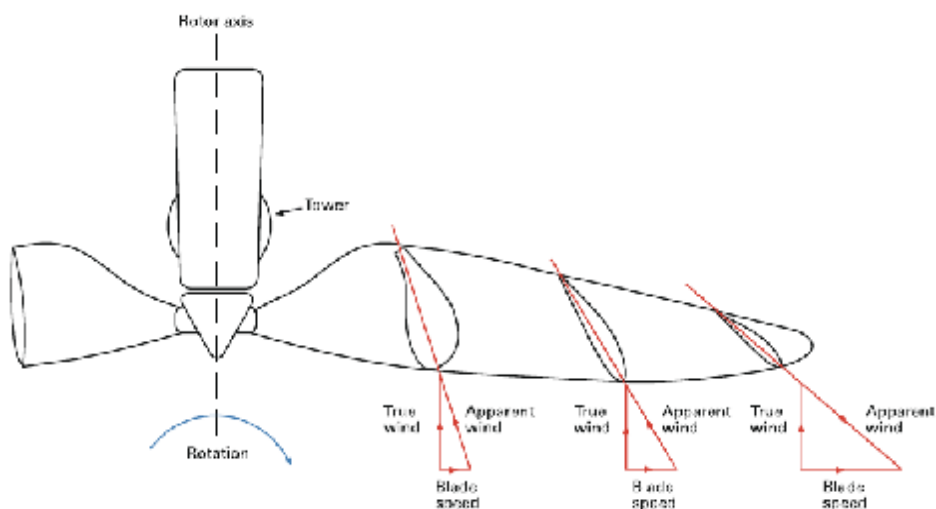
Μία στρωτή αεροτομή χαρακτηρίζεται από ψηλή τιμή αναλογίας των συντελεστών άνωσης αντίστασης C_l/C_d για τιμές γωνίας προσβολής κάτω από τις σχεδιαστικές. Σημαντικοί παράγοντες είναι και παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά της απώλειας στήριξης και η ευαισθησία στην τραχύτητα της επιφάνειας. Εάν μία αεροτομή έχει ευαισθησία ως προς την τραχύτητα της επιφάνειας, η καλή λειτουργία χάνεται αν οι πτέρυγες εκτεθούν σε σκόνη, βροχή ή έντομα. Για μια ανεμογεννήτρια κάτι τέτοιο θα μπορούσε να αλλάξει την απόδοσή της με τη πάροδο του χρόνου εάν για παράδειγμα είναι τοποθετημένη σε μία περιοχή με πολλά έντομα. Εάν η ανεμογεννήτρια έχει εγκατασταθεί κοντά σε ακτή, υπάρχει πιθανότητα συγκέντρωσης αλατιού στα πτερύγια εάν ο άνεμος έρχεται από τη θάλασσα, και εάν οι αεροτομές που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ευαισθησία στην τραχύτητα η ισχύς εξόδου από την ανεμογεννήτρια θα εξαρτηθεί από την κατεύθυνση του ανέμου.

3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Ο ρότορας μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα αποτελείται από έναν συγκεκριμένο αριθμό πτερυγίων. Κάνοντας μία τομή σε ακτινική απόσταση r από τον άξονα περιστροφής όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1, παρατηρείται ένα προφίλ αεροτομών όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.1: Ρότορας τριπτέρυγης ανεμογεννήτριας ακτίνας R



Εικόνα 3.2: Ακτινική τομή πτερυγίου ανεμογεννήτριας όπου φαίνονται οι αεροτομές και τα διανύσματα των ταχυτήτων σε τρία σημεία κατά μήκος του πτερυγίου

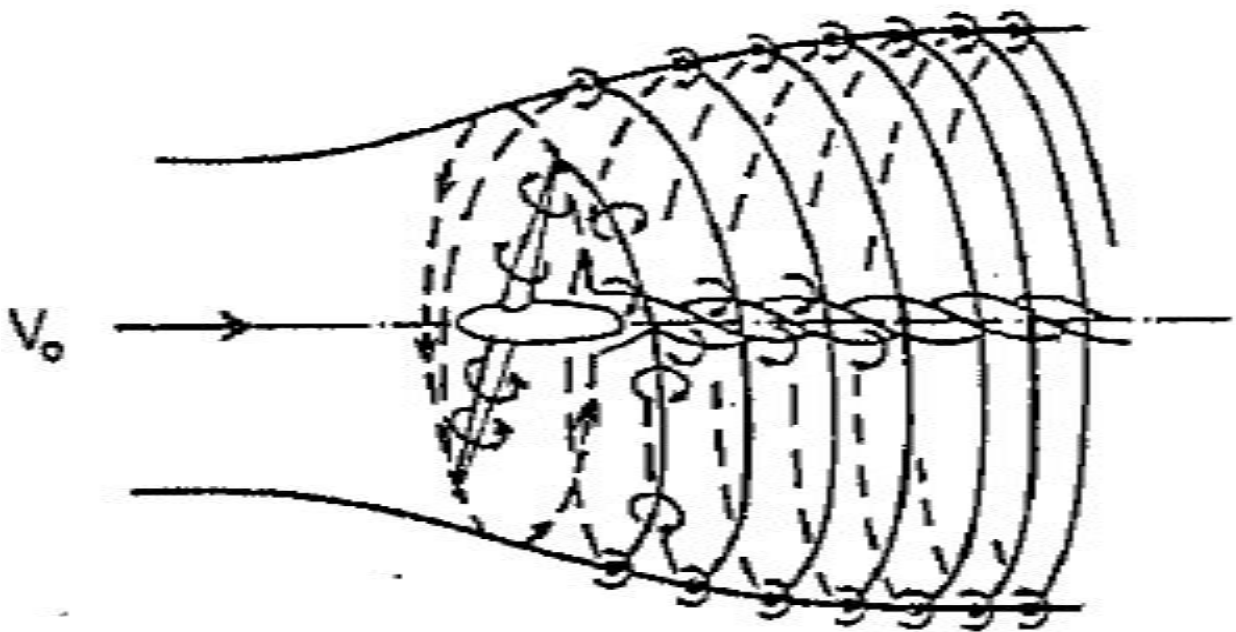
Η τοπική γωνία προσβολής α εξαρτάται από το βήμα της αεροτομής θ , την αξονική ταχύτητα V_α στο επίπεδο του ρότορα, και την περιστροφική ταχύτητα V_{rot} και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \varphi - \theta \quad (3.1)$$

όπου η γωνία φ είναι:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{V_a}{V_{rot}} \right) \quad (3.2)$$

Η ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα αποτελείται από περιστρεφόμενες πτέρυγες, με αποτέλεσμα δημιουργείται σύστημα στροβίλων. Οι ελεύθεροι στρόβιλοι κάνουν ελικοειδή διαδρομή πίσω από τον ρότορα. Οι στρόβιλοι στη βάση ακολουθούν γραμμική διαδρομή κατά μήκος του άξονα του ρότορα, ενώ οι δυνατοί στρόβιλοι στα άκρα των πτερυγίων αναπτύσσονται στα όρια του απορρεύματος του ρότορα (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Σύστημα στροβίλων πίσω από τον ρότορα μιας ανεμογεννήτριας

Το σύστημα στροβίλων αναγκάζει την ανεμογεννήτρια σε μία αξονική ταχύτητα αντίθετη στην κατεύθυνση του ανέμου, και μία εφαπτομενική ταχύτητα αντίθετη στην περιστροφή του ρότορα. Η αξονική συνιστώσα καθορίζεται από έναν συντελεστή αξονικής επαγωγής α , ως αV_0 , όπου V_0 είναι η αδιατάρακτη ταχύτητα του ανέμου. Η εφαπτομενική συνιστώσα στο απόρρευμα του ρότορα καθορίζεται από έναν συντελεστή ακτινικής επαγωγής α' , ως $2\alpha'\omega r$, όπου με ω συμβολίζεται η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα και με r η ακτινική απόσταση από τον άξονα περιστροφής.

Εφόσον η ροή δεν περιστρέφεται ανάντη του ρότορα, η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας στο επίπεδο του ρότορα υπολογίζεται ως $\alpha' \omega r$.

Αν α και α' είναι γνωστά, μία ισοδύναμη δισδιάστατη γωνία προσβολής μπορεί να βρεθεί από παραπάνω σχέσεις όπου:

$$V_a = (1 - a)V_0 \quad (3.3)$$

$$V_{rot} = (1 - a')\omega r \quad (3.4)$$

Επιπλέον, εάν οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης C_l και C_d είναι επίσης γνωστοί για τις αεροτομές σε όλο το μήκος της πτέρυγας, είναι εύκολο να υπολογιστεί η κατανομή των δυνάμεων. Τα συνολικά μεγέθη, όπως για παράδειγμα η ισχύς εξόδου και οι ροπές κάμψης στα πτερύγια, μπορούν να βρεθούν ολοκληρώνοντας αυτή την κατανομή για όλο το μήκος της πτέρυγας.

4 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

4.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Η απόδοση των ανεμογεννητριών μπορεί να εκφραστεί με αρκετούς τρόπους. Ένας από αυτούς είναι και ο αδιάστατος συντελεστής ισχύος C_p , ενώ ένας ακόμη δημοφιλής τρόπος έκφρασης της απόδοσης είναι και ο συντελεστής ταχυστροφίας λ . Ο συντελεστής ισχύος δίνεται από τη σχέση:

$$C_p = \frac{P}{0,5\rho V_1^3 A} \quad (4.1)$$

όπου P είναι η αποσπώμενη ισχύς του ανέμου σε (W), ρ η πυκνότητα του ρευστού (αέρα) σε (kg/m^3), V_1 η αδιατάρακτη ταχύτητα ροής του ανέμου στην ανάντη πλευρά του ρότορα σε (m/s) και A_p είναι η προβαλλόμενη επιφάνεια (επιφάνεια που «σαρώνει» το ρότορα σε μία πλήρη περιστροφή του) σε (m^2) στην κάθετη διεύθυνση της ελεύθερης και αδιατάρακτης ροής στην ανάντη πλευρά του ρότορα.

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο παραπάνω συντελεστής καλείται *Όριο Betz* και είναι ίση με:

$$C_{p,\max} = 16/27 = 0,593 \quad (4.2)$$

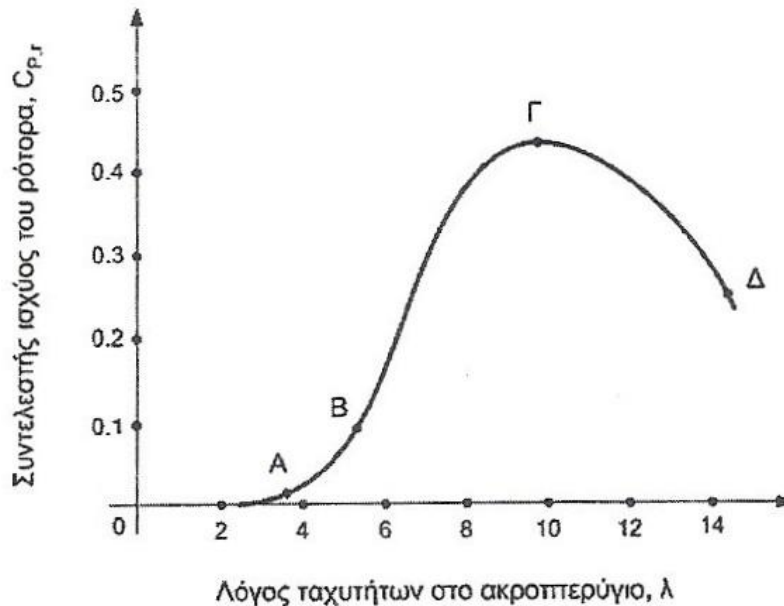
Επίσης δίνεται και ο συντελεστής ταχυστροφίας λ

$$\lambda = \frac{\omega_0 R}{V_1} \quad (4.3)$$

όπου R είναι η ακτίνα της πτερωτής σε (m), ω_0 η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα της εγκατάστασης σε (rad/s) και V_1 η αδιατάρακτη ταχύτητα ροής του ανέμου στην ανάντη πλευρά του ρότορα σε (m/s).

Στο σημείο αυτό αξίζει να επισημανθεί ότι στη σχέση (4.1) ο αριθμητής P μπορεί να είναι είτε η ισχύς εξόδου από το ρότορα, οπότε κατ' επέκταση ο αντίστοιχος συντελεστής ισχύος ονομάζεται συντελεστής ισχύος του ρότορα C_{p_r} , είτε η ισχύς εξόδου όλου του συστήματος της ανεμογεννήτριας συνολικά και έτσι στην περίπτωση αυτή ο αντίστοιχος συντελεστής ισχύος ονομάζεται συντελεστής ισχύος του συστήματος C_{p_s} . Η διαφορά αυτών των δύο ποσοτήτων είναι οι απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της ισχύος του συστήματος και οι απώλειες του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, αντίστοιχα.

Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται ο συντελεστής ισχύος του ρότορα $C_{p,r}$ συναρτήσει του λόγου λ .



Εικόνα 4.1: Τυπικό διάγραμμα του συντελεστή ισχύος ενός ρότορα $C_{p,r}$ συναρτήσει του συντελεστή ταχυστροφίας λ για ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα με τα πτερύγιά της σε συγκεκριμένη γωνία κλίσης (pitch angle)

Στην Εικόνα 4.1 παραπάνω η αριστερή περιοχή ΑΒΓ ελέγχεται από την αστάθεια των πτερυγίων (blade stall) του ρότορα και οι τοπικές γωνίες προσβολής αυξάνονται όσο περισσότερο πλησιάζουμε το σημείο Α. Οποιαδήποτε αλλαγή στη γωνία κλίσης των πτερυγίων θα έχει μεγάλη επίπτωση στην ισχύ εξόδου του ρότορα κατά μήκος του τμήματος ΑΒΓ.

Το δεξιό τμήμα ΓΔ του διαγράμματος ελέγχεται από τη δύναμη της αντίστασης και ειδικότερα από την αντίσταση τριβής (skin friction), επειδή οι τοπικές γωνίες προσβολής ελαττώνονται καθώς πλησιάζουμε το σημείο Δ.

4.2 ΘΕΩΡΙΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Για την μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα (HAWT) έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα κάποια θεωρητικά μοντέλα. Κάποια από αυτά προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια την πραγματική συμπεριφορά του ρότορα στο περιβάλλον λειτουργίας τους, ενώ κάποια δεν είναι τόσο ακριβή. Τα μοντέλα αυτά, από αυτό που είναι λιγότερο προς αυτό που είναι περισσότερο ακριβές, είναι:

- ∅ Θεωρία του δίσκου δράσης (actuator disk model).
- ∅ Θεωρία του βέλτιστου δίσκου δράσης για ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (Glauert).
- ∅ Θεωρία αξονικής ορμής (Rankine-Froude Theory).
- ∅ Γενική θεωρία ορμής με περιστρεφόμενο απόρρευμα.

- Ø Θεωρία στοιχείου-πτερυγίου (Blade Element Theory).
 - Ø Μέθοδος των πλαισίων (Panel Methods)
- Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι παραπάνω μέθοδοι.

4.2.1 ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ΔΡΑΣΗΣ

Η θεωρία αυτή περιέχει το απλούστερο μοντέλο αεροδυναμικής μελέτης των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα στο οποίο ο ρότορας μιας ανεμογεννήτριας θεωρείται σαν ένας ομογενής δίσκος ο οποίος αποσπά κάποιο ποσοστό ενέργειας από τη συνολικά διαθέσιμη αιολική ενέργεια. Αυτή η θεωρία προέρχεται από τον Rankine [1895] και αρχικός της σκοπός ήταν η ανάπτυξη και προσομοίωση των ναυτικών προπελών. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι η ταχύτητα ροής του ρευστού μέσου πάνω στο ρότορα είναι διαφορετική από εκείνη του ρεύματος ελεύθερης ροής.

Από τη μία, αυτή η θεωρία παρέχει ένα κατανοητό πεδίο ροής, από την άλλη αδυνατεί να συνδέσει την αεροδυναμική συμπεριφορά του ρότορα με τη γεωμετρία του.

4.2.2 ΘΕΩΡΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

Ο Glauert ανέπτυξε ένα απλό μοντέλο για τη βελτιστοποίηση της ήδη υπάρχουσας θεωρίας του δίσκου ενέργειας (Glauert, 1935). Θεώρησε το ρότορα σαν ένα περιστρεφόμενο δίσκο ενέργειας με άπειρο αριθμό πτερυγίων. Έτσι, η αιολική ισχύς που αποσπάται από το ρότορα για δεδομένο συντελεστή ταχυστροφίας λ είναι:

$$dP = \Omega dQ = \Omega r \rho V(r\omega) (2\pi r dr) \quad (4.4)$$

όπου dP είναι η αύξηση της αποσπώμενης ισχύος από το ροϊκό σωλήνα σε (W), Ω είναι η περιστροφική ταχύτητα του δίσκου ενέργειας σε (s⁻¹) και dQ είναι η αύξηση της ροπής του ρότορα (N·m) .

Στη Σχέση (4.4) ο πρώτος όρος της, που βρίσκεται εντός των παρενθέσεων, είναι η κλίση της εφαπτομενικής ροϊκής ταχύτητας και ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την επιφάνεια του ροϊκού σωλήνα. Τώρα, ο συντελεστής ισχύος CP μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$Cp = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^{\lambda} (1 - \alpha) \cdot \alpha' \cdot x^3 dx \quad (4.5)$$

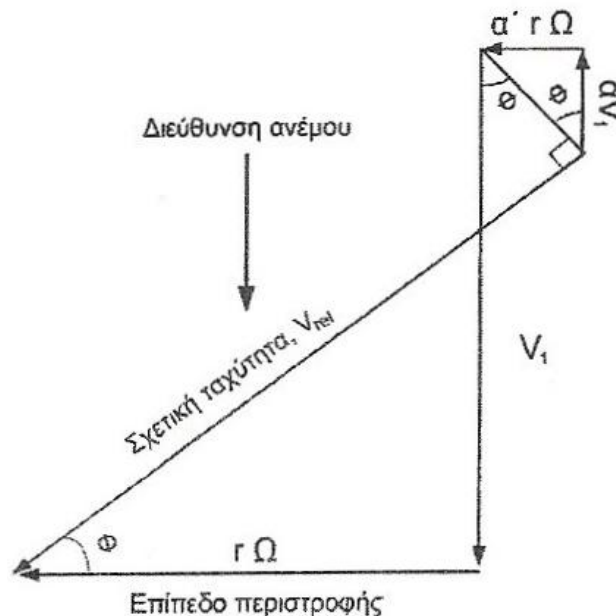
όπου $x = r \cdot \Omega / V$ είναι ο τοπικός λόγος ταχυτήτων, α είναι ο συντελεστής αξονικής επαγωγής και $\alpha' = \omega / (2 \cdot \Omega)$ ο συντελεστής περιστροφικής επαγωγής.

Εφόσον η σχέση (4.5) περιλαμβάνει δύο εξαρτημένες μεταβλητές, είναι αναγκαία η ύπαρξη μιας ακόμη σχέσης που θα τις συνδέει μεταξύ τους. Αυτό όμως συμβαίνει μόνο στην περίπτωση όπου οι τοπικές γωνίες προσβολής της πτέρυγας έχουν μικρότερη τιμή από εκείνη όπου παρουσιάζεται αποκόλληση της ροής και συνεπώς αστάθεια και απώλεια της στήριξής της.

Η ζητούμενη σχέση δεν είναι άλλη από την εξίσωση της ορμής, που γράφεται ως εξής:

$$\alpha' \cdot (1 + \alpha') \cdot x^2 = \alpha \cdot (1 + \alpha) \quad (4.6)$$

Ένας τρόπος απεικόνισης αυτής της σχέσης είναι να θεωρήσουμε τα διανύσματα των ταχυτήτων του ρότορα στο επίπεδο περιστροφής του, όπως φαίνονται και στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα ταχυτήτων ροής σε ρότορα ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα

Η ροή εδώ θεωρείται ομοιόμορφη, σχηματίζοντας δακτυλιοειδείς ροϊκούς σωλήνες χωρίς την ύπαρξη περιφερειακών αποκλίσεων. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, μπορεί να θεωρηθεί ως δυσδιάστατο το ροϊκό αυτό πεδίο. Επιπλέον, θεωρώντας αμελητέα την ύπαρξη της αεροδυναμικής αντίστασης, η ταχύτητα που επάγεται στο ρότορα θα πρέπει να οφείλεται στην ύπαρξη της αεροδυναμικής άνωσης και έχει κάθετη διεύθυνση ως προς τη διεύθυνση της σχετικής ταχύτητας V_{rel} .

Η εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζεται από το επίπεδο περιστροφής και τη διεύθυνση της σχετικής ταχύτητας του ανέμου υπό την προϋπόθεση ότι η ολικά επαγόμενη ταχύτητα έχει κάθετη διεύθυνση ως προς εκείνη της σχετικής ταχύτητας του, δίνεται από τις σχέσεις:

$$\tan \phi = \frac{(1 - \alpha)V_1}{(1 + \alpha') \cdot r \cdot \Omega} = \frac{(1 - \alpha)}{(1 + \alpha') \cdot x} \quad (4.7)$$

$$\tan \phi = \frac{\alpha' \cdot r \cdot \Omega}{\alpha V_1} = \frac{\alpha'}{\alpha} \cdot x \quad (4.8)$$

Εξισώνοντας τα δεξιά μέλη των σχέσεων (4.5) και (4.6) καταλήγουμε στη σχέση (4.9). Με τη βοήθεια της μαθηματικής ανάλυσης, μπορούμε να επιλύσουμε τη σχέση (4.6) και με τον περιορισμό της σχέσης (4.9), καταλήγουμε στη σχέση που συνδέει τους συντελεστές αξονικής και περιστροφικής επαγωγής:

$$a\phi = \frac{1 - 3\alpha}{4\alpha - 1} \quad (4.9)$$

Και τελικά καταλήγουμε στη σχέση:

$$x = (4\alpha - 1) \sqrt{\frac{1 - \alpha}{1 - 3\alpha}} \quad (4.10)$$

Ο συντελεστής αξονικής επαγωγής λαμβάνει τιμές $1/3 > \alpha > 1/4$ και ο Πίνακας 4.1 συνδέει μεταξύ τους τις παραμέτρους X, α, α', ϕ και C_p . Έχοντας ως δεδομένο το γεγονός ότι ρότορες υψηλών ταχυτήτων περιστροφής μπορούν εύκολα να φτάσουν τιμές του συντελεστή λ κοντά στο 7 ή και περισσότερο, είναι εμφανές ότι οι περισσότερο ιδανικοί ρότορες θα λειτουργούν με τιμή συντελεστή αξονικής επαγωγής $\alpha = 1/3$ και η κατανομή της περιστροφικής ταχύτητας θα είναι της μορφής του μη-περιστροφικού στροβίλου. Ο αδιάστατος συντελεστής ισχύος C_p για διάφορες τιμές του λόγου λ δίνεται επίσης στον Πίνακα 4.1 υπό την προϋπόθεση ότι ο συντελεστής λ έχει εξισωθεί με το λόγο x .

Είναι φανερό ότι σε χαμηλές τιμές του συντελεστή λ , ο συντελεστής C_p είναι και αυτός χαμηλός επειδή σε αυτές τις συνθήκες μεγάλο ποσό ενέργειας χάνεται ως περιστροφική κινητική ενέργεια στο απόρρευμα της ροής. Ενώ σε μεγάλες τιμές του συντελεστή λ ο συντελεστής C_p προσεγγίζει την τιμή **0.593** (όριο Betz) και η περιστροφή του απορρεύματος προσεγγίζει το μηδέν.

Περισσότερες λεπτομέρειες για αυτή τη θεωρία του Glauert μπορούμε να βρούμε εξετάζοντας στη συνέχεια τη θεωρία στοιχείου – πτερυγίου.

Λόγος ταχυτήτων	Συντελεστής αξονικής επαγωγής	Συντελεστής ακτινικής επαγωγής	Γωνία	Αδιάστατος συντελεστής παραγωγής ισχύος του ρότορα	Παράμετρος στοιχείου-πτερυγίου
λ	a	a'	Φ (deg)	C_{p_r}	$Bc\Omega C_l / 2\pi V_l$
0.25	0.280	1.364	50.6	0.176	0.3658
0.50	0.298	0.543	42.3	0.289	0.5205
0.75	0.310	0.294	35.4	0.364	0.5552
1.00	0.317	0.183	30.0	0.416	0.5359
1.25	0.322	0.124	25.8	0.451	0.4974
1.50	0.324	0.089	22.5	0.477	0.4551
1.75	0.326	0.067	19.8	0.496	0.4151
2.00	0.328	0.052	17.7	0.511	0.3791
2.50	0.330	0.034	14.5	0.532	0.3200
3.00	0.331	0.024	12.3	0.545	0.2750
3.50	0.331	0.018	10.6	0.555	0.2403
4.00	0.332	0.014	9.4	0.562	0.2129
4.50	0.332	0.011	8.4	0.566	0.1909
5.00	0.332	0.009	7.5	0.570	0.1729
5.50	0.332	0.007	6.9	0.573	0.1580
6.00	0.333	0.006	6.3	0.576	0.1453
7.00	0.333	0.004	5.4	0.580	0.1252
8.00	0.333	0.004	4.8	0.582	0.1099
9.00	0.333	0.003	4.2	0.584	0.0979
10.00	0.333	0.002	3.8	0.585	0.0883
11.00	0.333	0.002	3.5	0.586	0.0803
12.00	0.333	0.002	3.2	0.587	0.0737

Πίνακας 4.1: Ροϊκές συνθήκες και παράμετροι του ρότορα για τη θεωρία του βέλτιστου δίσκου ενέργειας για ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα (Glauert, 1935)

Ανακεφαλαιώνοντας τη θεωρία του δίσκου δράσης, διαπιστώνουμε ότι η θεωρία αυτή έχει περιορισμένη εφαρμογή στη μελέτη του ρότορα μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα. Εφαρμόζεται μέχρι μια μέγιστη τιμή του αδιάστατου συντελεστή ισχύος C_p το οποίο είναι ήδη γνωστό σαν όριο του Betz, δηλαδή $C_{p_{max}} = C_{p_B} = 16/27$.

Επιπλέον σημειώσαμε ότι στις ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με υψηλές τιμές του συντελεστή αξονικής επαγωγής και συγκεκριμένα για τιμές $a \geq 0.4$, αναπτύσσονται δυνάμεις οι οποίες έρχονται σε αντίθεση με εκείνες σύμφωνα με τη θεωρία της ορμής. Επίσης, οι υποθέσεις ότι ο ρότορας θεωρείται σαν δίσκος δράσης και ειδικότερα ότι αποτελείται από άπειρο αριθμό πτερυγίων, περιορίζουν την επίδραση της γεωμετρίας των πτερυγίων στη γενική απόδοση μιας ανεμογεννήτριας.

Επιπροσθέτως, διαπιστώσαμε ότι το όριο του Betz, είναι μεγαλύτερο από την πραγματικά μέγιστη υπολογισθείσα τιμή του αδιάστατου συντελεστή ισχύος C_p επειδή:

- ∅ οι πραγματικοί ρότορες έχουν πεπερασμένο αριθμό πτερυγίων και
- ∅ πάνω σε αυτούς αναπτύσσονται και δυνάμεις αντίστασης.

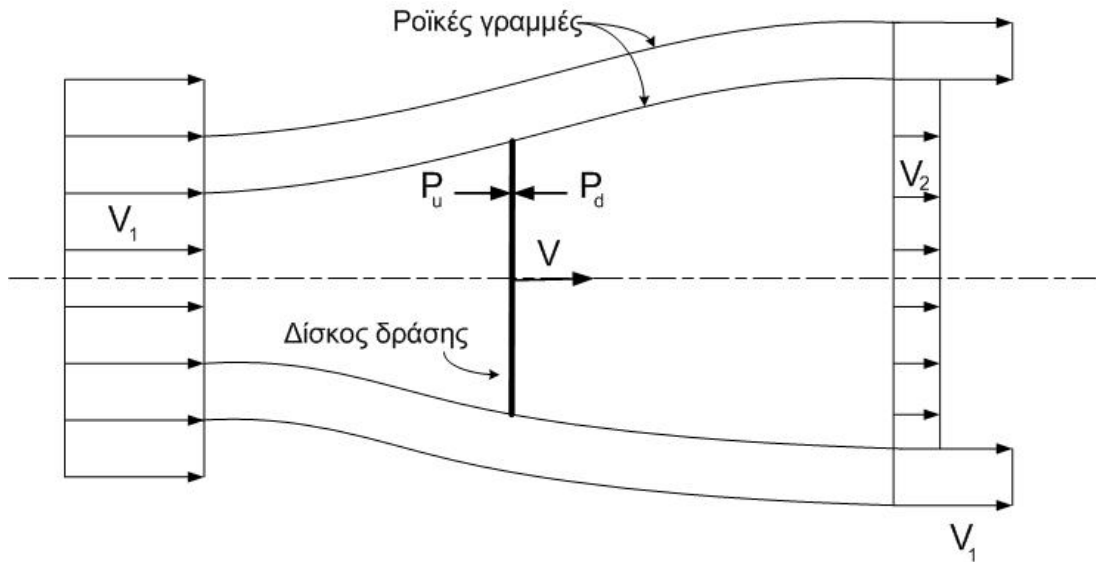
4.2.3 ΘΕΩΡΙΑ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΟΡΜΗΣ Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ RANKINE-FROUDE

Η θεωρία αξονικής ορμής, προερχόμενη από τους Rankine (Rankine, 1865) και W. Froude (Froude, 1889), εξιδανικεύει τη ροή του αέρα διά μέσω του ρότορα μιας ανεμογεννήτριας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.

Το ρεύμα αέρα ελεύθερης ροής κινείται με ταχύτητα V_1 και με τη βοήθεια της αρχής της συνέχειας, της διατήρησης της ορμής και της ενέργειας, θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε την αναπτυσσόμενη ώθηση και ισχύ, εφόσον η ροή θεωρηθεί καθαρά αξονική. Μπορούν λοιπόν να αναπτυχθούν για τη ζητούμενη ώθηση οι σχέσεις (4.11) και (4.12). Αρχικά, από το θεώρημα διατήρησης της ορμής καταλήγουμε:

$$T = \dot{M}_a (V_1 - V_2) = \rho \times A \times V (V_1 - V_2) \quad (4.11)$$

όπου T είναι η δύναμη της ώθησης που εφαρμόζεται στο ρότορα σε (N), \dot{M}_a η μαζική παροχή αέρα μέσω του ρότορα σε (kg/s), V η ταχύτητα του αέρα στο επίπεδο του ρότορα σε (m/s), V_1 η ταχύτητα ελεύθερης ροής του αέρα, στην ανάντη πλευρά του ρότορα σε (m/s), V_2 η ταχύτητα του αέρα στο απόρρευμα της ροής, στην κατάντη πλευρά του ρότορα σε (m/s) και A το εμβαδό του δίσκου ενέργειας σε (m^2).



Εικόνα 4.3: Εξιδανικευμένη ροή διά του ρότορα μιας ανεμογεννήτριας, καθώς ο ρότοράς της παρουσιάζεται ως ακίνητος δίσκος ενέργειας.

Επίσης, θεωρώντας ότι η πτώση πίεσης προκαλείται από την παρουσία του ρότορα, ισχύει:

$$T = A \cdot (P_u - P_d) \quad (4.12)$$

όπου P_u είναι η πίεση στην ανάντη πλευρά του ρότορα σε (N/m^2) και P_d η πίεση στη κατάντη πλευρά του ρότορα σε (N/m^2).

Εφαρμόζοντας την εξίσωση του Bernoulli ανάμεσα στο αδιατάραχτο πεδίο ροής και στην ανάντη πλευρά του ρότορα αλλά και ανάμεσα στην κατάντη πλευρά του ρότορα και στο απόρρευμά του, η σχέση παίρνει τη μορφή:

$$T = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (4.13)$$

Από τις σχέσεις παραπάνω καταλήγουμε στη σχέση:

$$V = 0,5 \cdot (V_1 + V_2) \quad (4.14)$$

Η σχέση (4.14) δείχνει ότι η ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο του ρότορα είναι ο μέσος όρος των ταχυτήτων ροής στο αδιατάραχτο πεδίο ροής στην ανάντη πλευρά του ρότορα και της ταχύτητας ροής στο απόρρευμά του (Νόμος Froude). Δηλαδή, η μεταβολή της ροϊκής ταχύτητας από το αδιατάραχτο πεδίο ροής μέχρι το απόρρευμα είναι διπλάσια της αντίστοιχης από το αδιατάραχτο πεδίο ροής μέχρι το δίσκο του ρότορα.

Δηλαδή θα ισχύουν:

$$V_1 - V = a \cdot V_1 \quad (4.15)$$

$$V_1 - V_2 = 2 \cdot a \cdot V_1 \quad (4.16)$$

Ο όρος a είναι γνωστός σαν ο συντελεστής αξονικής επαγωγής και είναι ένα μέτρο της επίδρασης του ρότορα στην ελεύθερη ροή του ανέμου. Στη βέλτιστη περίπτωση όπου ο ρότορας έχει καταφέρει να αποσπάσει όλη την ισχύ του ανέμου, δηλαδή η ταχύτητα ροής στο απόρρευμα είναι μηδενική, $V_2 = 0$, συνεπάγεται ότι η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο συντελεστής αξονικής επαγωγής a είναι $a_{max} = 0,5$.

Η δύναμη της ώθησης δεν έχει τόσο άμεση επίδραση στη συμπεριφορά και απόδοση του ρότορα και γενικότερα της ανεμογεννήτριας όσο έχει η επίδραση της ισχύος. Από τον 1^ο Νόμο της Θερμοδυναμικής υποθέτοντας ισοθερμική ροή, η περιβαλλοντική πίεση μακριά στο απόρρευμα είναι:

$$P = 0,5 \rho A (V_1^2 - V_2^2) V = 0,5 \rho A V (V_1 + V_2)(V_1 - V_2) \quad (4.17)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις, ο αδιάστατος συντελεστής ισχύος, για το δίσκο δράσης, σύμφωνα με τη θεωρία των Rankine-Froude, είναι:

$$C_p = \frac{P}{0,5 \rho V_1^3 A} = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (4.18)$$

Διαφορίζοντας τη σχέση (4.18) ως προς α καταλήγουμε στη σχέση:

$$\frac{dC_p}{d\alpha} = 4(1 - \alpha)(1 - 3\alpha) \quad (4.19)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορεί εύκολα ναδειχτεί ότι ο συντελεστής C_p λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όταν $\alpha=1/3$. Δηλαδή για $\alpha=1/3$ γίνεται:

$$C_{p,max} = 16/27 = 0,593 \quad (4.20)$$

Εξετάζοντας προσεκτικότερα τη σχέση (4.2.15), παρατηρούμε ότι ο παρονομαστής είναι η κινητική ενέργεια του ανέμου στο αδιατάραχτο πεδίο ροής του η οποία περιέχεται σε ένα ροϊκό σωλήνα διατομής ίσης με εκείνης του ρότορα που εξετάζουμε (Οριο Betz).

Από την άλλη, για την απόδοση του δίσκου δράσης έχουμε:

$$n_d = \frac{P}{0,5 \rho V_1^2 V A} = 4\alpha(1 - \alpha) \quad (4.21)$$

όπου n_d είναι η απόδοση του δίσκου δράσης.

Η μέγιστη απόδοσή του είναι $n_{d,max} = 100\%$ όταν ο συντελεστής αξονικής επαγωγής λάβει την τιμή $\alpha = 0,5$ από την οποία συνεπάγεται και αδιάστατος συντελεστής ισχύος $C_p = 0,5$, ενώ, όταν ο αδιάστατος συντελεστής ισχύος λάβει τη μέγιστη τιμή του, τότε η απόδοση του δίσκου δράσης είναι $n_d = 88,8\%$.

4.2.4 ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΟΡΜΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΑΠΟΡΕΥΜΑ

Με την επιπλέον θεώρηση της περιστροφικής κίνησης του απορρευμάτος μπορεί να επιτευχθεί ένα περισσότερο εξιδανικευμένο μοντέλο ροής. Ενώ αρχικά το αδιατάραχτο πεδίο ροής θεωρήθηκε χωρίς περιστροφή, η αλληλεπίδρασή του με ένα περιστρεφόμενο ρότορα έχει ως άμεση επίδραση την περιστροφική κίνηση του απορρευμάτος της ροής.

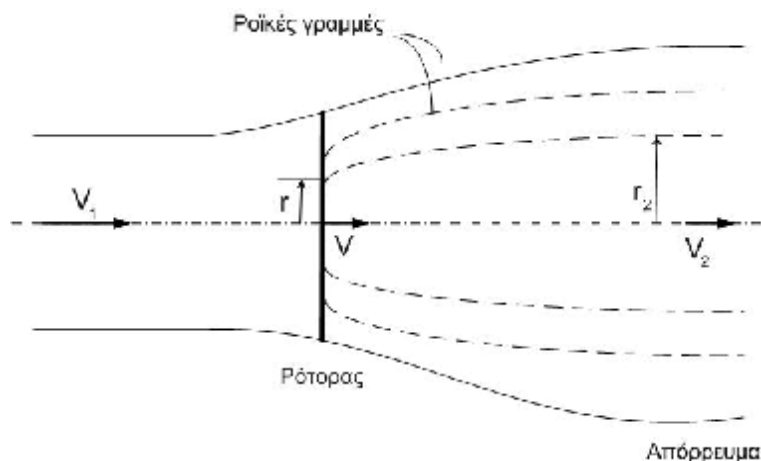
Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που εξετάζουμε μια ναυτική προπέλα ή μια έλικα ενός ελικοπτέρου, η οποία αποτελεί μια εργομηχανή, αυτή λαμβάνει μηχανική ενέργεια μέσω ενός περιστρεφόμενου άξονα και τη διοχετεύει στο ρευστό μέσο εντός του οποίου βρίσκεται, και το απόρρευμά της έχει την ίδια φορά περιστροφής με εκείνη των πτερυγίων της.

Αντιθέτως, στην προκειμένη περίπτωση της ανεμογεννήτριας, που αποτελεί κινητήρια μηχανή, η ενέργεια του ρευστού μέσου (αέρας) διοχετεύεται στο ρότορα και κατ' επέκταση στον άξονα περιστροφής του, και το απόρρευμά του περιστρέφεται με αντίθετη φορά από εκείνη του ρότορα.

Έτσι, αν υπάρχει περιστροφική κινητική ενέργεια στο απόρρευμα σε συνδυασμό με την υπάρχουσα μεταφορική κινητική ενέργεια, θα πρέπει σύμφωνα με θερμοδυναμικές θεωρήσεις, να αναμένουμε λιγότερη αποσπώμενη ισχύ σε σχέση με εκείνη που θα λαμβάναμε στην περίπτωση της ύπαρξης μόνο της μεταφορικής κινητικής ενέργειας.

Πρώτος ο Joukowski (Joukowski, 1912), έλαβε υπόψη του την επίδραση της περιστροφικής κίνησης του απορρεύματος κατά την ανάλυση προπελών. Τα αποτελέσματα των αναλύσεών του για την περίπτωση των ανεμογεννητριών, έχουν μεγάλη επίδραση στα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης, όπως εξάλλου θα φανεί και στην παρακάτω ανάλυση.

Χρησιμοποιώντας την ανάλυση του ροϊκού σωλήνα, μπορούμε να συντάξουμε ορισμένες εξισώσεις οι οποίες θα συσχετίζουν την αξονική και περιστροφική συνιστώσα της ταχύτητας του απορρεύματος με τις αντίστοιχες συνιστώσες ταχυτήτων στο επίπεδο του ρότορα. Επιπροσθέτως, για ορισμένες ειδικές περιπτώσεις, μπορεί να σχηματιστεί ένας ειδικός συντελεστής ισχύος. Το βασικό αποτέλεσμα από αυτή την προσέγγιση είναι ένα μέτρο εκτίμησης της επίδρασης της περιστροφικής κίνησης του απορρεύματος στις αντίστοιχες συνιστώσες των ταχυτήτων στο επίπεδο του ρότορα και στο απόρρευμα της ροής.



Εικόνα 4.4: Ποιοτική απεικόνιση του μοντέλου του ροϊκού σωλήνα για ροή μέσω ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα

Στην Εικόνα 4.4 φαίνεται η γεωμετρία του ροϊκού σωλήνα που σχηματίζεται κατά τη ροή του αέρα μέσω μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.

Υποθέτοντας μηδενική αντίσταση του αέρα, καταλήγουμε στις εξής σχέσεις:

Αρχή της Συνέχειας:

$$V_1 r_1 dr = V_2 r_2 dr_2 \quad (4.22)$$

Αρχή Διατήρησης της Ορμής:

$$r_1^2 \omega_1 = r_2^2 \omega_2 \quad (4.23)$$

Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας:

$$0,5(U - V_1)^2 = \frac{W + w_1 / 2}{V_1} - \frac{W + w / 2}{V} \times V_1 \times w_1 \times r_1^2 \quad (4.24)$$

όπου r , r_2 είναι οι ακτινικές συντεταγμένες στο ρότορα και στο απόρρευμα, αντίστοιχα σε (m), dr και dr_2 είναι τα ακτινικά πάχη του ροϊκού σωλήνα στο ρότορα και στο απόρρευμα σε (m) και ω , ω_2 είναι η γωνιακή ταχύτητα του αέρα στο ρότορα και στο επίπεδο του απορρεύματος, αντίστοιχα σε (rad/s).

Επίσης, μια ακόμη σχέση που εκφράζει την ακτινική κλίση της αξονικής ταχύτητας, προερχόμενη από την εξίσωση του Euler, γράφεται ως εξής:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{\omega_1^2 - V_1^2}{2} \right) = (W + w_2) \times \frac{d}{dr_2} (w_2 \times r_2^2) \quad (4.25)$$

όπου Ω είναι η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα σε (rad/s).

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα για να εξάγουμε σχέσεις που θα εκφράζουν την ώθηση και τη ροπή στο απόρρευμα. Όμως θα πρέπει εκ των προτέρων να γνωρίζουμε τουλάχιστον έναν από τους βασικούς παράγοντες αυτών των σχέσεων έτσι ώστε να οδηγηθούμε σε ορθή εξαγωγή αποτελεσμάτων. Έστω ότι γνωρίζουμε την γωνιακή ταχύτητα ω του αέρα στο επίπεδο του ρότορα. Έτσι, λαμβάνοντας όλα αυτά υπόψη, η ροή του ρευστού φαίνεται να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ø Η πίεση μεταβάλλεται κατά μήκος του απορρεύματος εξαιτίας της ταχύτητας περιστροφής.
- Ø Οι αξονικές συνιστώσες των ταχυτήτων του ρότορα και του απορρεύματος μεταβάλλονται ακτινικά.
- Ø Η γωνιακή ταχύτητα του αέρα έχει διαφορετική φορά στο απόρρευμα από ότι πάνω στο ρότορα, με αποτέλεσμα την ύπαρξη ασυνέχειας στη κατάντη πλευρά του ρότορα.

Αν στη σχέση (4.25) υποθέσουμε ότι η ποσότητα $r \cdot \omega_2$ είναι σταθερή, δηλαδή έχουμε αστρόβιλο απόρρευμα αέρα, τότε η αξονική ταχύτητα του απορρεύματος είναι

σταθερή κατά μήκος μιας ακτίνας αφού τότε μηδενίζεται το δεξιό σκέλος αυτής της σχέσης. Έχουμε λοιπόν:

$$V = V_1(1 - a) \quad (4.26)$$

$$V_2 = V_1(1 - b) \quad (4.27)$$

όπου a είναι ο συντελεστής αξονικής επαγωγής του ρότορα και b ο συντελεστής αξονικής επαγωγής του απορρεύματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.26) και (4.27), η σχέση (4.25) μπορεί να πάρει την εξής μορφή:

$$a = \frac{b}{2} \left[\frac{1}{\lambda} - \frac{(1 - a)b^2}{4\lambda^2(b - a)} \right] \quad (4.28)$$

Επιπλέον ο αδιάστατος συντελεστής ισχύος παίρνει και αυτός την παρακάτω μορφή:

$$C_p = \frac{b^2(1 - a)^2}{b - a} \quad (4.29)$$

Με προσεκτικότερο έλεγχο της σχέσης (4.28), παρατηρούμε ότι η μείωση της αξονικής ταχύτητας στο ρότορα είναι πάντα περίπου το μισό της αντίστοιχης για την περίπτωση που έχουμε $\lambda \geq 2$, πράγμα το οποίο ισχύει και για την περίπτωση που αμελείται η περιστροφική κίνηση του απορρεύματος.

Η σχέση (4.24) απαιτεί κάποιες τροποποιήσεις εφόσον έχουμε θεωρήσει ότι η ποσότητα $r \cdot \omega_2$ είναι σταθερή. Έτσι στην περίπτωση που θεωρούμε ένα μη περιστρεφόμενο στροβιλικό απόρρευμα, θα πρέπει αυτό να αντικατασταθεί με ένα στροβιλικό απόρρευμα τύπου Rankine το οποίο περιέχει ένα περιστρεφόμενο πυρήνα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ίση με τη μέγιστη που αναπτύσσεται στο ρότορα.

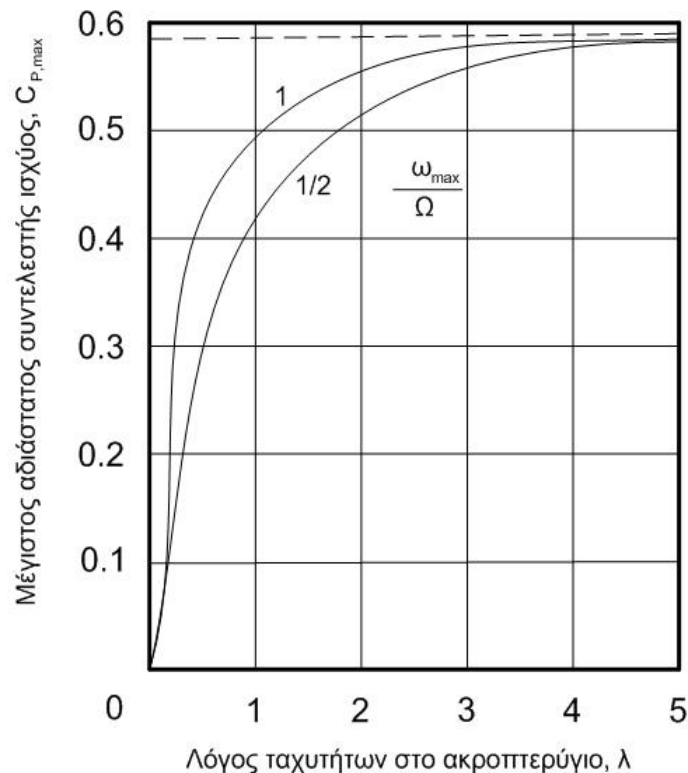
Έτσι καταλήγουμε στην παρακάτω τροποποιημένη σχέση του αδιάστατου συντελεστή ισχύος:

$$C_p = \frac{b(1 - a)^2}{b - a} \left[b + (2a - b) \frac{W}{w_{\max}} \right] \quad (4.29)$$

όπου ω_{\max} είναι η γωνιακή ταχύτητα του πυρήνα του απορρεύματος εκφρασμένη σε (rad/s).

Ο μέγιστος αδιάστατος συντελεστής ισχύος για ρότορα με στροβιλικό απόρρευμα τύπου Rankine απεικονίζεται στην Εικόνα 4.5. Όπως φαίνεται, ο συντελεστής αυτός παραμένει αμετάβλητος στην επίδραση της γωνιακής ταχύτητας

του πυρήνα για την περίπτωση υψηλών τιμών του συντελεστή λ , αφού τότε η ροπή και συνεπώς η περιστροφή του απορρεύματος δε λαμβάνονται υπόψη.



Εικόνα 4.5: Μέγιστος αδιάστατος συντελεστής ισχύος για ρότορα ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα με στροβιλικό απόρρευμα τύπου Rankine συναρτήσει του συντελεστή ταχυστροφίας λ .

4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ-ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ (BEM)

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί το μοντέλο της μεθόδου στοιχείου – πτερυγίου, όπως αυτή δόθηκε από τον Glauert (Glauert, 1935). Στη μονοδιάστατη θεωρία της ορμής δεν δίνεται βάση στη γεωμετρία του ρότορα όπως είναι για παράδειγμα ο αριθμός των πτερυγίων, η μεταβολή της καμπυλότητας, της χορδής και των αεροτομών κ.α. Η μέθοδος του στοιχείου – πτερυγίου συνδέει τη θεωρία της ορμής με τα τοπικά φαινόμενα που επιδρούν πάνω στα πτερύγια. Ο ροϊκός σωλήνας που αντιστοιχεί στον ρότορα χωρίζεται διακριτά σε N δακτυλιοειδή στοιχεία, πάχους dr όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6. Τα πλευρικά όρια των στοιχείων αυτών συνθέτονται από ροϊκές γραμμές και συνεπώς δεν υπάρχει ροή διαμέσου των ορίων αυτών. Στο μοντέλο BEM γίνονται οι εξής υποθέσεις για κάθε δακτυλιοειδές στοιχείο:

- Δεν υπάρχει ακτινική εξάρτηση μεταξύ των στοιχείων. Αυτό σημαίνει πως ότι συμβαίνει σε ένα στοιχείο δεν επηρεάζει το άλλο.
- Η δύναμη από τα πτερύγια που επιδρά στη ροή είναι σταθερή για κάθε δακτυλιοειδές στοιχείο. Αυτό μεταφράζεται στην ύπαρξη ενός ρότορα με άπειρο αριθμό πτερυγίων.

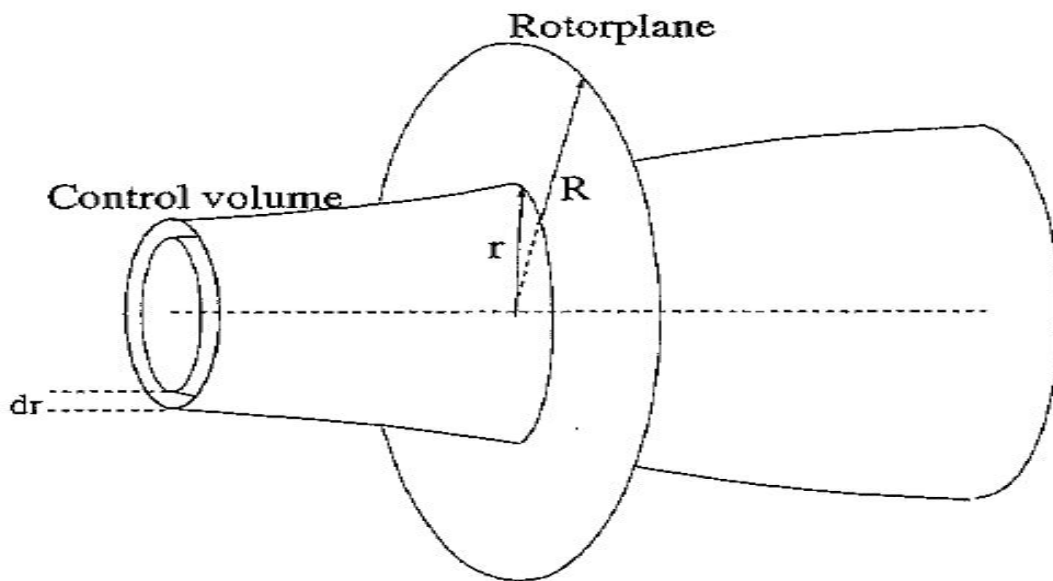
Για την προσαρμογή της δεύτερης πρότασης πάνω σε έναν ρότορα με πεπερασμένο αριθμό πτερυγίων θα εισαχθεί ένας συντελεστής διόρθωσης γνωστός ως συντελεστής «απωλειών ακροπτερυγίων» του Prandtl (tip-loss factor).

Επειδή η κατανομή της πίεσης κατά μήκος των καμπυλωτών ροϊκών γραμμών που περικλείουν το απόρρευμα δεν δίνει αξονική συνιστώσα δύναμης στην μονοδιάστατη ροή, γίνεται η υπόθεση ότι κάτι τέτοιο ισχύει και για τον δακτυλιοειδή όγκο ελέγχου της Εικόνας 4.6. Η ώθηση από τον δίσκο σε αυτόν τον όγκο ελέγχου μπορεί να βρεθεί με ολοκλήρωση της εξίσωσης της ορμής εάν η επιφάνεια διατομής του όγκου ελέγχου στο επίπεδο του ρότορα είναι $2\pi r dr$:

$$dT = \dot{m}(V_0 - u_1) = 2\pi r \rho u (V_0 - u_1) dr \quad (4.30)$$

Η ροπή dM στο δακτυλιοειδές στοιχείο βρίσκεται από την εξίσωση της ορμής στον όγκο ελέγχου, θέτοντας την ταχύτητα περιστροφής ανάντη του ρότορα σε μηδέν και κατάντη σε C_θ στο απόρρευμα:

$$dM = \dot{m} r C_\theta = 2\pi r^2 \rho u C_\theta dr \quad (4.31)$$



Εικόνα 4.6: Όγκος ελέγχου δακτυλιοειδούς στοιχείου

Η σχέση 4.31 μπορεί να προκύψει κατευθείαν και από την εξίσωση του Euler

$$dP = \omega dM \quad (4.32)$$

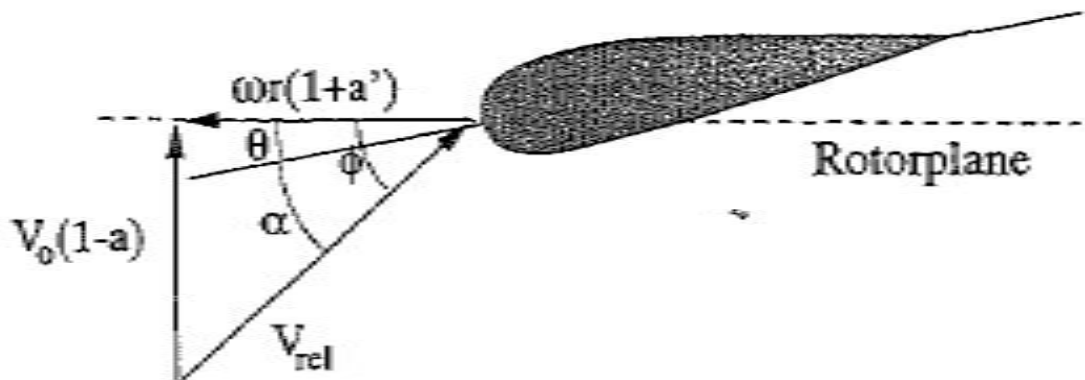
Για ένα ιδανικό ρότορα παρατηρήθηκε ότι η αξονική ταχύτητα του απόρρευματος u_1 μπορεί να εκφραστεί ως προς τον αξονικό συντελεστή επαγωγής α και την ταχύτητα του ανέμου V_0 ως $u_1 = (1 - 2\alpha)V_0$. Με αυτή τη σχέση προσεγγίζεται αρκετά και η συμπεριφορά ενός ρότορα με δίνη στο απόρρευμα. Η ώθηση και η ροπή μπορούν να υπολογιστούν επίσης και από τις σχέσεις:

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 \alpha (1 - \alpha) dr \quad (4.33)$$

και

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_0 \omega (1 - \alpha) \alpha' dr \quad (4.34)$$

Τα αριστερά μέρη των παραπάνω εξισώσεων υπολογίζονται από την τοπική ροή γύρω από την πτέρυγα. Η σχετική ταχύτητα V_{rel} που δέχεται ένα κομμάτι μιας πτέρυγας εξαρτάται από την αξονική ταχύτητα $(1 - \alpha)V_0$ και την εφαπτομενική ταχύτητα $(1 + \alpha')\omega r$ στο επίπεδο του ρότορα (Εικόνα 4.7). Με θ συμβολίζεται το βήμα του περυγίου, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στο επίπεδο περιστροφής και τη χορδή και με φ η γωνία ανάμεσα στο επίπεδο περιστροφής και τη σχετική ταχύτητα V_{rel} .



Εικόνα 4.7: Διανύσματα των ταχυτήτων στο επίπεδο της αεροτομής

Από την Εικόνα 4.7 είναι εμφανές ότι η τοπική γωνία προσβολής α δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = \varphi - \theta \quad (4.35)$$

Και

$$\tan \varphi = \frac{(1 - \alpha)V_0}{(1 + \alpha')\omega r} \quad (4.36)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η άνωση είναι κάθετη στην ταχύτητα που δέχεται η αεροτομή ενώ η αντίσταση παράλληλη. Στην περίπτωση του ρότορα, η ταχύτητα που δέχεται η αεροτομή είναι η σχετική ταχύτητα V_{rel} . Επίσης, αν οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης C_l και C_d είναι γνωστοί, η άνωση L και η αντίσταση D ανά μονάδα μήκους υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c C_l \quad (4.37)$$

Και

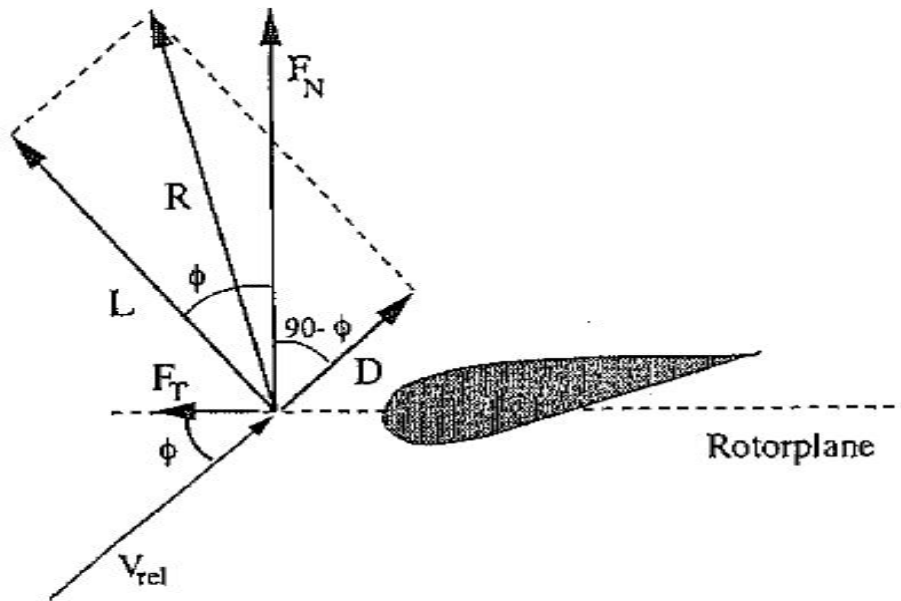
$$D = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c C_d \quad (4.38)$$

Το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στις δυνάμεις κάθετα και εφαπτομενικά στο επίπεδο του ρότορα. Έτσι αναλύοντας την άνωση και την αντίσταση σε αυτές τις κατευθύνσεις (Εικόνα 4.8) προκύπτει:

$$F_N = L \cos \varphi + D \sin \varphi \quad (4.39)$$

και:

$$F_T = L \sin \varphi - D \cos \varphi \quad (4.40)$$



Εικόνα 4.8: Δυνάμεις στο επίπεδο της αεροτομής

Αδιαστατοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις με τον παράγοντα $\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 c$, προκύπτει:

$$C_n = C_l \cos\phi + C_d \sin\phi \quad (4.41)$$

Και

$$C_t = C_l \sin\phi - C_d \cos\phi \quad (4.42)$$

Όπου

$$C_n = \frac{F_N}{\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 c} \quad (4.43)$$

και

$$C_t = \frac{F_T}{\frac{1}{2}\rho V_{rel}^2 c} \quad (4.44)$$

Επίσης, από την Εικόνα 4.7 προκύπτει πως:

$$V_{rel} \sin\phi = (1 - \alpha)V_0 \quad (4.45)$$

Και

$$V_{rel} \cos \varphi = (1 + \alpha') \omega r \quad (4.46)$$

Ο παράγοντας στερεότητας σ είναι το κλάσμα της δακτυλιοειδούς επιφάνειας του όγκου ελέγχου που καλύπτεται από πτερυγία, και δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma(r) = \frac{c(r)B}{2\pi r} \quad (4.47)$$

όπου με B συμβολίζεται ο αριθμός των πτερυγίων, με $c(r)$ η τοπική χορδή και με r η ακτίνα του όγκου ελέγχου.

Από τη στιγμή που οι δυνάμεις F_N και F_T είναι υπολογισμένες ανά μονάδα μήκους, η ολική δύναμη dT και ροπή dM στον όγκο ελέγχου πάχους dr υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$dT = BF_N dr \quad (4.48)$$

Και

$$dM = rBF_N dr \quad (4.49)$$

Και με αντικαταστάσεις από παραπάνω σχέσεις, προκύπτουν τελικά οι εξισώσεις:

$$dT = \frac{1}{2} \rho B \frac{(1 - \alpha)^2 V_0^2}{\sin^2 \varphi} c C_N dr \quad (4.50)$$

Και

$$dM = \frac{1}{2} \rho B \frac{(1 - \alpha) V_0 (1 + \alpha') \omega r}{\sin \varphi \cos \varphi} c C_T r dr \quad (4.51)$$

Εάν εξισωθούν οι δύο εξισώσεις που αφορούν το dT και εφαρμοστεί ο ορισμός της στερεότητας σ προκύπτει μια νέα σχέση για τον συντελεστή αξονικής επαγωγής α :

$$\alpha = \frac{1}{[(4 \sin^2 \varphi / \sigma C_n) + 1]} \quad (4.52)$$

Εάν από την άλλη εξισωθούν οι δύο εξισώσεις που αφορούν το dM ο συντελεστής αξονικής επαγωγής α' δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha' = \frac{1}{[(4 \sin \varphi \cos \varphi / \sigma C_t) - 1]} \quad (4.53)$$

Πλέον έχουν γίνει γνωστές όλες οι απαιτούμενες σχέσης της BEM μεθόδου με αποτέλεσμα να εξαχθεί ένας αλγόριθμος οκτώ βημάτων:

Βήμα 1: Δίνονται αρχικές τιμές στα α και α' , $\alpha = \alpha' = 0$

Βήμα 2: Υπολογίζεται η γωνία ροής φ

Βήμα 3: Υπολογίζεται η τοπική γωνία προσβολής $\alpha = \varphi - \theta$

Βήμα 4: βρίσκονται οι αεροδυναμικοί συντελεστές από πίνακα

Βήμα 5: Υπολογίζονται οι συντελεστές C_n και C_t

Βήμα 6: Υπολογίζονται τα α και α'

Βήμα 7: Συγκρίνονται οι τιμές των α και α' που υπολογίσθηκαν στο Βήμα 7 με τις αρχικές τιμές. Εάν η διαφορά υπερβαίνει το επίπεδο αποδοχής, επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος από το Βήμα 2 και μετά. Αν η διαφορά είναι αποδεκτή τότε τελειώνει η επαναληπτική διαδικασία για το στοιχείο.

Βήμα 8: Υπολογίζονται οι τοπικές δυνάμεις στο στοιχείο του πτερυγίου.

Ο αλγόριθμός αυτός εφαρμόζεται για κάθε ανεξάρτητο όγκο ελέγχου στον οποίο έχει διακριτοποιηθεί η πτέρυγα και τελειώνει όταν συμπληρωθεί το σύνολο των όγκων ελέγχου που την αποτελούν.

Για να εξασφαλίσουμε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της μεθόδου, θα πρέπει να εισάγουμε δύο διορθωτικούς παράγοντες στον αλγόριθμο. Ο πρώτος είναι ο συντελεστής απωλειών ακροπτερυγίων του Prandtl, ο οποίος αντισταθμίζει την υπόθεση ότι ο ρότορας έχει άπειρο αριθμό πτερυγίων. Ο δεύτερος είναι του Glauert, ο οποίος στην ουσία είναι μια εμπειρική σχέση για τον συντελεστή ώθησης C_T και τον συντελεστή αξονικής επαγωγής α , που εφαρμόζεται για τιμές του α μεγαλύτερες από 0,4.

Μετά την εφαρμογή του BEM σε όλους τους όγκους ελέγχου, προκύπτει η κατανομή της εφαπτομενικής και της κάθετης δύναμης στο πτερύγιο και μπορούν να υπολογιστούν τα συνολικά μεγέθη όπως η μηχανική ισχύς, η ώθηση και οι καμπτικές ροπές βάσης. Η ολοκλήρωση των εφαπτομενικών δυνάμεων για την εύρεση της ροπής του άξονα, ωστόσο, θα πρέπει να γίνει με προσοχή. Η εφαπτομενική δύναμη ανά μονάδα μήκους $F_{T,i}$ είναι γνωστή για κάθε κομμάτι σε ακτίνα r_i και, ανάμεσα σε δύο συνορεύοντα κομμάτια r_i και r_{i+1} γίνεται η υπόθεση της γραμμικής μεταβολής των μεγεθών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.9. Με βάση αυτή την υπόθεση η δύναμη F_T ανάμεσα στις ακτίνες r_i και r_{i+1} υπολογίζεται ως:

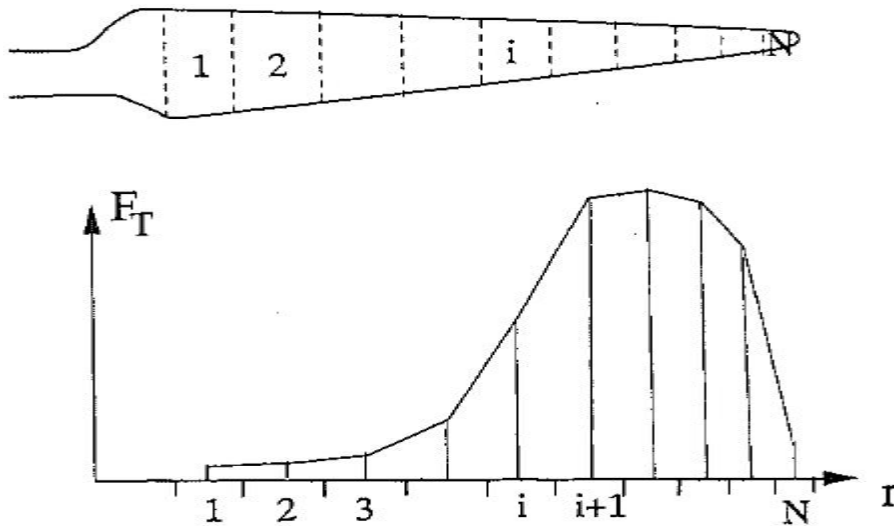
$$F_T = A_i r + B_i \quad (4.54)$$

Όπου

$$A_i = \frac{F_{T,i+1} - F_{T,i}}{r_{i+1} - r_i} \quad (4.55)$$

Και

$$B_i = \frac{F_{T,i} r_{i+1} - F_{T,i+1} r_i}{r_{i+1} - r_i} \quad (4.56)$$



Εικόνα 4.9: Γραμμική μεταβολή της εφαπτομενικής δύναμης ανάμεσα σε δυο ακτινικές θέσεις r_i και r_{i+1}

Η ροπή dM για ένα απειροστό κομμάτι του πτερυγίου, μήκους dr είναι:

$$dM = r F_T dr = (A_i r^2 + B_i r) dr \quad (4.57)$$

και η συμβολή του μεγέθους της ροπής $M_{i,i+1}$ στη συνολική ροπή του άξονα, δεδομένης της γραμμικής μεταβολής της εφαπτομενικής δύναμης μεταξύ των ακτινικών θέσεων r_i και r_{i+1} είναι:

$$M_{i,i+1} = \left[\frac{1}{3} A_i r^3 + \frac{1}{2} B_i r^2 \right]_{r_i}^{r_{i+1}} = \frac{1}{3} A_i (r_{i+1}^3 - r_i^3) + \frac{1}{2} B_i (r_{i+1}^2 - r_i^2) \quad (4.58)$$

Η ολική ροπή στον άξονα είναι το άθροισμα όλων των όρων $M_{i,i+1}$ κατά μήκος του πτερυγίου, πολλαπλασιασμένο με τον αριθμό των πτερυγίων του ρότορα:

$$M_{\text{tot}} = B \sum_1^{N-1} M_{i,i+1} \quad (4.59)$$

4.3.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΑΚΡΟΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΤΟΥ PRANDTL (TIP-LOSS FACTOR)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο συντελεστής απωλειών ακροπτερυγίων του Prandtl αντισταθμίζει την υπόθεση ότι ο ρότορας αποτελείται από άπειρο αριθμό πτερυγίων. Το σύστημα των στροβίλων στο απόρρευμα διαφέρει σε ένα ρότορα με πεπερασμένο αριθμό πτερυγίων από ένα ρότορα με θεωρητικά άπειρο αριθμό πτερυγίων. Ο Prandtl εισήγαγε ένα συντελεστή διόρθωσης F για τις εξισώσεις dT και dM , ως εξής:

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 a(1 - \alpha) F dr \quad (4.60)$$

και

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_0 \omega (1 - \alpha) \alpha' F dr \quad (4.61)$$

Με τον συντελεστή F να ορίζεται από τη σχέση:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{-f} \quad (4.62)$$

Όπου

$$f = \frac{B}{2} \frac{R - r}{r \sin \varphi} \quad (4.63)$$

Στην παραπάνω σχέση B είναι ο αριθμός των πτερυγίων, R η ακτίνα του ρότορα, r η τοπική ακτίνα και φ η γωνία ροής. Τα μεγέθη α και α' προκύπτουν τώρα από τις σχέσεις:

$$\alpha = \frac{1}{[(4F \sin^2 \varphi / \sigma C_n) + 1]} \quad (4.64)$$

Και

$$\alpha' = \frac{1}{[(4F \sin \varphi \cos \varphi / \sigma C_t) - 1]} \quad (4.65)$$

Στο Βήμα 6 του αλγορίθμου της BEM μεθόδου είναι πιο σωστό να χρησιμοποιούνται οι παραπάνω σχέσεις. Επίσης, είναι απαραίτητο να εισαχθεί και ένα επιπλέον βήμα υπολογισμού του παράγοντα F μετά το Βήμα 2.

4.3.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΟΥ GLAUERT ΓΙΑ ΥΨΗΛΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ A

Όταν ο συντελεστής αξονικής επαγωγής a παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 0,4 τότε η θεωρία της ορμής παύει να ισχύει. Δημιουργούνται έτσι διάφορες εμπειρικές εκτιμήσεις για το συντελεστή ώθησης C_T με σκοπό την ταύτιση με τα πειραματικά δεδομένα. Δύο τέτοιες σχέσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια:

$$C_T = \begin{cases} 4\alpha(1 - \alpha)F & \alpha \leq \frac{1}{3} \\ 4\alpha \left(1 - \frac{1}{4}(5 - 3\alpha)\alpha\right)F & \alpha > \frac{1}{3} \end{cases} \quad (4.66)$$

ή

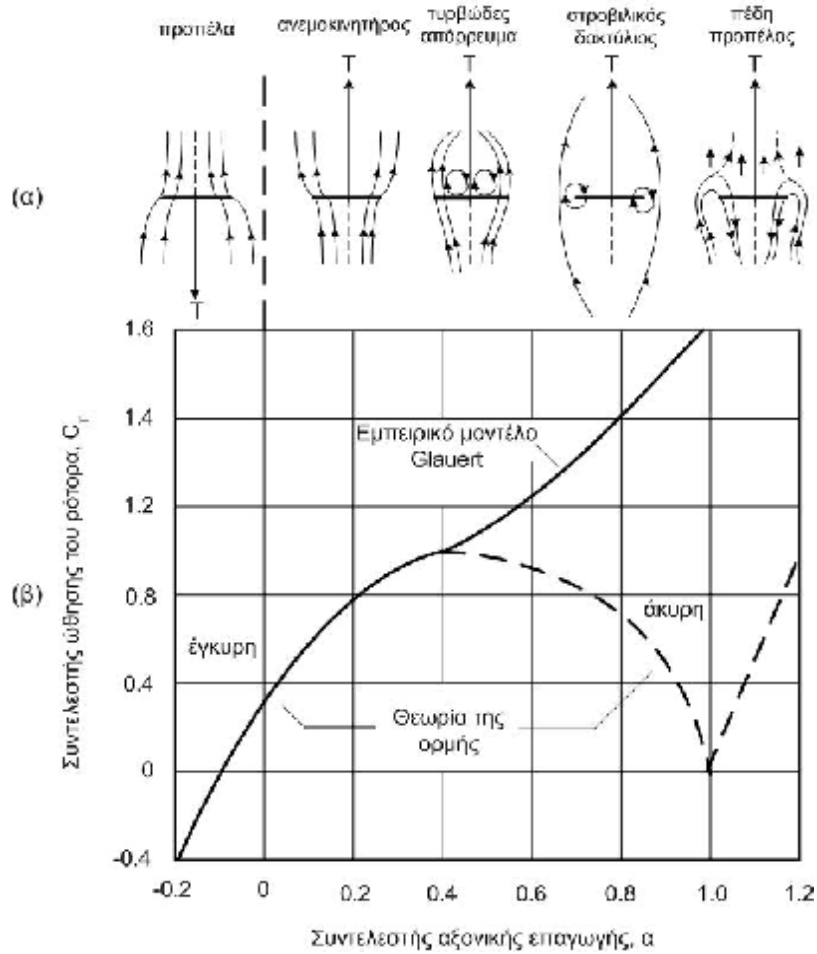
$$C_T = \begin{cases} 4\alpha(1 - \alpha)F & \alpha \leq \alpha_c \\ 4(\alpha_c^2 + (1 - 2\alpha_c)\alpha)F & \alpha > \alpha_c \end{cases} \quad (4.67)$$

Στην τελευταία ο παράγοντας α_c είναι περίπου 0,2 και F είναι ο συντελεστής διόρθωσης του Prandtl. Στην Εικόνα 4.10 δίνονται γραφικά οι δύο παραπάνω εκφράσεις για το C_T και για $F = 1$ και παράλληλα συγκρίνονται με αυτή από την απλή θεωρία της ορμής. Η θεωρία της αεροδυναμικής δίνει την ώθηση για ένα δακτυλιοειδές στοιχείο. Για ένα δακτυλιοειδή όγκο ελέγχου ο C_T είναι εξ' ορισμού:

$$C_T = \frac{dT}{\frac{1}{2}\rho V_0^2 2\pi r dr} \quad (4.68)$$

Εάν γίνει χρήση της σχέσης (4.60) για τον υπολογισμό του dT , ο C_T γίνεται:

$$C_T = \frac{(1 - \alpha)^2 \sigma C_n}{\sin^2 \varphi} \quad (4.69)$$



Εικόνα 4.10: α) Ροϊκά μοντέλα και (β) συντελεστής ώθησης του ρότορα C_T συναρτήσει του συντελεστή αξονικής επαγωγής α .

Εάν η σχέση 4.69 για τον συντελεστή C_T εξισωθεί με την εμπειρική σχέση 4.67 τότε για $\alpha \leq \alpha_c$ ισχύει:

$$4\alpha(1 - \alpha)F = \frac{(1 - \alpha)^2 \sigma C_n}{\sin^2 \varphi} \quad (4.70)$$

και αυτό δίνει:

$$\alpha = \frac{1}{[(4F \sin^2 \varphi / \sigma C_n) + 1]} \quad (4.71)$$

η οποία είναι η κανονική σχέση (4.65).

Για $\alpha > \alpha_c$ ισχύει:

$$4F(a_c^2 + (1 - 2\alpha_c)\alpha) = \frac{(1 - \alpha)^2 \sigma C_n}{\sin^2 \varphi} \quad (4.72)$$

και αυτό δίνει:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[2 + K(1 - 2\alpha_c) - \sqrt{(K(1 - 2\alpha_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right] \quad (4.73)$$

όπου:

$$K = \frac{4F \sin^2 \varphi}{\sigma C_n} \quad (4.74)$$

Για να υπολογιστούν με ακρίβεια οι ταχύτητες που προκύπτουν στην πτέρυγα για μικρές ταχύτητες ανέμου, οι εξισώσεις 4.74 και 4.72 θα πρέπει να αντικαταστήσουν την σχέση (4.65) από την απλή θεωρία ορμής.

5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΡΟΤΟΡΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

5.1 ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Στην περίπτωση που επιχειρείται ο σχεδιασμός ρότορα μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα, με δεδομένη κατανομή βήματος και πλάτους πτερυγίου, ακολουθείται συγκεκριμένος αλγόριθμος ο οποίος βασίζεται στα εξής βασικά μεγέθη:

Συντελεστής ισχύος C_p

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το όριο Betz ορίζει τον μέγιστο συντελεστή ισχύος, για την ιδεατή περίπτωση του ρότορα ανεμογεννήτριας με άπειρα πτερύγια, για οποιαδήποτε ταχύτητα του ανέμου και χωρίς απώλειες. Είναι $C_{pB} = 16/27 = 0,593$ και προφανώς ο μέγιστος συντελεστής ισχύος $C_{p_{max}}$ μιας πραγματικής αιολικής μηχανής είναι μικρότερος.

Σύμφωνα με τις αναλύσεις σχεδιασμού των ανεμογεννητριών, ο $C_{p_{max}}$ εξαρτάται κυρίως από τους εξής παράγοντες: τον αριθμό πτερυγίων B , τον αριθμό ταχυστροφίας $\lambda = \omega \cdot R/V_0$, όπου R η ακτίνα του ρότορα, ω η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα και V_0 η ταχύτητα του ανέμου και επίσης από την αεροδυναμική απόδοση D/L της αεροτομής του πτερυγίου, η οποία ορίζεται με τον λόγο της αεροδυναμικής αντίστασης D προς την άνωση L για τη γωνία προσβολής σχεδιασμού.

Ο ακόλουθος τύπος του Wilson (1976) έχει προκύψει από πολλά εμπειρικά και υπολογιστικά δεδομένα και λαμβάνει υπόψη τους προαναφερθέντες παράγοντες:

$$\frac{C_{p_{max}}}{C_{pB}} = \frac{\lambda z^{0,67}}{1,48 + (z^{0,67} - 0,04)\lambda + 0,025\lambda^2} - \frac{1,92\lambda^2 D}{1 + 2\lambda L} \quad (5.1)$$

Επίσης για την αεροδυναμική απόδοση είναι γνωστό ότι ισχύει:

$$\frac{D}{L} = \frac{C_D}{C_L} \quad (5.2)$$

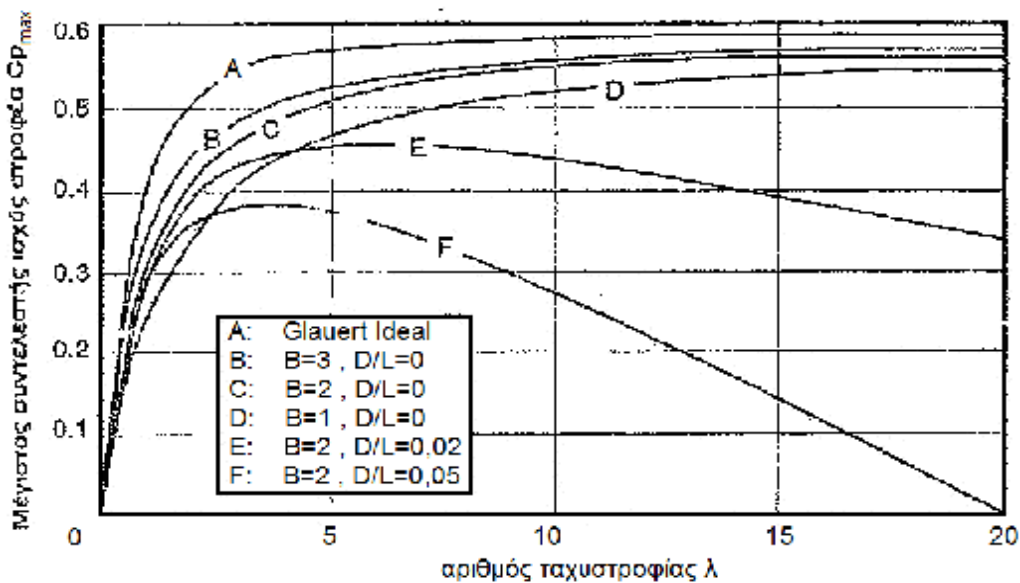
το οποίο υπολογίζεται εύκολα από τα διαγράμματα C_D και C_L των αεροτομών.

Αν θεωρηθεί, ότι η αεροδυναμική απόδοση της ανεμογεννήτριας είναι 90% και ο συνολικός βαθμός απόδοσης των μηχανικών συστημάτων είναι επίσης 90%, τότε προκύπτει η εύλογη τιμή του συντελεστή ισχύος:

$$C_P = \frac{P}{0,5 \times V_1^3 \times A_R} = 0,9 \times 0,9 \times C_{PB} = 0,81 \times 0,593 \approx C_P @ 0,48 \quad (5.3)$$

η οποία για εξελιγμένες ανεμογεννήτριες ίσως είναι κάπως χαμηλή.

Στην Εικόνα 5.1 δίνεται η εξάρτηση του $C_{P_{max}}$ από τον αριθμό ταχυτροφίας λ με παραμέτρους τον αριθμό πτερυγίων B και τον λόγο D/L . Είναι χρήσιμη για την αρχική επιλογή των βασικών χαρακτηριστικών του ρότορα για τον υπολογιστικό σχεδιασμό.



Εικόνα 5.1: Καμπύλες του μέγιστου συντελεστή ισχύος ρότορα οριζόντιου άξονα συναρτήσει του αριθμού ταχυτροφίας λ . Η αύξηση του αριθμού πτερυγίων και η μείωση της αντίστασης οδηγούν σε υψηλές τιμές του συντελεστή αντίστασης.

Ταχύτητα Ανέμου V_1

Κατά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών λαμβάνεται συνήθως από 4 έως 15 m/s. Για μικρότερες από 4 m/s ταχύτητες η λειτουργία διακόπτεται για λόγους ασφαλείας. Μια εύλογη πρώτη τιμή σχεδιασμού είναι 10 m/s. Η ταχύτητα σχεδιασμού διατηρείται σταθερή κατά την διάρκεια των υπολογισμών για το κανονικό σημείο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, που είναι και το σημείο μέγιστου συντελεστή ισχύος.

Όσον αφορά τις ταχύτητες της ανεμογεννήτριας διακρίνονται οι εξής χαρακτηριστικές τιμές:

- ∅ Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της μηχανής U_{in} ονομάζεται η ταχύτητα του ανέμου στην οποία γίνεται έναρξη της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Κάτω από αυτό το όριο οι απώλειες του κενού φορτίου της εγκατάστασης είναι μεγαλύτερες από την παραγόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας. Κυμαίνεται από 3 m/s έως 6 m/s, ενώ για μικρότερες τιμές η ισχύς του ανέμου παραμένει αναξιοποίητη.
- ∅ Ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας U_K ονομάζεται η μικρότερη ταχύτητα του ανέμου στην οποία έχουμε ονομαστική ισχύ της μηχανής. Κυμαίνεται από 8 m/s έως 15 m/s ανάλογα με τον κατασκευαστή. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου η πτερωτή ρυθμίζεται ώστε η ισχύς να μην υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ. Η ρύθμιση γίνεται με διάφορους τρόπους: α) με πέδηση μέσω αερόφρενων, β) με μεταβολή του βήματος των πτερυγίων, γ) με μεταβολή της διεύθυνσης του άξονα του ρότορα σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου, δ) με μεταβολή του αριθμού περιστροφών της μηχανής.
- ∅ Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας U_{out} , κατά την οποία διακόπτεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας για λόγους ασφαλείας. Κυμαίνεται από 20 m/s έως 30 m/s, όπου οι καλύτερες τιμές είναι για μικρότερες (και ελαφρότερες) κατασκευές και η υψηλότερη για ανεμογεννήτριες μεγάλης κατασκευαστικής αντοχής.

Κατά συνέπεια η ανεμογεννήτρια παράγει ωφέλιμη ισχύ σ' ένα σχετικό στενό διάστημα ταχυτήτων του ανέμου, μεταξύ της U_{in} και της U_K , αυξανόμενη σε συνάρτηση με την ταχύτητα και μεταξύ της U_K και U_{out} σταθερή ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου.

Πυκνότητα του αέρα ρ

Υπολογίζεται μία μέση τιμή για όλο το έτος από την καταστατική εξίσωση των τέλειων αερίων, όπως μπορεί να θεωρηθεί ο αέρας, με συνήθως μέση θερμοκρασία 15°C υπό κανονική πίεση 1 atm = 101325 Pa και για ειδική σταθερά αέρα $R=287,06$ J/kg·K. Προκύπτει:

$$\rho = \frac{P}{R \times T} = \frac{101325}{287,06 \times (273,15 + 15)} = 1,225 \frac{kg}{m^3} \quad (5.4)$$

Η πυκνότητα ρ διατηρείται σταθερή για όλο τον υπολογισμό. Οι χρονικές διακυμάνσεις λόγω των μεταβαλλόμενων μετεωρολογικών συνθηκών είναι μικρές. Μπορούν όμως να υπολογιστούν οι επιδράσεις τους στην ισχύ της ανεμογεννήτριας μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού.

Αριθμός πτερυγίων ρότορα B

Διπτέρυγες και τριπτέρυγες ανεμογεννήτριες επικρατούν στις περισσότερες εφαρμογές. Μεταξύ των δύο οι τριπτέρυγες μηχανές είναι ο πλέον συνηθέστερος τύπος για ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος. Γι' αυτό λαμβάνεται συνήθως:

B = 2 για μικρές ανεμογεννήτριες και

B = 3 για μεγάλες ανεμογεννήτριες.

Ισχύς ανεμογεννήτριας P

Ορίζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή και νοείται η ονομαστική ισχύς, δηλαδή η ισχύς όταν ο συντελεστής ισχύος C_p έχει τη μέγιστη τιμή του. Σε αυτήν την τιμή αντιστοιχεί ο ονομαστικός αριθμός ταχυστροφίας λ , δηλαδή ο λόγος της ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου, για ρότορα ακτίνας R και γωνιακή ταχύτητα ω (ή αριθμό στροφών N). Δίδεται:

$$\lambda = \frac{\omega_0 \cdot R}{V_1} = 2 \cdot \rho \cdot N \cdot \frac{R}{V_1} \quad (5.5)$$

Ακτίνα του ρότορα R

Από τις τιμές της ισχύος και του συντελεστή ισχύος και για επιφάνεια ρότορα $A_R = \pi \cdot R^2$ προκύπτει η ακτίνα R ως:

$$C_p = \frac{P}{0,5 \cdot \rho \cdot V_1^3 \cdot A_R} < C_{PB} \Rightarrow R = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\rho \cdot V_1^3 \cdot C_p}} \quad (5.6)$$

Η ακτίνα διατηρείται σταθερή καθ' όλου του υπολογισμού του σχεδιασμού, ο οποίος θα καταλήγει κατά κανόνα σε διαφορετικές τιμές για την ισχύ και τον συντελεστή ισχύος, όπως διαμορφώνονται τελικά από τον πλήρη αεροδυναμικό σχεδιασμό.

Αριθμός ταχυστροφίας λ

Λαμβάνει τιμές από 0 έως και 18 και επηρεάζει άμεσα τον συντελεστή ισχύος. Για καλοσχεδιασμένες μηχανές ο μέγιστος συντελεστής ισχύος παρατηρείται σε αριθμούς ταχυστροφίας 6 έως 10. Οπότε μια εύλογη τιμή για την εκκίνηση του σχεδιασμού είναι συνήθως $\lambda=8$.

Ο αριθμός στροφών N προκύπτει από τον αριθμό λ μέσω της γωνιακής ταχύτητας $\omega=2\cdot\pi\cdot N$, αφού είναι $\lambda = \omega \cdot R/V_1 = uR/V_1$, όπου uR είναι περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίων.

Ακτίνα αρχής (βάσης) του πτερυγίου γπ στην πλήμνη

Εξαρτάται από την κατασκευή της κάθε ανεμογεννήτριας. Μια εύλογη ενδεικτική τιμή για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό είναι: $r_\pi \approx 0,05 \cdot R$ με τάση στις μεγάλες μηχανές να είναι ακόμη μικρότερη και στις μικρές λίγο μεγαλύτερη.

Γωνία βήματος ή το βήμα β του πτερυγίου

Σχηματίζεται τοπικά από την ευθεία μηδενικής άνωσης της αεροτομής (ή της χορδής όταν πρόκειται για συμμετρική και χωρίς καμπυλότητα αεροτομή) με το επίπεδο περιστροφής του ρότορα. Η β μεταβάλλεται κατά την ακτίνα με συνέπεια την "στρέβλωση" του πτερυγίου, με μεγάλες τιμές στη βάση του και μικρές στο ακροπτερύγιο. Γενικά και για απλοποίηση στους υπολογισμούς θεωρείται γραμμική ακτινική κατανομή του βήματος.

$$b = b_p - b_R \times \frac{r}{R} \quad (5.7)$$

Μια εναλλακτική και ακριβέστερη σχέση υπολογισμού του προκύπτει από το τρίγωνο ταχυτήτων στο πτερυγικό στοιχείο, λαμβάνοντας υπόψη, ότι η β μαζί με την γωνία προσβολής α είναι η γωνία μεταξύ της εφαπτομενικής ταχύτητας $u = \omega \cdot r$ και της σχετικής ταχύτητας που δέχεται η αεροτομή V_{rel} . Θεωρώντας ότι η επιδιωκόμενη τιμή της αξονικής ταχύτητας προσροής στο επίπεδο του ρότορα είναι $V_e = (2/3) \cdot V_0$, η τιμή της οποίας προκύπτει από την θεωρία της ορμής για μέγιστες αποδόσεις, ισχύει στη θέση r :

$$\tan(b(r) + a(r)) = \frac{V_e}{u(r)} = \frac{2V_1}{3u(r)} \Rightarrow b(r) = \arctan\left(\frac{2V_1}{3u(r)}\right) - a(r) \quad (5.8)$$

Εναλλακτικά προς τις παραπάνω – και σχετικά αυθαίρετες – σχέσεις, το βήμα θ μπορεί να προκύψει από τον αεροδυναμικό σχεδιασμό με κατάλληλους επαναληπτικούς υπολογισμούς και παραδοχές.

Πλάτος πτερυγίου ή μήκος της χορδής της αεροτομής $c(r)$

Εξαρτάται από την ακτίνα r και καθορίζει το μέγεθος της άνωσης και αντίστασης στο θεωρούμενο στοιχείο πτερυγίου, αφού είναι ανάλογο προς την επιφάνειά του, η οποία είναι $\Delta A_r = c(r) \cdot \Delta r$.

Μειώνεται από τη ρίζα του πτερυγίου ακτινικά προς το ακροπτερύγιο και στους περισσότερους σχεδιασμούς η μείωση αυτή θεωρείται γραμμική.

$$c(r) = c_p \times \frac{r}{R} \quad (5.9)$$

Αυτή η θεώρηση όμως είναι λίγο ως πολύ αυθαίρετη. Αντίθετα θεωρώντας το ισοζύγιο της αεροδυναμικής άνωσης στο πτερυγικό στοιχείο με τη δύναμη ορμής, προκύπτει η ακόλουθη κατανομή της χορδής στο κάθε στοιχείο των B πτερυγίων:

$$c(r) = \frac{2 \times \rho \times r}{B} \times \frac{1}{C_L} \times \frac{8}{9} \times \frac{V_1^2}{u(r) \times W_R(r)} \quad (5.10)$$

όπου C_L ο συντελεστής άνωσης, B ο αριθμός των πτερυγίων, V_1 η ταχύτητα του ανέμου και W_R η συνιστάμενη ταχύτητα προσροής που δέχεται η αεροτομή (αλλιώς και $V_{rel,max}$). Όπως επισημάνθηκε πιο πάνω η επιδιωκόμενη τιμή της αξονικής ταχύτητας προσροής στο επίπεδο του ρότορα είναι $V_e = (2/3) \cdot V_1$, ενώ η εφαπτομενική ταχύτητα $u(r)$ εκφράζεται με τον αριθμό ταχυστροφίας ως:

$$u(r) = w \times r = l \times \frac{r}{R} \times V_1 \quad \text{αφού} \quad l = \frac{w \times R}{V_1} \quad \text{και} \quad w = l \times \frac{V_1}{R} \quad (5.11)$$

Επίσης η συνισταμένη ταχύτητα προσροής $W_R(r)$ είναι:

$$W_R(r) = \sqrt{u^2(r) + V_e^2} = \sqrt{\frac{\rho}{\rho} \times \frac{r}{R} \times V_1 \times \frac{\rho}{\rho} + \frac{\rho}{\rho} \times V_1 \times \frac{\rho}{\rho}} = V_1 \times \sqrt{\frac{\rho}{\rho} \times \frac{r}{R} \times \frac{\rho}{\rho} + \frac{4}{9}} \quad (5.12)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση για τη χορδή και μετά από απλοποιήσεις τελικά προκύπτει:

$$c(r) = C_{PB} \times \frac{2 \times A_R}{B \times R \times C_L} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{\rho} \times \frac{r}{R} \times \frac{\rho}{\rho} + 1}} \quad (5.13)$$

όπου $A_R = \pi \cdot R^2$ η επιφάνεια του ρότορα. Αυτή η κατανομή της χορδής αποτελεί μια εύλογη και συμβατή προς την επιδιωκόμενη τήρηση της αρχής διατήρησης της ορμής παραδοχή.

Τύπος της αεροτομής

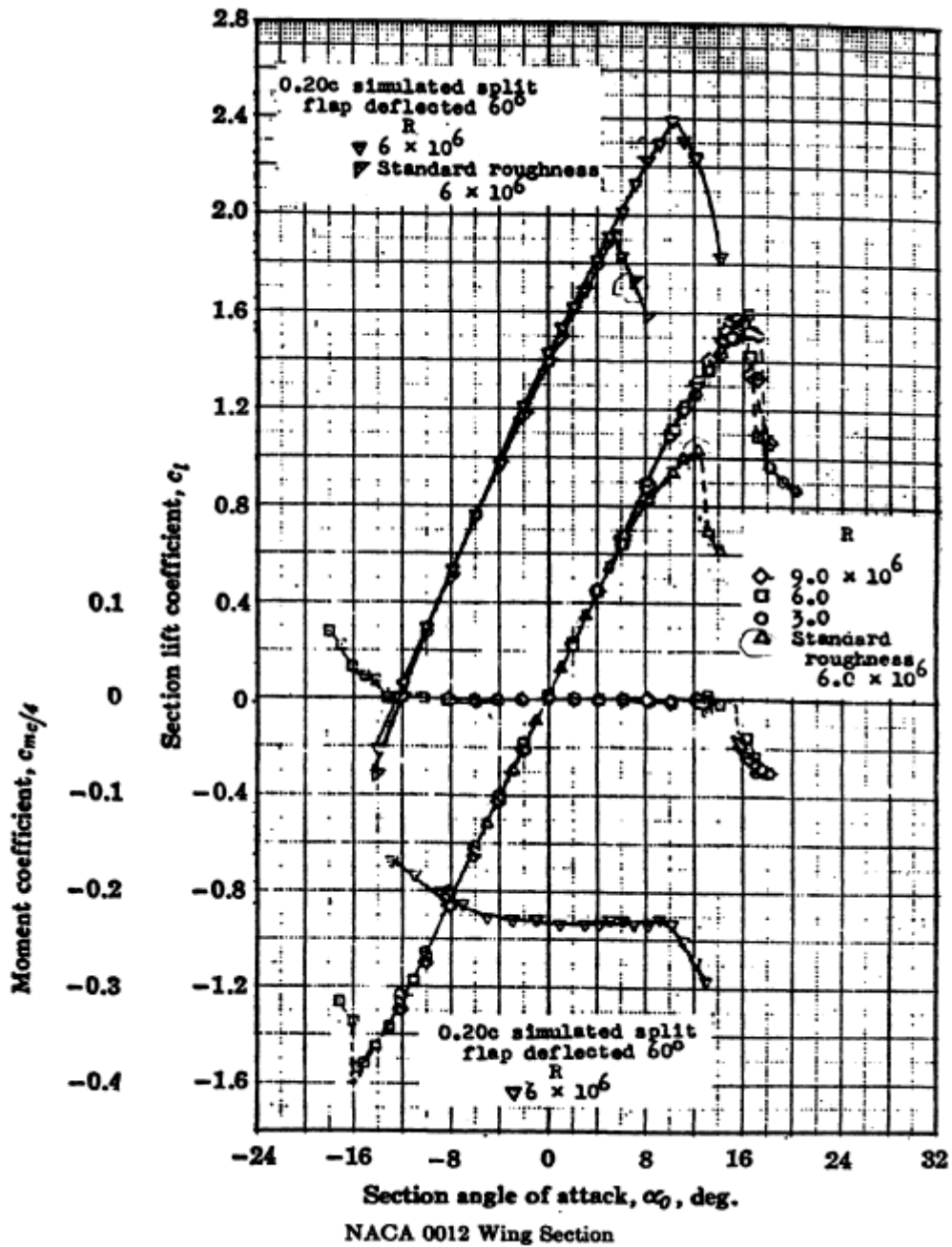
Επιλέγεται από τον σχεδιαστή μεταξύ πολλών τύπων, οι οποίοι τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ειδικά για πτερυγώσεις ανεμογεννητριών. Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά αυτών των αεροτομών, δηλαδή κυρίως ο συντελεστής άνωσης $C_L(\alpha)$ και ο συντελεστής αντίστασης $C_D(\alpha)$ ως συναρτήσεις της γωνίας προσβολής α , πολλές φορές δεν είναι δημοσιεύσιμα ή πρέπει να αναζητηθούν σε εξειδικευμένη βιβλιογραφία.

Οι αεροδυναμικοί συντελεστές εξαρτώνται εκτός από την γωνία προσβολής (δηλαδή τη γωνία προσροής του ανέμου σε σχέση με τη διεύθυνση της χορδής της αεροτομής), και από τον αριθμό Reynolds:

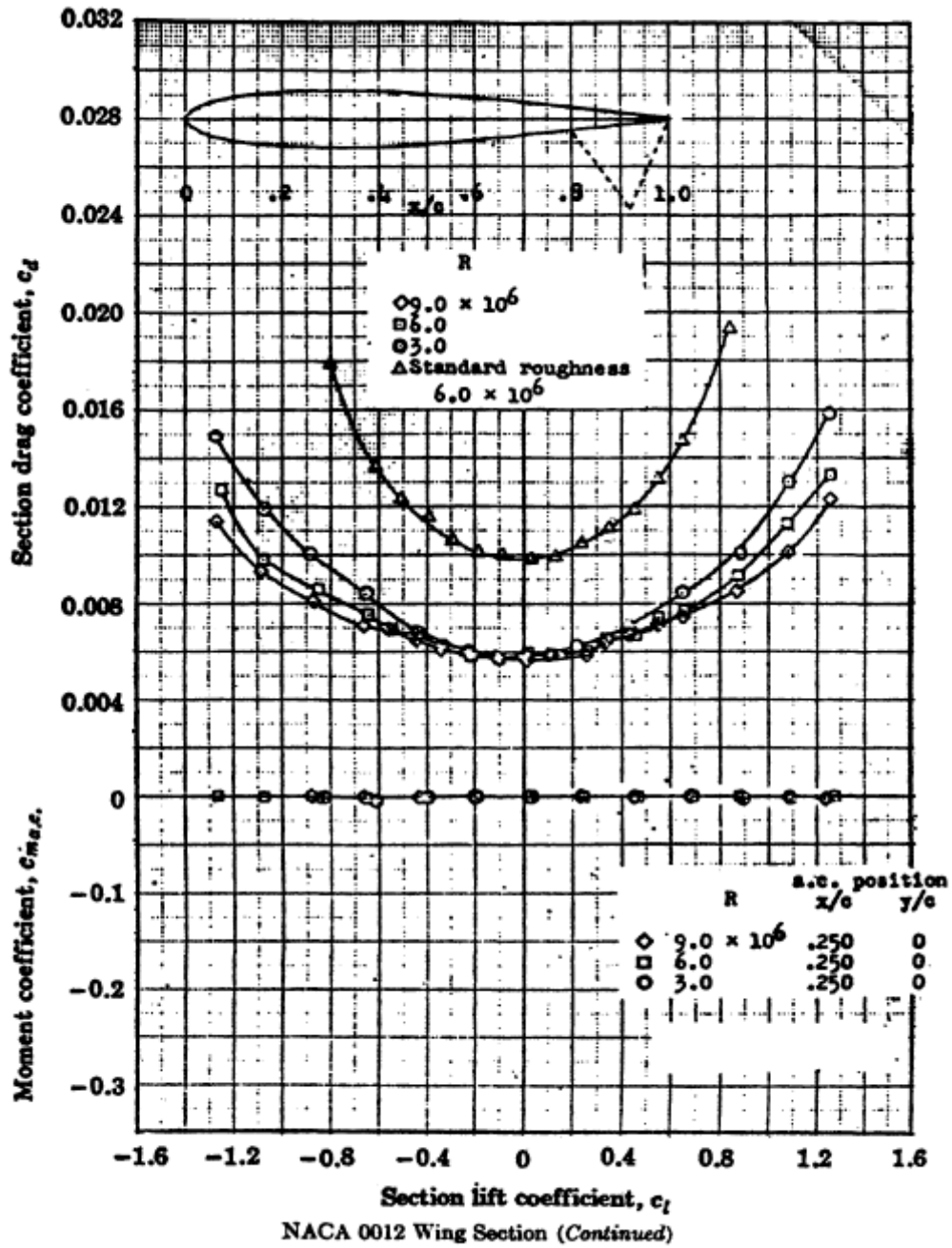
$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot c}{\mu} \quad (5.14)$$

όπου μ είναι το δυναμικό ιξώδες του αέρα ίσο με $1,79 \cdot 10^{-5}$ kg/(m·s) για 15°C, V η ταχύτητα προσροής, ρ η πυκνότητα του αέρα $1,225$ kg/m³ για 15°C και c το μήκος χορδής. Επίδραση έχει επίσης η τραχύτητα της επιφάνειας των πτερυγίων. Όμως σε πρώτη προσέγγιση η εξάρτηση των C_L και C_D από τον Re μπορεί να αμεληθεί, ενώ η τραχύτητα δεν μπορεί να θεωρηθεί μηδενική, αφού βασική προϋπόθεση είναι η πλήρη λείανση των πτερυγίων κατά την κατασκευή τους. Επίσης η "γήρανση" των επιφανειών μετά από χρόνια λειτουργίας επιφέρει πρόσθετη τραχύτητα και χειροτερεύει την απόδοση. Για το συνήθη σχεδιασμό αρκεί να λαμβάνονται οι καμπύλες των αεροδυναμικών συντελεστών για επιφάνεια συνήθους τραχύτητας.

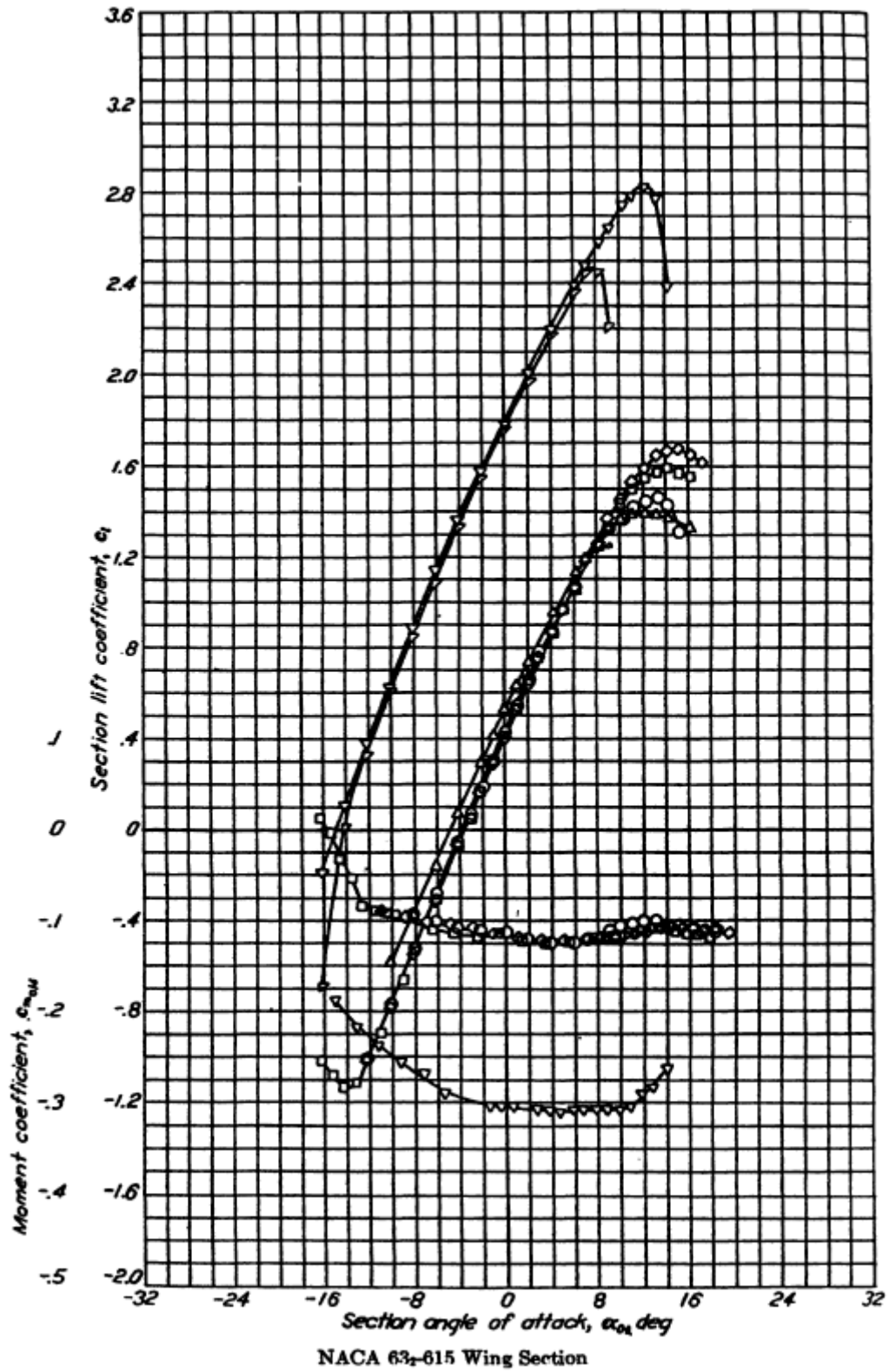
Το σημαντικότερο στοιχείο στη χρησιμοποίηση των αεροδυναμικών συντελεστών της αεροτομής είναι η μέγιστη τιμή των συντελεστών άνωσης σε συνδυασμό με τον αντίστοιχο συντελεστή αντίστασης. Από τις παρακάτω Εικόνες προκύπτουν οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης των αεροτομών που θα μελετηθούν.



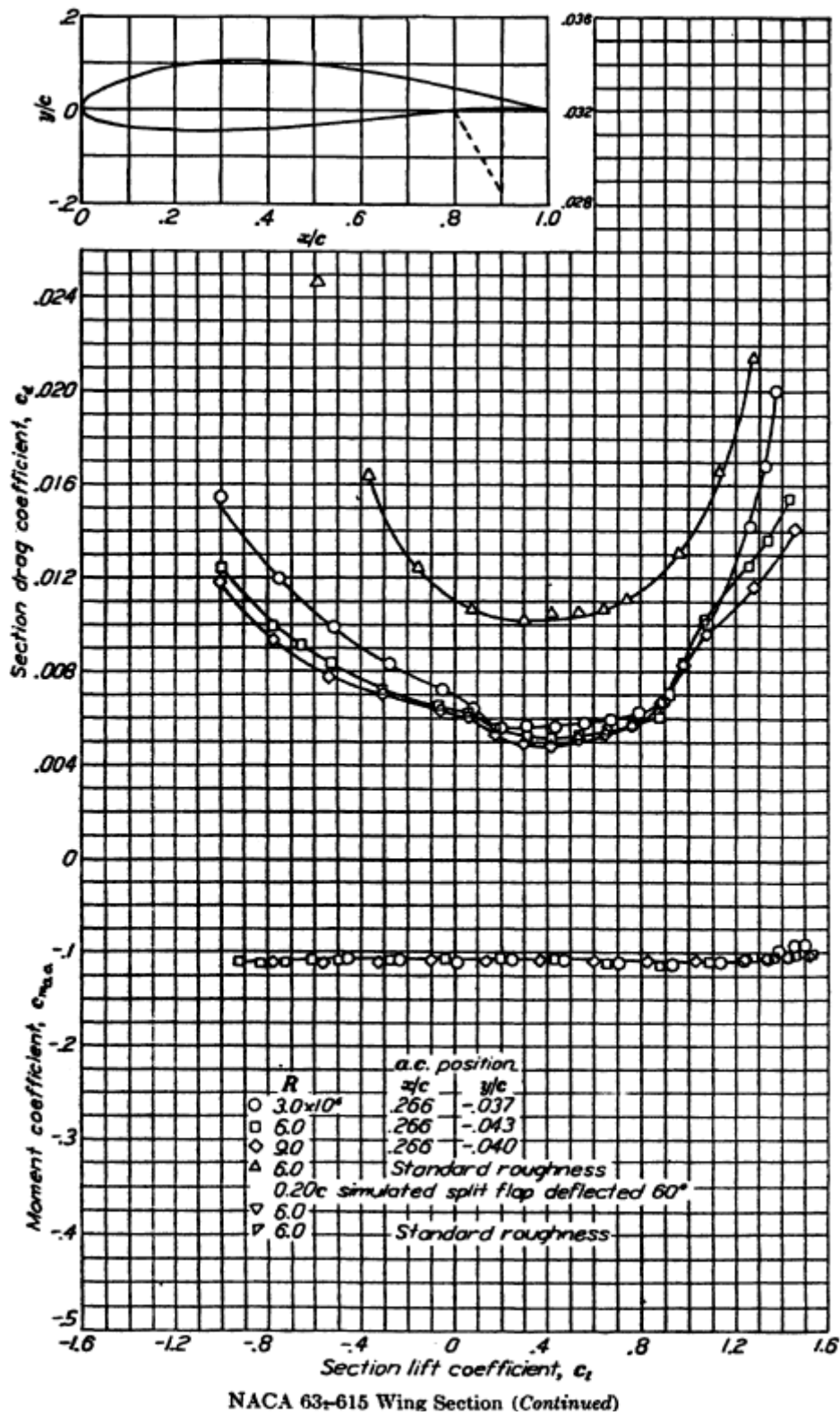
Εικόνα 5.2: Αεροδυναμικός συντελεστής άνωσης της αεροτομής NACA 0012 (Abbot and von Doenhoff, 1959).



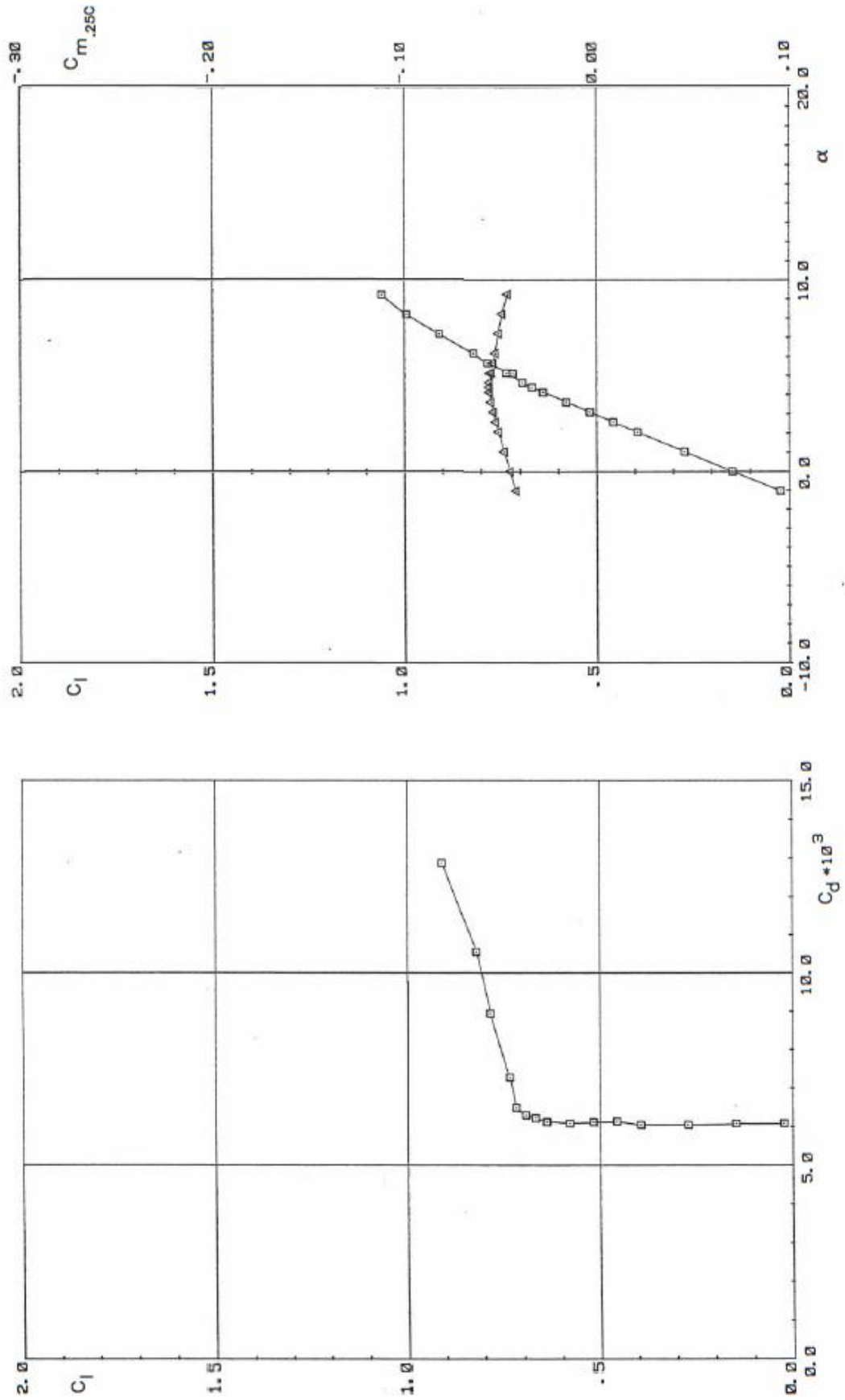
Εικόνα 5.3: Αεροδυναμικός συντελεστής αντίστασης της αεροτομής NACA 0012 (Abbot and von Doenhoff, 1959).



Εικόνα 5.4: Αεροδυναμικός συντελεστής άνωσης της αεροτομής NACA 63₂-615 (Abbot and von Doenhoff, 1959).

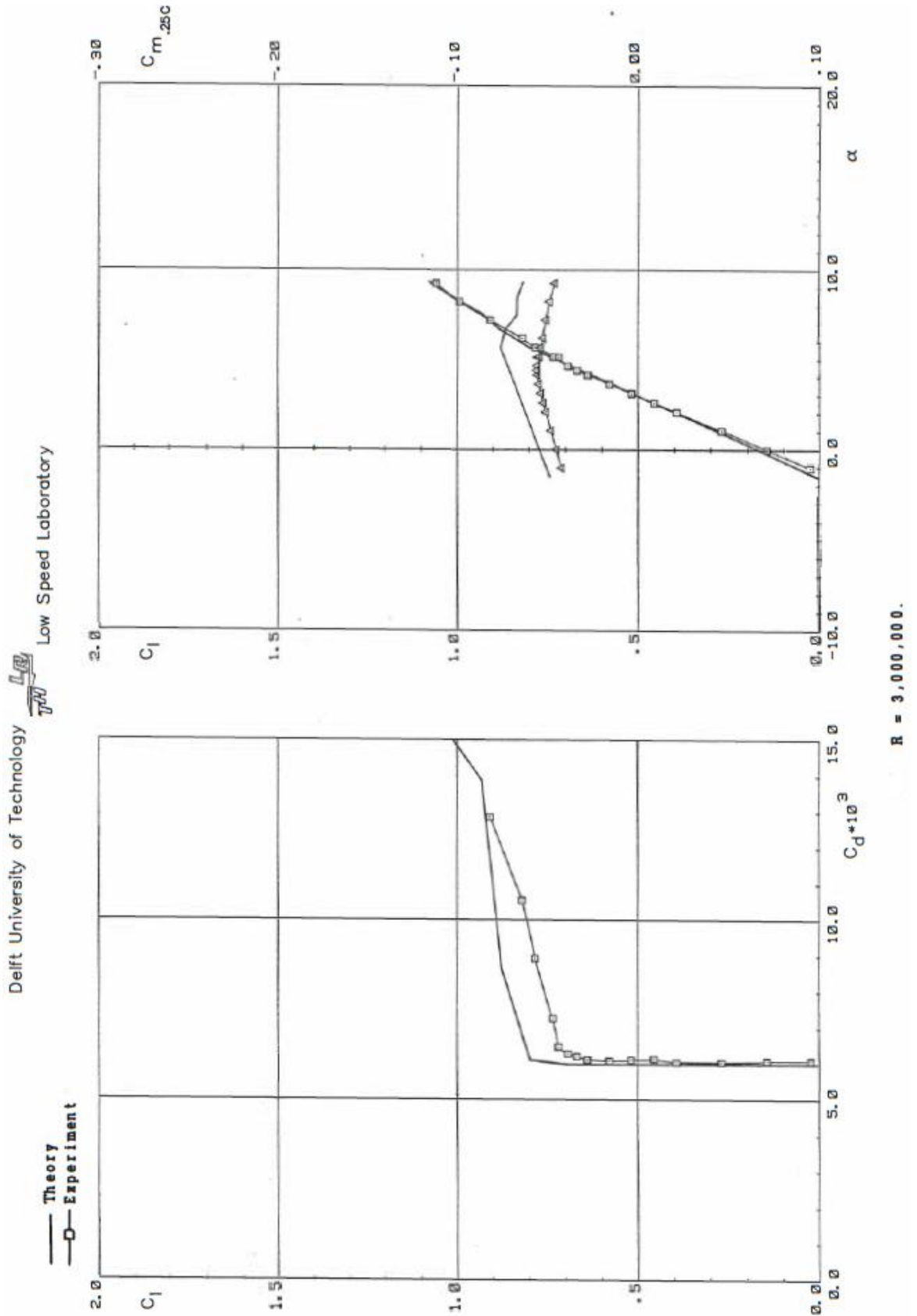


Εικόνα 5.5: Αεροδυναμικός συντελεστής αντίστασης της αεροτομής NACA 63₂-615 (Abbot and von Doenhoff, 1959).



$R = 3,000,000$

Εικόνα 5.6: Αεροδυναμικοί συντελεστές άνωσης και αντίστασης της αεροτομής S809 (Somers, 1997)



Εικόνα 5.7: Σύγκριση αεροδυναμικών συντελεστών της αεροτομής S809 από πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα (Somers, 1997)

Για μεγαλύτερες γωνίες προσβολής από τις παραπάνω οριακές τιμές παρουσιάζεται ραγδαία πτώση του συντελεστή άνωσης λόγω αποκόλλησης της ροής στην άνω επιφάνεια του πτερυγίου, η οποία αντιστοιχεί στη γνωστή "απώλεια στήριξης". Προφανώς στο σχεδιασμό του ρότορα της ανεμογεννήτριας είναι δυνατό να αποφευχθεί η απώλεια στήριξης με περιορισμό σε γωνίες προσβολής μικρότερες των 15°, διαμορφώνοντας κατάλληλα τη στρέβλωση του πτερυγίου.

Επειδή η γωνία προσβολής μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας, είναι αναγκαίο οι καμπύλες $C_L(\alpha)$ και $C_D(\alpha)$ να αναπαραχθούν στη μορφή πινάκων ή πολυωνύμων, τα οποία έχουν αποδειχτεί ιδιαίτερα χρήσιμα, διευκολύνοντας τους σχετικούς υπολογισμούς.

5.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η διαδικασία υπολογιστικού σχεδιασμού του ρότορα μιας μικρής ανεμογεννήτριας θα γίνει με βάση τα μεγέθη και τις εξισώσεις που έχουν παρουσιαστεί σε αυτό και σε προηγούμενα κεφάλαια (Παπανίκας, 2006). Η παρουσίαση του αλγόριθμου θα γίνει με τη βοήθεια ενός διαγράμματος ροής, στο οποίο θα φαίνονται όλα τα υπολογιστικά βήματα και οι επαναληπτικές διαδικασίες. Τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης στα οποία θα βασιστεί η εφαρμογή του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Ακτίνα ρότορα της ανεμογεννήτριας	R = 1,5 m
Αριθμός Πτερυγίων	B = 3
Ταχύτητα Ανέμου	V₁ = 8 m/s
Πυκνότητα Αέρα	ρ = 1,225 kg/m³
Αριθμός Ταχυστροφίας	λ = 6
Ακτίνα Βάσης Πτερυγίου στην Πλήμνη	R_π = 0,06·R
Αεροτομή	NACA 0012, συμμετρική, τυπική τραχύτητα
Γωνία Προσβολής	α=12,5°
Αεροδυναμικοί Συντελεστές	C_L=1,1, C_D=0,023 (για γωνία προσβολής α=12,5°)

Πίνακας 5.1: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά μικρής εγκατάστασης Α/Κ

Η γωνία προσβολής είναι η μέγιστη δυνατή προς αποφυγή απώλειας στήριξης. Με βάση τα δεδομένα της αεροτομής καθορίζεται ως βασική στρατηγική του σχεδιασμού, το πτερύγιο να διατηρεί γωνία προσβολής σταθερή και ίση με τη μέγιστη των 12.5°, οπότε αντίστοιχα σταθεροί θα είναι και οι συντελεστές C_L και C_D στις παραπάνω τιμές.

Υπολογίζεται ο συντελεστής ισχύος από τη σχέση (5.1) για αριθμό πτερυγίων $B=3$, αριθμό ταχυτροφίας $\lambda=6$, $C_D/C_L=0,023/1,1=0,0209$ και όριο Betz ίσο με $C_{PB} = 16/27 = 0,593$ ως εξής:

$$C_{P,max} = C_{PB} \times \frac{1 \times B^{0,67}}{1,48 + (B^{0,67} - 0,04) \times B + 0,025 \times B^2} - \frac{1,92 \times B^2 \times C_D}{1 + 2 \times B \times C_L} \times 0,0209$$

$$\Rightarrow C_{P,max} = \frac{16}{27} \times \frac{6 \times 3^{0,67}}{1,48 + (3^{0,67} - 0,04) \times 6 + 0,025 \times 6^2} - \frac{1,92 \times 6^2 \times 3}{1 + 2 \times 6 \times 3} \times 0,0209$$

$$\Rightarrow C_{P,max} = 0,437$$

Η τιμή αυτή είναι ενδεικτική και θα πρέπει συνεπώς να επαληθευθεί και από το συνολικό σχεδιασμό. Χρησιμοποιείται παρόλα αυτά έτσι ώστε να δοθεί μια πρώτη εκτίμηση στην ακτίνα του ρότορα με χρήση της σχέσης (5.4). Πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη ότι ο $C_{p,max}$ αφορά καθαρά στην «αεροδυναμική απόδοση» του ρότορα. Επιπρόσθετα υπάρχει ο βαθμός απόδοσης του μηχανικού και ηλεκτρικού μέρους της ανεμογεννήτριας στο επίπεδο του 85~93%, όπου οι υψηλές τιμές αφορούν τις μεγάλες ανεμογεννήτριες. Για την περίπτωση του πολύ μικρού της εφαρμογής ορίζεται $\eta_{HM}=86\%$, συνεπώς ισχύει:

$$C_p = C_{P,max} \times \eta_{HM} = 0,389 \times 0,86 \Rightarrow C_p = 0,376$$

Οπότε μια αρχική εκτίμηση για την τελικώς παραγόμενη ισχύ θα είναι:

$$P = C_p \times 0,5 \times V_1^3 \times (\rho \times R^2) \Rightarrow P = 0,376 \times 0,5 \times 1,225 \times 8^3 \times (\rho \times 1,5^2) \Rightarrow P = 832,5 \text{ W}$$

Εφόσον έχουν οριστεί τα μεγέθη $\lambda=6$, $R=1,5 \text{ m}$ και $V_0=8 \text{ m/s}$ καθορίζεται η γωνιακή ταχύτητα και ο αριθμός στροφών ω και N αντίστοιχα ως εξής:

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{V_1} \Rightarrow \omega = \lambda \times \frac{V_1}{R} = 6 \times \frac{8}{1,5} \Rightarrow \omega = 32 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

και:

$$\omega = 2 \times \pi \times N \Rightarrow N = \frac{\omega}{2 \times \pi} \times 60 = \frac{32}{2 \times \pi} \times 60 \Rightarrow N = 305,6 \text{ rpm}$$

Επίσης η ταχύτητα περιστροφής των ακροπτερυγίων είναι:

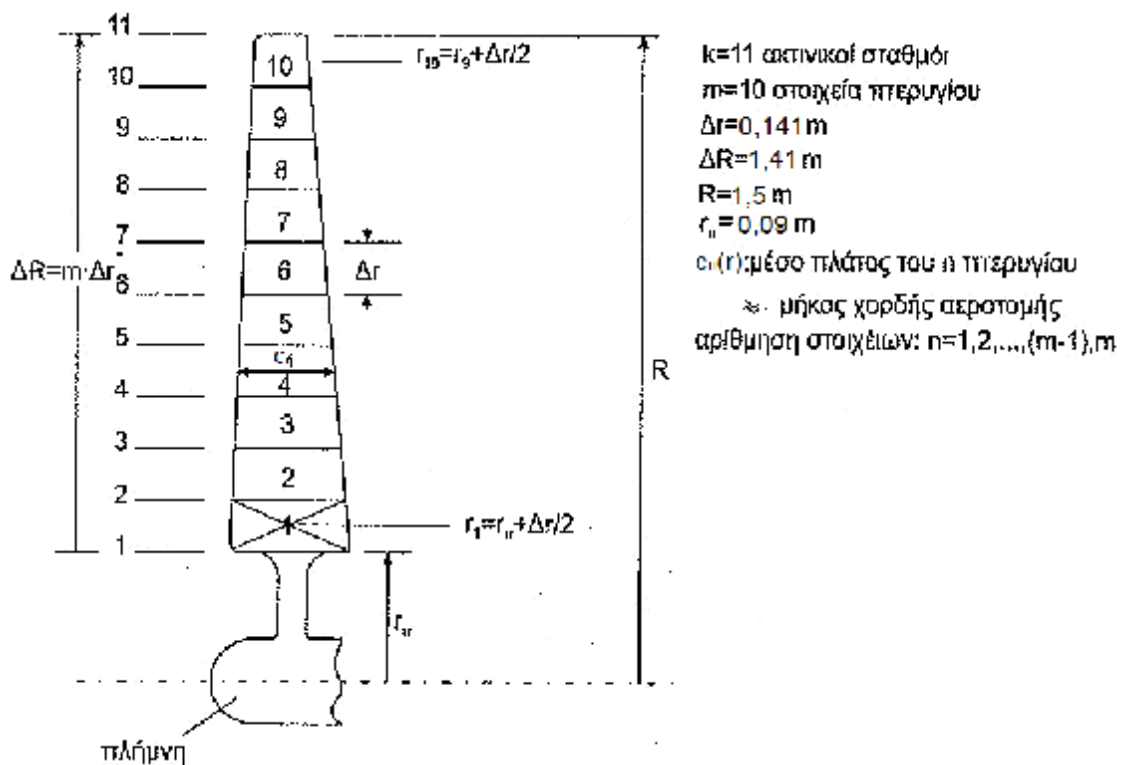
$$u = \omega \times R = 32 \times 1,5 \Rightarrow u = 48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Το ενεργό μήκος του πτερυγίου προκύπτει με αφαίρεση της ακτίνας βάσης του στην πλήμνη από την ακτίνα ακροπτερυγίου:

$$DR = R - r_p = R - 0,06 > R = 1,5 - 0,06 > 1,5 \text{ } \text{ } DR = 1,41\text{m}$$

Βασικό κομμάτι του αλγόριθμου είναι ο χωρισμός της πτέρυγας σε m ακτινικά μέρη, τα «πτερυγικά στοιχεία», τα οποία καθορίζουν $m+1$ σταθμούς μεταξύ $r = r_p = 0,09\text{ m}$ και $r = R = 1,5\text{ m}$. Στην Εικόνα 5.8 έχει γίνει παραδειγματικός χωρισμός της πτέρυγας σε $m=10$ ακτινικά μέρη όποτε και προκύπτει:

Αριθμός ακτινικών σταθμών:	$k = 11 = m+1$
Αριθμός στοιχείων:	$m = 10 = k-1$
Αρίθμηση πτερυγικών στοιχείων:	$n = 1,2,\dots,(m-1),m$
Μήκος του κάθε στοιχείου:	$\Delta r = \Delta R/m = 1,41/10 = 0,141$
Ενεργό μήκος πτερυγίου:	$\Delta R = m \cdot \Delta r$



Εικόνα 5.8: Διακριτοποίηση του πτερυγίου σε στοιχεία για την υπολογιστική διαδικασία σχεδιασμού του ρότορα της εφαρμογής (Παπανίκας, 2006)

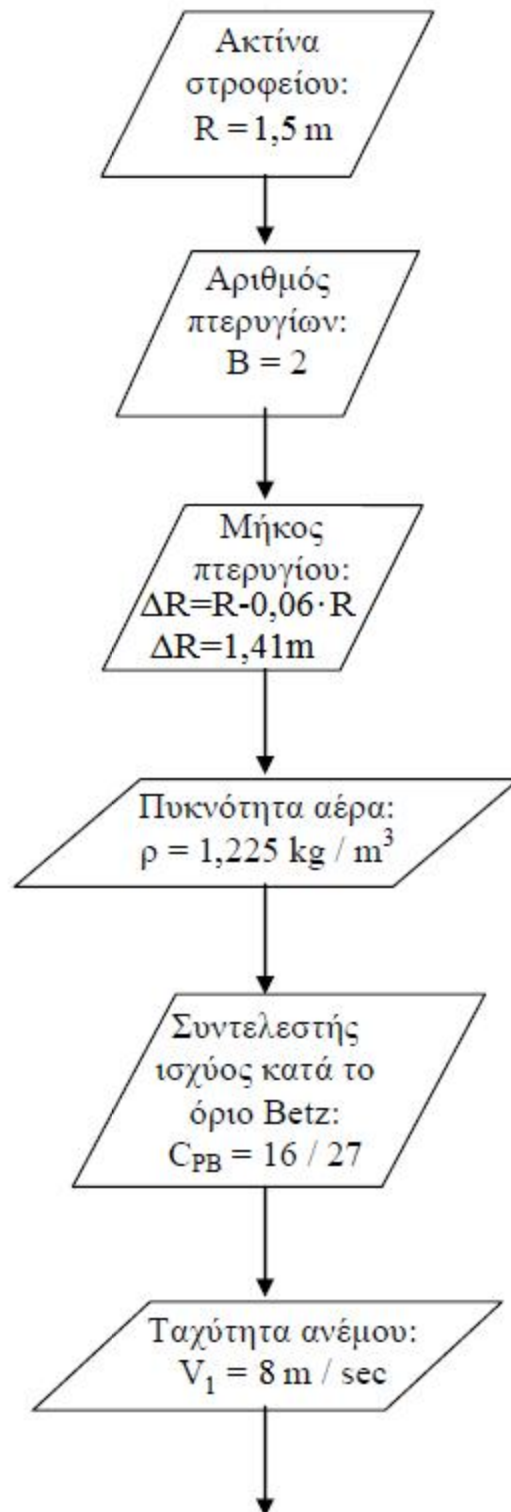
Στον αλγόριθμο ωστόσο το m θα είναι της τάξης του 10^3 για πιο ακριβή αποτελέσματα στους υπολογισμούς.

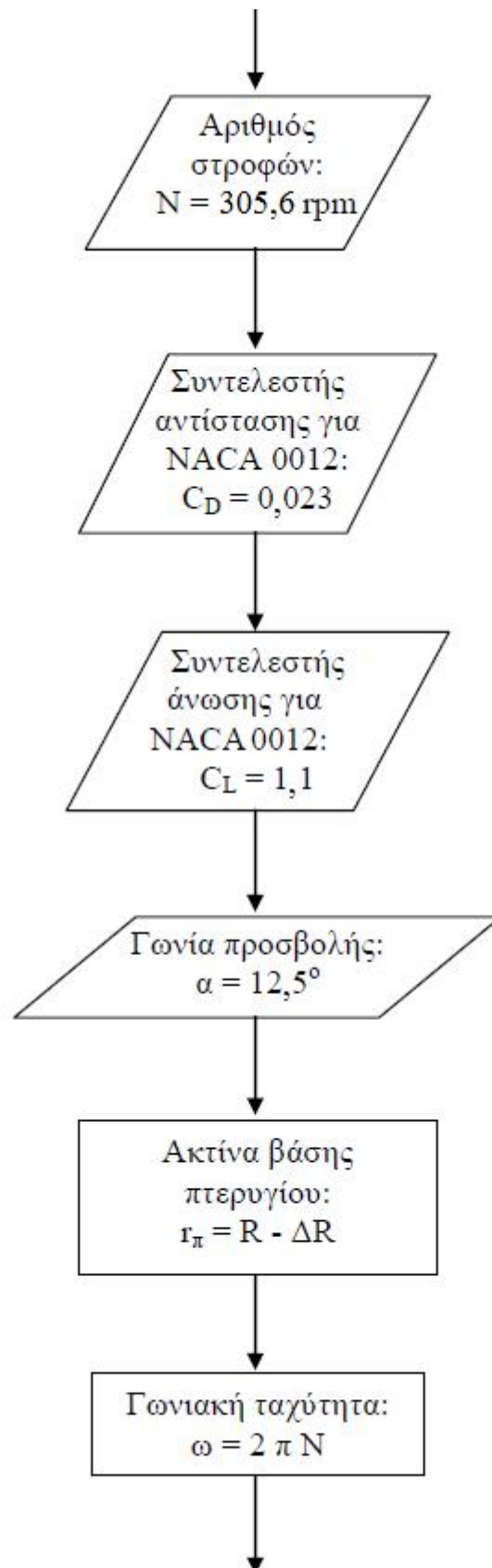
Επειδή το πλάτος του πτερυγίου, δηλαδή η χορδή της αεροτομής $c(r)$, μειώνεται από τη βάση προς το ακροπτερύγιο, είναι ακριβέστερο να θεωρηθούν οι συνθήκες προσροής στο μέσο του κάθε στοιχείου. Αυτό σημαίνει ότι η ανάλυση των συνθηκών ροής γίνεται για απόσταση από τον άξονα περιστροφής ίση με:

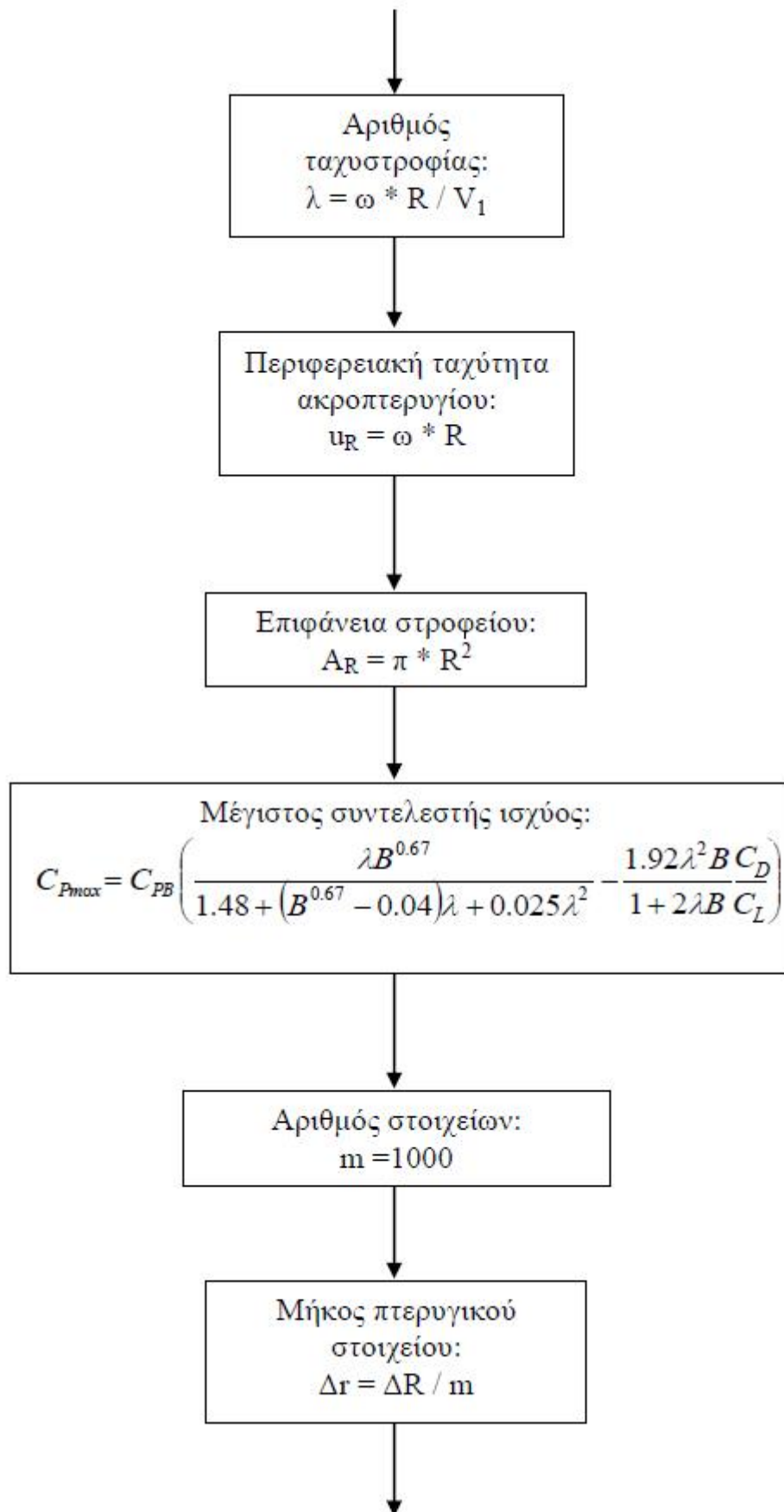
$$r_n = r_{n-1} + Dr \quad \text{για } n=2 \text{ έως } n=m \quad \text{και} \quad r_1 = r_p + \frac{Dr}{2}$$

Ακολουθεί η παρουσίαση του διαγράμματος ροής του αλγόριθμου σχεδιασμού ρότορα.

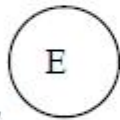
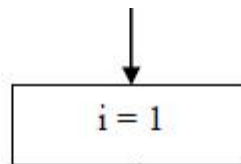
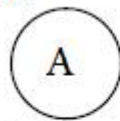
5.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ



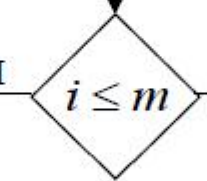




Επιστροφή στην αρχή του επαναληπτικού βρόγχου μετά το τέλος κάθε επανάληψης (όταν $i=i+1$) για επανέλεγχο της συνθήκης ($i \leq m$)



Έξοδος από τον επαναληπτικό βρόγχο όταν δεν ικανοποιείται πλέον η συνθήκη ($i \leq m$)

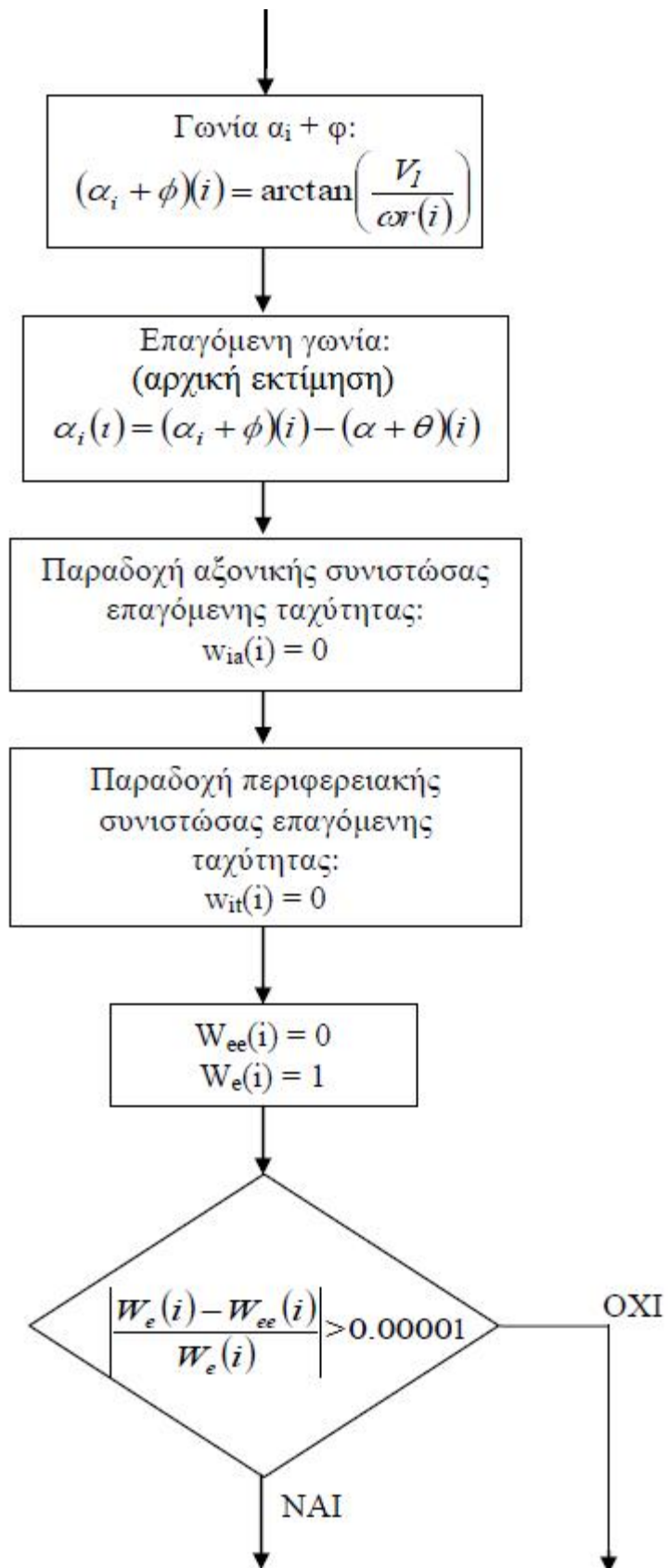


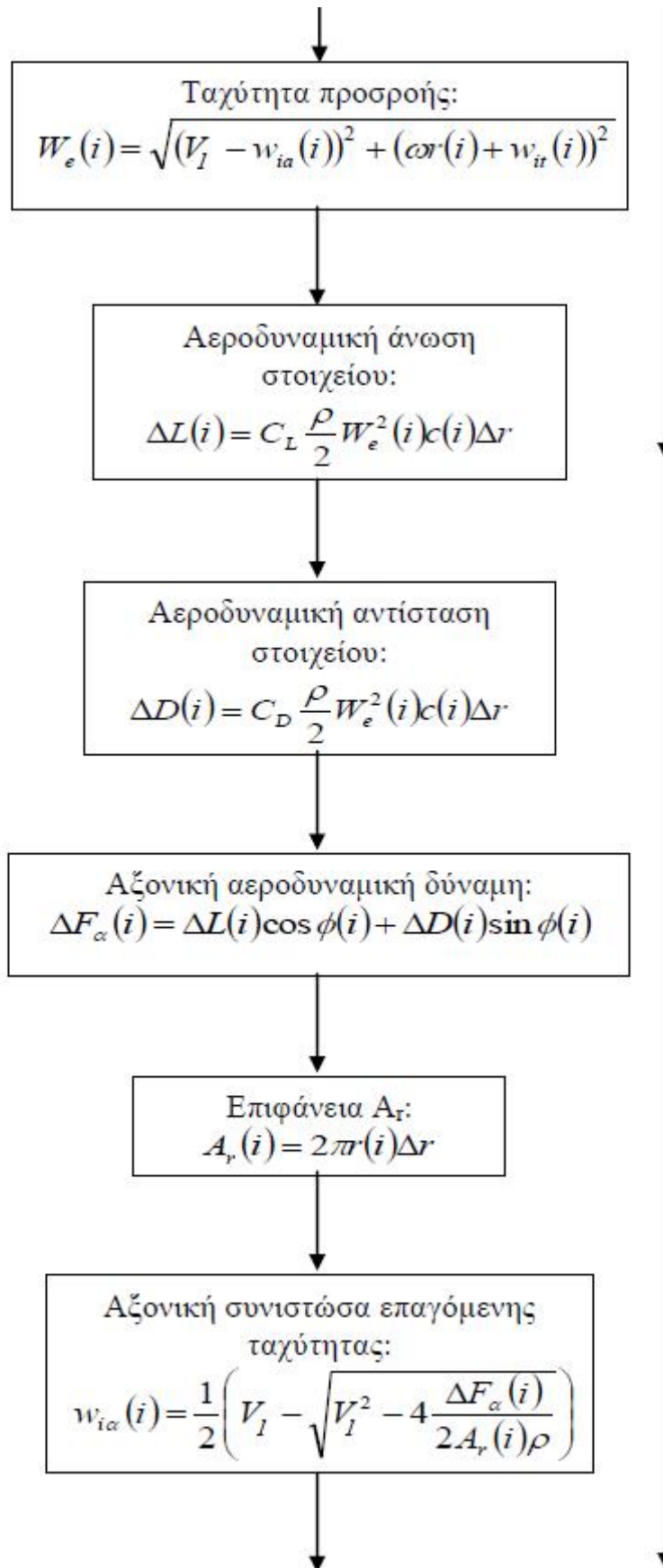
Ακτινική θέση κέντρου
κάθε στοιχείου:
 $r(i) = r_{\pi} + (2 \cdot i - 1) \cdot \Delta r / 2$

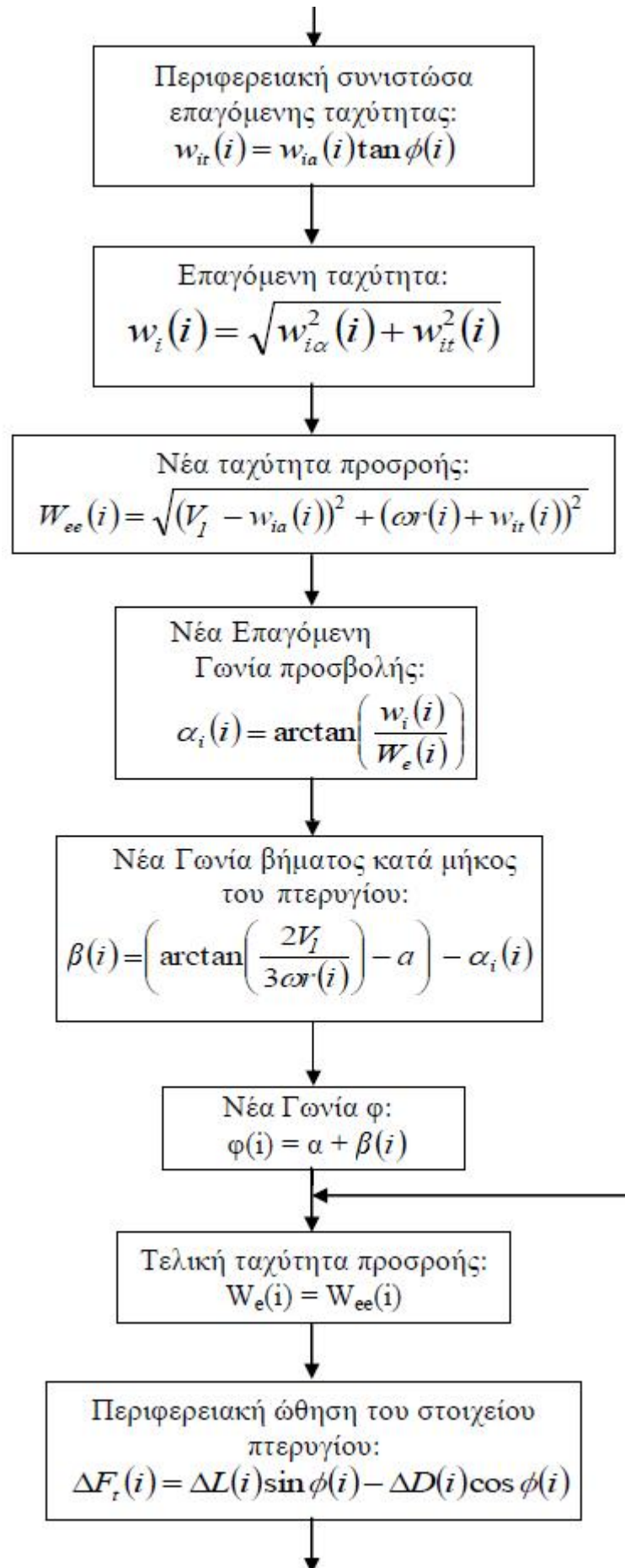
Πλάτος πτερυγίου σε κάθε θέση
στοιχείου:
$$c(i) = C_{PB} \frac{2 \cdot A_R}{B \lambda R C_L} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2}{3} \lambda \frac{r(i)}{R}\right)^2 + 1}}$$

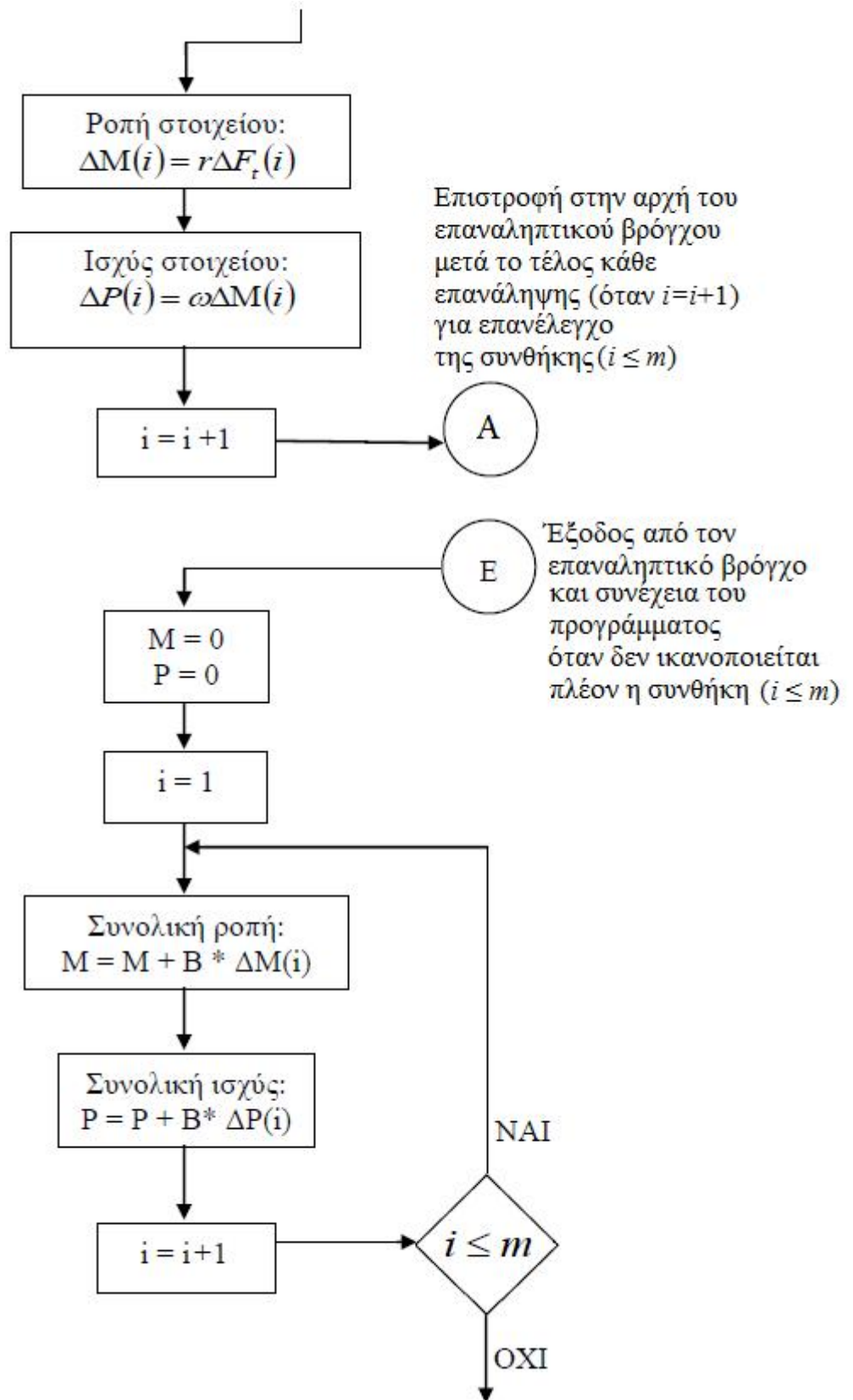
Γωνία βήματος κατά μήκος του
πτερυγίου: (αρχική εκτίμηση)
$$\beta(i) = \arctan\left(\frac{2V_I}{3\omega r(i)}\right) - \alpha$$

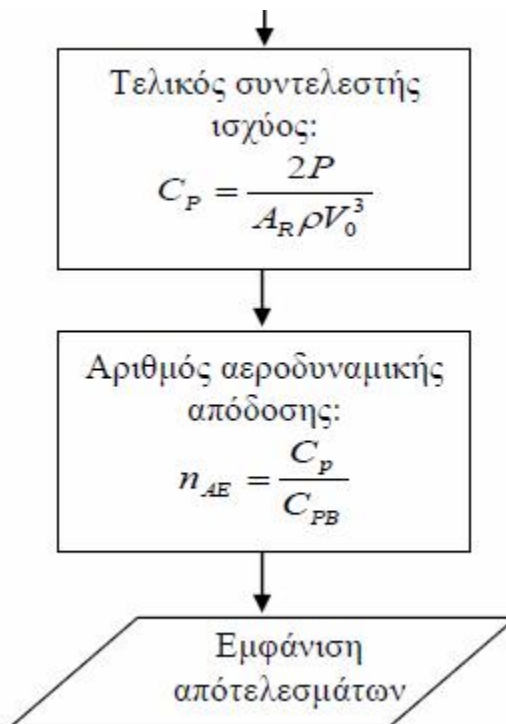
Γωνία φ:
(αρχική εκτίμηση)
$$\varphi(i) = \alpha + \beta(i)$$



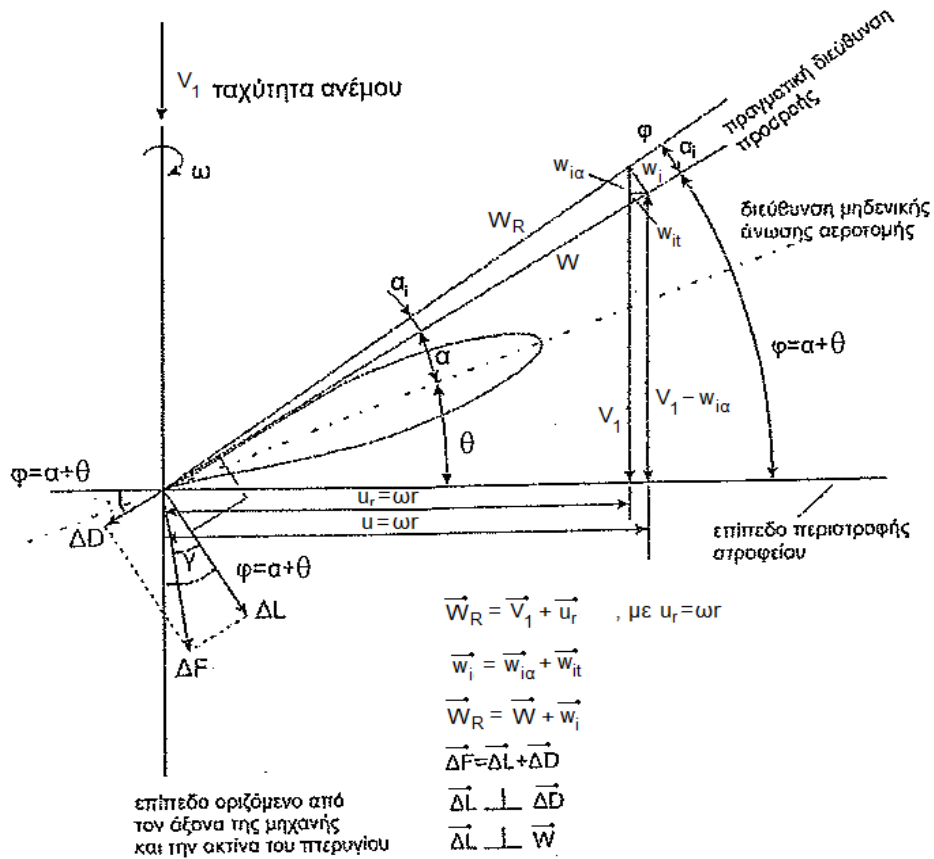




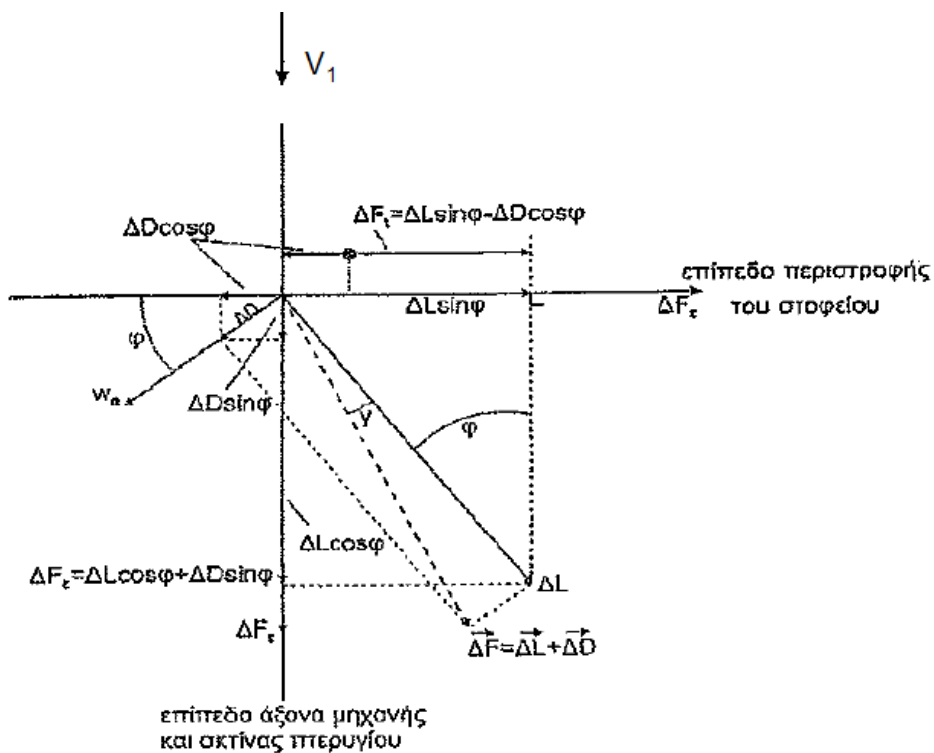




Οι Εικόνες 5.9 και 5.10 που ακολουθούν δίνουν μια γραφική αναπαράσταση των βασικών μεγεθών της αεροτομής NACA 0012, πάνω στα οποία στηρίχθηκε ο αλγόριθμος υπολογιστικού σχεδιασμού του ρότορα της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 5.9: Τρίγωνα ταχυτήτων στην αεροτομή του ρότορα (Παπανίκας, 2006)



Εικόνα 5.10: Ανάλυση Αεροδυναμικών Δυνάμεων (Παπανίκας, 2006)

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ MATLAB

Στους Πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από την επίλυση του παραπάνω αλγόριθμου στο MATLAB. Έχουν γίνει προσομοιώσεις για διαφορετικές αεροτομές, διαφορετικό αριθμό πτερυγίων και διαφορετικές ταχύτητες ανέμου.

Συγκεκριμένα, έχουν μελετηθεί δίπτερες και τρίπτερες ανεμογεννήτριες, με πτερύγια από αεροτομές NACA 0012, S809 και NACA 63₂-615 για ταχύτητες ανέμου 8 m/s, 9m/s και 10m/s.

NACA 0012	
Αριθμός πτερυγίων:	B=2.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	ΔR=2.820000 m
Πυκνότητα αέρα:	ρ=1.225000 kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	C _{pb} =0.592593
Ταχύτητα ανέμου:	V ₀ =8.000000 m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για NACA 0012:	C _d =0.023000
Συντελεστής άνωσης για NACA 0012:	C _l =1.100000
Γωνία προσβολής:	α=12.500000 μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	r _π =0.180000 m
Γωνιακή ταχύτητα:	ω=14.001031 rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	λ=5.250387
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	u _r =42.003094 m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	A _R =28.274334 m ²
Συνολική ροπή:	M=0.00032 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.004490 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	C _p =0.506389
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	η _{AE} =0.854531

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή NACA 0012, δίπτερυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 8 m/s

NACA 0012	
Αριθμός πτερυγίων:	B=2.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	$\Delta R=2.820000$ m
Πυκνότητα αέρα:	$\rho=1.225000$ kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	$C_{pb}=0.592593$
Ταχύτητα ανέμου:	$V_0=9.000000$ m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για NACA 0012:	$C_d=0.023000$
Συντελεστής άνωσης για NACA 0012:	$C_l=1.100000$
Γωνία προσβολής:	$\alpha=12.500000$ μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	$r_{\pi}=0.180000$ m
Γωνιακή ταχύτητα:	$\omega=14.001031$ rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	$\lambda=4.667010$
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	$u_r=42.003094$ m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	$A_R=28.274334$ m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000460 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.006446 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	$C_p=0.510605$
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	$\eta_{AE}=0.861647$

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή NACA 0012, διπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 9 m/s

NACA 0012	
Αριθμός πτερυγίων:	B=2.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	$\Delta R=2.820000$ m
Πυκνότητα αέρα:	$\rho=1.225000$ kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	$C_{pb}=0.592593$
Ταχύτητα ανέμου:	$V_0=10.000000$ m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για NACA 0012:	$C_d=0.023000$
Συντελεστής άνωσης για NACA 0012:	$C_l=1.100000$
Γωνία προσβολής:	$\alpha=12.500000$ μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	$r_{\pi}=0.180000$ m
Γωνιακή ταχύτητα:	$\omega=14.001031$ rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	$\lambda=4.200309$
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	$u_r=42.003094$ m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	$A_R=28.274334$ m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000635 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.008893 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	$C_p=0.513485$
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	$\eta_{AE}=0.866505$

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή NACA 0012, διπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 10 m/s

NACA 0012	
Αριθμός πτερυγίων:	B=3.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	$\Delta R=2.820000$ m
Πυκνότητα αέρα:	$\rho=1.225000$ kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	$C_{pb}=0.592593$
Ταχύτητα ανέμου:	$V_0=8.000000$ m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για NACA 0012:	$C_d=0.023000$
Συντελεστής άνωσης για NACA 0012:	$C_l=1.100000$
Γωνία προσβολής:	$\alpha=12.500000$ μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	$r_{\pi}=0.180000$ m
Γωνιακή ταχύτητα:	$\omega=14.001031$ rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	$\lambda=5.250387$
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	$u_r=42.003094$ m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	$A_R=28.274334$ m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000321 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.004500 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	$C_p=0.507478$
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	$\eta_{AE}=0.856369$

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή NACA 0012, τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 8 m/s

NACA 0012	
Αριθμός πτερυγίων:	B=3.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	$\Delta R=2.820000$ m
Πυκνότητα αέρα:	$\rho=1.225000$ kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	$C_{pb}=0.592593$
Ταχύτητα ανέμου:	$V_0=9.000000$ m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για NACA 0012:	$C_d=0.023000$
Συντελεστής άνωσης για NACA 0012:	$C_l=1.100000$
Γωνία προσβολής:	$\alpha=12.500000$ μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	$r_{\pi}=0.180000$ m
Γωνιακή ταχύτητα:	$\omega=14.001031$ rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	$\lambda=4.667010$
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	$u_r=42.003094$ m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	$A_R=28.274334$ m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000462 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.00646 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	$C_p=0.511859$
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	$\eta_{AE}=0.863763$

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή NACA 0012, τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 9 m/s

NACA 0012	
Αριθμός πτερυγίων:	B=3.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	$\Delta R=2.820000$ m
Πυκνότητα αέρα:	$\rho=1.225000$ kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	C _{pb} =0.592593
Ταχύτητα ανέμου:	V ₀ =10.000000 m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για NACA 0012:	C _d =0.023000
Συντελεστής άνωσης για NACA 0012:	C _l =1.100000
Γωνία προσβολής:	$\alpha=12.500000$ μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	r _π =0.180000 m
Γωνιακή ταχύτητα:	$\omega=14.001031$ rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	$\lambda=4.200309$
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	u _r =42.003094 m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	A _R =28.274334 m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000637 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.008917 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	C _p =0.514889
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	$\eta_{AE}=0.868874$

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή NACA 0012, τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 10 m/s

NACA 63₂-615	
Αριθμός πτερυγίων:	B=2.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	$\Delta R=2.820000$ m
Πυκνότητα αέρα:	$\rho=1.225000$ kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	C _{pb} =0.592593
Ταχύτητα ανέμου:	V ₀ =8.000000 m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για NACA 632-615:	C _d =0.07198
Συντελεστής άνωσης για NACA 632-615:	C _l =1.049
Γωνία προσβολής:	$\alpha=14$ μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	r _π =0.180000 m
Γωνιακή ταχύτητα:	$\omega=14.001031$ rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	$\lambda=5.250387$
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	u _r =42.003094 m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	A _R =28.274334 m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000229 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.003210 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	C _p =0.362028
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	$\eta_{AE}=0.610922$

Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή NACA 63₂-615, διπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 8 m/s

NACA 63 ₂ -615	
Αριθμός πτερυγίων:	B=2.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	ΔR=2.820000 m
Πυκνότητα αέρα:	ρ=1.225000 kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	C _{pb} =0.592593
Ταχύτητα ανέμου:	V ₀ =9.000000 m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για NACA 632-615:	C _d =0.07198
Συντελεστής άνωσης για NACA 632-615:	C _l =1.049
Γωνία προσβολής:	α=14 μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	ππ=0.180000 m
Γωνιακή ταχύτητα:	ω=14.001031 rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	λ=4.667010
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	u _r =42.003094 m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	A _R =28.274334 m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000345 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.004835 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	C _p =0.382960
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	η _{AE} =0.646245

Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή NACA 63₂-615, διπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 9 m/s

NACA 63 ₂ -615	
Αριθμός πτερυγίων:	B=2.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	ΔR=2.820000 m
Πυκνότητα αέρα:	ρ=1.225000 kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	C _{pb} =0.592593
Ταχύτητα ανέμου:	V ₀ =10.000000 m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για NACA 632-615:	C _d =0.07198
Συντελεστής άνωσης για NACA 632-615:	C _l =1.049
Γωνία προσβολής:	α=14 μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	ππ=0.180000 m
Γωνιακή ταχύτητα:	ω=14.001031 rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	λ=4.200309
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	u _r =42.003094 m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	A _R =28.274334 m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000494 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.006914 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	C _p =0.399222
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	η _{AE} =0.673688

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή NACA 63₂-615, διπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 10 m/s

NACA 63 ₂ -615	
Αριθμός πτερυγίων:	B=3.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	ΔR=2.820000 m
Πυκνότητα αέρα:	ρ=1.225000 kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	C _{pb} =0.592593
Ταχύτητα ανέμου:	V ₀ =8.000000 m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για NACA 632-615:	C _d =0.07198
Συντελεστής άνωσης για NACA 632-615:	C _l =1.049
Γωνία προσβολής:	α=14 μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	r _π =0.180000 m
Γωνιακή ταχύτητα:	ω=14.001031 rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	λ=5.250387
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	u _r =42.003094 m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	A _R =28.274334 m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000230 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.003218 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	C _p =0.362886
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	η _{AE} =0.612370

Πίνακας 6.10: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή NACA 63₂-615, τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 8 m/s

NACA 63 ₂ -615	
Αριθμός πτερυγίων:	B=3.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	ΔR=2.820000 m
Πυκνότητα αέρα:	ρ=1.225000 kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	C _{pb} =0.592593
Ταχύτητα ανέμου:	V ₀ =9.000000 m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για NACA 632-615:	C _d =0.07198
Συντελεστής άνωσης για NACA 632-615:	C _l =1.049
Γωνία προσβολής:	α=14 μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	r _π =0.180000 m
Γωνιακή ταχύτητα:	ω=14.001031 rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	λ=4.667010
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	u _r =42.003094 m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	A _R =28.274334 m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000346 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.004847 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	C _p =0.383958
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	η _{AE} =0.647929

Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή NACA 63₂-615, τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 9 m/s

NACA 63₂-615	
Αριθμός πτερυγίων:	B=3.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	ΔR=2.820000 m
Πυκνότητα αέρα:	ρ=1.225000 kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	C _{pb} =0.592593
Ταχύτητα ανέμου:	V ₀ =10.000000 m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για NACA 632-615:	C _d =0.07198
Συντελεστής άνωσης για NACA 632-615:	C _l =1.049
Γωνία προσβολής:	α=14 μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	r _π =0.180000 m
Γωνιακή ταχύτητα:	ω=14.001031 rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	λ=4.200309
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	u _r =42.003094 m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	A _R =28.274334 m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000495 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.006933 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	C _p =0.400339
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	η _{AE} =0.675572

Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή NACA 63₂-615, τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 10 m/s

S809	
Αριθμός πτερυγίων:	B=2.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	ΔR=2.820000 m
Πυκνότητα αέρα:	ρ=1.225000 kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	C _{pb} =0.592593
Ταχύτητα ανέμου:	V ₀ =8.000000 m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για S809:	C _d =0.020
Συντελεστής άνωσης για S809:	C _l =1.39
Γωνία προσβολής:	α=13.5 μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	r _π =0.180000 m
Γωνιακή ταχύτητα:	ω=14.001031 rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	λ=5.250387
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	u _r =42.003094 m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	A _R =28.274334 m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000333 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.00466 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	C _p =0.526121
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	η _{AE} =0.887829

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή S809, διπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 8 m/s

S809	
Αριθμός πτερυγίων:	B=2.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	$\Delta R=2.820000$ m
Πυκνότητα αέρα:	$\rho=1.225000$ kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	$C_{pb}=0.592593$
Ταχύτητα ανέμου:	$V_0=9.000000$ m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για S809:	$C_d=0.020$
Συντελεστής άνωσης για S809:	$C_l=1.39$
Γωνία προσβολής:	$\alpha=13.5$ μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	$r_{\pi}=0.180000$ m
Γωνιακή ταχύτητα:	$\omega=14.001031$ rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	$\lambda=4.667010$
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	$u_r=42.003094$ m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	$A_R=28.274334$ m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000476 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.006667 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	$C_p=0.528053$
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	$\eta_{AE}=0.891090$

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή S809, διπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 9 m/s

S809	
Αριθμός πτερυγίων:	B=2.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	$\Delta R=2.820000$ m
Πυκνότητα αέρα:	$\rho=1.225000$ kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	$C_{pb}=0.592593$
Ταχύτητα ανέμου:	$V_0=10.000000$ m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για S809:	$C_d=0.020$
Συντελεστής άνωσης για S809:	$C_l=1.39$
Γωνία προσβολής:	$\alpha=13.5$ μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	$r_{\pi}=0.180000$ m
Γωνιακή ταχύτητα:	$\omega=14.001031$ rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	$\lambda=4.200309$
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	$u_r=42.003094$ m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	$A_R=28.274334$ m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000654 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.009163 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	$C_p=0.529104$
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	$\eta_{AE}=0.892864$

Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή S809, διπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 10 m/s

S809	
Αριθμός πτερυγίων:	B=3.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	$\Delta R=2.820000$ m
Πυκνότητα αέρα:	$\rho=1.225000$ kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	C _{pb} =0.592593
Ταχύτητα ανέμου:	V ₀ =8.000000 m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για S809:	C _d =0.020
Συντελεστής άνωσης για S809:	C _l =1.39
Γωνία προσβολής:	$\alpha=13.5$ μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	r _π =0.180000 m
Γωνιακή ταχύτητα:	$\omega=14.001031$ rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	$\lambda=5.250387$
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	u _r =42.003094 m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	A _R =28.274334 m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000334 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.004675 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	C _p =0.527241
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	$\eta_{AE}=0.889720$

Πίνακας 6.16: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή S809, τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 8 m/s

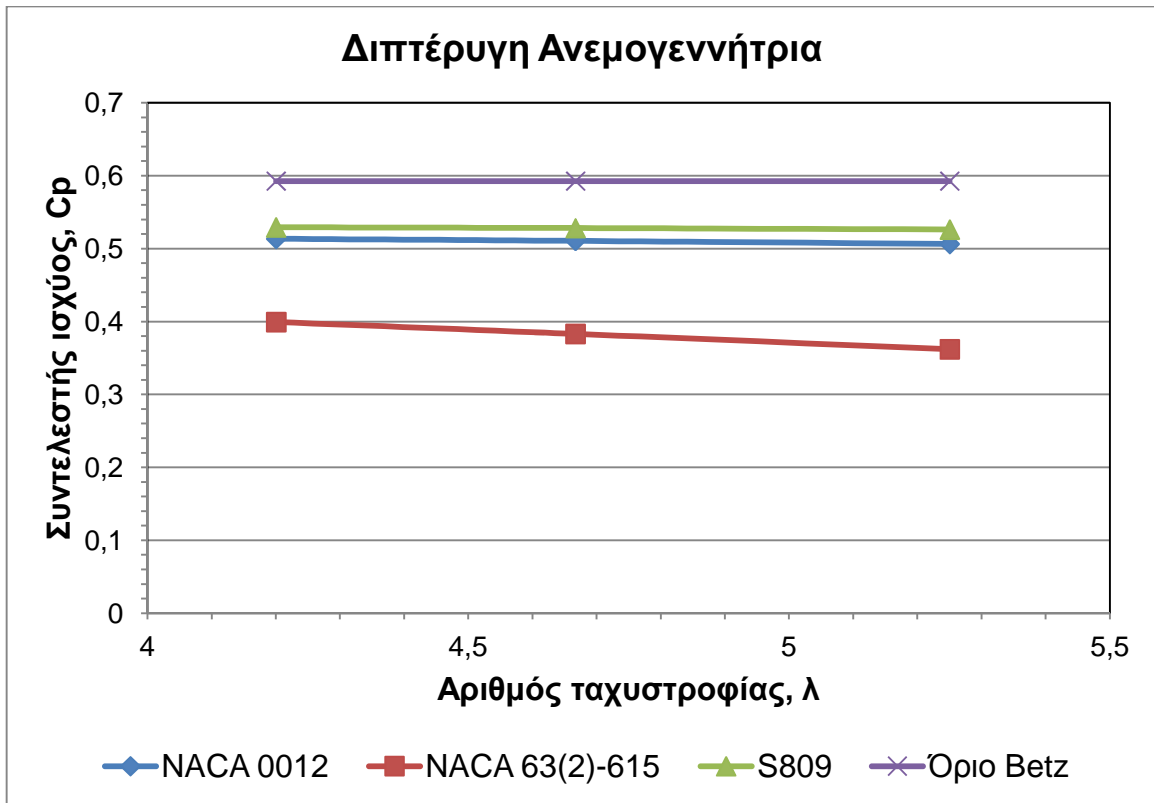
S809	
Αριθμός πτερυγίων:	B=3.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	$\Delta R=2.820000$ m
Πυκνότητα αέρα:	$\rho=1.225000$ kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	C _{pb} =0.592593
Ταχύτητα ανέμου:	V ₀ =9.000000 m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για S809:	C _d =0.020
Συντελεστής άνωσης για S809:	C _l =1.39
Γωνία προσβολής:	$\alpha=13.5$ μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	r _π =0.180000 m
Γωνιακή ταχύτητα:	$\omega=14.001031$ rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	$\lambda=4.667010$
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	u _r =42.003094 m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	A _R =28.274334 m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000477 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.006683 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	C _p =0.529342
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	$\eta_{AE}=0.893264$

Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή S809, τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 9 m/s

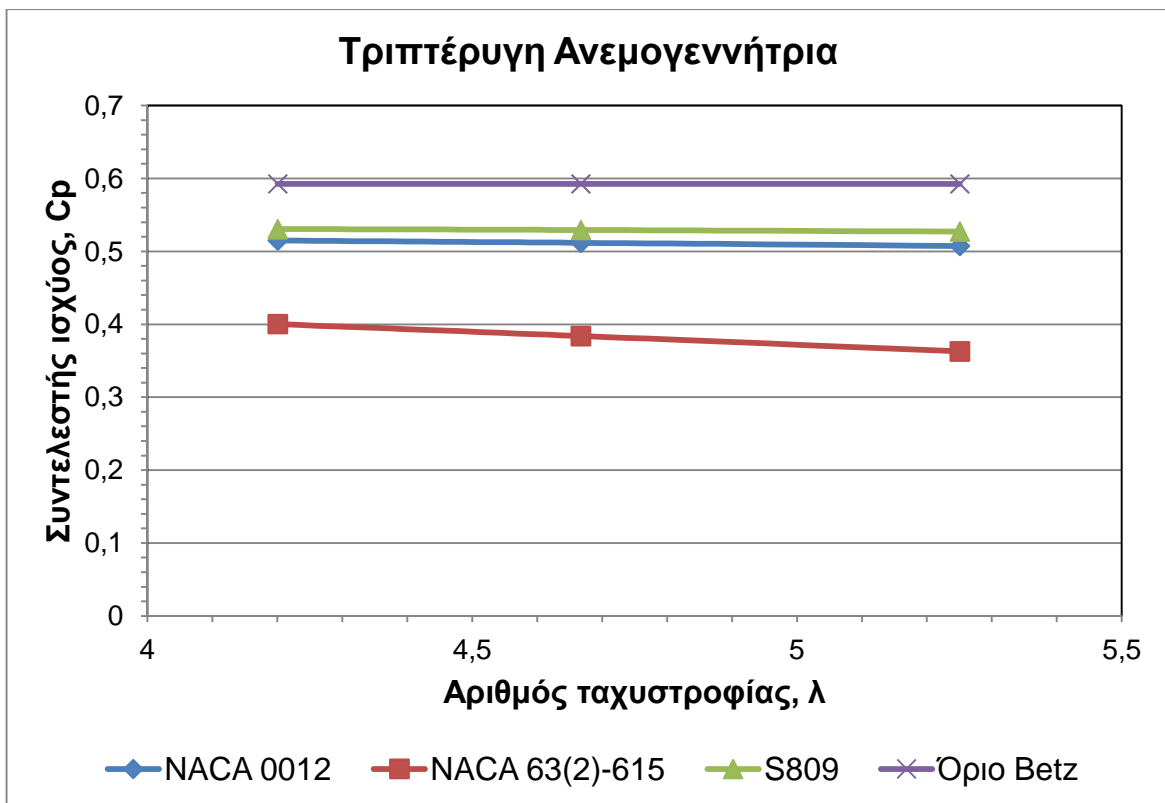
S809	
Αριθμός πτερυγίων:	B=3.000000
Ακτίνα ρότορα:	R=3.000000 m
Μήκος πτερυγίου:	$\Delta R=2.820000$ m
Πυκνότητα αέρα:	$\rho=1.225000$ kg/m ³
Συντελεστής ισχύος κατά το όριο Betz:	$C_{pb}=0.592593$
Ταχύτητα ανέμου:	$V_0=10.000000$ m/sec
Αριθμός στροφών:	N=133.700000 rpm
Συντελεστής αντίστασης για S809:	$C_d=0.020$
Συντελεστής άνωσης για S809:	$C_l=1.39$
Γωνία προσβολής:	$\alpha=13.5$ μοίρες
Ακτίνα βάσης πτερυγίου:	$r_{\pi}=0.180000$ m
Γωνιακή ταχύτητα:	$\omega=14.001031$ rad/sec
Αριθμός ταχυστροφίας:	$\lambda=4.200309$
Περιφερειακή ταχύτητα ακροπτερυγίου:	$u_r=42.003094$ m/sec
Επιφάνεια ρότορα:	$A_R=28.274334$ m ²
Συνολική ροπή:	M=0.000656 MNm
Συνολική ισχύς:	P=0.009188 MW
Τελικός συντελεστής ισχύος:	$C_p=0.530546$
Αριθμός αεροδυναμικής απόδοσης:	$\eta_{AE}=0.895297$

Πίνακας 6.18: Αποτελέσματα MATLAB για αεροτομή S809, τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια και ταχύτητα ανέμου 10 m/s

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης παρακάτω σε μπρφή διαγραμμάτων για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται ο συντελεστής ισχύος συναρτήσει του αριθμού ταχυστροφίας λ για διάφορες περιπτώσεις.



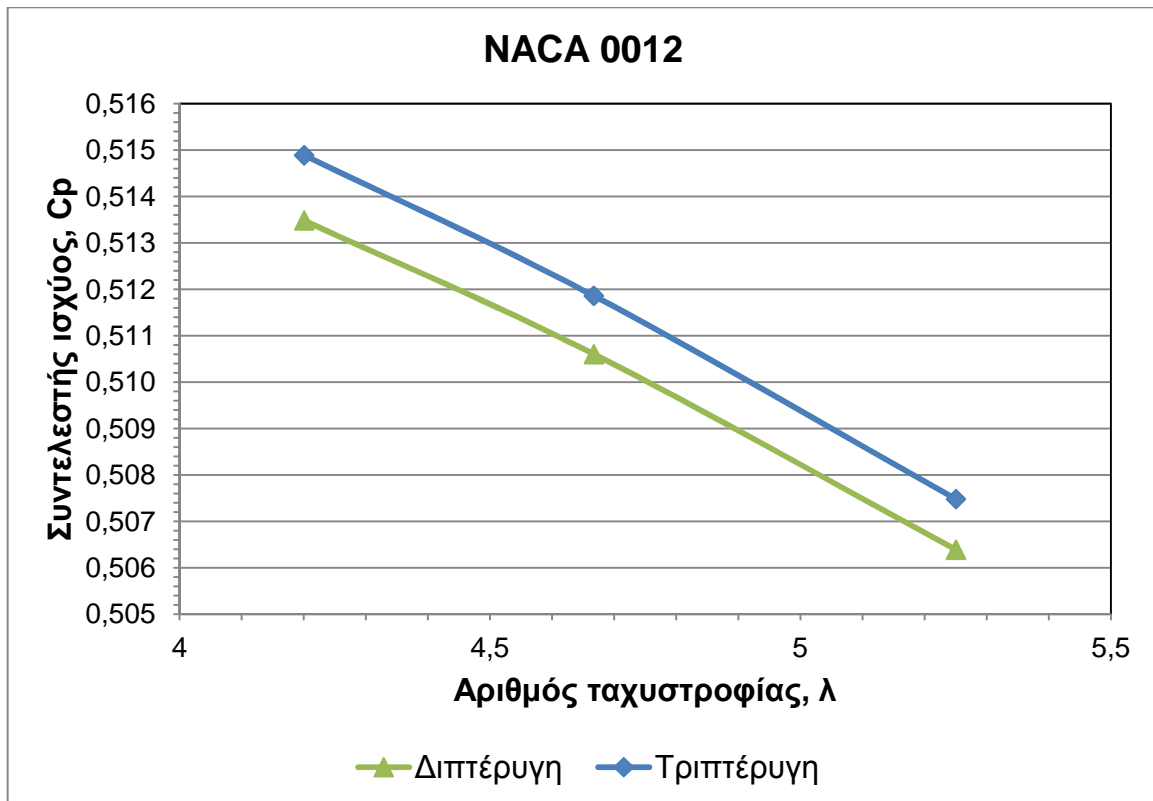
Εικόνα 6.1: Συντελεστής ισχύος συναρτήσει του αριθμού ταχυστροφίας για πτερύγια με διαφορετικές αεροτομές και διπτέρυγη ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 6.2: Συντελεστής ισχύος συναρτήσει του αριθμού ταχυστροφίας για πτερύγια με διαφορετικές αεροτομές και τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια.

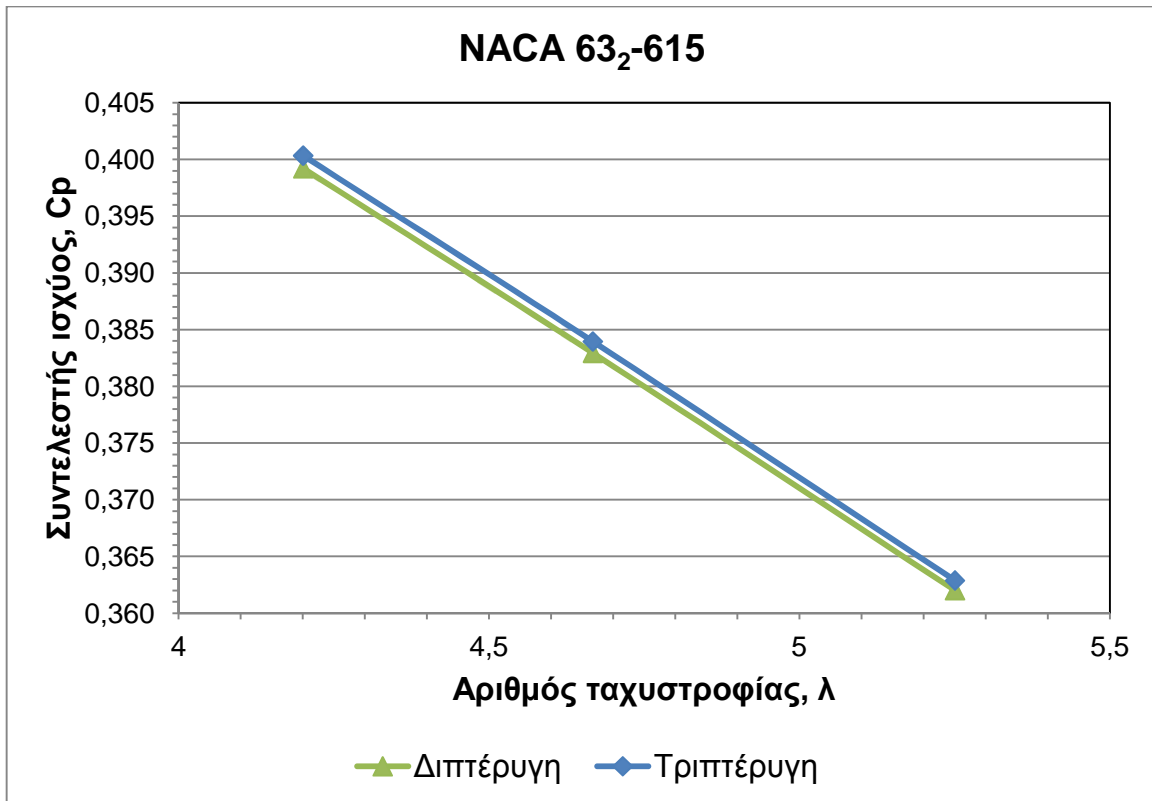
Από τις Εικόνες 6.1 και 6.2 είναι εμφανές πως την καλύτερη απόδοση την έχει η αεροτομή S809, τόσο σε διπτέρυγη όσο και σε τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια. Το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο καθώς η συγκεκριμένη αεροτομή έχει σχεδιαστεί για εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες. Ακολουθεί η αεροτομή NACA 0012 και τελευταία έρχεται η NACA 63₂-615. Επίσης, οι συντελεστές ισχύος που υπολογίστηκαν είναι μικρότεροι από το όριο του Betz, όπως και θα έπρεπε να είναι σύμφωνα με τη θεωρία.

Ακολουθούν συγκριτικά διαγράμματα που αφορούν διπτέρυγες και τριπτέρυγες ανεμογεννήτριες, τα πτερύγια των οποίων έχουν κατασκευαστεί με διαφορετικά προφίλ αεροτομών.

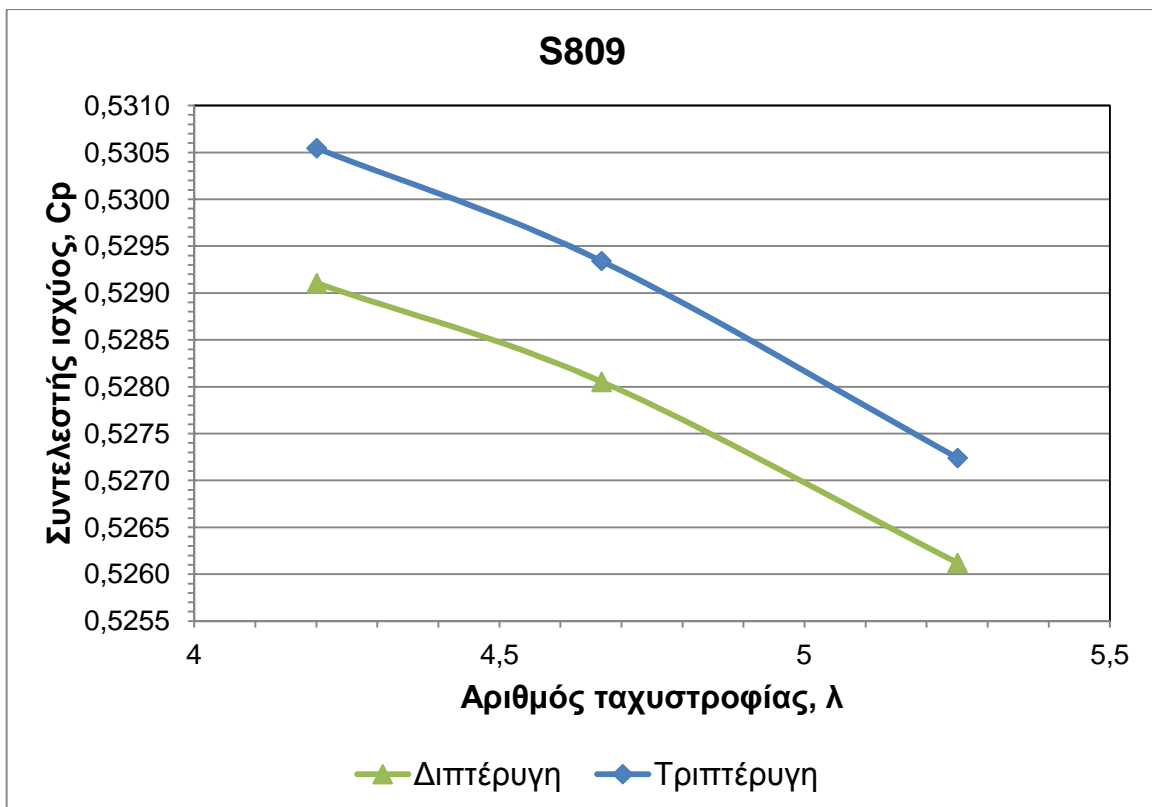


Εικόνα 6.3: Συντελεστής ισχύος συναρτήσει του αριθμού ταχυστροφίας για διπτέρυγη και τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια με αεροτομή NACA 0012.

Από τις Εικόνες 6.3 έως 6.5 είναι εμφανές πως οι ανεμογεννήτριες που ο ρότορας τους αποτελείται από τρία πτερύγια έχουν μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος από τις αντίστοιχες που έχουν ρότορα με δυο πτερύγια. Η ανεμογεννήτρια με αεροτομή S809 παρουσιάζει μεγαλύτερη αύξηση ισχύος με την προσθήκη ενός επιπλέον πτερυγίου, ενώ η ανεμογεννήτρια με αεροτομή NACA 63₂-615 ελάχιστη.



Εικόνα 6.4: Συντελεστής ισχύος συναρτήσει του αριθμού ταχυστροφίας για διπτέρυγη και τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια με αεροτομή NACA 63₂-615.



Εικόνα 6.5: Συντελεστής ισχύος συναρτήσει του αριθμού ταχυστροφίας για διπτέρυγη και τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια με αεροτομή S809.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αιολική ενέργεια αποτελεί αναμφίβολα μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική μορφή ενέργειας. Λόγω του γεγονότος ότι τα αποθέματα των συμβατικών καυσίμων έχουν ημερομηνία λήξης, η αξιοποίησή της αιολικής ενεργείας μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη ανεξαρτητοποίηση από την περπατημένη πετρελαϊκή οδό. Επιπλέον κίνητρα για την εφαρμογή της αιολικής ενέργειας αποτελούν ο φιλικός ως προς το περιβάλλον χαρακτήρας της, καθώς και η ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας που βοηθά στη μέγιστη αξιοποίησή της.

Όσον αφορά το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής, η κατανόησή του θα έχει πάντα ένα χαρακτήρα στοχαστικό. Έτσι, η απόδοση της ισχύος, παρόλες τις στατιστικές μελέτες, γίνεται μόνο όταν η φύση το επιτρέπει. Αυτό, σε συνδυασμό με τους κατασκευαστικούς περιορισμούς και τη μέγιστη απομάστευση από τον άνεμο, ενός ποσοστού της τάξεως 59% της συνολικής ισχύος του ανέμου να συλλέγεται μηχανικά (όριο το οποίο καθορίστηκε από τον Betz) δεν καθιστούν ακόμα δυνατό την αιολική ενέργεια να καταστεί πρωτοπόρα τεχνολογία στον ενεργειακό τομέα.

Από κατασκευαστικής άποψης, ο ανεμοκινητήρας βασίζεται στην εκμετάλλευση της δύναμης της άνωσης του ανέμου για την εξαγωγή της ισχύος. Η ταχύτητα του ανέμου V_0 και η επιφάνεια του στροφείου A είναι δύο βασικά μεγέθη από τα όποια εξαρτάται η απόδοση μιας εγκατάστασης ανεμοκινητήρα και ορίζονται από εξίσωση της μέγιστης εξαγόμενης ισχύος P_{max} . Συνεπώς στην τοποθεσία ενδιαφέροντος, το προφίλ του αιολικού δυναμικού είναι το πρώτο πράγμα προς εκτίμηση. Το στροφείο του ανεμοκινητήρα είναι το βασικό αντικείμενο τεχνολογικού ενδιαφέροντος μέχρι και σήμερα και είναι το τμήμα της εγκατάστασης που έχει δεχθεί την μεγαλύτερη εξέλιξη στο πέρασμα των χρόνων. Ξεχωριστοί κλάδοι επιστήμης που αποσκοπούν στη βελτίωση της απόδοσης των ανεμοκινητήρων παρουσιάζουν συνεχώς υλικά και νέα τεχνολογικά επιτεύγματα στον σχεδιασμό των αεροτομών των πτερυγίων και έχουν γνωρίσει μεγάλη άνθιση.

Η αντίδραση του ανέμου F πάνω σε μία τομή της πτέρυγας του στροφείου αναλύεται στην άνωση L και την αντίσταση D . Η αντίδραση είναι παράλληλη στη φορά του ανέμου ενώ η άνωση είναι κάθετη στην κατεύθυνση της αδιατάρακτης ροής του ανέμου. Η διαφορά πίεσης ανάμεσα στην πάνω και την κάτω επιφάνεια της αεροτομής είναι ο βασικός παράγοντας γένεσης της άνωσης L . Αυτό συμβαίνει λόγω της διαφοράς πίεσης Δp και λόγω του σχήματος της αεροτομής, το οποίο αναγκάζει τις ροϊκές γραμμές να καμπυλώνουν με τέτοιο τρόπο γύρω από την αεροτομή. Από την άλλη η αντίσταση τριβής D , ως συνιστώσα αντίστασης που προέρχεται από τις δυνάμεις πίεσης, συντίθεται από τη δύναμη τριβής της επιφάνειας με τον αέρα.

Από τη γνώση των L και D είναι δυνατός ο προσδιορισμός των συντελεστών άνωσης και αντίστασης, C_L και C_D αντίστοιχα. Ο C_L έως ότου φτάσει μια μέγιστη τιμή αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της γωνίας προσβολής α . Μετά το σημείο αυτό η αντίσταση τριβής σημειώνει μεγάλη αύξηση και η πτέρυγα περνά σε κατάσταση απώλειας στήριξης, με το συντελεστή άνωσης C_L και την άνωση L να μειώνονται δραστικά.

Η απώλεια στήριξης είναι συνάρτηση της αποκόλλησης του οριακού στρώματος από το πάνω μέρος της αεροτομής. Για τον έλεγχο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος κατά μήκος της επιφάνειας, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της μεταβολής της πίεσης της αεροτομής.

Η αυξημένη ορμή προσφέρει την ικανότητα στο ρευστό να αντισταθμίζει τις δυνάμεις πίεσης που οδηγούν σε αποκόλληση, και κατά συνέπεια σε απώλεια στήριξης. Για να μην έχουμε αποκόλληση του οριακού στρώματος πρέπει να τηρηθεί η συνθήκη Kutta, έτσι ώστε η μετάβαση από στρωτό σε τυρβώδες οριακό στρώμα να είναι ομαλή. Τέλος, η τραχύτητα της επιφάνειας της αεροτομής παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση της ανεμογεννήτριας, διότι επηρεάζει τους συντελεστές C_L και C_D .

Η ταχύτητα V_{rel} που δέχεται η αεροτομή μια πτέρυγας εκφράζεται ως το διανυσματικό άθροισμα της αξονικής ταχύτητας του ανέμου V_a και της περιστροφικής ταχύτητας των πτερυγίων V_{rot} .

Το σύστημα στροβίλων δημιουργεί αξονική και εφαπτομενική ταχύτητα που αντιστέκεται στην αξονική ταχύτητα του ανέμου και στην περιστροφική ταχύτητα των πτερυγίων. Εισάγονται έτσι δύο συντελεστές, ο συντελεστής αξονικής επαγωγής a και ο συντελεστής ακτινικής επαγωγής a' , οι οποίοι καθορίζουν το μέγεθος της αξονικής και της περιστροφικής ταχύτητας στην αεροτομή.

Οι a και a' καθιστούν επίσης δυνατό τον προσδιορισμό της δισδιάστατης γωνίας προσβολής α και αν είναι γνωστές οι κατανομές $C_L(\alpha)$ και $C_D(\alpha)$ από τα κατασκευαστικά δεδομένα της αεροτομής είναι εύκολο να υπολογιστούν συνολικά μεγέθη, όπως οι δυνάμεις στις πτέρυγες και η ισχύς εξόδου του ανεμοκινητήρα.

Η μέθοδος στοιχείου-πτερυγίου (BEM) λαμβάνει υπόψη και τους περιορισμούς που προκύπτουν από τη γεωμετρία του στροφείου και συνδέει τη θεωρία της ορμής με τα τοπικά ροϊκά φαινόμενα πάνω στην πτέρυγα.

Η εφαρμογή της μεθόδου BEM βασίζεται στη διακριτοποίηση της πτέρυγας σε στοιχειώδη τμήματα, τα «στοιχεία», τα οποία λαμβάνονται υπόψη ως ακτινικά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Επιπλέον, γίνεται η παραδοχή ότι η δύναμη από την πτέρυγα προς τη ροή είναι σταθερή, πράγμα το οποίο οδηγεί στη θεώρηση ύπαρξης ενός στροφείου με άπειρο αριθμό πτερυγίων. Κάτι τέτοιο προφανώς είναι αδύνατο και για αυτό το λόγο, στον αλγόριθμο υπολογισμού της μεθόδου, εισάγεται ο συντελεστής του Prandtl για την διόρθωση των αποκλίσεων.

Με την εφαρμογή των εξισώσεων της μεθόδου BEM, οι οποίες απορρέουν από τη θεωρία της ορμής, υπολογίζονται για κάθε στοιχείο τα μεγέθη των τοπικών δυνάμεων που δρουν σε αυτό. Οι υπολογισμοί γίνονται για γραμμική μεταβολή των μεγεθών από στοιχείο σε στοιχείο. Έτσι είναι δυνατή η εξαγωγή αποτελεσμάτων για συνολικά μεγέθη όπως τα προφίλ των κατανομών των δυνάμεων στις πτέρυγες και η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας.

Ο αλγόριθμος υπολογιστικού σχεδιασμού του στροφείου μιας ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται για τη μεγαλύτερη δυνατή γωνία προσβολής α που επιτρέπει η αεροτομή επιλογής, έτσι ώστε η πτέρυγα να μην περνά σε κατάσταση απώλειας στήριξης. Διατηρώντας την α σταθερή σε όλο το υπολογιστικό κομμάτι είναι εύκολο να προσδιοριστούν οι συντελεστές άνωσης C_L και αντίστασης C_D από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της αεροτομής και να υπολογιστεί ο μέγιστος συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης. Η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται σταθερή σε όλη τη διάρκεια των υπολογισμών. Ο χωρισμός της πτέρυγας σε στοιχεία είναι επίσης βασικό βήμα της υπολογιστικής διαδικασίας, με τις συνθήκες προσροής να λαμβάνονται στο κέντρο του κάθε πτερυγικού στοιχείου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του αλγόριθμου για την εγκατάσταση της μικρής ανεμογεννήτριας δύο πτερυγίων, παρατηρείται ότι η τελική

ισχύς εξόδου που υπολογίστηκε $P_{\text{τελ}}$, για κάθε περίπτωση $P_{\text{σχεδ}}$ και R , είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ισχύ σχεδιασμού. Η ποσοστιαία διαφορά κυμαίνεται από 28.8% έως 35%. Επίσης η ακτίνα του στροφείου R γίνεται όλο και μεγαλύτερη καθώς αυξάνεται η ισχύς εξόδου της εγκατάστασης.

Πιθανά σφάλματα και αποκλίσεις κατά τους υπολογισμούς οφείλονται κυρίως σε στρογγυλοποιήσεις μεγεθών καθώς και στον ορισμό της γωνίας προσβολής α και των συντελεστών άνωσης και αντίστασης C_L και C_D αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές υπολογιστήκαν από διάγραμμα για επιφάνεια τυπικής τραχύτητας, δίχως να εξασφαλίζεται η ακρίβειά τους.

Το πτερύγιο χωρίστηκε σε 1000 τμήματα για πιο ακριβή αποτελέσματα. Μελετήθηκαν δίπτερες και τρίπτερες ανεμογεννήτριες, με πτερύγια από αεροτομές NACA 0012, S809 και NACA 63₂-615 για ταχύτητες ανέμου 8 m/s, 9m/s και 10m/s.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε πως την καλύτερη απόδοση την έχει η αεροτομή S809, τόσο σε διπτέρυγη όσο και σε τριπτέρυγη ανεμογεννήτρια, όπως ήταν αναμενόμενο καθώς η συγκεκριμένη αεροτομή έχει σχεδιαστεί για εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες. Ακολουθεί η αεροτομή NACA 0012 και τελευταία έρχεται η NACA 63₂-615. Από τα συγκριτικά διαγράμματα διπτέρυγων – τριπτέρυγων ανεμογεννητριών προέκυψε πως οι ανεμογεννήτριες που ο ρότορας τους αποτελείται από τρία πτερύγια έχουν μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος. Η ανεμογεννήτρια με αεροτομή S809 παρουσίασε μεγαλύτερη αύξηση ισχύος με την προσθήκη ενός επιπλέον πτερυγίου, ενώ η ανεμογεννήτρια με αεροτομή NACA 63₂-615 ελάχιστη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abbot, H. and von Doenhoff, A.E., 1959. *Theory of Wing Sections*. New York: Dover Publications.

AirfoilTools, 2016. *Airfoil Tools*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://airfoiltools.com/plotter/index>
[Πρόσβαση 2016].

Anderson, J. D., 1985. *Fundamentals of Aerodynamics*. New York: McGraw-Hill.

Froude, H., 1889. On the part played in propulsion by differences of fluid pressure. *Transactions of the Institute of Naval Architects*, 30(390-405).

Glauert, H., 1935. Airplane Propellers. Στο: D. W.F., επιμ. *Aerodynamic Theory*. New York: Dover Publications, Inc., pp. 169-360.

Joukowski, N., 1912. Vortex theory of screw propeller. *Trudy Otdeleniya Fizicheskikh Nauk Obshchestva Lubitelei Estetvoznaniya*, Τόμος 16, pp. 1-31.

Prandtl, L., 1918. Tragfluegeltheorie. Part I. Mitteilung, Nachrichten der Gesellschaft der Wissenschaften zu Gottingen. *Math. Physik*, pp. 151-177.

Rankine, W., 1865. On the mechanical principles of the action of propellers. *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Τόμος 6, pp. 13-30.

Somers, D., 1997. *Design and Experimental Results for the S809 Airfoil*. Pennsylvania: Airfoils, Inc..

Καλλιντέρης, Ι., 2012. *Βασική Αεροδυναμική*. Πάτρα.

Μάργαρης, Δ., 2008. *Συστήματα Αιολικής Ενέργειας*. Πάτρα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.

Παπανίκας, Δ., 2006. *Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική*. Πάτρα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών

