

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ
ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

ΚΟΛΟΒΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΤΟΥΡΛΙΔΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ, 2011

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ
ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ**

ΚΟΛΟΒΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΤΟΥΡΛΙΔΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται, μια υπολογιστική μέθοδος αεροδυναμικού σχεδιασμού πτερυγίων με χρήση γενετικού αλγορίθμου και μια υπολογιστική μέθοδος για των υπολογισμό των χαρακτηριστικών του δρομέα. Και οι δύο σε συνδυασμό με την θεωρία του δίσκου ορμής (BEM). Τα πτερύγια αναπαρίστανται από τα στοιχεία, της χορδής και της γωνίας βήματος του πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση ως προς το επίπεδο περιστροφής του δρομέα. Για τον υπολογισμό της ισχύος, της ροπής, του συντελεστή ροπής, συντελεστή ισχύος της ανεμογεννήτριας και άλλων σημαντικών παραμέτρων που θα παρουσιαστούν παρακάτω αναπτύχθηκε ένας κώδικας (Παραρτήματα I) σε γλώσσα Fortran 90, ο οποίος δοκιμάστηκε σε αρκετές ανεμογεννήτριες με διαφορετικούς παραμέτρους. Ο γενετικός αλγόριθμος PIKAIA (έκδοση F90) καλείται από το πρόγραμμα βελτιστοποίησης (Παραρτήματα II) δίνοντας τιμές στις μεταβλητές(της χορδής και της γωνίας βήματος του πτερυγίου). Η συνάρτηση του συντελεστή ισχύος του δρομέα λειτουργεί ως αντικειμενική συνάρτηση. Και οι δύο κώδικες καλούν το λογισμικό XFOIL (έκδοση 6.96) για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών των αεροτομών του πτερυγίου και ο κώδικας (Παραρτήματα I) καλεί το λογισμικό MATLAB (έκδοση 7) για την διαγραμματική απεικόνιση των δεδομένων.

Και οι δύο κώδικες μετατράπηκαν ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν σε επιλογή σταθερών αλλά και μεταβλητών στροφών.

Η διάρθρωση της εργασίας είναι η εξής:

- Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή σχετικά με τους λόγους που κάνουν αναγκαία την όσο το δυνατόν βέλτιστη αεροδυναμική σχεδίαση του πτερυγίου.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στη θεωρία του δίσκου ορμής (BEM).
- Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό XFOIL και η θεωρία στην οποία βασίζεται, ενώ γίνεται και μια αξιολόγηση της ακρίβειάς του.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στη θεωρία των γενετικών αλγορίθμων, του PIKAIA
- Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα κύρια αποτελέσματα της εργασίας (τα πλήρη αριθμητικά δεδομένα και αποτελέσματα παρατίθενται στο συνοδευτικό CD).
- Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματά, σκέψεις και προτάσεις για μελλοντικές εργασίες και έρευνα.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας κ. Αντώνιο Τουρλιδάκη. Η εργατικότητα, η σοβαρότητα και η υπευθυνότητα την οποία επιδεικνύει ο κ. Τουρλιδάκης στην αντιμετώπιση των διδακτικών και ερευνητικών του υποχρεώσεων αποτέλεσε για μένα το σπουδαιότερο μάθημα και ενέπνευσε την αγάπη μου στα μαθήματά του. Από αυτόν πήρα τις πρώτες βάσεις στην Μηχανική των Ρευστών αλλά και θεμελίωσα μέσα μου πολλές γνώσεις πάνω στις Βασικές Αρχές των Στροβιλομηχανών. Οφείλω λοιπόν τις πρώτες μου και πιο θερμές ευχαριστίες να τις εκφράσω σ' αυτόν. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την υπόδειξη του θέματος, αλλά κυρίως για το γεγονός ότι καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας στάθηκε δίπλα μου με υπομονή και κατανόηση. Με βοήθησε στην συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας, υποδεικνύοντας πάντα και με σαφήνεια τον δρόμο που πρέπει να ακολουθηθεί.

Ευχαριστώ τους καθηγητές μου που κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα, διαμόρφωσαν το γνωστικό μου υπόβαθρο, τον τρόπο σκέψης και αναζήτησης αλλά και την προσωπικότητα μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος κ. Κυριάκο Βαφειάδη, ο οποίος με βοήθησε σε σημεία στα οποία συνάντησα προβλήματα κατά την ανάπτυξη του κώδικα σε γλώσσα FORTRAN.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ, θέλω να πω στην οικογένειά μου για την ηθική συμπαράσταση και στήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, για την υπομονή και την κατανόηση που έδειξαν απέναντι μου καθώς και για την οικονομική και ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν και μου προσφέρουν.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Ευχαριστίες.....	3
1 Εισαγωγή στο πρόβλημα.....	10
1.1 Αιολική ενέργεια και ανεμογεννήτριες.....	11
1.1.1 Αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος και τύρβη στον άνεμο	13
1.1.2 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ταχυτήτων ανέμου	16
1.1.3 Ισχύς κι ετήσια ενεργειακή παραγωγή ανεμογεννητριών.....	19
1.1.4 Η Λειτουργία των ανεμογεννητριών	24
1.1.5 Παγκόσμιας εγκατεστημένη ισχύς.....	25
1.2 Τύποι ανεμογεννητριών και τα βασικά τους μέρη.....	28
1.2.1 Ασύγχρονες γεννήτριες.....	32
1.2.2 Σύγχρονες γεννήτριες	34
1.2.3 Μέθοδοι λειτουργίας ανεμογεννητριών	35
1.2.4 Έλεγχος μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων.....	42
1.3 Απόδοση ανεμογεννητριών	44
1.3.1 Αεροδυναμική των πτερυγίων.....	48
1.3.2 Αεροδυναμική δύναμη και ροπή	51
1.3.3 Συντελεστές δυνάμεων και ροπών.....	52
1.3.4 Αεροδυναμική αντίσταση	54
1.3.5 Ρύθμιση των ανεμογεννητριών	55
1.3.6 Αεροτομές που χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες	57
1.3.7 Βέλτιστος σχεδιασμός πτερυγίων	61
2 Αεροδυναμική των ανεμογεννητριών και η Κλασική Θεωρία Δίσκου Ορμής (BEM)...	63
2.1 Δυσδιάστατα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά.....	63

2.2	Τρισδιάστατα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά	74
2.3	Σύστημα δινών πίσω από μία ανεμογεννήτρια.....	79
2.4	Θεωρία Ορμής Μονοδιάστατου Μοντέλου (1-D) για την Ιδεατή Ανεμογεννήτρια	82
2.5	Συνέπειες της Περιστροφής	90
2.6	Η κλασσική μέθοδος δίσκου ορμής.....	95
2.7	Συντελεστής απωλειών ακροπτερυγίου του Prandtl και νέες διορθώσεις	102
2.8	Διόρθωση του Glauert για υψηλές τιμές του α	103
2.8	Χαρακτηριστικές καμπύλες δρομέα.....	105
3	Το λογισμικό XFOIL	108
3.1	Ο αλγόριθμος XFOIL	108
3.1.1	Μαθηματική ανάλυση των πεδίων ροής.....	110
3.1.2	Στροβιλότητα και κυκλοφορία	113
3.2	Ροή χωρίς τριβή-Ιδανική ροή	115
3.2.1	Συνάρτηση δυναμικού της ροής.....	115
3.2.2	Εξισώσεις της ιδανικής ροής.....	116
3.2.3	Στοιχειώδεις ροές.....	117
3.3	Ροή με τριβή	120
3.3.1	Οι εξισώσεις του οριακού στρώματος (ασυμπύεστη ροή).....	125
3.3.2	Εξισώσεις του οριακού στρώματος (συμπιεστή ροή)	126
3.4	Κριτήριο μετάβασης.....	130
3.5	Ο αριθμός Reynolds στο XFOIL.....	131
3.5.1	Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών του XFOIL	134
3.6	Τα χαρακτηριστικά της αεροτομής naca 63415.....	135
3.6.1	Διορθώσεις στα χαρακτηριστικά της αεροτομής (εξισώσεις Viterna και Snel et al)	153
4	Βελτιστοποίηση με χρήση γενετικών αλγορίθμων	156
4.1	Γενετικοί αλγόριθμοι.....	156
4.1.1	Χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων	158

4.1.2	Βασικά βήματα των γενετικών αλγορίθμων.....	159
4.2	Το λογισμικό ΡΙΚΑΙΑ.....	160
4.2.1	Ένας βασικός γενετικός αλγόριθμος	162
4.2.2	Μια υπορουτίνα βελτιστοποίησης βασισμένη σε γενετικούς αλγορίθμους .	162
4.2.3	Εισαγωγή νέου πληθυσμού Αρχικός πληθυσμός	163
4.2.4	Τεχνική επιλογής	163
4.2.5	Κατάταξη ως καταλληλότητα.....	164
4.2.6	Κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση	164
4.2.7	Ο τελεστής διασταύρωσης.....	165
4.2.8	Ο τελεστής μετάλλαξης	166
4.2.9	Ομοιόμορφη μετάλλαξη	166
4.2.10	Δυναμική προσαρμογή του ρυθμού μετάλλαξης	166
4.2.11	Σχέδια αναπαραγωγής	166
4.2.12	Ελιτισμός	167
4.3	Οι τελεστές ελέγχου δεδομένων εισαγωγής	168
4.3.1	Αριθμός πληθυσμού n_p	168
4.3.2	Αριθμός γενεών n_{gen}	168
4.3.3	Ακρίβεια κωδικοποίησης n_d	168
4.3.4	Ρυθμός διασταύρωσης p_{cross}	168
4.3.5	Μέθοδος μετάλλαξης i_{mut}	169
4.3.6	Αρχικός ρυθμός μετάλλαξης p_{mut}	169
4.3.7	Κατώτατος ρυθμός μετάλλαξης p_{mutmn}	169
4.3.8	Ανώτατος ρυθμός μετάλλαξης p_{mutmx}	169
4.3.9	Καταλληλότητα f_{dif}	169
4.3.10	Σχέδια αναπαραγωγής i_{rep}	170
4.3.11	Ελιτισμός i_{elite}	170
4.3.12	Επιλογή επιπλέον ελέγχου i_{invb}	170

4.4	Διασύνδεση του ΡΙΚΑΙΑ και του προγράμματος αξιολόγησης	172
5	Εκτέλεση και αποτελέσματα.....	178
5.1	Λειτουργία σταθερού βήματος	181
5.1.1	Σενάριο 1: Υπολογισμός των χαρακτηριστικών του δρομέα για το πρωτότυπο πτερύγιο της NTK500/41 με χρήση της αεροτομής naca 63415 σε όλες τις ακτινικές θέσεις	183
5.1.2	Σενάριο 2: Υπολογισμός των χαρακτηριστικών του δρομέα για πτερύγιο που δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα βελτιστοποίησης για ταχύτητα ανέμου 7.5 m/s ...	194
5.1.3	Σενάριο 3: Υπολογισμός των χαρακτηριστικών του δρομέα για πτερύγιο που δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα βελτιστοποίησης για ταχύτητα ανέμου 6.5 , 7.5 και 8.5 m/s	207
5.2	Λειτουργία σταθερής ταχύτητας ακροπτερυγίου λ.....	220
5.2.1	Σενάριο 4: Υπολογισμός των χαρακτηριστικών του δρομέα για πτερύγιο που δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα βελτιστοποίησης για ταχύτητα ακροπτερυγίου $\lambda=9$ και ταχύτητες ανέμου 7.5 m/s.....	221
6	Συμπεράσματα	234
	Βιβλιογραφία.....	240
	Παράρτημα I: Αλγόριθμος εύρεσης των χαρακτηριστικών του δρομέα	245
	Παράρτημά II: Αλγόριθμος εύρεσης των τιμών της χορδής και της γωνίας βήματος του νέου πτερυγίου	260
	Παράρτημα III: Αποτελέσματα.....	283

1 Εισαγωγή στο πρόβλημα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εισαγωγή σε θέματα που αφορούν την αιολική ενέργεια και την εξέλιξη των ανεμογεννητριών, καθώς επίσης και μια πρώτη εισαγωγή στην αεροδυναμική των πτερυγίων και στα συστήματα ελέγχου της παραγόμενης ισχύος. Σκοπός του κεφαλαίου είναι ο αναγνώστης να κατανοήσει τον λόγο για τον οποίο κρίνεται σημαντικός ο βέλτιστος αεροδυναμικός σχεδιασμός των πτερυγίων των ανεμογεννητριών.

Η σύγχρονη εποχή χαρακτηρίζεται από την τεράστια κλιματική αλλαγή της τελευταίας εκατονταετίας εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κι ως συνέπεια την αύξηση της στάθμης των θαλάσσιων υδάτων και την δημιουργία δυσμενών κι ακραίων καιρικών συνθηκών. Αιτία αυτού του φαινομένου είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, που προκύπτουν από την υπερεκμετάλλευση του πετρελαίου και των άλλων γνωστών ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας.

Απόρροια του γεγονότος αυτού, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση εξαιτίας της ραγδαίας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και σε συνάρτηση με τη μείωση των αποθεμάτων αυτών των καυσίμων, ήταν η ανθρωπότητα να στραφεί σε άλλες εναλλακτικές μορφές ενέργειας, τις γνωστές στο ευρύτερο κοινό κι ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Πλέον έχει γίνει κοινή συνείδηση όλων η χρήση αυτών των ανεξάντλητων και φυσικών μορφών ενέργειας που μόνο θετικά έχει να προσφέρει στον ανθρώπινο πληθυσμό και στο περιβάλλον του (χλωρίδα και πανίδα) αλλά και γενικότερα στον πλανήτη που κατοικεί.

Αυτή τη στιγμή, ο άνθρωπος έχει καταφέρει να εκμεταλλευθεί αρκετές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως την αιολική, την ηλιακή, τη γεωθερμία, την υδατόπτωση που την εκμεταλλεύεται με τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, την κυματική, τη βιομάζα αλλά και τη χημική ενέργεια του υδρογόνου που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από διατάξεις που ονομάζονται κυψέλες καυσίμου ή υδρογόνου.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η αιολική ενέργεια και οι μηχανές που πραγματοποιούν την εν λόγω μετατροπή της ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια, οι επονομαζόμενες Ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Οι τελευταίες μαζί με τα φωτοβολταϊκά και τα υδροηλεκτρικά αποτελούν τις περισσότερες και τις πιο διαδεδομένες εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε παγκόσμιο επίπεδο.

1.1 Αιολική ενέργεια και ανεμογεννήτριες

Οι άνεμοι παράγονται κυρίως από την άνιση θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο. Οι θάλασσες παρουσιάζουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα αφού εκτός από την εξάτμιση, η θερμότητα μεταφέρεται προς το εσωτερικό των υδάτινων μαζών [2,3,4,5]. Έτσι κατά τη διάρκεια της ημέρας ο αέρας πάνω από λίμνες και θάλασσες παραμένει σχετικά κρύος, σε σχέση με τον αέρα τις στεριές που θερμαίνεται περισσότερο. Έτσι έχουμε και μια μείωση της πυκνότητάς του, με αποτέλεσμα την ανύψωσή του και τα κρύα βαρύτερα στρώματα του αέρα που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας κινούνται για να πάρουν τη θέση του πάνω από την ξηρά.

Με τον τρόπο αυτόν παράγονται τα τοπικά παραλιακά ρεύματα που κατά τη διάρκεια της νύχτας τα ρεύματα αυτά αντιστρέφονται επειδή η θερμοκρασία της ξηράς ελαττώνεται πολύ γρηγορότερα από αυτή του νερού και έτσι ο ψυχρότερος άρα και βαρύτερος αέρας της ξηράς κινείται προς τη θάλασσα όπου αναπληρώνει αυτόν που ανυψώνεται από την επιφάνειά της. Παρόμοια τοπικά ρεύματα συμβαίνουν στις βουνοπλαγιές κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν ο θερμός αέρας ανυψώνεται κατά μήκος των θερμών πλαγιών υπό την επίδραση του ήλιου. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο σχετικά κρύος αέρας των πλαγιών κινείται προς τις πεδιάδες. Κατά τον ίδιο τρόπο παράγονται και οι πλανητικοί άνεμοι λόγω της μεγαλύτερης θέρμανσης της επιφάνειας της γης κοντά στον ισημερινό από ότι στους πόλους. Επίσης έχουμε και τους εποχιακούς ανέμους, όπως οι Μουσσώνες, καθώς και τους ετήσιους ή Μελέμια [2,3,4,5].

Οι τελευταίοι έχουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αφού η παρουσία τους είναι πολύ συχνή στην περιοχή του Αιγαίου. Είναι άνεμοι του καλοκαιριού, βόρειο-βορειοανατολικοί μέχρι και βορειοδυτικής διεύθυνσης που αρχίζουν να πνέουν από τις αρχές του Μαΐου και εξασθενούν στα μέσα του Οκτωβρίου. Τη μεγαλύτερη ένταση και συχνότητα τη παρουσιάζουν από τα μέσα του Ιουλίου έως τα μέσα του Σεπτεμβρίου, με μέγιστη ημερήσια διακύμανση τις απογευματινές ώρες, ενώ η έντασή τους ελαττώνεται τη νύχτα.

Γενικότερα, οι τροπικές περιοχές που βρίσκονται κοντά στον ισημερινό απορροφούν πολύ περισσότερη ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια του έτους από ότι οι περιοχές που βρίσκονται στους δύο πόλους της γης. Συνεπώς, ως αποτέλεσμα, οι τροπικές περιοχές γίνονται όλο και πιο θερμές, ενώ οι πολικές περιοχές γίνονται ολοένα και ψυχρότερες, λόγω αυτού δημιουργείται ένα δυνατό συνεχές ρεύμα μεταξύ αυτών των περιοχών. Κατά αυτόν τον τρόπο παράγονται οι λεγόμενοι πλανητικοί - παγκόσμιοι άνεμοι.

Πέραν αυτής της γενικότερης κίνησης των αέριων μαζών, τα ρεύματα ανέμου επηρεάζονται επιπλέον από μικρότερης κλίμακας τοπικά γεωγραφικά χαρακτηριστικά. Λόγου χάρη, οι βουνοπλαγιές που προσανατολίζονται προς τον ήλιο, θερμαίνονται γρηγορότερα. Η θέρμανση κι η ψύξη μεγάλων δασικών εκτάσεων παρουσιάζει διαφορές από τις επιφάνειες υδάτινων περιοχών που βρίσκονται κοντά τους. Ειδικότερα, πλαγιές ή κορυφογραμμές μπορούν να συνεισφέρουν στην τοπική επιτάχυνση της ταχύτητας του ανέμου. Τέτοια τοπογραφικά χαρακτηριστικά, πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη, όταν υπολογίζονται οι τοπικές συνθήκες ανέμου και αποτελούν στοιχεία που προσφέρουν προσοδοφόρες και κατάλληλες περιοχές για εγκατάσταση ανεμογεννητριών.

Μόλις περίπου το 2% της ηλιακής ενέργειας των $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh που συλλαμβάνει η ατμόσφαιρα μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του ανέμου. Παρόλα αυτά, αυτό το 2% υπολογίζεται ότι αντιστοιχεί σε αιολική ενέργεια $4 \cdot 10^{12}$ kWh. Αυτό το ποσό είναι περίπου εκατό φορές μεγαλύτερο από όλη την παραγόμενη ενέργεια από όλους τους σταθμούς παραγωγής του πλανήτη [1,2,3,4].

Για τη μελέτη της αιολικής ενέργειας και για το σχεδιασμό Α/Γ, το διάνυσμα της ταχύτητας θεωρείται ότι αποτελείται από ένα σταθερό άνεμο συν τις διάφορες αποκλίσεις που λαμβάνουν χώρα σε σχέση με αυτόν το σταθερό άνεμο, οι οποίες αποτελούν τη λεγόμενη τύρβη. Για το σχεδιασμό Α/Γ λαμβάνονται υπόψη κι οι δύο αυτοί παράγοντες, ενώ ο υπολογισμός της ισχύος και της ενέργειας βασίζεται μόνο στη συνιστώσα του σταθερού ανέμου. Η ισχύς που βρίσκεται διαθέσιμη στον άνεμο εξαρτάται και μεταβάλλεται με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Ένα ευρέως διαδεδομένο μέγεθος μέτρησης είναι η πυκνότητα αιολικής ισχύος ή ισχύς ανά μονάδα επιφανείας (W/m^2) που δίνεται από τη σχέση :

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_w^3$$

Όπου,

- ρ η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3)
- v_w η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Κύριος σκοπός είναι να εξαχεται η ενέργεια από τον άνεμο, για το λόγο αυτό η πιο σημαντική παράμετρος είναι η μέση ετήσια πυκνότητα αιολικής ισχύος :

$$\bar{P}_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{1}{8760} \int_{\acute{\epsilon}\tau\omicron\varsigma} v_w^3 dt$$

Όπου 8760 είναι περίπου οι ώρες ενός έτους. Σε σχέση με την ετήσια κατανομή του ανέμου η μέση ετήσια πυκνότητα του ανέμου δίνεται από τη σχέση :

$$\bar{P}_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_w^3 \cdot f(v_w)$$

Όπου $f(v_w)$, είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του ανέμου, που προσεγγίζεται κατά κανόνα από μία συνάρτηση Weibull [1,2,3,4].

1.1.1 Αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος και τύρβη στον άνεμο

Ένα από τα σημαντικότερα φαινόμενα, που εκμεταλλεύεται ο άνθρωπος για την χρησιμοποίηση της αιολικής ενέργειας μέσω των Α/Γ, είναι η αύξηση της ταχύτητας ανέμου σε σχέση με το υψόμετρο (wind shear). Τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την ταχύτητα του ανέμου είναι η θερμοκρασία, η υγρασία κι η πίεση, που καθορίζουν ουσιαστικά την πυκνότητα του αέρα. Όμως, ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την ταχύτητα του ανέμου είναι η τραχύτητα του εδάφους, η οποία μετράτε σε μήκος τραχύτητας z_0 (m) και κυμαίνεται σε τιμές από 0,0001 για τις επιφάνειες υδάτινων περιοχών μέχρι μεγαλύτερες τιμές από το 1 για τις πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές με υψηλά κτίρια κι ουρανοξύστες όπως στον πίνακα 1.1 [5]. Η αύξηση του ανέμου σε σχέση με το ύψος, υπολογίζεται σύμφωνα με αυτό το μέγεθος και δίνεται από τη σχέση που ακολουθεί :

$$\bar{V}_H = \bar{V}_{ref} \cdot \frac{\ln \frac{H}{z_0}}{\ln \frac{H_{ref}}{z_0}}$$

Όπου,

- \bar{V}_H η μέση ταχύτητα του ανέμου (m/s) σε ύψος H
- \bar{V}_{ref} η μέση ταχύτητα του ανέμου (m/s) στο ύψος αναφοράς (συνήθως $H_{ref} = 10\text{ m}$)
- Z_0 το μήκος τραχύτητας που χαρακτηρίζει μία περιοχή (m)

]

Πίνακας 1.1 : Ενδεικτικές τιμές μήκους τραχύτητας διαφορετικών περιοχών [1,4,5]

Τύπος εδάφους	Μήκος τραχύτητας z_0 (m)
Θάλασσα στα ανοιχτά	0,0001
Παράκτια περιοχή	0,001
Ύπαιθρος χωρίς ψηλά κτίρια και πυκνή βλάστηση	0,01
Αραιοκατοικημένες περιοχές με λίγα σπίτια	0,05
Δάση και προάστια πόλεων	0,3
Κέντρα μεγάλων πόλεων	1-10

Μία άλλη μαθηματική έκφραση για τον υπολογισμό της ταχύτητας συναρτήσει του υψομέτρου δίνεται με τη βοήθεια του εκθέτη Hellman, για τον οποίο ισχύει :

$$\alpha = \frac{1}{\ln\left(\frac{H_{ref}}{z_0}\right)}$$

Επομένως, η σχέση γίνεται :

$$\bar{V} = \bar{V}_{ref} \cdot \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^\alpha$$

Οι σχέσεις αυτές δίνουν με σχετικά καλή ακρίβεια την τιμή της ταχύτητας του ανέμου μέχρι τα 100 μέτρα από το έδαφος. Από εκεί και πέρα, η ταχύτητα θα πρέπει να εκτιμάται ως λίγο μικρότερη από αυτήν που προκύπτει από τις μαθηματικές σχέσεις που έχουν περιγραφεί παραπάνω, ιδιαίτερα όταν γίνεται μελέτη για εγκατάσταση Α/Γ μεγάλης ισχύος, της τάξεως των MW, που ο δρομέας τους βρίσκεται σε ύψη ανώτερα των 100 μέτρων.

Όπως προαναφέρθηκε, η ταχύτητα του ανέμου συνηθίζεται να μετράτε σε μέσες τιμές 10λέπτου. Οι στιγμιαίες τιμές του ανέμου, από τις οποίες προκύπτει η μέση τιμή, θεωρούνται ως το άθροισμα της μέσης τιμής συν την απόκλιση τους από αυτή τη μέση τιμή, τη λεγόμενη τυρβώδη συνιστώσα. Η τύρβη, λοιπόν αποτελεί τη διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου γύρω από τη μέση τιμή της.

Είναι έντονη σε περιπτώσεις ξαφνικών ριπών ανέμου κι ακραίων καιρικών φαινομένων. Εξαρτάται από τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου κατά κύριο λόγο, από το μήκος τραχύτητας μίας περιοχής, την ατμοσφαιρική σταθερότητα αλλά και τα επιμέρους τοπογραφικά χαρακτηριστικά [2,3,4,5].

$$V_w(t) = \bar{V}_w + v(t)$$

Όπου,

- $V_w(t)$ η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου
- \bar{V}_w η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου
- $v(t)$ η στιγμιαία τύρβη

Ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μαθηματικά την τύρβη λέγεται ένταση ή διασπορά τύρβης κι εξαρτάται από τη μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου κι από τη διασπορά αυτής, ενώ παίρνει τιμές 5-20%. Για το σχεδιασμό των Α/Γ οι συνήθεις τιμές που λαμβάνονται είναι 16-18% [2,3,4].

$$I = \frac{\sigma_v}{\bar{v}_w} \quad (\%)$$

Όπου, σ_v η διασπορά της ταχύτητας του ανέμου από τη μέση τιμή στο διάστημα που υπολογίζεται η μέση τιμή και δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_v = \frac{\overline{v_w}}{\ln \frac{H}{z_0}}$$

Συνεπώς, η εξίσωση γίνεται :

$$I = \frac{1}{\ln \frac{H}{z_0}}$$

Όπου, H το ύψος μέτρησης της ταχύτητας ανέμου κι επομένως γίνεται ο υπολογισμός της έντασης της τύρβης δίχως τη γνώση της μέσης τιμής της ταχύτητας. Συγκρίνοντας τις σχέσεις προκύπτει ουσιαστικά ότι ο εκθέτης Hellman χαρακτηρίζει την τύρβη μίας περιοχής.

1.1.2 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ταχυτήτων ανέμου

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα κατά την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας σε σχέση με την ηλιακή είναι ότι υπάρχει κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας, σε αντίθεση με τις 10-12 ώρες που εμφανίζεται ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Αλλά, το βασικό της μειονέκτημα της σε σχέση με την ηλιακή είναι η διακύμανση της.

Πολύ συχνά για την εκτίμηση της αιολικής πυκνότητας μίας περιοχής, χρησιμοποιούνται οι χάρτες ανέμου (Wind Atlas), που εμφανίζουν τις τάξεις της αιολικής ισχύος ή της μέσης ταχύτητας ανέμου που αναφέρονται στην ετήσια κατανομή τους. Έτσι, έχουν διαμορφωθεί αυτοί οι χάρτες, βάσει μετεωρολογικών δεδομένων αρκετών ετών στο σύνηθες ύψος μέτρησης των 10 μέτρων. Η ανάγκη ύπαρξης αυτών των χαρτών εξηγείται από το πλέον χαρακτηριστικό γνώρισμα της αιολικής ενέργειας, τη διακύμανση της. Η αιολική διαθεσιμότητα μεταβάλλεται γεωγραφικά αλλά κι εποχιακά. Έχει προκύψει ότι η ετήσια πυκνότητα της αιολικής ισχύος είναι δυνατό να έχει απόκλιση έως και 13% από χρόνο σε χρόνο [2,3,4]. Αυτό οφείλεται στην κυβική σχέση της ταχύτητας του ανέμου με τη διαθέσιμη αιολική ισχύ. Παρατηρώντας μακροσκοπικά το φαινόμενο αυτό, επεξηγείται η ύπαρξη πολλών διαφορετικών κλιμάτων στις διάφορες περιοχές της υφής.

Όμως, ακόμα και στην ίδια κλιματική περιοχή υπάρχει μεγάλη ποικιλία στη συμπεριφορά του ανέμου, σε μικρότερη κλίμακα όμως σε σχέση με την παγκόσμια διαφορετικότητα, η οποία επηρεάζεται από τη γεωγραφία της περιοχής, το μέγεθος της υδάτινης και εδαφικής της επιφάνειας, την τοπογραφία και τη γνωστή βλάστηση, πάνω από τις θάλασσες και

γενικότερα τις υδάτινες επιφάνειες οι ταχύτητες του ανέμου είναι μεγαλύτερες, ενώ μειώνονται σημαντικά πάνω από τις ηπειρωτικές επιφάνειες.

Όσον αφορά στην Ευρώπη, οι συνθήκες ανέμου ποικίλλουν από το παραθαλάσσιο κλίμα της Βόρειας Ευρώπης και των Βρετανικών νήσων στο ηπειρωτικό κλίμα της Κεντρικής κι Ανατολικής Ευρώπης και στο Μεσογειακό κλίμα των νοτιότερων περιοχών. Με βάση τις συνθήκες ανέμου, η Ευρώπη μπορεί να χωριστεί σε δύο διαφορετικές περιοχές, την περιοχή με τα ευδιάκριτα παραθαλάσσια χαμηλής πίεσης ρεύματα που κινούνται από τα δυτικά προς τα ανατολικά και την περιοχή στην Νότια Ευρώπη που επηρεάζεται ελάχιστα από αυτά, καθώς επηρεάζεται σε μέγιστο βαθμό από τα θερμά ρεύματα της Μεσογείου [2,3,4].

Ως χαρακτηριστικό, όπως αναφέρθηκε, για το αιολικό δυναμικό μίας περιοχής θεωρείται η μέση ταχύτητα του ανέμου. Όμως, η γνώση μόνο αυτής δεν αποτελεί από μόνη της κριτήριο για την εκτίμηση της αιολικής ενέργειας που μπορεί να προσφέρει μία περιοχή. Απαιτείται, επιπλέον, πληροφόρηση σχετικά με τη συχνότητα της κάθε ταχύτητας ανέμου. Η στατιστική κατανομή της ετήσιας ταχύτητας ανέμου μπορεί να προκύψει από ανεμολογικά δεδομένα μετρούμενα σε ένα καθορισμένο ύψος (10 μέτρα συνήθως). Κατά τη διαδικασία αυτή συνηθίζεται η χρήση μέσων τιμών δεκάλεπτων, τα οποία αξιολογούνται σε διάστημα ενός έτους, ώστε να προκύψει η ετήσια μέση ταχύτητα ανέμου και η ετήσια σχετική κατανομή του.

Για να προκύψουν αξιόπιστα στατιστικά αποτελέσματα, χρειάζονται δεδομένα τουλάχιστον μερικών ετών, μέχρι δέκα σύμφωνα με τη μετεωρολογική επιστήμη. Η στατιστική κατανομή της συχνότητας της ταχύτητας του ανέμου συνηθίζεται να μετράτε ως συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας (συνεχής κατανομή) ή της αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας. Γραφικά, η πρώτη δείχνει απευθείας τις ταχύτητες ανέμου που εμφανίζονται περισσότερο σε μία περιοχή, ενώ η δεύτερη δείχνει ως ποσοστό την περίοδο μέσα στο διάστημα ενός χρόνου, κατά την οποία η ταχύτητα ανέμου πέφτει από την τιμή ενός συγκεκριμένου σημείου της εν λόγω καμπύλης.

Ένα επίσης χαρακτηριστικό μέγεθος, που χρησιμοποιείται, είναι ο όρος της ταχύτητας μέγιστης πιθανοφάνειας (V_{mode} ή V_{median}) και αποτελεί την ταχύτητα που βρίσκεται στην αιχμή της σχετικής κατανομής και αντίστοιχα στο 50% της αθροιστικής και συνήθως είναι χαμηλότερη της μέσης ταχύτητας κατά 0,3 - 0,5 m/s.

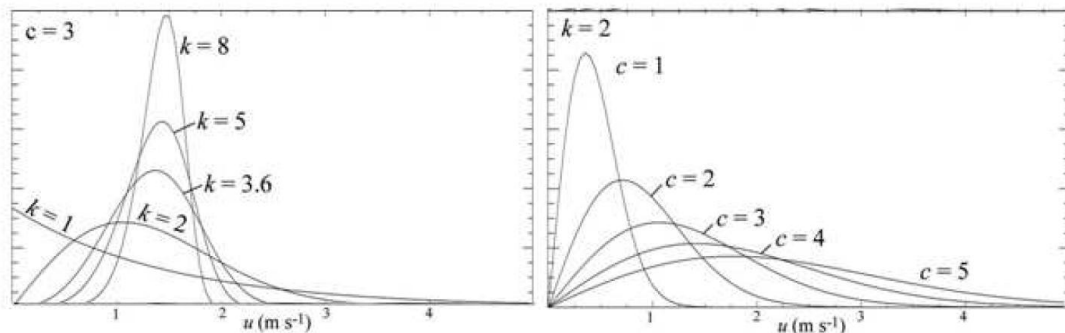
Εξαιτίας των ελλιπών ιστορικών δεδομένων για την ταχύτητα ανέμου στις περισσότερες περιοχές, χρησιμοποιείται η μαθηματική συνάρτηση Weibull, για να χαρακτηρίσει το αιολικό δυναμικό μίας περιοχής, η οποία προσεγγίζει σε πολύ καλό βαθμό την κατανομή

του ανέμου. Η συνάρτηση αυτή εξαρτάται από την παράμετρο κλίμακας c , η οποία καθορίζει την μέση ταχύτητα ανέμου και μετράτε σε m/s, και την παράμετρο μορφής k που συνήθως παίρνει τιμές 1,5 - 2,5.

Στον Ελλαδικό χώρο συνήθως λαμβάνονται τιμές μεταξύ 1,5 και 2,0 [5]. Συχνά (όταν είναι γνωστή μόνο η μέση ταχύτητα του ανέμου) κι επειδή είναι δύσκολος ο υπολογισμός της παραμέτρου μορφής, λαμβάνεται η τιμή $k=2$ [2,3,4,5], που τότε η κατανομή Weibull ονομάζεται κατανομή Rayleigh. Οι μαθηματικές εκφράσεις τους φαίνονται παρακάτω:

$$\text{Weibull : } h(v_w) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v_w}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^k}$$

$$\text{Rayleigh : } h(v_w) = \frac{2}{c^2} \cdot v_w \cdot e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^2}$$



Σχήμα 1.1 : Μορφή της κατανομής Weibull για διάφορες τιμές της παραμέτρου μορφής k και της παραμέτρου κλίμακας c (δεξιά εικόνα : Rayleigh) [2,3,4].

Όσον αφορά στην κατανομή Rayleigh προκύπτει εύκολα από μαθηματικούς υπολογισμούς η σχέση που συνδέει την παράμετρο c με την μέση ταχύτητα ανέμου V_{mean} και την ταχύτητα μέγιστης συχνότητας V_{mode} . Η μέση ταχύτητα ανέμου δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{V} = \int_0^{+\infty} v \cdot f(v) dv \rightarrow \bar{V} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

Όπου για $k=2$, δίνει :

$$\bar{V} \approx 0,89 \cdot c$$

Επίσης, ισχύει :

$$V_{mode} = \frac{c}{\sqrt{2}}$$

Άρα,

$$V_{mode} = 0,707 \cdot c \approx 0,8 \cdot \bar{V}$$

1.1.3 Ισχύς κι ετήσια ενεργειακή παραγωγή ανεμογεννητριών

Είναι θεμιτή η μέτρηση του ανέμου και μετά την εγκατάσταση μίας ανεμογεννήτριας, αφού με αυτόν τον τρόπο γίνεται ο καλύτερος έλεγχος της απόδοσης της σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία. Εκτιμάται η πραγματική επιρροή που μπορεί να έχουν τα πολλά εμπόδια μίας έκτασης (complex terrain), σε σύγκριση με τα θεωρητικά δεδομένα των διάφορων προσομοιώσεων και σημαντικότερο υπολογίζεται η πραγματική ενεργειακή παραγωγή κι άρα η ενεργειακή αποδοτικότητα μίας τέτοιας επένδυσης σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Για τους υπολογισμούς αυτούς είναι αναγκαία η παρατήρηση της παραγομένης ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα του υπάρχοντος ανέμου. Η σχέση αυτή απεικονίζεται γραφικά στην γνωστή καμπύλη ισχύος μίας Α/Γ.

Η καμπύλη ισχύος μίας Α/Γ αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο της και ουσιαστικά την χαρακτηρίζει, ενώ είναι το βέλτιστο κριτήριο για την σύγκριση μεταξύ διαφορετικών Α/Γ. Επίσης, είναι το στοιχείο αυτό που κρίνει την καταλληλότητα μίας Α/Γ συγκεκριμένης τεχνολογίας για μία συγκεκριμένη τοποθεσία, αφού διαφορετικές κατανομές ανέμου, προκαλούν διαφορετικές συμπεριφορές από τις Α/Γ κι άρα διαφορετική παραγωγή ενέργειας. Συνεπώς, η καμπύλη ισχύος βασίζεται σε διάφορα κριτήρια. Ανάλογα με την τεχνολογία της Α/Γ, βασίζεται στην αεροδυναμική της ποιότητα και στις μεμονωμένες αποδοτικότητες του μηχανικού και του ηλεκτρικού μέρους της κι ανάλογα με την τοποθεσία που βρίσκεται, εξαρτάται και βασίζεται στις επικρατούσες συνθήκες ανέμου και στα χαρακτηριστικά του εδάφους (μήκος τραχύτητας κι διάφορα εμπόδια) [5].

Η αεροδυναμική ποιότητα του δρομέα παρουσιάζεται μέσω του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p κι εξαρτάται ουσιαστικά από τον αεροδυναμικό σχεδιασμό των πτερυγίων, μέσω των οποίων γίνεται ουσιαστικά η απορρόφηση της αιολικής ισχύος κι εμφανίζει απώλειες λόγω [2]:

- της αναπόφευκτης καθυστέρησης λόγω του προσανατολισμού (yaw) του δρομέα
- της επιδείνωσης της ποιότητας της επιφάνειας των πτερυγίων

- του φαινομένου της σκίασης του πύργου (tower shadow) (2-3%)

Ο αεροδυναμικός συντελεστής c_p μπορεί να πάρει μέγιστη τιμή $C_{p_{\max}} = 0,592$, το οποίο αποτελεί το γνωστό όριο του Betz.

Η ενέργεια που αφαιρείται από τον άνεμο λόγω της φτερωτής είναι :

$$E_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a \cdot (v_1^2 - v_3^2)$$

όπου V_a ο όγκος του αέρα.

Η αντίστοιχη αεροδυναμική ισχύς είναι :

$$P_w = \frac{dE_w}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_3^2) \cdot \frac{dV_{a2}}{dt}$$

Όπου $\frac{dV_{a2}}{dt} = A_R \cdot v_2$, η παροχή του αέρα που περνάει από τη φτερωτή (όγκος ανά δευτερόλεπτο), A_R η διατομή της φτερωτής και v_2 η ταχύτητα του ανέμου στο δρομέα. Η ολική (αρχική) ισχύς του διερχόμενου αέρα είναι :

$$P_o = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 \cdot \frac{dV_{a1}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_R \cdot v_1^3$$

Συνεπώς, ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος ορίζεται ως το πηλίκο της απορροφημένης ισχύος προς την αρχική διερχόμενη ισχύ :

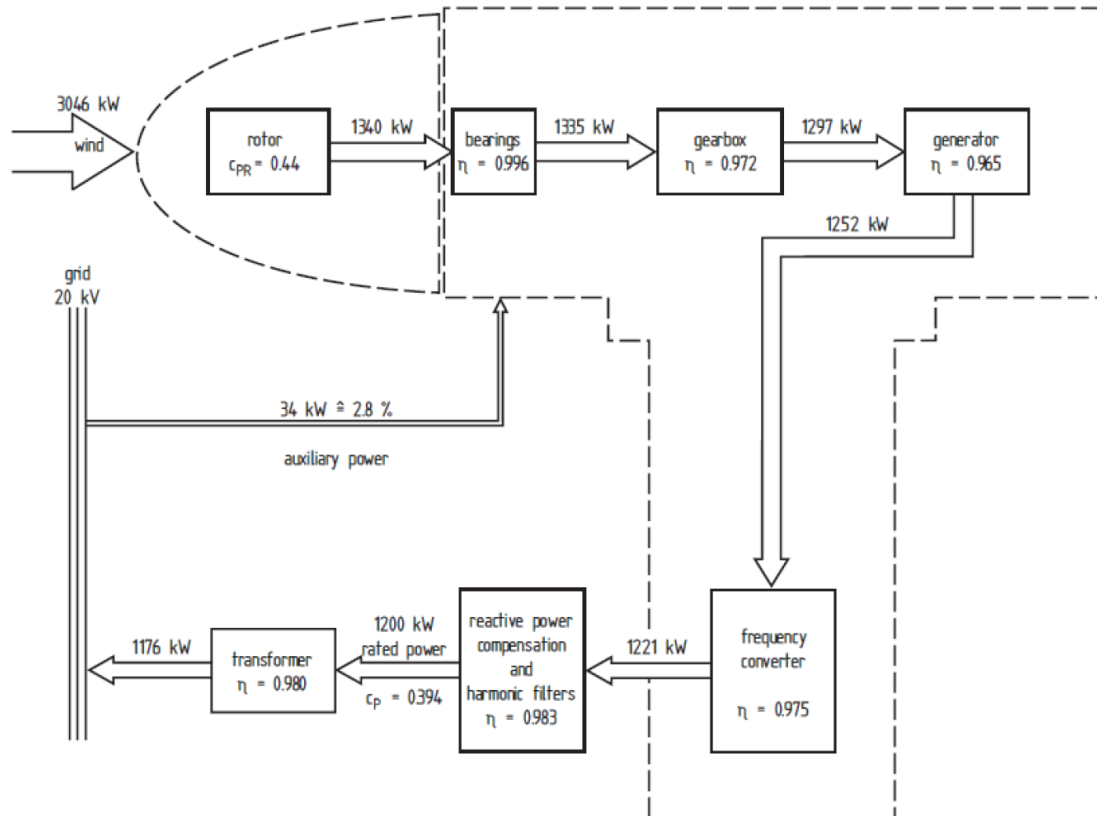
$$c_p \triangleq \frac{P_w}{P_o} = \frac{v_2}{v_1} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right]$$

Όσον αφορά στο μηχανικό - ηλεκτρικό κομμάτι μίας Α/Γ υπάρχουν απώλειες λόγω

[2,3,4]:

- της τριβής στον άξονα του δρομέα
- της αποτελεσματικότητας του κιβωτίου ταχυτήτων (εάν υπάρχει)
- της αποδοτικότητας της ηλεκτρικής γεννήτριας και του αντιστροφέα που συνδέεται
- της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο (για διασυνδεδεμένα συστήματα) ή στις μπαταρίες (για αυτόνομα συστήματα)

- της ανάγκης τροφοδότησης βοηθητικών λειτουργιών (εσωτερική κατανάλωση) και οργάνων μέτρησης που ενδεχομένως να υπάρχουν



Σχήμα 1.2: Ενδεικτικό σχεδιάγραμμα αποδόσεων κι απωλειών του μηχανικού και ηλεκτρικού μέρους μίας Α/Γ [2,3]

Από την αεροδυναμική ποιότητα των πτερυγίων, προκύπτει ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος (στο δρομέα) C_p , όπως είδαμε παραπάνω στο σχήμα 1.2 και ο οποίος μέσω της συνολικής απόδοσης η των μηχανικών κι ηλεκτρικών μερών της Α/Γ δίνει την ηλεκτρική ισχύ εξόδου μίας Α/Γ.

$$P_{el} = n \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot c_p \cdot v_w^3$$

Όπου,

- P_{el} η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (Watt)
- n η συνολική απόδοση της γεννήτριας
- ρ η πυκνότητα του ανέμου (για το επίπεδο της θάλασσας (MSL) $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$)

- R η ακτίνα πτερυγίου της Α/Γ (m)
- C_p ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος
- U_w η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Τα χαρακτηριστικά σημεία μίας καμπύλης ισχύος που την καθορίζουν και διακρίνονται εύκολα σε ένα διάγραμμα $P(U_w) - U_w$ βρίσκονται σε τρεις χαρακτηριστικές, για κάθε Α/Γ, ταχύτητες ανέμου, οι οποίες είναι:

- η ταχύτητα ένταξης V_{cut-in} , η οποία αποτελεί την ταχύτητα κατά την οποία μία Α/Γ αρχίζει να λειτουργεί και να παράγει ισχύ,
- η ονομαστική ταχύτητα V_{nom} , η οποία αποτελεί την ταχύτητα κατά την οποία η Α/Γ ξεκινάει να λειτουργεί στα ονομαστικά της μεγέθη και να παράγει την ονομαστική της ισχύ,
- η ταχύτητα αποκοπής $V_{cut-out}$, η οποία αποτελεί την ταχύτητα κατά την οποία η Α/Γ σταματάει να λειτουργεί για λόγους ασφαλείας και για την αποφυγή μεγάλης καταπόνησης των υδραυλικών της κομματιών και κυρίως των πτερυγίων. Η ανάπτυξη μεγάλων ταχυτήτων στο δρομέα μπορεί να γίνει ανεξέλεγκτη, με κίνδυνο καταστροφής της γεννήτριας, εφόσον είναι δυνατόν να παραχθούν μεγάλα ρεύματα σε σχέση με τα μέγιστα της γεννήτριας, αλλά και κίνδυνο αποκόλλησης της φτερωτής κι άλλων μηχανικών κομματιών της με οδυνηρές συνέπειες για ότι βρίσκεται σε ακτίνα πολλών μέτρων (αναλόγως της διαμέτρου της έλικας και του ύψους ανύψωσης του δρομέα). Για το λόγο αυτό φρενάρεται μέσω συστημάτων πέδησης ή μέσω της απομάκρυνσης των πτερυγίων από την κατεύθυνση του πνέοντος ανέμου.

Κατά την περίοδο των μετρήσεων των δεδομένων του ανέμου και πριν την εγκατάσταση μίας Α/Γ, είναι δυνατό να υπολογιστεί η αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή, δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί θεωρητικά για την κατανομή ανέμου μίας περιοχής και για μία συγκεκριμένη καμπύλη ισχύος Α/Γ.

Επιπροσθέτως, και με μεγαλύτερη ακρίβεια, αυτός ο υπολογισμός μπορεί να γίνει και μετά την εγκατάσταση μίας Α/Γ και την παράλληλη μέτρηση της πραγματικής της καμπύλης ισχύος. Αναφέρεται ο όρος πραγματική καμπύλη ισχύος, αφού συχνά οι κατασκευαστικές καμπύλες ισχύος που συνοδεύουν μία Α/Γ είναι ιδανικότερες κι εξιδανικευμένες σε σχέση με την πραγματική συμπεριφορά της. Συνήθως, αυτός ο υπολογισμός γίνεται για περίοδο ενός έτους και για αυτό έχει καθιερωθεί ο όρος ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή (Ετήσια ΑΕΠ) και δίνεται συνήθως από τη σχέση:

$$E = \frac{8760}{100} \cdot \sum_{V_{cut-in}}^{V_{cut-out}} Pel(v_w) \cdot H(v_w)$$

Όπου,

- E η ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή (kWh)
- h=8760 οι ώρες ενός έτους
- Pel η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της Α/Γ (kW)
- H η διακριτή και συνεχής κατανομή του ανέμου σε ποσοστά % (όταν δεν είναι γνωστά αρκετά στοιχεία, λαμβάνεται ως Rayleigh)

Πέραν της ετήσιας ΑΕΠ, υπάρχουν κι άλλα σημαντικά μεγέθη που παρουσιάζουν την απόδοση μίας Α/Γ ή ενός αιολικού πάρκου. Αρχικά, υπάρχει ο συντελεστής χρησιμοποίησης (capacity factor) που ουσιαστικά δείχνει το ποσοστό σε περίοδο ενός έτους που μία Α/Γ ή ένα Α/Π παράγει την ονομαστική ισχύ. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης έχει ιδιαίτερη σημασία, αφού σχετίζεται άμεσα με τη βιωσιμότητα μίας ενεργειακής επένδυσης. Συνήθεις τιμές του είναι 25 - 35 %, δίχως να αποκλείονται χαμηλότερες τιμές [3]. Είναι προφανές, ότι εάν προκύπτουν τιμές χαμηλότερες αυτού του διαστήματος, τότε η επένδυση αποτυγχάνει και δύσκολα αποσβήνεται το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης. Επιπλέον, οι μεγαλύτερες τιμές προκύπτουν, όπως γίνεται αντιληπτό για περιοχές με μεγάλη ετήσια ταχύτητα ανέμου, αλλά εξαρτάται επίσης από τη μορφή της καμπύλης ισχύος της Α/Γ κι από τη διαθεσιμότητα της.

$$CF = \frac{E}{8760 \cdot P_n} = \frac{\bar{P}}{P_n}$$

Όπου,

- CF ο συντελεστής χρησιμοποίησης
- E η ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή (kWh)
- P_n η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς μίας Α/Γ ή ενός Α/Π (kW)
- P η μέση τιμή της παραγόμενης ισχύος (kW)

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό μέγεθος είναι οι Συμβατικές Ανηγμένες Ώρες Λειτουργίας (ΣΑΩΛ). Αποτελούν χαρακτηριστικό ενός συστήματος κι ορίζονται ως το πηλίκο της μέγιστης δυνατής ετήσιας παραγωγής του προς την ονομαστική του ισχύ. Ουσιαστικά

εκφράζουν τον ισοδύναμο χρόνο λειτουργίας του πάρκου υπό πλήρη ισχύ, ώστε να παράγει την μέγιστη δυνατή παραγωγή. Συνήθως, χρησιμοποιείται παράλληλα με τους συντελεστές διαθεσιμότητας και τους περιορισμούς διείσδυσης ενός συστήματος (μεμονωμένη Α/Γ ή Α/Π), όπως συμβαίνει άλλωστε και με όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη.

$$\Sigma A\Omega\Lambda = \frac{E}{P_n} = 8760 \cdot CF$$

Συνοψίζοντας, δίνονται επιγραμματικά τα στοιχεία που επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στην καμπύλη ισχύος και στην αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή :

- Αιολικό δυναμικό τοποθεσίας (μέση ταχύτητα ανέμου, στατιστική κατανομή του ανέμου, wind shear)
- Πυκνότητα αέρα (διαφορά ανάλογα με το υψόμετρο και τη θερμοκρασία), επισύρονται διορθώσεις στην κατασκευαστική καμπύλη ισχύος σύμφωνα με την επικρατούσα πυκνότητα ανέμου
- Τύρβη και τραχύτητα εδάφους (χαμηλότερη απόδοση της Α/Γ και καταπόνηση των αντοχών της)
- Διάμετρος φτερωτής (αύξηση της ισχύος με το τετράγωνο της καλυπτόμενης περιοχής $\pi \cdot R^2$ (swept area) του δρομέα)
- Αεροδυναμικός συντελεστής C_p (εξαρτάται από την αεροδυναμική κι από τον αριθμό των πτερυγίων)
- Ταχύτητα περιστροφής δρομέα (μεταβλητών ή σταθερών στροφών)
- Σύστημα ελέγχου Α/Γ (pitch ή stall control)
- Εγκατεστημένη ισχύς της γεννήτριας
- Ύψος πλήμνης δρομέα (εξαρτάται από το wind shear και την τάξη τραχύτητας που παρουσιάζει μία περιοχή)
- Λειτουργικό φάσμα ταχυτήτων (όσο μεγαλύτερο, τόσο καλύτερο)

1.1.4 Η Λειτουργία των ανεμογεννητριών

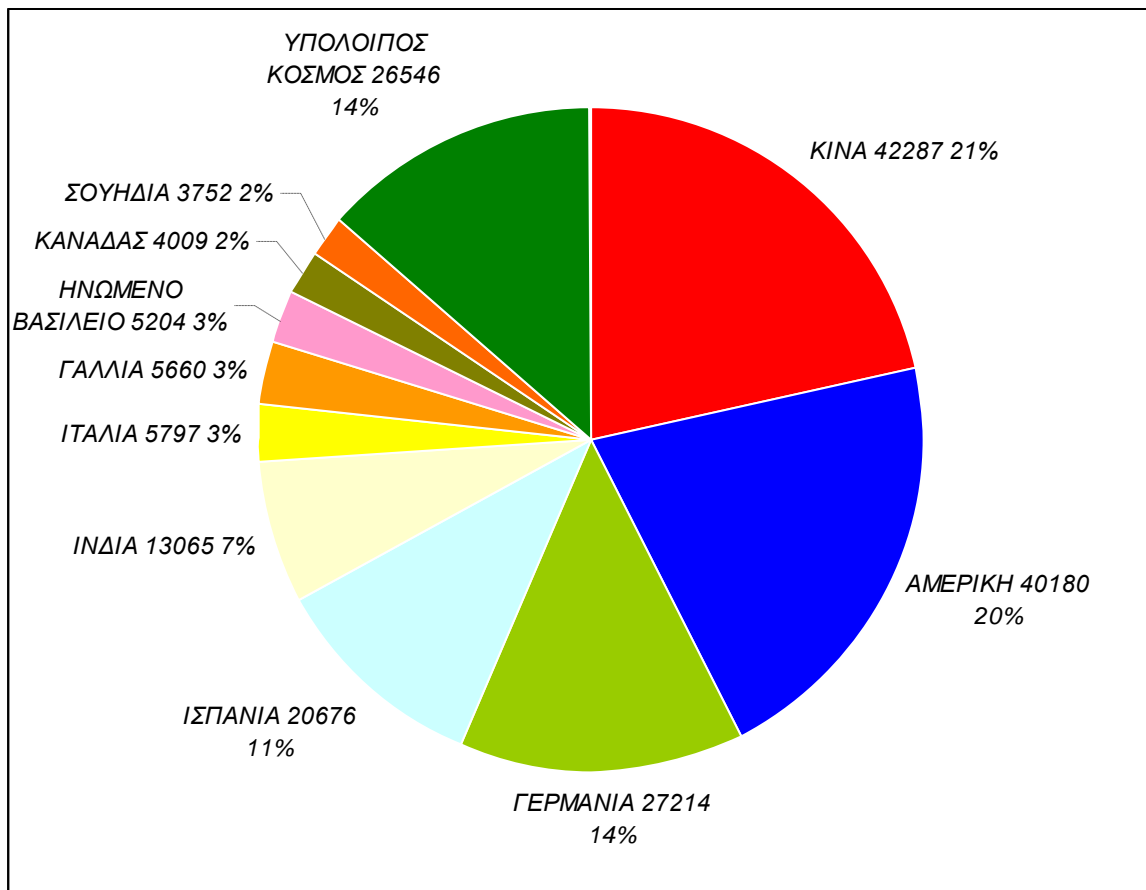
Στη γενική τους μορφή οι ανεμοκινητήρες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε άλλες πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας, όπως θερμική, ηλεκτρική και φυσικά μηχανική.

Ο άνεμος όμως, είναι μια ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη σε όλες της τις παραμέτρους πηγή ενέργειας [2,3,4,5]. Η δέσμευση και χρησιμοποίηση της ενέργειας αυτής, είναι ως εκ τούτου μια πολύ δαπανηρή διαδικασία. Η σχεδίαση και η κατασκευή μιας αποδοτικής και παράλληλα οικονομικής ανεμομηχανής δεν είναι εύκολη δουλειά. Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες ανεμομηχανές (που η επιστημονική ονομασία τους είναι «συστήματα μετατροπής» της αιολικής ενέργειας, ή πιο απλά «ανεμοκινητήρες», ή όταν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια «ανεμογεννήτριες»), χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα επιτεύγματα στην τεχνολογία των υλικών, στη μηχανολογία, στην ηλεκτρονική και στην αεροδυναμική, έχουν ανεβάσει σε υψηλά επίπεδα την απόδοσή τους, μειώνοντας συνεχώς το κόστος της παραγόμενης ενέργειας.

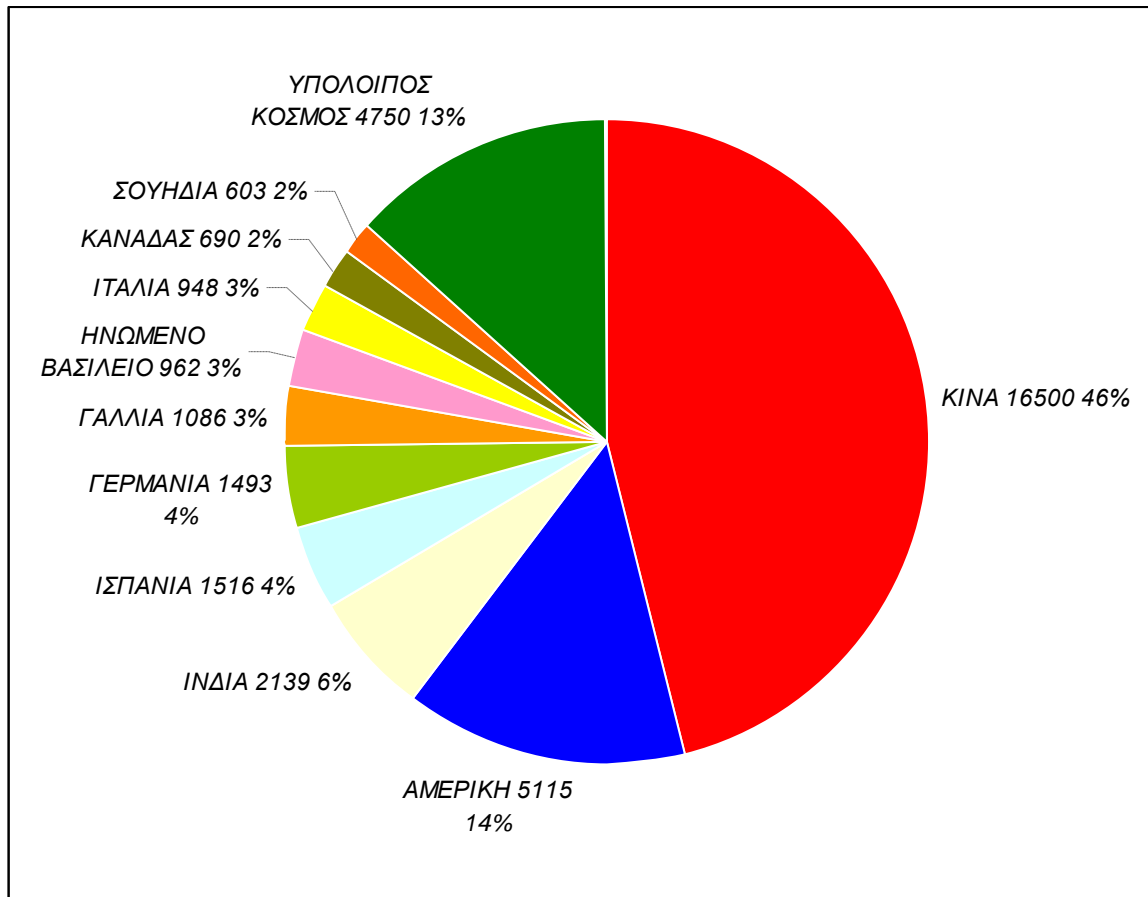
Η μελέτη ενός συστήματος ανεμογεννήτριας, περιλαμβάνει την αεροδυναμική σχεδίαση και τη μελέτη εφαρμογής, στην οποία περιλαμβάνονται η μηχανολογική μελέτη και σχεδίαση, η μελέτη του ηλεκτρολογικού συστήματος και τα ηλεκτρολογικά συστήματα ελέγχου και ασφαλείας. Η αεροδυναμική σχεδίαση αποτελεί προϋπόθεση για τον σχεδιασμό ενός συστήματος δέσμευσης και μετατροπής της ενέργειας του ανέμου, ενώ η ηλεκτρομηχανολογική μελέτη είναι το αμέσως επόμενο και αναγκαίο στάδιο για την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, κατά τον αποδοτικότερο και πλέον συμφέροντα τεχνοοικονομικό τρόπο.

1.1.5 Παγκόσμιας εγκατεστημένη ισχύς

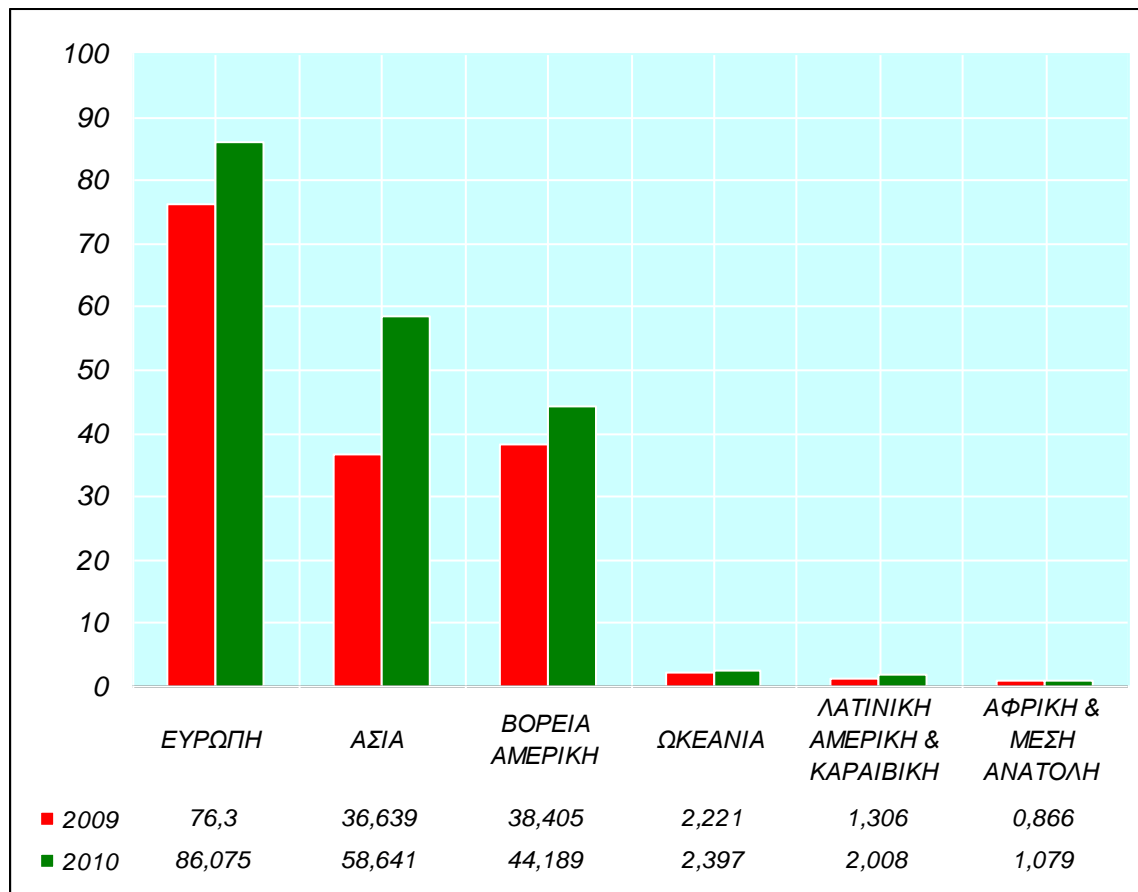
Με την υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο και την διακήρυξη, από την Ευρωπαϊκή Ένωση, της Πράσινης Βίβλου και της Λευκής Βίβλου και άλλων σημαντικών οικολογικών κινήσεων, παρατηρείται μια συνεχόμενη αύξηση της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος από πάρκα που εκμεταλλεύονται την ενέργεια του ανέμου, τα γνωστά αιολικά πάρκα. Στοιχεία σχετικά με την παγκόσμια ετήσια εγκατεστημένη ισχύ αιολικών πάρκων δίνονται στο σχήμα 1.3 [22]. Στο σχήμα 1.4 [22] φαίνονται οι χώρες με τις μεγαλύτερες νέες εγκαταστάσεις αιολικών συστημάτων για το έτος 2010 (MW) και στο σχήμα 1.5 [22] φαίνονται οι μεγαλύτερες εγκαταστάσεις αιολικών συστημάτων ανά ήπειρο σε σχέση με το 2009 και 2010 (GW) .



Σχήμα 1.3: Ετήσια εγκατεστημένη ισχύς από αιολικά συστήματα στις δέκα πρώτες χώρες σε σχέση με την παγκόσμια παραγωγή για τα έτος 2010(MW) [22]



Σχήμα 1.4 : Οι 10 χώρες με την μεγαλύτερη νέα εγκατάσταση αιολικών συστημάτων σε σχέση με την νέα παγκόσμια εγκατάσταση για το 2010(MW) [22]

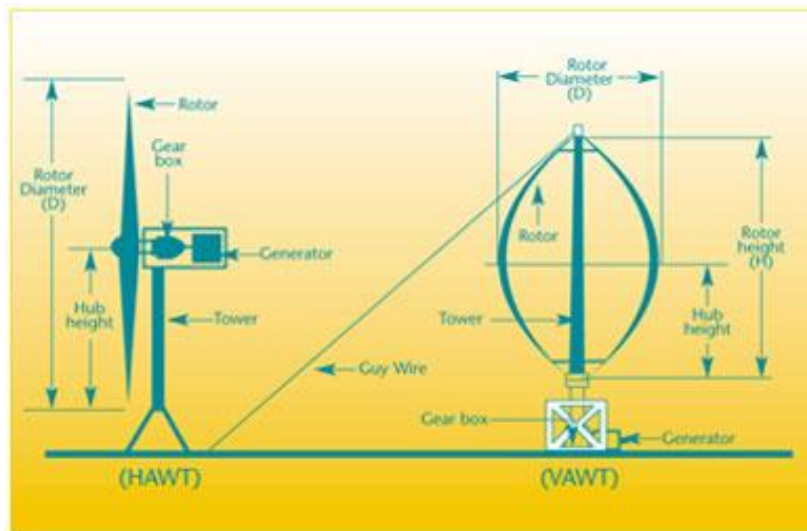


Σχήμα 1.5 : Οι μεγαλύτερες εγκαταστάσεις αιολικών συστημάτων ανά ήπειρο σε σχέση με το 2009 και 2010 (GW) [22]

1.2 Τύποι ανεμογεννητριών και τα βασικά τους μέρη

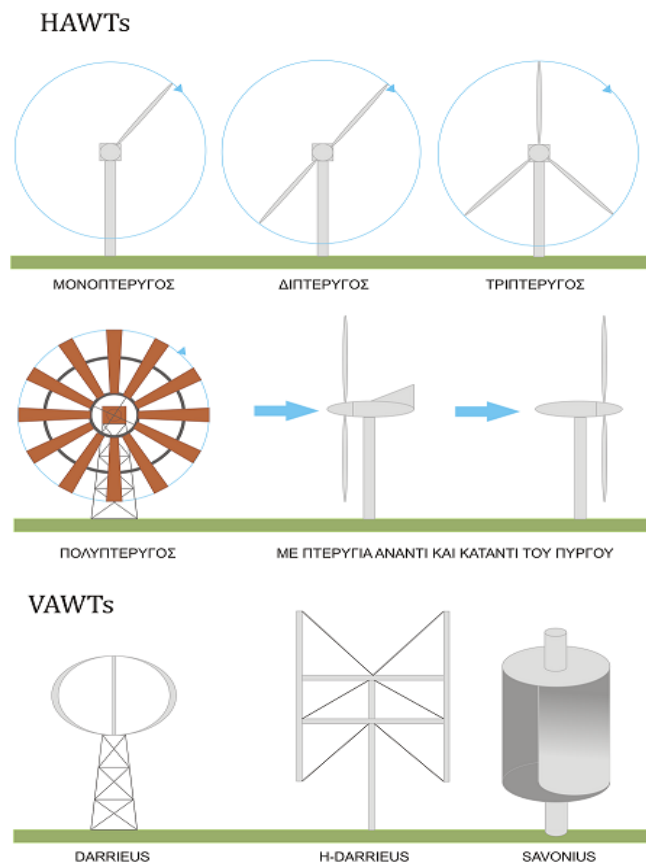
Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού γίνεται με τις ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και κατατάσσονται σε δυο βασικές κατηγορίες όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6 [2,3,4,5]:

- Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (Horizontal Axis Wind Turbines -HAWTs)
- Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (Vertical Axis Wind Turbines -VAWTs)



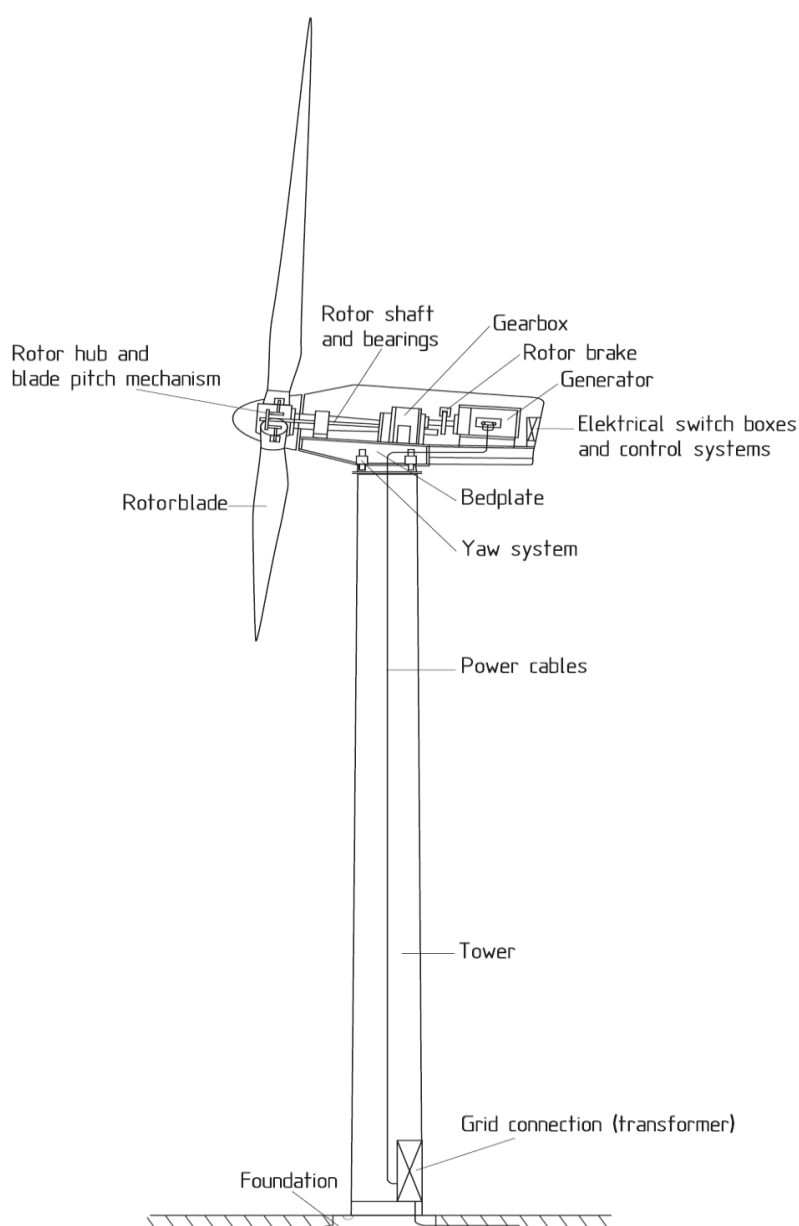
Σχήμα 1.6 : Οι δυο βασικές κατηγορίες ανεμογεννητριών [2]

Στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζώντιου άξονα δυο ή τριών πτερυγίων [2,3,4,5]. Η ισχύς τους μπορεί να ξεπερνά τα 500 kW και μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στο σχήμα 1.7 παρουσιάζονται οι τύποι ανεμογεννητριών για οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 1.7 : Κατηγορίες ανεμογεννητριών τύπου HAWT και τύπου VAWT [2]

Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι σχετικά απλή. Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι συνδεδεμένα με τον δρομέα. Ο δρομέας περνάει από το κιβώτιο μετάδοσης κίνησης (κιβώτιο ταχυτήτων) όπου αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα ο οποίος κινεί μια ηλεκτρογεννήτρια. Αν η ένταση του ανέμου ενισχυθεί υπερβολικά, η ανεμογεννήτρια έχει φρένο που περιορίζει την υπερβολική αύξηση περιστροφής των πτερυγίων. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η φθορά της και αποτρέπεται η καταστροφή της. Μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα παρουσιάζεται στο σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας τύπου HAWT [2]

Όπως, εμφανίζονται στη βιβλιογραφία [2,3,4,5], τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα είναι:

1. Ο δρομέας (rotor), στον οποίο βρίσκονται τοποθετημένα δύο ή τρία πτερύγια (blades). Τα πτερύγια προσδένονται πάνω στη πλήμνη (hub) και είναι είτε σταθερά (fixed) είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα (pitch).
2. Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο ταχυτήτων (gear box), το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας.
3. Η ηλεκτρογεννήτρια (electric generator), σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 πόλους, η οποία συνδέεται με την έξοδο του συστήματος μετάδοσης της κίνησης μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του περιστρεφόμενου άξονα σε ηλεκτρική. Βρίσκεται μέσα στον οικίσκο της ανεμογεννήτριας.
4. Το σύστημα πέδησης ή φρένο (brake), το οποίο είναι ένα δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.
5. Το σύστημα προσανατολισμού (yaw system), ελέγχει συνεχώς και περιστρέφει τον άξονα περιστροφής του δρομέα ώστε να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
6. Ο πύργος (tower), ο οποίος στηρίζει όλη την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση που βρίσκεται στον οικίσκο. Ο πύργος είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα.
7. Ο ηλεκτρονικός πίνακας και ο πίνακας ελέγχου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.

Αν και η βιομηχανία κατασκευής ανεμογεννητριών είναι ένας σχετικά νέος βιομηχανικός κλάδος, αναπτύχθηκε πολύ γρήγορα και εξελίχθηκε, με αποτέλεσμα σήμερα να έχει φτάσει σε ένα πολύ υψηλό επίπεδο ωριμότητας [2,3,4,5]. Το γεγονός αυτό κάνει τον τομέα κατασκευής και εξέλιξης των ανεμογεννητριών ανοιχτό σε καινοτομίες και εύκολα προσαρμόσιμο στις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες [2,3,4,5]. Μια μεγάλη ποικιλία παραμέτρων επηρεάζει τη λειτουργία και την αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών, όπως

ο προσανατολισμός, το ύψος του πύργου, η επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων, το σύστημα κίνησης του δρομέα, ο σχεδιασμός των πτερυγίων, κ.α. Χάρη στις σύγχρονες τεχνολογίες έχουν επιτευχθεί σημαντικές εξελίξεις στο σχεδιασμό των ανεμογεννητριών. Σύγχρονες τεχνικές έρευνας και ανάπτυξης παράγουν ανθεκτικότερα, ελαφρύτερα και περισσότερο αποτελεσματικά πτερύγια για τις ανεμογεννήτριες. Τα αιολικά πάρκα ελέγχονται από Η/Υ και δίνουν κατάλληλες τιμές ισχύος. Όλες αυτές οι εξελίξεις στοχεύουν στο να βελτιστοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η απόδοση των ανεμογεννητριών.

1.2.1 Ασύγχρονες γεννήτριες

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες στον κόσμο χρησιμοποιούν τριφασικές ασύγχρονες γεννήτριες με κλωβό. Αυτός ο τύπος γεννήτριας παρόλο που δεν χρησιμοποιείται ευρέως, είναι πολύ διαδεδομένος εκτός από την βιομηχανία των ανεμογεννητριών και στα μικρά υδροηλεκτρικά. Το περίεργο με αυτού του είδους τη γεννήτρια είναι ότι αρχικά είχε σχεδιαστεί ως ηλεκτρικός κινητήρας. Για την ακρίβεια το ένα τρίτο της παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης χρησιμοποιείται για τη λειτουργία ασύγχρονων κινητήρων μέσα σε εργοστάσια, αντλίες, ανελκυστήρες και άλλες εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική [2,3,4,5]. Ένας λόγος επιλογής του κινητήρα αυτού είναι η αξιοπιστία του και ότι είναι σχετικά φθηνός. Η γεννήτρια έχει ακόμα κάποια χαρακτηριστικά που είναι χρήσιμα για τις ανεμογεννήτριες. Έχει αυξημένη δυνατότητα ολίσθησης και μια ικανότητα υπερφόρτωσης.

Η ασύγχρονη γεννήτρια με κλωβό έχει ένα δρομέα ο οποίος τη διαφοροποιεί από τη σύγχρονη γεννήτρια. Ο δρομέας αποτελείται από μεταλλικές ράβδους (συνήθως αλουμινίου) που ενώνονται ηλεκτρικά με αλουμινένιους δακτυλίους. Ένα ισχυρό πλεονέκτημα αυτού του τύπου δρομέα είναι ότι προσαρμόζεται αυτόματα στα ζεύγη πόλων του στάτη.

Αν ο δρομέας περιστρέφεται ακριβώς στην σύγχρονη ταχύτητα τότε το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με ακριβώς την ίδια ταχύτητα, δεν υπάρχουν φαινόμενα επαγωγής και δεν αλληλεπιδρά με το στάτη. Αν η ταχύτητα υπερβεί την σύγχρονη ταχύτητα τότε ο δρομέας περιστρέφεται γρηγορότερα από το μαγνητικό πεδίο με συνέπεια να παρέχεται στο δίκτυο ηλεκτρικό ρεύμα [2,3,4,5].

Η ταχύτητα της ασύγχρονης γεννήτριας μεταβάλλεται με την εφαρμοζόμενη περιστροφική δύναμη. Στην πράξη, η διαφορά μεταξύ της περιστροφικής ταχύτητας στη μέγιστη ισχύ και στη χαμηλή είναι πολύ μικρή, της τάξης του 1 %. Η διαφορά αυτή σε ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας καλείται ολίσθηση της γεννήτριας. Γι' αυτό μια γεννήτρια με δυο

ζεύγη πόλων θα περιστρέφεται αργά στις 1500 rpm όταν είναι συνδεδεμένη με δίκτυο συχνότητας 50 Hz.

Αν η γεννήτρια παράγει τη μέγιστη ισχύ της θα λειτουργεί στις 1515 rpm. Η παρακάτω σχέση είναι ο ορισμός της ολίσθησης μιας ασύγχρονης μηχανής. Το μέγεθος s εκφράζει την ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από την σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι η γεννήτρια θα αυξάνει ή θα μειώνει ελαφρώς τις στροφές όταν η περιστροφική δύναμη μεταβάλλεται. Αυτό έχει ως συνέπεια μικρότερη καταπόνηση στο κιβώτιο ταχυτήτων και αυτός είναι ένας από τους σοβαρότερους λόγους για τη χρήση ασύγχρονης γεννήτριας παρά σύγχρονης σε ανεμογεννήτριες που είναι άμεσα συνδεδεμένες με το δίκτυο.

Στην ασύγχρονη γεννήτρια, ο στάτης πρέπει πριν λειτουργήσει να μαγνητιστεί από το δίκτυο. Υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργήσει η ασύγχρονη γεννήτρια σε αυτόνομο δίκτυο, όμως, πρέπει να παρέχονται πυκνωτές που να δίνουν το απαραίτητο ρεύμα μαγνήτισης. Επίσης είναι απαραίτητο ο δρομέας να έχει έναν εναπομείναν μαγνητισμό όταν εκκινήσει η γεννήτρια. Σε άλλη περίπτωση θα χρειαστεί μπαταρία και ηλεκτρονικά ισχύος, ή μια μικρή ντιζελογεννήτρια για να εκκινήσει το σύστημα. Μια ασύγχρονη μηχανή με δακτυλιοφόρο δρομέα (wound rotor) έχει ένα στάτη παρόμοιο με την ασύγχρονη μηχανή με κλωβό αλλά ένα δρομέα ο οποίος φέρει αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τύλιγμα όμοιο με το τύλιγμα του στάτη. Το τύλιγμα του δρομέα συνδέεται ηλεκτρικά με το περιβάλλον (π.χ. αντιστάσεις) διαμέσου “slip rings” (δακτυλίους) και “brushes” (ψήκτρες). Έτσι γίνεται δυνατός ο εξωτερικός έλεγχος των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του ρότορα και με τον τρόπο αυτό επηρεάζεται η τάση του.

Στο δρομέα σχεδόν πάντα οι τρεις φάσεις συνδέονται σε αστέρα και τα τρία άκρα τους συνδέονται με τους τρεις δακτυλίους. Οι δακτύλιοι μέσω των ψηκτρών συνδέονται με ένα εξωτερικό κύκλωμα, π.χ. με τρεις ωμικές αντιστάσεις συνδεδεμένες σε αστέρα, ή είναι βραχυκυκλωμένοι. Εντούτοις δε δίνεται ισχύς στους δακτυλίους. Ο μοναδικός τους στόχος είναι να επιτρέψουν στην αντίσταση να τοποθετηθεί σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα κατά την εκκίνηση. Τέτοια διάταξη ομαλής εκκίνησης υπάρχει στις γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (optislip) [2,3,4,5]. Ο άλλος τύπος γεννήτριας με δακτυλιοφόρο δρομέα, ο διπλά τροφοδοτούμενος, παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο. Τοποθετώντας την αντίσταση σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα όχι μόνο μειώνεται το ρεύμα εκκίνησης, αλλά αυξάνεται και η ροπή εκκίνησης. Η ολίσθηση του δρομέα αλλάζει τροποποιώντας τη συνολική αντίσταση του ρότορα μέσω ενός μετατροπέα που συνδέεται στον άξονα του ρότορα. Ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται

κατευθείαν στο δίκτυο. Αυτή η αντίσταση αποκόβεται όταν η μηχανή έχει ξεκινήσει, ώστε να μοιάζει ο δρομέας ηλεκτρικά με το δρομέα σε μηχανή κλωβού .

Το βασικό πλεονέκτημα είναι η ελαχιστοποίηση του φορτίου στις ανεμογεννήτριες κατά τη διάρκεια των ριπών του ανέμου. Μέσω αυτού του συστήματος η γεννήτρια έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει την ολίσθησή της (σε ένα μικρό εύρος τιμών) και να οδηγηθεί στη βέλτιστη ολίσθηση, εξασφαλίζοντας μικρότερες ταλαντώσεις στη ροπή εισόδου και στην ισχύ εξόδου.

Τα κύρια μειονεκτήματα της γεννήτριας με δακτυλιοφόρο δρομέα είναι ότι είναι πιο ακριβή και όχι τόσο στιβαρή όσο η γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού, το εύρος στο οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα περιορίζεται στο 0 – 10% καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του στάτη, ο έλεγχος της πραγματικής και άεργου ισχύος που επιτυγχάνεται δεν είναι αρκετά ικανοποιητικός, ένα ποσοστό ισχύος καταναλώνεται στη μεταβλητή αντίσταση του δρομέα.

1.2.2 Σύγχρονες γεννήτριες

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι πιο πολύπλοκη και ακριβότερη σε σχέση με μια αντίστοιχη επαγωγική. Εμφανίζει όμως ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της επαγωγικής, δεν απαιτεί άεργο ρεύμα μαγνήτισης. Σε γενικές γραμμές η λειτουργία των σύγχρονων μηχανών έχει ως εξής.

Όλες οι τριφασικές γεννήτριες χρησιμοποιούν ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται από τρεις ηλεκτρομαγνήτες. Καθένας από τους τρεις ηλεκτρομαγνήτες είναι συνδεδεμένος με μια φάση του ηλεκτρικού δικτύου. Καθένας από τους ηλεκτρομαγνήτες μετατρέπεται διαδοχικά από Νότιος σε Βόρειος πόλος και αντίστροφα. Η μεταβολή αυτή του μαγνητισμού αντικατοπτρίζει ακριβώς τη μεταβολή της τάσης της κάθε φάσης. Όταν η μια φάση βρίσκεται στο μέγιστο, οι άλλες δυο διαρρέονται από ρεύμα αντίθετης διεύθυνσης στη μισή τάση. Αφού οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι ανά 120 μοίρες, το μαγνητικό πεδίο θα κάνει μια πλήρη περιστροφή ανά κύκλο.

Η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια αν επιβληθεί στον δρομέα δύναμη για να τον εξαναγκάσει στην κυκλική κίνηση, αντί να τον περιστρέφει το ρεύμα του δικτύου. Πρέπει συνεπώς να υπάρχει ένας ισχυρός μαγνήτης για να παράγεται αρκετό ρεύμα. Όσο περισσότερη δύναμη εφαρμόζεται στο δρομέα τόσο περισσότερο ρεύμα παράγεται, η γεννήτρια όμως συνεχίζει να λειτουργεί στην ίδια ταχύτητα η οποία προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου και τους πόλους της μηχανής. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να

αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το δίκτυο και να προκύψει ένα ανεξάρτητο τριφασικό δίκτυο. Εάν όμως αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το δίκτυο, θα πρέπει να διατηρηθεί σταθερή περιστροφική ταχύτητα προκειμένου να παραχθεί εναλλασσόμενο ρεύμα με σταθερή συχνότητα. Επομένως, με τέτοιου είδους γεννήτρια θα πρέπει συνήθως να χρησιμοποιείται έμμεση σύνδεση με το δίκτυο.

Στην πράξη, σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες δεν χρησιμοποιούνται πολύ. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι γι' αυτό. Ένας είναι ότι οι μόνιμοι μαγνήτες τείνουν να απομαγνητιστούν όταν λειτουργούν κάτω από ισχυρά μαγνητικά πεδία όπως αυτά της γεννήτριας. Ένας άλλος είναι ότι ισχυροί μαγνήτες φτιάχνονται από σπάνια μέταλλα π.χ. Νεοδύνιο και είναι πολύ ακριβοί [2,3,4,5]. Συνήθως οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούν στον δρομέα ηλεκτρομαγνήτες που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα το οποίο παρέχεται από το δίκτυο. Αφού όμως το δίκτυο παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα, πρέπει να προηγηθεί ένα στάδιο μετατροπής του εναλλασσόμενου σε συνεχές ρεύμα.

Η ταχύτητα μιας γεννήτριας που είναι άμεσα συνδεδεμένη με το τριφασικό δίκτυο είναι σταθερή, προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, και από τα ζεύγη πόλων του στάτη. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες με σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούν γεννήτριες με δύο ή τρία ζεύγη πόλων. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται αυτές οι σχετικά υψηλής ταχύτητας γεννήτριες είναι η οικονομία σε μέγεθος και κόστος.

Η μέγιστη δύναμη την οποία μπορεί να αντέξει η γεννήτρια εξαρτάται από το μέγεθος του δρομέα. Για δεδομένη ισχύ εξόδου υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ μιας αργόστροφης, μεγάλης και άρα ακριβής γεννήτριας, ή μιας υψηλόστροφης και άρα φθηνότερης μικρότερης γεννήτριας.

1.2.3 Μέθοδοι λειτουργίας ανεμογεννητριών

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι λειτουργίας των συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η μέθοδος λειτουργίας σταθερής ταχύτητας (fixed speed) και η μέθοδος λειτουργίας μεταβλητής ταχύτητας (variable speed).

1. Σταθερής ταχύτητας ανεμογεννητριες

Είναι οι Α/Γ που έχουν πρακτικά σταθερή ταχύτητα περιστροφής ανεξαρτήτως ταχύτητας ανέμου. Αποτελούν τις πρώτες Α/Γ που άρχισαν να χρησιμοποιούνται, ενώ ακόμα και σήμερα υπάρχουν σε μεγάλο ποσοστό από τις ήδη εγκατεστημένες. Συνδυάζονται είτε με σύγχρονες γεννήτριες είτε με γεννήτριες επαγωγής. Η μεγάλη εξάπλωσή τους οφείλεται

στο κόστος τους, αφού για τη σύνδεση τους με το δίκτυο δεν απαιτούνται και δεν παρεμβάλλονται ηλεκτρονικοί μετατροπείς κι αντιστροφείς, των οποίων το κόστος μόνο αμελητέο δεν είναι.

Η απευθείας με το δίκτυο σύνδεση έχει ως αποτέλεσμα η ταχύτητα του δρομέα να είναι σταθερή και πρακτικά ίση με τη σύγχρονη.

$$N_s = \frac{120 \cdot f_s}{p} = \text{σταθερή}$$

Όπου,

- N_s η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (rpm)
- f_s η συχνότητα στο στάτη, που ισούται με τη συχνότητα του δικτύου ($f_s=50\text{Hz}$)
- p ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας (πάντα ζυγός)

Λειτουργία σταθερής ταχύτητας σημαίνει ότι ο δρομέας της ανεμογεννήτριας στρέφεται με σταθερό αριθμό στροφών ανεξάρτητα της ταχύτητας του ανέμου. Ο τρόπος σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο, είναι ο ίδιος με τον τρόπο σύνδεσης γεννητριών που τροφοδοτούνται από συμβατικές πηγές ενέργειας. Δηλαδή η σύνδεση γίνεται απευθείας, χρησιμοποιώντας ένα μετασχηματιστή προσαρμογής του επιπέδου τάσης της γεννήτριας, σε αυτό του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός ο τρόπος σύνδεσης, “επιβάλλει” στην ανεμογεννήτρια την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της. Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι είτε σύγχρονη είτε ασύγχρονη. Ειδικότερα δε, όταν χρησιμοποιούνται σύγχρονες μηχανές ως γεννήτριες, ο αριθμός στροφών παραμένει σταθερός, ενώ όταν χρησιμοποιούνται ασύγχρονες μηχανές το εύρος μεταβολών των στροφών εξαρτάται από το φορτίο και είναι περιορισμένο. Τα συστήματα σταθερών στροφών – σταθερής συχνότητας είναι συστήματα που βασίζονται στην υλοποίηση συστημάτων ελέγχου μεθόδου “stall” (απώλεια αεροδυναμικής στήριξης, εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων) [2,3,4,5], είτε συστημάτων ελέγχου μεθόδου “pitch” (έλεγχος μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων).

Οι συμβατικές ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών διαθέτουν κυρίως γεννήτριες επαγωγής τύπου βραχυκυκλωμένου κλωβού. Ο λόγος που προτιμάται η ασύγχρονη γεννήτρια είναι γιατί είναι κατασκευαστικά απλούστερη κάτι που μειώνει το κόστος και αυξάνει την αξιοπιστία της συγκρινόμενη με τη σύγχρονη γεννήτρια. Επιπλέον η γωνιακή της ταχύτητα μπορεί να μεταβάλλεται σε ένα εύρος λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Αυτή η δυνατότητα έχει ως αποτέλεσμα να εξομαλύνονται οι διακυμάνσεις της ισχύος στην

έξοδο της γεννήτριας καθώς και η καταπόνηση του μηχανικού συστήματος μεταφοράς. Το μεγάλο μειονέκτημα που παρουσιάζει είναι ότι, σε αντίθεση με την σύγχρονη γεννήτρια, απορροφά άεργο ισχύ. Για την τροφοδοσία της ασύγχρονης γεννήτριας με άεργο ισχύ, συνδέονται στους ακροδέκτες των τυλιγμάτων της κατάλληλοι πυκνωτές.

Το σύστημα σταθερών στροφών παρουσιάζει το πλεονέκτημα της εξαιρετικής απλότητας και αξιοπιστίας και των μηδενικών αναγκών συντήρησης, γεγονός που συνέβαλε στην καθιέρωσή του, σε μια εποχή όπου η αξιοπιστία ήταν το βασικότερο από τα προς επίλυση προβλήματα των ανεμογεννητριών. Ταυτόχρονα, όμως, το σχήμα αυτό χαρακτηρίζεται από μια σειρά από καθοριστικά μειονεκτήματα, τα οποία σχετίζονται αφ' ενός με την σταθερότητα των στροφών και αφ' ετέρου με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μηχανής επαγωγής. Εάν η μεταβαλλόμενη αεροδυναμική ροπή περιέχει αρμονικές συνιστώσες, που βρίσκονται κοντά στις συχνότητες συντονισμού του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της ισχύος, θα εμφανιστούν έντονες ταλαντώσεις σ' αυτό αλλά και στην ισχύ εξόδου της γεννήτριας. Συνεπώς έχουμε αυξημένη μεταβλητότητα ροπών και της ισχύος εξόδου, ταλαντώσεις του μηχανικού συστήματος.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι Α/Γ λειτουργίας σταθερών στροφών αφορούν στην εξαιρετική τους απλότητα, αξιοπιστία και στις ελάχιστες ανάγκες συντήρησης τους. Παράλληλα, όμως εμφανίζουν και κάποια μειονεκτήματα, τα σοβαρότερα εκ των οποίων είναι :

- Αδυναμία συνεχούς λειτουργίας με το μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή C_{pmax}
- Αυξημένη μεταβλητότητα ισχύος εξόδου
- Χαμηλός συντελεστής ισχύος εξόδου
- Μεταβατικά φαινόμενα εκκίνησης και ζεύξης - απόζευξης

Εξαιτίας αυτών των αδυναμιών, οι κατασκευάστριες εταιρείες ξεκίνησαν την παραγωγή Α/Γ μεταβλητών στροφών, οι οποίες δίνουν λύση σε μεγάλο βαθμό στα προαναφερθέντα προβλήματα.

2. Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας

Στη λειτουργία αυτή, για να υπάρχει η καλύτερη απόδοση της Α/Γ, απαιτείται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα να είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχουν μεγάλες μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων. Για την πραγματοποίηση αυτής της αναλογίας (στροφές δρομέα - ταχύτητα ανέμου) χρησιμοποιούνται συστήματα ηλεκτρονικών αντιστροφών (inverters) που ελέγχουν τις

στροφές του δρομέα, αποδεσμεύοντας έτσι την A/Γ από τη συχνότητα του δικτύου κι επιτρέποντας της να κυμαίνεται σε μεγάλα διαστήματα συχνοτήτων με αποτέλεσμα τη βέλτιστη λειτουργία αφού σε κάθε περίπτωση μπορεί να λειτουργεί με το μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή C_{pmax} , το οποίο επιτυγχάνεται μέσω του λόγου ταχυτήτων ακροπτερυγίου λ . Επιπροσθέτως, ο inverter επιτυγχάνει την ομαλή σύνδεση στο δίκτυο με την προσαρμογή της ισχύος εξόδου στην ονομαστική συχνότητα του δικτύου.

$$N_s = \frac{120 \cdot f_s}{p} = \text{μεταβαλλόμενη}$$

Όπου, η διαφορά της από τη σχέση είναι στην :

f_s , τη συχνότητα στο στάτη που μεταβάλλεται κι ελέγχεται από τον αντιστροφέα, ο οποίος μεταβάλλει τις στροφές της A/Γ σύμφωνα με τη σχέση:

$$N_s = \frac{60 \cdot v_w \cdot \lambda}{2\pi \cdot R}$$

Όπου,

- v_w η ταχύτητα του ανέμου
- λ ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου (tip speed ratio)
- R η ακτίνα των πτερυγίων

Στην λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας, η ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται κατά ελεγχόμενο τρόπο, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Για την σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο σταθερής συχνότητας χρησιμοποιείται μετατροπέας συχνότητας. Με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα περιστροφής αποδεσμεύεται από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου και είναι δυνατή η μεταβολή της.

Στην έξοδο της γεννήτριας συνδέεται ένας τριφασικός ανορθωτής ελεγχόμενος ή μη, που μετατρέπει τα εναλλασσόμενα ηλεκτρικά μεγέθη σε συνεχή. Η σύνδεση στο δίκτυο γίνεται μέσω ενός αντιστροφέα, ο οποίος μετατρέπει τα συνεχή ηλεκτρικά μεγέθη σε εναλλασσόμενα, συχνότητας ίδιας με αυτήν του δικτύου. Οι μετατροπείς αυτοί μπορούν να αποτελούνται είτε από θυρίστορ, είτε από ημιαγωγικά στοιχεία ελεγχόμενης έναυσης και σβέσης, όπως θυρίστορ με πύλη σβέσης (GTO) ή τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT).

Το βασικό πλεονέκτημα της λειτουργίας μεταβλητής ταχύτητας είναι η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης της μηχανής, καθώς αυξάνεται το ποσοστό εκμετάλλευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου κυρίως κατά τις χαμηλές ταχύτητες ανέμου, σε σχέση με την λειτουργία σταθερής ταχύτητας. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ελέγχου της άεργου ισχύος ανάλογα με τον τύπο μετατροπέα που χρησιμοποιείται. Σημαντικό επίσης πλεονέκτημα από την λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας είναι η εξομάλυνση της μεταβλητότητας των μηχανικών ροπών και απόσβεση των συντονισμών του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης, τα οποία σημαίνουν μείωση των μηχανικών καταπονήσεων και αύξηση της διάρκειας ζωής του συστήματος.

Τα μειονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι καταρχήν η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω του μετατροπέα συχνότητας και η αντίστοιχη αύξηση του κόστους. Επίσης λόγω του ηλεκτρονικού μετατροπέα παρουσιάζεται αύξηση των ανώτερων αρμονικών που εισέρχονται στο δίκτυο, κάτι που κάνει αναγκαία την εγκατάσταση φίλτρων για τον περιορισμό τους. Υπάρχουν διάφορα συστήματα εκ των οποίων μερικά είναι τα ακόλουθα τρία:

- Ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου δρομέα (κλωβό) με διασύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στον στάτη.
- Ασύγχρονη μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα με διασύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στον δρομέα
- Σύγχρονη μηχανή με διασύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ στον στάτη.

Ο περιορισμός της ισχύος σε αυτά τα συστήματα, για μεγάλες ταχύτητες του ανέμου, επιτυγχάνεται μέσω ελέγχου του βήματος των πτερυγίων. Οι πυκνωτές στους ακροδέκτες της ασύγχρονης γεννήτριας τροφοδοτούν την άεργο ισχύ που απαιτείται για την διέγερσή της. Κύρια πλεονεκτήματα της διάταξης είναι βέβαια το χαμηλό κόστος της ασύγχρονης γεννήτριας και η απλότητα και αξιοπιστία του ανορθωτή διόδων. Όμως, η επιλογή ανορθωτή διόδων δεν μας δίνει την δυνατότητα ελέγχου της τάσης στη διασύνδεση συνεχούς ρεύματος. Η τάση αυτή αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι στροφές της γεννήτριας. Για τον λόγο αυτό έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι περιορισμού της, με κατάλληλη διαμόρφωση της παλμοδότησης των ημιαγωγίμων στοιχείων του αντιστροφέα. Από την πλευρά του δικτύου, απαιτούνται μεγάλα και δαπανηρά φίλτρα έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι αρμονικές ρεύματος που δημιουργούνται από τον αντιστροφέα. Εκτός από το πρόβλημα των αρμονικών, ο αντιστροφέας απορροφά και άεργο ισχύ από το δίκτυο.

Σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχει προταθεί και διερευνηθεί σε σημαντικό βαθμό η διάταξη ασύγχρονης μηχανής δακτυλιοφόρου δρομέα με σύστημα μετατροπέων

συνδεδεμένων στους ακροδέκτες του. Στην απλούστερη περίπτωση, η διάταξη των μετατροπέων περιλαμβάνει μη ελεγχόμενο ανορθωτή στους ακροδέκτες του δρομέα και γέφυρα που λειτουργεί ως αντιστροφείας στην έξοδο, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η ανάκτηση της ισχύος ολισθήσεως και η επιστροφή της στο δίκτυο.

Η ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας είναι ανάλογη του ρεύματος του δρομέα και κατά συνέπεια του συνεχούς ρεύματος. Άρα, μεταβάλλοντας κατάλληλα την γωνία εναύσεως των θυρίστωρ του αντιστροφεία, μπορούμε να ρυθμίζουμε την ηλεκτρική ροπή, έτσι ώστε να μεταβάλλεται η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα κατά τον επιθυμητό τρόπο. Αυτή η συνδεσμολογία προτιμάται για συστήματα μεγάλης ισχύος (της τάξεως των MW). Η ασύγχρονη μηχανή είναι δακτυλιοφόρου δρομέα, η οποία σε σχέση με την βραχυκυκλωμένου δρομέα είναι ακριβότερη και έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις συντήρησης. Από την άλλη πλευρά, επειδή οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς είναι στον δρομέα, διαχειρίζονται μόνο ένα τμήμα της συνολικής ισχύος εξόδου, το οποίο καθορίζεται από το εύρος ολισθήσεων που θέλουμε να λειτουργεί η μηχανή.

Αυτό το γεγονός οδηγεί σε μείωση της ονομαστικής ισχύος των μετατροπέων και άρα και του κόστους τους. Αυτό είναι και το βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης που σε συνδυασμό με την απλότητα και την αξιοπιστία των μετατροπέων την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές ανεμογεννητριών. Επιπλέον έχουμε μικρότερη καταπόνηση του δικτύου από αρμονικές. Παρόλα αυτά το πρόβλημα του μικρού συντελεστή ισχύος, λόγω του αντιστροφεία από θυρίστωρ και η ύπαρξη αρμονικών συνεχίζουν να υφίστανται.

Επίσης σε αρκετά χαμηλή συχνότητα έχουμε ταλαντώσεις της ηλεκτρικής ροπής λόγω των παραμορφωμένων ρευμάτων του δρομέα. Το τελευταίο γεγονός πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη στον σχεδιασμό του μηχανικού συστήματος μεταφοράς της ισχύος, για την αποφυγή κάποιου πιθανού συντονισμού.

3. Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με DFIG

Το DFIG αποτελείται από μια επαγωγική γεννήτρια με δακτυλιοφόρο δρομέα η οποία συνδέεται με το δίκτυο και έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα [2,3,4,5]. Ο όρος “doubly fed” αναφέρεται στο γεγονός ότι η τάση στο στάτη εφαρμόζεται από το δίκτυο και η τάση στο δρομέα προκαλείται από το μετατροπέα ισχύος. Το σύστημα αυτό επιτρέπει λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας γύρω από ένα μεγάλο αλλά με συγκεκριμένα όρια εύρος. Ο μετατροπέας εξισορροπεί τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική συχνότητα δίνοντας ένα ρεύμα δρομέα με μεταβλητή συχνότητα. Τόσο στη διάρκεια κανονικής

λειτουργίας όσο και σε σφάλματα η συμπεριφορά της γεννήτριας καθορίζεται από το μετατροπέα και τους ελεγκτές του.

Αυτό σημαίνει πως ο στάτης είναι απευθείας συνδεδεμένος με το δίκτυο ενώ τα τυλίγματα του δρομέα είναι συνδεδεμένα διαμέσου δαχτυλιδιών ολίσθησης (slip rings) με έναν μετατροπέα. Το σύστημα αυτό έχει γίνει πολύ δημοφιλές τελευταία διότι εδώ ο μετατροπέας χειρίζεται μόνο ένα κλάσμα 20-30% της συνολικής ισχύος. Έτσι οι απώλειες στον ηλεκτρονικό μετατροπέα μπορούν να μειωθούν σε σχέση με ένα σύστημα του οποίου ο μετατροπέας έχει να χειριστεί τη συνολική ισχύ. Επίσης, το κόστος του μετατροπέα μειώνεται.

Το μέγεθος του μετατροπέα δε σχετίζεται με τη συνολική ισχύ της γεννήτριας αλλά με το επιλεγμένο εύρος ταχυτήτων και συνεπώς με την ισχύ ολίσθησης. Το κόστος του μετατροπέα αυξάνει όταν το εύρος ταχύτητας γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα γίνεται πλατύτερο. Συνεπώς, η επιλογή του εύρους ταχύτητας βασίζεται σε οικονομικά κριτήρια και στην αυξημένη αποτελεσματικότητα. Ένα μειονέκτημα του DFIG είναι η αναπόφευκτη ανάγκη δαχτυλιδιών ολίσθησης.

Η χρήση τους γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη και προτιμώνται πλέον από των σταθερών στροφών, καθώς παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι [3]:

- Αύξηση ενεργειακής απόδοσης
- Μείωση των μηχανικών καταπονήσεων (πτερύγια, σύστημα μετάδοσης της κίνησης και δομικό σύστημα) - μεγαλύτερη διάρκεια ζωής
- Δυνατότητα απαλοιφής του κιβωτίου ταχυτήτων
- Μείωση του ακουστικού θορύβου
- Προσαρμογή της A/Γ στις τοπικές συνθήκες ανέμου
- Καλύτερη ποιότητα ισχύος (Μείωση διακυμάνσεων ισχύος εξόδου)
- Δυνατότητα ελέγχου άεργου ισχύος
- Δυνατότητα ρύθμισης τάσης (σε ασθενή δίκτυα) και της συχνότητας (σε αυτόνομα)
- Διευκόλυνση διαδικασιών εκκίνησης

Τα μειονεκτήματα τους αφορούν κυρίως τον οικονομικό τομέα, αφού απαιτούν σύνδεση ηλεκτρονικών ισχύος που, συνιστούν σημαντικό μέρος των εξόδων μίας εγκατάστασης τέτοιας A/Γ. Επιπλέον, εμφανίζουν κι αδυναμίες που αφορούν στην αυξημένη

πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών μετατροπών, στην έγχυση αρμονικών στο δίκτυο και στην αύξηση των απωλειών λόγω της παραμόρφωσης των ρευμάτων της γεννήτριας.

1.2.4 Έλεγχος μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων

Οι ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες ώστε να παράγουν ενέργεια όσο το δυνατόν φτηνότερα. Για αυτό γενικά σχεδιάζονται έτσι ώστε να παράγουν μέγιστη ισχύ σε ταχύτητες ανέμου από 6 m/s μέχρι της τάξης των 15 m/s. Δεν αποδίδει να σχεδιάζονται ώστε να μεγιστοποιούν την έξοδό τους σε μεγαλύτερους ανέμους, γιατί τόσο ισχυροί άνεμοι είναι σπάνιοι.

Σε περίπτωση ισχυρότερων ανέμων είναι απαραίτητο να 'σπαταλάτε' μέρος της επιπλέον ενέργειας του ανέμου προκειμένου να προφυλαχθεί ο εξοπλισμός της ανεμογεννήτριας. Ο έλεγχος βήματος (Pitch control) [2,3,4,5] είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος ελέγχου της αεροδυναμικής ισχύος που παράγεται από το δρομέα της ανεμογεννήτριας. Επίσης έχει σημαντική επίδραση σε όλα τα αεροδυναμικά φορτία που παράγονται από το δρομέα.

Σε ανεμογεννήτριες που εφαρμόζεται τέτοιου είδους έλεγχος, δηλαδή στις ανεμογεννήτριες με ελεγχόμενο βήμα έλικας, ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ελέγχει την έξοδό τους αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Όταν η έξοδος γίνει αρκετά μεγάλη, στέλνει εντολή στο μηχανισμό περιστροφής του πτερυγίου ο οποίος αμέσως στρέφει τα πτερύγια προς τον αέρα. Γι' αυτό τα πτερύγια πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφονται κατά μήκος του άξονά τους. Κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας τα πτερύγια θα στρέφονται με μια γωνία μιας μοίρας τη φορά – ενώ ταυτόχρονα θα στρέφεται και ο δρομέας. Ο σχεδιασμός τέτοιου είδους ανεμογεννητριών απαιτεί έξυπνη μηχανική ώστε τα πτερύγια να στρέφονται ακριβώς την απαιτούμενη γωνία. Ο έλεγχος αυτός κάθε φορά που αλλάζει διεύθυνση ο αέρας στρέφει τα πτερύγια μερικές μοίρες ώστε να διατηρεί τη γωνία πρόσπτωσης ιδανική για να μεγιστοποιεί την έξοδο.

Μια παράμετρος που επηρεάζει την έξοδο ισχύος είναι η γωνία της μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (γωνία βήματος-pitch angle) θ [1,2,3,4,6,7,8]. Ο σχεδιασμός των πτερυγίων σχεδόν πάντοτε είναι σπειροειδής, αλλά τα πτερύγια μπορούν να τοποθετηθούν σε πλήρη pitch γωνία. Μικρές μεταβολές στην pitch γωνία μπορεί να έχουν δραματικές επιπτώσεις στην έξοδο ισχύος. Ο δρομέας μιας ανεμογεννήτριας που έχει σχεδιαστεί για λειτουργία σε δεδομένες συνθήκες ανέμου, μπορεί να γίνει κατάλληλος για άλλες συνθήκες με κατάλληλες προσαρμογές στην pitch γωνία και στην ταχύτητα περιστροφής.

Η ρύθμιση ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με δυο τρόπους :

1. “pitching to feather” ή “passive stall” [2,3,4,5] (παθητική επιβράδυνση)

Οι ανεμογεννήτριες στις οποίες εφαρμόζεται αυτός ο έλεγχος έχουν τα πτερύγιά τους ενσωματωμένα στην κεφαλή του ρότορα σε σταθερή γωνία. Το γεωμετρικό προφίλ όμως των πτερυγίων, είναι αεροδυναμικά σχεδιασμένο ώστε να διασφαλίσει ότι τη στιγμή που η ταχύτητα του ανέμου γίνει αρκετά υψηλή, να δημιουργεί αναταραχές στην πλευρά του πτερυγίου που δεν ‘βλέπει’ τον αέρα, γεγονός που οδηγεί σε επιβράδυνση των πτερυγίων. Αυτή η επιβράδυνση προλαμβάνει την άσκηση ανεπιθύμητων δυνάμεων των πτερυγίων στον ρότορα.

2. “pitching to stall” ή “active stall” [2,3,4,5] (ενεργός επιβράδυνση) .

Προκειμένου να επιτύχουν μια αρκετά μεγάλη ροπή (περιστροφική δύναμη) σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, οι μηχανές συχνά θα προγραμματίζονται να περιστρέφουν τα πτερύγιά τους όπως μια ανεμογεννήτρια με ελεγχόμενο βήμα έλικα σε χαμηλές ταχύτητες. Αν όμως η μηχανή τείνει να υπερφορτωθεί, η μηχανή με ελεγχόμενη ενεργητική καθυστέρηση θα στρέψει τα πτερύγιά της σε αντίστροφη διεύθυνση από ότι μια μηχανή με ελεγχόμενο βήμα έλικα. Με άλλα λόγια, θα αυξήσει τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια προκειμένου τα πτερύγια να επιβραδυνθούν, κατ’ αυτόν τον τρόπο σπαταλά την επιπλέον ενέργεια του ανέμου.

Παρόλο που το “pitching to feather” είναι πιο συνηθισμένη μέθοδος, κάποιες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν “pitching to stall” . Το “pitching to feather” απαιτεί πολύ περισσότερη δυναμική δραστηριότητα μεταβολής της κλίσης από το “pitching to stall” ενώ ένα μεγάλο μέρος των πτερυγίων επιβραδύνεται, πολύ μικρές κινήσεις μεταβολής της κλίσης επαρκούν για να ελεγχθεί η ροπή. Το “pitching to stall” επιφέρει μια σημαντικά μεγαλύτερη ώθηση φορτίου. Από την άλλη, η ώθηση είναι πολύ πιο σταθερή όταν τα πτερύγια επιβραδύνονται, συνεπώς τα καταχρηστικά φορτία της ώθησης θα είναι μικρότερα.

Ένα επιπλέον πρόβλημα με το “pitching to stall” είναι ότι η άνωσης στην αρχή της περιοχής επιβράδυνσης είναι αρνητική, έτσι ο συντελεστής άνωσης μειώνεται με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης. Αυτό επιδρά στην αρνητική αεροδυναμική, που μπορεί να επιδράσει στην αστάθεια των στρεφόμενων πτερυγίων. Αυτό είναι επίσης πρόβλημα για τις ανεμογεννήτριες που ελέγχεται η επιβράδυνσή τους με ρυθμισμένο “pitch” .

Για να πετύχουμε καλή ρύθμιση , το “pitch control” πρέπει να αποκρίνεται πολύ γρήγορα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Αυτή η εφαρμογή υψηλού ενεργού ελέγχου απαιτεί πολύ

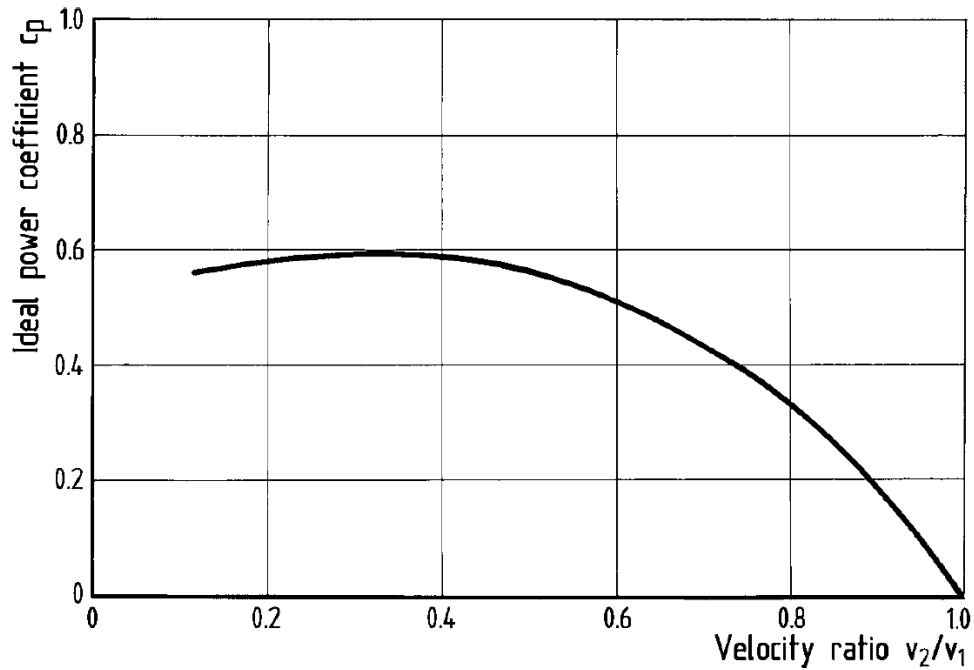
προσεκτικό σχεδιασμό καθώς έχει ισχυρή αλληλεπίδραση με τη δυναμική απόκριση της ανεμογεννήτριας .

Μια από τις πιο ισχυρές αλληλεπιδράσεις είναι με τη δυναμική συμπεριφορά του πύργου. Καθώς μεταβάλλεται η κλίση των πτερυγίων για τη ρύθμιση της αεροδυναμικής ροπής, η αεροδυναμική ώθηση στο δρομέα μεταβάλλεται σημαντικά και αυτό τροφοδοτεί παλμό στον πύργο. Καθώς ο άνεμος αυξάνει, η γωνία μεταβολής της κλίσης αυξάνει για να διατηρήσει σταθερή τη ροπή, αλλά ο δρομέας τείνει να τη μειώσει. Αυτό επιτρέπει στην απόκλιση του πύργου που είναι κόντρα στον άνεμο να μειωθεί και καθώς η κορυφή του πύργου μετακινείται ευνοϊκά στον άνεμο η σχετική ταχύτητα του ανέμου που φαίνεται από το δρομέα αυξάνεται. Η αεροδυναμική ροπή αυξάνεται περισσότερο, προκαλώντας περισσότερη μεταβολή στην κλίση των πτερυγίων.

1.3 Απόδοση ανεμογεννητριών

Μεταξύ 1922 και 1925 ο φυσικός Albert Betz [2] εξέδωσε εργασίες στις οποίες με απλούς νόμους της φυσικής έδειχνε ότι η μηχανική ενέργεια που εξέρχεται από ένα σύστημα, όταν ρεύμα αέρα διέρχεται από την επιφάνεια μιας δεδομένης διατομής, περιορίζεται ως ένα σταθερό ποσοστό της κινητικής ενέργειας του αέρα. Σύμφωνα λοιπόν με τον Betz, το ποσοστό αυτό ονομάζεται συντελεστής ισχύος (power coefficient). Ο συντελεστής ισχύος δίνεται από μια πολύ απλουστευτική σχέση [2], η οποία αγνοεί τις τριβή του συστήματος και εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα του ρεύματος αέρα στην είσοδο U_1 και στην έξοδο U_2 της διατομής όπως φαίνεται στο σχήμα 1.9:

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot \left\| 1 - \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \right\| \cdot \left\| 1 + \frac{U_2}{U_1} \right\|$$

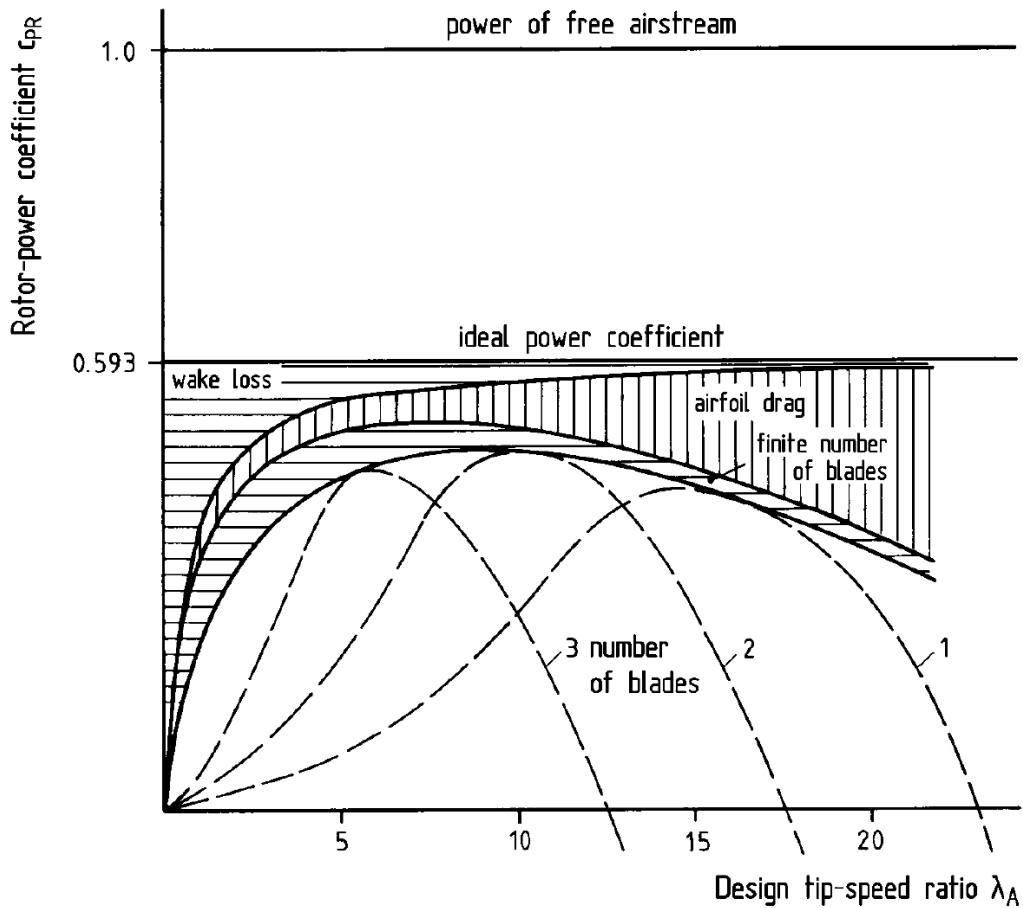


Σχήμα 1.9: Ο συντελεστής ισχύος σε σχέση με τον λόγο των ταχυτήτων στην είσοδο και στην έξοδο του συστήματος [2]

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.9, η μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος είναι $C_p=0,593$ και προφανώς η μέγιστη θεωρητική μηχανική ισχύς που μπορεί να παραχθεί από μια ανεμογεννήτρια δεν ξεπερνά το 60% της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Το όριο αυτό συχνά ονομάζεται και όριο του Betz. Μια πολύ σημαντική παράμετρος για τις ανεμογεννήτριες, όπως και για κάθε μηχανή που χρησιμοποιεί έλικα, είναι ο συντελεστής ταχύτητας ακροπτερυγίου, λ (tip speed ratio-TSR) [1,2,3], ο οποίος ορίζεται ως:

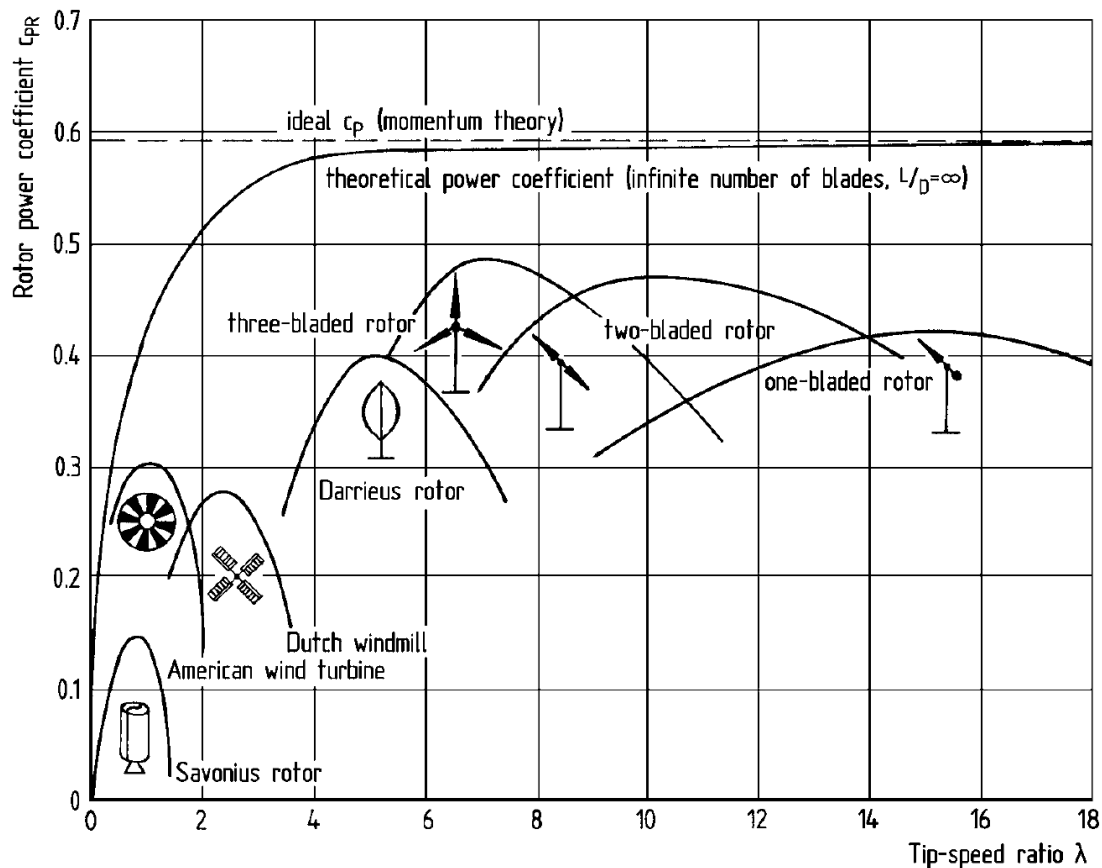
$$\lambda = \omega R/V_o.$$

όπου ω είναι η περιστροφική ταχύτητα του δρομέα, R η ακτίνα του πτερυγίου και V_o η ταχύτητα του ανέμου. Στο σχήμα 1.10 φαίνονται όλες οι απώλειες που εμφανίζονται κατά τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική από μια ανεμογεννήτρια σε σχέση με τον συντελεστή λ .



Σχήμα 1.10: Εκτίμηση της πραγματικής χαρακτηριστικής ισχύος του ρότορα με διάφορες θεωρητικές προσεγγίσεις [2]

Η μέγιστη δυνατή ισχύς παράγεται όταν η ακμή του πτερυγίου περιστρέφεται με ταχύτητα πενταπλάσια ή εξαπλάσια της ταχύτητας του ανέμου. Στο σχήμα 1.11 παρουσιάζεται ο συντελεστής ισχύος για ρότορες διαφορετικών ειδών ανεμογεννήτριας.



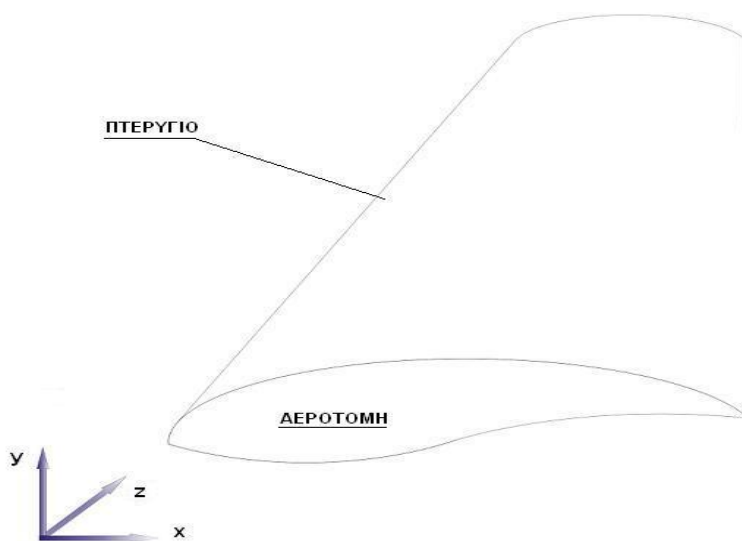
Σχήμα 1.11 : Συντελεστής ισχύος για διάφορους τύπους ανεμογεννητριών [2]

Είναι εμφανές ότι οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα παρέχουν μεγαλύτερη ισχύ από αυτές του κάθετου άξονα και ιδιαίτερα αυτές με τα τρία πτερύγια, οι οποίες λειτουργούν σε ένα ικανοποιητικό εύρος ταχυτήτων ανέμου. Σε κάθε περίπτωση η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας είναι συνιστώσα πολλών επιμέρους αποδόσεων που αντιστοιχούν στα επιμέρους μέρη που την αποτελούν.

Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τον βαθμό απόδοσης του ρότορα είναι τα πτερύγια. Ο όρος πτερύγια αφορά τόσο το σχήμα τους όσο και την γωνία με την οποία τοποθετούνται ως προς τη ροή του αέρα. Οι σχεδιαστές μηχανικοί ασχολούνται με τον αεροδυναμικό σχεδιασμό των πτερυγίων ανάλογα με τον τρόπο ελέγχου της ισχύος που παράγει η ανεμογεννήτρια. Ο σχεδιασμός αποβλέπει στην μεγιστοποίηση του λόγου της αεροδυναμικής άνωσης (lift) προς την αεροδυναμική αντίσταση (drag), διατηρώντας την καθεμία από αυτές εντός κάποιων ορίων. Στις επόμενες ενότητες θα γίνει μια επισκόπηση της θεωρίας της αεροδυναμικής των πτερυγίων και θα αναφερθούν οι τρόποι ρύθμισης της ισχύος των ανεμογεννητριών.

1.3.1 Αεροδυναμική των πτερυγίων

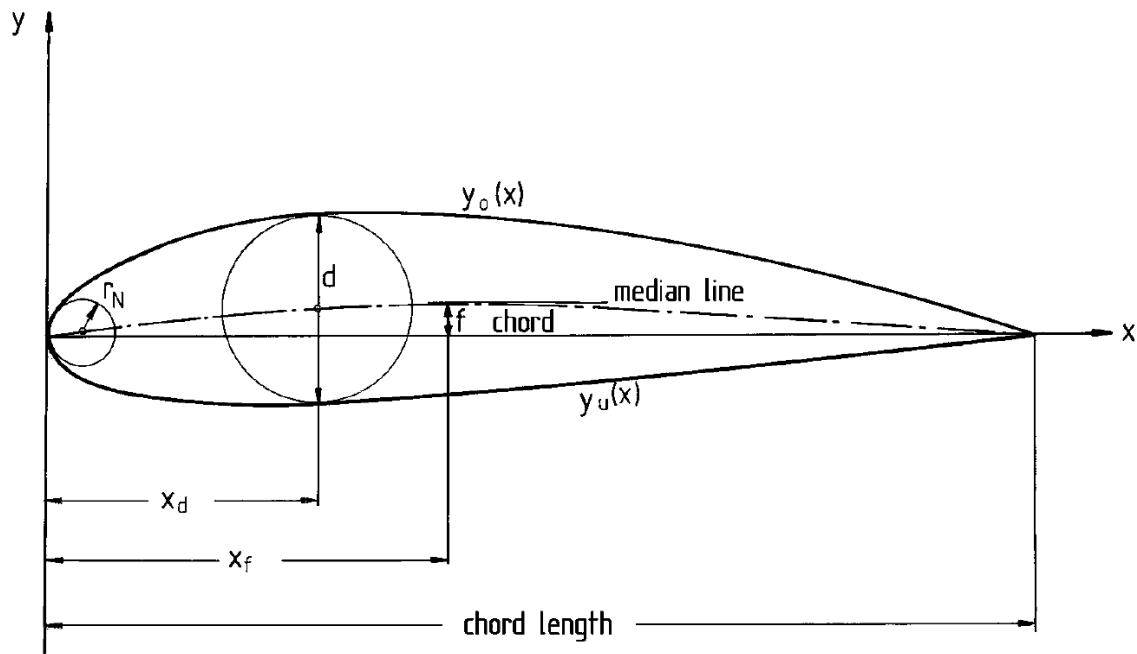
Όπως σε κάθε άλλη στροβιλομηχανή έτσι και στις ανεμογεννήτριες απαιτείται ο ακριβής σχεδιασμός των πτερυγίων ώστε η μετατροπή ενέργειας να είναι όσο το δυνατόν αποδοτικότερη. Σε ένα πτερύγιο που περιστρέφεται, η ροή υπόκειται σε φυγοκεντρικές δυνάμεις που μεταβάλλουν σημαντικά τη διανομή των ταχυτήτων μέσα στο πτερύγιο. Έτσι το ρευστό αντί να παραμένει πάνω σε μια επιφάνεια σταθερής ακτίνας κάτω από την επίδραση των φυγοκεντρικών δυνάμεων, κινείται προς περιοχές με μεγαλύτερη ακτίνα. Δηλαδή, η ταχύτητα μεταβάλλεται ακτινικά [2,6]. Για την μελέτη των πτερυγίων χρειάζεται η διανομή των ταχυτήτων του ρευστού κατά μήκος της ακτίνας πριν το περιστρεφόμενο πτερύγιο. Για να βρεθεί αυτή η διανομή η πιο κοινή υπόθεση είναι ότι το ρευστό πριν και μετά το πτερύγιο βρίσκεται σε ακτινική ισορροπία, κινείται δηλαδή σε επιφάνεια σταθερής ακτίνας και ότι οι απαραίτητες μεταβολές στην ακτινική θέση του ρευστού γίνονται μόνο μέσα στο περιστρεφόμενο πτερύγιο [2,6]. Για τη μελέτη των πτερυγίων με αξονική ισορροπία, απαιτείται ο διαχωρισμός του πτερυγίου σε τρεις περιοχές (τομές), την βάση, το κύριο μέρος και την ακμή (ή ακροπτερύγιο). Για δυσδιάστατα προβλήματα, οι ταχύτητες στην είσοδο των πτερυγίων μπορούν να υπολογιστούν, αν θεωρηθεί ότι η ακτινική μεταβολή της ταχύτητας έχει την μορφή ελεύθερης δίνης.



Σχήμα 1.12 : Πτερύγιο και αεροτομή

Αν θεωρηθεί ένα πτερύγιο με προοπτική όπως αυτή του σχήματος 1.12, κάθε τομή του πτερυγίου, παράλληλη στο επίπεδο x-y, είναι μια αεροτομή (airfoil). Μια αεροτομή είναι ένα αεροδυναμικό σώμα, το οποίο όταν βρίσκεται σε σχετική κίνηση ως προς τον αέρα εμφανίζει μια κάθετη δύναμη στη φορά της κίνησης η οποία ονομάζεται άνωση. Στη περίπτωση των ανεμογεννητριών, ο αέρας κινείται ως προς την αεροτομή και δημιουργεί

σε αυτήν άνωση. Η άνωση που δημιουργείται περιστρέφει τα πτερύγια και τον άξονα. Τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας αεροτομής φαίνονται στο επόμενο σχήμα 1.13.

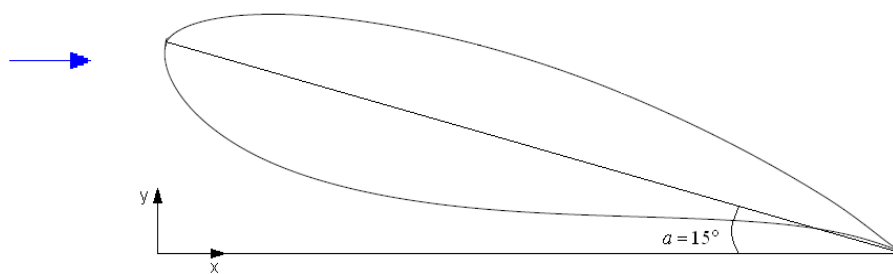


Σχήμα 1.13: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας αεροτομής [1,3,6,51]

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας αεροτομής όπως βρίσκονται στη βιβλιογραφία [1,3,4,5,6,51] είναι:

- Η μέση γραμμή καμπυλότητας (median camber line) είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που ακολουθούν την καμπυλότητα του σώματος της αεροτομής και βρίσκονται ανάμεσα στην επάνω και στην κάτω πλευρά.
- Η επάνω πλευρά της αεροτομής καλείται πλευρά αναρρόφησης και η κάτω πλευρά, πλευρά κατάθλιψης. Στις ανεμογεννήτριες, συνήθως αναφέρονται ως επάνω (upper) και κάτω (lower) πλευρά αντίστοιχα.
- Το μπροστινό σημείο στην αεροτομή, ονομάζεται μύτη (nose) ή ακμή προσβολής (leading edge) μιας και αποτελεί το πρώτο σημείο που συναντά η ροή όταν η αεροτομή είναι τοποθετημένη παράλληλα με την ροή. Το σχήμα της αεροτομής στην ακμή προσβολής είναι συνήθως κυκλικό, με ακτίνα καμπυλότητας (r_N) μέχρι και 2% της χορδής.

- Το σημείο στην ουρά της αεροτομής ονομάζεται ακμή φυγής (trailing edge). Η ευθεία γραμμή που διέρχεται από αυτά τα σημεία, ονομάζεται γραμμή της χορδής της αεροτομής (chord length) και το ευθύγραμμο τμήμα, ονομάζεται χορδή της αεροτομής (chord) και συμβολίζεται με το λατινικό γράμμα c . Όλες οι διαστάσεις της αεροτομής μπορούν να εκφραστούν ως ποσοστά της χορδής.
- Το πάχος μιας αεροτομής (d) είναι η κάθετη απόσταση ενός σημείου της επάνω επιφάνειας και ενός της κάτω. Το μέγιστο πάχος είναι χαρακτηριστικό της αεροτομής και η θέση του μετράτε από την ακμή προσβολής (X_d), ως ποσοστό της χορδής.
- Η μέγιστη καμπυλότητα, είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό μιας αεροτομής (f), αποτελεί την μέγιστη κάθετη απόσταση της μέσης γραμμής καμπυλότητας και της χορδής και η θέση του μετράτε από την ακμή προσβολής (X_f), ως ποσοστό της χορδής.
- Το βήμα θ (pitch), είναι η γωνία που σχηματίζει η χορδή της αεροτομής με το επίπεδο περιστροφής. Η γωνία προσβολής α (angle of attack), είναι η κλίση με την οποία προσπίπτει η ροή στην αεροτομή, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται από την σχετική ταχύτητα και την χορδή της αεροτομής. Όταν μελετάται η ροή γύρω από μια αεροτομή που δεν βρίσκεται σε συγκεκριμένη θέση στο χώρο (arbitrary airfoil), συνήθως θεωρείται ότι η ροή έρχεται παράλληλα με το οριζόντιο επίπεδο. Σε αυτή τη περίπτωση θεωρείται ότι η γωνία προσβολής α , είναι η γωνία μεταξύ της χορδής της αεροτομής και του οριζόντιου επιπέδου. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 1.14 με μια αεροτομή με $\alpha=15^\circ$.



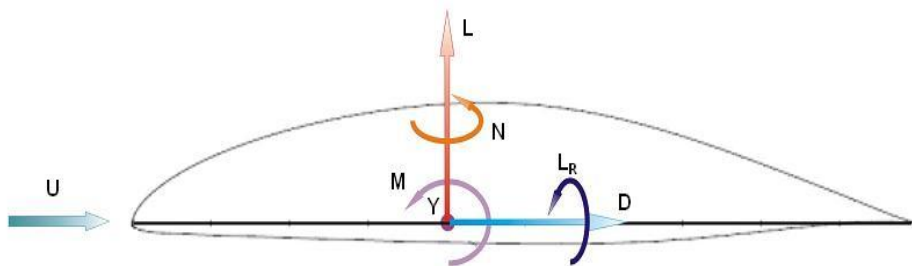
Σχήμα 1.14 : Αεροτομή υπό γωνία προσβολής $\alpha=15^\circ$

Η αεροτομή που αντιστοιχεί στη βάση του πτερυγίου συνηθίζεται να καλείται αεροτομή βάσης. Αυτή που βρίσκεται στο κύριο μέρος καλείται κύρια αεροτομή και η αεροτομή της

ακμής (ακροπτερυγίου), αεροτομή ακμής. Η κύρια αεροτομή και η αεροτομή ακμής αποτελούν τις αεροτομές που γενικά αναφέρονται ως εξωτερικές αεροτομές.

1.3.2 Αεροδυναμική δύναμη και ροπή

Όταν ο αέρας ρέει γύρω από ένα πτερύγιο αναγκάζεται να εκτραπεί από την πορεία του, κάτι που οδηγεί σε αλλαγή της ταχύτητάς του. Η εξίσωση του Bernoulli, δείχνει ότι η πίεση του αέρα στο πτερύγιο είναι διαφορετική από αυτή της ελεύθερης ροής [1]. Επίσης, το ιξώδες του αέρα οδηγεί στην εμφάνιση δυνάμεων τριβής που τείνουν να αντισταθούν στη ροή. Ως αποτέλεσμα, το πτερύγιο δέχεται μια αεροδυναμική δύναμη και μια ροπή [1]. Είναι βολικό για την μελέτη της αεροδυναμικής, να χωριστούν η δύναμη και η ροπή σε τρεις συνιστώσες η κάθε μια, μια για κάθε διάσταση. Στο παρακάτω σχήμα 1.15 φαίνεται μια τυχαία αεροτομή στην οποία ασκούνται αυτές οι δυνάμεις και οι ροπές.



Σχήμα 1.1.25 : Δυνάμεις και ροπές σε μια αεροτομή

Οι δυνάμεις και ροπές που υφίστανται σε μια αεροτομή, όπως περιγράφονται στη βιβλιογραφία [1,2,3,4,5,6] είναι:

- Η άνωση (lift) είναι η κάθετη στη ροή συνιστώσα της αεροδυναμικής δύναμης, με διεύθυνση προς τα πάνω σε σχέση με τον ορίζοντα. Συμβολίζεται με L και είναι η κύρια δύναμη στην οποία οφείλεται η περιστροφή των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας.
- Η οπισθέλκουσα δύναμη ή αεροδυναμική αντίσταση (drag) είναι η συνιστώσα της αεροδυναμικής δύναμης που είναι παράλληλη στην διεύθυνση της ταχύτητας και συμβολίζεται με το γράμμα D .
- Η πλευρική δύναμη (cross-wind force) είναι κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν η άνωση και η αντίσταση. Η φορά της όπως φαίνεται στο σχήμα 1.15 είναι προς το επίπεδο του χαρτιού. Συμβολίζεται με το γράμμα Y .

- Η ροπή πρόνευσης (pitching moment) συμβολίζεται με το γράμμα M και βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με την άνωση και την οπισθέλκουσα. Είναι θετική όταν τείνει να αυξήσει την γωνία πρόσπτωσης.
- Η ροπή διατοίχισης (rolling moment) συμβολίζεται με τον όρο L_r και τείνει να περιστρέψει το πτερύγιο προς τη φορά της ροής.
- Η ροπή εκτροπής (yawing moment) τείνει να περιστρέψει το πτερύγιο γύρω από τη διεύθυνση της άνωσης. Συμβολίζεται με το γράμμα N .

1.3.3 Συντελεστές δυνάμεων και ροπών

Στη δυσδιάστατη μελέτη αεροτομών χρησιμοποιούνται δυο αδιάστατοι συντελεστές που αντιπροσωπεύουν τις δύο βασικές συνιστώσες της αεροδυναμικής δύναμης, ο συντελεστής άνωσης C_L και ο συντελεστής αντίστασης C_D [1,2,3,4,6,50,51,52]. Οι συντελεστές αυτοί δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$C_L = \frac{L}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S}$$

$$C_D = \frac{D}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S}$$

όπου το S είναι η επιφάνεια του πτερυγίου.

Με παρόμοιες σχέσεις εκφράζονται αδιάστατοι συντελεστές και για τις ροπές που εφαρμόζονται σε ένα πτερύγιο. Η ροπή πρόνευσης είναι η ροπή που χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις ανάλυσης δυσδιάστατης ροής [1,2,3,4,6,50,51,52]. Η σχέση που δίνει αυτόν τον συντελεστή C_M είναι:

$$C_M = \frac{M}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S \cdot c}$$

Η διανομή πίεσης στην επιφάνεια μια αεροτομής δεν είναι ομοιόμορφη. Αν είναι δεδομένη η πίεση μακριά από την αεροτομή, είναι βολικότερη η χρήση ενός συντελεστή που θα

χαρακτηρίζει την τοπική πίεση P σε σχέση με την πίεση μακριά από την επιφάνεια της αεροτομής. Ο συντελεστής C_p ονομάζεται συντελεστής διαφοράς πίεσης και δίνεται από τη σχέση [1,2,3,4,6,50,51,52]:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2}$$

Για γωνία προσβολής $\alpha=0$ ο συντελεστής πίεσης είναι θετικός σε μικρές περιοχές, στην ακμή προσβολής και στην ακμή φυγής. Στην μεγαλύτερη επιφάνεια της αεροτομής ο συντελεστής έχει αρνητικές τιμές. Η διανομή πίεσης στην επιφάνεια αναρρόφησης της αεροτομής τείνει να κινήσει το πτερύγιο προς τα πάνω, ενώ η διανομή στην επιφάνεια κατάθλιψης τείνει να το κινήσει προς τα κάτω. Όπως φαίνεται η κατανομή στην επιφάνεια αναρρόφησης έχει μεγαλύτερες τιμές και άρα η δράση της υπερνικά αυτή της επιφάνειας κατάθλιψης, με αποτέλεσμα το πτερύγιο να κινείται προς τα πάνω, αυτός είναι και ο τρόπος σχηματισμού της δυναμικής άνωσης.

Όσο αυξάνεται η γωνία προσβολής από την τιμή $\alpha=0$, η διανομή πίεσης στην επιφάνεια αναρρόφησης αυξάνει συνεχώς σε ένταση και έκταση. Σε μεγάλες γωνίες προσβολής καταλαμβάνει και μέρος της εμπρόσθιας επιφάνειας κατάθλιψης. Το σημείο ανακοπής για $\alpha=0$, βρίσκεται πάνω στη μέση γραμμή της αεροτομής, στην ακμή προσβολής. Με αύξηση της γωνίας προσβολής το σημείο ανακοπής μετακινείται προς την πλευρά κατάθλιψης και μετά από ένα ορισμένο σημείο (διαφορετικό για κάθε αεροτομή) η ροή αποκολλάται σχηματίζοντας την φουσαλίδα αποκόλλησης. Σε αυτή τη περιοχή εμφανίζεται η μέγιστη άνωση. Αν η γωνία πρόσπτωσης αυξηθεί περαιτέρω, το σημείο επανακόλλησης μετακινείται προς την ακμή φυγής και πέρα από κάποιο όριο (συνήθως $18^\circ - 20^\circ$) [1,2,6], η ροή αποκολλάται πλήρως. Όσο το σημείο επανακόλλησης της ροής κινείται προς την ακμή φυγής η διανομή πίεσης στην επιφάνεια αναρρόφησης μειώνεται δραματικά και στην περίπτωση πλήρους αποκόλλησης της ροής παύει να υφίσταται. Σε μια τέτοια ακραία περίπτωση η άνωση μηδενίζεται και το πτερύγιο υπόκειται μόνο στη δύναμη της αεροδυναμικής αντίστασης. Για αρνητικές γωνίες προσβολής εμφανίζεται αρνητική άνωση, δηλαδή περιστρέφει το πτερύγιο προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που πρέπει να στραφεί.

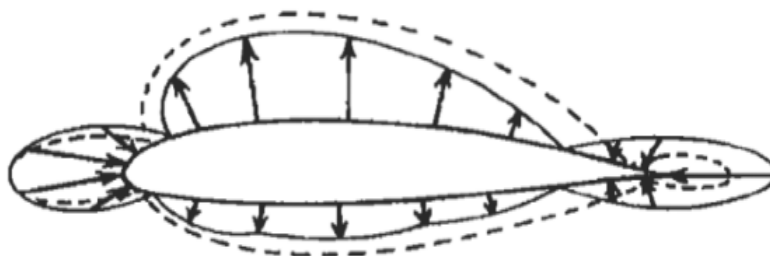
Γενικά, για μικρές γωνίες προσβολής, η άνωση δημιουργείται από τη διαφορά των πιέσεων στην πλευρά αναρρόφησης και κατάθλιψης. Σε μεγαλύτερες γωνίες, η άνωση είναι αποτέλεσμα της μείωσης πίεσης στην επιφάνεια αναρρόφησης και της αύξησης πίεσης στην πλευρά κατάθλιψης.

1.3.4 Αεροδυναμική αντίσταση

Η αεροδυναμική αντίσταση είναι η συνολική δύναμη που αντιστέκεται στη σχετική κίνηση αέρα-αεροδυναμικού σώματος [1,2,6] και μπορεί να χωριστεί σε δυο βασικές συνιστώσες, την αντίσταση λόγω πίεσης (pressure drag) και την αντίσταση λόγω επιφανειακής τραχύτητας (skin-friction drag).

Η αντίσταση επιφανειακής τραχύτητας, είναι η αντίσταση που δημιουργείται σε κάθε σημείο επαφής μεταξύ του ρευστού και της στερεής επιφάνειας λόγω των διατμητικών τάσεων που δημιουργούνται στην επιφάνεια το σώματος [1,50,51,52]. Σε ροή χωρίς τριβή (inviscid flow), η συνιστώσα αυτή της αντίστασης είναι αμελητέα. Η αντίσταση λόγω της πίεσης που δρα κάθετα σε κάθε σημείο της επιφάνειας, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τις παρακάτω συνιστώσες:

- Η αντίσταση δίνης (vortex drag), εξαρτάται από την άνωση, αλλά δεν εξαρτάται άμεσα από τα φαινόμενα τριβής [1,50,51,52]. Μπορεί να υπολογιστεί υποθέτοντας ροή χωρίς τριβή.
- Η αντίσταση κύματος (wave drag), συνδέεται με τη δημιουργία κρουστικών κυμάτων σε υψηλές ταχύτητες [1,50,51,52].



Σχήμα 1.16 : Διανομή πίεσης σε μια αεροτομή για ροή χωρίς τριβή (συνεχής γραμμή) και ροή με τριβή (διακεκομμένη γραμμή) [2]

Η διανομή πίεσης σε μια αεροτομή για ροή με τριβή, διαφέρει από τη περίπτωση ιδανικής ροής χωρίς τριβή. Αυτό οφείλεται στην δημιουργία του οριακού στρώματος το οποίο επηρεάζει τη διανομή πίεσης σε όλη τη περιφέρεια της αεροτομής [1]. Ένα παράδειγμα αυτής της διαφοροποίησης φαίνεται στο σχήμα 1.16, όπου με διακεκομμένη γραμμή αναπαρίσταται η διανομή πίεσης σε πραγματική ροή και με συνεχή γραμμή η αντίστοιχη διανομή για ιδεατή ροή. Αν η ροή είναι ιδεατή η ταχύτητα της ροής στην ακμή φυγής θα είναι μηδέν οπότε και ο συντελεστής διαφοράς πίεσης θα είναι +1. Στη πραγματική ροή το

άθροισμα του πάχους του σώματος και του πάχους του οριακού στρώματος είναι πεπερασμένο, οπότε η ταχύτητα δεν μηδενίζεται και ο συντελεστής διαφοράς πίεσης είναι μικρότερος του +1. Αυτή η διαφοροποίηση στη διανομή πίεσης μεταξύ της πραγματικής και ιδεατής ροής οδηγεί στην εμφάνιση μιας δύναμης αντίστασης η οποία ονομάζεται αντίσταση μορφής (form drag- boundary layer pressure drag) [1]. Το άθροισμα της αντίστασης επιφανειακής τραχύτητας και της αντίστασης μορφής αποτελεί την αντίσταση οριακού στρώματος (boundary layer drag-profile drag) [1].

1.3.5 Ρύθμιση των ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται για λειτουργία σε ανέμους ταχύτητας από 6 μέχρι 15m/sec [3,4]. Σε περίπτωση εμφάνισης ισχυρότερων ανέμων ή μεγάλων διακυμάνσεων στην ταχύτητα των ανέμων απαιτείται η ρύθμιση της ανεμογεννήτριας έτσι ώστε να μη προκληθούν ζημιές στα πτερύγια και την γεννήτρια. Ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους [3,4,6]:

- Ρύθμιση μέσω αποκόλλησης της ροής (stall regulation)
- Μεταβολή των στροφών του ρότορα (variable speed/rpm)
- Μεταβολή του βήματος των πτερυγίων (variable pitch)

Αντίθετα με τις ανεμογεννήτριες μεταβαλλόμενων στροφών και μεταβαλλόμενου βήματος πτερυγίων, οι ανεμογεννήτριες που ρυθμίζονται με αποκόλληση της ροής διατηρούν ένα σταθερό εύρος ταχυτήτων περιστροφής και για οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας απαιτείται η πέδηση του ρότορα [3,4,6]. Στην περίπτωση που η ανεμογεννήτρια ρυθμίζεται με αποκόλληση της ροής, η ρύθμιση (πέδηση) του ρότορα πραγματοποιείται είτε ενεργητικά (έλεγχος βήματος περιστρεφόμενων πτερυγίων) είτε παθητικά (σταθερά πτερύγια) [3,4,6]. Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η αεροδυναμική των πτερυγίων στην περιοχή της ακμής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Στη περίπτωση παθητικής πέδησης τα σταθερά πτερύγια είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να εμφανίζουν χαμηλό σχετικά μέγιστο συντελεστή άνωσης C_{lmax} και ειδικότερα με αύξηση της ταχύτητας λόγω της γεωμετρίας τους οδηγούν σε αποκόλληση της ροής [3,4,6,24,25,29,39,40]. Στη περίπτωση ενεργητικής πέδησης, τα πτερύγια έχουν σχεδιαστεί ώστε να εμφανίζουν μεγαλύτερο C_{lmax} στην ακμή, σε σχέση με τα πτερύγια παθητικής πέδησης. Σε αυτή τη περίπτωση η ανεμογεννήτρια είναι εξοπλισμένη με ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου που ελέγχει συνεχώς την ταχύτητα του ανέμου και σε περιπτώσεις σφοδρών ανέμων περιστρέφει τα πτερύγια (αλλάζει το βήμα τους) [2,3,4,5,53]. Η αλλαγή του βήματος γίνεται έτσι ώστε τα

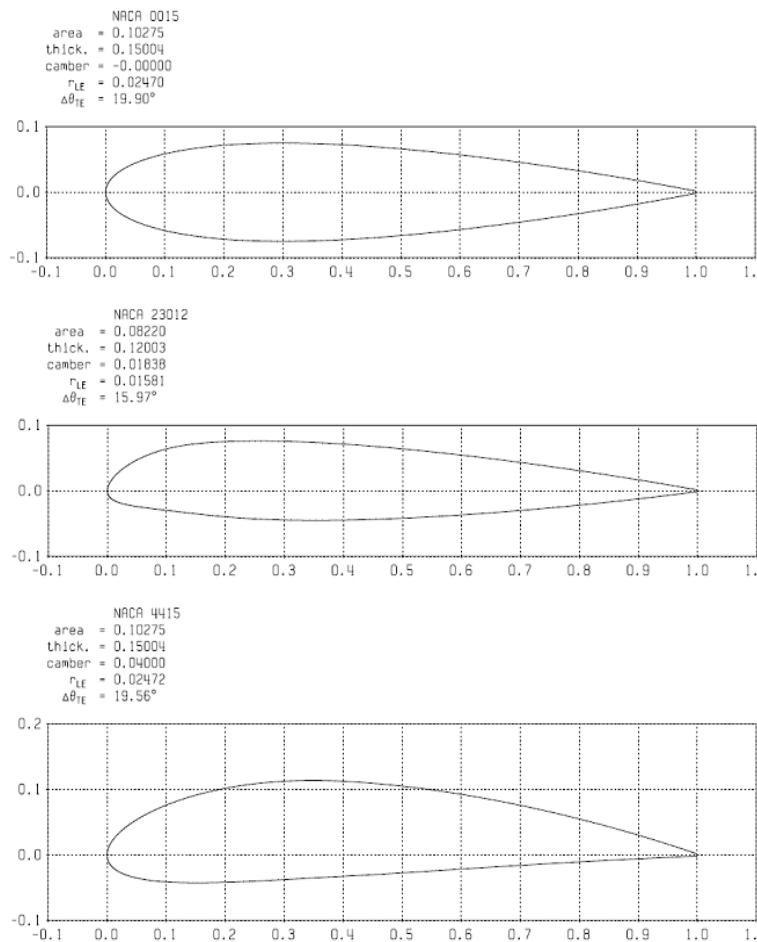
πτερύγια να είναι εκτεθειμένα στην ροή του αέρα με μεγαλύτερη γωνία προσβολής, ικανή ώστε να προκαλέσει αποκόλληση της ροής. Πτερύγια με χαμηλό συντελεστή C_{lmax} επιτυγχάνουν καλύτερη και ηπιότερη πέδηση με δημιουργία μικρής έντασης ταλαντώσεων και θορύβου [16,19,41,52]. Αντίθετα, πτερύγια υψηλότερου συντελεστή C_{lmax} παρουσιάζουν αυξημένες ταλαντώσεις και θόρυβο κατά την πέδηση, παρουσιάζουν όμως πολύ καλύτερη συμπεριφορά κατά την εκκίνηση.

Η τεχνολογία μεταβλητών στροφών του ρότορα χρησιμοποιείται από πολύ παλιά στις ανεμογεννήτριες με μόνη διαφορά τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται κάθε φορά [53]. Αυτού του είδους οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου ο άνεμος έχει ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου συνεπάγονται διακυμάνσεις στη συχνότητα του παραγόμενου από την ανεμογεννήτρια ρεύματος. Μια ανεμογεννήτρια με αυτές τις διακυμάνσεις συχνότητας στο παραγόμενο ρεύμα είναι αδύνατο να συνδεθεί σε κάποιο δίκτυο (συγκεκριμένης συχνότητας) καθώς θα προκαλέσει ζημιά είτε στο δίκτυο είτε στην ίδια τη γεννήτρια [53]. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε ήδη από το 1920 σε αμερικανικές φάρμες όπου χρησιμοποιούνταν γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (DC) για να φορτίζουν συσσωρευτές και να τροφοδοτούν με συνεχές ρεύμα εξοπλισμό συνεχούς ρεύματος [3,4,53]. Αργότερα, χρησιμοποιήθηκαν μοντέρνες τεχνολογίες ηλεκτρονικών ισχύος που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα (μεταβαλλόμενης συχνότητας) της ανεμογεννήτριας, σε συνεχές και στη συνέχεια πάλι σε εναλλασσόμενο σταθερής συχνότητας (AC-DC-AC converter) [3,4,53]. Για μεγάλες ανεμογεννήτριες εκτός των μετατροπών AC-DC-AC χρησιμοποιήθηκαν και άλλες συσκευές άμεσης μετατροπής της συχνότητας από εναλλασσόμενο σε εναλλασσόμενο (AC-AC converter) [3,4,53]. Τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας αυτού του τύπου είναι αρκετά λεπτά και παρουσιάζουν υψηλό συντελεστή C_{lmax} [3,4,26,36,37,53].

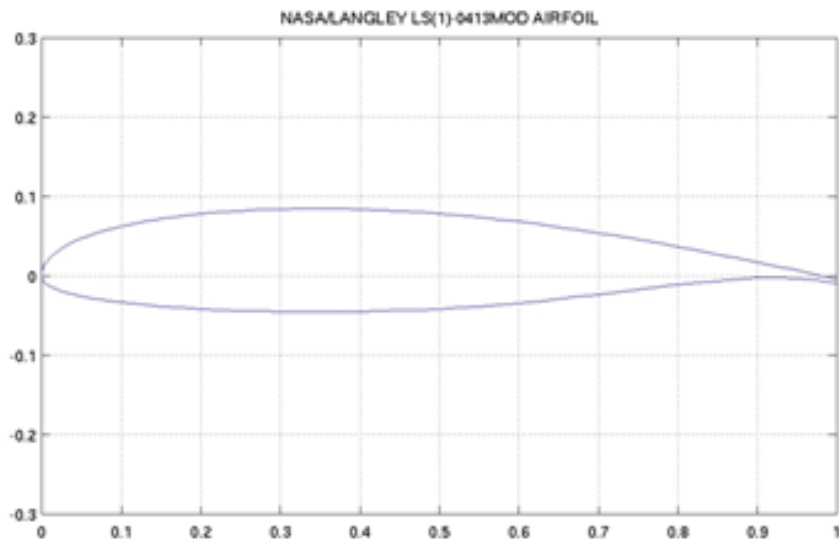
Την μεγαλύτερη εξέλιξη στον τομέα των ανεμογεννητριών αποτελούν οι ανεμογεννήτριες μεταβαλλόμενου βήματος πτερυγίου. Οι ανεμογεννήτριες αυτές είναι εξοπλισμένες με έναν μηχανισμό που περιστρέφει τα πτερύγια, παρόμοιο με αυτόν των ρυθμιζόμενων με αποκόλληση της ροής ενεργητικής πέδησης [34,35]. Η διαφορά έγκειται στο ότι αυτές οι ανεμογεννήτριες διαθέτουν ένα ειδικό σύστημα ελέγχου που καθορίζει το βέλτιστο βήμα ώστε να παράγεται συνεχώς η μέγιστη δυνατή ισχύς [34,35]. Τα πτερύγια μιας τέτοιας ανεμογεννήτριας είναι πολύ λεπτά και σχεδιασμένα ώστε να εμφανίζουν πολύ υψηλές τιμές του μέγιστου συντελεστή άνωσης C_{lmax} .

1.3.6 Αεροτομές που χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες

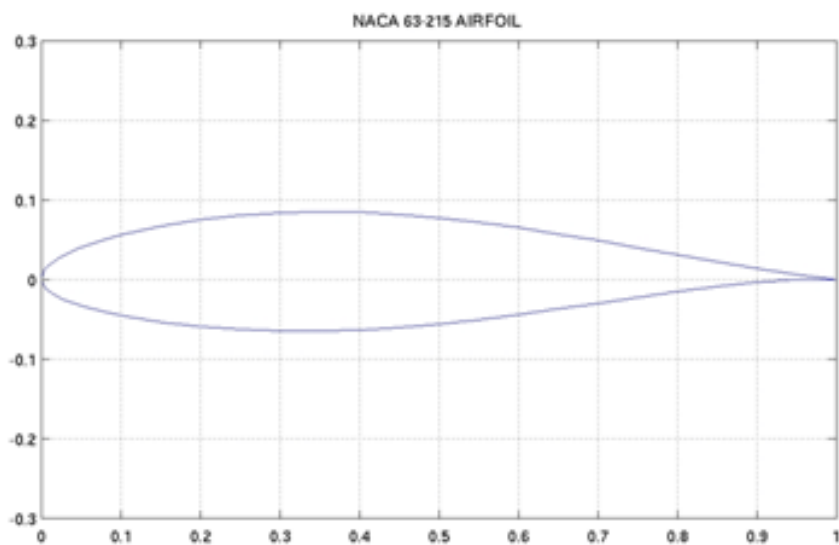
Τα πρώτα πατενταρισμένα σχήματα αεροτομών αναπτύχθηκαν το 1884 από τον H.F. Phillips [50,51,52]. Ο Phillips ήταν ο πρώτος που διεξήγαγε σοβαρά πειράματα με χρήση αεροσύραγγας. Το 1902, οι αδερφοί Wright διεξήγαγαν τα δικά τους πειράματα σε αεροσύραγγα [50,51,52], τα οποία οδήγησαν στον σχεδιασμό αποτελεσματικών αεροτομών κάτι το οποίο συνεισέφερε σημαντικά στη πρώτη επιτυχή τους πτήση, τον Δεκέμβριο του 1903. Στις αρχές του 1930, η αμερικανική National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) - μετέπειτα γνωστή ως NASA, διεξήγαγε πειράματα σε αεροσύραγγα τα οποία οδήγησαν στην σχεδίαση συγκεκριμένων γεωμετρικών αεροτομών [50,51,52]. Πολλές από τις αεροτομές NACA χρησιμοποιούνται και σήμερα, κυρίως στην αεροναυσιπλοΐα [2,10,20]. Αρκετές αεροτομές NACA που αναπτύχθηκαν για χρήση σε αεροσκάφη χρησιμοποιήθηκαν και στις ανεμογεννήτριες [2,3,4,26,50,51], χωρίς όμως να παρέχουν ιδιαίτερα αποτελέσματα και αποδοτικότητα. Πέντε από αυτές τις αεροτομές [36,37,38] παρουσιάζονται στα σχήματα 1.17-18.



Σχήμα 1.17: Αεροτομές NACA 0015, NACA 23012 και NACA 4415 [34]



Σχήμα 1.18 : Η αεροτομή LS(1)-0413 Mod [34]



Σχήμα 1.19 : Η αεροτομή NACA 63-215 [34]

Οι σειρές NACA 230XX και NACA 44XX (τα ψηφία XX συμβολίζουν τον λόγο πάχους προς χορδή-%) χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές σύγχρονες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, με λόγο πάχους προς χορδή 28% στη ρίζα ως 12% στην ακμή [2]. Αυτές οι αεροτομές δεν παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, για παράδειγμα οι NACA 230XX έχουν μέγιστο συντελεστή C_l ο οποίος εξαρτάται από τις επιφανειακές επικαθίσεις, την σκωρία και γενικότερα την επιφανειακή τραχύτητα του πτερυγίου [2]. Η σειρά NACA 63-2XX παρουσιάζει (σχήμα 1.19) τη βέλτιστη αποτελεσματικότητα χωρίς σημαντική εξάρτηση

από την επιφανειακή τραχύτητα του πτερυγίου [36,37,38]. Η σειρά LS(1)-04XX σχεδιάστηκε να αντέχει την επιφανειακή τραχύτητα, όμως η εφαρμογή τους σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχει δείξει αντίθετα αποτελέσματα. Για τις περισσότερες ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα χρησιμοποιούνται συμμετρικές αεροτομές της τετραπήφιας σειράς NACA 00XX με λόγο πάχους προς χορδή μεταξύ 12% και 15% [36,37,38].

Τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύχθηκαν ειδικές αεροτομές για χρήση σε ανεμογεννήτριες. Η ανάπτυξη αεροτομών για χρήση σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ξεκίνησε το 1984 σαν μια κοινή προσπάθεια των αμερικανικών National Renewable Energy Laboratory (NREL), του Solar Energy Research Institute (SERI) και της Airfoils Incorporated [36,37,38]. Από τότε αναπτύχθηκαν 11 οικογένειες αεροτομών για χρήση σε διάφορα μεγέθη αξόνων ανεμογεννητριών, με χρήση του λογισμικού Eppler Airfoil Design and Analysis Code, των Richard Eppler και Dan Somers. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στα πτερύγια για ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Οι οικογένειες αεροτομών της NREL ανταποκρίνονται στις σχεδιαστικές προδιαγραφές και απαιτήσεις των πτερυγίων όλων των τύπων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα, ρυθμιζόμενων με αποκόλληση της ροής, μεταβαλλόμενου βήματος και μεταβαλλόμενων στροφών [26].

Για ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, ρυθμιζόμενων με αποκόλληση της ροής, η βέλτιστη ισχύς επιτυγχάνεται με αεροτομές που περιορίζουν τον μέγιστο συντελεστή άνωσης. Ο περιορισμός του C_{lmax} επιτρέπει χρήση μεγαλύτερου δίσκου σάρωσης (περιοχή που σαρώνουν τα πτερύγια) για δεδομένη γεννήτρια [26]. Για ανεμογεννήτριες μεταβαλλόμενου βήματος και στροφών χρησιμοποιούνται αεροτομές υψηλών C_{lmax} που συνεπάγονται λεπτότερα πτερύγια [26]. Παχύτερες αεροτομές κάνουν τα πτερύγια περισσότερα δύσκαμπτα αποτρέποντας και την περίπτωση να μικρύνει το διάκενο μεταξύ πύργου και πτερυγίων λόγω κάμψης των πτερυγίων [26]. Επίσης, παχύτερες αεροτομές στην ακμή των πτερυγίων διευκολύνουν τις συσκευές περιορισμού της ταχύτητας. Γενικά, οι ανεμογεννήτριες που ρυθμίζονται μέσω αποκόλλησης της ροής χρησιμοποιούν παχιά, δύσκαμπτα πτερύγια. Στον πίνακα 1.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται όλες οι οικογένειες αεροτομών NREL για ανεμογεννήτριες.

Πλέον, πολλές από αυτές τις οικογένειες της NREL αποτελούν ιδιοκτησία εταιριών κατασκευής ανεμογεννητριών και ως εκ τούτου η γεωμετρία τους δεν παρέχεται ελεύθερα. Η πρώτη οικογένεια αεροτομών για πτερύγια μικρών ανεμογεννητριών σχεδιάστηκε το 1993 και χρησιμοποιεί στη βάση την αεροτομή S823 και στην ακμή την αεροτομή S822. Οι σχεδιαστικές προδιαγραφές που τέθηκαν για αυτήν την οικογένεια ορίζουν για την περιοχή της ακμής, συντελεστές $C_{lmax}=1$ και $C_{dmin}=0.01$ για $Re=600000$. Για την βάση

ορίστηκαν $C_{lmax}=1.2$ και $C_{dmin}=0.018$ για $Re=400000$ [26]. Σε μικρές ανεμογεννήτριες απαιτούνται αρκετά στιβαρά πτερύγια και για αυτό επιλέχθηκε η βάση να έχει πάχος ίσο με το 21% της χορδής και ακμή πάχους 16% της χορδής. Το 2001-2002 σχεδιάστηκε μια νέα οικογένεια αεροτομών για εφαρμογή σε μικρές ανεμογεννήτριες [26]. Αυτή η οικογένεια αποτελείται από τις αεροτομές S835 (βάση), S833 (κύρια), S834 (ακμή).

Πίνακας 1.2: Οικογένειες αεροτομών της NREL [26]

Ανεμογεννήτρια			Πάχος	Αεροτομή		
Διάμετρος (m)	Γεννήτρια (kW)	Τύπος		Κύρια	Ακμή	Βάση
3-10	2-20	Μεταβλητών στροφών Μεταβλητού βήματος	Παχιές	—	S822	S823
				S833	S834	S835
10-20	20-150	Μεταβλητών στροφών Μεταβλητού βήματος	Λεπτές	S801	S802 S803	S804
				Ρυθμιζόμενες με αποκόλληση της ροής	Λεπτές	S805 S805A
		Παχιές	S819		S820	S821
20-30	150-400	Ρυθμιζόμενες με	Παχιές	S809	S810	S811

		αποκόλληση της ροής		S812	S813	S814 S815
20-40		Μεταβλητών στροφών Μεταβλητού βήματος		S825	S826	S814 S815
30-50	400-1000	Ρυθμιζόμενες με αποκόλληση της ροής	Παχιές	S816	S817	S818
40-50			Παχιές	S827	S828	S818
		Μεταβλητών στροφών Μεταβλητού βήματος	Παχιές	S830	S831 S832	S818

Το 2001-2002 σχεδιάστηκε μια νέα οικογένεια αεροτομών για εφαρμογή σε μικρές ανεμογεννήτριες [26]. Αυτή η οικογένεια αποτελείται από τις αεροτομές S835 (βάση), S833 (κύρια), S834 (ακμή). Οι περιορισμοί σε αυτή την οικογένεια αεροτομών είναι παρόμοιοι με αυτούς της προκατόχου της, με εξαίρεση το γεγονός ότι σχεδιάστηκαν για χαμηλότερους αριθμούς Reynolds και αποτελείται από τρεις αεροτομές ώστε να περιγράφει ακριβέστερα το πτερύγιο.

Όλες αυτές οι αεροτομές σχεδιάστηκαν και εξελίσσονται με ένα και μοναδικό σκοπό, τη βελτιστοποίηση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών των πτερυγίων ώστε να παράγεται με αποδοτικότερο τρόπο ηλεκτρική ενέργεια.

1.3.7 Βέλτιστος σχεδιασμός πτερυγίων

Από όλα τα παραπάνω φαίνεται ξεκάθαρα ότι όσο πιο αποδοτικός είναι ο σχεδιασμός των πτερυγίων του δρομέα τόσο πιο αποδοτική είναι και η ανεμογεννήτρια. Ο σχεδιασμός εξαρτάται από το είδος της ανεμογεννήτριας, από το απαιτούμενο μήκος των

πτερυγίων, τον μηχανισμό ελέγχου της και τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής εγκατάστασής της. Επίσης από την βιβλιογραφία φαίνεται ότι ο σχεδιασμός αφορά και την οικογένεια αεροτομών που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη του πτερυγίου, από την μεταξύ τους συστροφή και από διάφορες σχεδιαστικές ιδιαιτερότητες του ακροπτερυγίου. Καθώς λοιπόν η αιολική ενέργεια είναι μια πολύ καλή επιλογή εναλλακτικής και οικολογικής ενέργειας και αφού η χρήση ανεμογεννητριών αυξάνεται όλο και πιο πολύ θα πρέπει οι μηχανικοί, οι σχεδιαστές και κατασκευαστές να στραφούν στην δημιουργία ανεμογεννητριών με όσο το δυνατόν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την βελτιστοποίηση πτερυγίων, ώστε να παραχθούν νέα πτερύγια με βελτιστοποιημένα χαρακτηριστικά. Οι στόχοι που πρέπει να εκπληρώνει ο σχεδιασμός πτερυγίων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα [1] είναι:

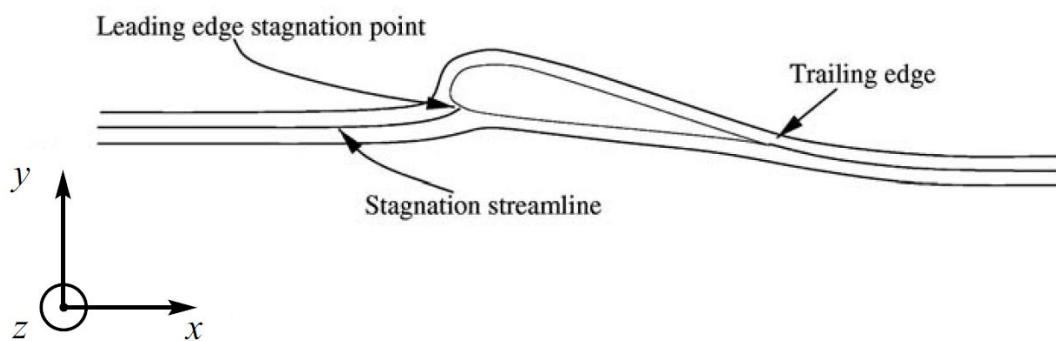
- Μεγιστοποίηση και διατήρηση της τιμής του μέγιστου συντελεστή ισχύος C_p
- Βελτιστοποίηση της τιμής του αξονικού επαγωγικού και του εφαιπτομενικού επαγωγικού συντελεστή
- Μεγιστοποίηση της ισχύος ανά ταχύτητα ανέμου
- Βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του πτερυγίου από την βάση έως και το ακροπτερύγιο

2 Αεροδυναμική των ανεμογεννητριών και η Κλασική Θεωρία Δίσκου Ορμής (BEM)

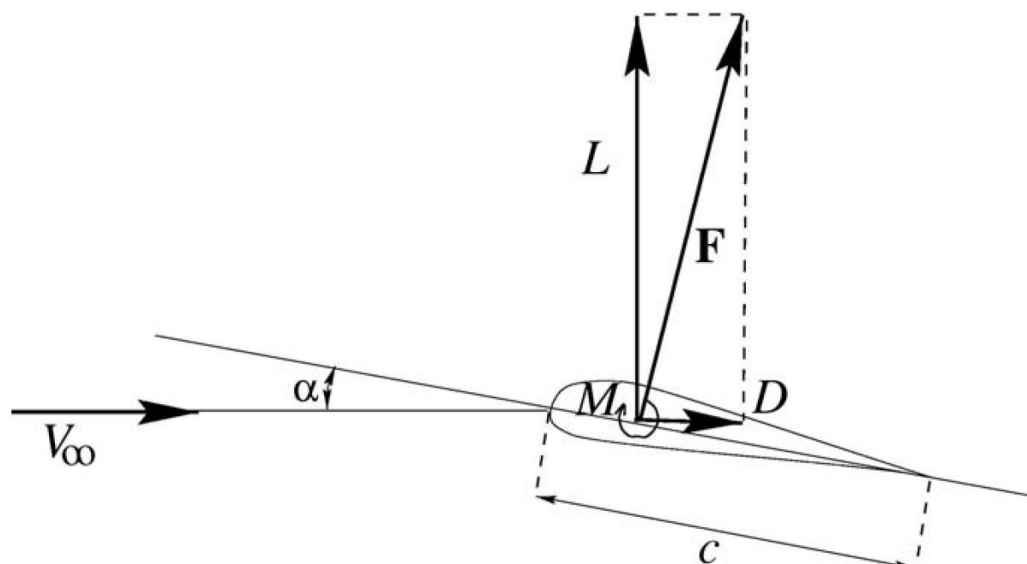
Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι μακριές και λεπτές δομές στις οποίες η ταχύτητα κατά την κατεύθυνση του ανέμου είναι πολύ μεγαλύτερη από την εγκάρσια κατεύθυνση και έτσι θεωρείται σε πολλά αεροδυναμικά μοντέλα ότι η ροή σε μία επιλεγμένη ακτινική θέση είναι δυσδιάστατη και ότι τα δεδομένα των δυσδιάστατων αεροτομών μπορούν να εφαρμοσθούν. Η δυσδιάστατη ροή αποτελείται από ένα επίπεδο και αν αυτό το επίπεδο περιγράφεται με ένα σύστημα συντεταγμένων όπως στο σχήμα 2.1, η συντεταγμένη της ταχύτητας στην κατεύθυνση z είναι μηδέν.

2.1 Δυσδιάστατα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά

Προκειμένου να αντιληφθούμε μία δυσδιάστατη ροή είναι αναγκαίο να προεκτείνουμε μία αεροτομή σε ένα πτερύγιο άπειρης κλίμακας. Σε ένα αληθινό πτερύγιο η χορδή και η περιστροφή αλλάζουν ανάλογα με την κλίμακα και το πτερύγιο αρχίζει με μία βάση και τελειώνει σε μία άκρη, αλλά για τα μακριά λεπτά πτερύγια, όπως αυτά στα σύγχρονα ανεμόπτερα και στις ανεμογεννήτριες, ο Prandtl έχει δείξει ότι τα δυσδιάστατα δεδομένα για τις δυνάμεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν εάν η γωνία πρόσπτωσης (α) διορθωθεί σύμφωνα με τις δίνες πίσω από την ακμή φυγής (trailing edge) της αεροτομής του πτερυγίου (Prandtl και Tietjens, 1957). Είναι τώρα ξεκάθαρο ότι τα δυσδιάστατα αεροδυναμικά δεδομένα είναι πρακτικού ενδιαφέροντος, παρόλο που είναι δύσκολο αυτό να γίνει κατανοητό. Το σχήμα 2.1 απεικονίζει το σημείο ανακοπής (leading edge stagnation point) στην ακμής προσβολής που υπάρχει στη δυσδιάστατη ροή που διασχίζει μία αεροτομή [1,3,4,5]. Στο σχήμα 2.2, η δύναμη αντίδρασης F από τη ροή αναλύεται σε μία κατεύθυνση κάθετη προς την ταχύτητα στο άπειρο V_{∞} και σε μία κατεύθυνση παράλληλη στο V_{∞} . Η πρώτη είναι γνωστή ως άνωση (L) και η δεύτερη ως αντίσταση (D).



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση των ροικών γραμμών γύρω από την αεροτομή [1]



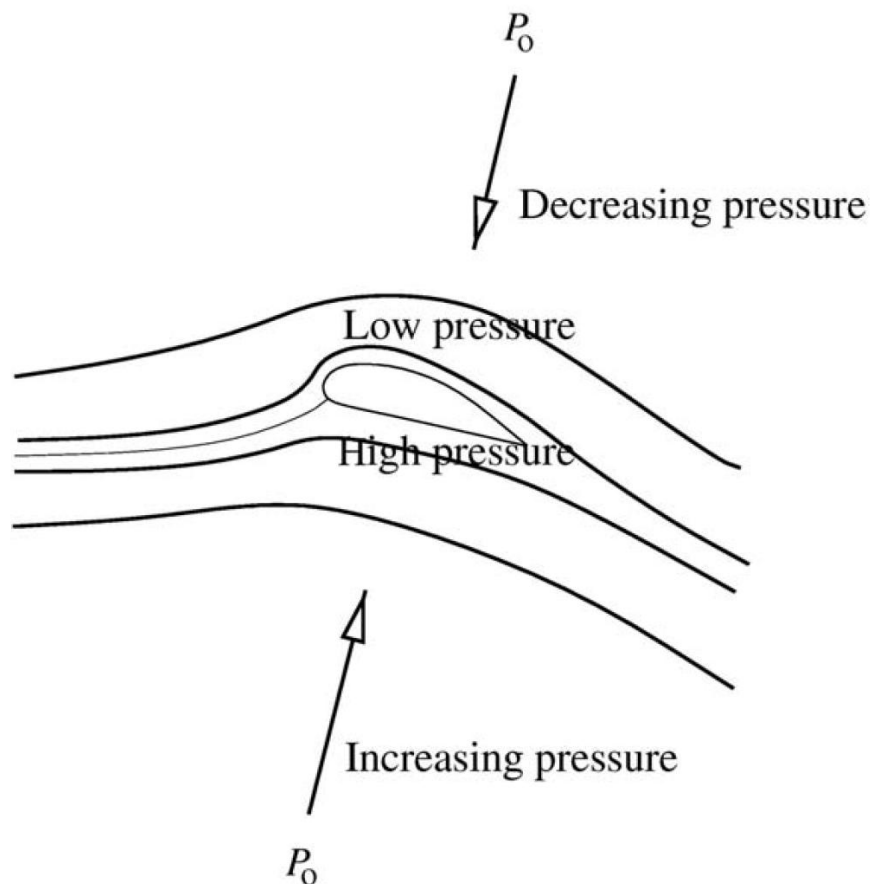
Σχήμα 2.2: Απεικόνιση της άνωσης και της αντίστασης [1]

Αν η αεροτομή σχεδιάζεται για αεροσκάφος είναι προφανές ότι η αναλογία L/D θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί. Η άνωση είναι η δύναμη που χρησιμοποιείται για να υπερνικηθεί η βαρύτητα και όσο μεγαλύτερη η άνωση τόσο μεγαλύτερη η μάζα που μπορεί να ανυψωθεί από το έδαφος. Για να διατηρηθεί μία σταθερή ταχύτητα η αντίσταση πρέπει να ισορροπηθεί από μία δύναμη ώθησης προερχόμενη από μία μηχανή και όσο μικρότερη είναι η αντίσταση τόσο μικρότερη και η απαιτούμενη μηχανή. Οι συντελεστές της άνωσης και της αντίστασης C_l και C_d ορίζονται ως [1,3,4,5]:

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V \alpha^2 c}$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V \alpha^2 c}$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα και c το μήκος της χορδής της αεροτομής. Ας σημειωθεί ότι η μονάδα για την άνωση και την αντίσταση στις εξισώσεις είναι δύναμη ανά μονάδα μήκους (N/m). Μια γραμμή χορδής μπορεί να οριστεί ως η γραμμή από την ακμή φυγής ως τη μύτη της αεροτομής (σχήμα 2.2) [1,3,4,5]. Για να περιγράψουμε απόλυτα τις δυνάμεις είναι επίσης απαραίτητο να γνωρίζουμε τη ροπή (M) για ένα σημείο της αεροτομής. Αυτό το σημείο συχνά τοποθετείται στη γραμμή χορδής στο σημείο $c/4$ από την ακμή προσβολής.



Σχήμα 2.3: Απεικόνιση της δημιουργίας δύναμης άνωσης [1]

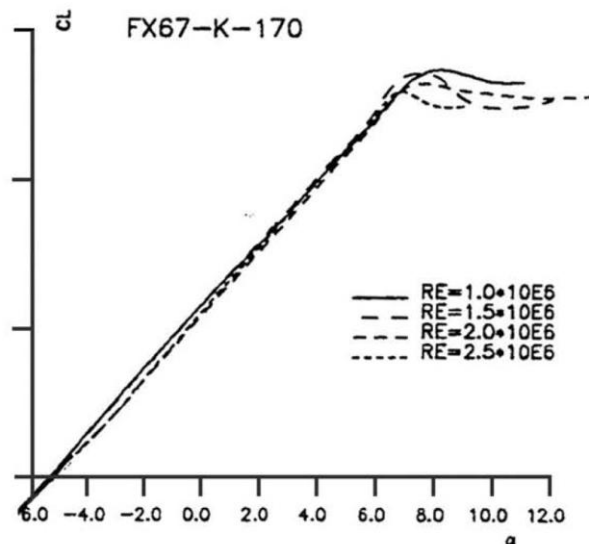
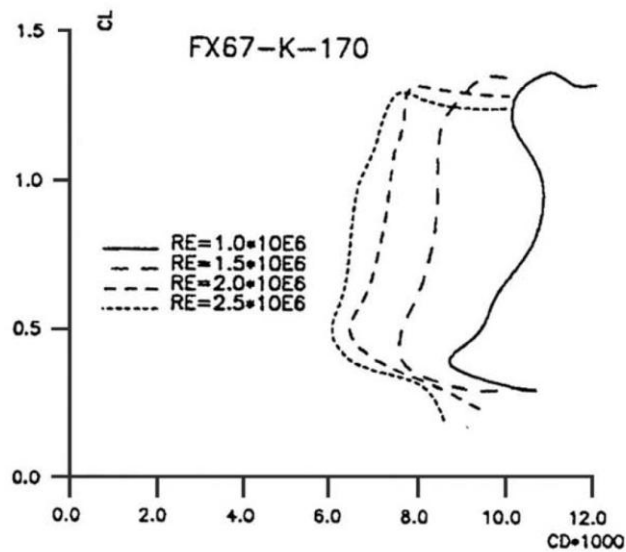
Η ροπή είναι θετική όταν τείνει να περιστρέφει την αεροτομή στο σχήμα 2.2 δεξιόστροφα και ο συντελεστής ροπής (C_m) ορίζεται ως:

$$C_m = \frac{M}{1/2 \rho V_\infty^2 c^2}$$

Η φυσική εξήγηση της άνωσης είναι ότι το σχήμα της αεροτομής αναγκάζει - ωθεί τις ροές να στρέφονται γύρω από τη γεωμετρία της, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Από τη βασική μηχανική ρευστών είναι γνωστό ότι μία κλίση πίεσης είναι απαραίτητη για να καμπυλώνει τις ροές $dP/dr = \rho \cdot V^2/r$, r είναι η καμπυλότητα της ροής και V η ταχύτητα. Αυτή η κλίση πίεσης φέρεται ως η κεντρομόλος δύναμη γνωστή από την κυκλική κίνηση ενός σωματιδίου.

Εφόσον υπάρχει ατμοσφαιρική πίεση P_0 , από την αεροτομή πρέπει να υπάρχει μία πίεση χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική στην επάνω μεριά της αεροτομής και μία πίεση υψηλότερη από την ατμοσφαιρική στην κατώτερη μεριά της αεροτομής. Αυτή η διαφορά πίεσης δίνει μια ανυψωτική δύναμη στην αεροτομή. Όταν η αεροτομή είναι σχεδόν ευθυγραμμισμένη με τη ροή, το οριακό στρώμα παραμένει επαπτόμενο και η σχετική αντίσταση προκαλείται κυρίως από την τριβή με τον αέρα.

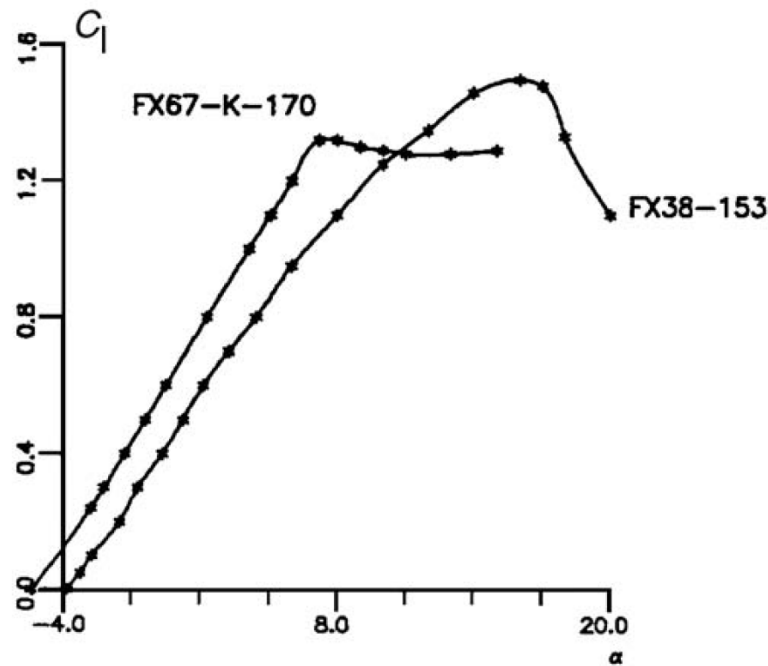
Οι συντελεστές C_l , C_d και C_m είναι εξαρτώμενοι των α , Re και Ma . Η α είναι η γωνία πρόσπτωσης που ορίζεται ως η γωνία ανάμεσα στη γραμμή χορδής και το V_{∞} , Re είναι ο αριθμός Reynolds που βασίζεται στη χορδή και στην V_{∞} , $Re = c \cdot V_{\infty} / \nu$, όπου ν είναι το κινηματικό ιξώδες και το Ma δηλώνει τον αριθμό Mach, με άλλα λόγια η αναλογία ανάμεσα στο V_{∞} και την ταχύτητα του ήχου. Για μία ανεμογεννήτρια και ένα αργά κινούμενο αεροσκάφος οι συντελεστές της άνωσης, της αντίστασης και της ροπής είναι μόνο λειτουργίες των α και Re . Για μία δεδομένη αεροτομή οι συμπεριφορές των C_l , C_d και C_m μετρώνται ή υπολογίζονται και σχεδιάζονται σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Ένα παράδειγμα με καταγεγραμμένες γωνίες πρόσπτωσης για την αεροτομή FX67-K-170 φαίνεται στο σχήμα 2.4 [1,3,4,5].



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση της αναλογίας $C_l - C_d$ και $C_l - \alpha$ της αεροτομής FX67-K-170 για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds [1]

Η C_l αυξάνεται γραμμικά με την α , με μία κλίση περίπου $2\pi/\text{rad}$, ως ένα συγκριμένο μέγεθος της α , όπου φτάνουμε το μέγιστο μέγεθος του C_l . Από εδώ και πέρα αναπτύσσεται αποκόλληση της ροής και το C_l μειώνεται σε άμεση αναλογία με τη γεωμετρία της αεροτομής. Για τις μικρές γωνίες πρόσπτωσης ο συντελεστής C_d είναι σχεδόν σταθερός, αλλά αυξάνεται γρήγορα μετά την αποκόλληση. Η εξάρτηση του αριθμού Reynolds φαίνεται στο σχήμα 2.4 [1,3,4,5]. Φαίνεται, ειδικά στην αντίσταση, ότι καθώς ο αριθμός Reynolds φτάνει μία συγκεκριμένη τιμή, η εξάρτηση του αριθμού Reynolds γίνεται μικρή. Η εξάρτηση του αριθμού Reynolds συνδέεται με το σημείο της αεροτομής, όπου εμφανίζεται η μετάβαση του οριακού στρώματος από στρωτή σε

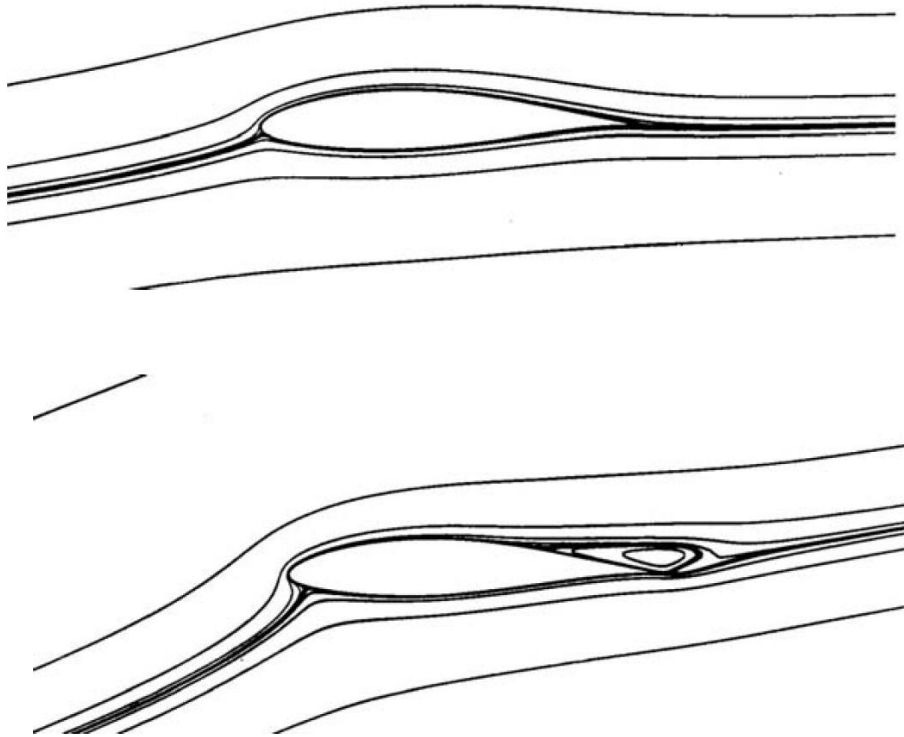
τυρβώδη ροή. Ο τρόπος με τον οποίο αποκολλάται η ροή σε μια αεροτομή είναι κατά πολύ εξαρτημένος από τη γεωμετρία. Οι λεπτές αεροτομές με αιχμηρή μύτη, με άλλα λόγια με υψηλή καμπυλότητα γύρω από την ακμή προσβολής, τείνουν να αποκολλώνται πιο απότομα από τις μεγάλου πάχους αεροτομές. Διαφορετικές συμπεριφορές αποκόλλησης φαίνονται στο σχήμα 2.5, όπου ο C_l (α) συγκρίνεται για δύο διαφορετικές αεροτομές [1,3,4,5]. Η FX38-153 φαίνεται ότι χάνει την άνωσή της πιο γρήγορα από την FX67-K-170.



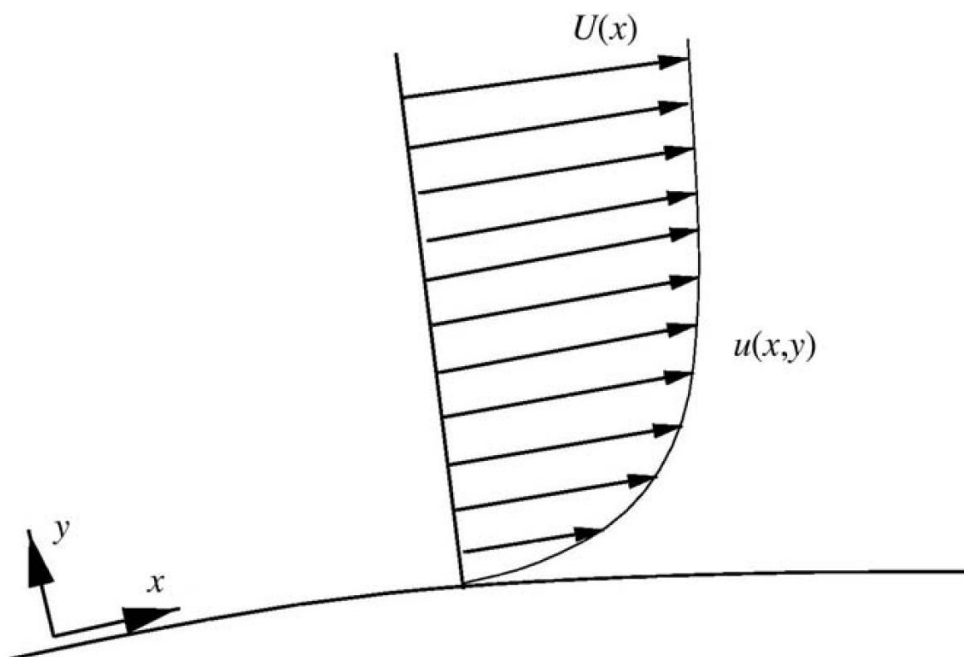
Σχήμα 2.5: Απεικόνιση διαφορετικής συμπεριφοράς αποκόλλησης της ροής για διαφορετικές αεροτομές [1]

Η εξήγηση βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο το οριακό στρώμα χωρίζεται από το επάνω μέρος της αεροτομής. Αν ο διαχωρισμός αρχίζει στην ακμή φυγής της αεροτομής και αυξάνεται αργά με αυξανόμενη τη γωνία πρόσπτωσης, παρατηρείται μία ομαλή αποκόλληση αλλά αν ο διαχωρισμός αρχίζει στην ακμή προσβολής της αεροτομής, ολόκληρο το οριακό στρώμα μπορεί να χωριστεί σχεδόν ταυτόχρονα με δραματική απώλεια στην άνωση. Η συμπεριφορά του τυρβώδους οριακού στρώματος είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και εξαρτάται μεταξύ άλλων, από την καμπυλότητα της αεροτομής, τον αριθμό Reynolds, τη σκληρότητα της επιφάνειας και για υψηλές ταχύτητες, από τον αριθμό Mach επίσης. Το σχήμα 2.6 δείχνει τις υπολογισμένες ροές για μία αεροτομή NACA63-415 σε γωνίες πρόσπτωσης 5° και 15° μοιρών. Για $\alpha=15^\circ$ μοίρες παρατηρείται ένας διαχωρισμός στην ακμής φυγής. Οι δυνάμεις στην αεροτομή προέρχονται από την διανομή πίεσης $p(x)$ και την επιφανειακή τριβή με τον αέρα $T_w = \mu (du / dy)_{y=0}$. (x, y) είναι το σύστημα

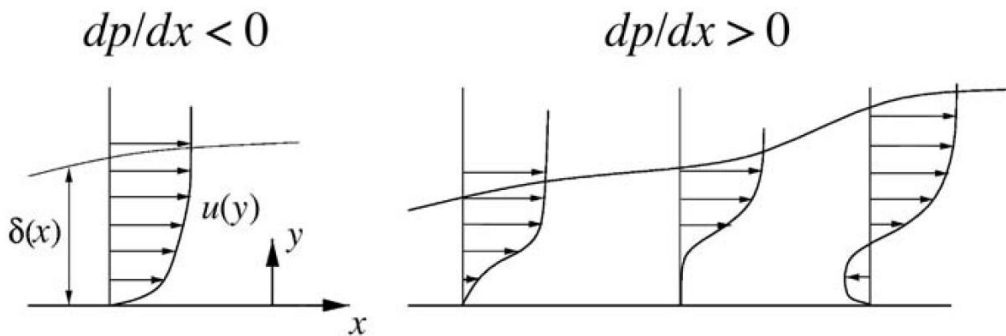
συντεταγμένων στην επιφάνεια όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7 και μ είναι το δυναμικό ιξώδες.



Σχήμα 2.6: Απεικόνιση ροικών γραμμών για γωνίες πρόσπτωσης από 5 και 15 μοίρες [1]



Σχήμα 2.7: Απεικόνιση του τυρβώδους οριακού στρώματος στην επιφάνεια της αεροτομής [1]



Σχήμα 2.8: Απεικόνιση της μορφής του οριακού στρώματος για αρνητική και για θετική κλίση πίεσης [1]

Η επιφανειακή τριβή συμβάλλει κυρίως στην αντίσταση, ενώ η δύναμη που βρίσκεται ενσωματώνοντας την πίεση έχει συντεταγμένες άνωσης και αντίστασης. Η συντεταγμένη αντίστασης από την κατανομή πίεσης είναι γνωστή ως αντίσταση τριβής και γίνεται πολύ μεγάλη όταν η αεροτομή αποκολλάται. Το φαινόμενο της αποκόλλησης συνδέεται στενά με το διαχωρισμό του οριακού στρώματος, έτσι ο πρώτος κανόνας στη μείωση της αντίστασης είναι να αποφύγουμε τον διαχωρισμό. Κοντά στην αεροτομή υπάρχει ένα τυρβώδες οριακό στρώμα λόγω των συνθηκών αστάθειας της ταχύτητας πάνω στην επιφάνεια όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7.

Το σύστημα συντεταγμένων (x,y) είναι ένα τοπικό σύστημα, όπου $x=0$ στο σημείο ανακοπής της ακμής προσβολής και y είναι η κανονική απόσταση από την επιφάνεια. Η πυκνότητα του οριακού στρώματος συχνά καθορίζεται ως η κανονική απόσταση $\delta(x)$ από την επιφάνεια, όπου $u(x)/U(x) = 0.99$ [1]. Επιπλέον το πάχος μετάθεσης $\delta(x)$, το πάχος απώλειας ορμής $\theta(x)$ και ο συντελεστής μορφής $H(x)$ ορίζονται ως:

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

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

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

Η ροική γραμμή ανακοπής (stagnation streamline), στο σχήμα 2.1 χωρίζει το ρευστό που ρέει επάνω από την αεροτομή από το ρευστό που ρέει κάτω από αυτή. Στο σημείο

ανακοπής η ταχύτητα είναι 0 και το πάχος του οριακού στρώματος είναι μικρό. Το ρευστό που ρέει επάνω στην αεροτομή επιταχύνει καθώς περνάει την ακμή προσβολής και εφόσον η ακμή προσβολής είναι κοντά στο σημείο ανακοπής και η ροή επιταχύνει, το οριακό στρώμα είναι λεπτό. Είναι γνωστό από τη θεωρία τριβής του οριακού στρώματος [1,3,4,5] ότι η πίεση είναι περίπου σταθερή από την επιφάνεια ως το άκρο του οριακού στρώματος, πχ. $dp/dy = 0$.

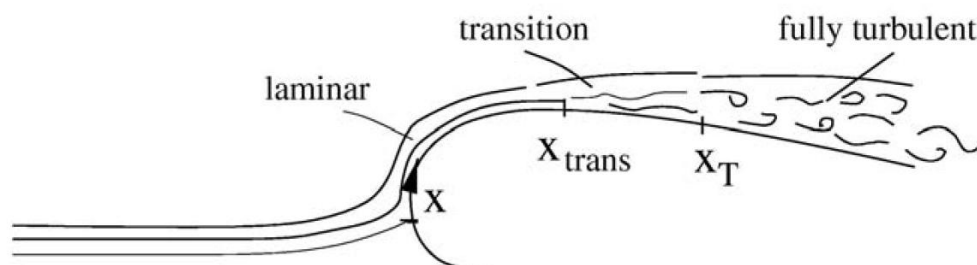
Έξω από το οριακό στρώμα η εξίσωση Bernoulli ισχύει, και εφόσον η ροή επιταχύνει, η πίεση μειώνεται, πχ. $dp/dx < 0$. Στο κατώτερο τμήμα η κλίση της πίεσης είναι πολύ μικρότερη εφόσον η καμπυλότητα της επιφάνειας είναι μικρή σε σχέση με της ακμή προσβολής. Στην ακμή φυγής η πίεση πρέπει να είναι η ίδια στο επάνω και κάτω μέρος (η συνθήκη του Kutta) και έτσι η πίεση πρέπει να ανέβει, $dp/dx > 0$, από μία κατώτατη τιμή κάπου στο επάνω μέρος σε μία υψηλότερη στην ακμή φυγής. Μία δυσμενής κλίση πίεσης, $dp/dx > 0$, μπορεί να οδηγήσει σε διαχωρισμό. Η κλίση της ταχύτητας u στην επιφάνεια δίνεται έτσι από την κλίση πίεσης κατά μήκος του x . Επιπλέον είναι γνωστό ότι $du/dy = 0$ στο $y = \delta$ όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$$

Η u κατανομή ταχύτητας σε μία δυσμενή κλίση πίεσης, $dp/dx > 0$, έχει σχήμα S και ο διαχωρισμός της ροής μπορεί να εμφανισθεί, ενώ η κλίση της ταχύτητας u για $dp/dx < 0$ είναι αρνητική σε ολόκληρο το οριακό στρώμα και το οριακό στρώμα παραμένει εφαιπτόμενο. Μια εικόνα που δείχνει τα διαφορετικά σχήματα του οριακού στρώματος δίνεται στο σχήμα 2.8. Εφόσον η αντίσταση τριβής αυξάνεται δραματικά όταν το οριακό στρώμα διαχωρίζεται, είναι ύψιστης σημασίας για τη λειτουργία της αεροτομής να ελέγχεται η κλίση πίεσης.

Για μικρές τιμές του x η ροή είναι στρωτή όπως στο σχήμα 2.9, αλλά για ένα συγκεκριμένο X_{trans} το στρωτό οριακό στρώμα γίνεται ασταθές και εμφανίζεται μία μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή. Στο X_t η ροή είναι πλήρως τυρβώδης. Στο σχήμα 2.9 απεικονίζεται η μετάβαση από στρωτό σε τυρβώδες οριακό στρώμα. Η μεταβατική διαδικασία είναι ιδιαίτερα σύνθετη και όχι ακόμα πλήρως κατανοητή, αλλά μία περιγραφή του φαινομένου βρίσκεται στον White (1991), όπου δίνονται επίσης κάποια εργαλεία για την πρόβλεψη του X_{trans} . Ένα από τα μοντέλα που κάποιες φορές χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς αεροτομών λέγεται η μέθοδος «one step» του Michel. Η μέθοδος προβλέπει μετάβαση όταν:

$$Re_{\theta} = 2.9 Re_x^{0.4}$$



Σχήμα 2.9: Απεικόνιση της μετάβασης των ροικών γραμμών από στρωτή σε μεταβατική και τέλος σε πλήρως τυρβώδη ροή [1]

όπου $Re_{\theta} = U(x) \cdot \theta(x) / \nu$ και $Re_x = U(x) \cdot x / \nu$. Η τυρβώδης ροή χαρακτηρίζεται από το ότι είναι πιο σταθερή σε περιοχές με θετικές κλίσεις πίεσης, $dp/dx > 0$ και από μια πιο απότομη κλίση ταχύτητας στην επιφάνεια du/dy [1]. Η πρώτη ιδιότητα είναι καλή αφού καθυστερεί την αποκόλληση, αλλά η δεύτερη ιδιότητα αυξάνει την επιφανειακή τριβή και έτσι την αντίσταση. Αυτά τα δύο φαινόμενα αξιοποιούνται στον σχεδιασμό αεροτομών υψηλής απόδοσης που ονομάζονται στρωτές αεροτομές. Στρωτή αεροτομή είναι μια αεροτομή στην οποία ένα μεγάλο τμήμα του οριακού στρώματος είναι στρωτό και εφαιπτόμενο. Για να σχεδιαστεί μία τέτοια αεροτομή είναι απαραίτητο να καθοριστεί η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης, όπου το οριακό στρώμα υποτίθεται ότι είναι στρωτό σε ένα μεγάλο βαθμό. Η αεροτομή τότε κατασκευάζεται έτσι ώστε η ταχύτητα στο άκρο του οριακού στρώματος, $U(x)$, να είναι σταθερή μετά την επιτάχυνση πέρα από την ακμή προσβολής και κατάντι αυτής. Είναι γνωστό από τη θεωρία οριακού στρώματος [1,3,4,5] ότι η κλίση πίεσης εκφράζεται από την ταχύτητα εκτός του οριακού στρώματος ως:

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

Σε αυτή τη γωνία η κλίση πίεσης είναι έτσι μηδέν και δε θα γίνει διαχωρισμός. Για μικρότερες γωνίες πρόσπτωσης η ροή $U(x)$ θα επιταχύνει και το dp/dx γίνεται αρνητικό, το οποίο ξανά αποφεύγει το διαχωρισμό και είναι σταθεροποιητικό για το στρωτό οριακό στρώμα, καθυστερώντας έτσι τη μετάβαση. Σε κάποιο σημείο x στο επάνω μέρος της αεροτομής είναι, απαραίτητο να επιβραδυνθεί η ροή έτσι ώστε να εκπληρωθεί η συνθήκη

του Kutta, με άλλα λόγια η κλίση πίεσης πρέπει να είναι μονάδα στην ακμή φυγής. Εάν αυτή η επιβράδυνση αρχίσει σε μία θέση όπου το οριακό στρώμα είναι στρωτό, το οριακό στρώμα είναι πιθανόν να διαχωριστεί. Αμέσως μετά τη μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή το οριακό στρώμα είναι σχετικά λεπτό και η ορμή κοντά στο τείχος είναι σχετικά μεγάλη και έτσι είναι ικανό να αντέξει μια υψηλή θετική κλίση πίεσης χωρίς διαχωρισμό. Κατά τη διάρκεια της συνεχούς επιβράδυνσης προς την ακμή φυγής η ικανότητα του οριακού στρώματος να αντέξει τη θετική κλίση πίεσης ελαττώνεται και έτσι για να αποφευχθεί ο διαχωρισμός είναι απαραίτητο να μειωθεί η επιβράδυνση προς την ακμή φυγής. Είναι ύψιστης σημασίας να βεβαιωθούμε ότι το οριακό στρώμα είναι τυρβώδες πριν να επιβραδύνουμε το $U(x)$. Αλλά πριν επιλέξουμε μία τέτοια αεροτομή είναι σημαντικό να λάβουμε υπόψη το χαρακτηριστικό της αποκόλλησης και την επιφανειακή τραχύτητα. Σε ένα αεροπλάνο είναι απαραίτητο να πετάς με υψηλό Cl κατά την προσγείωση αφού η ταχύτητα είναι σχετικά χαμηλή. Εάν ο πιλότος ξεπεράσει το Cl_{max} και η ροή αποκολληθεί, θα μπορούσε να είναι καταστροφικό αν το Cl πέσει τόσο δραστικά με τη γωνία πρόσπτωσης όσο στο FX38-153 στο σχήμα 2.5. Το αεροπλάνο θα έχανε την άνωσή του και μπορεί να προσέκρουε στο έδαφος.

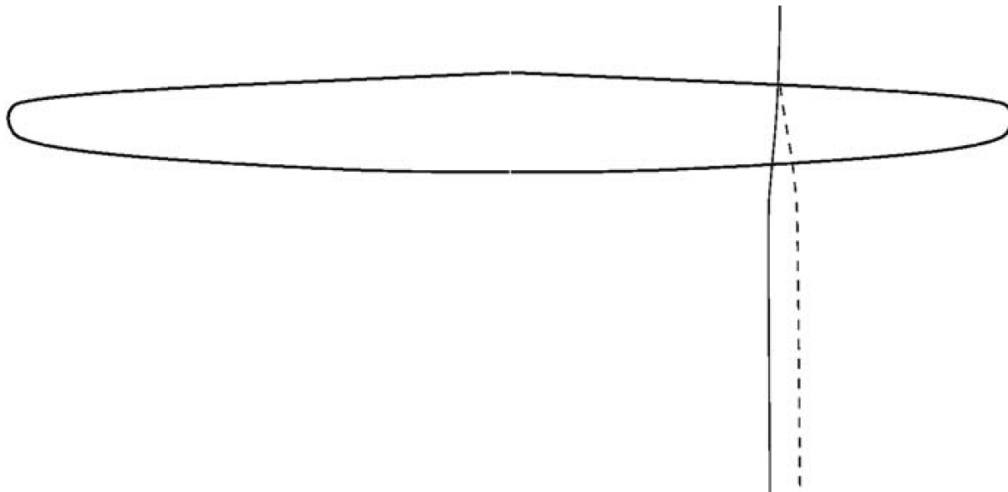
Αν η αεροτομή είναι ευαίσθητη στην τραχύτητα, η καλή λειτουργία χάνεται αν τα φτερά επικαλυφθούν από σκόνη, σωματίδια βροχής ή έντομα, για παράδειγμα. Σε μια ανεμογεννήτρια αυτό θα μπορούσε να αλλάξει την απόδοση με τον καιρό, αν για παράδειγμα η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε περιοχή με πολλά έντομα. Αν μία ανεμογεννήτρια βρίσκεται κοντά στην ακτή, μπορεί να συγκεντρωθεί αλάτι στα πτερύγια, αν ο αέρας έρχεται από τη θάλασσα και αν οι αεροτομές που χρησιμοποιούνται είναι ευαίσθητες στην τραχύτητα, η δύναμη που βγαίνει από τη γεννήτρια θα είναι εξαρτημένη από την κατεύθυνση του ανέμου. Οι Fuglsang και Bak (2003) περιγράφουν κάποιες προσπάθειες να σχεδιαστούν αεροτομές ειδικά για χρήση σε ανεμογεννήτριες, όπου η χαμηλή ευαίσθητη στην τραχύτητα είναι ένας από τους στόχους σχεδιασμού.

Για να υπολογίσουμε την απόδοση δύναμης μίας ανεμογεννήτριας είναι απαραίτητο να έχουμε τα δεδομένα των $Cl(\alpha, Re)$ και $Cd(\alpha, Re)$ για τις αεροτομές των πτερυγίων. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να μετρηθούν ή να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας εξελιγμένα αριθμητικά εργαλεία, αλλά εφόσον η ροή γίνεται ασταθής και τρισδιάστατη μετά την αποκόλληση, είναι δύσκολο να εξασφαλίσουμε αξιόπιστα δεδομένα για υψηλές γωνίες πρόσπτωσης. Σε μία ανεμογεννήτρια πολύ υψηλές γωνίες πρόσπτωσης μπορεί να υπάρχουν τοπικά, έτσι είναι συχνά απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε γραμμική παρεμβολή για τα διαθέσιμα δεδομένα σε υψηλές γωνίες πρόσπτωσης.

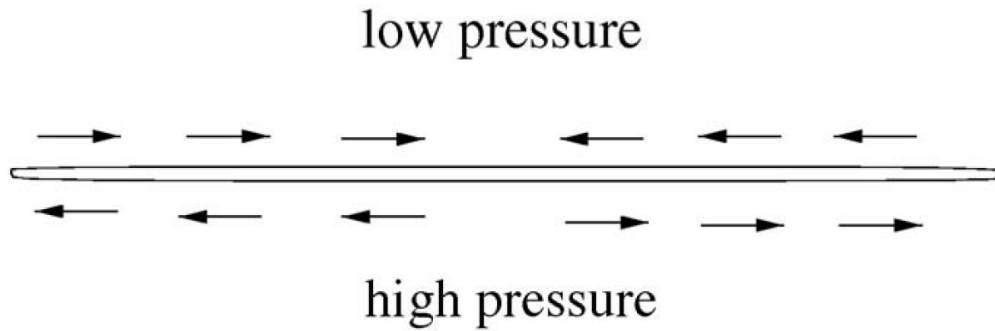
2.2 Τρισδιάστατα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει ποιοτικά τη ροή σε ένα τρισδιάστατο πτερύγιο και πώς η άνωσης αλλάζει την ροή ανάντι και έτσι την τοπική γωνία πρόσπτωσης σε κάθε ακτινική θέση το πτερύγιο. Η βασική θεωρία της στροβιλότητας όπως περιγράφεται σε διάφορα εγχειρίδια (για παράδειγμα Milne - Thomsen, 1952), χρησιμοποιείται. Εφόσον αυτή η θεωρία δε χρησιμοποιείται απευθείας στη θεωρία δίσκου ορμής, αναφέρεται μόνο εν συντομία εδώ. Έτσι αυτό το κεφάλαιο μπορεί να είναι αρκετά αόριστο, με περιορισμένη γνώση της θεωρίας στροβιλότητας, αλλά ελπίζουμε ότι κάποια από τα βασικά αποτελέσματα θα γίνουν ποιοτικά κατανοητά.

Ένα πτερύγιο είναι μία «δοκός» πεπερασμένου μήκους με αεροτομές ως διατομές και έτσι δημιουργείται μία διαφορά πίεσης ανάμεσα στα ανώτερα και κατώτερα μέρη, οδηγώντας έτσι στην αύξηση της άνωσης. Στα άκρα υπάρχουν απώλειες, όπου ο αέρας ρέει γύρω από τις άκρες από την κάτω προς την επάνω μεριά. Οι ροϊκές γραμμές επάνω στο πτερύγιο θα εκτρέπονται προς τα μέσα και οι ροϊκές γραμμές κάτω από το πτερύγιο θα εκτρέπονται προς τα έξω. Έτσι στην ακμή φυγής υπάρχει μία απότομη ανύψωση της εφαπτομενικής ταχύτητας όπως στο σχήμα 2.10 και 2.11.



Σχήμα 2.10: Απεικόνιση των γραμμών ροής πάνω και κάτω από το πτερύγιο [1]



Σχήμα 2.11: Απεικόνιση των ταχυτήτων πίσω από το πτερύγιο [1]

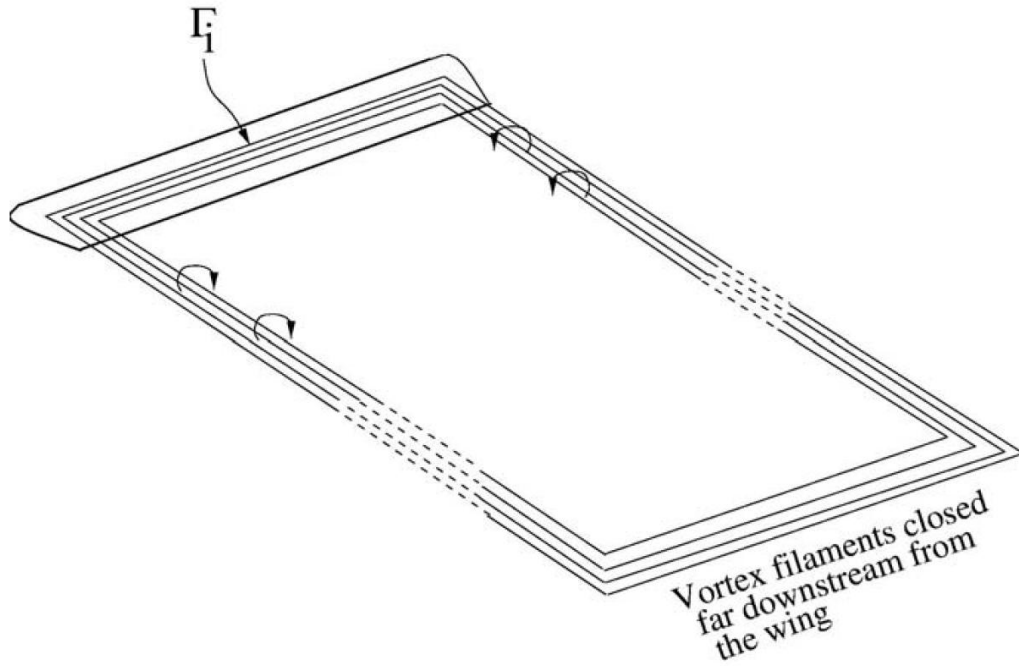
Εξαιτίας αυτής της ανύψωσης υπάρχει ένα διαρκές εκτεταμένο στρώμα στροβιλότητας στην διεύθυνση του ομόρρου πίσω από το πτερύγιο. Αυτό το στρώμα είναι γνωστό ως δίνες φυγής.

Στην κλασσική αεροδυναμική θεωρία (πχ. Milne - Thomsen, 1952) φαίνεται ότι μία κλειστή γραμμή στροβιλότητας με ένταση Γ μπορεί να διαμορφώσει τη ροή σε μία αεροτομή για μικρές γωνίες πρόσπτωσης. Αυτό συμβαίνει επειδή η ροή σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης είναι κυρίως ιδεατή (χωρίς ιξώδες) και εκφράζεται από τη γραμμική εξίσωση Laplace. Φαίνεται αναλυτικά ότι σε αυτή την περίπτωση η άνοση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση Kutta - Joukowski:

$$L = \rho V_{\infty} \times \Gamma.$$

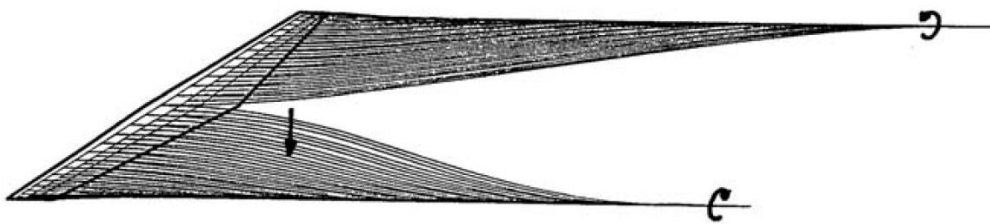
Μία αεροτομή μπορεί έτσι να αντικατασταθεί από μία ροϊκή γραμμή κυκλοφορίας Γ και η άνοση που παράγεται από ένα τρισδιάστατο πτερύγιο μπορεί να διαμορφωθεί για μικρές γωνίες πρόσπτωσης από μία σειρά στροβιλικών νημάτων προσανατολισμένων στην κατεύθυνση του ανέμου, που είναι γνωστές ως οριακές δίνες.

Σύμφωνα με το θεώρημα του Helmholtz, μια ροϊκή γραμμή δε μπορεί να ολοκληρωθεί στο εσωτερικό του ρευστού αλλά πρέπει είτε να ολοκληρωθεί στο όριο του είτε να κλείσει. Ένα ολοκληρωμένο πτερύγιο μπορεί να διαμορφωθεί από μία σειρά από ροϊκές γραμμές, $i=1,2,3,4,\dots$, οι οποίες είναι προσανατολισμένες όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12.

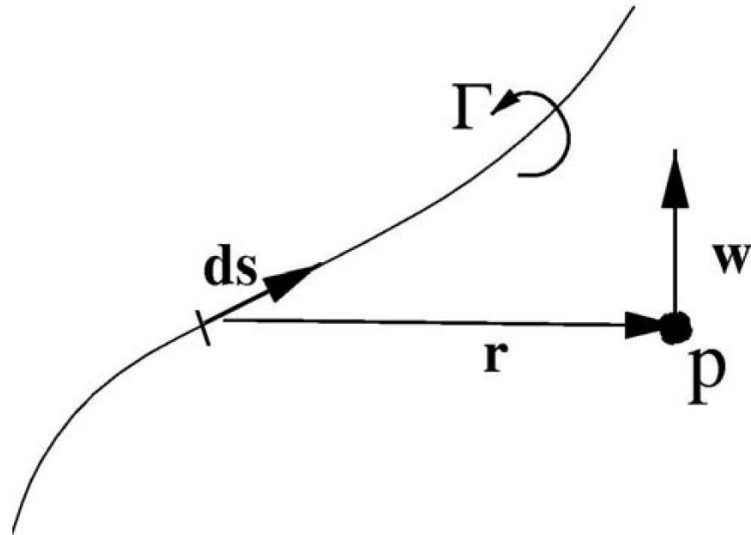


Σχήμα 2.12: Απεικόνιση συστήματος δινών πίσω από το πτερόγιο [1]

Οι δίνες στο πτερόγιο (bound vortices) διαμορφώνουν την άνωση όπως στο σχήμα 2.13 και οι δίνες φυγής (free vortices) διαμορφώνουν την ροϊκή γραμμή που προέρχεται από την τρισδιάστατη μορφή του πτερυγίου. Η ελεύθερες δίνες προκαλούν σύμφωνα με το νόμο του Biot-Savart μία συντεταγμένη ταχύτητα προς τα κάτω σε κάθε ακτινική θέση του πτερυγίου. Για μία κυκλοφορία έντασης Γ η ταχύτητα σε ένα σημείο r είναι όπως στο σχήμα 2.14.



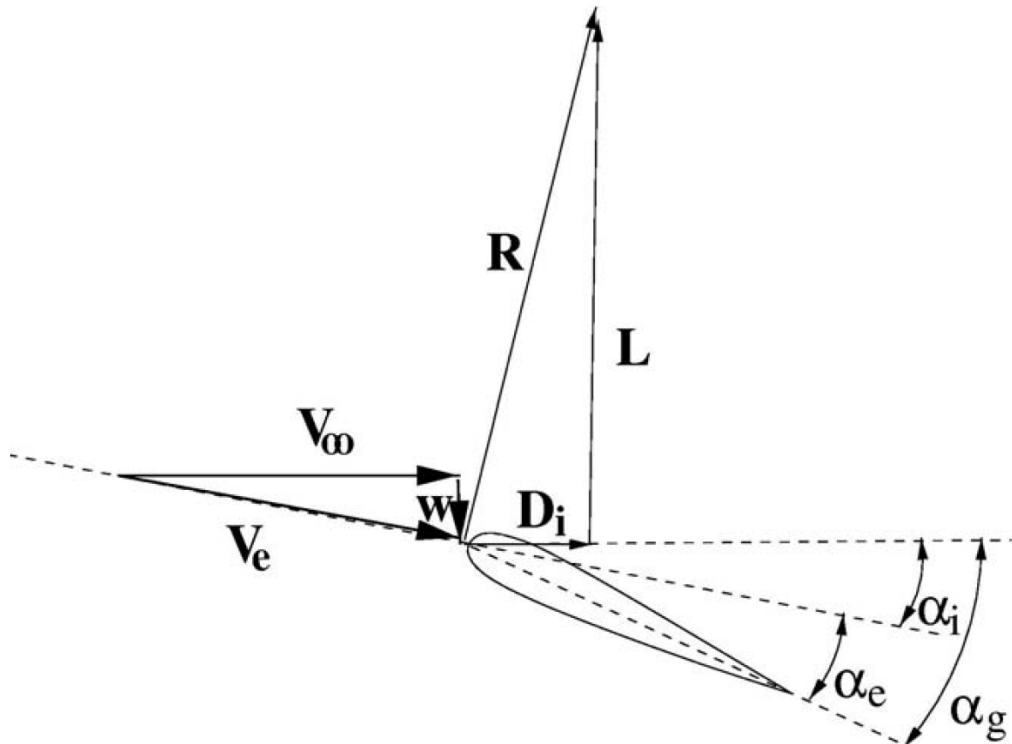
Σχήμα 2.13: Απεικόνιση πιο ρεαλιστικού συστήματος δινών πίσω από το πτερόγιο [1]



Σχήμα 2.14: Απεικόνιση επαγωγικής ταχύτητας λόγω της γραμμής δίνης έντασης Γ [1]

Η συνολική ταχύτητα που προέρχεται από όλες τις δίνες σε ένα τμήμα του πτερυγίου είναι γνωστή ως κάθετη ροής ταχύτητα (downwash) και η τοπική γωνία πρόσπτωσης σε αυτό το τμήμα μειώνεται κατά α_i , εφόσον η σχετική ταχύτητα είναι το διανυσματικό άθροισμα της ταχύτητας του ανέμου V_{∞} και της επαπτομενικής ταχύτητας w . Η αποτελεσματική γωνία πρόσπτωσης είναι:

$$\alpha_e = \alpha_g - \alpha_i.$$



Σχήμα 2.15: Απεικόνιση της αποτελεσματικής γωνίας πρόσπτωσης σε μία τομή του πτερυγίου, η συνολική δύναμη R , άνωσης L και αντίστασης D [1]

Στο σχήμα 2.15 φαίνεται η επαπτόμενη ταχύτητα w , η ταχύτητα του ρευστού V_{∞} και η (effective velocity) V_e για ένα τμήμα του πτερυγίου μαζί με τις διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης α_g , α_i και α_e [1]. Θεωρείται ότι η εξίσωση ισχύει επίσης για ένα τμήμα σε ένα τρισδιάστατο πτερύγιο αν χρησιμοποιηθεί η V_e . Η τοπική δύναμη άνωσης R , η οποία είναι κάθετη προς τη V_e φαίνεται στο σχήμα 2.15. Η ολική άνωση είναι εξ ορισμού η δύναμη που είναι κάθετη προς την V_{∞} . Πρέπει έτσι να αναλυθεί σε κάθετες και παράλληλες της κατεύθυνσης της V_{∞} . Έτσι το πρώτο διάνυσμα είναι η άνωση και το δεύτερο μία αντίσταση που δηλώνεται από την επαπτόμενη αντίσταση D_i . Στις άκρες του πτερυγίου η επαπτόμενη ταχύτητα αποκτά μία τιμή η οποία εξασφαλίζει ακριβώς μηδενική άνωση.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα λοιπόν είναι για ένα τρισδιάστατο πτερύγιο η άνωση μειώνεται σε σύγκριση με ένα δυσδιάστατο πτερύγιο στην ίδια γωνία πρόσπτωσης, και η τοπική άνωση έχει μία συντεταγμένη στην κατεύθυνση της ροής η οποία είναι γνωστή ως επαπτόμενη αντίσταση. Και οι δύο οφείλονται στο «downwash» που προκαλείται από το σύστημα δινών ενός τρισδιάστατου πτερυγίου.

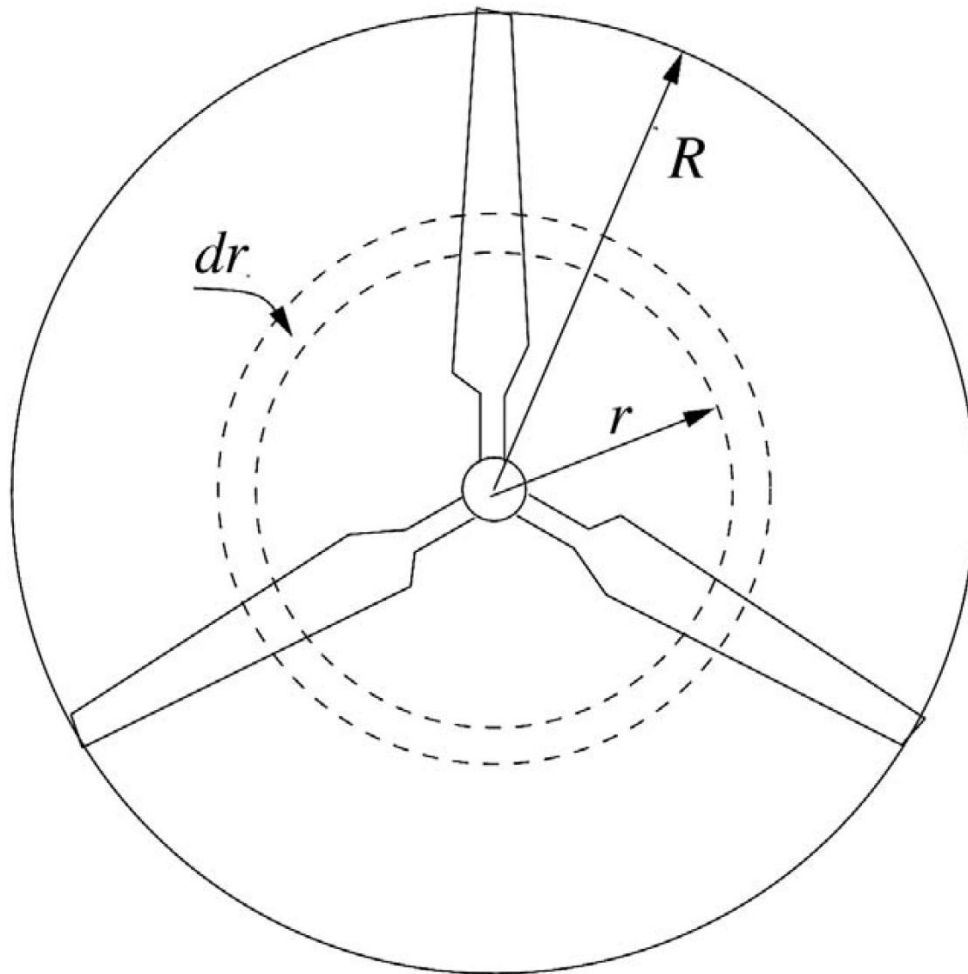
Θεωρείται ότι η τρισδιάστατη ροή περιορίζεται από την «downwash», με άλλα λόγια η ταχύτητα της ροής στο πτερύγιο είναι ακόμα μικρή σε σύγκριση με την ταχύτητα πριν από

τον δρομέα. Η υπόθεση αυτή είναι λογική για τα λεπτά μακριά πτερύγια όπως αυτά ενός ανεμόπτερου ή μίας ανεμογεννήτριας. Μία μέθοδος για να καθοριστεί ποσοτικά η τιμή των δινών και έτσι οι εφαιπόμενες ταχύτητες είναι η λύση του Multhopp για την ολοκληρωτική εξίσωση του Prandtl. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται αναλυτικά για παράδειγμα στους Schlichting και Truckenbrondt (1959) και δε θα αναφερθεί εδώ, αλλά είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι το σύστημα δινών που παράγεται από ένα τρισδιάστατο πτερύγιο αλλάζει τις τοπικές συνθήκες της ροής στο πτερυγίου, με άλλα λόγια παρόλο που η ροή είναι τοπικά δισδιάστατη δε μπορεί να εφαρμοσθεί η γεωμετρική γωνία πρόσπτωσης όταν υπολογίζουμε τις δυνάμεις επάνω στο πτερύγιο. Αυτό το λάθος έγινε στην παλαιότερη θεωρία δίσκου ορμής και η ασυμφωνία ανάμεσα στην μετρημένη και την υπολογιζόμενη απόδοση θεωρούνταν ότι οφείλονται σε λάθος δεδομένα 2-D αεροτομών.

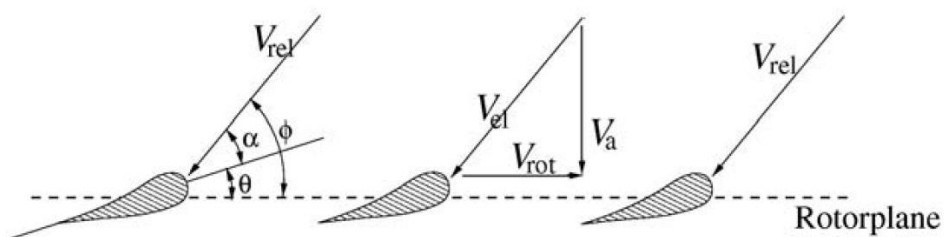
Σε ένα περιστρεφόμενο πτερύγιο οι Coriolis και φυγόκεντρες δυνάμεις παίζουν σημαντικό ρόλο στα διαχωρισμένα οριακά στρώματα που εμφανίζονται μετά την αποκόλληση. Σε ένα διαχωρισμένο οριακό στρώμα η ταχύτητα και έτσι η ορμή είναι σχετικά μικρές σε σύγκριση με την φυγόκεντρη δύναμη, η οποία αρχίζει έτσι να ωθεί το ρευστό προς την κορυφή και την άκρη. Όταν το ρευστό κινείται ακτινικά προς την κορυφή η δύναμη Coriolis δείχνει προς την ακμή φυγής και συμπεριφέρεται ως ευνοϊκή κλίση πίεσης. Το αποτέλεσμα της φυγόκεντρης και Coriolis δύναμης είναι να μεταβάλλονται τα δεδομένα της 2-D αεροτομής μετά την αποκόλληση. Σημαντική μηχανολογική ικανότητα και εμπειρία απαιτείται για να κατασκευαστούν τέτοια δεδομένα αποκόλλησης για παράδειγμα να υπολογιστεί η πραγματική απόδοση μιας ανεμογεννήτριας σε υψηλές ταχύτητες ανέμου έτσι ώστε να εξασφαλισθεί ένα αποδεκτό αποτέλεσμα.

2.3 Σύστημα δινών πίσω από μία ανεμογεννήτρια

Το δρομέας μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα αποτελείται από έναν αριθμό πτερυγίου, οι οποίες έχουν σχήμα φτερού. Αν γίνει μία τομή σε μία ακτινική απόσταση r , από τον άξονα περιστροφής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16, επίσης παρατηρείται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17 διαδοχικές τομές αεροτομών.



Σχήμα 2.16: Απεικόνιση του δρομέα μιας ανεμογεννήτριας τριών πτερυγίων και ακτίνας R [1]



Σχήμα 2.17: Απεικόνιση τομής σε μία ακτινική θέση και το ανάλογο τρίγωνο ταχυτήτων [1]

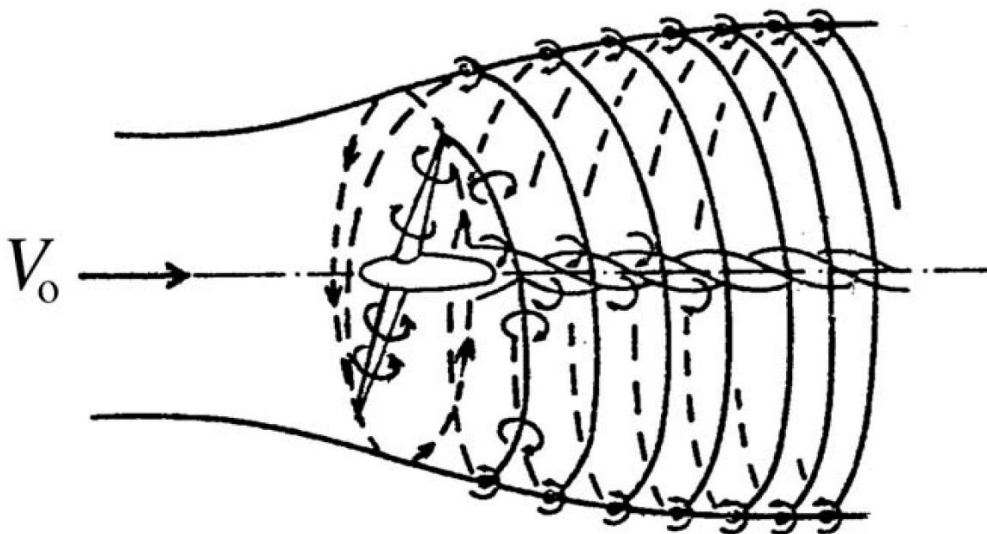
Η τοπική γωνία πρόσπτωσης α δίνεται από την γωνία βήματος της αεροτομής θ , η σχετική ταχύτητα και η περιστροφική ταχύτητα στο δρομέα δηλώνονται αντίστοιχα από τα V_{rel} και V_{rot} όπως στο σχήμα 2.17.

$$\alpha = \phi - \theta$$

όπου ϕ η γωνία ροής υπολογίζεται ως:

$$\tan \phi = \frac{V_a}{V_{rot}}$$

Εφόσον μια ανεμογεννήτρια με οριζόντιο άξονα αποτελείται από περιστρεφόμενα πτερύγια, πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα στροβίλων παρόμοιο με τη στρωτή μεταβατική ροή. Το σύστημα των ελεύθερων δινών προσανατολίζεται σε ελικοειδή τροχιά πίσω από το δρομέα. Οι δυνατοί ακραίοι στρόβιλοι βρίσκονται στο χείλος του πτερυγίου και βρίσκονται κυρίως στο γραμμικό μονοπάτι κατά μήκος του άξονα του δρομέα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18.



Σχήμα 2.18: Απεικόνιση του συστήματος δινών πίσω από την ανεμογεννήτρια [1]

Το σύστημα στροβίλων προκαλεί στην ανεμογεννήτρια έναν συντελεστή αξονικής ταχύτητας αντίθετο με την κατεύθυνση του ανέμου και έναν συντελεστή εφαπτόμενης ταχύτητας αντίθετο προς την περιστροφή των πτερυγίων του δρομέα.

Η εφαπτόμενη ταχύτητα στην αξονική κατεύθυνση προσδιορίζεται μέσω του συντελεστή αξονικής επαγωγής a ως $a \cdot V_0$, όπου V_0 είναι η ταχύτητα του ανέμου. Η εφαπτόμενη ταχύτητα στο δρομέα προσδιορίζεται μέσω του συντελεστή εφαπτομενικής επαγωγής a' ως $2 \cdot a' \cdot \omega \cdot r$. Εφόσον η ροή δεν περιστρέφεται αντίθετα προς το ρεύμα του δρομέα η επαγόμενη εφαπτόμενη ταχύτητα είναι $a' \cdot \omega \cdot r$, r η απόσταση από τον άξονα περιστροφής και ω η γωνιακή ταχύτητα σε (rad/sec). Η συνιστώσα της αξονικής ταχύτητας είναι:

$$V_a = (1-a)V_0,$$

Η συνιστώσα της περιστροφικής ταχύτητας είναι:

$$V_{rot} = (1 + a')\omega r.$$

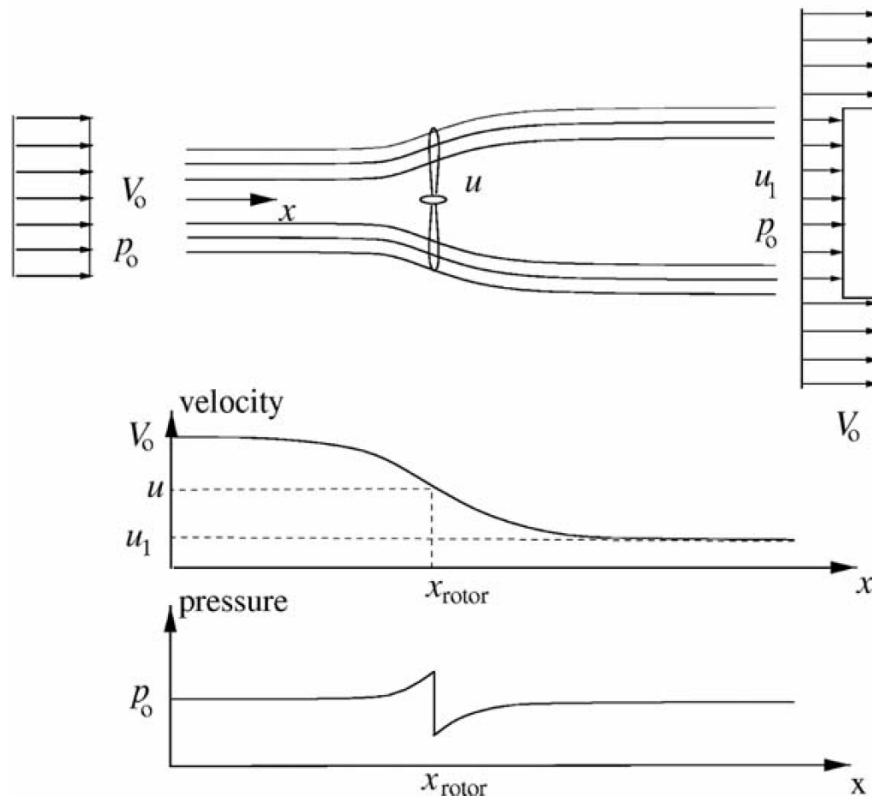
Επιπλέον, αν οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης $C_l(\alpha)$ και $C_d(\alpha)$ είναι επίσης γνωστοί για τις αεροτομές που εφαρμόζονται στα πτερύγια, είναι εύκολο να υπολογιστεί η κατανομή ισχύος.

2.4 Θεωρία Ορμής Μονοδιάστατου Μοντέλου (1-D) για την Ιδεατή Ανεμογεννήτρια

Πριν τη εξαγωγή συμπερασμάτων για τη Θεωρία Δίσκου Ενέργειας είναι χρήσιμο να εξετάσουμε ένα απλό μονοδιάστατο μοντέλο (1-D) για έναν ιδεατό δρομέα. Η ανεμογεννήτρια μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια. Ο δρομέας σε αυτό το απλό μονοδιάστατο μοντέλο είναι ένας διαπερατός δίσκος. Ο δίσκος θεωρείται ιδανικός, δηλαδή χωρίς τριβές και το διάνυσμα της περιστροφικής ταχύτητας στον ομόρρου είναι μηδενικό. Το τελευταίο μπορεί να επιτευχθεί με δύο αντεπιστρεφόμενους δρομείς. Ο δίσκος του δρομέας λειτουργεί ως μηχανισμός αντίστασης μειώνοντας της ταχύτητα του ανέμου από V_0 πριν από το δρομέα σε u στο επίπεδο του δρομέα και σε u_1 στον ομόρρου. Για το λόγο αυτό η απόκλιση των γραμμών ροής θα πρέπει να είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 2.19. Η αντίσταση επιτυγχάνεται με την πτώση πίεσης πάνω στον δρομέα. Κοντά ανάντι του δρομέα υπάρχει μια μικρή αύξηση της πίεσης από το ατμοσφαιρικό επίπεδο p_0 σε p πριν την ασυνεχή πτώση πίεσης Δp πάνω στον δρομέα. Κατάντι του δρομέα η πίεση επανέρχεται βαθμιαία το ατμοσφαιρικό επίπεδο. Ο αριθμός Mach είναι μικρός και η πυκνότητα του αέρα σταθερή και η αξονική ταχύτητα πρέπει να μειωθεί βαθμιαία από V_0 σε u_1 . Η συμπεριφορά της πίεσης και της αξονικής ταχύτητας αναπαρίσταται γραφικά στο σχήμα 2.19. Χρησιμοποιώντας τις παραδοχές για έναν ιδεατό δρομέα, μπορούμε να εξάγουμε απλές σχέσεις μεταξύ των ταχυτήτων V_0 , u_1 και u της ώσης T και της απορροφημένης ισχύς στον άξονα P . Η ώση είναι η δύναμη στην κατεύθυνση η οποία είναι αποτέλεσμα της πτώσης πίεσης πάνω στον δρομέα, και οδηγεί στην μείωση της ταχύτητας του ανέμου από V_0 σε u_1 :

$$T = \Delta p A,$$

όπου $A=\pi \cdot R^2$ είναι η επιφάνεια του δρομέα. Η ροή είναι σταθερή, ασυμπίεστη και χωρίς τριβές και δεν δρουν εξωτερικές δυνάμεις στο ρευστό ανάντι ή κατάντι του δρομέα. Για το λόγο αυτό η εξίσωση του Bernoulli ισχύει από αρκετά ανάντι ως το μπροστινό σημείο του δρομέα και ακριβώς πίσω από το δρομέα έως αρκετά κατάντι στον ομόρροου:



Σχήμα 2.19: Απεικόνιση των γραμμών ροής που διέρχονται από τον δρομέα και της αξονικής ταχύτητας και πίεσης στην ανάντι και κατάντι του δρομέα [1]

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p + \frac{1}{2} \rho u^2,$$

και:

$$p - \Delta p + \frac{1}{2} \rho u^2 = p_0 + \frac{1}{2} \rho u_1^2.$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - u_1^2).$$

Η εξίσωση της αξονικής ορμής με μορφή ολοκληρώματος εφαρμόζεται στον κυκλικό όγκο ελέγχου με επιφάνεια διατομής A_{cv} που απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 2.20, και μας δίνει:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{cv} \rho u(x, y, z) dx dy dz + \iint_{cs} u(x, y, z) \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = F_{ext} + F_{pres}.$$

Το $d\mathbf{A}$ είναι ένα διάνυσμα με κατεύθυνση προς την κανονική κατεύθυνση του απειροελάχιστου μέρους της επιφάνειας ελέγχου με μήκος ίσο με την επιφάνεια αυτού του στοιχείου [1].

Το F_{pres} είναι η αξονική συνιστώσα των δυνάμεων πίεσης που ασκούνται στον όγκο ελέγχου. Ο πρώτος όρος της παραπάνω εξίσωσης ισούται με το μηδέν εφόσον η ροή υποτίθεται ότι είναι σταθερή και ο δεύτερος όρος ισούται με το μηδέν αφού η πίεση έχει την ίδια ατμοσφαιρική τιμή στο άκρο του επιπέδου του δρομέα και ασκείται σε ίση επιφάνεια. Επιπλέον, στο πλευρικό όριο του όγκου ελέγχου που φαίνεται στο σχήμα 2.20, η δύναμη πίεσης δεν έχει αξονική συνιστώσα. Χρησιμοποιώντας τις απλοποιημένες παραδοχές του ιδεατού δρομέα, η παραπάνω εξίσωση μας δίνει:

$$\rho u_1^2 A_1 + \rho V_0^2 (A_{cv} - A_1) + \dot{m}_{side} V_0 - \rho V_0^2 A_{cv} = -T.$$

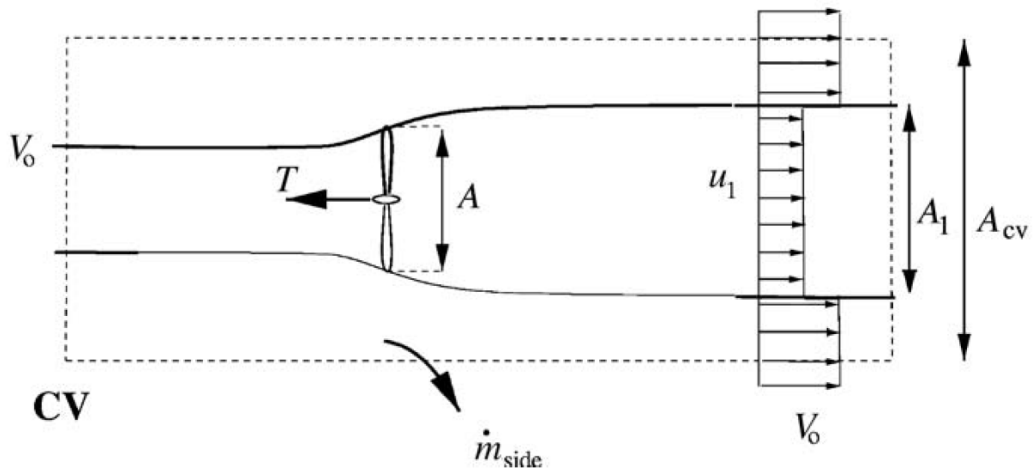
Το \dot{m}_{side} μπορεί να υπολογιστεί από την αρχή διατήρησης της μάζας:

$$\rho A_1 u_1 + \rho (A_{cv} - A_1) V_0 + \dot{m}_{side} = \rho A_{cv} V_0.$$

$$\dot{m}_{side} = \rho A_1 (V_0 - u_1).$$

Η αρχή διατήρησης της μάζας μας δίνει επίσης μια σχέση μεταξύ των A και A_1 όπου:

$$\dot{m} = \rho u A = \rho u_1 A_1.$$



Σχήμα 2.20: Κυκλικός όγκος ελέγχου γύρω από την ανεμογεννήτρια [1]

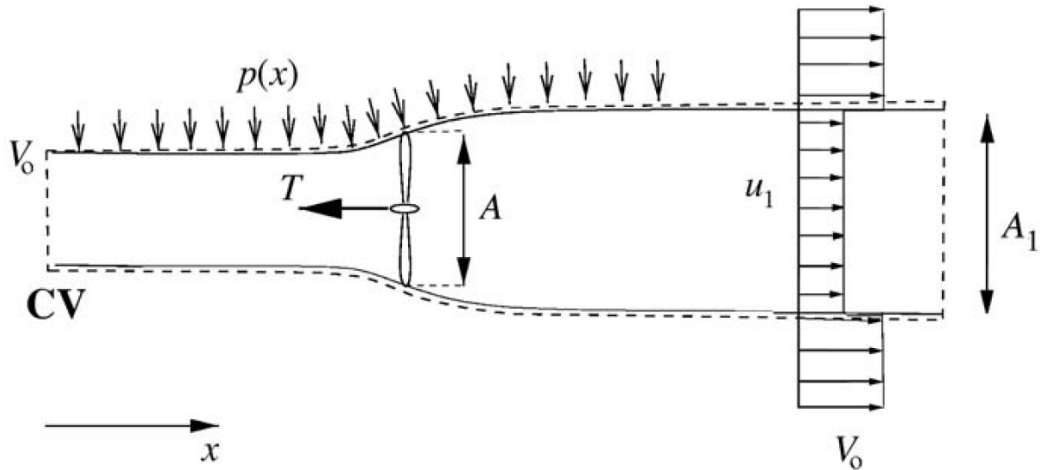
Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις παίρνουμε:

$$T = \rho u A (V_0 - u_1) = \dot{m} (V_0 - u_1).$$

Αν η ώση T αντικατασταθεί με την πτώση πίεσης πάνω στον δρομέα όπως στην παραπάνω εξίσωση και χρησιμοποιηθεί η πτώση πίεσης προκύπτει ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα [1]:

$$u = \frac{1}{2} (V_0 + u_1).$$

Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα στο επίπεδο του δρομέα είναι η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου V_0 και της τελικής τιμής στον ομόρρο u_1 . Ένας εναλλακτικός όγκος ελέγχου στο σχήμα 2.21.



Σχήμα 2.21: Εναλλακτικός όγκος ελέγχου γύρω από την ανεμογεννήτρια [1]

Η δύναμη από την κατανομή της πίεσης κατά μήκος των πλευρικών τοιχωμάτων F_{pres} , πλευρικά του όγκου ελέγχου, είναι άγνωστη και για το λόγο αυτό είναι η συμβολή καθαρής πίεσης F_{pres} .

Σε αυτό τον εναλλακτικό όγκο ελέγχου δεν υπάρχει ροή μάζας μέσω των πλευρικών ορίων, αφού η ροή μάζας ευθυγραμμίζεται με την γραμμή ροής. Για τον λόγο αυτό η εξίσωση αξονικής ώσης γίνεται:

$$T = \rho u A (V_0 - u_1) + F_{pres}.$$

Εφόσον το φυσικό πρόβλημα είναι το ίδιο, είτε εφαρμοστεί ο όγκος ελέγχου στο σχήμα 2.20 ή εκείνο στο σχήμα 2.21, παρατηρούμε από την σύγκριση των εξισώσεων και ότι η δύναμη καθαρής πίεσης στον όγκο ελέγχου που ακολουθεί την γραμμή ροής, είναι μηδενική.

Υποτίθεται ότι η ροή είναι χωρίς τριβές και για το λόγο αυτό δεν υπάρχει μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας από το σημείο εισόδου στο σημείο εξόδου και η ισχύς στον άξονα P μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση εσωτερικής ενέργειας στον όγκο ελέγχου που φαίνεται στο σχήμα 2.21:

$$P = \dot{m} \left(\frac{1}{2} V_0^2 + \frac{P_0}{\rho} - \frac{1}{2} u_1^2 - \frac{P_0}{\rho} \right).$$

Και δεδομένου ότι $\dot{m} = \rho u A$ η εξίσωση για την ισχύ P γίνεται:

$$P = \frac{1}{2} \rho u A (V_0^2 - u_1^2).$$

Ο συντελεστής αξονικής επαγωγής a ορίζεται ως:

$$u = (1 - a)V_o.$$

Η εξίσωση της ταχύτητας του ανέμου αρκετά κατάντι του δρομέα ορίζεται ως :

$$u_1 = (1 - 2a)V_o$$

την οποία μπορούμε να την εισάγουμε στην εξίσωση για την ισχύ P και στην εξίσωση για την ώση T , και μας δίνει:

$$P = 2\rho V_o^3 a(1 - a)^2 A$$

και:

$$T = 2\rho V_o^2 a(1 - a)A.$$

Η διαθέσιμη ισχύς σε μια διατομή ίση με την επιφάνεια A που σαρώνεται από τον δρομέα, είναι:

$$P_{avail} = \frac{1}{2} \rho A V_o^3$$

Η ισχύς P συχνά χαρακτηρίζεται από τον αδιάστατο συντελεστή ισχύς C_p :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_o^3 A}$$

Ομοίως ο συντελεστής ώσης C_T ορίζεται ως:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V_o^2 A}$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις και οι συντελεστές ισχύς και ώσης για την ιδεατή ανεμογεννήτρια μονοδιάστατου μοντέλου μπορούν να αναγραφούν ως εξής:

$$C_p = 4a(1 - a)^2$$

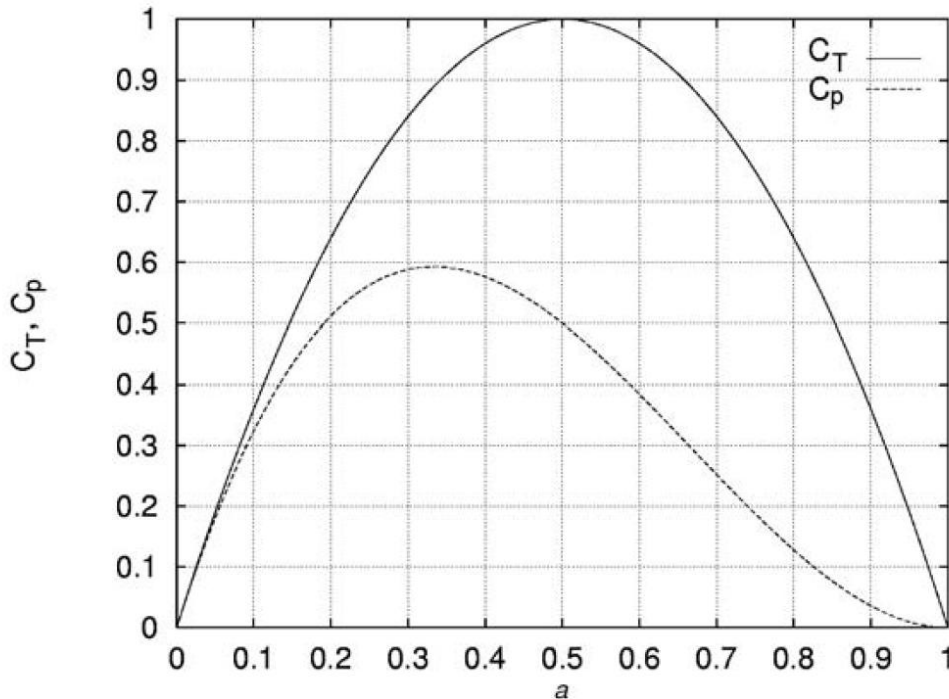
και:

$$C_T = 4a(1 - a).$$

Παραγωγίζοντας το C_p ως προς a παίρνουμε:

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a).$$

Παρατηρούμε ότι για $a=1/3$ έχουμε μέγιστο $C_{p_{\max}}=16/27$. Οι εξισώσεις και αναπαρίστανται γραφικά στο σχήμα 2.22. Αυτό το θεωρητικό μέγιστο σημείο για την ιδεατή ανεμογεννήτρια είναι γνωστό ως όριο Betz.



Σχήμα 2.22: Οι συντελεστές ισχύος και ώσης C_p και C_t ως συνάρτηση του συντελεστή αξονικής επαγωγής a για την ιδεατή ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα [1]

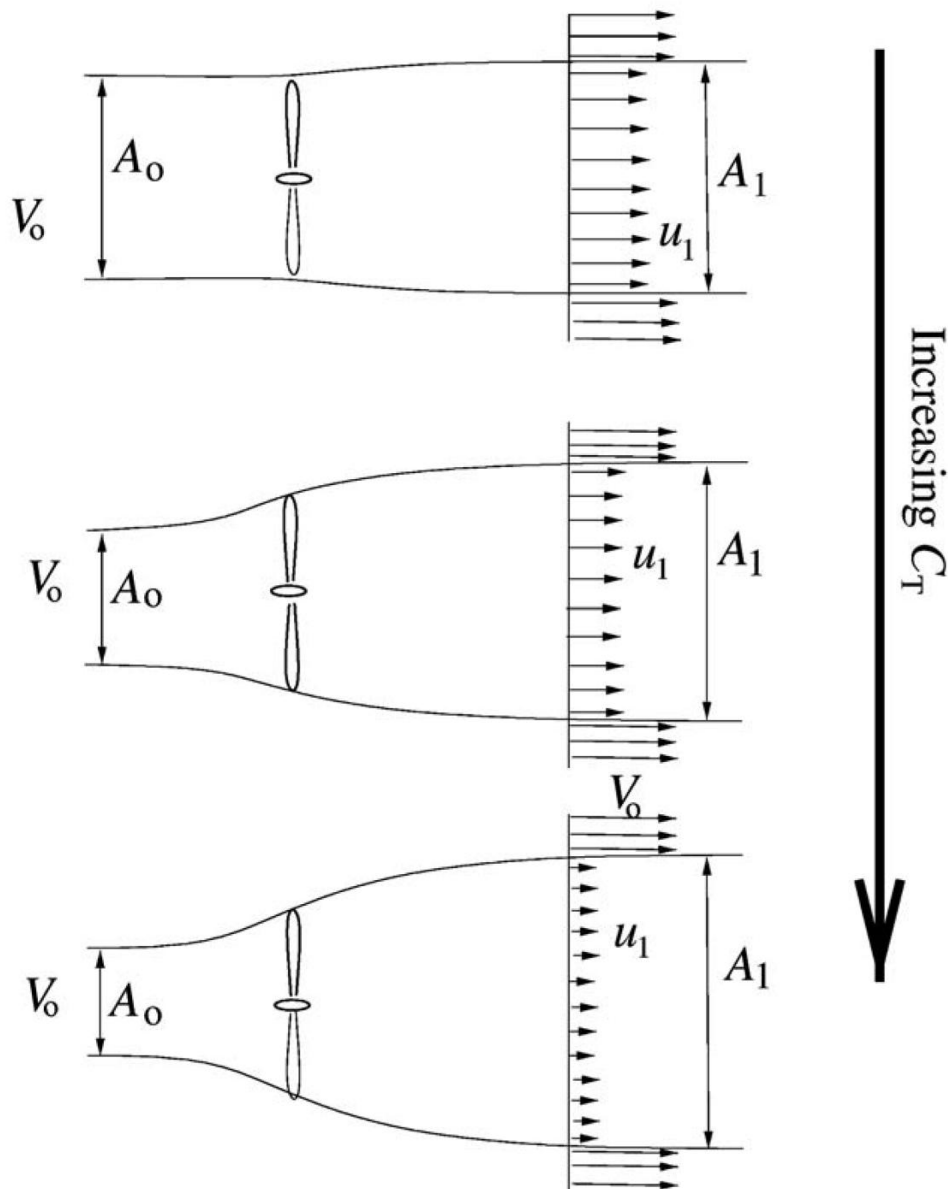
Πειράματα έχουν δείξει ότι οι παραδοχές για την ιδεατή ανεμογεννήτρια που οδηγούν στη εξίσωση του συντελεστή ώσης, από των συντελεστή αξονικής επαγωγής a , μικρότερες προσεγγιστικά του 0.4. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.22, το οποίο αναπαριστά μετρήσεις του συντελεστή C_t σε συνάρτηση του συντελεστή a για διαφορετικές συνθήκες στον δρομέα. Αν η θεωρία της ορμής είχε ισχύ για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή a , η ταχύτητα στον ομόρρου θα έπαιρνε αρνητικές τιμές.

Όσο αυξάνεται ο συντελεστής C_T , αυξάνεται η διαστολή του ομόρρου και για το λόγο αυτό η ταχύτητα στον ομόρρου από V_0 γίνεται u_1 , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.23.

Η αναλογία μεταξύ των επιφανειών A_0 και A_1 στο μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από την εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{A_0}{A_1} = 1 - 2a.$$

Σε μια ανεμογεννήτρια, ο υψηλός συντελεστής ώσης C_T , ο οποίος συνεπάγεται και υψηλό συντελεστή αξονικής επαγωγής a , εμφανίζεται όταν υπάρχουν χαμηλές ταχύτητες αέρα. Ο λόγος για τον οποίο η απλοποιημένη θεωρία ορμής δεν ισχύει για τιμές μεγαλύτερες προσεγγιστικά του 0.4 είναι ότι το ελεύθερο διαχωριστικό στρώμα στο άκρο του ομόρρου γίνεται ασταθές όταν η αλλαγή ταχύτητας $V_0 - u_1$ γίνεται πολύ υψηλή και δημιουργούνται στροβιλισμοί (ή δίνες) οι οποίοι μεταφέρουν ορμή από την εξωτερική ροή στον ομόρρου [1,3,4,5]. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται κατάσταση τυρβώδους ομόρρου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.23.



Σχήμα 2.23: Η διαστολή του ομόρρου και το δiάνυσμα της ταχύτητας στον ομόρρου στην ιδεατή ανεμογεννήτρια μονοδιάστατου μοντέλου 1-D [1]

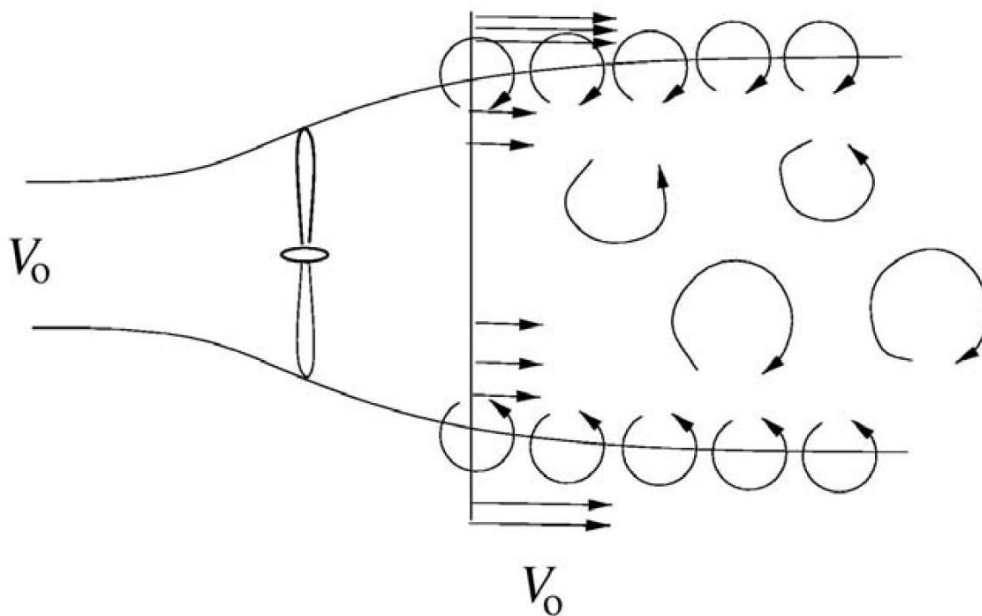
2.5 Συνέπειες της Περιστροφής

Στον ιδεατό δρομέα δεν υπάρχει περιστροφή στον ομόρρου, με άλλα λόγια ο συντελεστής περιφερειακής επαγωγής a' είναι μηδενικός. Δεδομένου ότι μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια αποτελείται από έναν δρομέα χωρίς στάτορα, στον ομόρρου θα υπάρχει κάποια περιστροφή:

$$dP = \dot{m}\omega r C_\theta = 2\pi r^2 \rho u \omega C_\theta dr;$$

Όπου C_θ η αξιμουθιακή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας $C = (C_r, C_\theta, C_a)$ μετά τον δρομέα και u η αξονική ταχύτητα διαμέσου του δρομέα.

Εφόσον οι δυνάμεις που ασκούνται στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, ασκούνται και στον εισερχόμενο αέρα, αλλά με αντίθετο πρόσημο ο αέρας στην ανεμογεννήτρια θα περιστραφεί με αντίθετη φορά από αυτή των πτερυγίων. Αυτό μπορεί να απεικονιστεί με το σχήμα 2.24, όπου η σχετική ταχύτητα ανάντη του πτερυγίου $V_{rel,1}$ δίνεται από την αξονική ταχύτητα u και την περιστροφική ταχύτητα V_{rot} . Για ενδιάμεσες γωνίες πρόσπτωσης, η σχετική ταχύτητα $V_{rel,2}$ κατάντη του δρομέα, ακολουθεί προσεγγιστικά το άκρο φυγής. Η αξονική συνιστώσα, C_a , της απόλυτης ταχύτητας ισούται με u λόγω της αρχής διατήρησης της μάζας, και η περιστροφική ταχύτητα παραμένει σταθερή[1].



Σχήμα 2.24: Σχηματική αναπαράσταση της τυρβώδη ροής στον ομόρροο λόγω της μεταβαλλόμενης ασταθής ροής στο άκρο του ομόρροο [1]

Το διανυσματικό τρίγωνο ταχυτήτων κατάντη του πτερυγίου είναι τώρα σταθερό και, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.24, η απόλυτη ταχύτητα κατάντη του πτερυγίου, C , έχει μια εφαπτόμενη συνιστώσα C_θ στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του πτερυγίου.

Από την εξίσωση dP φαίνεται ότι για μια δεδομένη τιμή ισχύος P και ταχύτητας του ανέμου, όταν μειώνεται η αξιμουθιακή συνιστώσα ταχύτητας C_θ στον ομόρρου, αυξάνεται η περιστροφική ταχύτητα του δρομέα. Από άποψη απόδοσης, είναι επιθυμητό, η ανεμογεννήτρια να έχει υψηλή περιστροφική ταχύτητα για να ελαχιστοποιείται η απώλεια κινητικής ενέργειας που εμπεριέχεται στον περιστρεφόμενο ομόρρου. Όπως έχει αναφερθεί η αξονική ταχύτητα στον δρομέα δίνεται από τον συντελεστή αξονικής επαγωγής a όπως στην εξίσωση και η περιστροφική ταχύτητα στον ομόρρου δίνεται από το a' όπως στην εξίσωση:

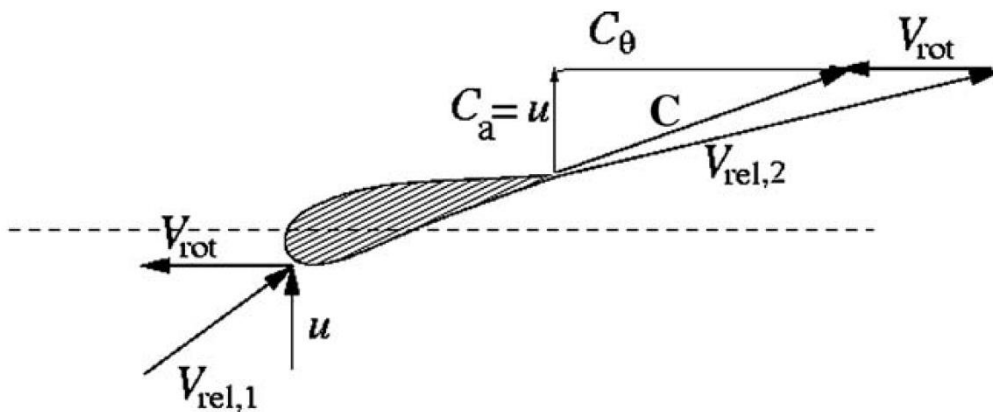
$$C_\theta = 2a'\omega r.$$

Οπότε η εξίσωση μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$dP = 4\pi\rho\omega^2 V_0 a'(1-a)r^3 dr.$$

Η συνολική ισχύς υπολογίζεται ολοκληρώνοντας το dP από 0 έως R όπως παρακάτω:

$$P = 4\pi\rho\omega^2 V_0 \int_0^R a'(1-a)r^3 dr.$$



Σχήμα 2.25: Το διανυσματικό τρίγωνο των ταχυτήτων για ένα τμήμα του δρομέα [1]

Η αδιάστατη μορφή είναι ως εξής:

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a)x^3 dx,$$

όπου $\lambda = \omega \cdot r / V_0$ είναι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου και $x = \omega \cdot r / V_0$ είναι η τοπική περιστροφική ταχύτητα σε ακτίνα r σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου V_0 .

Είναι προφανές από τις εξισώσεις, ότι προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η ισχύς, είναι απαραίτητο να μεγιστοποιηθεί η παρακάτω παράσταση:

$$f(a, a') = a'(1-a).$$

Αν οι τοπικές γωνίες πρόσπτωσης είναι κάτω από την γωνία εμφάνισης αποκόλλησης (stall) της ροής, οι όροι a και a' δεν είναι ανεξάρτητοι εφόσον η δύναμη αντίδρασης, σύμφωνα με τη θεωρία δυναμικής ροής, είναι κάθετη στην τοπική ταχύτητα που παρατηρείται στον ομόρροο. Η συνολική επαγωγική ταχύτητα, w , πρέπει να έχει την ίδια διεύθυνση με αυτή της δύναμης, και κατά συνέπεια κάθετη στην τοπική ταχύτητα. Για το λόγο αυτό ισχύει η παρακάτω σχέση μεταξύ των a και a' :

$$x^2 a'(1+a') = a(1-a).$$

Από την παραπάνω εξίσωση συνεπάγεται απευθείας από το σχήμα 2.25 εφόσον:

$$\tan \phi = \frac{a' \omega r}{a V_0}$$

και:

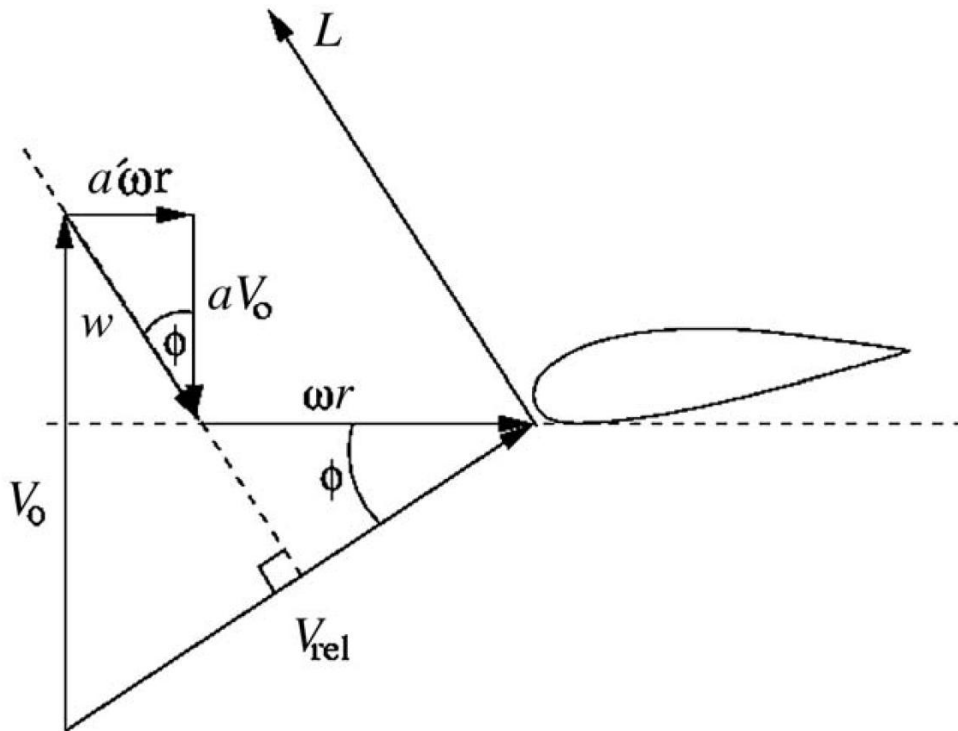
$$\tan \phi = \frac{(1-a)V_0}{(1+a')\omega r}$$

Ο όρος $x = \omega \cdot r / V_0$ δηλώνει τη σχέση μεταξύ τοπικής περιστροφικής ταχύτητας και της ταχύτητας του ανέμου. Η βέλτιστη σχέση μεταξύ a και a' γίνεται:

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1}.$$

Οπότε τώρα μπορεί να υπολογιστεί ένας πίνακας μεταξύ των a , a' και x . Το a' υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση για μια συγκεκριμένη τιμή του a και στη συνέχεια το x υπολογίζεται από την εξίσωση.

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η περιστροφική ταχύτητα ω και κατά συνέπεια το $x = \omega \cdot r / V_0$, η βέλτιστη τιμή για το a τείνει στο $1/3$, το οποίο συμφωνεί με την απλοποιημένη θεωρία ορμής για τον ιδεατό δρομέα. Σημειώστε ότι για μικρές γωνίες πρόσπτωσης, η συνολική επαγωγική ταχύτητα w είναι κάθετη στην σχετική ταχύτητα.

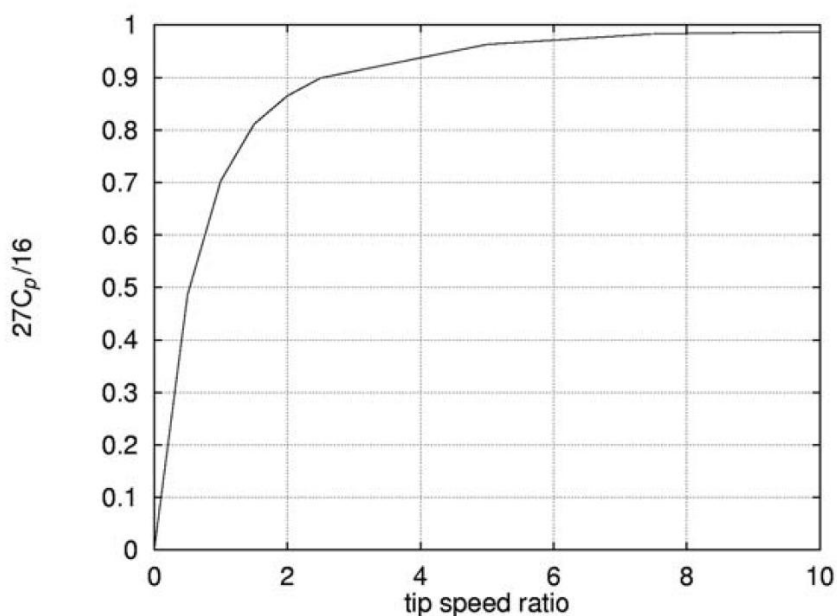


Σχήμα 2.26: Το διανυσματικό τρίγωνο των σχετικών ταχυτήτων για ένα τμήμα του πτερυγίου [1]

Αυτό έγινε από τον Glauert (1935) για διαφορετικούς λόγους ταχυτήτων ακροπτερυγίου. Ο Glauert συνέκρινε αυτόν τον υπολογιζόμενο βέλτιστο συντελεστή ισχύος με το όριο Betz του $16/27$, το οποίο λαμβάνεται για μηδενική περιστροφή στον ομόρρου $a'=0$, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1. Στο σχήμα 2.27, αναπαρίσταται ο πίνακας και μπορεί να παρατηρηθεί ότι η απώλεια λόγω της περιστροφής είναι μικρή για λόγους ταχυτήτων ακροπτερυγίου προσεγγιστικά μεγαλύτερους του 6.

Πίνακας 2.1: Η σύγκριση του υπολογιζόμενου βέλτιστου συντελεστή ισχύος του Glauert's που περιλαμβάνει την περιστροφή του ομόρρου με το όριο του Betz [1]

$\lambda = \omega \cdot R_t / V_0$	$27 \cdot C_p / 16$
0.5	0.484
1.0	0.703
1.5	0.811
2.0	0.865
2.5	0.899
5.0	0.963
7.5	0.983
10.0	0.987

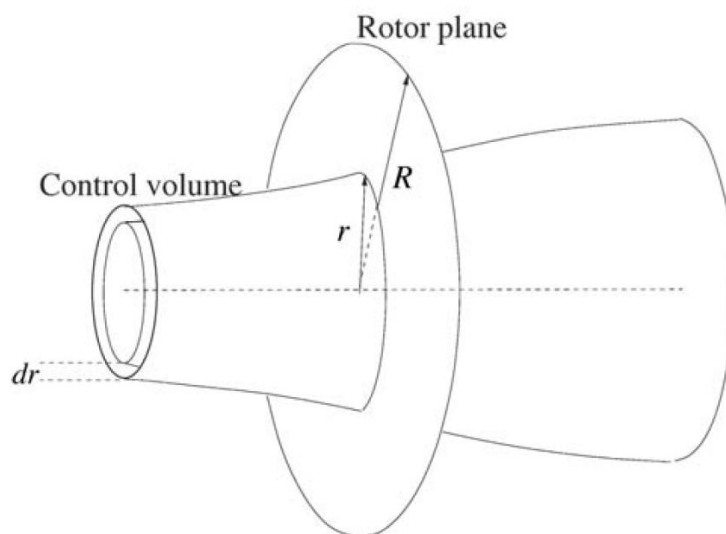


Σχήμα 2.27: Η απόδοση από μια βέλτιστη ανεμογεννήτρια σε διάφορες τιμές λ [1]

2.6 Η κλασσική μέθοδος δίσκου ορμής

Έχει πλέον γίνει εισαγωγή όλων των απαραίτητων ορισμών και θεωριών για την κατανόηση της μέθοδος δίσκου ορμής (Blade Element Momentum-BEM). Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το κλασσικό BEM μοντέλο από τον Glauert (1935). Με αυτό το

μοντέλο είναι δυνατό να υπολογιστούν τα σταθερά φορτία και έτσι επίσης η ισχύς και η ώση για διαφορετικές ρυθμίσεις της ταχύτητας του ανέμου, της ταχύτητας περιστροφής και της γωνίας βήματος. Στην 1D θεωρία ορμής η πραγματική γεωμετρία του δρομέα – ο αριθμός των πτερυγίων, η κατανομή χορδής και η κατανομή της γωνίας συστροφής, και η χρησιμοποιούμενη αεροτομή δε λαμβάνονται υπόψη. Η Blade Element Momentum Method ενώνει τη θεωρία ορμής με τα τοπικά φορτία που συμβαίνουν στα πραγματικά πτερύγια. Ο ροϊκός σωλήνας που εισάγεται στη θεωρία ορμής χωρίζεται σε N δακτυλιοειδή στοιχεία ύψους dr , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.28. Το πλευρικό – πλάγιο όριο αυτών των στοιχείων αποτελείται από ροϊκές γραμμές, με άλλα λόγια δεν υπάρχει ροή διαμέσου των στοιχείων.



Σχήμα 2.28: Όγκος ελέγχου ως δακτυλιοειδές στοιχείο για να χρησιμοποιηθεί στο BEM μοντέλο [1]

Στο BEM μοντέλο υποθέτονται τα ακόλουθα για τα δακτυλιοειδή στοιχεία:

- Δεν υπάρχει ακτινική εξάρτηση, με άλλα λόγια ότι συμβαίνει σε κάθε στοιχείο δε μπορεί να γίνει αισθητό από τα άλλα.
- Η δύναμη από τα πτερύγια στη ροή είναι σταθερή σε κάθε δακτυλιοειδές στοιχείο, αυτό αντιστοιχεί σε ένα δρομέα με άπειρο αριθμό πτερυγίων.
- Μία διόρθωση γνωστή ως συντελεστής απώλειας ακροπτερυγίου του Prandtl εισάγεται αργότερα ως διόρθωση για την προηγούμενη υπόθεση ώστε να υπολογιστεί ένας δρομέας με πεπερασμένο – συγκεκριμένο αριθμό πτερυγίων.

Στο προηγούμενο μέρος που αφορούσε την 1-D θεωρία ορμής αποδείχθηκε ότι η κατανομή πίεσης κατά μήκος των κυρτών αεροδυναμικών γραμμών συμπεριλαμβανομένου του ομόρρου έδινε το διάνυσμα αξονικής δύναμης. Έτσι

υποθέτουμε ότι αυτό ισχύει επίσης και για τον δακτυλιοειδή όγκο ελέγχου που φαίνεται στο σχήμα 2.28. Η ώση από το δίσκο σε αυτόν τον όγκο ελέγχου μπορεί έτσι να βρεθεί από την εξίσωση ορμής εφόσον η περιοχή διατομής του όγκου ελέγχου στο επίπεδο του δρομέα είναι $2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$:

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

Η ροπή dM στο δακτυλιοειδές στοιχείο βρίσκεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση της ορμής στον όγκο ελέγχου και θέτοντας την ταχύτητα περιστροφής σε μηδενική ανάντι του δρομέα και σε $C\theta$ στον ομόρροτο:

$$dM = r C_\theta d\dot{m} = 2\pi r^2 \rho u C_\theta dr.$$

Αυτό θα μπορούσε επίσης να είχε αντληθεί απευθείας από την εξίσωση στροβίλων του Euler εφόσον:

$$dP = \omega dM$$

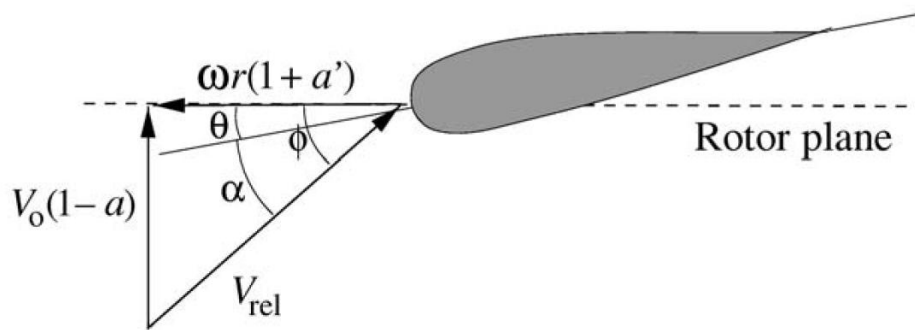
Από τον ιδανικό δρομέα βρέθηκε ότι η αξονική ταχύτητα στον ομόρροτο θα μπορούσε να εκφραστεί από τον αξονικό συντελεστή επαγωγής a και την ταχύτητα του ανέμου V_0 ως $u_1 = (1 - 2a) \cdot V_0$, και αν αυτό εισαχθεί στις παραπάνω εξισώσεις για την ισχύ και την ροπή, μαζί με τους ορισμούς για a και a' στις εξισώσεις και η ώση και η ροπή μπορούν να υπολογιστούν ως:

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

και:

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_0 \omega (1 - a) a' dr.$$

Τα αριστερά μέρη των εξισώσεων βρίσκονται από την τοπική ροή γύρω από το πτερύγιο. Ανακαλύπτεται ότι η σχετική ταχύτητα V_{rel} σε έναν τομέα του πτερυγίου είναι ένας συνδυασμός της αξονικής ταχύτητας $(1 - a) \cdot V_0$ και της εφαπτομενικής ταχύτητας $(1 + a') \cdot \omega \cdot r$ στο επίπεδο του δρομέα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.29:



Σχήμα 2.29: Ταχύτητες στο επίπεδο του δρομέα [1]

Θ είναι η τοπική γωνία βήματος (local pitch angle) του πτερυγίου, με άλλα λόγια η τοπική γωνία ανάμεσα στη χορδή και στο επίπεδο της περιστροφής. Η τοπική γωνία βήματος είναι ένας συνδυασμός της γωνίας βήματος (pitch angle), θ_p , και της γωνίας περιστροφής (angle twist) του πτερυγίου, β , ως $\theta = \theta_p + \beta$, όπου γωνία βήματος είναι η γωνία ανάμεσα στη χορδή ακροπτερυγίου και στο επίπεδο του δρομέα και η περιστροφή μετράτε σε σχέση με τη χορδή ακροπτερυγίου. Φ είναι η γωνία ανάμεσα στο επίπεδο περιστροφής και τη σχετική ταχύτητα, V_{rel} , και φαίνεται στο σχήμα 2.29 ότι η τοπική γωνία πρόσπτωσης δίνεται από:

$$\alpha = \phi - \theta.$$

Επιπλέον, φαίνεται ότι

$$\tan \phi = \frac{(1-a)V_0}{(1+a')\omega r}.$$

Η άνωση, είναι κάθετη προς την σχετική ταχύτητα (V_{rel}) από την πλευρά της αεροτομής και η αντίσταση είναι παράλληλη στην ίδια ταχύτητα[1,3,4,5].

Επιπλέον, αν οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης C_l και C_d είναι γνωστοί, η δύναμη της άνωσης L και της αντίστασης D ανά μονάδα μήκους μπορούν να βρεθούν από τις εξισώσεις ως:

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c C_l$$

και

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c C_d.$$

Εφόσον ενδιαφερόμαστε μόνο για τη δύναμη που είναι αξονική και εφαπτόμενη προς το επίπεδο του δρομέα, η άνωση και η αντίσταση αναλύονται σε αυτές τις κατευθύνσεις όπως στο σχήμα 2.30:

$$p_N = L \cos \phi + D \sin \phi$$

και:

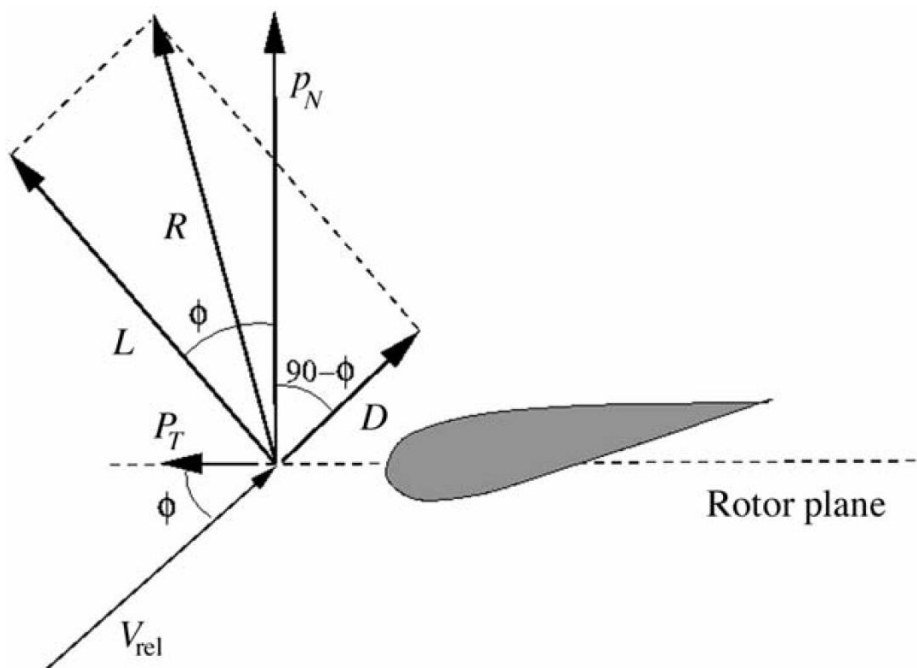
$$p_T = L \sin \phi - D \cos \phi$$

Οι τοπικοί συντελεστές αξονικής δύναμης και εφαπτομενικής δύναμης είναι οι εξής:

$$C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi$$

και:

$$C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi$$



Σχήμα 2.30: Τα τοπικά φορτία πάνω στο πτερύγιο [1]

Από το σχήμα 2.29 φαίνεται άμεσα από τη γεωμετρία ότι:

$$V_{rel} \sin \phi = V_o (1 - a)$$

και:

$$V_{rel} \cos \phi = \omega r(1 + a')$$

Επιπλέον, η στερεότητα σ (solidity) ορίζεται ως το κλάσμα της δακτυλιοειδούς περιοχής στον όγκο ελέγχου που καλύπτεται από πτερύγια [1,3,4,5]:

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

B είναι ο αριθμός των πτερυγίων, $c(r)$ είναι η τοπική χορδή και r είναι η ακτινική θέση του όγκου ελέγχου.

Εφόσον P_n και P_t είναι δυνάμεις ανά μονάδα μήκους, η κανονική δύναμη και η ροπή στον όγκο ελέγχου πάχους dr είναι:

$$dT = Bp_N dr$$

και:

$$dM = rBp_T dr$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση για P_n και την εξίσωση για V_{rel} , η εξίσωση γίνεται:

$$dT = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_o^2 (1 - a)^2}{\sin^2 \phi} c C_n dr.$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση για P_t και την εξίσωση για V_{rel} , η εξίσωση γίνεται

$$dM = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_o (1 - a) \omega r (1 + a')}{\sin \phi \cos \phi} c C_r r dr.$$

Αν οι δύο εξισώσεις για dT και ο ορισμός της στερεότητας εφαρμοστεί, επιτυγχάνεται μία έκφραση για τον συντελεστή αξονικής επαγωγής a :

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1}.$$

Αν οι δύο εξισώσεις για dM και ο ορισμός της στερεότητας εφαρμοστεί, επιτυγχάνεται μία έκφραση για τον συντελεστή εφαπτομενικής επαγωγής a' :

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1}.$$

Τώρα όλες οι απαραίτητες εξισώσεις για το BEM μοντέλο έχουν εξαχθεί και ο αλγόριθμος μπορεί να συνοψισθεί στα 8 παρακάτω βήματα. Εφόσον οι διαφορετικοί όγκοι ελέγχου υποτίθεται ότι είναι ανεξάρτητοι, κάθε δακτύλιος μπορεί να αντιμετωπιστεί ξεχωριστά και η λύση σε μία ακτίνα μπορεί να υπολογιστεί πριν τη λύση για μία άλλη ακτίνα. Με άλλα λόγια για κάθε όγκο ελέγχου εφαρμόζεται ο ακόλουθος αλγόριθμος [1].

Βήμα (1) Δίνεται αρχική τιμή α και α' , τυπικά $\alpha = \alpha' = 0$

Βήμα (2) Υπολογίζεται η γωνία ροής ϕ χρησιμοποιώντας την εξίσωση

Βήμα (3) Υπολογίζεται η τοπική γωνία πρόσπτωσης χρησιμοποιώντας την εξίσωση

Βήμα (4) Λαμβάνονται οι συντελεστές $C_l(\alpha)$ και $C_d(\alpha)$ από τον πίνακα η από το πρόγραμμα.

Βήμα (5) Υπολογίζεται C_n και C_t από τις εξισώσεις

Βήμα (6) Υπολογίζεται το α και α' από τις εξισώσεις

Βήμα (7) Αν το α και α' έχει αλλάξει περισσότερο από μια συγκεκριμένη ακρίβεια, πηγαίνουμε στο βήμα (2) η διαφορετικά τελειώνει η διαδικασία.

Βήμα (8) Υπολογίζονται τα τοπικά φορτία στο τμήμα των πτερυγίων.

Αυτή είναι στην ουσία η μέθοδος BEM, αλλά για να έχουμε καλά αποτελέσματα είναι απαραίτητο να εφαρμοσθούν δύο διορθώσεις στον αλγόριθμο. Η πρώτη λέγεται συντελεστής απωλειών ακροπτερυγίου του Prandtl, η οποία διορθώνει την υπόθεση ενός άπειρου αριθμού πτερυγίων. Η δεύτερη διόρθωση λέγεται διόρθωση του Glauert και είναι μία εμπειρική σχέση ανάμεσα στον συντελεστή ώσης C_T και τον συντελεστή αξονικής επαγωγής α , για α μεγαλύτερο από περίπου 0.4, όπου η σχέση που προκύπτει από την μονοδιάστατη θεωρία ορμής δεν ισχύει πια. Αφού εφαρμοσθεί ο αλγόριθμος BEM σε όλους τους όγκους ελέγχου, η επαπτόμενη και η αξονική κατανομή φορτίου είναι γνωστές και οι τοπικές παράμετροι όπως η μηχανική ισχύς, η ώση και η ροπή μπορούν να υπολογισθούν.

2.7 Συντελεστής απωλειών ακροπτερυγίου του Prandtl και νέες διορθώσεις

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο συντελεστής απωλειών ακροπτερυγίου του Prandtl διορθώνει την υπόθεση ενός άπειρου αριθμού πτερυγίων. Για ένα δρομέα με συγκεκριμένο αριθμό πτερυγίων το σύστημα δινών στον ομόρρου είναι διαφορετικό από αυτό ενός δρομέα με άπειρο αριθμό πτερυγίων. Ο Prandtl παρήγαγε ένα συντελεστή διόρθωσης F στις εξισώσεις και dT και dM [1].

$$dT = 4\pi r \rho V_o^2 a(1-a)Fdr$$

και:

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_o \omega (1-a)a'Fdr.$$

Το F υπολογίζεται ως [1,13,14,15,35]:

$$F = F_{tip} \times F_{root}$$

όπου:

Ο συντελεστής F_{tip} ορίζεται ως ο συντελεστής απωλειών στο ακροπτερύγιο και δίνεται ως:

$$F_{tip} = \frac{2}{\pi} \arccos \left(e^{-\frac{B(R-r)}{2r \sin \phi}} \right)$$

Ο συντελεστής F_{root} ορίζεται ως ο συντελεστής απωλειών στη βάση του πτερυγίου και δίνεται ως:

$$F_{root} = \frac{2}{\pi} \arccos \left(e^{-\frac{B(r-R_{root})}{2r \sin \phi}} \right)$$

B είναι ο αριθμός των πτερυγίων, R είναι η συνολική ακτίνα του δρομέα, r είναι η τοπική ακτίνα, R_{root} η ακτίνα στη βάση και ϕ η γωνία ροής. Για την καλύτερη προσέγγιση του αριθμού Prandtl χρησιμοποιείται επιπλέον μια νέα διόρθωση ανάλογα με την τοπική ακτίνα και παρουσιάζεται παρακάτω [15].

$$F_{new} = \frac{F_{Prandtl}^{0.85} + 0.5}{2} \quad \text{for } 0.7 \leq r/R \leq 1,$$

or

$$F_{new} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right) \frac{1 - F_{Prandtl}(r/R=0.7)}{0.7} \quad \text{for } r/R < 0.7.$$

Στο βήμα 2 του αλγόριθμου BEM προστίθεται ένα επιπλέον βήμα που να υπολογίζει τον συντελεστή απωλειών ακροπτερυγίου του Prandtl F , και θα πρέπει να τοποθετηθεί και το βήμα (7) θα αλλάξει με τις παρακάτω εξισώσεις.

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1}$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1}$$

2.8 Διόρθωση του Glauert για υψηλές τιμές του a

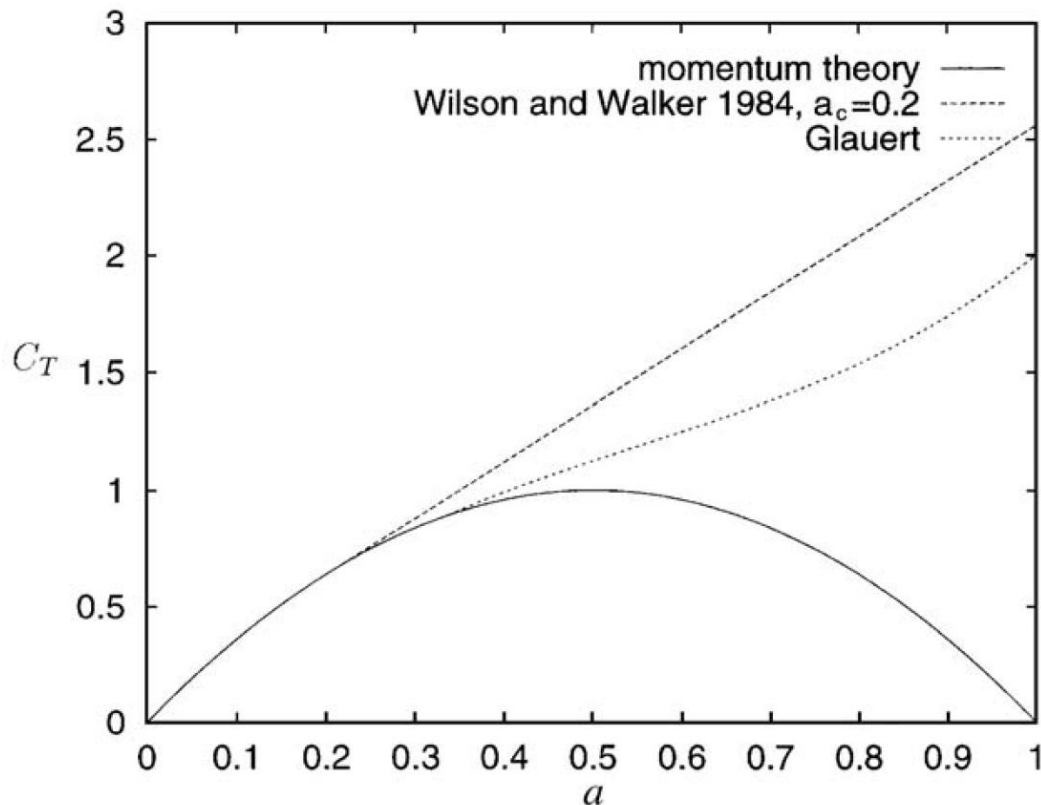
Όταν ο αξονικός συντελεστής επαγωγής γίνεται μεγαλύτερος από περίπου 0.4, η απλή θεωρία ορμής καταρρέει. Διαφορετικές εμπειρικές σχέσεις ανάμεσα στον συντελεστή ώσης C_t και στον a μπορούν να γίνουν ώστε να ταιριάζει με τις μετρήσεις, για παράδειγμα:

$$C_t = \begin{cases} 4a(1-a)F & a \leq \frac{1}{3} \\ 4a(1 - \frac{1}{4}(5-3a)a)F & a > \frac{1}{3} \end{cases}$$

ή

$$C_T = \begin{cases} 4a(1-a)F & a \leq a_c \\ 4(a_c^2 + (1-2a_c)a)F & a > a_c \end{cases}$$

Η τελευταία έκφραση βρίσκεται στο βιβλίο του Spera (David Spera in Wind Turbine Technology 1994) και το a_c είναι 0.2. F είναι ο συντελεστής απωλειών πτερυγίου του Prandtl και διορθώνει την υπόθεση ενός άπειρου αριθμού πτερυγίων. Στο σχήμα 2.31 οι δύο εκφράσεις για $C_T(a)$ απεικονίζονται για $F=1$ και συγκρίνονται με την απλή θεωρία ορμής.



Σχήμα 2.31: Διαφορετικές εκφράσεις του συντελεστή ώσης σε σχέση με τον αξονικό επαγωγικό συντελεστή [1]

Η διόρθωση του συντελεστή αξονικής επαγωγής a σύμφωνα με τον Spera γίνεται με τις παρακάτω εξισώσεις αν $a > a_c$, όπου το $a_c = 0.2$:

$$a = \frac{1}{2} \left[2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right]$$

Και όπου K :

$$K = \frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_n}$$

2.8 Χαρακτηριστικές καμπύλες δρομέα

Από την καμπύλη συντελεστή ισχύος του δρομέα ως συνάρτηση της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ μπορεί να προκύψουν οι καμπύλες ισχύος του ανεμοκινητήρα για καθορισμένες στροφές του δρομέα ως συνάρτηση της ταχύτητας πνέοντος ανέμου. Συγκεκριμένα από την καμπύλη συντελεστή ισχύος και για ορισμένες στροφές δρομέα προκύπτει η καμπύλη συντελεστή ισχύος ταχύτητας ανέμου η οποία στη συνέχεια με τις σχέσεις μετατρέπεται σε καμπύλη ισχύος ή ροπής του δρομέα ως συνάρτηση ταχύτητας πνέοντος ανέμου.

Τώρα όλες οι απαραίτητες εξισώσεις για τον υπολογισμό της ολικής ισχύος, της ολικής ροπής, της ολικής ώσης, του ολικού συντελεστή ισχύος, του ολικού συντελεστή ροπής και του ολικού συντελεστή ώσης. Ο αλγόριθμος μπορεί να συνεχιστεί με τα παρακάτω βήματα. Εφόσον οι διαφορετικοί όγκοι ελέγχου υποτίθεται ότι είναι ανεξάρτητοι, κάθε δακτύλιος μπορεί να αντιμετωπιστεί ξεχωριστά και οι τοπικοί συντελεστές αξονικής a και περιφερειακής επαγωγής a' έχουν υπολογιστεί. Με άλλα λόγια εφαρμόζονται τα ακόλουθα βήματα στον αλγόριθμο:

Βήμα (9) Υπολογίζεται το τοπικό C_p , C_t , C_m

$$C_p = 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2$$

$$C_t = 4 \cdot a \cdot (1 - a)$$

$$C_m = 4 \cdot a' \cdot (1 - a) \cdot \Omega \cdot \frac{r}{V_0}$$

Βήμα (10) Υπολογίζεται η συνολική ισχύς, συνολική ώση και συνολική ροπή στο δρομέα

$$P = \int_r^R 2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot V_0^3 \cdot \frac{C_p}{2}$$

$$T = \int_r^R 2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot V_0^2 \cdot \frac{Ct}{2}$$

$$M = \int_r^R 2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dr \cdot V_0^2 \cdot \frac{Cm}{2}$$

Βήμα (11) Υπολογίζεται ο ολικός CP, CT, CM

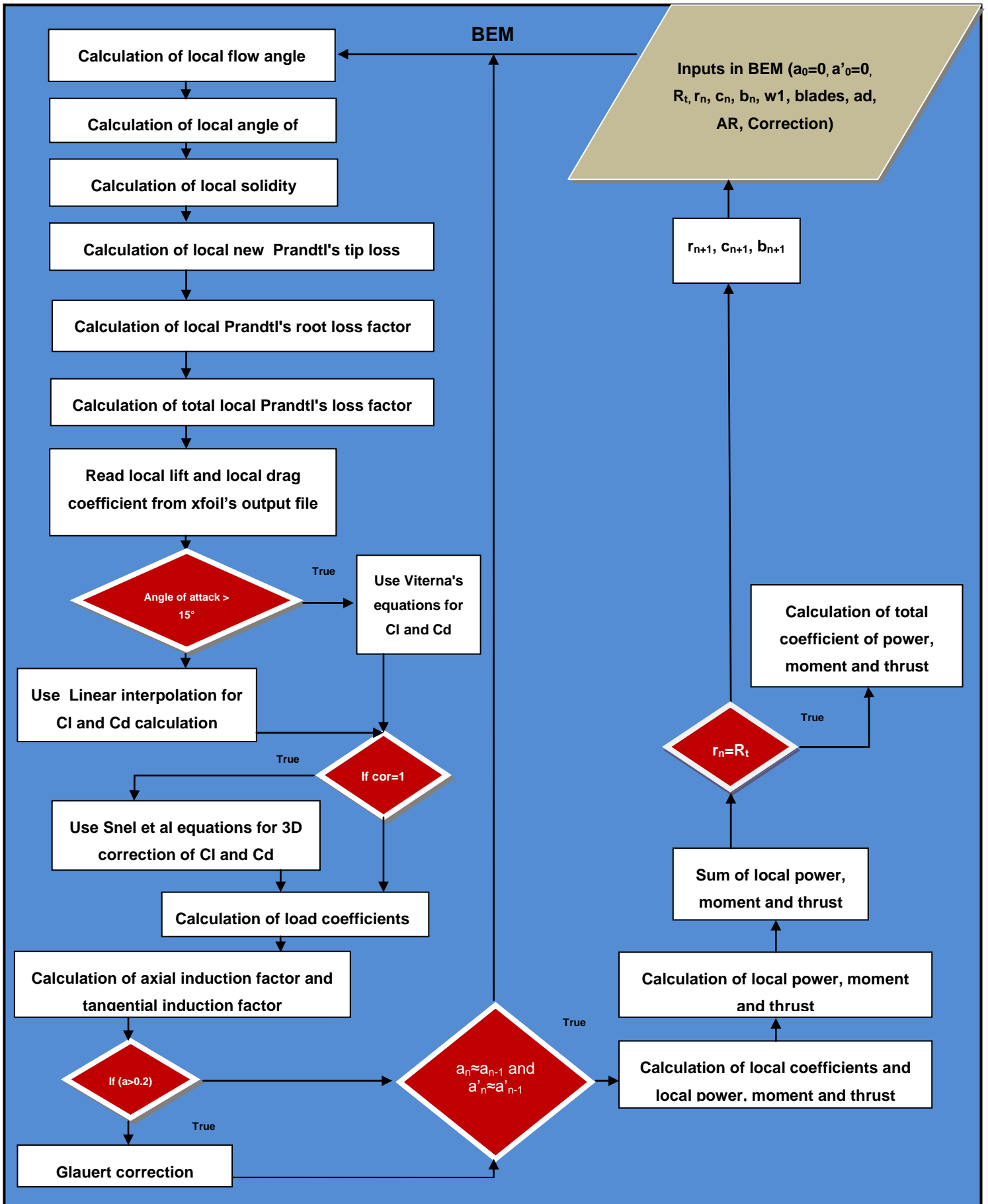
$$Cp = 2 \cdot P / (\rho \cdot \pi \cdot (R^2) \cdot V_0^3)$$

$$Ct = 2 \cdot T / (\rho \cdot \pi \cdot (R^2) \cdot V_0^2)$$

$$Cm = 2 \cdot M / (\rho \cdot \pi \cdot (R^3) \cdot V_0^2)$$

Με βάση όλα τα παραπάνω βήματα τα οποία εμφανίζονται στο διάγραμμα ροής στο σχήμα 2.32 είναι πλέον εύκολη η σύγχρονη αριθμητική επίλυση των εξισώσεων βελτιστοποίησης του δρομέα με την βοήθεια αλγορίθμου βασισμένο σε επαναληπτική διαδικασία δοκιμών.

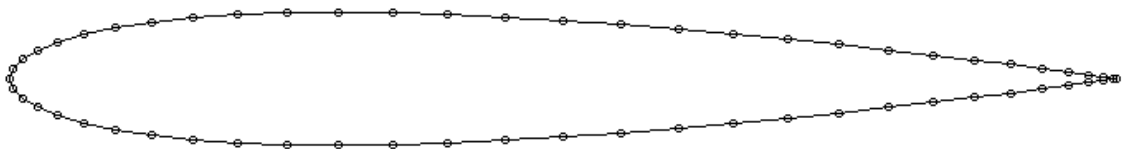
Και στους δύο κώδικες επιλέγεται μείωση της συνολικής ισχύος κατά 5% λόγω αεροδυναμικών και μηχανολογικών απωλειών.



Σχήμα 2.32 : Διάγραμμα ροής της διαδικασίας BEM

3 Το λογισμικό XFOIL

Η υπολογιστική ρευστομηχανική (Computational Fluid Dynamics-CFD) είναι ο κλάδος της μηχανικής ρευστών που χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους και αλγόριθμους για να επιλύσει προβλήματα σχετικά με τη ροή ρευστών. Η θεμελιώδης αρχή κάθε προβλήματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι οι εξισώσεις Navier-Stokes. Οι μέθοδοι ανάλυσης της ροής γύρω από αεροδυναμικά σώματα αναλύουν την περιφέρεια του σώματος σε τμήματα που ονομάζονται πλαίσια (panels). Τα πλαίσια αυτά συνδέονται μεταξύ τους με σημεία τα οποία ονομάζονται κόμβοι (nodes). Αν το σώμα που εξετάζεται είναι μια αεροτομή, διακριτοποιείται σε κόμβους οι οποίοι περιγράφουν την περιφέρειά της από την ακμή φυγής προς την ακμή προσβολής και από την ακμή προσβολής προς την ακμή φυγής, με αντιωρολογιακή φορά (σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Η αεροτομή NACA 2412 διακριτοποιημένη [51]

Για δυσδιάστατη ανάλυση ροών γύρω από αεροδυναμικά σώματα έχουν αναπτυχθεί δύο προγράμματα ανάλυσης πλαισίων, ο κώδικας PROFIL του Richard Eppler και ο κώδικας XFOIL του Mark Drela. Τα δυο προγράμματα περιέχουν αλγόριθμους επίλυσης ροής χωρίς τριβή, πραγματικής ροής, οριακών στρωμάτων καθώς και αλγόριθμους αντίστροφης ανάλυσης (περίπτωση που δεν είναι η ολόκληρη η γεωμετρία γνωστή από την αρχή). Στη παρούσα εργασία θα γίνει χρήση του XFOIL (έκδοση 6.96), που είναι ένα πρόγραμμα ανοικτού πηγαίου κώδικα γραμμένου σε γλώσσα FORTRAN. Παρακάτω αναλύεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το XFOIL για να αναλύσει τη ροή γύρω από μια αεροτομή και τις δυνάμεις που εμφανίζονται σε αυτήν.

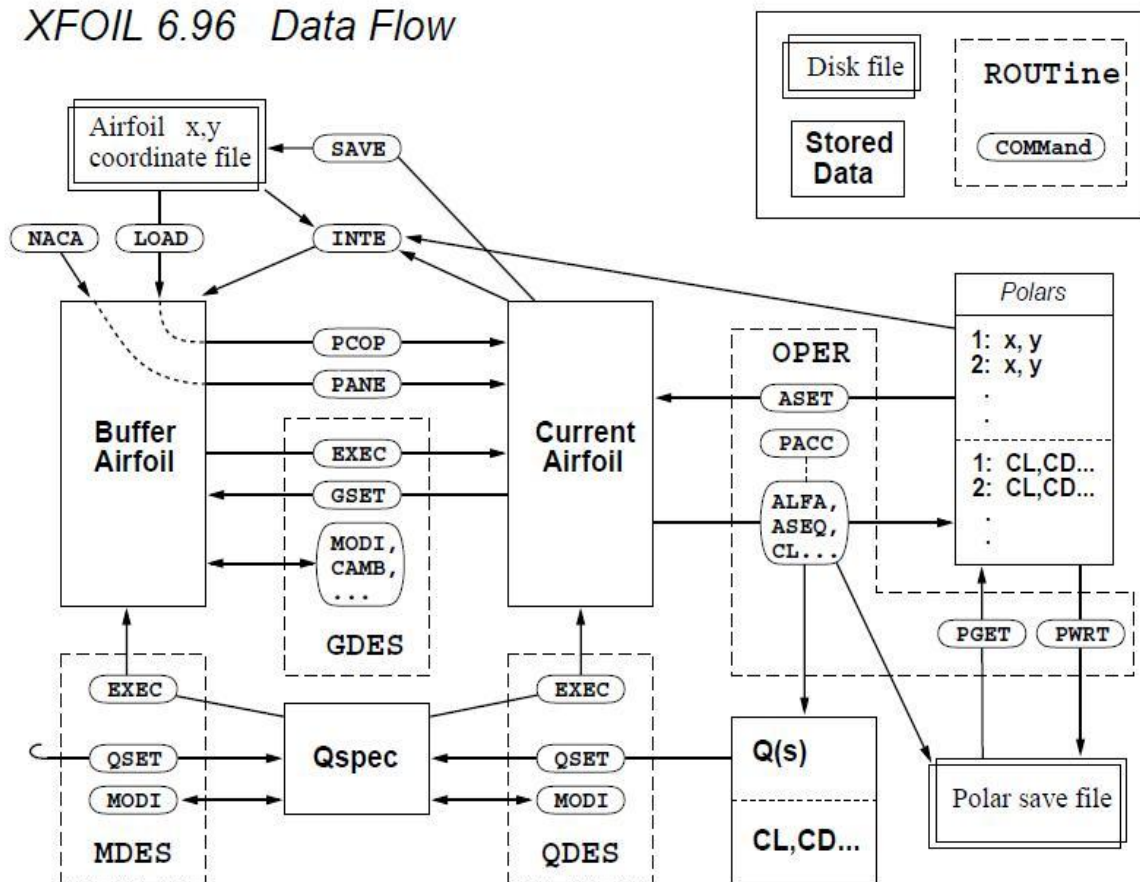
3.1 Ο αλγόριθμος XFOIL

Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι πλαισίων, άλλες περισσότερο και άλλες λιγότερο επιτυχείς σε ανάλυση ατρίβους αλλά και πραγματικής ροής γύρω από αεροτομές. Το XFOIL v1.0 προγραμματίστηκε από τον Mark Drela το 1986 [43]. Σκοπός ήταν ο συνδυασμός της ταχύτητας και της ακρίβειας των μεθόδων πλαισίων υψηλής τάξης με τη νέα μέθοδο διασυνδεδεμένης αλληλεπίδρασης ατρίβους/πραγματικής ροής που

χρησιμοποιούνταν στον κώδικα ISES που ανέπτυξαν οι Drela και Giles. Οι κλασσικοί CFD κώδικες, γράφονταν σε μορφή αρχείων batch και ως εκ τούτου δεν ήταν αρκετά εύκολοι στη χρήση. Για αυτό εφαρμόστηκε ένα πλήρως διαδραστικό περιβάλλον διασύνδεσης. Από εκείνη τη πρώτη έκδοσή του, το XFOIL υπέστη αρκετές αναθεωρήσεις, αναβαθμίσεις και βελτιώσεις. Αυτές οι αλλαγές φάνηκε ότι έπρεπε να γίνουν κατά τη χρήση του προγράμματος για την ανάπτυξη και το σχεδιασμό αεροτομών στη πράξη. Ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος μετά την έκδοση v6.8 δημοσιεύτηκε για το κοινό και πλέον οποιοσδήποτε αλλαγές, βελτιώσεις και επιδιορθώσεις πραγματοποιούνται από τους χρήστες του και συζητούνται στο σχετικό forum. Βελτιώσεις στη μέθοδο και προσθήκες πιθανώς να προστεθούν στο κώδικα ενός εντελώς νέας γενιάς προγράμματος.

Ο παρακάτω αλγόριθμος αναπαριστά τις αεροτομές με μια ροϊκή συνάρτηση γραμμικής στροβιλότητας και σχεδιάστηκε ειδικά ώστε να είναι συμβατή με μια αντίστροφη μέθοδο (για τη περίπτωση που δεν είναι γνωστή ολόκληρη η γεωμετρία της αεροτομής) και για να μπορεί να ανταπεξέλθει σε ροή με τριβή. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η δομή του XFOIL v6.96.

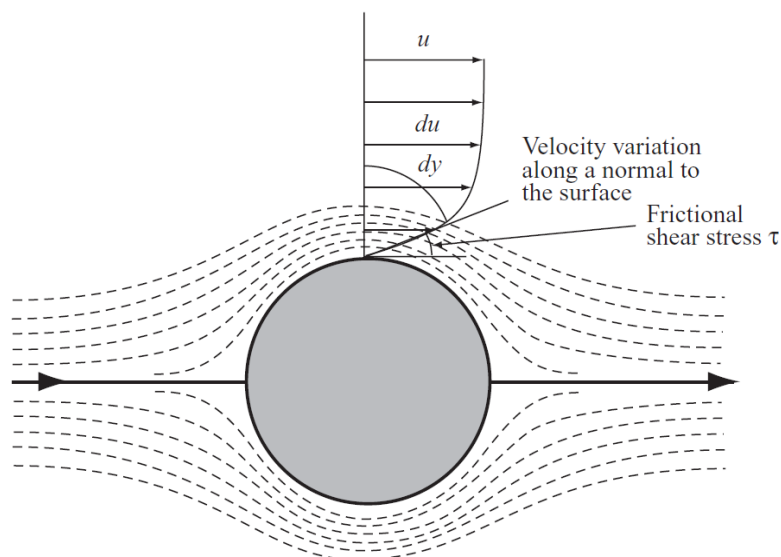
XFOIL 6.96 Data Flow



Σχήμα 3.2: Η δομή και η ροή δεδομένων του XFOIL v6.96 [43]

3.1.1 Μαθηματική ανάλυση των πεδίων ροής

Στις επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου θα αναφερθούν όροι και έννοιες που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο του XFOIL. Κάθε κινούμενο ρευστό έχει τέσσερις χαρακτηριστικές ιδιότητες που καθορίζουν την συμπεριφορά του, τη ταχύτητα (U), τη πίεση (P), τη θερμοκρασία (T) και τη πυκνότητα (ρ). Αυτές μπορεί να μεταβάλλονται από σημείο σε σημείο του ρευστού ή και με το χρόνο. Για τη μελέτη αυτών των μεγεθών πρέπει να οριστεί ένα πεδίο ροής (flow field) όπως ακριβώς ορίζεται και για ένα μαγνητικό ή ένα ηλεκτρικό πεδίο. Για να αποκτηθεί μια οπτική εικόνα του πεδίου ροής πρέπει να οριστεί μια γραμμή εφαπτόμενη στο διάνυσμα της ταχύτητας σε κάθε σημείο της. Αυτή η γραμμή ονομάζεται ροϊκή γραμμή και θεωρητικά πάνω της ταξιδεύουν τα στοιχεία του ρευστού. Αν τώρα θεωρηθούν πολλές ροϊκές γραμμές μαζί δημιουργείται ένα ροϊκό πεδίο, ένα συνεχές πεδίο ροής αποτελείται από συνεχείς ροϊκές γραμμές. Οι ροϊκές γραμμές ενός πεδίου εξ ορισμού δεν τέμνονται (εκτός και αν πρόκειται για σημείο μηδενικής ταχύτητας, για πηγή ή καταβόθρα) και ρευστό δεν περνάει μέσα από τις γραμμές αυτές. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα παράδειγμα συνεχούς ροϊκού πεδίου γύρω από έναν κύλινδρο.

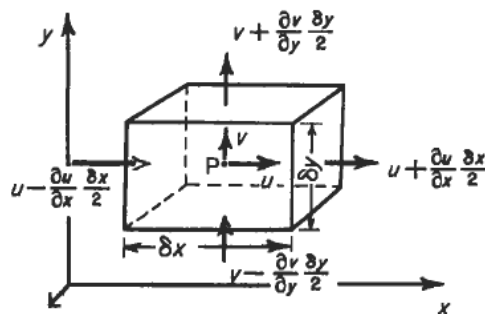


Σχήμα 3.3: Πεδίο ροής χωρίς τριβή γύρω από κύλινδρο [4]

Στη παρούσα εργασία γίνεται βελτιστοποίηση αεροτομών η ροή γύρω από τις οποίες είναι ασυμπίεστη (incompressible), τέτοια είναι άλλωστε και η πραγματική ροή γύρω από τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας ($M \ll 0.3$).

Εξίσωση συνέχειας

Έστω V ένας όγκος ελέγχου του ρευστού από τον οποίο διέρχεται δισδιάστατη ροή μάζας.



Σχήμα 3.4: Όγκος ελέγχου του ρευστού και οι ροές μάζας [50]

Η ροή έχει πυκνότητα ρ και ταχύτητα U , με συνιστώσες u στον άξονα x και v στον άξονα y . Για μια τέτοια ανάλυση η ροή μάζας από την επιφάνεια που έχει προσανατολισμό προς τα αριστερά του ημιάξονα x θα είναι [50]:

$$\left(\rho \cdot u - \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} \cdot \frac{\delta x}{2} \right) \cdot \delta y$$

και προς τα δεξιά:

$$\left(\rho \cdot u + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} \cdot \frac{\delta x}{2} \right) \cdot \delta y$$

Άρα συνολικά η ροή στον άξονα x θα είναι:

$$-\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} \cdot \delta x \cdot \delta y$$

και αντίστοιχα για τον άξονα y θα είναι:

$$-\frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} \cdot \delta x \cdot \delta y$$

Συνολικά η ροή μάζας από τον όγκο ελέγχου θα είναι:

$$-\left(\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y}\right) \cdot \delta x \cdot \delta y$$

Η συνολική μάζα του όγκου V θα είναι:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot \delta x \cdot \delta y$$

και άρα από την αρχή διατήρησης της μάζας, θα είναι:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} = 0$$

Το ανάπτυγμα του οποίου είναι η γενική μορφή της εξίσωσης συνέχειας για δισδιάστατη ροή:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0$$

Στη περίπτωση μόνιμης ασυμπίεστης ροής, η εξίσωση της συνέχειας παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Οι εξισώσεις Navier-Stokes, περιγράφουν την κίνηση ενός ρευστού. Στην ουσία εκφράζουν τον δεύτερο Νόμο του Newton για τα ρευστά. Η αναλυτική τους μορφή προκύπτει μετά από μια σειρά πολύπλοκων υπολογισμών και η μορφή τους για δισδιάστατη, ασυμπίεστη ροή πυκνότητας ρ και ιξώδους μ , είναι:

$$\rho \cdot g_x + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} = \rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\rho \cdot g_y + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} = \rho \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

όπου, g_x και g_y η επιτάχυνσης της βαρύτητας στον άξονα x και y αντίστοιχα και P η πίεση που ασκείται στο ρευστό.

Οι εξισώσεις Navier-Stokes της ασυμπίεστης ροής σε συνδυασμό με την εξίσωση συνέχειας αποτελούν ένα σύστημα τριών εξισώσεων για τρεις άγνωστες μεταβλητές της ροής, τις συνιστώσες της ταχύτητας u και v και την πίεση.

3.1.2 Στροβιλότητα και κυκλοφορία

Στροβιλότητα (vorticity) ενός ρευστού ονομάζεται το διανυσματικό μέγεθος που στη γενική περίπτωση ορίζεται ως (με $U = (u, v, w)$):

$$\omega = \nabla \times U$$

$$\omega = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

Για δυσδιάστατες ροές όπου δεν υπάρχει συνιστώσα w στον άξονα z , το μέτρο της στροβιλότητας δίνεται από τη σχέση:

$$\xi = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

Η ύπαρξη στροβιλότητας σε ένα πεδίο, προκαλεί συστροφή στα στοιχεία του ρευστού. Ένα πεδίο ροής του οποίου η στροβιλότητα σε όλα τα σημεία έχει μηδενική τιμή ονομάζεται αστρόβιλο (irrotational), ενώ αντίθετα η ύπαρξη στροβιλότητας σε ένα πεδίο το κάνει στροβιλό (rotational). Κυκλοφορία (circulation) ενός ρευστού ονομάζεται το ποσό

στροβιλότητας σε μια συγκεκριμένη περιοχή του ρευστού. Μαθηματικά αυτό εκφράζεται με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της ταχύτητας κατά μήκος μιας κλειστής γραμμής:

$$\Gamma = \oint U ds$$

Σύμφωνα με το θεώρημα Stokes κυκλοφορία και στροβιλότητα συσχετίζονται με τον επόμενο τύπο:

$$\Gamma = \iint \omega dA$$

Σε μια μόνιμη δισδιάστατη ροή ασυμπίεστου ρευστού η εξίσωση της συνέχειας δίνεται από τη σχέση. Η ροϊκή συνάρτηση (stream function) της δισδιάστατης ροής ορίζεται ώστε να ικανοποιεί την σχέση:

$$U = \nabla \times \Psi$$

όπου $U = (u, v, 0)$

και

$$\Psi = (0, 0, \Psi)$$

.

Στο καρτεσιανό σύστημα αξόνων, η ταχύτητα κάθε σημείου του ρευστού είναι:

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \text{ και } v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

Η εξίσωση της συνέχειας γίνεται:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y \partial x} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} = 0$$

Ακόμη ισχύει:

$$d\Psi = \frac{\partial\Psi}{\partial x} dx + \frac{\partial\Psi}{\partial y} dy = u dx - v dy$$

Η ροϊκή συνάρτηση χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των ροϊκών γραμμών του πεδίου. Κατά μήκος μιας ροϊκής γραμμής, η ροϊκή συνάρτηση έχει σταθερή τιμή, οπότε:

$$d\Psi = 0 \rightarrow \frac{dx}{u} = \frac{dy}{v}$$

3.2 Ροή χωρίς τριβή-Ιδανική ροή

Τα πεδία ιδανικής ροής (potential flow) είναι αστρόβιλα, δηλαδή η στροβιλότητα σε κάθε σημείο του πεδίου είναι μηδενική. Μηδενική στροβιλότητα συνεπάγεται ροή χωρίς τριβές. Σε αυτή τη παράγραφο θα παρουσιαστούν οι βασικές εξισώσεις που χαρακτηρίζουν την ιδανική ροή.

3.2.1 Συνάρτηση δυναμικού της ροής

Στη θεωρία της ιδανικής ροής εισάγεται η έννοια της συνάρτησης δυναμικού ροής (velocity potential). Σε αυτή τη περίπτωση θα πρέπει να είναι:

$$\nabla \times \mathbf{U} = 0$$

άρα η ταχύτητα μπορεί να εκφραστεί:

$$\mathbf{U} = \nabla\Phi$$

όπου Φ το βαθμωτό μέγεθος που ονομάζεται συνάρτηση δυναμικού ροής.

Η συνάρτηση Φ περιγράφει αστρόβιλα ροϊκά πεδία και η ταχύτητα κάθε σημείο y του πεδίου είναι:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \text{ και } v = \frac{\partial \Phi}{\partial y}$$

Ακόμη, ισχύει η εξίσωση:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial x} = 0$$

Οι γραμμές που αναπαριστά η συνάρτηση δυναμικού ροής είναι πάντα κάθετες με τις ροϊκές γραμμές.

3.2.2 Εξισώσεις της ιδανικής ροής

Οι εξισώσεις που διέπουν την ιδανική δισδιάστατη ροή δίνονται επιγραμματικά παρακάτω.

Εξίσωση συνέχειας (δισδιάστατη, ασυμπίεστη ροή):

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Εξισώσεις Navier-Stokes (Εξισώσεις Euler για αμελητέες τριβές):

$$\rho \cdot g_x - \frac{\partial P}{\partial x} = \rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

και

$$\rho \cdot g_y - \frac{\partial P}{\partial y} = \rho \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

Στροβιλότητα:

$$\xi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

Ροϊκή συνάρτηση (δισδιάστατη, ασυμπίεστη ροή):

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial y}$$

και

$$v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

Συνάρτηση δυναμικού (δισδιάστατη, αστρόβιλη ροή):

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x}$$

Και

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial y}$$

Εξίσωση Laplace:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0$$

3.2.3 Στοιχειώδεις ροές

Οι στοιχειώδεις ροές, είναι απλές ροές οι οποίες αν συντεθούν δημιουργούν λύσεις πολύπλοκων προβλημάτων δηλαδή πολύπλοκων ροών. Οι τρεις στοιχειώδεις ροές είναι η ομοιόμορφη ροή, η σημειακή πηγή (και καταβόθρα) και η δίνη.

Οι συνιστώσες της ταχύτητας έχουν μέτρα

$$u = |U| \cdot \cos \theta$$

και

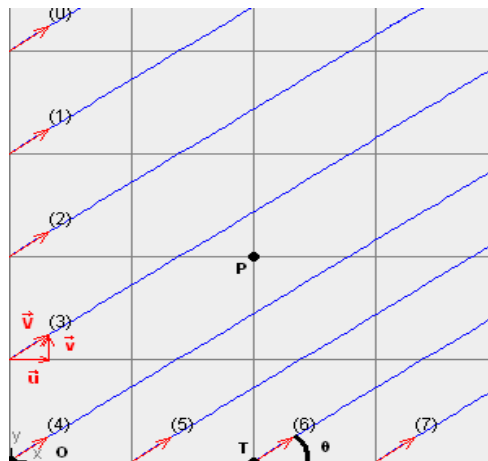
$$v = |U| \cdot \sin \theta.$$

Η μαθηματική περιγραφή των ροϊκών γραμμών αυτού του πεδίου δίνεται από την ροϊκή συνάρτηση:

$$\Psi = u \cdot y - v \cdot x = \text{constant}$$

η οποία σε κάθε γραμμή έχει διαφορετική τιμή.

Μια ευθύγραμμη ομοιόμορφη ροή (uniform parallel flow), σταθερής γωνίας θ ως προς τον άξονα x , φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

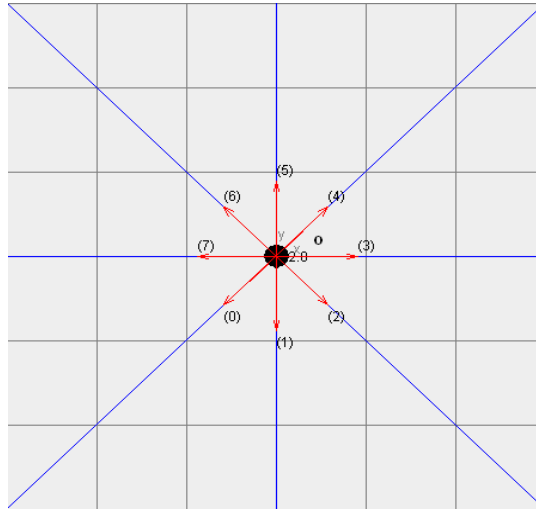


Σχήμα 3.4: Ομοιόμορφη ροή υπό γωνία θ [55]

Η συνάρτηση δυναμικού που αποτελεί ένα μέτρο της ροής κατά μήκος της διαδρομής OTP και οποιασδήποτε καμπύλης συνδέει τα σημεία OTP, δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = u \cdot \chi - v \cdot \psi$$

Μια πηγή (source) είναι ένα σημείο από το οποίο αναβλύζει ρευστό ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις. Για δυσδιάστατες ροές η ένταση της πηγής συμβολίζεται με σ και μετράται σε μονάδες $\frac{m^2}{sec}$. Μια δισδιάστατη πηγή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.5: Σημειακή πηγή [55]

Αν η ένταση της πηγής είναι αρνητική, δηλαδή το ρευστό δεν αναβλύζει αλλά απορροφάται από το κεντρικό σημείο της, τότε το σημείο αυτό δεν είναι πηγή αλλά καταβόθρα (sink). Η ροϊκή συνάρτηση μιας πηγής είναι:

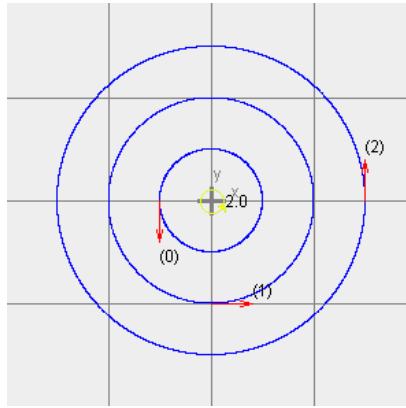
$$\psi = \frac{\sigma \cdot \theta}{2 \cdot \pi} = \frac{\sigma}{2 \cdot \pi} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right)$$

ενώ η συνάρτηση δυναμικού ροής:

$$\Phi = \frac{\sigma}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r}{r_0} \right)$$

Όπου r_0 , η ακτίνα για την οποία $\Phi=0$

Μια δίνη είναι ένα περιστρεφόμενο πεδίο ρευστού. Συγκεκριμένα το κέντρο αυτής τη περιστρεφόμενης ροής ονομάζεται σημειακή δίνη. Δυο είναι οι κύριοι τύποι δίνης, η ελεύθερη ή αστρόβιλη δίνη και η δίνη στερεού σώματος ή στροβιλή. Παρακάτω φαίνεται το πεδίο μιας δίνης.



Σχήμα 3.6: Δίνη [55]

Μια δίνη με μηδενική στροβιλότητα (αστρόβιλη) ονομάζεται ελεύθερη, ενώ μια στροβιλή δίνη ονομάζεται δίνη στερεού σώματος. Η στροβιλότητα σε κάθε σημείο του ρευστού σε μια ελεύθερη δίνη είναι μηδενική $\xi=0$ εκτός από το κέντρο περιστροφής της. Παρακάτω παραθέτουμε τη ροϊκή συνάρτηση και την συνάρτηση δυναμικού της ελεύθερης δίνης.

$$\Psi = \frac{\Gamma}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_0}\right)$$

Όπου r_0 , η ακτίνα για την οποία $\Psi=0$.

$$\Phi = \frac{\Gamma \cdot \theta}{2 \cdot \pi} + c$$

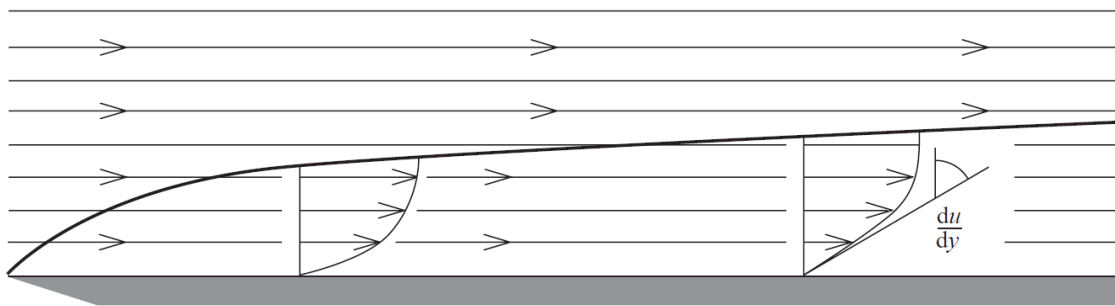
αν οριστεί για $\Phi=0$ θα ισχύει $\Theta=0$.

3.3 Ροή με τριβή

Προηγούμενα έγινε λόγος για ροή όπου οι δυνάμεις ιξώδους ήταν αμελητέες και έτσι δεν εμφανίζονταν φαινόμενα τριβής. Παρόλο που αυτή η προσέγγιση δίνει πολύ καλά αποτελέσματα στην πλειονότητα των ασυμπίεστων και υποηχητικών ροών, στη πραγματικότητα τα πραγματικά ρευστά έχουν ιξώδες και έτσι η ροή αποκτά τριβή. Βάση κάθε μελέτης στη ρευστομηχανική αποτελούν οι εξισώσεις Navier-Stokes. Στη περίπτωση ροής με τριβή οι εξισώσεις Navier-Stokes έχουν τη γενική μορφή τους για ασυμπίεστη ροή όπως αυτή φαίνεται στις εξισώσεις. Η ροή με τριβή μπορεί να είναι στρωτή (laminar) ή τυρβώδης (turbulent), ανάλογα από την τιμή του αριθμού Reynolds. Ο κρίσιμος αριθμός

Reynolds διαφέρει σε κάθε ροή. Για μικρούς αριθμούς Reynolds η ροή είναι στρωτή, ενώ για μεγάλους τυρβώδης.

Η ροή γύρω από στερεό σώμα (π.χ. πτερύγιο) δημιουργεί στην περιοχή την εμφάνιση του οριακού στρώματος (boundary layer). Στη περιοχή αυτή η σχετική ταχύτητα στην στερεή επιφάνεια του σώματος είναι μηδενική. Η στροβιλότητα στο οριακό στρώμα είναι μη μηδενική ενώ στην ακμή του οριακού στρώματος η ταχύτητα παίρνει την τιμή της αστρόβιλης ροής, πριν δηλαδή συναντήσει το στερεό σώμα. Έξω από το οριακό στρώμα η ροή μπορεί να θεωρηθεί ιδανική. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η μεταβολή της ταχύτητας της ροής πλησίον στερεής επιφάνειας.



Σχήμα 3.7: Μεταβολή της ταχύτητας της ροής κοντά στη στερεή επιφάνεια [4]

Τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη του οριακού στρώματος περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

Πάχος (thickness) οριακού στρώματος, είναι το μήκος δ για το οποίο η ταχύτητα είναι ίση με το 99% της u_E .

Η ανώτερη γραμμή του στρώματος ονομάζεται ακμή (edge) και τα μεγέθη που αναφέρονται σε αυτήν δεικτοδοτούνται με το γράμμα «E». Στη γραμμή αυτή η ταχύτητα είναι μόλις 1% μικρότερη της u_E .

Το πάχος μετατόπισης (displacement thickness), ορίζεται το μέγεθος για το οποίο ισχύει:

$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{\rho \cdot u}{\rho \cdot u_E} \right) \cdot dy$$

Πάχος απώλειας ορμής (momentum thickness), ονομάζεται η απόσταση θ που θα πρέπει να μετακινηθεί το τοίχωμα για να έχουμε την ίδια ορμή στο ρευστό όταν αυτό είναι ιδανικό:

$$\theta = \int_0^{\infty} \left(\frac{\rho \cdot u}{\rho \cdot u_E} \left(1 - \frac{u}{u_E} \right) \right) \cdot dy$$

Επίσης, ορίζεται και η παράμετρος μορφής (shape parameter):

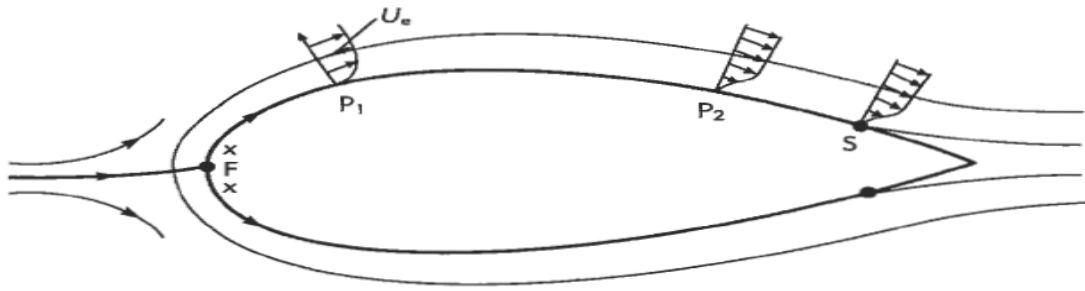
$$H = \frac{\delta^*}{\theta}$$

Για το οριακό στρώμα γύρω από μια αεροτομή ο αριθμός *Reynolds*, ορίζεται:

$$Re_x = \frac{\rho \cdot u_E \cdot c}{\mu}$$

Το πάχος του οριακού στρώματος είναι μια συνάρτηση της απόστασης από το σημείο που αρχίζει να δημιουργείται και στη γενική περίπτωση ροής γύρω από αεροτομές η ακμή του δεν είναι παράλληλη με την επιφάνεια. Η αρχή της συνέχειας ορίζει ότι θα πρέπει να υπάρξει μια εναλλαγή μάζας και ορμής ανάμεσα στο οριακό στρώμα και την περιοχή του αστρόβιλου ρευστού.

Όπως προαναφέρθηκε οι τύποι ροής που εμφανίζονται στην φύση (ροή με τριβή) είναι η στρωτή ροή και η τυρβώδης. Μεταξύ των δύο αυτών τύπων ροής μπορούμε να διακρίνουμε ένα μεταβατικό στάδιο, την μεταβατική ροή (transitional flow). Στην στρωτή ροή, τα σωματίδια του ρευστού κινούνται σε παράλληλες στρώσεις χωρίς να αναμιγνύονται μεταξύ τους. Στη μεταβατική ροή, διάφοροι παράγοντες (εξωτερικοί παράγοντες, τραχύτητα της επιφάνειας, θέρμανση λόγω τριβής κ.α.) διαταράσσουν τις στοιχειώδεις στρώσεις των σωματιδίων τα οποία μετακινούνται συνεχώς από τη μια στρώση στην άλλη. Αυτή η διαταραχή αυξάνεται και δημιουργείται ένα ασταθές πεδίο ροής. Η περιοχή της ροής όπου λαμβάνει χώρα η μεταβατική ροή είναι συνήθως πολύ μικρή. Στην τυρβώδη ροή τα σωματίδια κινούνται και στις τρεις διαστάσεις με τελείως ακανόνιστο τρόπο. Η ακανόνιστη αυτή κίνηση των σωματιδίων οδηγεί στην εμφάνιση δινών διαφορετικού μεγέθους, μέσα σε ολόκληρο το πεδίο ροής. Η ανάλυση τέτοιων ροών γίνεται με την βοήθεια στατιστικών μεθόδων. Ο κρίσιμος αριθμός *Reynolds* δηλώνει την μετάβαση από την στρωτή στην τυρβώδη ροή. Το σημείο της ροής στο οποίο ο αριθμός *Reynolds* παίρνει την κρίσιμη τιμή του λέγεται σημείο μετάβασης και ανήκει στη μεταβατική ροή. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η ανάπτυξη οριακού στρώματος γύρω από μια αεροτομή.



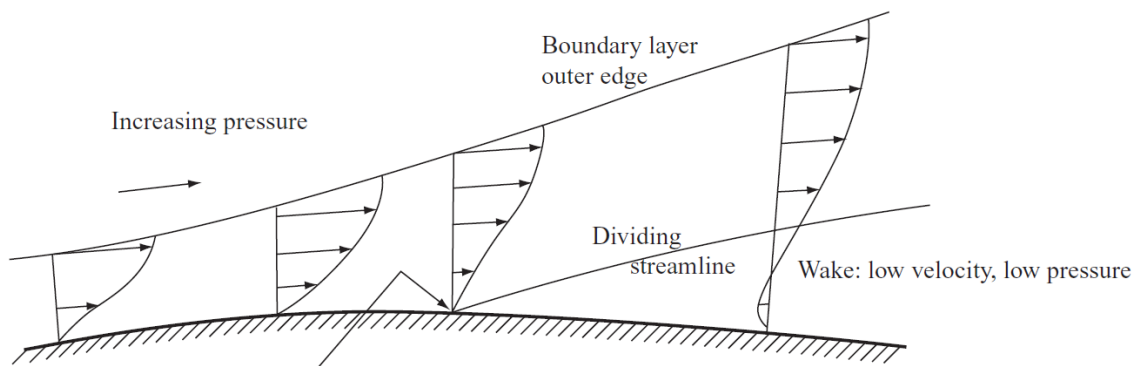
Σχήμα 3.8: Ανάπτυξη οριακού στρώματος γύρω από αεροτομή [50]

Σε σημεία όπου η κλίση της πίεσης είναι θετική, δηλαδή η ροή επιβραδύνεται (λόγω γεωμετρίας ή τραχύτητας επιφάνειας) ευνοείται η αποκόλληση της ροής. Το φαινόμενο αυτό είναι γενικά ανεπιθύμητο. Η ροή, κοντά στη στερεή επιφάνεια, επιβραδύνεται από την τριβή και από την θετική διαφορά πίεσης που υπάρχει στην ροή, λόγω γεωμετρίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ρευστό κοντά στο τοίχωμα σταδιακά να επιβραδύνεται και η ροή να αντιστρέφεται (Σημείο P_1). Το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνει κατά πολύ κατά την κατεύθυνση της κίνησης τα σωματίδια του ρευστού κοντά στην στερεή επιφάνεια κινούνται προς τα έξω του στρώματος και έτσι η ροή αποκολλάται (Σημείο S).

Στην περιοχή του σημείου αποκόλλησης η ταχύτητα είναι μηδενική στην στερεή επιφάνεια αλλά και σε ένα μικρό διάστημα, κάθετο σε αυτήν:

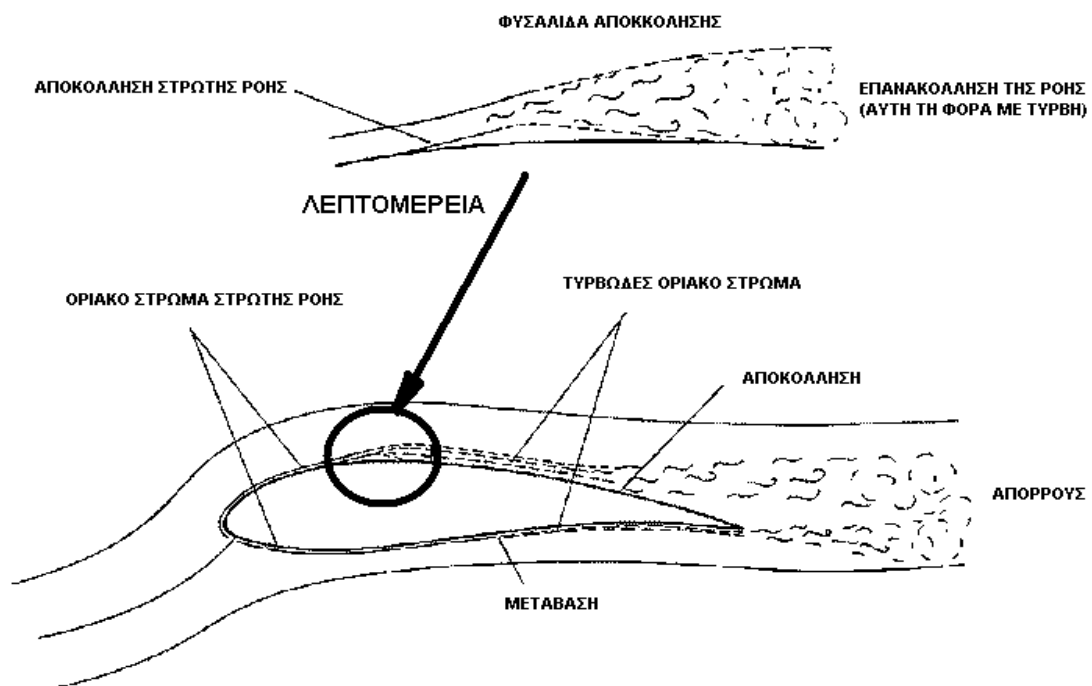
$$\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0$$

Δηλαδή στο σημείο αποκόλλησης δεν έχουμε επιτάχυνση της ροής και συνεπώς ούτε διατμητικές τάσεις. Στα επόμενα σχήματα εμφανίζονται τα παραπάνω σχετικά με το οριακό στρώμα. Στη πρώτη εικόνα φαίνεται το προφίλ της ταχύτητας το οποίο έχει μηδενική τιμή για ένα διάστημα μέσα στο οριακό στρώμα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η μεταβολή του προφίλ ταχύτητας κατά την ροή του ρευστού πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής, η επιβράδυνση της ροής και η αποκόλλησή της.



Σχήμα 3.9: Επιβράδυνση και απαρχή της αποκόλλησης της ροής [4]

Η στρωτή ροή μετά το σημείο αποκόλλησης είναι δυνατό να επανακολληθεί στη ροή αυτή τη φορά όμως εμπεριέχοντας στροβιλότητα και δημιουργώντας έτσι τη τυρβώδη περιοχή του οριακού στρώματος. Στη συνέχεια η ροή μπορεί να αποκολληθεί δημιουργώντας δυσμενή αποτελέσματα στον απόρο. Στο επόμενο σχήμα περιγράφεται η συγκεκριμένη διαδικασία από τον Prandtl [51].



Σχήμα 3.10: Αποκόλληση ροής, φυσαλίδα αποκόλλησης και επανακόλληση [50]

3.3.1 Οι εξισώσεις του οριακού στρώματος (ασυμπίεστη ροή)

Για το οριακό στρώμα ασυμπίεστης δυοδιάστατης ροής, ο Prandtl αναπτύσσοντας τις εξισώσεις Navier-Stokes, κατέληξε σε δύο εξισώσεις που διέπουν τη ροή στο οριακό στρώμα:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}$$

Όταν

$$\left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0$$

Τότε

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν την εξίσωση της ορμής στον άξονα x και την γνωστή εξίσωση της συνέχειας αντίστοιχα και συνήθως αναφέρονται σαν εξισώσεις του οριακού στρώματος για ασυμπίεστη ροή. Οι υποθέσεις που γίνανε για να καταλήξει ο Prandtl σε αυτές απαριθμούνται παρακάτω.

Το ροϊκό πεδίο έξω από το οριακό στρώμα είναι πεδίο ιδανικής ροής, χωρίς τριβή και ισχύουν οι εξισώσεις του Euler. Μέσα στο οριακό στρώμα έχουμε τριβή.

Το οριακό στρώμα είναι πολύ λεπτό σε σχέση με το χαρακτηριστικό μήκος της στερεής επιφάνειας.

Οι οριακές συνθήκες του οριακού στρώματος είναι οι παρακάτω:

$$u(x, 0) = 0$$

$$v(x, 0) = 0$$

$$u(x, 0) = 0$$

$$v(x, 0) = 0$$

$$\lim_{y \rightarrow \infty} u(x, y) = u_E$$

$$\lim_{y \rightarrow \infty} v(x, y) = 0$$

Μια ενδιαφέρουσα διατύπωση των εξισώσεων του οριακού στρώματος είναι η ολοκληρωμένη εξίσωση της ορμής στην κατεύθυνση y και διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον von Karman. Η εξίσωση αυτή γράφεται ως εξής:

$$\frac{d\theta}{dk} + (2 + H) \cdot \frac{\theta}{u_E} \cdot \frac{du_E}{dx} = \frac{C_f}{2}$$

όπου C_f ο συντελεστής τριβής της στερεής επιφάνειας.

3.3.2 Εξισώσεις του οριακού στρώματος (συμπιεστή ροή)

Παρακάτω θα αναλυθούν οι εξισώσεις και οι σχέσεις που ισχύουν στη περίπτωση που η ροή είναι συμπιεστή. Οι εξισώσεις αυτές βασίζονται σε πολλές μελέτες που έχουν γραφτεί εδώ και δεκαετίες. Η παρούσα μελέτη όπως προαναφέρθηκε αφορά σε ασυμπίεστη ροή, όμως είναι σημαντικό να αναφερθούν οι εξισώσεις της συμπιεστής ροής καθώς απλοποιώντας αυτές προκύπτουν οι εξισώσεις της ασυμπίεστης. Ακόμη θα βοηθήσουν τον αναγνώστη που ενδιαφέρεται να μάθει τον τρόπο λειτουργίας της υπολογιστικής μεθόδου του XFOIL. Αρχικά δίνονται οι ορισμοί κάποιων βασικών μεγεθών που θα χρησιμοποιηθούν στις εξισώσεις.

Ο παράγοντας σχήματος δίνεται με τις παρακάτω μορφές:

$$H = \frac{\delta^*}{\theta}$$

: παράμετρος μορφής (*shape parameter*)

$$H^{**} = \frac{\delta^{**}}{\theta}$$

: παράμετρος μορφής πυκνότητας (*density shape parameter*)

$$H^{**} = \frac{\theta^*}{\theta}$$

: παράμετρος μορφής κινητικής ενέργειας (*kinetic energy shape parameter*)

$$H_k = \frac{\int \left(1 - \frac{u}{u_E}\right) dn}{\int \left(\frac{u}{u_E}\right) \cdot \left(1 - \frac{u}{u_E}\right) dn}$$

: κινηματική παράμετρος μορφής (*kinematic shape parameter*)

Κάποια βασικά μεγέθη του οριακού στρώματος αναφέρθηκαν προηγούμενα. Παρακάτω δίνονται όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη με τους ορισμούς τους.

$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{\rho \cdot u}{\rho_E \cdot u_E}\right) \cdot dn$$

: πάχος μετατόπισης (*displacement thickness*)

$$\delta^{**} = \int \left(\frac{u}{u_E} \right) \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_E} \right) dn$$

: πάχος πυκνότητας (*density thickness*)

$$\theta = \int \left(\frac{\rho \cdot u}{\rho_E \cdot u_E} \right) \cdot \left(1 - \frac{u}{u_E} \right) dn$$

: πάχος απώλειας ορμής (*momentum thickness*)

$$\theta^* = \int \left(\frac{\rho \cdot u}{\rho_E \cdot u_E} \right) \cdot \left(1 - \frac{u^2}{u_E^2} \right) dn$$

: πάχος κινητικής ενέργειας (*kinetic energy thickness*)

Στις επόμενες εξισώσεις θα χρησιμοποιηθούν οι παράγοντες:

$$C_d = \left(\frac{1}{\rho_E \cdot u_E^3} \right) \int \tau \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right) dn$$

: συντελεστής σκέδασης (*dissipation coefficient*)

$$C_f = \left(\frac{2 \cdot t_{wall}}{\rho_E \cdot u_E^2} \right)$$

: συντελεστής επιφανειακής τριβής (*skin – friction coefficient*)

$$C_t = \left(\frac{t_{wall}}{\rho_E \cdot u_E^2} \right)$$

: συντελεστής διατμητικών τάσεων (*shear stress coefficient*)

Όπως προαναφέρθηκε όλα τα μεγέθη που αναφέρονται στην ακμή του οριακού στρώματος φέρουν το δείκτη «E». Τα μεγέθη αυτά είναι η ταχύτητα ακμής οριακού στρώματος u_E , η πυκνότητα ακμής οριακού στρώματος ρ_E , το ιξώδες στην ακμή μ_E , ο αριθμός Mach της ακμής οριακού στρώματος M_E .

Στις εξισώσεις που θα ακολουθήσουν θα χρησιμοποιηθούν τα παρακάτω μεγέθη, ο αριθμός Reynolds (που αναφέρεται στο πάχος θ)

$$Re_\theta = \frac{\rho_E \cdot u_E \cdot \theta}{\mu_E}$$

, η μεταβλητή ενίσχυσης της διαταραχής της μετάβασης \tilde{n} , η εφαπτομενική ταχύτητα στη στερεή επιφάνεια

$$U_t = \sqrt{\frac{t_{wall}}{\rho}}$$

και h_o η ενθαλπία στο σημείο ανακοπής.

Ενώ η τετμημένη του ροϊκού πεδίου ως τώρα αναφέρονταν με το λατινικό γράμμα x και η τεταγμένη με το y , θα αντικατασταθούν από το ελληνικά γράμματα ξ και η αντίστοιχα (σχετικές συντεταγμένες ως προς τους καρτεσιανούς άξονες). Η παρούσα διατύπωση των εξισώσεων που ισχύουν σε συμπιεστή ροή χρησιμοποιεί τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{d\theta}{d\xi} + (2 + H - M_E^2) \cdot \frac{\theta}{u_E} \cdot \frac{du_E}{d\xi} = \frac{C_f}{2}$$

$$\theta \frac{dH^*}{d\xi} + (2 \cdot H^{**} + H^* \cdot (1 - H)) \cdot \frac{\theta}{u_E} \cdot \frac{du_E}{d\xi} = 2 \cdot C_d - H^* \cdot \frac{C_f}{2}$$

Η εξίσωση προκύπτει εύκολα από τον συνδυασμό της ολοκληρωμένης εξίσωσης της ορμής και της διαφορικής εξίσωσης του πάχους κινητικής ενέργειας η οποία γράφεται ως εξής:

$$\frac{d\theta^*}{d\xi} + \left(\frac{\delta^{**}}{\theta^*} + 3 - M_E^2 \right) \cdot \frac{\theta}{u_E} \cdot \frac{du_E}{d\xi} = 2 \cdot C_d$$

Το σύστημα των εξισώσεων και ολοκληρώνεται αν προστεθούν και οι εξισώσεις που ορίζουν τις ποσότητες

$$H^* = H^*(H_k, M_E, Re_\theta)$$

$$H^{**} = H^{**}(H_k, M_E)$$

$$C_f = C_f(H_k, M_E, Re_\theta)$$

$$C_d = C_d(H_k, M_E, Re_\theta)$$

3.4 Κριτήριο μετάβασης

Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο στο μοντέλο του XFOIL για την εκτίμηση της περιοχής μετάβασης (ελεύθερη μετάβαση) χρησιμοποιείται η μέθοδος e^n . Για την εκτέλεση του κώδικα απαιτείται η εισαγωγή από τον χρήστη της παραμέτρου n_{crit} , η οποία όπως έχει προαναφερθεί είναι ο λογάριθμος του παράγοντα ενίσχυσης της διαταραχής η οποία εκκινεί τη μετάβαση. Η τιμή του παράγοντα αυτού εξαρτάται από το επίπεδο διαταραχών στη ροή στην οποία βρίσκεται η αεροτομή ώστε να γίνει σωστή προσομοίωση της επίδρασής τους στη μετάβαση. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται οι τυπικές τιμές του για διάφορες περιπτώσεις.

Πίνακας 3.1: Τιμές του κρίσιμου παράγοντα για διάφορες περιπτώσεις [43]

Περίπτωση	n_{crit}
Sailplane	12-14
Motor glider	11-13
Καθαρή αεροσύραγμα	10-12
Συνήθης αεροσύραγμα	9
Λερωμένη αεροσύραγμα	4-8

Η επιλογή $n_{crit} = 9$ οδηγεί στη κλασσική μέθοδο e^9 και είναι μια από τις πιο συνήθεις επιλογές καθώς δίνει ακριβή αποτελέσματα στις περισσότερες εφαρμογές αεροτομών. Στο XFOIL αυτή η τιμή είναι η προεπιλογή. Στη παρούσα εργασία θα γίνει προσομοίωση ροής με ελεύθερη μετάβαση και $n_{crit} = 9$.

3.5 Ο αριθμός Reynolds στο XFOIL

Οι περισσότερες λειτουργίες του XFOIL πραγματοποιούνται στις καρτεσιανές συντεταγμένες x, y της περιφέρειας της αεροτομής, η οποία δεν έχει οπωσδήποτε μοναδιαία χορδή c . Μιας και η έννοια της χορδής για 'παράξενα' σχήματα αεροτομών είναι κάτι το ασαφές, οι συντελεστές CL , CD , CM στο XFOIL, υπολογίζονται κανονικοποιώντας τις δυνάμεις και τη ροπή μόνο με τη δυναμική πίεση της ροής (η χορδή αναφοράς τίθεται ίση με τη μονάδα). Όμοια, ο αριθμός Reynolds στο XFOIL (RE) προσδιορίζεται από τη ταχύτητα της ροής, το ιξώδες και μια υπόθεση για μοναδιαία χορδή. Έτσι είναι:

$$CL = L/q$$

$$CD = D/q$$

$$CM = M/q$$

$$RE = U/\nu$$

$$q = 0.5 \cdot \rho \cdot u^2$$

Οι συμβατικοί ορισμοί των παραπάνω συντελεστών είναι:

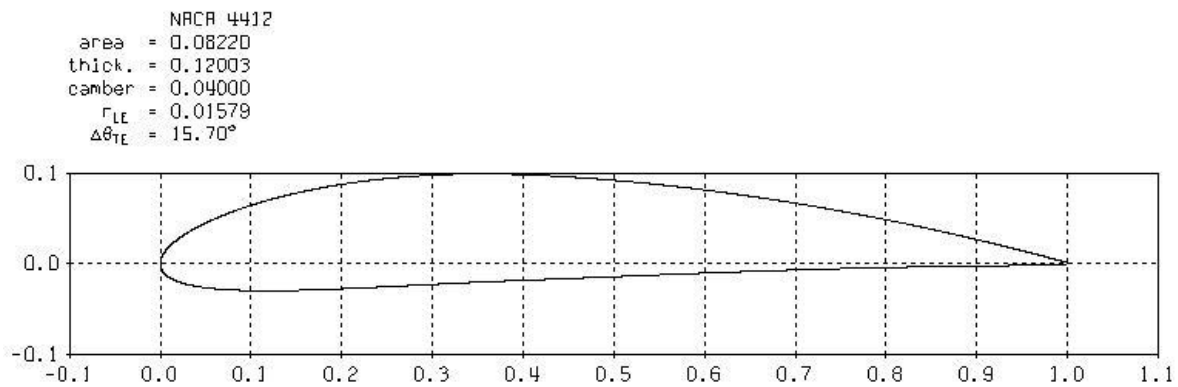
$$C_L = \frac{L}{q \cdot c}$$

$$C_D = \frac{D}{q \cdot c}$$

$$C_M = \frac{L}{q \cdot c^2}$$

$$Re_c = Re = \frac{U \cdot c}{\nu}$$

Άρα οι συμβατικοί ορισμοί και αυτοί του XFOIL, διαφέρουν μόνο κατά ένα παράγοντα c ή c^2 . Για παράδειγμα, μια αεροτομή NACA 4412 (σχήμα 3.11) στο μενού, μελετάται για $Re=500000$ και, αρχικά $a=3^\circ$ για χορδή $c=1.0$ και στη συνέχεια για χορδή $c=0.5$ (μεταβάλλεται η κλίμακα με μια εντολή του XFOIL).



Σχήμα 3.11: Η αεροτομή NACA 4412

Τα αποτελέσματα που εξάγονται από αυτή την εκτέλεση είναι:

$$c = 1.0 : CL = 0.80, CD = 0.0082, (RE = 500000, Re_c = 500000)$$

$$c = 0.5 : CL = 0.40, CD = 0.0053, (RE = 500000, Re_c = 250000)$$

Αφού ο CL δεν είναι κανονικοποιημένος με τη χορδή, είναι σχεδόν ανάλογος με το μέγεθος της αεροτομής. Δεν είναι ακριβώς ανάλογος, αφού ο πραγματικός αριθμός Reynolds (Re_c) είναι διαφορετικός και επίσης ο αριθμός Reynolds επηρεάζει λίγο την άνωση. Σε αντίθεση, ο CD για τη μικρότερη αεροτομή είναι αισθητά μεγαλύτερος από το μισό αυτού της μεγαλύτερης αεροτομής, μιας και ο πραγματικός αριθμός Reynolds έχει σημαντικό αντίκτυπο στην αεροδυναμική αντίσταση οριακού στρώματος. Επαναλαμβάνοντας την υπόθεση της αεροτομής με χορδή $c = 0.5$, με $RE = 1000000$, παράγονται τα αναμενόμενα αποτελέσματα:

$$c = 1.0 : CL = 0.40, CD = 0.0041, (RE = 1000000, Re_c = 500000)$$

Αν και το XFOIL εκτελεί όλες του τις λειτουργίες χωρίς να λαμβάνει υπόψη το μέγεθος της αεροτομής, ωστόσο κάποιες ποσότητες καθορίζονται ως προς τη χορδή. Ένα παράδειγμα είναι το σχήμα της γραμμής καμπυλότητας και το πάχος του οριακού στρώματος, που ορίζονται ως προς τις σχετικές συντεταγμένες x/c , y/c κατά μήκος και καθέτως της χορδής. Αυτό γίνεται για τη διευκόλυνση του χρήστη. Στην είσοδο και στην έξοδο οι όροι x και y αναφέρονται στις καρτεσιανές συντεταγμένες, ενώ οι όροι x/c και y/c αναφέρονται στις συντεταγμένες που βασίζονται στη χορδή και είναι μετατοπισμένες, περιστρεφμένες και σε κλίμακα έτσι ώστε η ακμή προσβολής να βρίσκεται στο σημείο $(x/c, y/c) = (0,0)$ και η ακμή φυγής στο $(x/c, y/c) = (1,0)$. Τα δύο συστήματα συμπίπτουν μόνο αν η αεροτομή είναι κανονικοποιημένη.

3.5.1 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών του XFOIL

Το XFOIL αποτελεί ένα ακριβές υπολογιστικό εργαλείο το οποίο όμως έχει κάποιους περιορισμούς, κάποια όρια πέραν των οποίων η ακρίβεια του κώδικα μειώνεται. Πολλές φορές έχει συζητηθεί αυτό το θέμα στο επίσημο forum του XFOIL. Για παράδειγμα, έχει αναφερθεί από τα μέλη ότι για αεροτομές με μικρή ακτίνα καμπυλότητας στην ακμή προσβολής τύπου NACA, ο μέγιστος συντελεστής άνωσης που βρίσκεται από το XFOIL, είναι σχετικά μεγαλύτερος από αυτόν που έχουν δώσει δεδομένα δοκιμών σε αεροσύραγγες [36,37,41,52].

Πίνακας 3.2 : Μέγιστο συντελεστής άνωσης από πειραματικά δεδομένα και εκτίμηση του XFOIL [36,37,41,52]

Αεροτομή	Εκτίμηση από το XFOIL	Δεδομένα αεροσύραγγας
NACA 0006	1.57	0.90
NACA 1408	1.83	1.35
NACA 0010-34	1.40	0.80
NACA 0012	1.86	1.60
NACA 2412	1.94	1.70
NACA 23012	1.89	1.80

Όπως φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα σε άλλες περιπτώσεις η απόκλιση είναι μεγάλη και σε άλλες μικρή. Όπως όμως αναφέρθηκε στο ίδιο forum για την αεροτομή NACA 0006 και με $Re = 9000000$ ο ορισμός του αριθμού Mach παίζει καίριο ρόλο. Συγκεκριμένα αποτελέσματα φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.3 : Επίδραση του αριθμού Mach στην εκτίμηση του μέγιστου συντελεστή άνωσης [25]

Mach	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
$C_{L,max}$	1.56	1.53	1.46	1.33	1.21	1.06	0.94

Ο λόγος για τον οποίο υπάρχει αυτή η ευαισθησία σε αεροτομές με τόσο μικρή ακτίνα καμπυλότητας της ακμής προσβολής είναι ότι αν και η ελεύθερη ροή (μακριά από το πτερύγιο) μπορεί να έχει χαμηλό αριθμό Mach και το ρευστό στην έκτασή του είναι ασυμπιέστο, σε μεγάλες γωνίες προσβολής η ροή στη περιοχή αυτή γίνεται υπερηχητική. Αυτή η υπερηχητική ή περίπου υπερηχητική ροή στην ακμή προσβολής επηρεάζει σημαντικά και αρνητικά την αντίσταση στην αποκόλληση της ροής στο οριακό στρώμα της κάτω πλευράς και ως εκ τούτου μειώνει τον μέγιστο συντελεστή άνωσης. Αυτά έχουν αναφερθεί για τις αεροτομές NACA των οποίων τα δεδομένα συνήθως αντλούνται από κάποιες παλιές τεχνικές εκθέσεις στις οποίες όμως δε καθορίζονταν για ποιόν αριθμό Mach γίνονταν οι δοκιμές [28,36].

3.6 Τα χαρακτηριστικά της αεροτομής naca 63415

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια από τα αποτελέσματα που αναφέρονται στην αεροτομή NACA 63415 η οποία χρησιμοποιείται σε όλες τις ακτινικές θέσεις του πτερυγίου. Στο πρόγραμμα βελτιστοποίησης γίνεται διαχωρισμός του πτερυγίου ολικού μήκους 20.5 m, σε έντεκα ακτινικές θέσεις και στην συνέχεια σε ενενήντα και υπολογίζεται ο αριθμός Reynolds για κάθε ακτινική θέση από $2.5 \cdot 10^6$ στην θέση 1 έως $2 \cdot 10^6$ στην θέση 11. όπως φαίνεται στον πίνακα 3.4. Ο αριθμός Mach προκύπτει από τον λόγο της αντίστοιχης ταχύτητα ανέμου με την παράμετρο ταχύτητας ήχου $a = 343.2$ (m/s). Χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

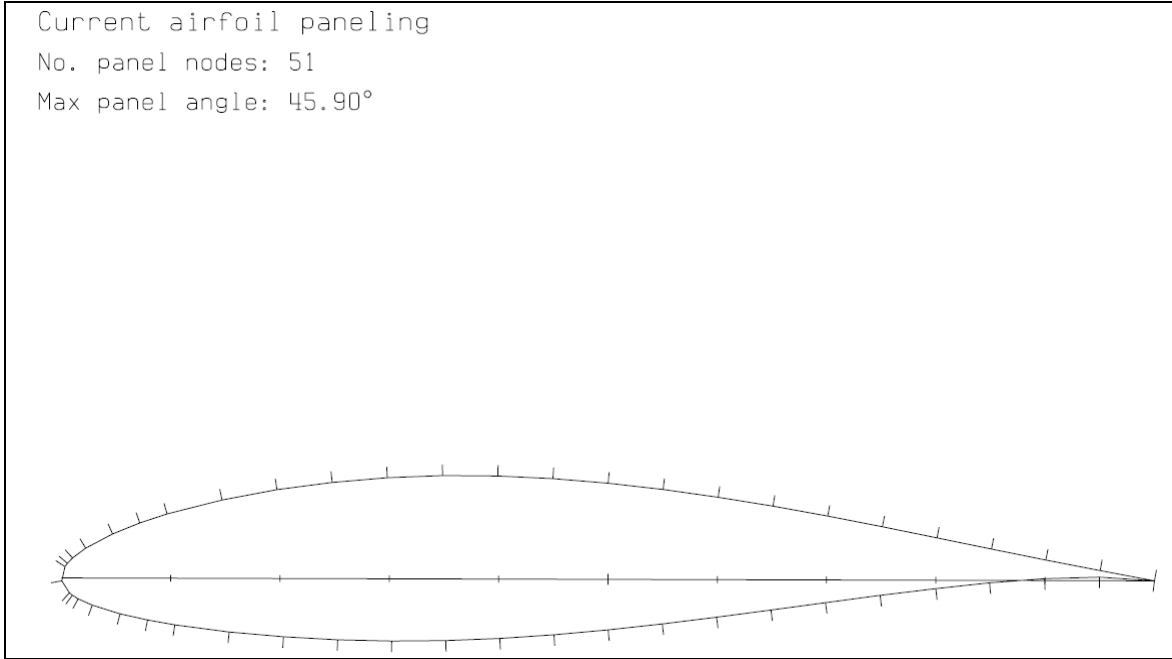
$$mach = \frac{V_0}{a}$$

Με χρήση του αριθμού Reynolds και του Mach υπολογίζονται οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης για ένα εύρος γωνιών -5 έως 15 και παρουσιάζονται στο πίνακα 3.6. Στο σχήμα 3.12, 3.13 παρουσιάζονται με γραφικές παραστάσεις οι τιμές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης καθώς και η γεωμετρία της αεροτομής NACA 63415 [37] στο

σχήμα 3.11. Οι πολικές συντεταγμένες της αεροτομής naca 63415 εμφανίζονται στον πίνακα 3.7. Επίσης παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της αεροτομής στον πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.4: Διαχωρισμός του πτερυγίου σε έντεκα ακτινικές θέσεις.

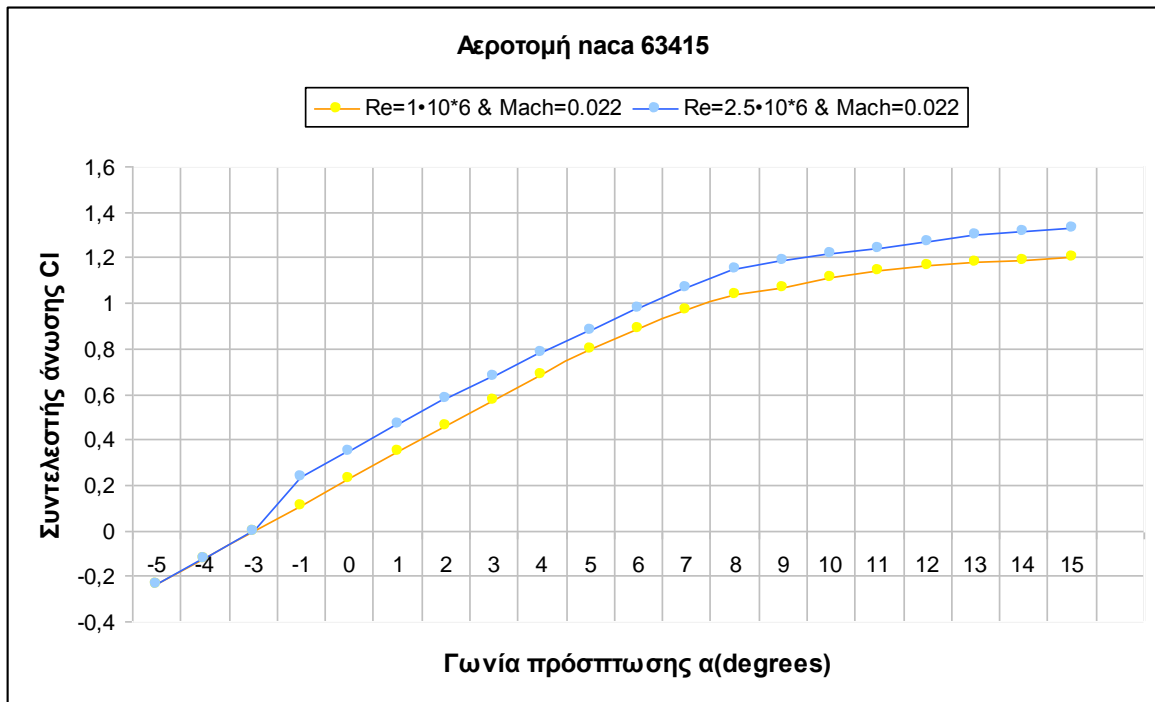
Ακτινικά σημεία	r/R
1	0.13
2	0.20
3	0.25
4	0.35
5	0.45
6	0.55
7	0.65
8	0.75
9	0.87
10	0.95
11	0.99



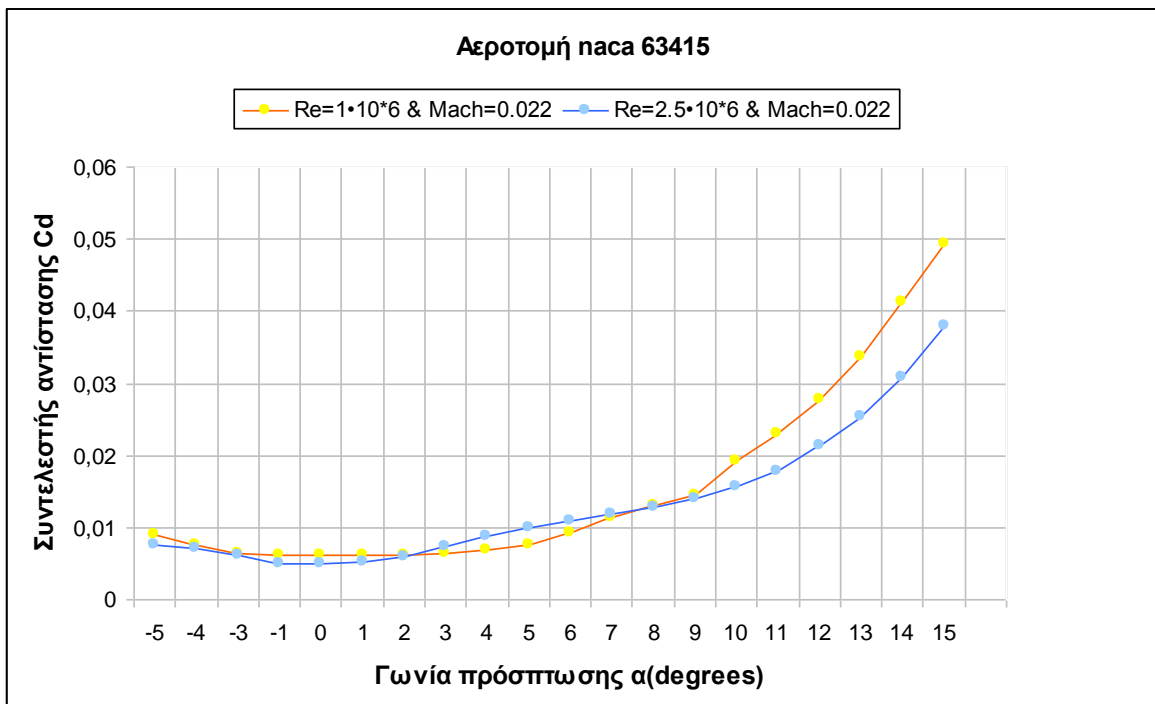
Σχήμα 3.11 : Η γεωμετρία της αεροτομής NACA 63415 [XFOIL]

Πίνακας 3.5 : Τα χαρακτηριστικά της αεροτομής NACA 63415 [37]

Πάχος	15.0%
Καμπυλότητα	2.2%
Γωνία σημείου πρόσπτωσης	14.2
Ακτίνα καμπυλότητας σημείου πρόσπτωσης	2.0%
Μέγιστος συντελεστής άνωσης Cl	1.301
Γωνία πρόσπτωσης μέγιστου συντελεστή άνωσης Cl	15.0
Γωνία αποκόλλησης	8.0
Γωνία μηδενικής άνωσης	-3.0



Σχήμα 3.12 :Ο συντελεστής άνωσης για ένα εύρος γωνιών -5 έως 15 για την αεροτομή NACA 63415 και για διάφορους Re [XFOIL]



Σχήμα 3.12 :Ο συντελεστής αντίστασης για ένα εύρος γωνιών -5 έως 15 για την αεροτομή NACA 63415 και για διάφορους Re [XFOIL]

Πίνακας 3.6 : Δεδομένα συντελεστών άνωσης και αντίστασης στο πρόγραμμα βελτιστοποίησης που προκύπτουν από το XFOIL για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds [XFOIL]

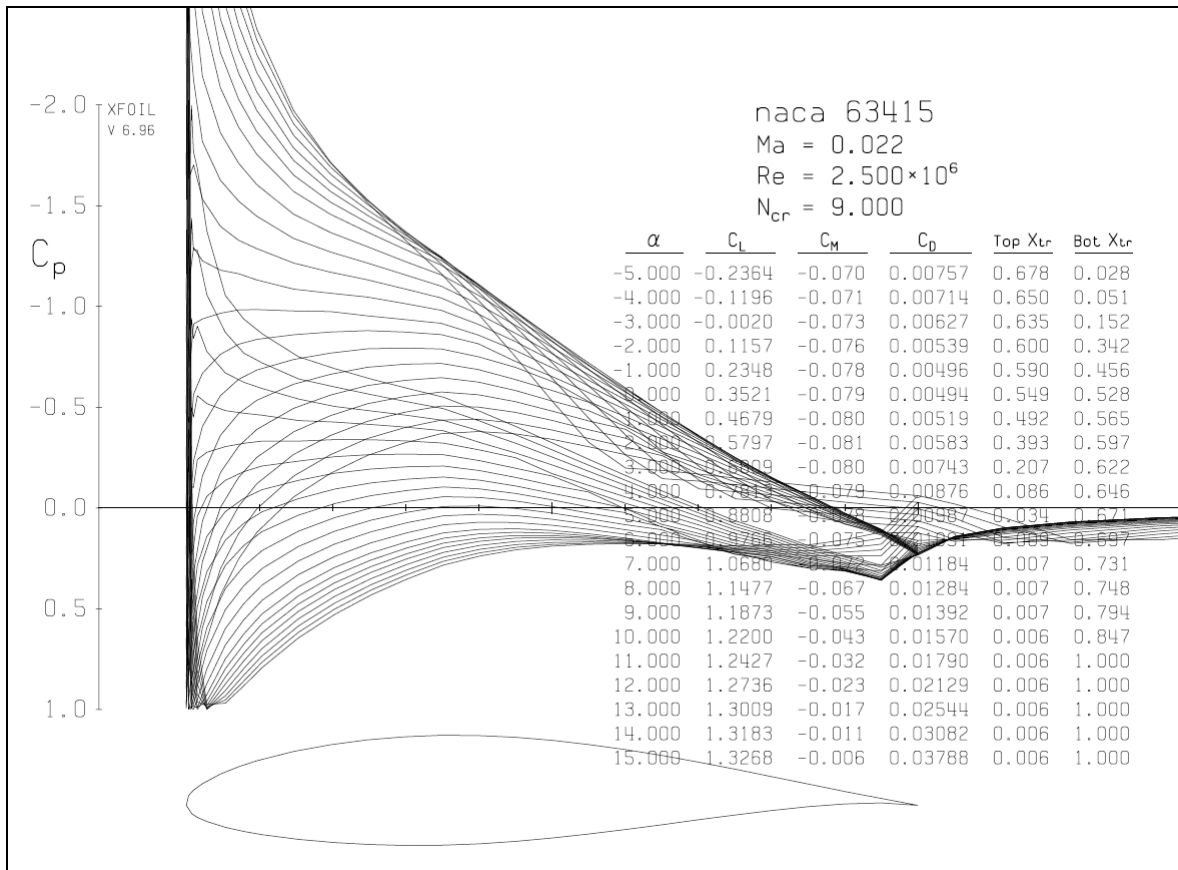
	Re=2.5·10⁶ & Mach=0.022		Re=1·10⁶ & Mach=0.022	
Γωνία πρόσπτωσης (μοίρες)	Cl	Cd	Cl	Cd
-5	-0,236	0,008	-0,235	0,009
-4	-0,120	0,007	-0,122	0,008
-3	-0,002	0,006	-0,006	0,006
-2	0,235	0,005	0,112	0,006
-1	0,352	0,005	0,230	0,006
0	0,468	0,005	0,346	0,006
1	0,580	0,006	0,463	0,006
2	0,681	0,007	0,577	0,007
3	0,781	0,009	0,690	0,007
4	0,881	0,010	0,796	0,008
5	0,977	0,011	0,890	0,009

6	1,068	0,012	0,969	0,011
7	1,148	0,013	1,036	0,013
8	1,187	0,014	1,070	0,015
10	1,220	0,016	1,113	0,019
11	1,243	0,018	1,144	0,023
12	1,274	0,021	1,167	0,028
13	1,301	0,025	1,182	0,034
14	1,318	0,031	1,188	0,041
15	1,327	0,038	1,203	0,049

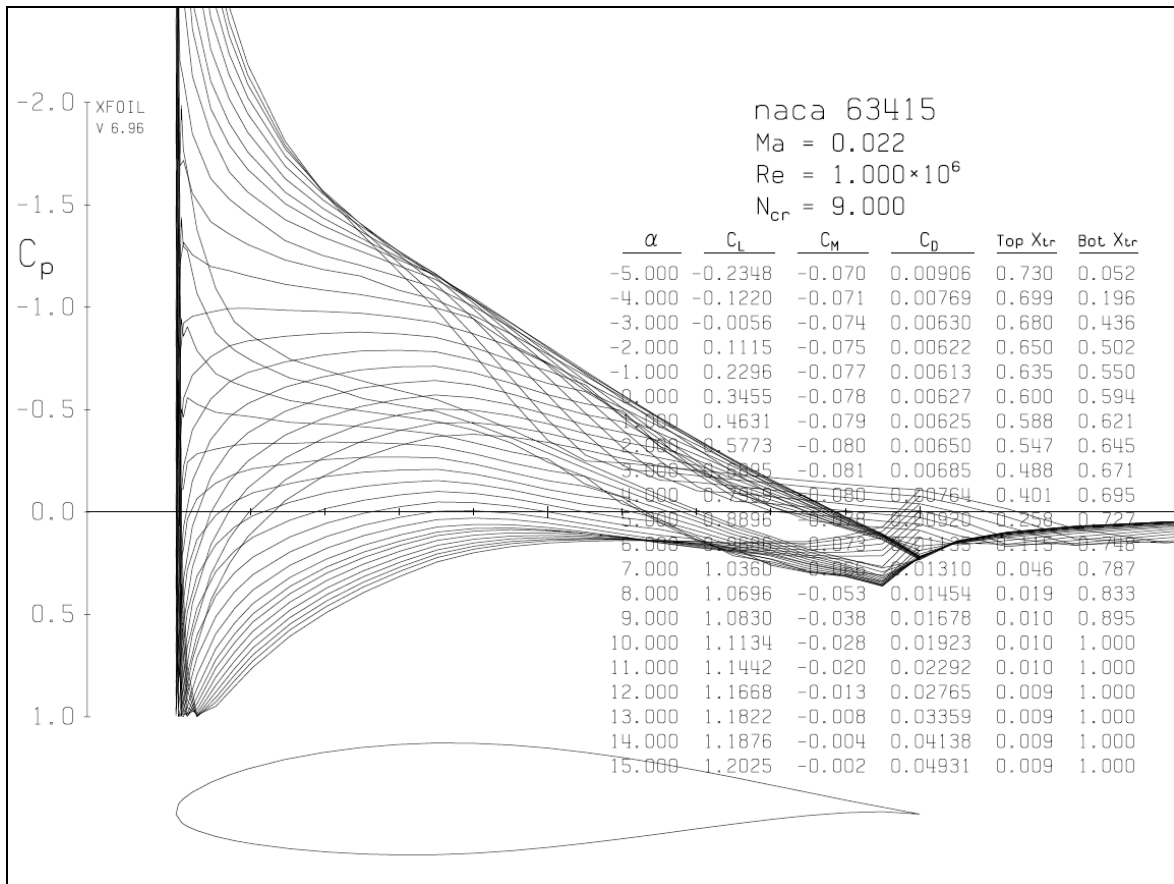
Πίνακας 3.7 : Οι πολικές συντεταγμένες της αεροτομής NACA 63415 [37]

x/c	y/c	x/c	y/c
1	0	0	0
0,95028	0,00931	0,007	-0,01087
0,90059	0,01884	0,00975	-0,01305
0,85085	0,02885	0,01509	-0,01646
0,80102	0,039	0,02802	-0,0222
0,75109	0,04907	0,0534	-0,03
0,70106	0,05877	0,07853	-0,03565
0,65093	0,0678	0,10353	-0,04009
0,6007	0,07595	0,15331	-0,04656

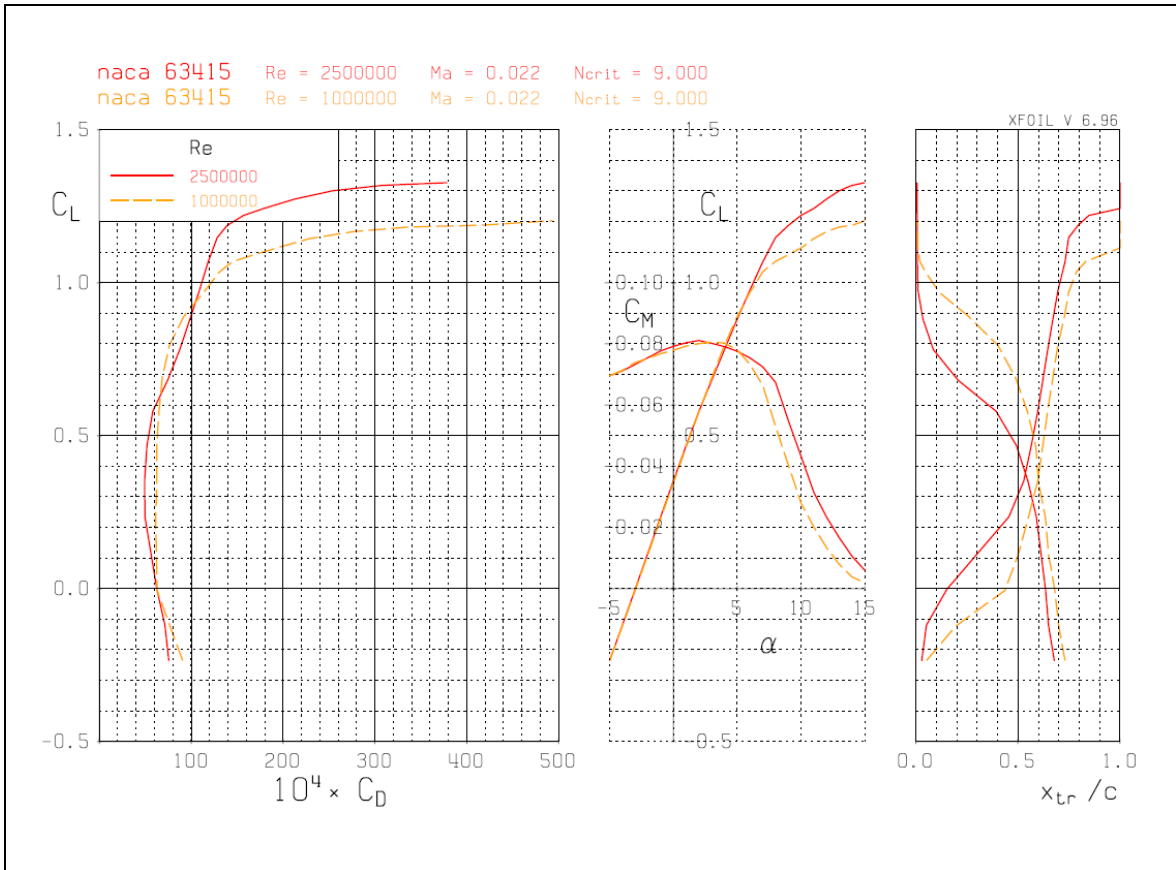
0,55039	0,08298	0,20295	-0,05095
0,5	0,08871	0,2525	-0,05361
0,44955	0,09289	0,302	-0,05474
0,39905	0,09527	0,35148	-0,05439
0,34852	0,09559	0,40095	-0,05243
0,298	0,09362	0,45045	-0,04909
0,2475	0,08941	0,5	-0,04459
0,19705	0,08279	0,54961	-0,03918
0,14669	0,07348	0,5993	-0,03311
0,09647	0,06077	0,64907	-0,0266
0,07147	0,05261	0,69894	-0,01989
0,0466	0,04264	0,74891	-0,01327
0,02198	0,02964	0,79989	-0,00716
0,00991	0,02074	0,84915	-0,00193
0,00525	0,01585	0,89941	0,00184
0,003	0,01287	0,94972	0,00333
0	0	1	0



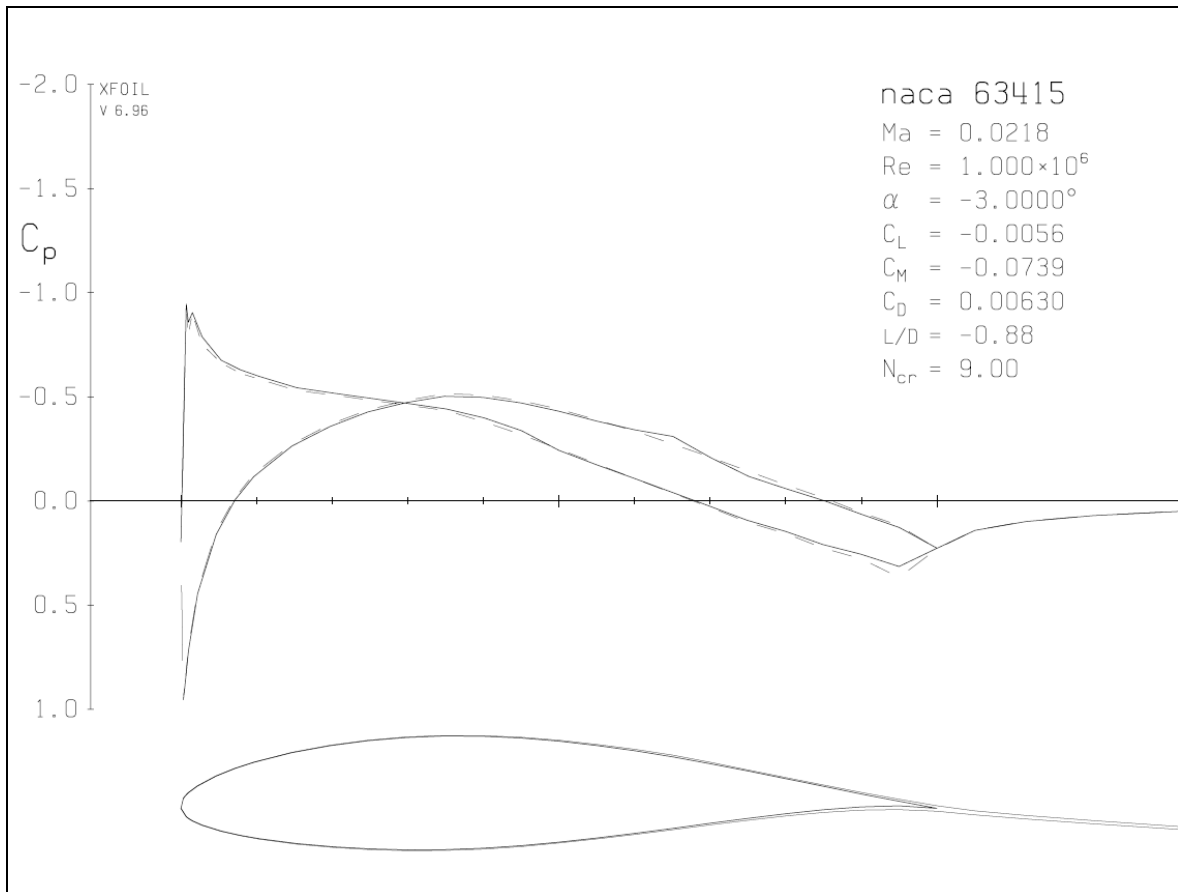
Σχήμα 3.13 :Η διανομή πίεσης για ένα εύρος γωνιών -5 έως 15 για την αεροτομή NACA 63415 και για $Re=2.5 \cdot 10^6$, $Mach=0.022$ [XFOIL]



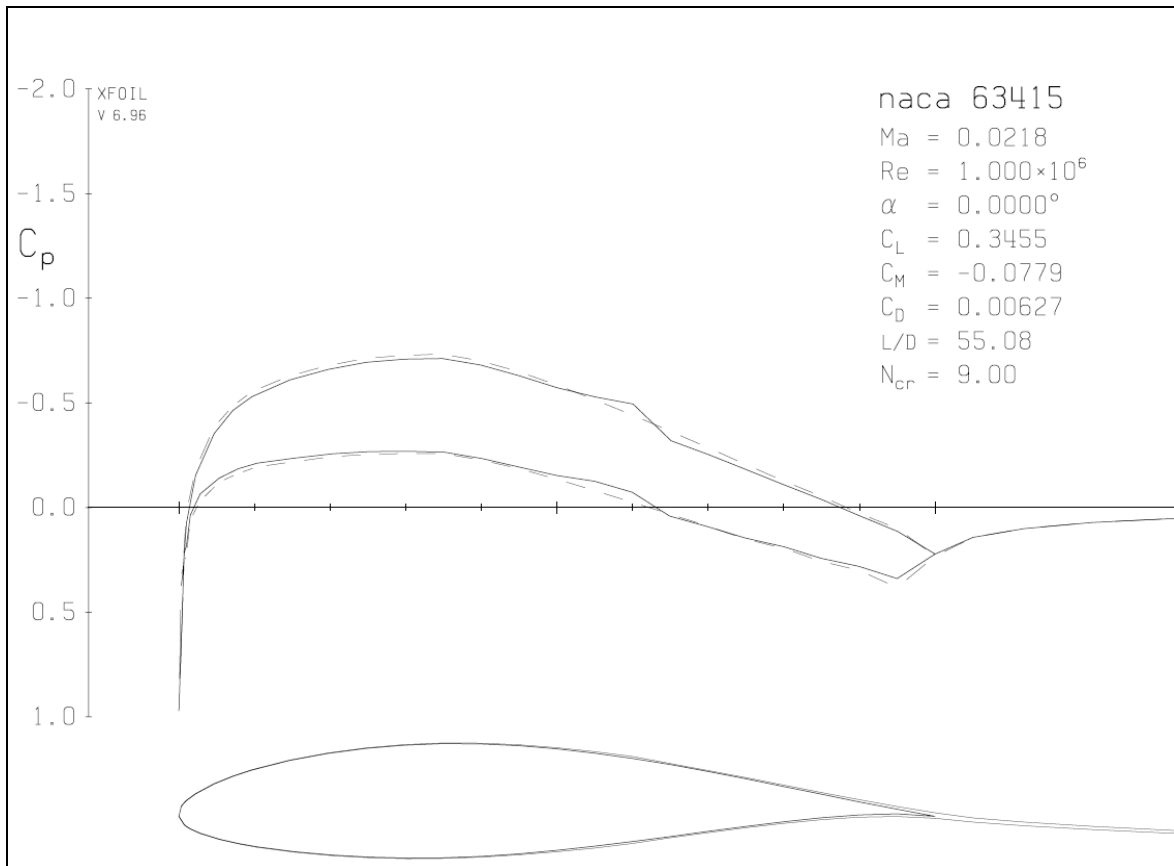
Σχήμα 3.14 :Η διανομή πίεσης για ένα εύρος γωνιών -5 έως 15 για την αεροτομή NACA 63415 και για $Re=1 \cdot 10^6$, $Mach=0.022$ [XFOIL]



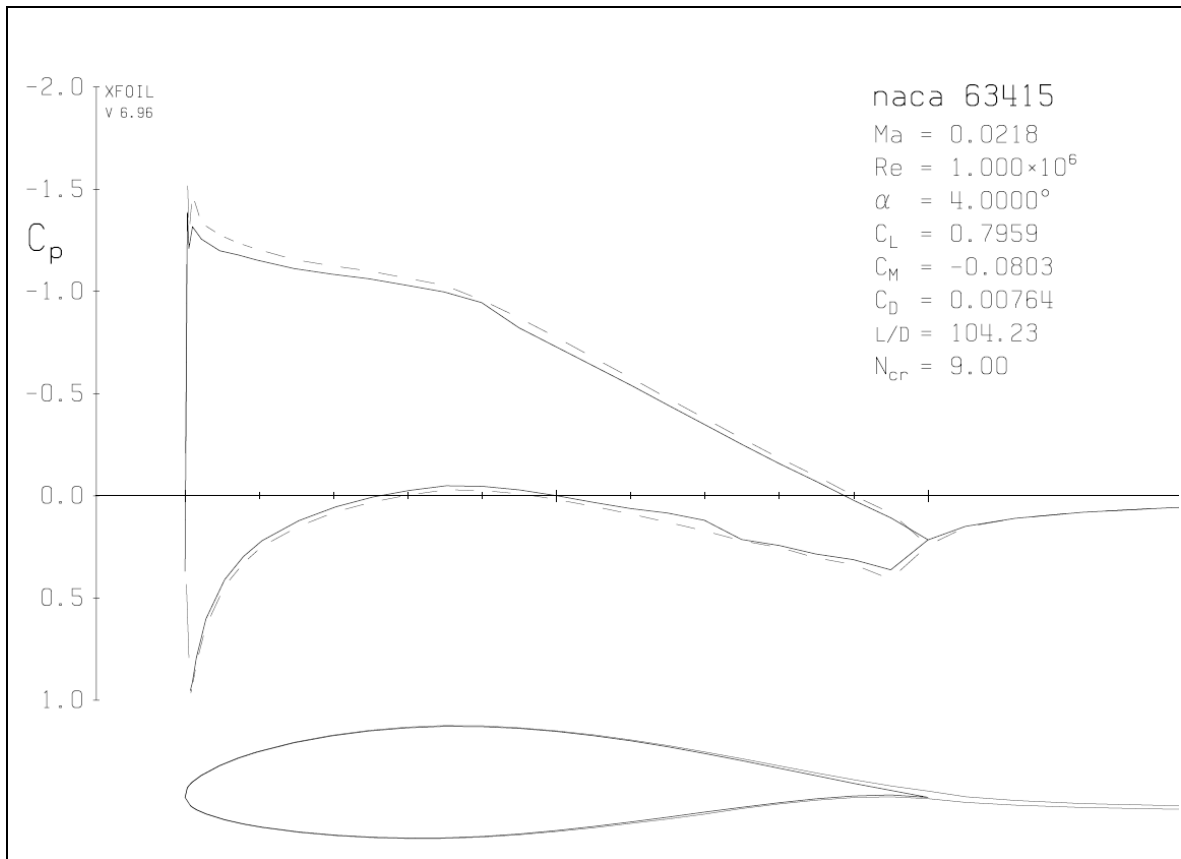
Σχήμα 3.15 :Ο λόγος συντελεστή άνωσης και αντίστασης και ο συντελεστής ροπής και άνωσης για ένα εύρος γωνιών -5 έως 15 για την αεροτομή NACA 63415 και για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds [XFOIL]



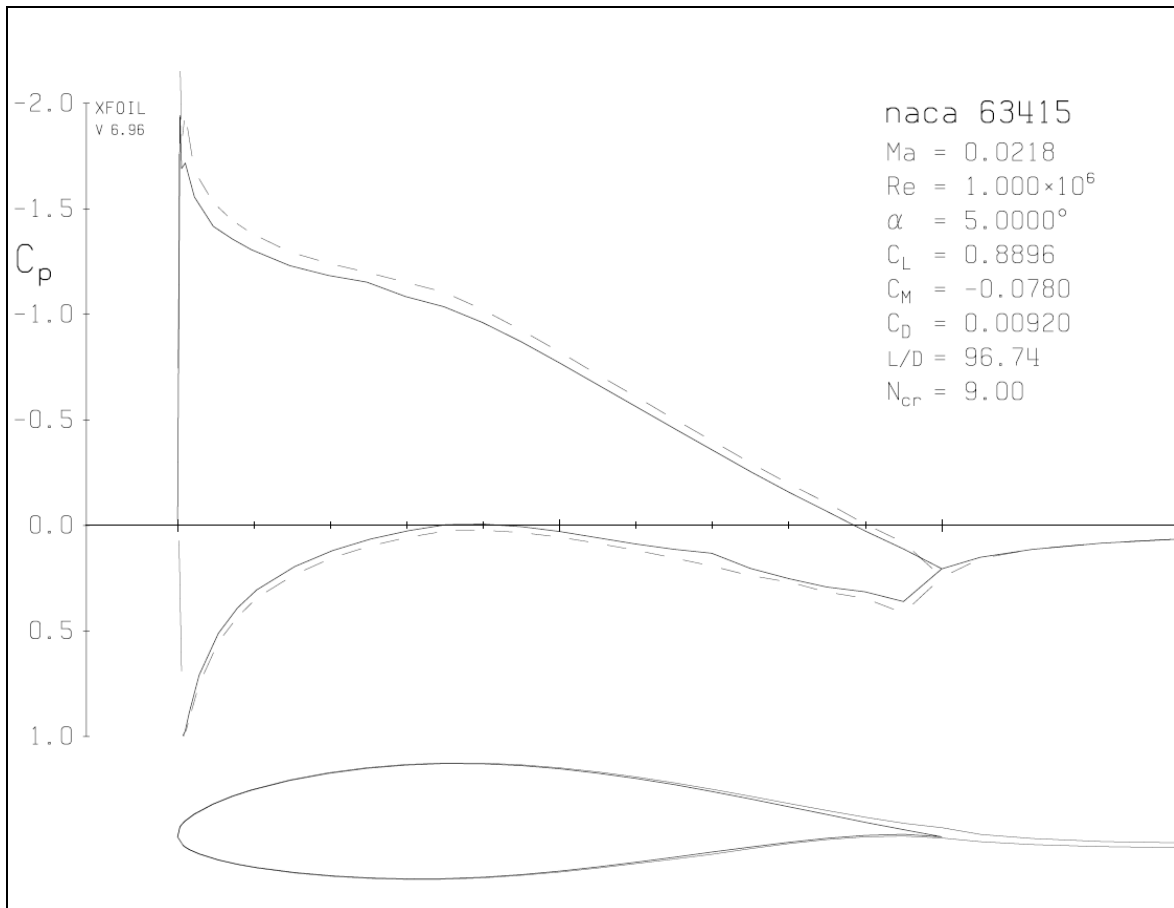
Σχήμα 3.16 :Η διανομή πίεσης για γωνία -3° για την αεροτομή NACA 63415 και για $Re=1 \cdot 10^6$, $Mach=0.022$ [XFoil]



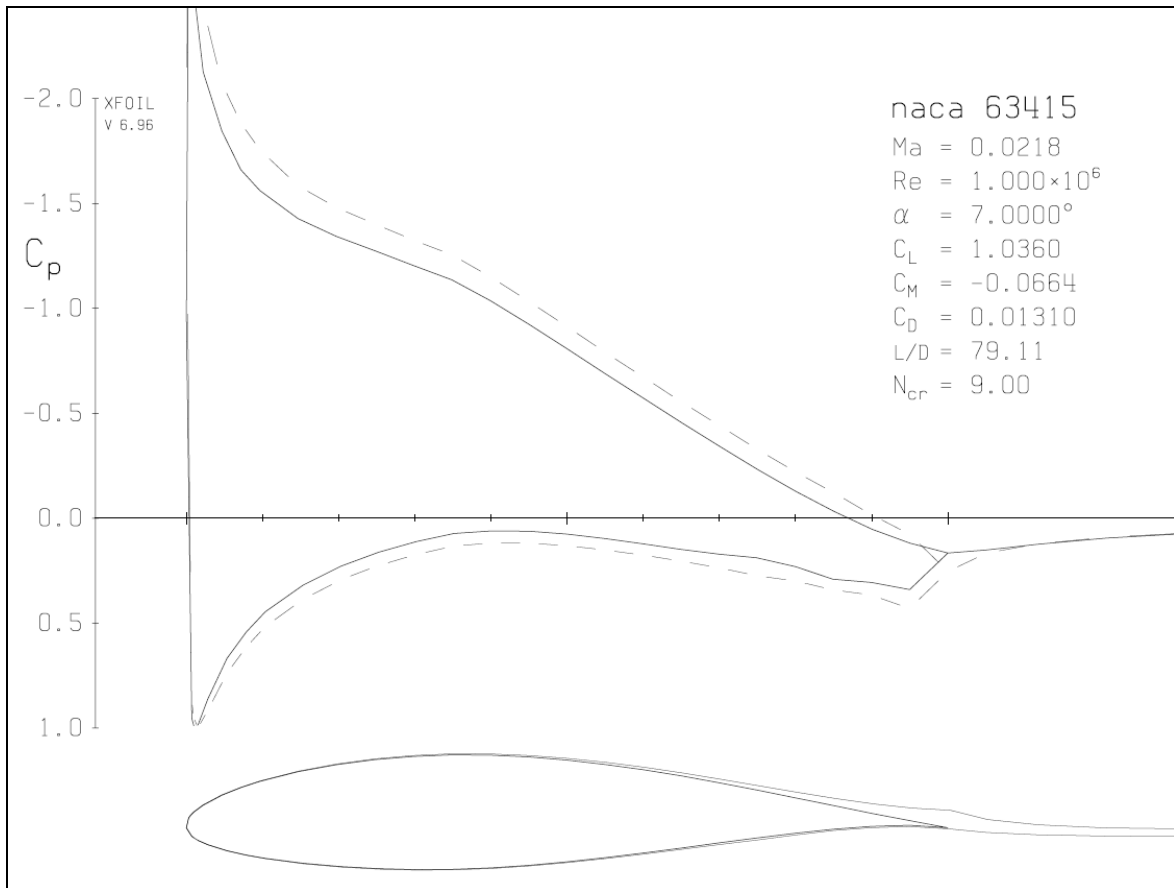
Σχήμα 3.17 :Η διανομή πίεσης για γωνία 0° για την αεροτομή NACA 63415 και για $Re=1 \cdot 10^6$, $Mach=0.022$ [XFOIL]



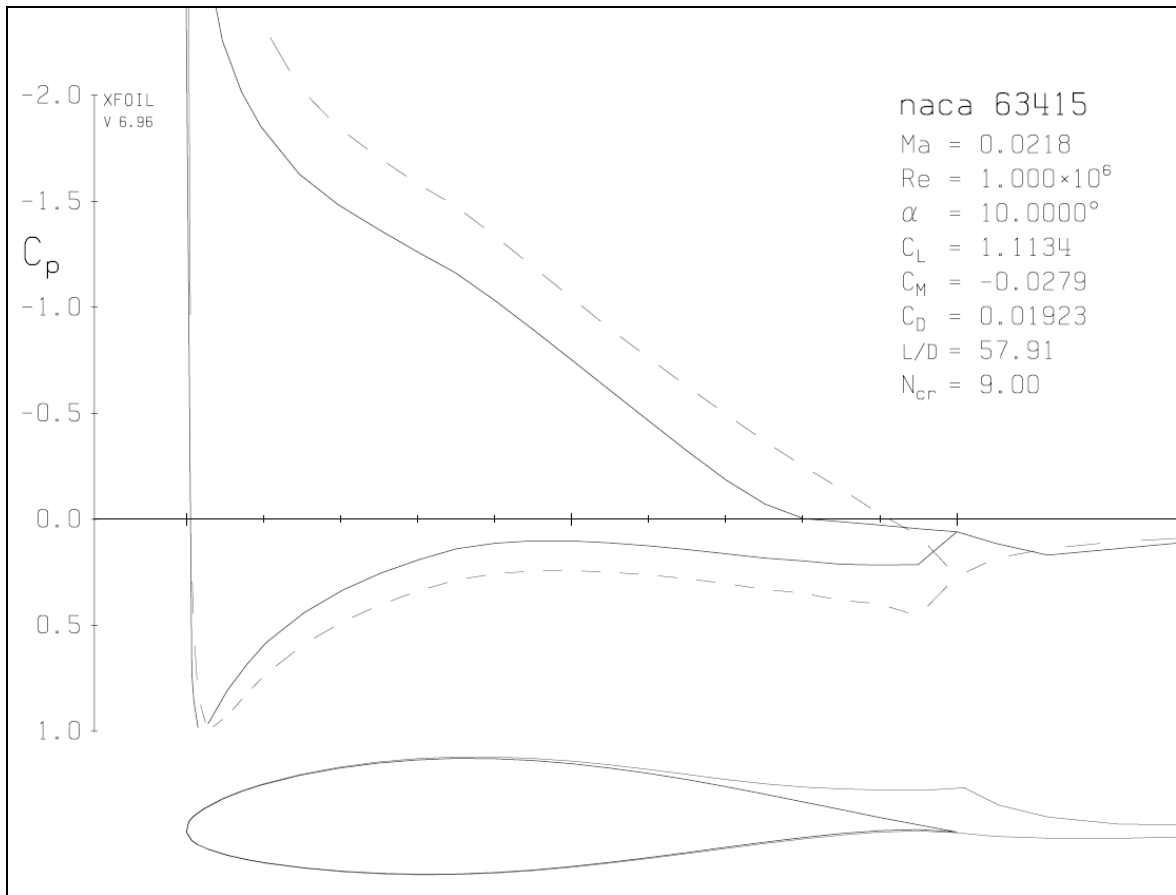
Σχήμα 3.18 :Η διανομή πίεσης για γωνία 4° για την αεροτομή NACA 63415 και $Mach=0.022$
 [XFOIL]



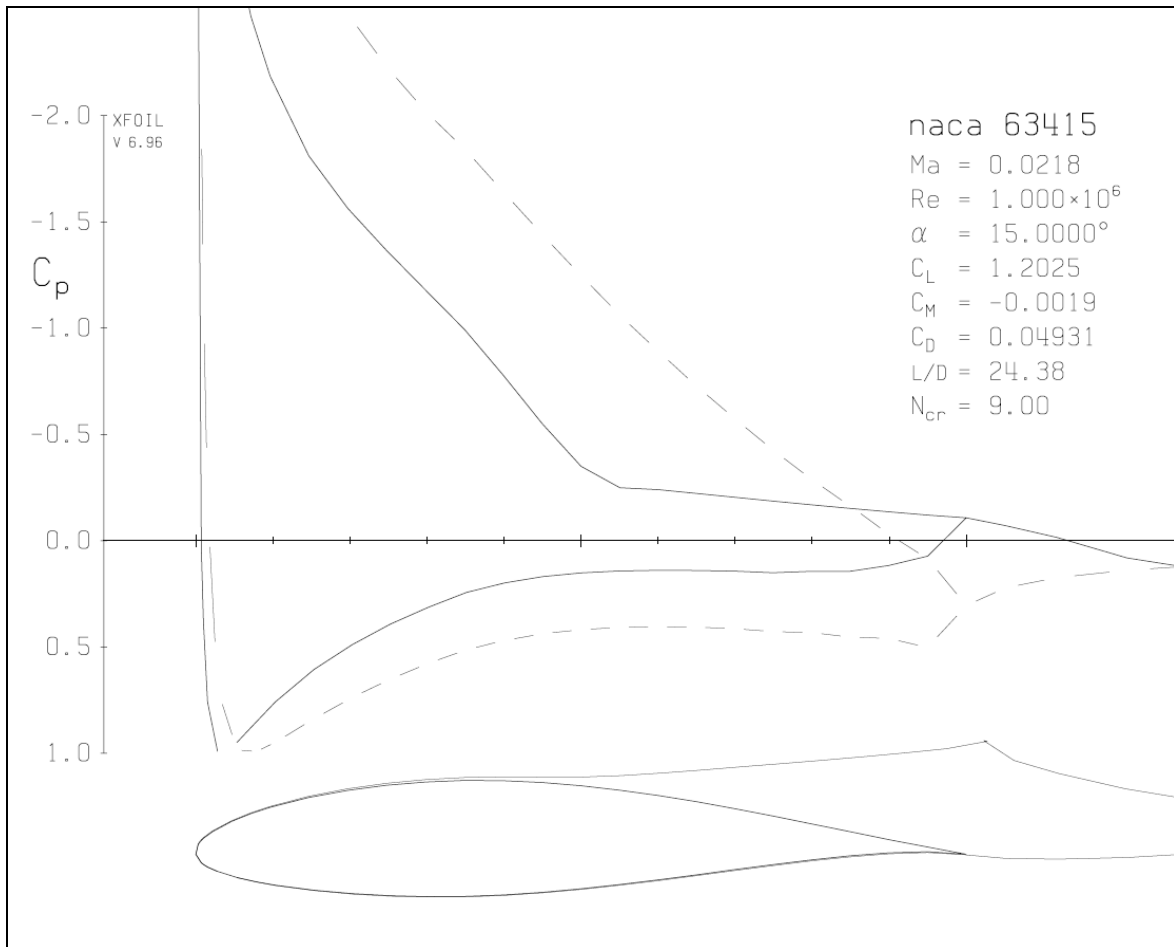
Σχήμα 3.19 :Η διανομή πίεσης για γωνία 5° για την αεροτομή NACA 63415 και $Mach=0.022$ [XFOIL]



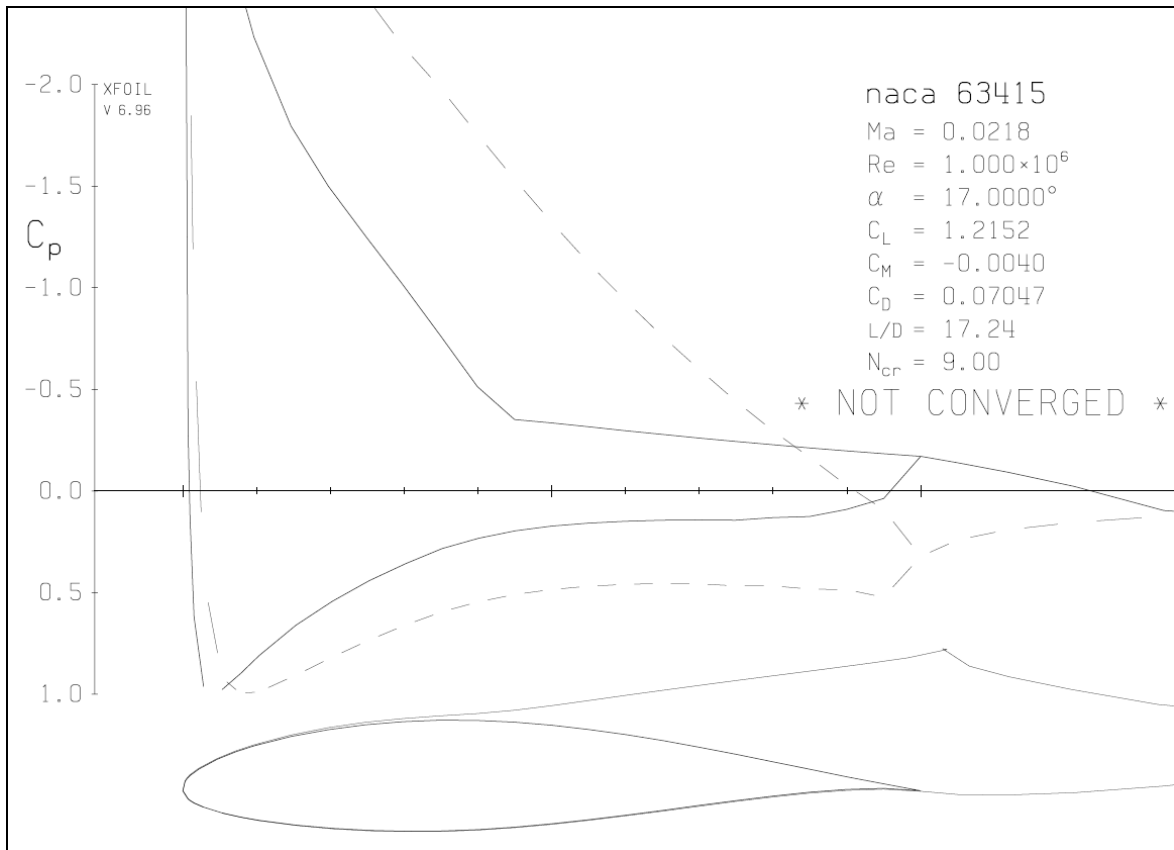
Σχήμα 3.20 :Η διανομή πίεσης για γωνία 7° για την αεροτομή NACA 63415 Mach=0.022 [XFOIL]



Σχήμα 3.21 :Η διανομή πίεσης για γωνία 10° για την αεροτομή NACA 63415 και $Mach=0.022$ [XFOIL]



Σχήμα 3.22 :Η διανομή πίεσης για γωνία 15° για την αεροτομή NACA 63415 και $Mach=0.022$ [XFOIL]



Σχήμα 3.23: διανομή πίεσης για γωνία 17° για την αεροτομή NACA 63415 και $Mach=0.022$ [XFOIL]

3.6.1 Διορθώσεις στα χαρακτηριστικά της αεροτομής (εξισώσεις Viterna και Snel et al)

Στην πραγματικότητα λόγω της περιστροφής του δρομέα παρατείνεται το φαινόμενο του διαχωρισμού της ροής και εμφανίζεται αύξηση του συντελεστή άνωσης [58]. Όσον αφορά τον συντελεστή αντίστασης ενώ κανείς θα περίμενε να μειώνεται και σύμφωνα με αρκετά αριθμητικά μοντέλα αυτό συμβαίνει, στην πραγματικότητα μετά από μετρήσεις στα πτερύγια των ανεμογεννητριών οι ερευνητές της Nasa κατέληξαν σε αύξηση του συντελεστή αντίστασης. Η τρισδιάστατη διόρθωση του συντελεστή άνωσης βασισμένη στην διανομή πίεσης της αεροτομής υπολογίζεται από τους παρακάτω εξισώσεις (Snel et al):

$$c_{l,3D} = c_{l,2D} + \frac{3.1 \cdot \lambda^2}{1 + \lambda^2} \cdot g \cdot \left(\frac{c}{r}\right)^2 \cdot \left(\left. \frac{dc_l}{d\alpha} \right|_{\text{linear}} \cdot \sin(\alpha - \alpha_0) - c_{l,2D} \right)$$

Ο συντελεστής g εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης και υπολογίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$g = \begin{cases} 1 & , \quad 0 < \alpha < 30, \\ \frac{1}{2}(1 + \cos(6\alpha - 180)) & , \quad 30 < \alpha < 60, \\ 0 & , \quad 60 < \alpha < 360. \end{cases}$$

Από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι λογισμικό XFOIL μπορεί να εξάγει ρεαλιστικά δεδομένα σε ένα περιορισμένο εύρος γωνιών με αποτέλεσμα στη συγκεκριμένη αεροτομή για γωνίες μεγαλύτερες των δεκαπέντε μοιρών, να μην εξάγονται δεδομένα που αντιστοιχούν στην πραγματικότητα, για των συντελεστή άωσης και αντίστασης λόγω του διαχωρισμού της ροής για μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις του Viterna [40] οι οποίες χρησιμοποιούν ως γωνία αποκόλλησης την γωνία μέγιστου Cl. Για τον υπολογισμό των εξισώσεων σε κάθε γωνία πρόσπτωσης α ο μέγιστος Cl χρησιμοποιείται ως συντελεστής άωσης αποκόλλησης Clstall και ο Cd στην ίδια γωνία as χρησιμοποιείται ως συντελεστής αντίστασης αποκόλλησης Cd stall. Επίσης χρησιμοποιείται ο συντελεστής AR [2]. Η αναλογία διαστάσεων (aspect ratio) για δρομέα με ακτίνα πτερυγίου περίπου είκοσι μέτρα είναι 19 [2]. Οι παρακάτω εξισώσεις χρησιμοποιούνται για α μεγαλύτερη του δεκαπέντε και μικρότερη η ίση του ενενήντα. Για α=90 Cl=0.0 και Cd=Cdmax.

$$\text{Aspect ratio} = \frac{(\text{Rotor radius})^2}{\text{Planform area of a rotor blade}}$$

$$C_{D_{\max}} = 1.11 + 0.018AR$$

$$C_D = C_{D_{\max}} \sin^2 \alpha + B_2 \cos \alpha$$

$$B_2 = \frac{C_{D_s} - C_{D_{\max}} \sin^2 \alpha_s}{\cos \alpha_s}$$

$$C_L = \frac{C_{D_{\max}}}{2} \sin 2\alpha + A_2 \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha}$$

$$A_2 = \left(C_{D_s} - C_{D_{\max}} \sin \alpha_s \cos \alpha_s \right) \frac{\sin \alpha_s}{\cos^2 \alpha_s}$$

Στα παραπάνω δεδομένα τα οποία είναι τα δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα βελτιστοποίησης, ο συντελεστής άνωσης διατηρείται σε ικανοποιητικά επίπεδα, το οποίο δεν συμβαίνει στο πρόγραμμα υπολογισμού των χαρακτηριστικών της ανεμογεννήτριας με αποτέλεσμα να υπερεκτιμά την ισχύ της μηχανής.

Στη διαδικασία υπολογισμού των χαρακτηριστικών της ανεμογεννήτριας, οι περιορισμοί που τίθενται στα σενάρια βελτιστοποίησης και αφορούν σε μέγιστες και ελάχιστες τιμές της άνωσης και της αντίστασης αντλούνται από τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του XFOIL για διαφορετικό αριθμό Re και Mach. Οι ποίοι υπολογίζονται σε κάθε ακτινική θέση για την αντίστοιχη σχετική ταχύτητα με αποτέλεσμα κάποιες φορές να εμφανίζεται αρκετά διαφορετικός συντελεστής άνωσης και αντίστασης από αυτών του βιβλίου σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης[1,34,37]. Έτσι σε κάθε περίπτωση ακόμα και αν το βέλτιστο πτερύγιο που θα παραχθεί δεν έχει ακριβώς τα χαρακτηριστικά όσον αφορά τους συντελεστές άνωσης σε κάθε ακτινική θέση που του θέσαμε ως βέλτιστο, μέσα στο πρόγραμμα υπολογισμού, σίγουρα θα είναι καλύτερο από το πρωτότυπο πτερύγιο.

4 Βελτιστοποίηση με χρήση γενετικών αλγορίθμων

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται μια τάση για ανάπτυξη συστημάτων βελτιστοποίησης που βασίζονται στους νόμους της εξέλιξης. Αυτά τα συστήματα χειρίζονται έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων του προβλήματος και εφαρμόζουν σε αυτόν διαδικασίες εμπνευσμένες από τη βιολογική εξέλιξη. Από γενιά σε γενιά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων εξελίσσοντάς τους προηγούμενους. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στην θεωρία των γενετικών αλγορίθμων και μια ανάλυση του εργαλείου βελτιστοποίησης PIKAIA, το οποίο αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει προβλήματα στην αστρονομία και αστροφυσική όπως, σχεδιασμός τροχιών των γαλαξιών και υπολογισμός των ταλαντώσεων στην επιφάνεια αστεριών λόγω των τεράστιων θερμοκρασιών. Επίσης αναλύεται η δομή του προγράμματος με το οποίο θα συνδυαστεί το λογισμικό PIKAIA.

4.1 Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms) είναι ένα σύστημα που ανήκει σε μια κατηγορία συστημάτων επίλυσης προβλημάτων που είναι γνωστή με τον όρο εξελικτικοί αλγόριθμοι (evolutionary algorithms) [42,44,45,46,47,49].

Οι γενετικοί αλγόριθμοι πρωτοεμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '50, η συστηματική τους ανάπτυξη όμως, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland [42,44,45,46,47,49] και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan.

Η βασική ιδέα των γενετικών αλγορίθμων είναι η μίμηση των μηχανισμών της βιολογικής εξέλιξης που απαντώνται στη φύση. Ένα πολύ καλό παράδειγμα δίνεται από τον Z. Michalewicz [42,44,45,46,47,49] και είναι αυτό των λαγών και του τρόπου που αναπαράγονται και εξελίσσονται από γενιά σε γενιά. Έστω ένας συγκεκριμένο πληθυσμό από λαγούς σε ένα οικοσύστημα. Όπως είναι φυσικό, κάποιοι από αυτούς θα είναι πιο γρήγοροι και πιο εύστροφοι από άλλους. Αυτοί οι λαγοί έχουν περισσότερες πιθανότητες να επιβιώσουν στο φυσικό τους περιβάλλον (π.χ. ικανότητα εύρεσης τροφής και διαφυγής από τα αρπακτικά), σε σχέση με κάποιους πιο αργούς ή λιγότερο έξυπνους λαγούς. Φυσικά δεν είναι λίγοι οι αργοί ή λιγότερο έξυπνοι λαγοί που καταφέρνουν να επιβιώνουν εξαιτίας της τύχης ή άλλων παραγόντων. Όλοι αυτοί οι λαγοί, που καταφέρνουν να επιβιώσουν, θα αρχίσουν την παραγωγή της επόμενης γενιάς τους, η οποία θα συνδυάζει με διάφορους τρόπους όλα τα χαρακτηριστικά των μελών της προηγούμενης. Έτσι, μερικοί αργοί λαγοί θα αναμειχθούν με κάποιους γρήγορους, κάποιοι γρήγοροι με άλλους

γρήγορους, κάποιοι εύστροφοι λαγοί με κάποιους μη εύστροφους και ούτω καθεξής, δημιουργώντας έτσι σταδιακά έναν πληθυσμό που απαρτίζεται από λαγούς που κατά μέσο όρο είναι εξυπνότεροι και ταχύτεροι από τους προγόνους τους. Ευτυχώς όμως, για τη διατήρηση της φυσικής ισορροπίας, και τα αρπακτικά υφίστανται την ίδια διαδικασία εξέλιξης από γενιά σε γενιά, διαφορετικά οι λαγοί θα γίνονταν υπερβολικά γρήγοροι και έξυπνοι για να μπορούν να τους πιάσουν.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της γενετικής, αναφέρονται σε άτομα (individuals) ή γενότυπους (genotypes) μέσα σε έναν πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γενότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα (chromosomes). Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια (genes) που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωματοσώματος (loci). Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου έχει τη δυνατότητα να εμφανιστεί με διάφορες αλληλουχίες (alleles), ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Κάθε γενότυπος αναπαριστά μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα. Το «αποκωδικοποιημένο» περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος καλείται φαινότυπος (phenotype). Μια διαδικασία εξέλιξης που εφαρμόζεται πάνω σε ένα πληθυσμό αντιστοιχεί σε μια εκτενή αναζήτηση στο χώρο των πιθανών λύσεων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχημένη έκβαση μιας τέτοιας αναζήτησης αποτελεί η εξισορρόπηση δύο διαδικασιών που είναι αντικρουόμενες, της εκμετάλλευσης και διατήρησης των καλύτερων λύσεων και της όσο το δυνατόν καλύτερης εξερεύνησης όλου του διαστήματος.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων, του προβλήματος που παρουσιάζει ενδιαφέρον, πάνω στον οποίο δουλεύουν, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης. Έτσι ένας γενετικός αλγόριθμος πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις και υποστηρίζει καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων. Ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Σε κάθε γενιά, οι σχετικά "καλές" λύσεις αναπαράγονται, ενώ οι σχετικά "κακές" απομακρύνονται. Ο διαχωρισμός και η αποτίμηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με την βοήθεια μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective ή fitness function), η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός.

Ένας γενετικός αλγόριθμος πρέπει να αποτελείται από τα παρακάτω πέντε συστατικά:

- Μια γενετική αναπαράσταση (representation) των πιθανών λύσεων του προβλήματος
- Έναν τρόπο δημιουργίας ενός αρχικού πληθυσμού από πιθανές λύσεις (αρχικοποίηση)
- Μια αντικειμενική συνάρτηση αξιολόγησης των μελών του πληθυσμού
- Τους γενετικούς τελεστές (genome operators) για τη δημιουργία νέων ατόμων
- Τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος (μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών, κ.τ.λ.).

4.1.1 Χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων

Οι γενετικοί αλγόριθμοι πλεονεκτούν αισθητά στη λύση προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, μιας και διαφέρουν θεμελιωδώς από αυτές. Τα τέσσερα κυριότερα χαρακτηριστικά που τους διαφοροποιούν και τους δίνουν υπεροχή σε σχέση με άλλες μεθόδους [42], συνοψίζονται παρακάτω:

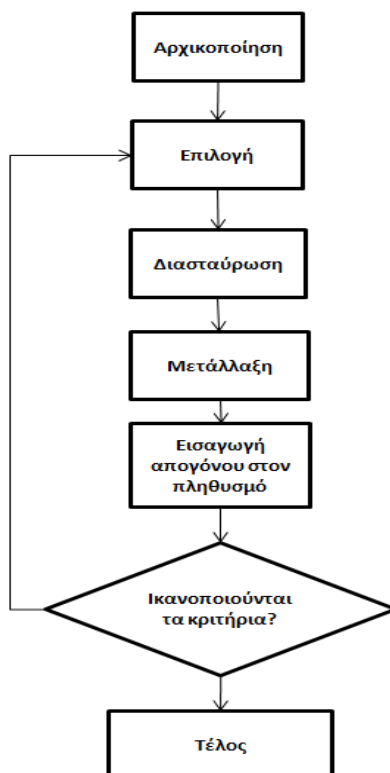
Εργάζονται με μια κωδικοποίηση του συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές του προβλήματος

Κάνουν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα

Χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία

Χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς κανόνες μετάβασης και όχι ντετερμινιστικούς.

4.1.2 Βασικά βήματα των γενετικών αλγορίθμων



Σχήμα 4.1: Η βασική δομή ενός απλού γενετικού αλγορίθμου

Τα βασικά βήματα του απλού γενετικού αλγορίθμου, που επιλύει το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι τα εξής:

- Δημιουργία, με τυχαίο τρόπο, ενός αρχικού πληθυσμού δυνατών λύσεων
- Αξιολόγηση κάθε λύσης χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση f σαν αντικειμενική συνάρτηση.
- Επιλογή ενός νέου πληθυσμού με βάση την απόδοση κάθε μέλους (δυνατής λύσης) του προηγούμενου πληθυσμού.
- Εφαρμογή στον πληθυσμό που προκύπτει μετά τη διαδικασία της επιλογής των γενετικών τελεστών της διασταύρωσης (Crossover) και της μετάλλαξης (Mutation).
- Με την ολοκλήρωση του βήματος 4, έχει δημιουργηθεί η επόμενη γενιά, οπότε επιστρέφει στο βήμα 2.

- Μετά από κάποιον αριθμό γενιών και αφού καμιά βελτίωση δεν παρατηρείται πλέον, ο αλγόριθμος τερματίζεται.
- Το καλύτερο χρωμόσωμα αντιστοιχεί σε μια βέλτιστη λύση (πιθανώς καθολικά βέλτιστη).

Στη συνέχεια θα περιγραφούν πιο αναλυτικά τα βήματα του αλγορίθμου.

4.2 Το λογισμικό ΠΙΚΑΙΑ

Οι γενικές ιδέες της εξέλιξης και της προσαρμογής είναι προγενέστερες του “Πάνω στην Προέλευση των ειδών μέσω της φυσικής επιλογής” του Καρόλου Δαρβίνου το 1859 (βλ. Bowler, 1983), αλλά είναι ο Δαρβίνος (και λίγο πολύ ταυτόχρονα ο A.R. Wallace) που πρώτοι αναγνώρισαν αυτό που ακόμα θεωρείται από τους περισσότερους ο πρωταρχικός μηχανισμός της εξέλιξης: η φυσική επιλογή. Η φυσική επιλογή είναι η διαδικασία μέσω της οποίας τα άτομα που προσαρμόζονται καλύτερα στο περιβάλλον (δηλαδή τα καταλληλότερα άτομα με την ευρεία έννοια της λέξης) τείνουν να παράγουν κατά μέσο όρο περισσότερους απόγονους από τους λιγότερο προικισμένους ανταγωνιστές τους στον πληθυσμό αναπαραγωγής. Ο Δαρβίνος και οι σύγχρονοί του επίσης κατάλαβαν ότι δύο πρόσθετα συστατικά απαιτούνται ώστε η φυσική επιλογή να οδηγήσει στην εξέλιξη. Το πρώτο είναι η κληρονομικότητα. Ένας απόγονος πρέπει να κληρονομήσει, κατά κάποιο τρόπο, κάποια από τα χαρακτηριστικά που κάνουν τους γονείς του “κατάλληλους”, διαφορετικά η εξέλιξη επαναφέρεται στο μηδέν με κάθε νέα γενιά.

Το δεύτερο συστατικό είναι η ποικιλότητα: σε κάθε επιλεγμένη στιγμή πρέπει να υπάρχει ένα φάσμα καταλληλότητας ανάμεσα στα μέλη του πληθυσμού, διαφορετικά η φυσική επιλογή απλά δε μπορεί να λειτουργήσει.

Παρόλο που και οι δύο αυτές απόψεις παρέμειναν ανεξήγητες στην εποχή του Δαρβίνου, οι πρωταρχικές διαδικασίες μέσω των οποίων η κληρονομικότητα μεταβιβάζεται και η ποικιλότητα διατηρείται έχουν γίνει τώρα βασικά κατανοητές. Κάθε κύτταρο κάθε ατόμου (ή φαινότυπος) περιέχει ένα ολοκληρωμένο σύνολο από οδηγίες που καθορίζουν αποτελεσματικά τη φυσική (και ενδεχομένως την συμπεριφορά) του κατασκευής. Αυτές οι πληροφορίες είναι κωδικοποιημένες με τη μορφή γραμμικών γονιδιακών σειρών αποθηκευμένων σε ζεύγη ομόλογων χρωμοσωμάτων, τα οποία αποτελούν το γονότυπο του ατόμου. Η αναπαραγωγή συμπεριλαμβάνει το συνδυασμό γενετικού υλικού και από τους δύο γονείς, το μισό από κάθε ζεύγος χρωμοσωμάτων προέρχεται από τον κάθε γονέα. Ένα βασικό στοιχείο αυτής της αναπαραγωγικής διαδικασίας είναι ότι η σχέση

ανάμεσα στο φαινότυπο και το γονότυπο είναι μονής κατεύθυνσης, κάθε άτομο μπορεί να θεωρηθεί μία εξωτερική εκδήλωση του γονότυπού του (παρόλο που υπάρχουν περιβαλλοντικές επιδράσεις στην ανάπτυξη και εξέλιξη που είναι πέρα από τον γενετικό έλεγχο), αλλά το άτομο δε μπορεί να επηρεάσει τη γενετική του κατασκευή. Μπορεί παρόλα αυτά να επηρεάσει τη γενετική κατασκευή των μετέπειτα γενεών μέσα από τη διαφοροποιημένη αναπαραγωγική επιτυχία, το οποίο είναι βέβαια το σημείο όπου η φυσική επιλογή παίζει αποφασιστικό ρόλο. Σε μεγάλο βαθμό η ποικιλότητα φαίνεται ότι διατηρείται από τον ίδιο το μηχανισμό της κληρονομικότητας. Η παραγωγή αναπαραγωγικών κυττάρων συχνά συνεπάγεται τον επανασυνδυασμό γενετικού υλικού διαμέσου ομόλογων χρωμοσωμάτων μέσα από τις διαδικασίες της διασταύρωσης και της αντιστροφής. Λάθη στην αντιγραφή και τυχαία γεγονότα επίσης εισάγουν περιστασιακά μεταλλάξεις στο γονότυπο. Το σύνολο όλων των γονιδίων που υπάρχουν σε κάθε περίοδο στον πληθυσμό αναπαραγωγής αποτελεί τη γονιδιακή δεξαμενή. Για κάθε γονίδιο που συνδέεται με μία χρωμοσωματική τοποθεσία, υπάρχουν γενικά περισσότερες από μία επιτρεπτές γονιδιακές τιμές (ή αλληλόμορφα στην ορολογία της βιολογίας). Μπορούμε να σκεφτούμε την εξέλιξη ως πρόσκαιρες αλλαγές σε αλληλόμορφες συχνότητες μέσα στη γονιδιακή δεξαμενή.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (GA) είναι ένα είδος μεθόδου ανίχνευσης που ενσωματώνει αυτές τις ιδέες σε ένα σύνολο που είναι περισσότερο υπολογιστικό παρά βιολογικό. Με την αυστηρή έννοια, οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν βελτιώνουν, ούτε και η βιολογική εξέλιξη. Η εξέλιξη χρησιμοποιεί ότι υλικά έχει στη διάθεση της για να παράγει άτομα άνω του μέσου όρου. Η εξέλιξη είναι τυφλή. Η εξέλιξη δεν έχει ως τελικό σκοπό την τελειότητα. Ακόμα και αν την είχε, η εξέλιξη πρέπει να προσαρμόσει τους φυσικούς περιορισμούς που συνδέονται με την ανάπτυξη και την αύξηση, έτσι λοιπόν δεν είναι όλα τα μονοπάτια πιθανά στις γενετικές παραμέτρους. Θα μπορούσε ίσως κάποιος να υποστηρίξει ότι η εξέλιξη εκτελεί ένα είδος πολύ περιορισμένης βελτιστοποίησης, αλλά ακόμα και τότε σίγουρα δεν βελτιστοποιεί με τη μαθηματική έννοια του όρου. Παρολαυτά, οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν τη βάση ενός είδους μίας εξαιρετικά εύρωστης μεθόδου βελτιστοποίησης που είναι γνωστή ως βελτιστοποιητές βασισμένοι σε γενετικούς αλγόριθμους. Ο ΡΙΚΑΙΑ είναι ένας τέτοιος βελτιστοποιητής.

4.2.1 Ένας βασικός γενετικός αλγόριθμος

Στην απλούστερή τους ενσάρκωση, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν την ακόλουθη περιορισμένη εκδοχή της βιολογικής εξελικτικής διαδικασίας. Η γονιδιακή δεξαμενή και ο αντίστοιχος φαινοτυπικός πληθυσμός της, εξελίσσονται σε σχέση με:

- Την αναπαραγωγική επιτυχία στον πληθυσμό
- Την γενετική διασταύρωση που εμφανίζεται στην αναπαραγωγή
- Τις τυχαίες μεταλλάξεις που επηρεάζουν ένα υποσύνολο αναπαραγωγικών γεγονότων

Σκεφθείτε λοιπόν το ακόλουθο πρόβλημα γενετικής βελτιστοποίησης. Μας δίνεται ένα “μοντέλο” που εξαρτάται από ένα σύνολο παραμέτρων a , και μία λειτουργική σχέση $f(a)$ που δίνει ένα ποιοτικό μέτρο για το αντίστοιχο μοντέλο. Το έργο της βελτιστοποίησης έγκειται στο να βρει το σημείο a^* καθορίζοντας ένα μοντέλο που μεγιστοποιεί το ποιοτικό μέτρο $f(a)$.

4.2.2 Μια υπορουτίνα βελτιστοποίησης βασισμένη σε γενετικούς αλγορίθμους

Το ΡΙΚΑΙΑ είναι μία γενικού σκοπού υπορουτίνα βελτιστοποίησης βασισμένη σε ένα γενετικό αλγόριθμο. Η υπορουτίνα γράφεται σε γλώσσα FORTRAN, και εκτός από δύο μικρές εξαιρέσεις χρησιμοποιεί εξ ολοκλήρου τη γλώσσα ANSI FORTRAN-77. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε ο ΡΙΚΑΙΑ 1.0 σε γλώσσα FORTRAN-90 και μετατράπηκε από απλής ακρίβειας σε διπλής ακρίβειας.

Εσωτερικά, το ΡΙΚΑΙΑ προσπαθεί να μεγιστοποιήσει μια (καθορισμένη από το χρήστη) αντικειμενική συνάρτηση $f(x)$ σε ένα περιορισμένο n -διάστατο χώρο, π.χ,

$x=(x_1,x_2,\dots,x_n)$, $x_k \in [0.0, 1.0]$ [42].

Η κύρια διαδικασία που ακολουθείται στον ΡΙΚΑΙΑ αποτελείται από δύο εμφωλευμένους κύκλους, τον κύκλο των γενιών και τον αναπαραγωγικό κύκλο εργασιών και η διαδικασία είναι η εξής:

- Κύκλος γενιών
- Αναπαραγωγικός κύκλος
- Επιλογή πατέρα
- Επιλογή μητέρας

- Δημιουργία του χρωμοσώματος του πατέρα
- Δημιουργία του χρωμοσώματος της μητέρας
- Διασταύρωση των χρωμοσωμάτων
- Δημιουργία του πρώτου απογόνου
- Δημιουργία του δεύτερου απογόνου
- Μετάλλαξη του πρώτου απογόνου
- Μετάλλαξη του δεύτερου απογόνου
- Κωδικοποίηση του πρώτου απογόνου
- Κωδικοποίηση του δεύτερου απογόνου
- Εισαγωγή/αποθήκευση των απογόνων

4.2.3 Εισαγωγή νέου πληθυσμού Αρχικός πληθυσμός

Όστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε συγκεκριμένη παράμετρος στο ξεκίνημα μίας εξελικτικής σειράς, κάθε μία από τις n παραμέτρους που ορίζουν κάθε ένα από τα n άτομα στον αρχικό πληθυσμό ξεκινάει με έναν τυχαίο αριθμό $R \in [0.0, 1.0]$ και ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

- n άτομα στον πληθυσμό
- n παράμετροι για κάθε άτομο
- τυχαία αρχικοποίηση
- υπολογισμός της καταλληλότητας
- δημιουργία της πσίνας του πληθυσμού

Ο αρχικός πληθυσμός παραμένει σταθερός κατά την διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας.

4.2.4 Τεχνική επιλογής

Το Rikaia χρησιμοποιεί έναν πιθανολογικό (το αντίθετο του ντετερμινιστικού-αιτιοκρατικού) μηχανισμό δειγματοληψίας για να επιλέξει και τους δύο γονείς σε μία επανάληψη του κύκλου αναπαραγωγής. Η διαδικασία επιλογής είναι τέτοια ώστε η πιθανότητα που έχει ένα άτομο να επιλεγεί για αναπαραγωγή να είναι ανάλογη με την καταλληλότητα του.

4.2.5 Κατάταξη ως καταλληλότητα

Η απευθείας χρήση της καταλληλότητας ως μέτρο για την πιθανότητα αναπαραγωγής παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες (όπως αναλύεται στον Goldberg 1989, κεφ.3, Davis 1991, κεφ.3) αλλά αυτές μπορούν να ξεπεραστούν με διάφορους τρόπους. Με λίγα λόγια, ο σκοπός είναι να εξασφαλιστεί μία καταλληλότητα μέσα στον πληθυσμό κατά τη διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας. Στη γλώσσα της βιολογίας, η εξαναγκασμένη επιλογή (selection pressure) πρέπει να ενισχύεται συνεχώς προκειμένου να συνεχιστεί η εξέλιξη. Για να επιτευχθεί αυτό, το ΡΙΚΑΙΑ χρησιμοποιεί μια στρατηγική γνωστή ως κατάταξη (ranking).

- Εξαναγκασμένη επιλογή

Η κατάταξη που περιγράφεται ισοδυναμεί με την επιβολή μίας γραμμικής σχέσης ανάμεσα στη σχετική καταλληλότητα και κατάταξη στον πληθυσμό, με μοναδιαία κλίση. Αυτή η επιλογή ξεκάθαρα δεν είναι η μοναδική. Υπάρχει και η τυχαία επιλογή (selection probability) που έχει μία άμεση σχέση με την εξαναγκασμένη επιλογή.

4.2.6 Κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση

Η διαδικασία της κωδικοποίησης παράγει, για κάθε επιλεγμένο γονέα, μια χρωμοσωμιακή δομή η οποία μετέπειτα θα χρησιμοποιηθεί για αναπαραγωγή μέσα από τη δράση των διάφορων γενετικών ελεγκτών. Η συμπληρωματική διαδικασία της αποκωδικοποίησης είναι το ισοδύναμο της ανάπτυξης και της αύξησης στη βιολογία, δηλ., η αναδόμηση ενός ατόμου από το γενετικό υλικό που το καθορίζει.

Πιο πρακτικά, ο σκοπός της διαδικασίας κωδικοποίησης είναι να παράγει ένα “χρωμόσωμα” από τις n παραμέτρους που καθορίζοντας την εξίσωση $f(x)$ για να μεγιστοποιηθεί.

Η διαδικασία κωδικοποίησης και η αποκωδικοποίησης είναι ενός σημείου και περιγράφονται παρακάτω:

1. Κωδικοποίηση
 - Κωδικοποίηση σε φαινότυπο και γενότυπο
 - Μετατροπή σε ακέραιο

Και στην αποκωδικοποίηση ακολουθείται σχεδόν η αντίθετη διαδικασία.

4.2.7 Ο τελεστής διασταύρωσης

Ο τελεστής διασταύρωσης είναι, επί της ουσίας, αυτό που διαχωρίζει τους γενετικούς αλγόριθμους από άλλες μεθόδους ανίχνευσης. Το ΡΙΚΑΙΑ συμπεριλαμβάνει μόνο έναν τελεστή διασταύρωσης γνωστό ως διασταύρωση ενός σημείου. Παράγεται ένας τυχαίος αριθμός $R \in [0.0, 0.1]$, και η λειτουργία της διασταύρωσης εφαρμόζεται μόνο αν $R \leq p_{cross}$.

Εάν $R > p_{cross}$ τότε οι απόγονοι είναι ακριβή αντίγραφα των γονέων. Αυτός ο τελεστής δρα σε ένα ζεύγος γονέων-χρωμοσωμάτων για να παράγει ένα ζεύγος απόγονων-χρωμοσωμάτων με διαδικασία διασταύρωσης ενός σημείου. Σκεφτείτε ξανά δύο πρωτότυπους “γονείς” για το τεστ-πρόβλημα.

$(x,y)_1 = (0.34567890, 0.23456789)$

$(x,y)_2 = (0.87654321, 0.65432198)$

Για τους παραπάνω γονείς έχουμε:

Φαινότυπο₁: 0.34567890

Γενότυπο₁: 0.23456789

Φαινότυπο₂: 0.87654321

Γενότυπο₂: 0.65432198

Παράγεται το χρωμόσωμα για τον πατέρα και για την μητέρα αντίστοιχα ανάλογα με τα ψηφία κωδικοποίησης:

3456789023456789

8765432165432198

Εάν ο τυχαίος αριθμός K είναι 10 τότε γίνεται διαχωρισμός στο δέκατο ψηφίου.

345678902 | 3456789

876543216 | 5432198

Στην συνέχεια ανταλλάσσουν τα ψηφία πίσω από το σημείο τομής δημιουργώντας τα νέα χρωμοσώματα των απογόνων.

345678902 | 5432198 →

876543216 | 3456789 →

3456789025432198

8765432163456789

Ετσι έχουμε τους δύο απογόνους

$(x,y)_1=(0.34567890, 25432198)$

$(x,y)_2=(0.87654321, 0.63456789)$

4.2.8 Ο τελεστής μετάλλαξης

Το PIKAIA συμπεριλαμβάνει μόνο έναν τελεστή μετάλλαξης γνωστό ως ομοιόμορφη μετάλλαξη ενός σημείου αλλά επιτρέπει στο ρυθμό μετάλλαξης να ποικίλλει δυναμικά στην πορεία της εξελικτικής διαδικασίας.

4.2.9 Ομοιόμορφη μετάλλαξη

Ο τελεστής μετάλλαξης λειτουργεί ως εξής. Για κάθε γονίδιο ενός χρωμοσώματος απογόνου, παράγεται ένας τυχαίος αριθμός $R \in [0.0, 1.0]$, και η μετάλλαξη χτυπάει το γονίδιο μόνο αν $R \leq \rho_{mut}$, όπου $\rho_{mut} \in [0.0, 1.0]$ είναι ο ρυθμός μετάλλαξης. Η ίδια η μετάλλαξη συνίσταται στην αντικατάσταση του στοχοποιημένου γονιδίου από έναν τυχαίο ακέραιο αριθμό $K \in [1, n \times nd]$.

4.2.10 Δυναμική προσαρμογή του ρυθμού μετάλλαξης

Η δράση του τελεστή μετάλλαξης έχει επιβλαβή και ευεργετικά αποτελέσματα. Μπορεί να καταστρέψει έναν πιθανά ανώτερο απόγονο παραγόμενο από τη διασταύρωση δύο άνω του μέσου όρου γονέων, όμως απαιτείται να διαφυλαχθεί η ποικιλότητα στον πληθυσμό και συχνά είναι ο μόνος διαθέσιμος μηχανισμός να σώσει την κατάσταση αν εμφανίζονταν πρόωρη σύγκλιση. Η εμπειρία δείχνει ότι η επιλογή μίας άριστης τιμής του ρυθμού μετάλλαξης ρ_{mut} είναι ένα πολύ εξαρτώμενο πρόβλημα από τις παραμέτρους, και γενικά δε μπορεί να γίνει a priori.

4.2.11 Σχέδια αναπαραγωγής

Ένα σχέδιο αναπαραγωγής ελέγχει τους τρόπους με τον οποίους τα νεογέννητα άτομα θα ενσωματωθούν στον πληθυσμό. Το PIKAIA λειτουργεί σε ένα καθορισμένο μέγεθος πληθυσμού, και προσφέρει την επιλογή τριών σχεδίων αναπαραγωγής:

- Πλήρης γενεαλογική αντικατάσταση

Αυτό είναι ίσως το πιο απλό σχέδιο αναπαραγωγής. Μέσα από μία επανάληψη του γενεαλογικού κύκλου οι απόγονοι συγκεντρώνονται σε προσωρινή αποθήκευση (με διαδοχικές κλήσεις της υπορουτίνας `genrep`). Μόλις οι απόγονοι ηρ παραχθούν και αποθηκευτούν, ολόκληρος ο γονεϊκός πληθυσμός εξαλείφεται και αντικαθίσταται από τον πληθυσμό των απογόνων (με μία μόνο κλήση της υπορουτίνας `newpop`), μετά από την

οποία ξεκινάει μια νέα γενεαλογική επανάληψη. Η υπορουτίνα newpop υπολογίζει επίσης τις καταλληλότητες για τα μέλη του νέου πληθυσμού και υπολογίζει τις αντίστοιχες τάξεις τους. Μέσα από αυτό το σχέδιο αναπαραγωγής τα άτομα έχουν καθορισμένη διάρκεια ζωής μέσα στην κάθε γενιά.

- Σταθερής κατάστασης σχέδια

Τα σταθερής κατάστασης αναπαραγωγικά σχέδια εισάγουν άτομα καθώς γεννιούνται. Πρέπει να καθοριστούν κριτήρια για να αποφασιστεί κάτω από ποιες συνθήκες θα εισαχθούν οι νεογέννητοι απόγονοι και πώς θα διαγραφούν τα μέλη του γονεϊκού πληθυσμού για να κάνουν χώρο για τα νέα μέλη και αν θα επιβληθεί κάποιο όριο στο χρόνο ζωής ενός ατόμου.

- Σχέδιο Select-Random-Delete-Worst

Ένα ενδιαφέρον είδος αναπαραγωγικών σχεδίων σταθερής κατάστασης επιλέγει γονείς εντελώς τυχαία, θέτοντας σε ενέργεια τη φυσική επιλογή στη δημιουργία χώρου για νέους απογόνους: η πιθανότητα στοχοποίησής για τερματισμό γίνεται σε αντίστροφη αναλογία με την καταλληλότητα. Η στρατηγική αυτή έχει βρεθεί πλεονεκτική για μεγάλα προβλήματα που τείνουν να εξαλείψουν την πρώιμη σύγκλιση. Μια ακραία εκδοχή ενός τέτοιου σχεδίου αναπαραγωγής μπορεί να παραχθεί τρέχοντας το PIKAIA με `fdif=0` εξαφανίζοντας την πίεση επιλογής σύμφωνα με το `steady -state -delete-worst` σχέδιο αναπαραγωγής.

Η επιλογή ενός σχεδίου αναπαραγωγής ελέγχεται από μία παράμετρο εισαγόμενων δεδομένων `iper`. Η επιλογή `iper=1` θέτει σε εφαρμογή την πλήρη γενεαλογική αντικατάσταση, η επιλογή `iper=2` το `steady-state-delete-random`, και η επιλογή `iper=3` το `steady-state-delete-worst`. Το PIKAIA δεν επιτρέπει τη μετάβαση από ένα σχέδιο αναπαραγωγής σε ένα άλλο κατά τη διάρκεια της εξέλιξης.

4.2.12 Ελιτισμός

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα διαχωρισμού των τελεστών διασταύρωσης και μετάλλαξης, υπάρχει η πιθανότητα ότι ο γονότυπος του καταλληλότερου ατόμου δε θα μεταβιβαστεί ανέπαφος στην επόμενη γενιά. Μόνο κάτω από το `steady - state - delete-worst` σχέδιο αναπαραγωγής είναι εγγυημένο ότι ο καταλληλότερος θα επιβιώσει. Η στρατηγική που είναι γνωστή ως ελιτισμός μειώνει το πιθανό εμπόδιο στην αποτελεσματική σύγκλιση.

4.3 Οι τελεστές ελέγχου δεδομένων εισαγωγής

Εσωτερικά το PIKAIA συνδέει τον τελεστή ελέγχου ctrl με τις ακόλουθες παραμέτρους:

$ctrl(1 : 12) = (nr, ngen, nd, pcross, imut, pmut, pmutm, pmutm, fdif, irep, ielite, ivrb)$

Αυτά αντιστοιχούν στα ακόλουθα:

4.3.1 Αριθμός πληθυσμού nr

Ο αριθμός των ατόμων στον πληθυσμό. Ας σημειωθεί ότι αυτός παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια της εξελικτικής σειράς. Το μέγεθος του πληθυσμού περιορίζεται εσωτερικά στο $nr \leq 512$ και πρέπει να είναι άρτιος αριθμός.

4.3.2 Αριθμός γενεών ngen

Το PIKAIA εξελίσσει τον πληθυσμό σε έναν προκαθορισμένο αριθμό γενεών ngen που ορίζεται από την τιμή της παραμέτρου, αντί να προσπαθεί να φτάσει ένα προκαθορισμένο κριτήριο ακριβείας. Αυτή η προσέγγιση είναι πιθανώς επικίνδυνη όταν αντιμετωπίζουμε ένα νέο πρόβλημα, παίρνοντας υπόψη τις συνήθεις τάσεις σύγκλισης που παρουσιάζονται από τους βασισμένους σε γενετικούς αλγόριθμους βελτιστοποιητές.

4.3.3 Ακρίβεια κωδικοποίησης nd

Αυτή καθορίζει τον αριθμό των ψηφίων που διατηρούνται στην κωδικοποίηση του φαινότυπου σε γονότυπο. Αυτός περιορίζεται εσωτερικά σε $nd \leq 6$, στις περισσότερες πραγματικές εφαρμογές, αν απαιτούνται περισσότερα από 4 ψηφία ακριβείας θα ήταν γενικά προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε μία τετραψήφιας ακρίβειας γενετική λύση ως αρχική υπόθεση για μία πιο συμβατική μέθοδο βελτιστοποίησης. Ανακαλέστε ότι ο γονότυπος καταλήγει να είναι μία ακέραια διάταξη μήκους $n \cdot nd$, όπου κάθε στοιχείο ("γονίδιο") παίρνει τιμές στην κλίμακα [0,9].

Το σχήμα κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται στο PIKAIA ξεκάθαρα απέχει από το άριστο όσον αφορά την αποτελεσματική χρήση της αποθήκευσης, αλλά είναι εύκολο να κωδικοποιείται, κατανοείται, τροποποιείται και παρακολουθείται όταν κάτι πάει στραβά. Στην εργασία η ακρίβεια κωδικοποίησης τροποποιήθηκε σε 9 ψηφίων.

4.3.4 Ρυθμός διασταύρωσης pcross

Εφόσον δύο γονείς έχουν επιλεγεί για αναπαραγωγή, παράγεται ένας τυχαίος αριθμός $R \in [0.0, 0.1]$, και η λειτουργία της διασταύρωσης εφαρμόζεται μόνο αν $R \leq pcross$.

4.3.5 Μέθοδος μετάλλαξης imut

Η ακέραιη παράμετρος που ελέγχει τη συμπεριφορά του τελεστή μετάλλαξης. Θέτοντας $imut=1$ τίθεται σε εφαρμογή ένας σταθερός ρυθμός μετάλλαξης, με μία τιμή που ορίζεται από το $pmut$. Για $imut=2$, ο ρυθμός μετάλλαξης ποικίλει στην κλίμακα $[pmutm_n, pmutm_x]$ σε όλη τη μετάλλαξη, με τιμή εκκίνησης $pmut$. Ο ρυθμός μετάλλαξης αυξάνεται ή μειώνεται μόνο όταν η σχετική διαφορά στις απόλυτες καταλληλότητες των καλύτερων και μέσων μελών του πληθυσμού πέφτει κάτω από (υπερβαίνει) την τιμή $rdiflo$ ($rdifhi$).

4.3.6 Αρχικός ρυθμός μετάλλαξης pmut

Κατα συνθήκη, η τιμή του $pmut$ αντιπροσωπεύει την πιθανότητα (≤ 1) που έχει κάθε γονίδιο να επηρεαστεί από μετάλλαξη κατά τη γέννηση. Για κάθε γονίδιο παράγεται ένας τυχαίος αριθμός $R \in [0.0, 1.0]$ και η μετάλλαξη διεξάγεται μόνο αν $R \leq pmut$. Η ίδια η μετάλλαξη συνίσταται στην παραγωγή ενός τυχαίου ακέραιου αριθμού $K \in [0.9]$, και στην επαναφορά της γονιδιακής τιμής σε K , ως σημειωθεί ότι υπάρχει 1/10 πιθανότητα ότι το K θα είναι ίσο με την αρχική γονιδιακή τιμή, στην οποία περίπτωση η μετάλλαξη δεν έχει κανένα φαινοτυπικό αποτέλεσμα.

4.3.7 Κατώτατος ρυθμός μετάλλαξης pmutm_n

Χρησιμοποιείτε μόνο αν $imut=2$, η προεπιλογή είναι $pmutm_n=0.0001$, Ο κατώτατος ρυθμός μετάλλαξης είναι εφικτός κάτω από μεταβλητή συμπεριφορά μετάλλαξης.

4.3.8 Ανώτατος ρυθμός μετάλλαξης pmutm_x

Χρησιμοποιείτε μόνο αν $imut=2$, η προεπιλογή είναι $pmutm_x=0$. Ο μέγιστος ρυθμός μετάλλαξης είναι εφικτός κάτω από μεταβλητή συμπεριφορά μετάλλαξης. Τυπικά το $pmut$ και/ή $pmutm_x$ πρέπει να είναι πολύ μικρότερο από την μονάδα διαφορετικά είναι πιθανό να εμφανισθεί σχεδόν απόλυτη τυχαιοποίηση σε κάθε απόγονο. Κάτω από πλήρη γενεαλογική αντικατάσταση και αν δεν έχει ενεργοποιηθεί ο ελιτισμός (θέτοντας $ielite=1$), το PIKAIA θα εκδώσει προειδοποιήσεις αν $pmut > 0.05$, ή αν $imut=2$ και $pmutm_x > 0.05$.

4.3.9 Καταλληλότητα fdif

Το PIKAIA χρησιμοποιεί την κατάταξη για να ορίσει την καταλληλότητα. Τα άτομα αρχικά κατατάσσονται ως $[1, 2, \dots, n]$, σύμφωνα με την “πραγματική καταλληλότητα”, όπου εξορισμού το καταλληλότερο άτομο έχει τάξη 1 και το λιγότερο κατάλληλο n , αντίστοιχα.

4.3.10 Σχέδια αναπαραγωγής *irep*

Η ακέραιη παράμετρος δηλώνει την επιλογή ενός από τα τρία διαθέσιμα σχέδια αναπαραγωγής. Θέτοντας $irep = 1$ επιλέγεται πλήρη γενεαλογική αντικατάσταση, και $irep=2$ ή $irep =3$ σταθερής κατάστασης αναπαραγωγή. Στις τελευταίες περιπτώσεις ένας απόγονος εισάγεται μόνο αν (1) η καταλληλότητά του είναι ανώτερη από αυτή του λιγότερο κατάλληλου μέλους του πληθυσμού, και (2) ο γονότυπος του διαφέρει σε τουλάχιστον ένα γονίδιο από κάθε γονότυπο που ήδη υπάρχει στον πληθυσμό. Τα δύο steady-state σχέδια αναπαραγωγής διαφέρουν μόνο στον τρόπο με τον οποίο τα άτομα του παλαιού πληθυσμού διαγράφονται για να δημιουργήσουν νέους απογόνους αρκετά κατάλληλους για εισαγωγή, με $irep=3$ ο λιγότερο κατάλληλος διαγράφεται (steady-state-delete-worst plan). Αν από την άλλη $irep=2$ ένα άτομο από τον παλαιότερο πληθυσμό επιλέγεται τυχαία και διαγράφεται, ανεξάρτητα από την καταλληλότητα του (steady-state-delete-random plan).

4.3.11 Ελιτισμός *ielite*

Η ακέραια παράμετρος ελέγχει τη χρήση του ελιτισμού. Ο ελιτισμός τίθεται σε εφαρμογή αν $ielite=1$, διαφορετικά δε γίνεται καμία λειτουργία. Όταν $irep=2$, θέτοντας $ielite=1$ βεβαιώνεται ότι το καταλληλότερο άτομο δε θα επιλεγεί για τυχαία διαγραφή. Αυτή η παράμετρος δεν έχει καμία επίδραση όταν $irep=3$. (steady-state-delete-worst reproduction plan)

4.3.12 Επιλογή επιπλέον ελέγχου *inrb*

Θέτοντας $inrb=1$ ή $inrb=2$ παράγεται μία καταγραφή παραμέτρων δεδομένων εισόδου καθώς και πληροφορίες που αφορούν την τωρινή κατάσταση του πληθυσμού. Αυτά τα δεδομένα εξόδου παράγονται με αναφορά υπορουτίνας. Η πρώτη γραμμή of output περιλαμβάνει (1) την αρίθμηση του πληθυσμού, (2) τον αριθμό των ατόμων που εισάγονται στον τελευταίο γύρο της διαδικασίας γέννησης και (3) τις καταλληλότητες των καλύτερων, δεύτερων και διάμεσων ατόμων στον τωρινό πληθυσμό. Αυτό ακολουθείται από η γραμμές που καταγράφουν τους φαινοτύπους για τα καλύτερα, δεύτερα και μέσα άτομα.

Πίνακας 4.1: Οι προκαθορισμένες τιμές των μεταβλητών στον PIKAIA [42]

Element	Internal variable	Type	Legal values	Default values	Note
1	np	integer	≤ 128	100	1
2	ngen	integer	$< \infty$	500	1
3	nd	integer	≤ 6	5	1
4	pcross	real	$0.0 \leq \text{pcross} \leq 1.0$	0.85	2
5	imut	integer	1, 2	2	
6	pmut	real	$0.0 \leq \text{pmut} \leq 1.0$	0.005	2
7	pmutmn	real	$0.0 \leq \text{pmutmn} \leq 1.0$	0.0005	2
8	pmutmx	real	$0.0 \leq \text{pmutmx} \leq 1.0$	0.25	2
9	fdif	real	$0.0 \leq \text{fdif} \leq 1.0$	1.0	2
10	irep	integer	1, 2, 3	1	
11	ielite	integer	0, 1	1	
12	ivrb	integer	0, 1, 2	0	

Πίνακας 4.2: Οι επιλεγμένες τιμές των μεταβλητών στον PIKAIA για την επίλυση του προβλήματος

Στοιχεία	Μεταβλητές	Όνομα	Τιμές
1	np	πληθυσμός	210
2	ngen	γενιές	300
3	nd	Ακρίβεια κωδικοποίησης	9
4	pcross	Ρυθμός διασταύρωσης	0.6
5	imut	Μέθοδος μετάλλαξης	2
6	pmut	Αρχικός ρυθμός μετάλλαξης	0.005
7	pmutmn	Κατώτατος ρυθμός μετάλλαξης	0.005
8	pmutmx	Ανώτατος ρυθμός	0.07

		μετάλλαξης	
9	fdif	Καταλληλότητα	1
10	irep	Σχέδια αναπαραγωγής	3
11	ielite	Ελπισμός	1
12	ivrb	Επιλογή επιπλέον ελέγχου	2

4.4 Διασύνδεση του ΡΙΚΑΙΑ και του προγράμματος αξιολόγησης

Η διασύνδεση του ΡΙΚΑΙΑ με το πρόγραμμα αξιολόγησης είναι μια εύκολη διαδικασία. Το πρόγραμμα αξιολόγησης είναι διαθέσιμο σε γλώσσα f90 και σε μορφή αρχείου όνομα.f90 [42]. Ένα πρόγραμμα που αποτελείται από τις δηλώσεις των παραμέτρων του προβλήματος, την εκτέλεση του XFOIL για την εξαγωγή του συντελεστή άνωσης και αντίστασης, τις δηλώσεις των τελεστών του γενετικού αλγορίθμου, την εκτέλεση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών, την εκτέλεση του ΡΙΚΑΙΑ και την εκτέλεση της εσωτερικής διαδικασίας τύπου FUNCTION. Για την εκτέλεση της αξιολόγησης, ο ΡΙΚΑΙΑ δίνει τυχαίες πραγματικές τιμές από 0.0 έως 1.0, αριθμού n, όπου n είναι το πλήθος των μεταβλητών σχεδίασης (design variables). Με τον όρο μεταβλητές σχεδίασης, αναφέρονται οι μεταβλητές του προβλήματος δηλαδή το μήκος χορδής και η γωνία βήματος, τις οποίες μεταχειρίζεται ο γενετικός αλγόριθμος για την εύρεση της βέλτιστης λύσης και στο πρόγραμμα έχει επιλεχθεί n=22.

Το πρόγραμμα βελτιστοποίησης αναζητεί τη βέλτιστη τιμή της χορδής και της γωνίας βήματος από έντεκα ακτινικές θέσεις πάνω στο πτερύγιο σε ενενήντα, με σκοπό να μεγιστοποιούν τον συντελεστή ισχύος του δρομέα με μεγαλύτερη ακρίβεια και με άμεση συνέπεια να βελτιστοποιούν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του δρομέα. Οι ακτινικές θέσεις πάνω στο πτερύγιο παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Οι επιλεγμένες τιμές των ακτινικών θέσεων πάνω στο πτερύγιο για την επίλυση του προβλήματος

Θέση στο πτερύγιο	Ποσοστό πτερυγίου	Μήκος πτερυγίου (m)
1	0,130	2,665
2	0,195	3,997
3	0,250	5,125
4	0,350	7,174
5	0,450	9,225
6	0,550	11,275
7	0,650	13,325
8	0,750	15,375
9	0,870	17,835
10	0,950	19,475
11	0,990	20,300

Στην περιοχή δήλωσης των σχεδιαστικών παραμέτρων μέσα στο αρχείο f90 ο χρήστης δηλώνει τις μεταβλητές σχεδίασης που θα μείνουν σταθερές μέχρι τον τερματισμό του προγράμματος. Όταν ο PIKAIA εκτελείται από το πρόγραμμα, δίνονται τυχαίες μεταβλητές, στη συνέχεια οι μεταβλητές αυτές εισέρχονται στην εσωτερική διαδικασία η οποία περιέχει την BEM η οποία αναζητά των βέλτιστο συντελεστή αεροδυναμικής επαγωγής με ακρίβεια τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων, οδηγώντας έτσι στον βέλτιστο συντελεστή ισχύος που είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και η πορεία αυτή ακολουθεί μέχρι αυτό να τερματιστεί.

Η εκτέλεση του XFOIL γίνεται με την χρήση του αρχείου XFOILCALL.bat και τα δεδομένα στο XFOIL εισάγονται μέσω του αρχείου XFOILCALL.key το οποίο μετατρέπεται κάθε φορά για κάθε ακτινική θέση ώστε να επιλέγει την αντίστοιχη αεροτομή και να εκτελείται το XFOIL με τον αντίστοιχο Reynolds και Mach .

Στη περίπτωση που το πρόβλημα βελτιστοποίησης υπόκειται σε περιορισμούς (constraints), οι περιορισμοί δηλώνονται μέσα στην εσωτερική διαδικασία. Ο αλγόριθμος αναμένει να διαβάσει δηλαδή να καταλάβει τους περιορισμούς μέσα από την τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε γενιά [42]. Παρακάτω θα παρουσιαστεί ο τρόπος

διασύνδεσης του PIKAIA με το λογισμικό αξιολόγησης και σε επόμενη παράγραφο οι ρυθμίσεις που αφορούν σε κάθε εκτέλεση του προγράμματος για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω αρχείο f90 ως πρόγραμμα αξιολόγησης:

```
PROGRAM OPTIMIZATION
```

Μέσα στο πρόγραμμα δηλώνεται η εσωτερική διαδικασία τύπου FUNCTION η οποία περιέχει τη θεωρία δίσκου ενέργειας:

```
FUNCTION CP_GEN(n, x) RESULT(fn_val)
```

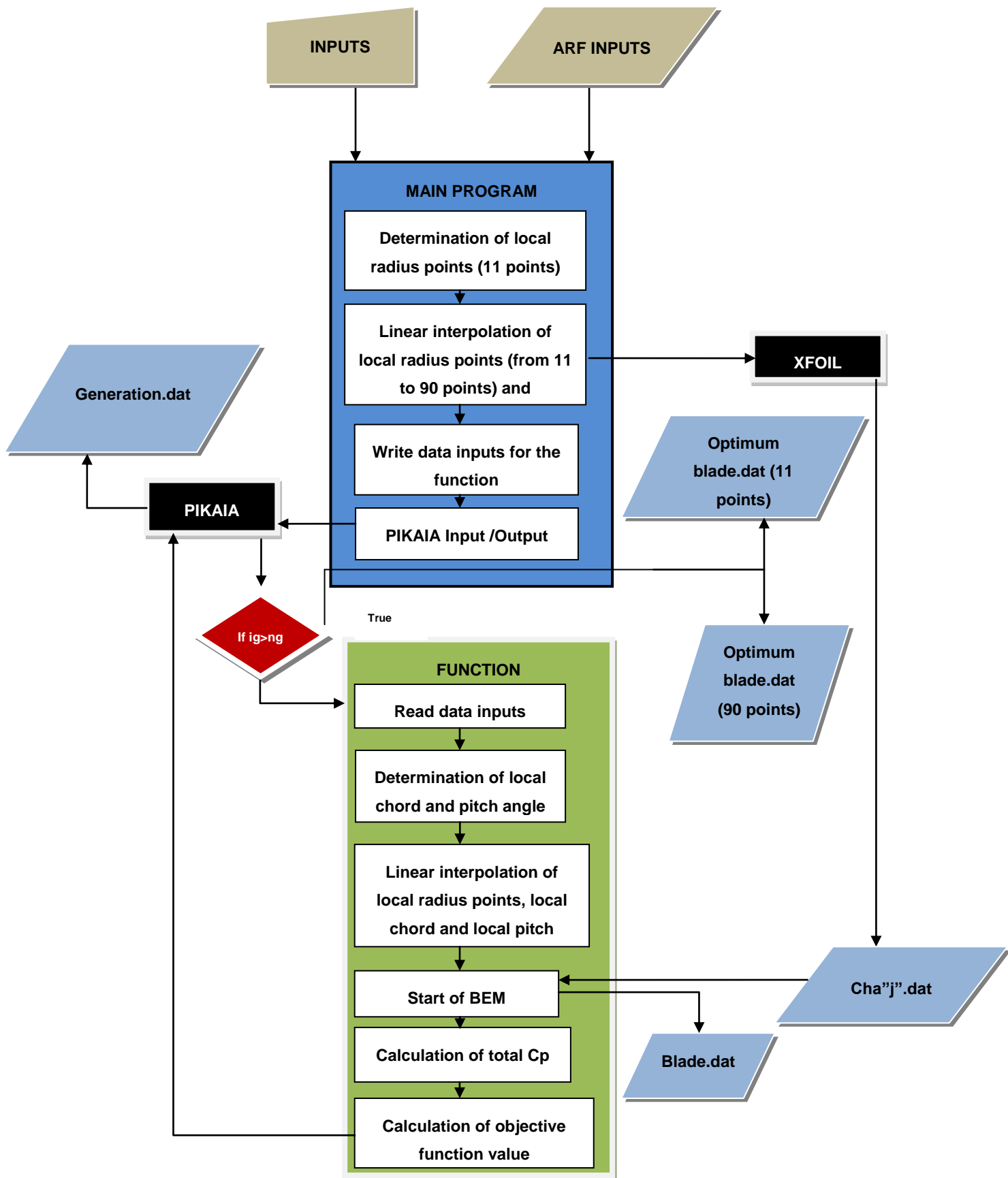
Στη συνέχεια δημιουργείται ένα αρχείο δεδομένων INPUT_PIK.dat, το αρχείο αυτό περιέχει τα δεδομένα εισόδου για την FUNCTION CP_GEN(n,x), στην συνέχεια εκτελείται η γεννήτρια τυχαίων αριθμών :

```
CALL rninit(seed)
```

Ακολουθεί η εκτέλεση της υπορουτίνας PIKAIA :

```
CALL pikaia(CP_GEN,n,ctrl,x,f,STATUS,ig,c_cr)
```

Στην εξωτερική διαδικασία εισέρχεται το αρχείο INPUT_PIK.dat, ενώ εξέρχονται τα αρχεία OPTIMUM BLADE.dat, BLADE.dat και GENERATION.dat. Στο σχήμα 4.2, φαίνονται οι λειτουργίες που εκτελούνται στο εκτελέσιμο πρόγραμμα.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής του εκτελέσιμου PROGRAM OPTIMIZATION

Στο παραπάνω εκτελέσιμο προγράμμα χρησιμοποιείται η υπορουτίνα SUBROUTINE CONVERGENCE αλλά ως FUNCTION CP_GEN(n,x) με κάποιες διαφοροποιήσεις από την αντίστοιχη που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος εύρεσης της καμπύλης ισχύος, της καμπύλης συντελεστή ισχύος, της καμπύλης συντελεστή ροπής που έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 2. Επίσης στο πρόγραμμα γίνεται κλήση του αρχείου δέσμης call system ("c:\BEM\XFOILCALL\XFOILCALL.bat"). Το αρχείο αυτό περιέχει τις παρακάτω εντολές.

```
"C:\BEM\XFOILCALL\XFoil"<
"C:\BEM\XFOILCALL\XFOILCALL.key"
```

Πρέπει να τονιστεί ότι όλα τα αρχεία που λαμβάνουν μέρος στη βελτιστοποίηση βρίσκονται στον κατάλογο c:\BEM\ . Έτσι, στο παραπάνω αρχείο η πρώτη σειρά εκτελεί την εφαρμογή Xfoil.exe στην οποία δίνεται σαν είσοδος η καταχώριση μητρώου XFOILCALL.key. Το αρχείο XFOILCALL.key, περιλαμβάνει εντολές του προγράμματος XFOIL (έκδοση 6.96) και τις εκτελεί με τη σειρά που εμφανίζονται στη καταχώριση μητρώου. Το XFOIL, εκτελεί τις εντολές και εξάγει το αρχείο dpl.pol, στο οποίο περιλαμβάνονται τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της αεροτομής που περιλαμβάνεται στο αρχείο ARF1...17.dat. Η FUNCTION CP_GEN(n, x) RESULT(fn_val) διαβάζει το xfoilout.pol, εισάγει τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης στις εξισώσεις και εξάγει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σύμφωνα με τους περιορισμούς και “δημιουργεί” τα δεδομένα για τον αλγόριθμο PIKAIA.

Παρακάτω αναλύονται τα κύρια σημεία του προγράμματος:

- Επιλογή σχεδιαστικών παραμέτρων
- Επιλογή λειτουργίας (σταθερών ή μεταβλητών στροφών)
- Επιλογή ολικής ακτίνας δρομέα
- Επιλογή αριθμού ταχυτήτων ως σημεία βέλτιστου σχεδιασμού (1-3)
- Επιλογή ποσοστού συμμετοχής της κάθε ταχύτητας
- Επιλογή ταχυτήτων βέλτιστου σχεδιασμού
- Επιλογή αριθμού πτερυγίων
- Επιλογή αναλογίας διαστάσεων πτερυγίου
- Επιλογή αριθμού Reynolds (αρχικό και τελικό)
- Επιλογή τρισδιάστατης διόρθωσης του συντελεστή άνωσης (προαιρετική)
- Εγγραφή του αρχείου XFOILCALL.key για ακτινική θέση

- Εκτέλεση του ΧFOIL και
- Δήλωση μεταβλητών του ΡΙΚΑΙΑ
- Εκτέλεση του ΡΙΚΑΙΑ
- Κλήση της αντικειμενικής συνάρτησης
- Εξαγωγή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε τυχαία επιλογή μεταβλητών άλλα και στο τέλος κάθε γενιάς.

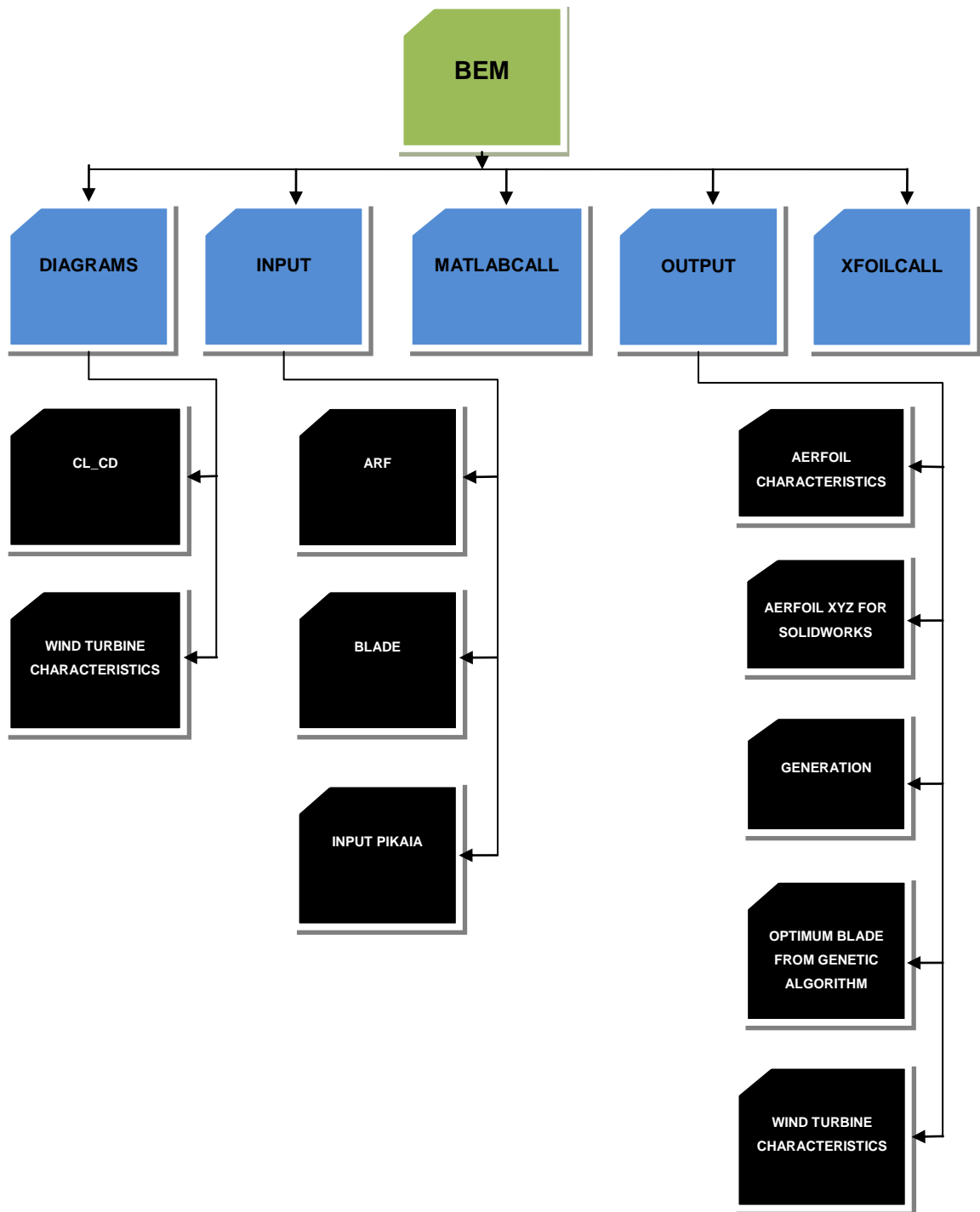
5 Εκτέλεση και αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και τα αποτελέσματα του πρωτότυπου πτερυγίου της NTK500/41 και των βελτιστοποιημένων πτερυγίων. Οι βασικές έννοιες της θεωρίας BEM, που παρουσιάζεται στο 2^ο κεφάλαιο, χρησιμοποιούνται εκτενώς για την παραγωγή των χαρακτηριστικών και την ανάλυση της συμπεριφοράς των πτερυγίων. Ο τελικός στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η εξαγωγή του βέλτιστου πτερυγίου, για ένα δρομέα ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα διαμέτρου 41 μέτρων. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τρία παραδείγματα βελτιστοποίησης του αεροδυναμικού σχεδιασμού πτερυγίων ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα, που χρησιμοποιούνται σε δρομέα ανεμογεννήτριας διαμέτρου 41 μέτρων και συνολικά τέσσερα παραδείγματα εξαγωγής αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα υπολογισμού των χαρακτηριστικών του δρομέα. Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και τα αποτελέσματα που αναφέρονται στην αεροτομή NACA 63415 η οποία χρησιμοποιείται σε όλες τις ακτινικές θέσεις του πτερυγίου. Στο πραγματικό πτερύγιο χρησιμοποιείται η αεροτομή NACA FFA-W3-301 (στο σημείο 8m), η αεροτομή NACA FFA-W3-241 (στο σημείο 10m), η αεροτομή NACA 63418 (στο σημείο 16,5m) και η αεροτομή NACA 63415 (στο σημείο 19m). Στις ενδιάμεσες περιοχές του πτερύγιου αλλάζουν τα χαρακτηριστικά των αεροτομών για να διαδεχθούν την επόμενη αεροτομή, ενώ κοντά στη βάση την κυλινδρική μορφή διαδέχεται η αεροτομή NACA FFA-W3-301. Για τις υπόλοιπες αεροτομές δεν βρέθηκε η γεωμετρία τους, λόγω των δικαιωμάτων αγοράζονται σε πακέτα αεροτομών. Μόνο για την naca 63415 βρίσκεται ελεύθερη η γεωμετρία της, για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η NACA 63415 σε όλο το πτερύγιο, παραδοχή η οποία ακολουθείται και στο βιβλίο [1].

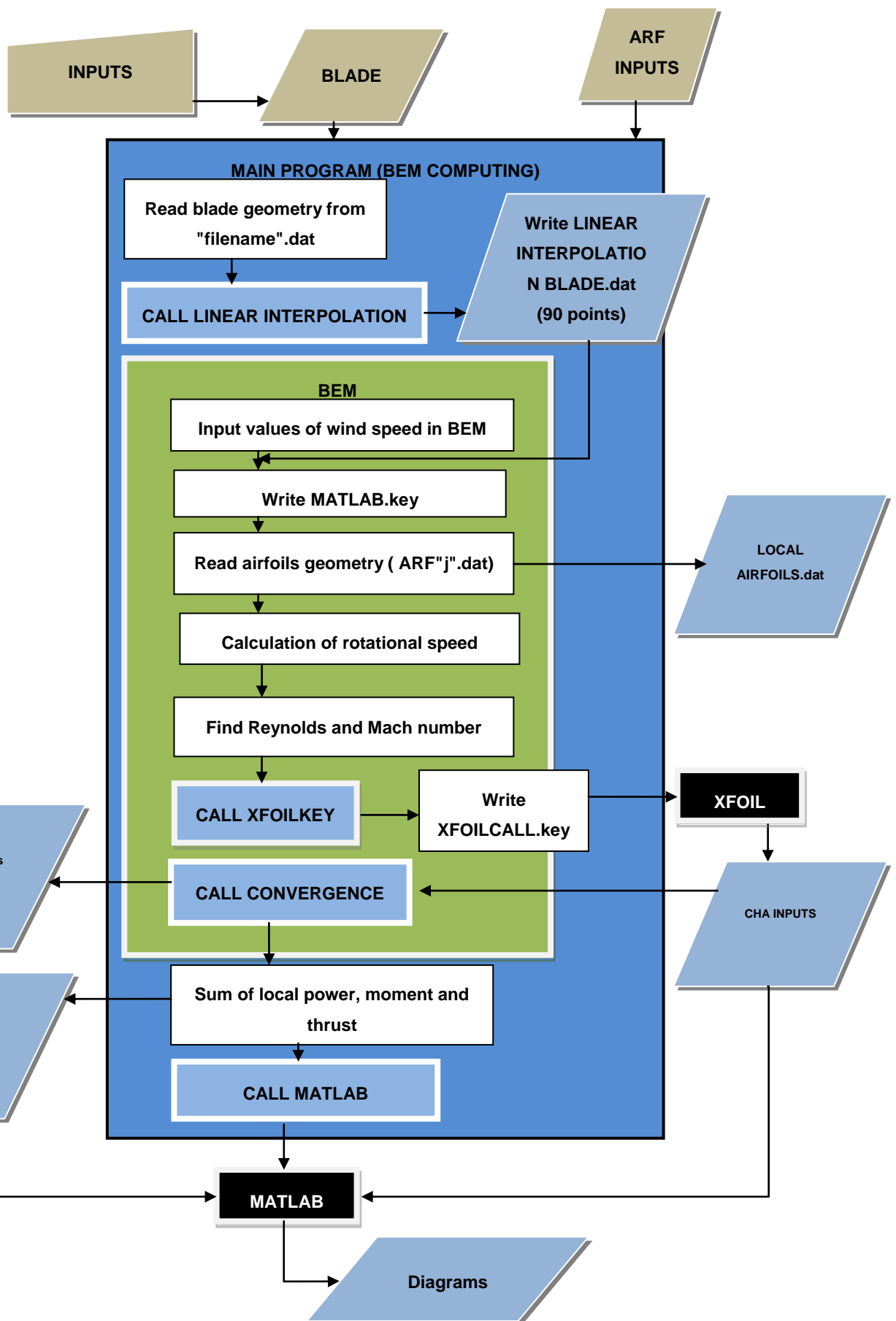
Το πτερύγιο που θα βελτιστοποιηθεί είναι το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας Nordtank 500/41 [56]. Η ανεμογεννήτρια NTK500/41 λειτουργεί με σταθερό βήμα, σταθερές στροφές (27,1 rpm), στις οποίες υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά της. Στο κεφαλαίο 5.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του δρομέα με το αρχικό πτερύγιο (NTK500/41) και με τα νέα πτερύγια (optimum blade) σε λειτουργία σταθερών στροφών. Ενώ στο κεφάλαιο 5.2 σε λειτουργία σταθερού βήματος.

Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του οποιοδήποτε δρομέα απαιτείται να τοποθετηθούν σε κάποιους φακέλους συγκεκριμένα αρχεία. Η γεωμετρία της επιλεγμένης αεροτομής naca 63415 για κάθε ακτινική θέση βρίσκεται στη θέση c:\BEM\INPUT\ARF\ σε αρχεία της μορφής ARF1...17.dat (ο αριθμός ένα αντιστοιχεί στην πρώτη ακτινική θέση μετά τη βάση του πτερυγίου) που κάθε φορά μπορούν να αλλάζουν και να επιλέγονται διαφορετικές αεροτομές σε άλλες ακτινικές θέσεις.

Η γεωμετρία του πτερυγίου τοποθετείται στη θέση c:\BEM\INPUT\BLADE\ σε αρχείο της μορφής .dat που κάθε φορά μπορεί να αλλάζει και να επιλέγονται άλλα πτερύγια. Στο σχήμα 5.1, φαίνεται η διάρθρωση των αρχείων και των φακέλων του προγράμματος και στο σχήμα 5.2 φαίνονται οι λειτουργίες που εκτελούνται στο εκτελέσιμο πρόγραμμα.



Σχήμα 5.1: Η διάρθρωση των αρχείων και των φακέλων του προγράμματος



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ροής του εκτελέσιμου PROGRAM BEM COMPUTING

5.1 Λειτουργία σταθερού βήματος

Στη λειτουργία σταθερού βήματος επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές στην είσοδο του προγράμματος για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του δρομέα:

- Ολική ακτίνα δρομέα $R_t=20,5$ m
- Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας $V_c=4$ m/s
- Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας $V_f=25$ m/s
- Ταχύτητα περιστροφής $W=27,1$ rpm
- Αριθμός πτερυγίων $Blades=3$
- Βήμα ταχύτητας $Speedstep=1$
- Αναλογία διαστάσεων $AR=19$
- Επιλογή τρισδιάστατης διόρθωσης του συντελεστή άνωσης ($Correction=0$)

Η γεωμετρία της αεροτομής naca 63415 παρουσιάζεται στον πίνακα 5.1 και τα δεκαεπτά αρχεία των αεροτομών τοποθετούνται στον φάκελο ARF.

Πίνακας 5.1 : Η γεωμετρία της αεροτομής naca 63415

X	Y	Z
1	0	0
0,95028	0,00931	0
0,90059	0,01884	0
0,85085	0,02885	0
0,80102	0,039	0
0,75109	0,04907	0
0,70106	0,05877	0
0,65093	0,0678	0
0,6007	0,07595	0
0,55039	0,08298	0
0,50000	0,08871	0

0,44955	0,09289	0
0,39905	0,09527	0
0,34852	0,09559	0
0,298	0,09362	0
0,2475	0,08941	0
0,19705	0,08279	0
0,14669	0,07348	0
0,09647	0,06077	0
0,07147	0,05261	0
0,0466	0,04264	0
0,02198	0,02964	0
0,00991	0,02074	0
0,00525	0,01585	0
0,00300	0,01287	0
0	0	0
0,0070	-0,01087	0
0,00975	-0,01305	0
0,01509	-0,01646	0
0,02802	-0,0222	0
0,0534	-0,0300	0
0,07853	-0,03565	0
0,10353	-0,04009	0
0,15331	-0,04656	0
0,20295	-0,05095	0
0,25250	-0,05361	0
0,30200	-0,05474	0

0,35148	-0,05439	0
0,40095	-0,05243	0
0,45045	-0,04909	0
0,50000	-0,04459	0
0,54961	-0,03918	0
0,5993	-0,03311	0
0,64907	-0,0266	0
0,69894	-0,01989	0
0,74891	-0,01327	0
0,79989	-0,00716	0
0,84915	-0,00193	0
0,89941	0,00184	0
0,94972	0,00333	0
1	0	0

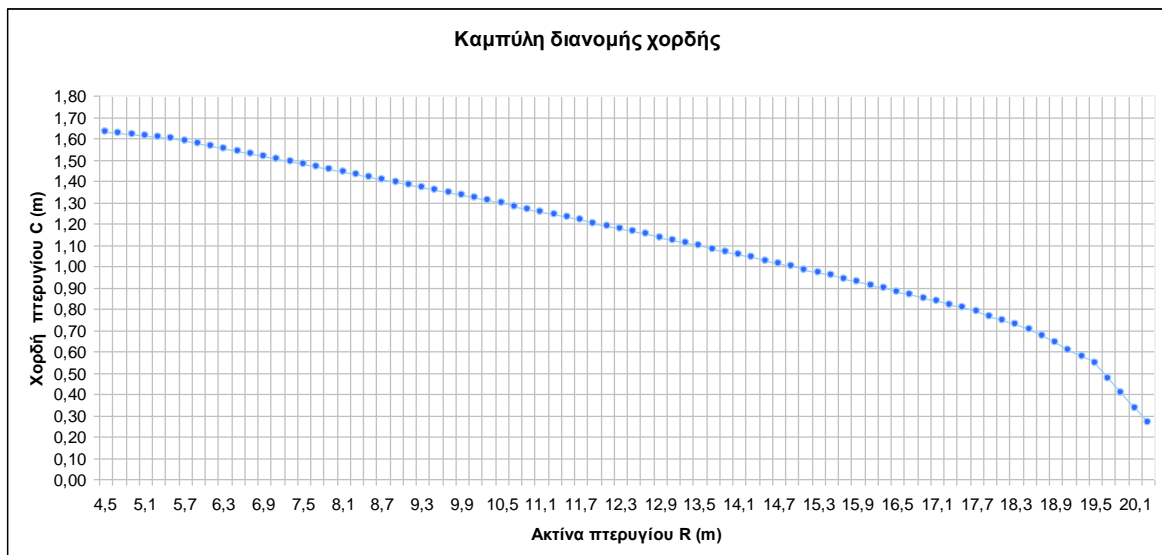
5.1.1 Σενάριο 1: Υπολογισμός των χαρακτηριστικών του δρομέα για το πρωτότυπο πτερύγιο της NTK500/41 με χρήση της αεροτομής naca 63415 σε όλες τις ακτινικές θέσεις

Η γεωμετρία του πτερυγίου είναι η γεωμετρία του πρωτότυπου πτερυγίου της ανεμογεννήτριας NTK500/41 [56] και παρουσιάζετε στα σχήματα 5.3, 5.2 και στον πίνακα 5.2. Το αρχείο όνομα.dat της γεωμετρίας του πτερυγίου τοποθετείται στον φάκελο BLADE.

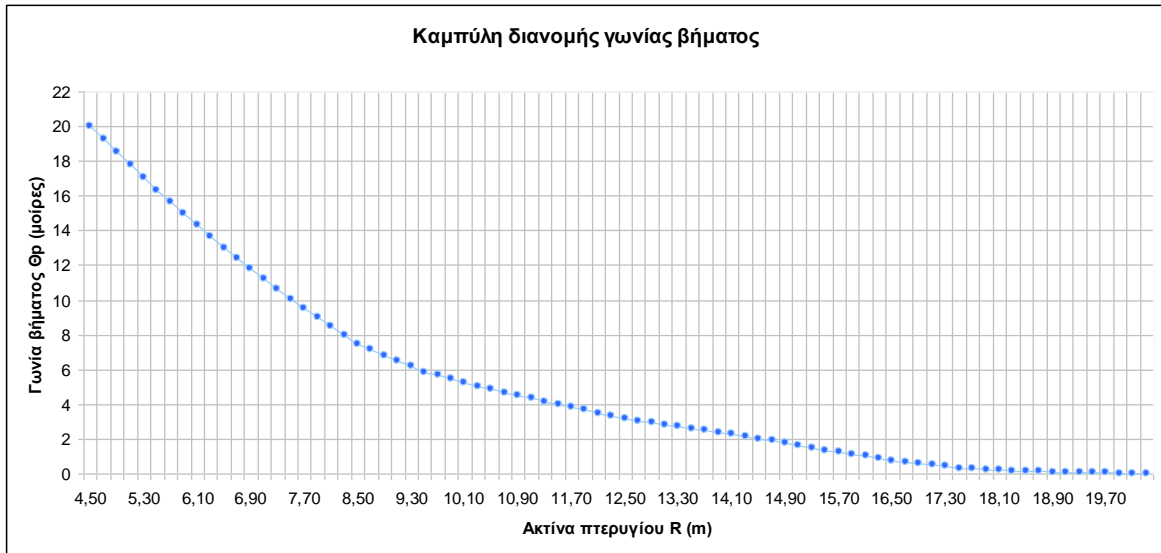
Πίνακας 5.2 : Η γεωμετρία του πτερυγίου [56]

Ακτίνα (m)	Χορδή (m)	Γωνία Βήματος (μοίρες)
4,5	1,630	20,00
5,5	1,597	16,30
6,5	1,540	13,00

7,5	1,481	10,05
8,5	1,420	7,45
9,5	1,356	5,85
10,5	1,294	4,85
11,5	1,229	4,00
12,5	1,163	3,15
13,5	1,095	2,60
14,5	1,026	2,02
15,5	0,955	1,36
16,5	0,881	0,77
17,5	0,806	0,33
18,5	0,705	0,14
19,5	0,545	0,05
20,3	0,265	0,02



Σχήμα 5.3 : Η διανομή της χορδής του πτερυγίου



Σχήμα 5.4: Η διανομή της γωνίας βήματος του πτερυγίου

Τα δεδομένα εξόδου του προγράμματος εξάγονται στη θέση c:\BEM\OUTPUTWIND TURBINE CHARACTERISTICS\ σε αρχεία της μορφής dat. Στο αρχείο P_T_M_Vo.dat εμφανίζονται για κάθε ταχύτητα ανέμου:

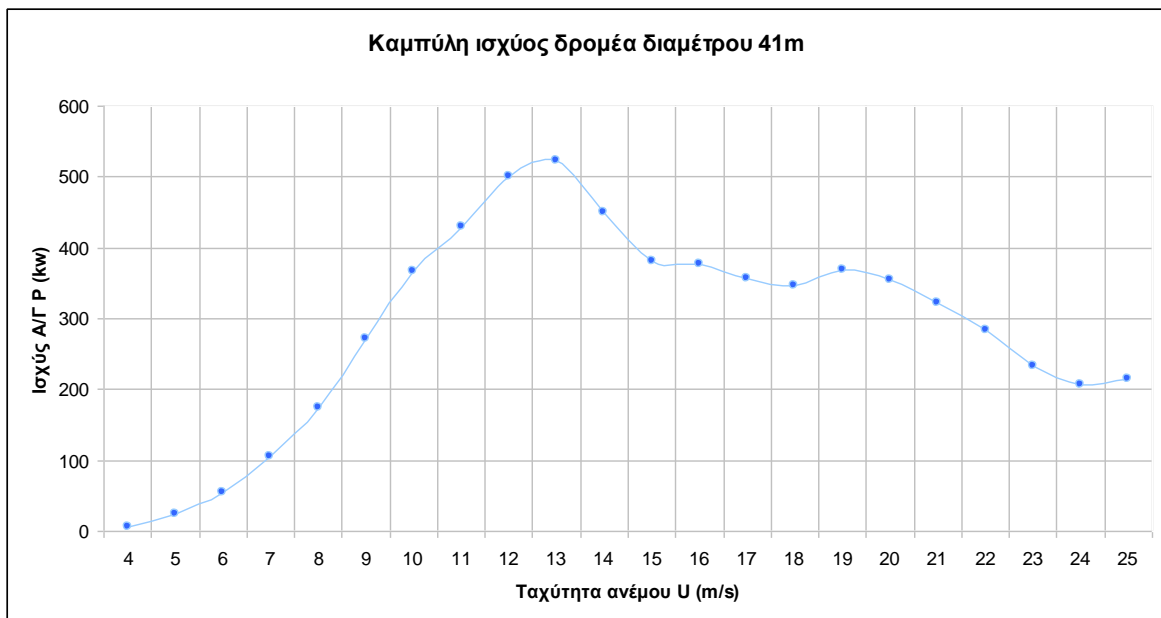
- η ισχύς P
- η ροπή M
- η δύναμη αντίστασης T
- οι αντίστοιχοι συντελεστές ισχύς C_p, ροπής C_m, αντίστασης C_t
- η μείωση της ταχύτητας επάνω στο δρομέα V_r
- η μείωση της ταχύτητας κατάντι του δρομέα V_d
- η ταχύτητα ακροπτερυγίου λ
- η ταχύτητα ανέμου V₀
- ο λόγος επιφάνειας ανάντι και κατάντι του δρομέα A₀/A₁

Στο αρχείο Th_M_P.dat εμφανίζονται για κάθε ακτινική θέση πάνω στο πτερύγιο:

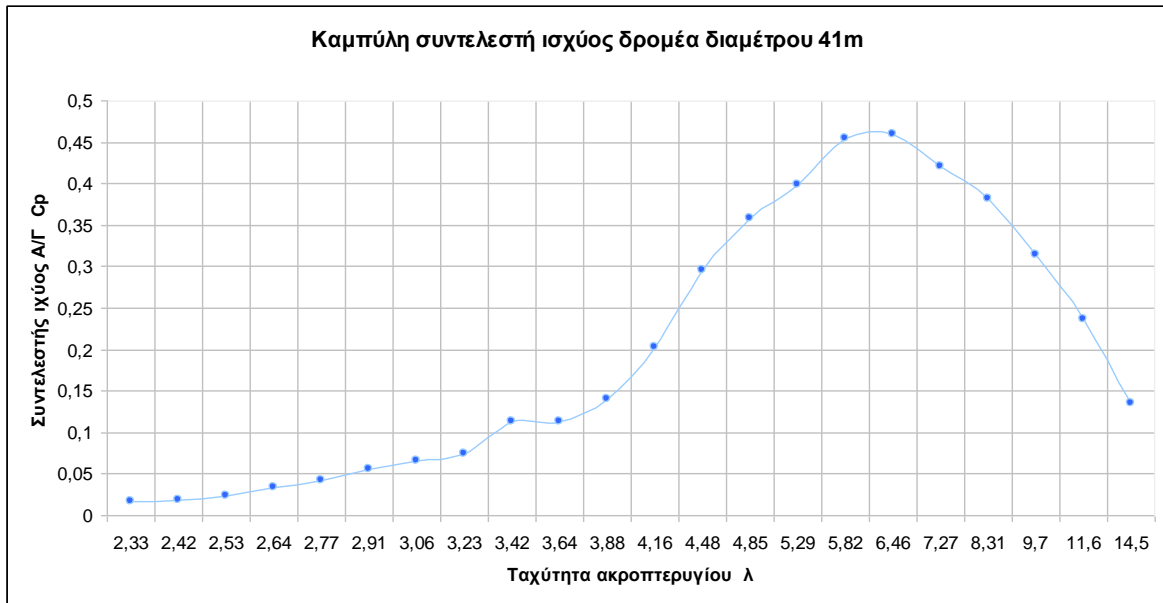
- η ισχύς P
- η ροπή M
- η δύναμη αντίστασης T
- οι αντίστοιχοι συντελεστές ισχύς C_p, ροπής C_m, αντίστασης C_t

- ο συντελεστής αξονικής επαγωγής a
- η ταχύτητα ανέμου V_0
- η ακτινική θέση
- ο συντελεστής εφαπτομενικής επαγωγής a'
- ο συντελεστής Prandtl

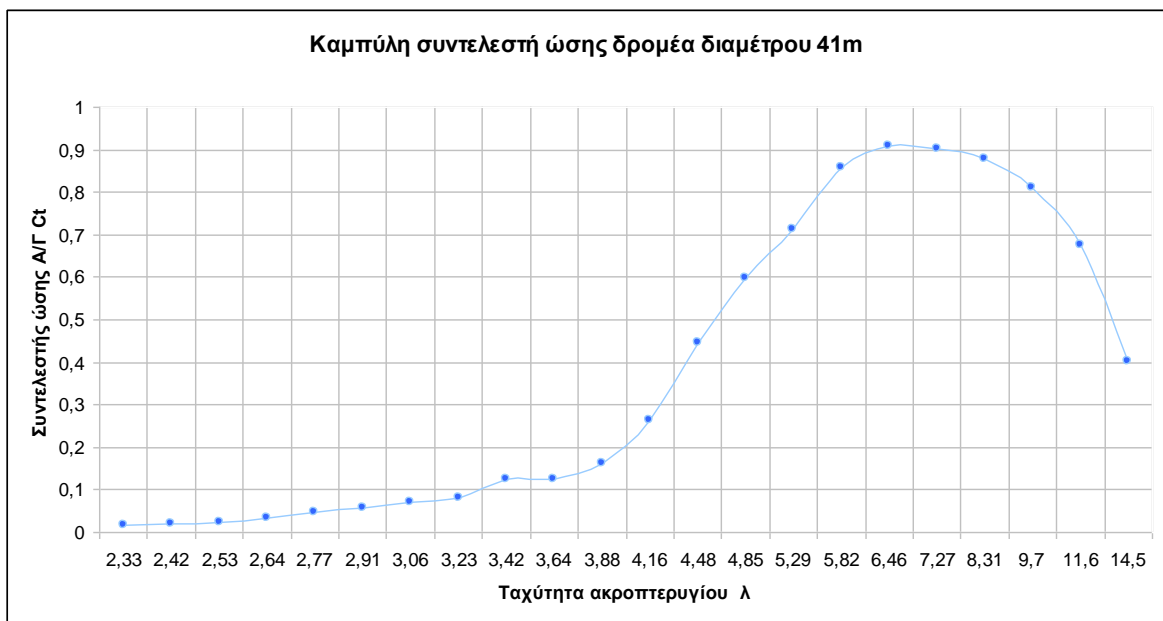
Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα ώστε να παρατηρηθεί αρχικά η συμπεριφορά του δρομέα αλλά και μία πρώτη εικόνα για την κατάσταση της ροής στο επίπεδο του δρομέα και πίσω από αυτό. Παρακάτω εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά του πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση. Για τα παραπάνω δεδομένα εισόδου προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.



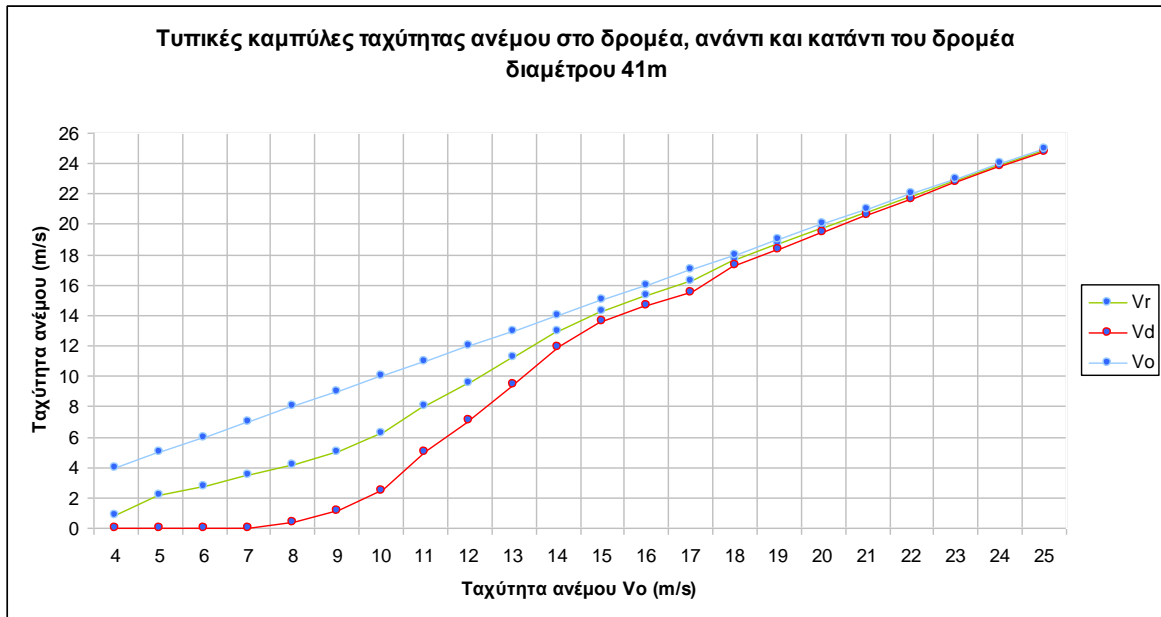
Σχήμα 5.5: Η καμπύλη ισχύος του δρομέα



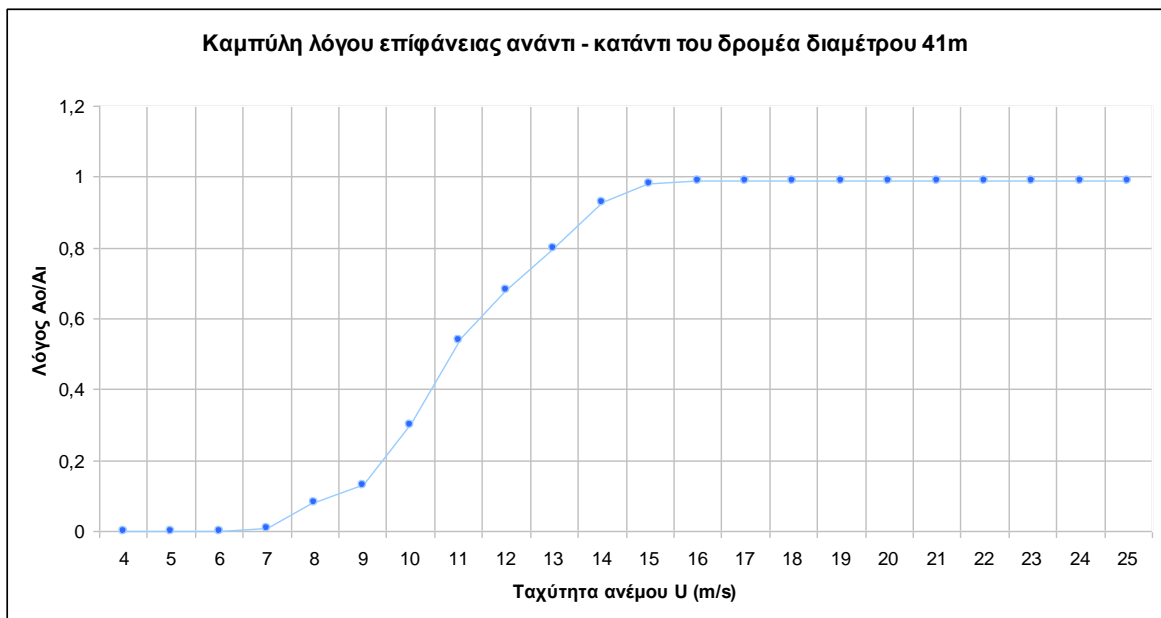
Σχήμα 5.6: Η καμπύλη συντελεστή ισχύος του δρομέα



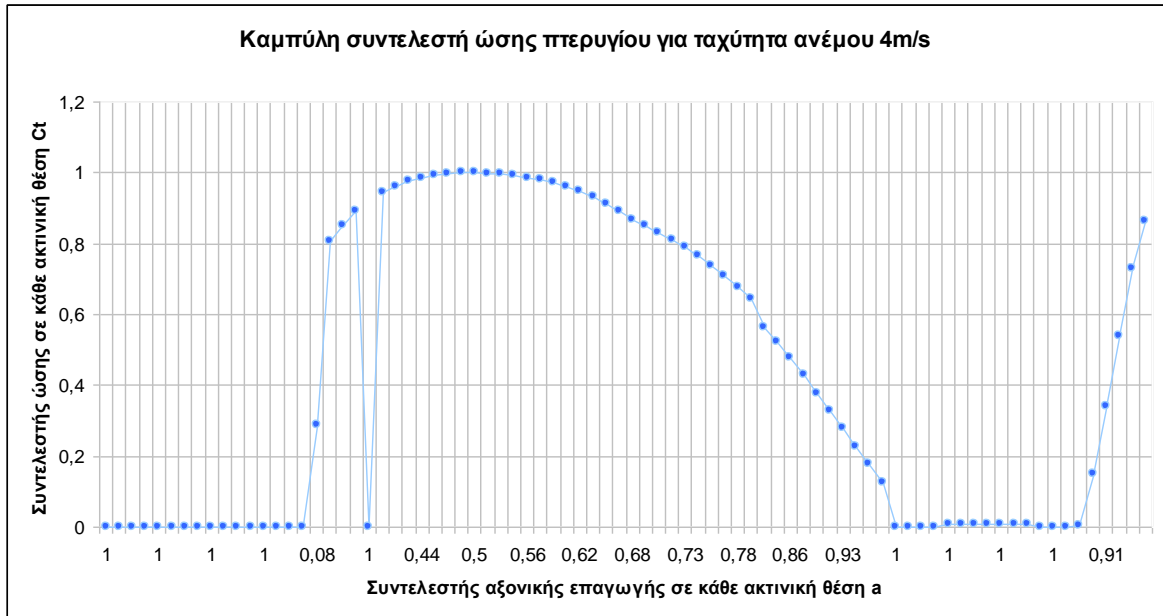
Σχήμα 5.7: Η καμπύλη συντελεστή ώσης του δρομέα



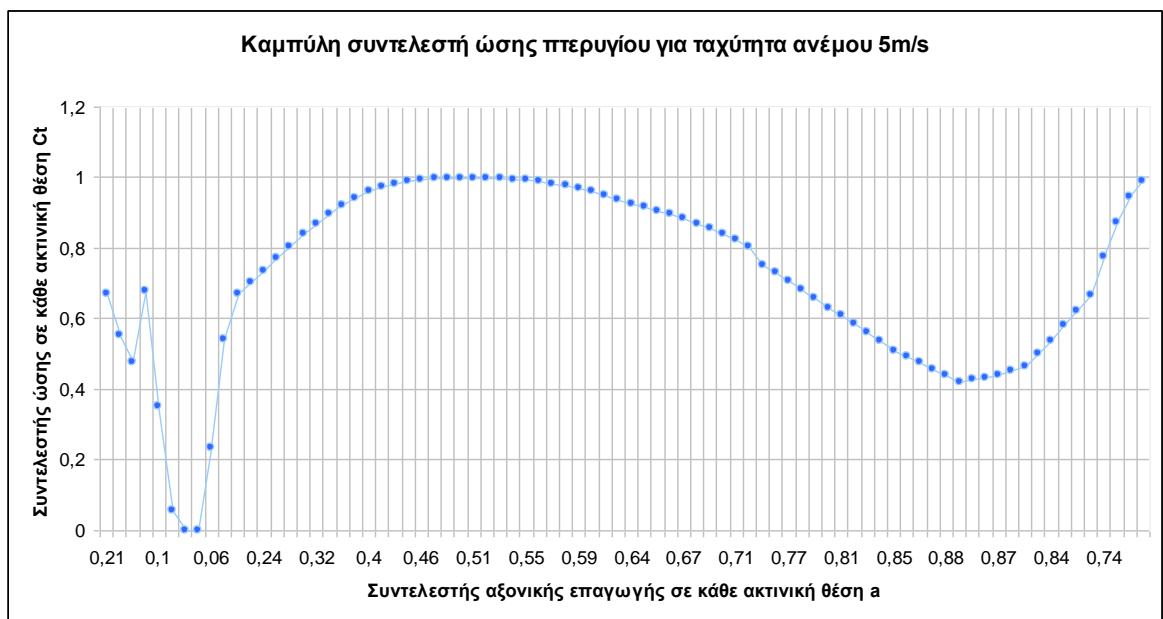
Σχήμα 5.8: Καμπύλες πτώσης της ταχύτητας στο δρομέα και κατάντι του δρομέα (V_o =ταχύτητα ανάντι, V_r =ταχύτητα στο δρομέα, V_d =ταχύτητα κατάντι)



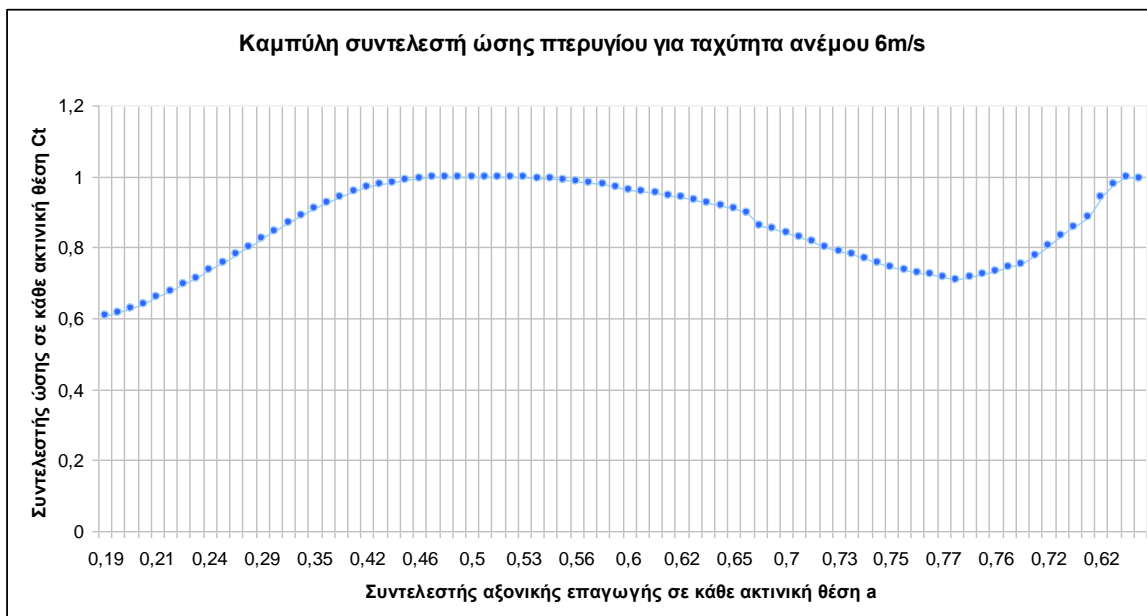
Σχήμα 5.9: Η καμπύλη του λόγου επιφάνειας ανάντι προς κατάντι του δρομέα



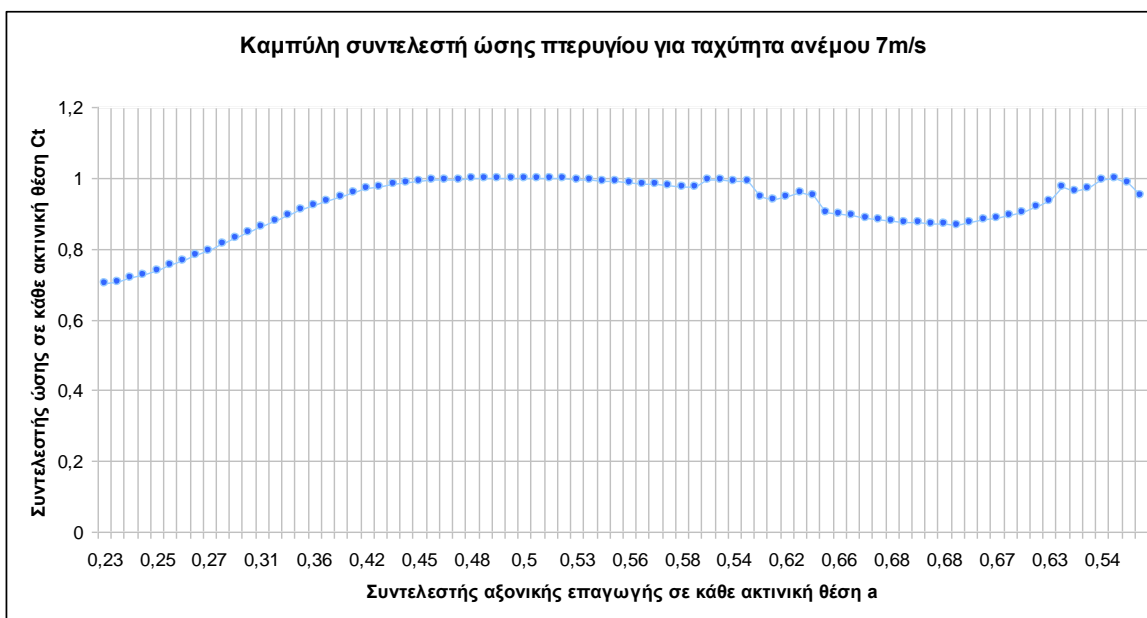
Σχήμα 5.10: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



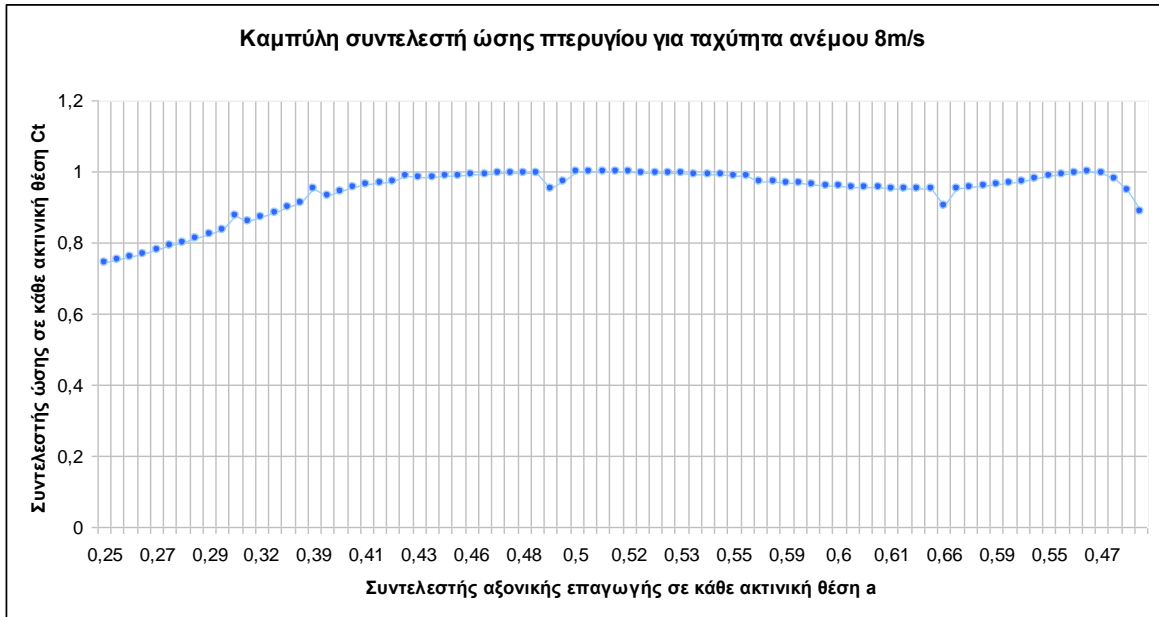
Σχήμα 5.11: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



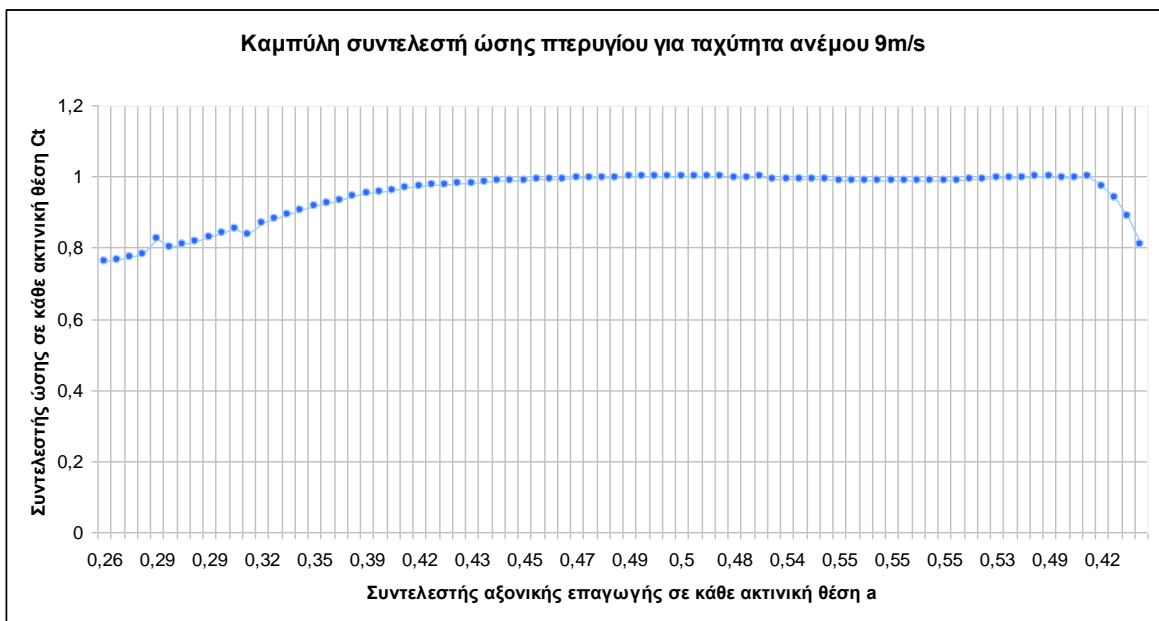
Σχήμα 5.12: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



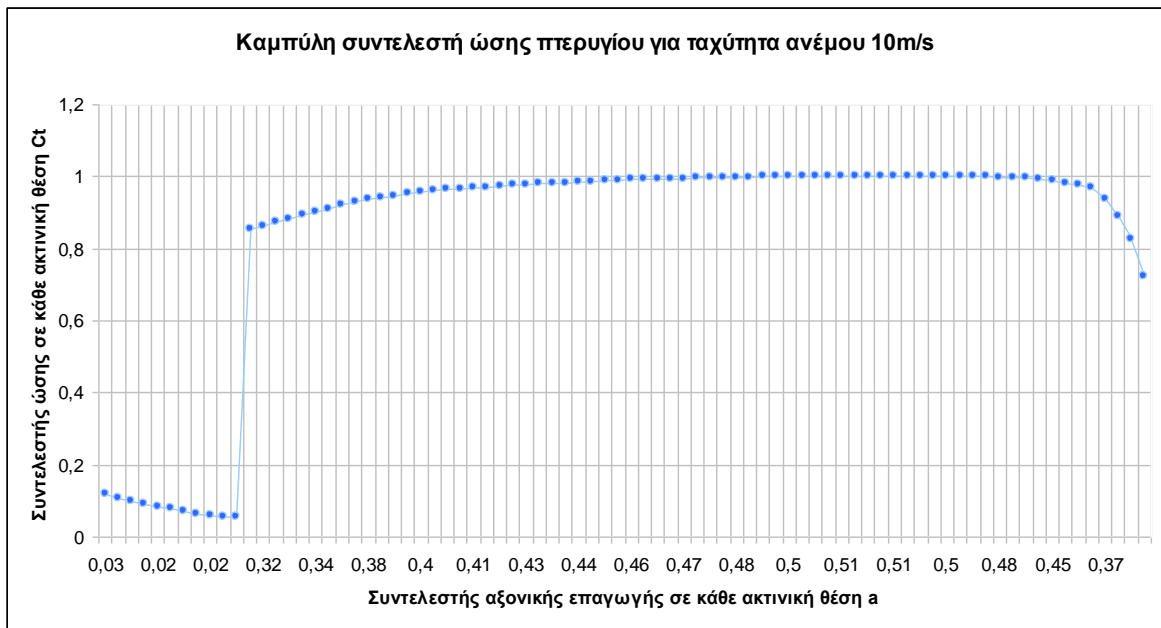
Σχήμα 5.13: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 5.14: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 5.15: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 5.16: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση

Πίνακας 5.3: Η ποσοστιαία διαφορά της ισχύος μεταξύ του παραδείγματος του βιβλίου και του σεναρίου 1 για ένα εύρος ταχυτήτων 4m/s έως 12m/s

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ισχύς NTK500 σενάριο 1(kw)	Ισχύς NTK500 βιβλίου [1](kw)	Ποσοστιαία διαφορά (%)
4	7,0	19,2	174,5
5	23,8	47,5	99,4
6	54,9	87,3	59,0
7	105,8	135,8	28,4
8	173,8	194,5	11,9
9	271,0	265,1	-2,2
10	367,5	323,3	-12,0
11	428,7	387,3	-9,7
12	500,2	446,9	-10,7

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5 ο δρομέας παρουσιάζει μέγιστη ισχύ $P=470\text{kW}$ σε ταχύτητα ανέμου $V_0=13\text{m/s}$ και μέγιστο συντελεστή ισχύος $C_p=0,46$ σε $\lambda=6,46$ δηλαδή σε $V_0=9\text{m/s}$ (σχήμα 5.6) με αποτέλεσμα να εμφανίζει διαφορά με το δρομέα που παρουσιάζεται στο βιβλίο [1] με μέγιστη ισχύ $P=570\text{kW}$ σε $V_0=17\text{m/s}$ και μέγιστο συντελεστή ισχύος $C_p=0,5$ σε $\lambda=9,7$ δηλαδή σε $V_0=6\text{m/s}$. Επίσης συγκρίνοντας τα δύο πτερύγια, ο πρωτότυπος δρομέας του βιβλίου παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά από 4m/s έως 8m/s και από 13m/s έως 25m/s , ενώ ο δρομέας (σενάριο 1) παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά από 9m/s έως 12m/s όπως παρατηρείτε στον πίνακα 5.3. Αυτές οι διαφορές οφείλονται κυρίως στις διαφορετικές παραδοχές:

- για την τοποθέτηση μονό της αεροτομής naca 63415 σε όλο το πτερύγιο
- στις διαφορές του συντελεστή άνωσης και αντίστασης στα παραδείγματα του βιβλίου και του XFOIL.

Επίσης παρατηρείται διαφορά στα σημεία μετά το μέγιστο της καμπύλης ενώ και οι δύο καμπύλες σχηματίζονται με εφαρμογή της BEM. Αυτό οφείλεται:

- στην χρήση των εξισώσεων του Viterna [40] οι οποίες υπολογίζουν τους πραγματικούς συντελεστές C_l και C_d για γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερης της γωνίας μέγιστου συντελεστή άνωσης C_{lmax} .

Σε γενική εικόνα το πρόγραμμα δείχνει να λειτουργεί σωστά και να σχεδιάζει φυσιολογικές καμπύλες παρά τις διαφορές με τα αποτελέσματα του βιβλίου.

Στο σχήμα 5.7 στις ταχύτητες ανέμου 7m/s , 8m/s και 9m/s ο συντελεστής ώσης του δρομέα παρουσιάζει σταθερή τιμή αρκετά κοντά στην τιμή $C_t=0.9$.

Στο σχήμα 5.8 εμφανίζεται η ταχύτητα ανέμου ανάντι, πάνω και κατάντι του δρομέα. Η μείωση της ταχύτητας ανέμου V_r και V_d είναι μεγάλη από 4m/s έως 10m/s . Κανονικά η μείωση κατάντι είναι διπλάσια της μείωσης πάνω στο δρομέα. Η μείωση αυτή δεν φαίνεται από 4m/s έως και 7m/s λόγω της παραδοχής στο πρόγραμμα για την τιμή της V_d . Εάν η V_d είναι μικρότερη του μηδενός επειδή ο συντελεστής αξονικής επαγωγής a , είναι μεγαλύτερός του 0.5 , να ορίζεται η $V_d=0$. Η μεγάλη μείωση της V_r από 4m/s έως 8m/s σε συνδυασμό με την μικρή τιμή του λόγου επιφάνειας ανάντι προς κατάντι όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9 για τις ίδιες ταχύτητες ανέμου προκαλεί μεγάλη ανάπτυξη τυρβώδους ροής στον ομόρροο και παράλληλα μειωμένη ταχύτητα σε αρκετά μεγάλη επιφάνεια πίσω από τον δρομέα, δηλαδή πολύ δυσμενείς συνθήκες τόσο για τον ίδιο το δρομέα αλλά και για ένα αιολικό πάρκο.

Στα σχήματα 5.10 έως 5.16 παρουσιάζεται ο συντελεστής αντίστασης C_t σε κάθε ακτινική θέση. Για ταχύτητες ανέμου 4m/s έως και 6m/s η διανομή του C_t είναι έντονα ανομοιόμορφη το οποίο είναι μη επιθυμητό. Αντίθετα από 6m/s έως και 9m/s είναι σχεδόν ομοιόμορφη στα περισσότερα σημεία ελέγχου πάνω στο πτερύγιο, πράγμα που δηλώνει την σχεδόν ομαλή λειτουργία από την πλευρά της κατανομής δυνάμεων πάνω στο πτερύγιο αλλά όχι και την βέλτιστη λειτουργία του δρομέα. Από τα παραπάνω κρίνεται ότι το πρόγραμμα εξάγει δεδομένα με ικανοποιητική ακρίβεια.

5.1.2 Σενάριο 2: Υπολογισμός των χαρακτηριστικών του δρομέα για πτερύγιο που δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα βελτιστοποίησης για ταχύτητα ανέμου 7.5 m/s

Για την δημιουργία του πτερυγίου το πρόγραμμα βελτιστοποίησης χρησιμοποίησε τα ίδια αρχεία με την γεωμετρία των αεροτομών από τον ίδιο φάκελο στη θέση `c:\BEM\INPUT\ARF\`.

Στη δημιουργία του πτερυγίου επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές στην είσοδο του προγράμματος για τον υπολογισμό των σχεδιαστικών παραμέτρων του πτερυγίου:

- Λειτουργία σταθερών στροφών (Operation=1)
- Ταχύτητα περιστροφής $W=27,1\text{rpm}$
- Ολική ακτίνα δρομέα $R_t=20,5\text{ m}$
- Αριθμός σημείων ταχυτήτων ανέμου Points=1
- Ποσοστό συμμετοχής της κάθε ταχύτητας ανέμου: 1.0%
- Επιλογή ταχυτήτων ανέμου: $V=7.5\text{ m/s}$
- Αριθμός πτερυγίων Blades=3
- Λόγος πλευράς $AR=19$
- Επιλογή τρισδιάστατης διόρθωσης του συντελεστή άνωσης (Correction=0)

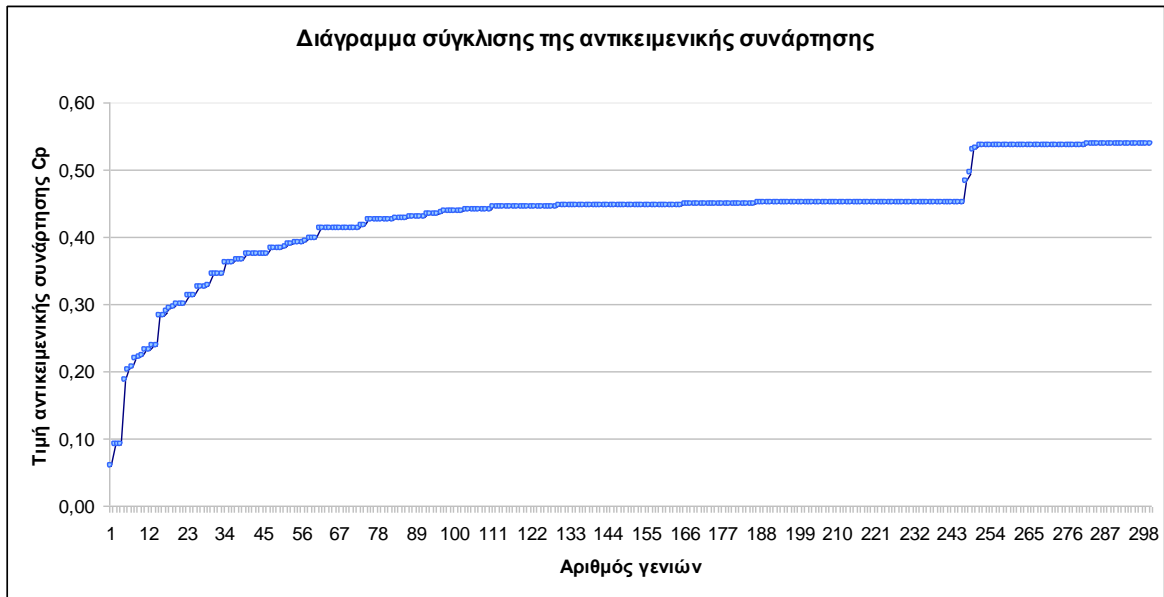
Τα αρχεία εξόδου είναι τα αρχεία `blade.dat`, `optimum blade.dat` και `LINEAR INTERPOLATION BLADE.dat` στη θέση `c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM`

GENETIC ALGORITHM\, το αρχείο generation.dat στη θέση c:\BEM\OUTPUT\GENERATION\ και τα αρχεία INPUT_PIK.dat και στη θέση c:\BEM\INPUT\INPUT PIKAI\ . Τα αρχεία blade.dat, linear interpolation blade.dat και generation.dat ανανεώνονται παράλληλα με την εκτέλεση του προγράμματος βελτιστοποίησης με σκοπό να δείχνουν την μεταβολή των τιμών. Το αρχείο generation.dat δείχνει την πορεία της σύγκλισης της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή του συντελεστή ισχύος του δρομέα στην επιθυμητή τιμή 0.59259. Η γεωμετρία του πτερυγίου δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα βελτιστοποίησης και παρουσιάζεται στα σχήματα 5.18, 5.19 και στον πίνακα 5.4.

Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζεται το διάγραμμα σύγκλισης της εκτέλεσης. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο αριθμός των γενιών. Στον κατακόρυφο φαίνεται με θετικό πρόσημο η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Στη πραγματικότητα η βέλτιστη αεροτομή που θα προκύψει, θα έχει συντελεστή ισχύος που θα πλησιάζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης $C_p=0,59259$.

Η μορφή του σχήματος με κάποια ευδιάκριτα πλατό λύσεων είναι χαρακτηριστική. Στο πρώτο πλατό, όπου η αντικειμενική συνάρτηση διατηρεί τη τιμή 0,451465 για 20 συνεχόμενες γενιές όπου και επέρχεται η διαδικασία της μετάλλαξης. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι μικρή και κυμαίνεται από 0,5% έως 7% αλλά ο πληθυσμός μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικά μεγάλος ώστε κάποια άτομα να υποστούν μετάλλαξη. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται και στα επόμενα πλατό. Αποτέλεσμα αυτής της αναπροσαρμογής είναι η χαρακτηριστική μορφή του διαγράμματος με τα διακριτά πλατό τιμών.

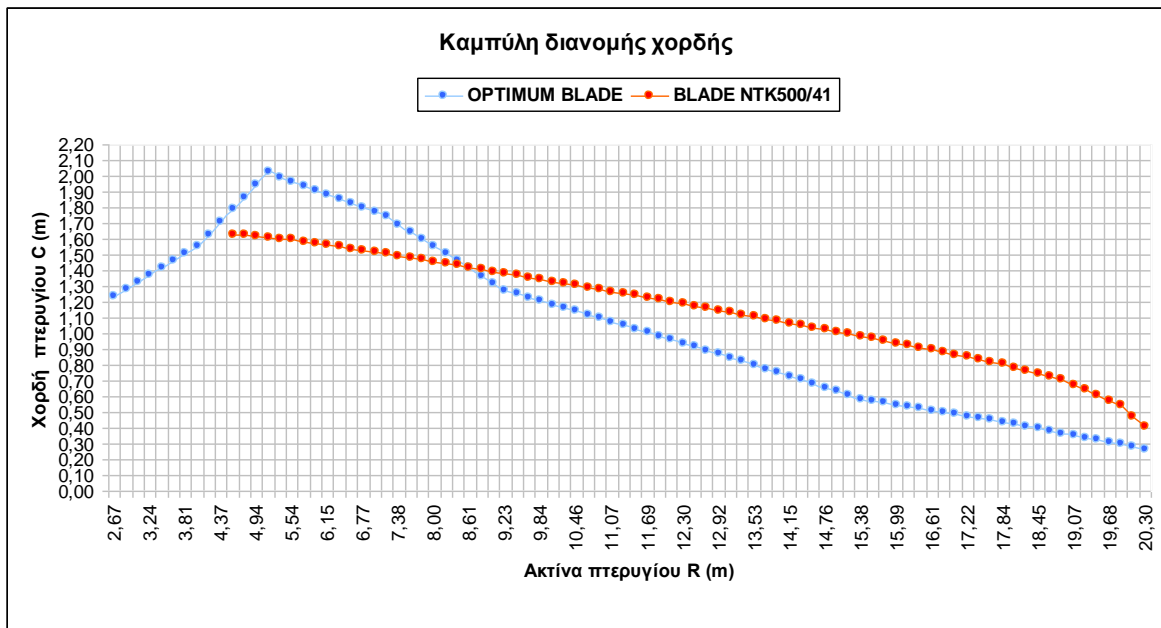
Η σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης, παρουσιάζει σημαντική αλλαγή ακόμη και στις 250 γενιές, που είναι το σημείο όπου η CP_GEN λαμβάνει την τιμή 0,531912 και μεταβάλλεται ελάχιστα μέχρι τις 300 γενιές λαμβάνοντας την τιμή 0,537396, φτάνοντας στο ποσοστό 0,9068 του ορίου του betz .



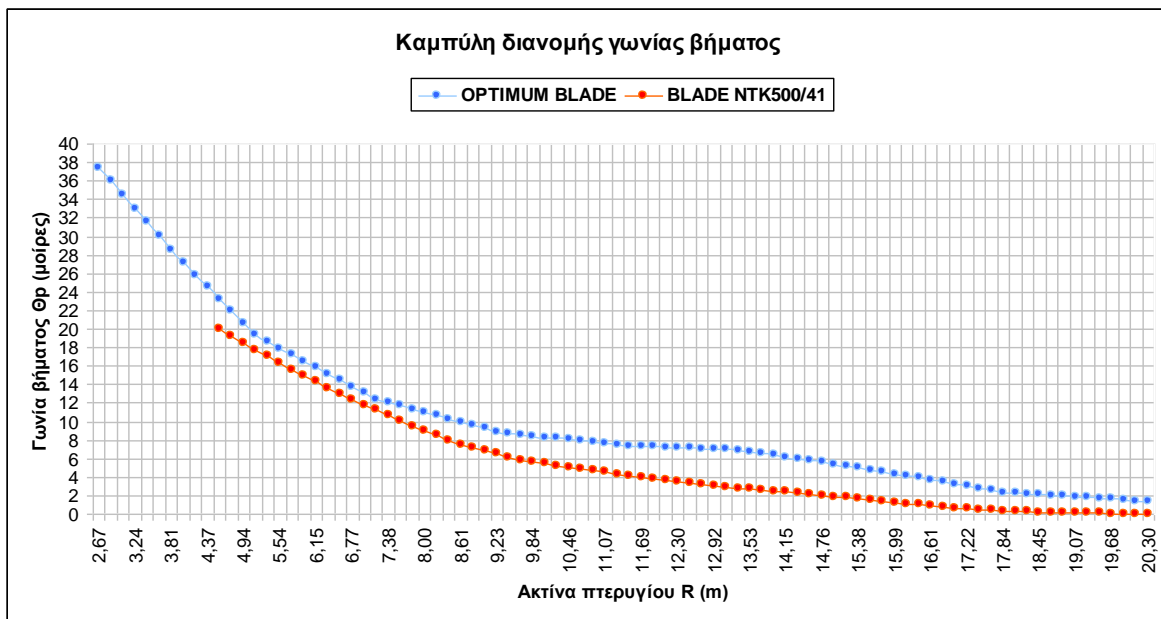
Σχήμα 5.17 : Διάγραμμα σύγκλισης της αντικειμενικής συνάρτησης Cp

Πίνακας 5.4 : Η γεωμετρία του περυγίου

Ακτίνα (m)	Χορδή (m)	Γωνία Βήματος (μοίρες)
2,665	1,238	37,431
3,997	1,552	27,122
5,125	2,023	19,313
7,175	1,742	12,394
9,225	1,274	8,897
11,275	1,053	7,443
13,325	0,824	6,945
15,375	0,586	4,993
17,835	0,438	2,358
19,475	0,325	1,698
20,3	0,266	1,366



Σχήμα 5.18: Η διανομή της χορδής του βελτιστοποιημένου πτερυγίου και του πρωτότυπου πτερυγίου της NTK500/41



Σχήμα 5.19: Η διανομή της γωνίας βήματος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου και του πτερυγίου της NTK500/41

Στον πίνακα 5.4 και στα σχήματα 5.18 και 5.19 παρουσιάζεται η νέα γεωμετρία του πτερυγίου, η οποία παρουσιάζει αρκετές διαφορές με το αρχικό πτερύγιο. Το αρχικό πτερύγιο στο σημείο 4,5m παρουσιάζει το μέγιστο μήκος χορδής $c=1,63m$ και γωνία

βήματος $\theta=20,0$ μοίρες ενώ το νέο πτερύγιο στο σημείο 5,12m παρουσιάζει μήκος $c=2,06m$ και $\theta=19,31$ μοίρες. Η μέγιστη χορδή στο νέο πτερύγιο εμφανίζεται στο σημείο 5,12m και είναι $c=2,06m$, ενώ στα προηγούμενα σημεία με κατεύθυνση προς τη βάση η χορδή μειώνεται γραμμικά. Η διαφορά στη γωνία βήματος και στο μήκος χορδής οφείλεται στο ότι το αρχικό πτερύγιο έχει σχεδιαστεί για βέλτιστη λειτουργία σε ταχύτητα ανέμου 6m/s δηλαδή $\lambda=9,7$ με χρήση και των άλλων αεροτομών στα υπόλοιπα σημεία του πτερυγίου, ενώ το νέο σε $V_0=7.5m/s$ δηλαδή $\lambda=7,73$ μόνο με χρήση της αεροτομής naca 63415. Για το λόγο αυτό παρατηρούμε ότι το νέο πτερύγιο είναι πιο λεπτό στο μεγαλύτερο μέρος του και η γωνία βήματος πιο μεγάλη κατά δύο μοίρες περίπου. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου και για σημεία πιο κοντά στη βάση απαιτούνται μεγαλύτερες γωνίες βήματος ώστε η γωνία πρόσπτωσης να βρίσκεται σε ιδανικές τιμές, οι οποίες είναι διαφορετικές για κάθε αεροτομή και αυτό επηρεάζει σημαντικά την γεωμετρία του πτερυγίου. Αυτό οφείλεται στο ότι τα σημεία κοντά στη βάση συμμετέχουν λιγότερο στην παραγωγή ισχύος και ο γενετικός αλγόριθμος το αντιλαμβάνεται με την αλλαγή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Το αρχείο όνομα.dat της γεωμετρίας του πτερυγίου τοποθετείται στον φάκελο BLADE. Τα δεδομένα εξόδου του προγράμματος εξάγονται στη θέση c:\BEM\OUTPUT\WIND TURBINE CHARACTERISTICS\ σε αρχεία της μορφής dat. Στο αρχείο P_T_M_Vo.dat εμφανίζονται για κάθε ταχύτητα ανέμου:

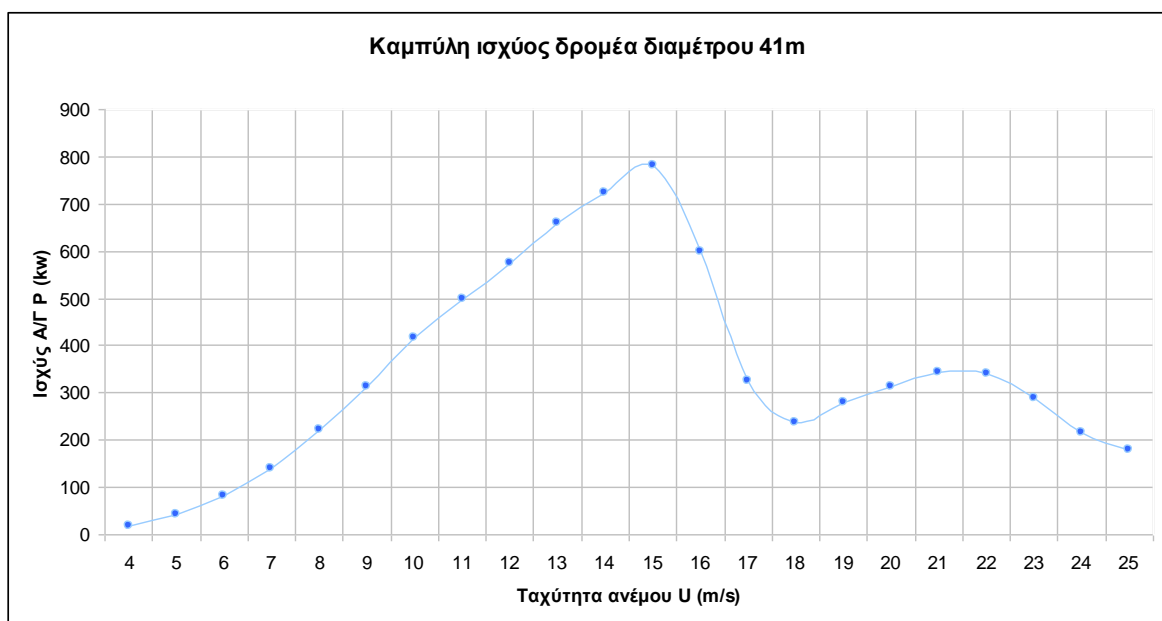
Τα δεδομένα εξόδου του προγράμματος εξάγονται στη θέση c:\BEM\OUTPUT\WIND TURBINE CHARACTERISTICS\ σε αρχεία της μορφής dat. Στο αρχείο P_T_M_Vo.dat εμφανίζονται για κάθε ταχύτητα ανέμου:

- η ισχύς P
- η ροπή M
- η δύναμη αντίστασης T
- οι αντίστοιχοι συντελεστές ισχύος C_p , ροπής C_m , αντίστασης C_t
- η μείωση της ταχύτητας επάνω στο δρομέα V_r
- η μείωση της ταχύτητας κατάντι του δρομέα V_d
- η ταχύτητα ακροπτερυγίου λ
- η ταχύτητα ανέμου V_0
- ο λόγος επιφάνειας ανάντι και κατάντι του δρομέα A_0/A_I

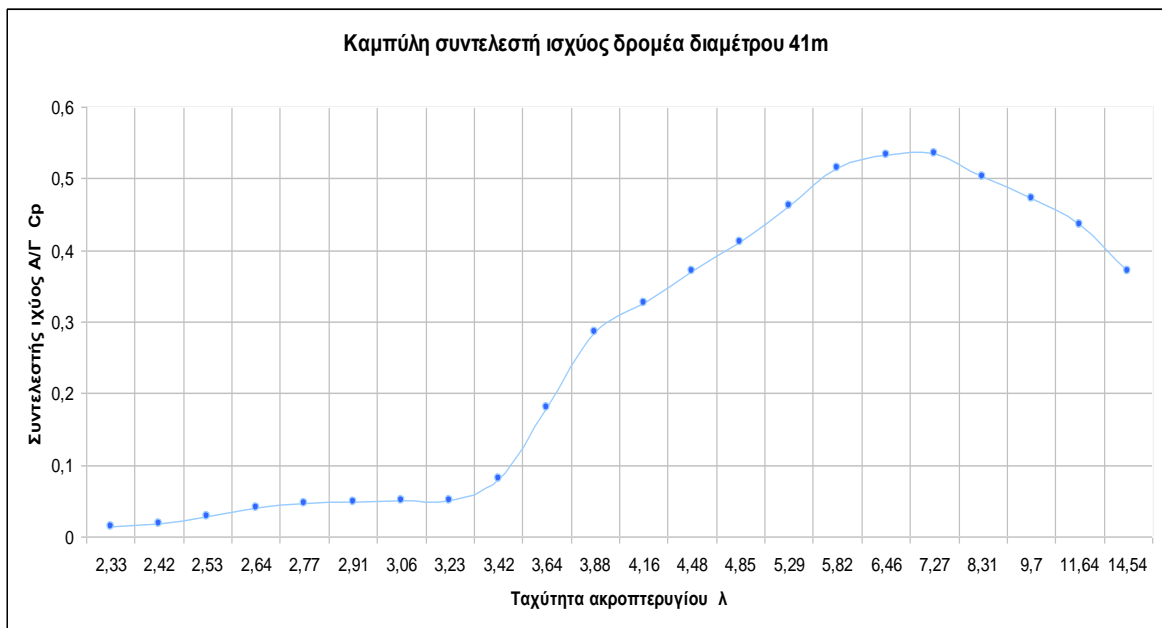
Στο αρχείο Th_M_P.dat εμφανίζονται για κάθε ακτινική θέση πάνω στο πτερύγιο:

- η ισχύς P
- η ροπή M
- η δύναμη αντίστασης T
- οι αντίστοιχοι συντελεστές ισχύος C_p , ροπής C_m , αντίστασης C_t
- ο συντελεστής αξονικής επαγωγής a
- η ταχύτητα ανέμου V_0
- η ακτινική θέση
- ο συντελεστής επαπτομενικής επαγωγής a'
- ο συντελεστής Prandtl

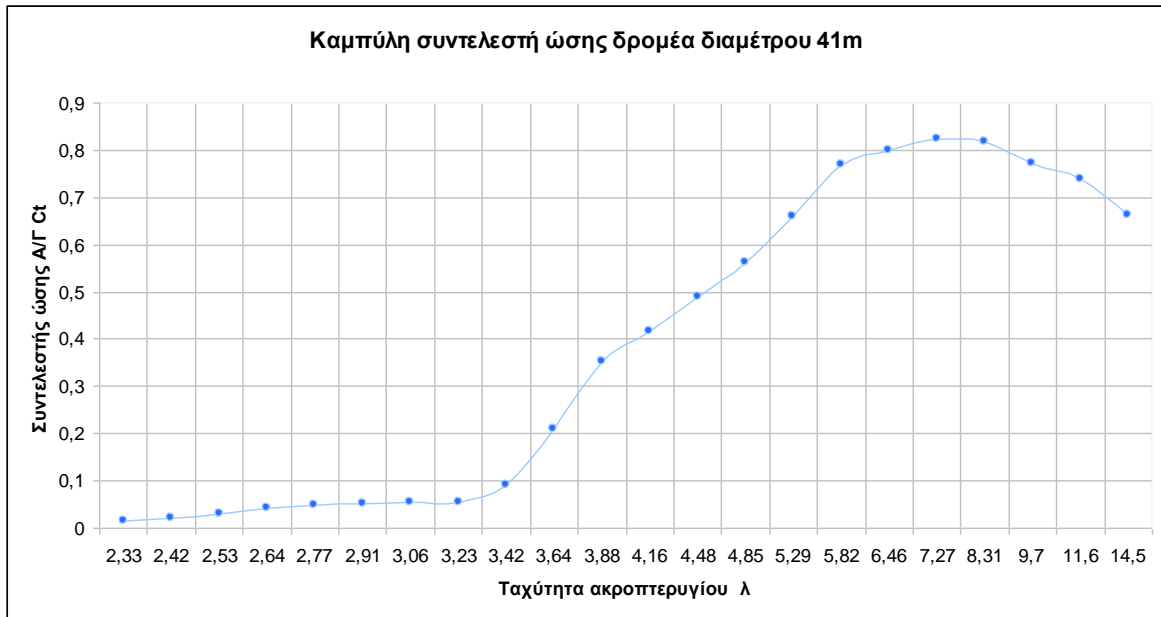
Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα ώστε να παρατηρηθεί αρχικά η συμπεριφορά του δρομέα αλλά και μία πρώτη εικόνα για την κατάσταση της ροής στο επίπεδο του δρομέα και πίσω από αυτό. Για τα παραπάνω δεδομένα εισόδου προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.



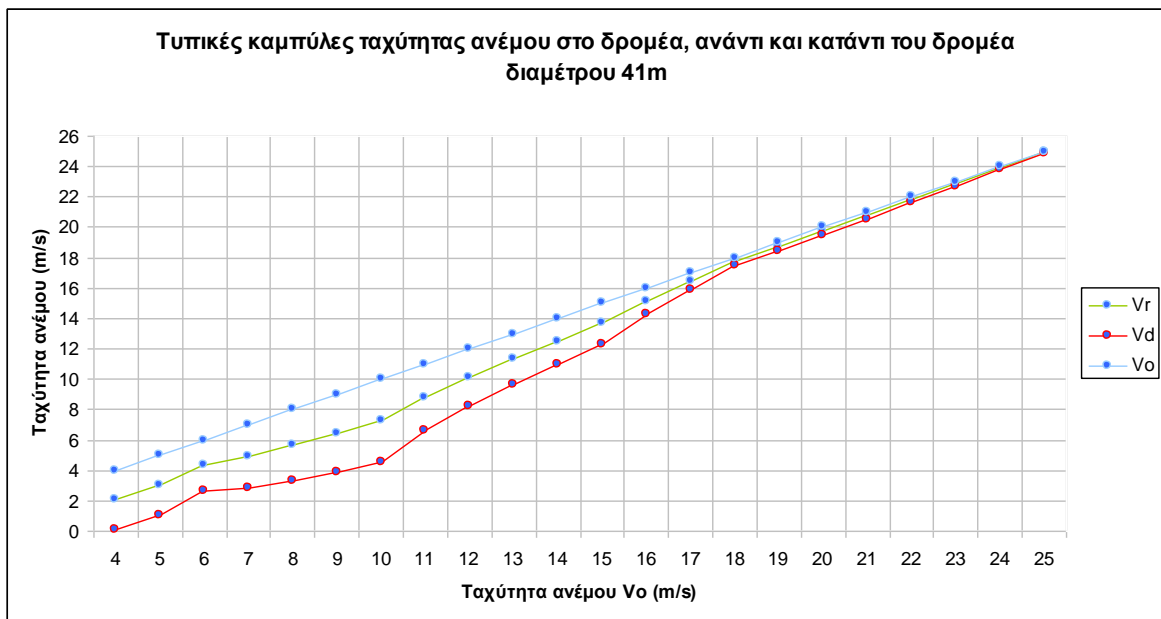
Σχήμα 5.20: Η καμπύλη ισχύος του δρομέα



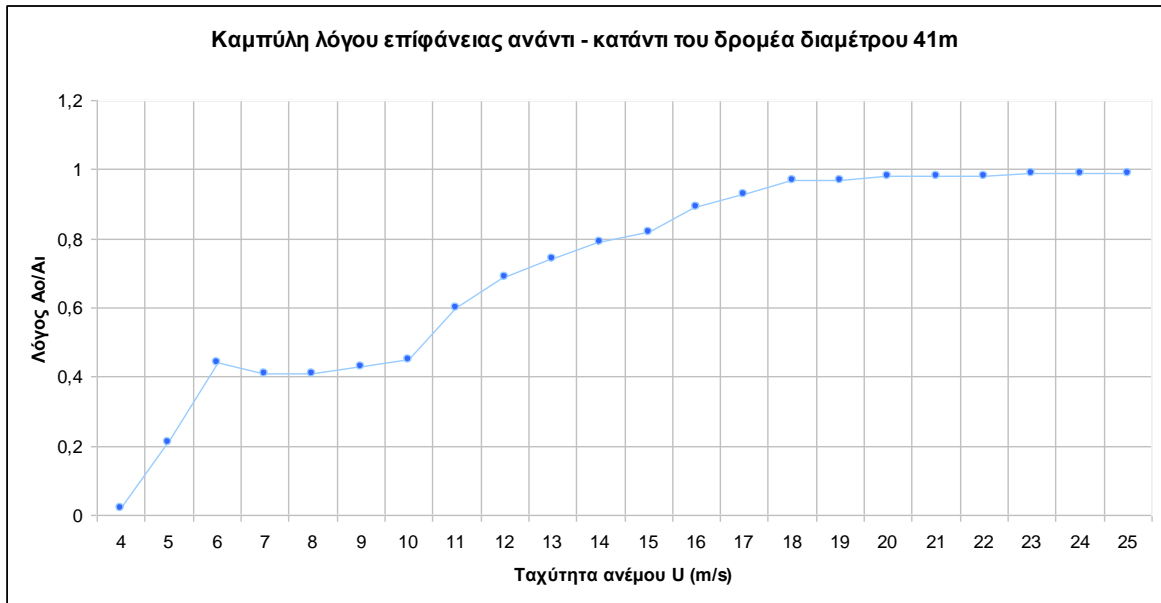
Σχήμα 5.21: Η καμπύλη συντελεστή ισχύος του δρομέα



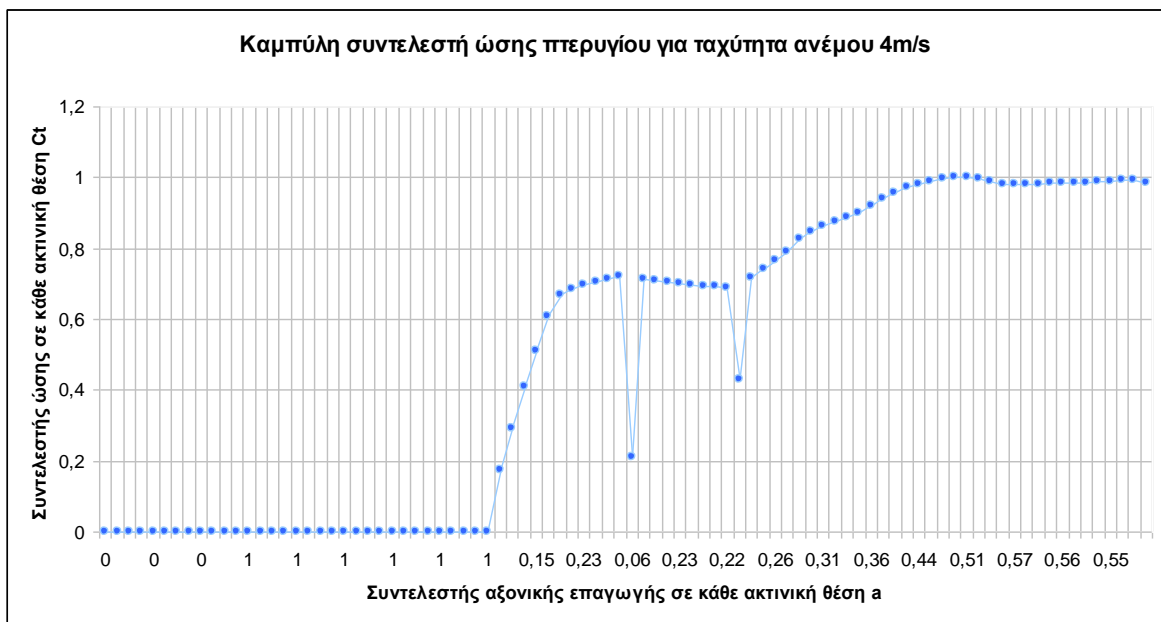
Σχήμα 5.22: Η καμπύλη συντελεστή ώσης του δρομέα



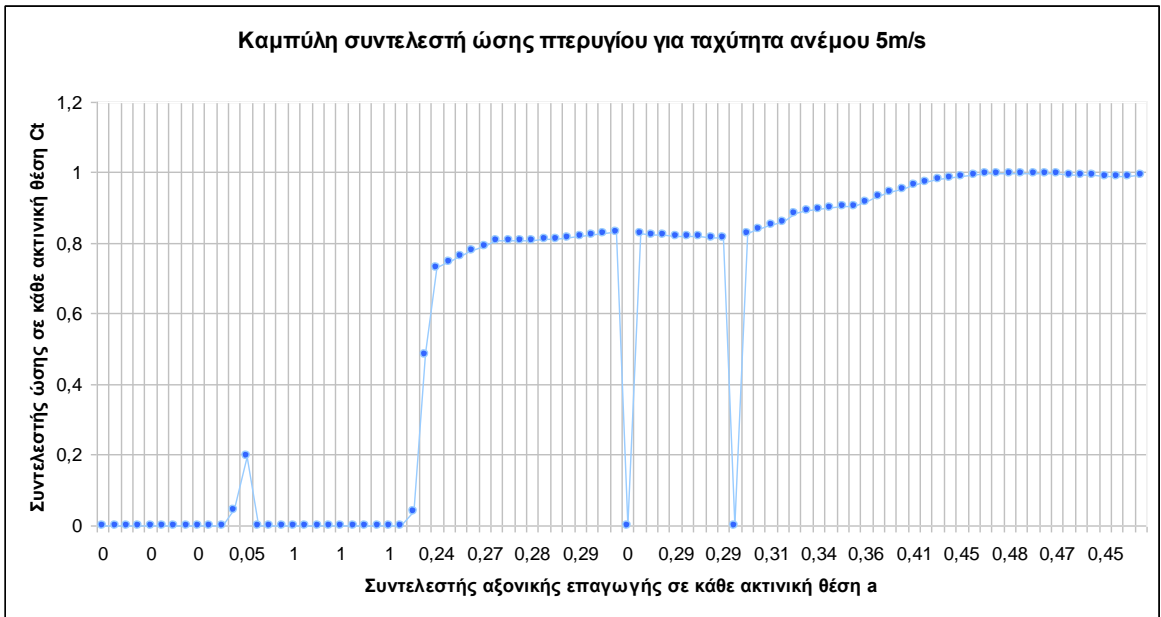
Σχήμα 5.23: Καμπύλες πτώσης της ταχύτητας στο δρομέα και κατάντι του δρομέα (Vo=ταχύτητα ανάντι, Vr=ταχύτητα στο δρομέα, Vd=ταχύτητα κατάντι)



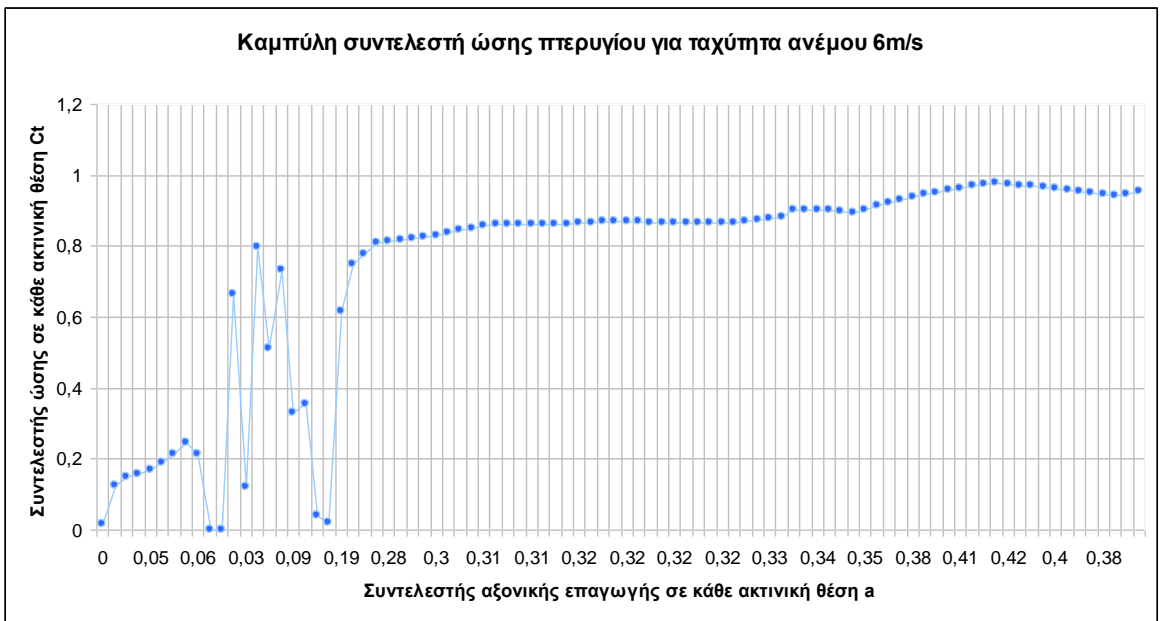
Σχήμα 5.24: Η καμπύλη του λόγου επιφάνειας ανάντι προς κατόντι του δρομέα



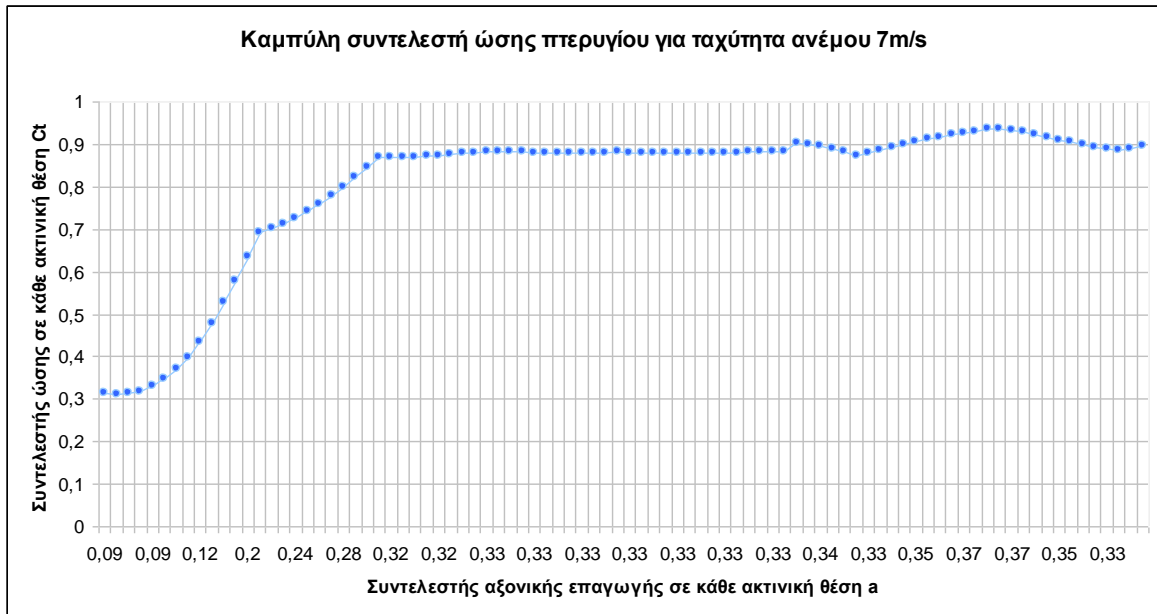
Σχήμα 5.25: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



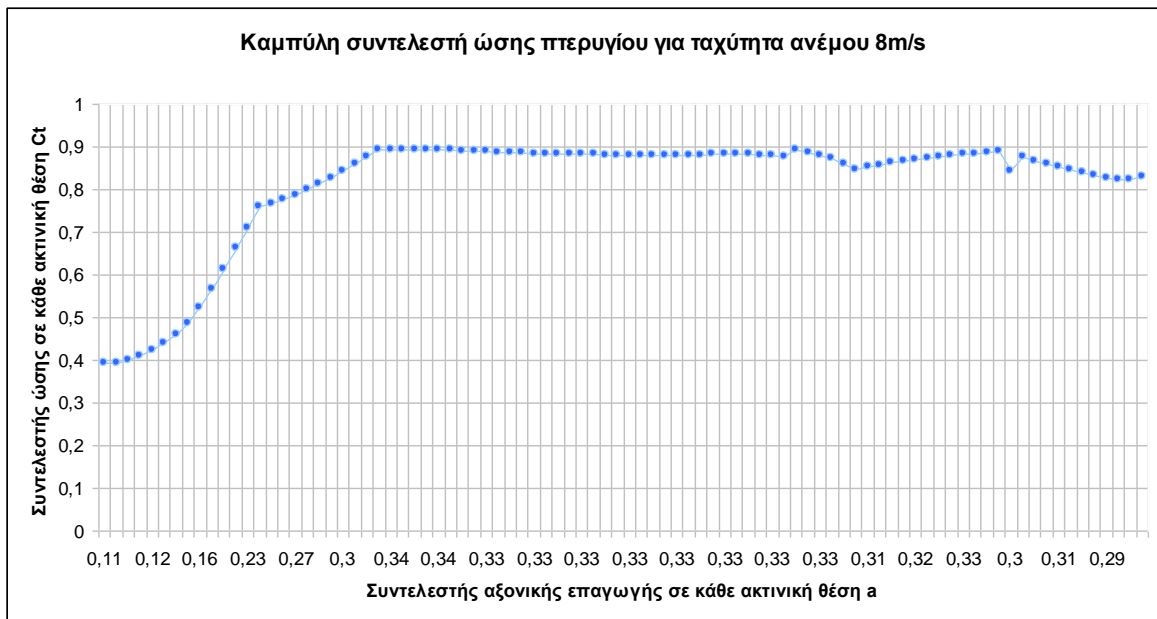
Σχήμα 5.26: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



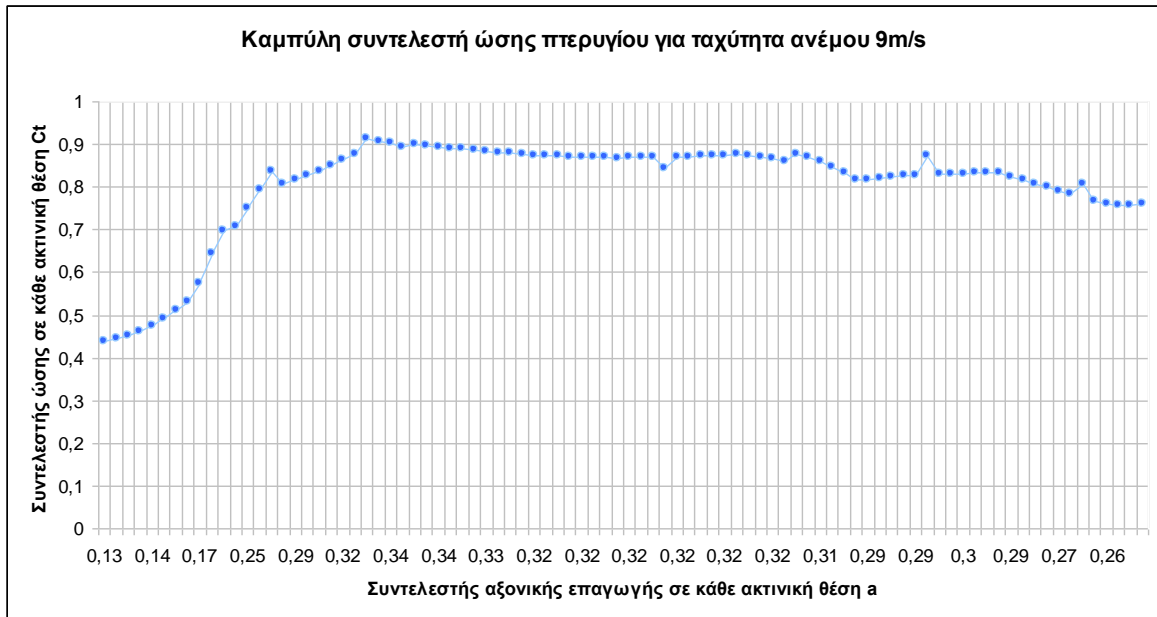
Σχήμα 5.27: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



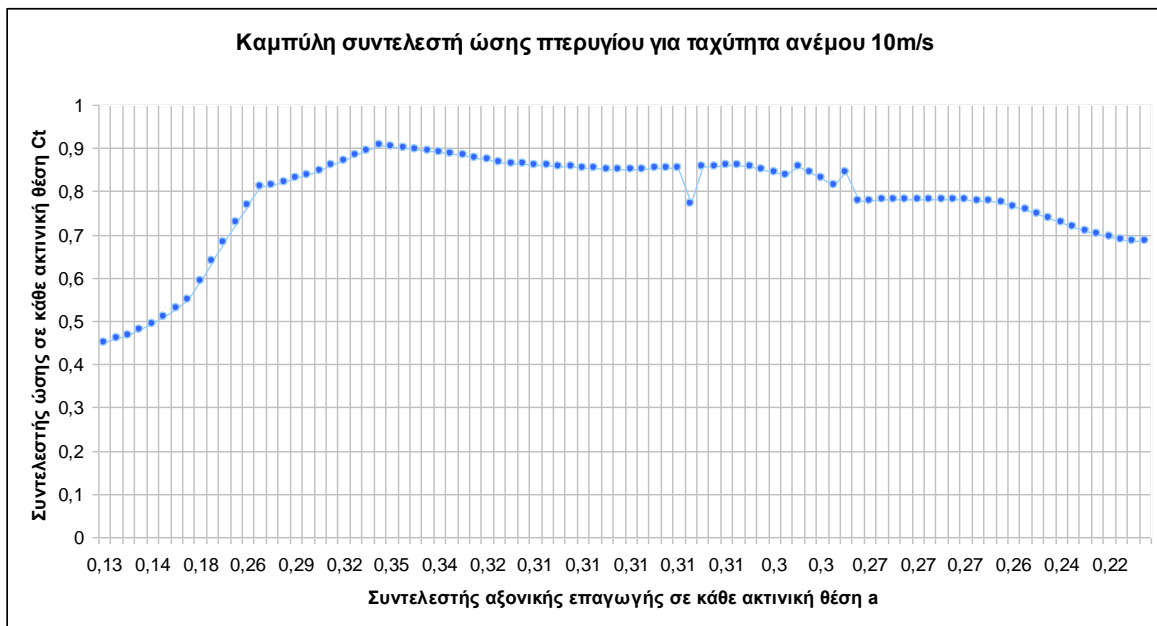
Σχήμα 5.28: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 5.29: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 5.30: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 5.31: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.20 ο δρομέας παρουσιάζει μέγιστη ισχύ $P=781\text{kW}$ σε ταχύτητα ανέμου $V_0=15\text{m/s}$ και στο σχήμα 5.21 μέγιστο συντελεστή ισχύος $C_p=0,536$ σε $V_0=8\text{m/s}$ ($\lambda=7,25$) δηλαδή κοντά στο σημείο που σχεδιάστηκε να είναι βέλτιστος στην τιμή 7.5m/s . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζει διαφορά στα χαρακτηριστικά με τον δρομέα που παρουσιάζεται στο 5.1.1 σενάριο 1 και με τον δρομέα NTK500/41 του βιβλίου. Η διαφορά στην παραγόμενη ισχύ φαίνεται στον πίνακα 5.5 και είναι εμφανής η

μεγάλη αύξηση της ισχύς στις χαμηλές ταχύτητες από 4m/s έως και 6m/s. Επίσης σημαντική είναι και η αύξηση στις μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Συγκρίνοντας την παραγόμενη ισχύ (πίνακας 5.5) του νέου δρομέα με την παραγόμενη ισχύ του δρομέα (σεναρίου 1) και με την παραγόμενη ισχύ του δρομέα της NTK500 [1] του βιβλίου παρατηρούμε σημαντική διαφορά σε όλες τις ταχύτητες ανέμου και συγκεκριμένα στη $V_0=7-8\text{m/s}$ δηλαδή στο σημείο βελτιστοποίησης παρατηρούμε 31-27% και 2,7-14% αύξηση ενώ στις ταχύτητες 4-6 συγκρίνοντας με τα αποτελεσμάτα του βιβλίου παρατηρούμαι μείωση της παραγόμενης ισχύος.

Πίνακας 5.5: Η ποσοστιαία αύξηση της ισχύος για ένα εύρος ταχυτήτων 4m/s έως 12m/s

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ισχύς NTK500 σενάριο 1(kw)	Ισχύς του νέου δρομέα (kw)	Ποσοστιαία διαφορά (%)	Ισχύς NTK500 [1](kw)	Ποσοστιαία διαφορά (%)
4	7,0	19,2	173,9	19,2	-0,2
5	23,8	44,0	84,5	47,5	-7,4
6	54,9	82,4	50,2	87,3	-5,6
7	105,8	139,5	31,9	135,8	2,7
8	173,8	221,8	27,6	194,5	14,0
9	271,0	314,2	15,9	265,1	18,5
10	367,5	416,5	13,3	323,3	28,8
11	428,7	497,8	16,1	387,3	28,5
12	500,2	575,3	15,0	446,9	28,7

Στο σχήμα 5.22 ο συντελεστής ώσης του δρομέα παρουσιάζει σταθερή τιμή ανάμεσα από 0,8 και 0,9 στις ταχύτητες ανέμου 7m/s έως και 8m/s και παρατηρούμαι την μεγαλύτερη τιμή 0,82 επειδή έχουμε αύξηση του τοπικού συντελεστή αντίστασης σε όλο το περύγιο. Στο σχήμα 5.23 εμφανίζεται η ταχύτητα ανέμου ανάντι, πάνω και κατάντι του δρομέα. Η μείωση της ταχύτητας ανέμου σε V_r και V_d είναι μικρότερη σε όλες τις ταχύτητες ανέμου από ότι στο σχήμα 5.8. Η μικρή μείωση της V_r σε συνδυασμό με την μικρή τιμή του λόγου επιφάνειας ανάντι προς κατάντι όπως φαίνεται στο σχήμα 5.24 για τις ίδιες ταχύτητες ανέμου προκαλεί μείωση της ανάπτυξης τυρβώδους ροής στον ομόρρου και παράλληλα ικανοποιητικές ταχύτητες πίσω από τον δρομέα.

Στα σχήματα 5.25 έως 5.31 παρουσιάζεται ο συντελεστής αντίστασης C_t σε κάθε ακτινική θέση. Για ταχύτητες ανέμου 4m/s, 5m/s, 6m/s η διανομή του C_t είναι ανομοιόμορφη σε αρκετά σημεία αλλά παραμένει ομοιόμορφη διανομή στα σημεία που μετέχουν πιο πολύ στην παραγωγή ισχύος και βρίσκονται σε αρκετή απόσταση από την βάση. Στην τιμή 7m/s και σε 8m/s είναι ομοιόμορφη στα περισσότερα σημεία ελέγχου πάνω στο πτερύγιο, πράγμα που δηλώνει την καλή λειτουργία από την πλευρά της κατανομής δυνάμεων πάνω στο πτερύγιο δηλαδή στο σημείο σχεδίασης. Σε όλες τις ταχύτητες ανέμου ο συντελεστή αντίστασης C_t στα περισσότερα σημεία έχει μειωθεί από την τιμή 1,00 που παρουσίαζε το αρχικό πτερύγιο στην τιμή 0,88. Η σημαντική αύξηση του συντελεστή ισχύος στις υψηλές ταχύτητες σε συνδυασμό με την μείωση, του συντελεστή αντίστασης σε κάθε ακτινική θέση πάνω στο πτερύγιο αλλά και η βελτίωση των άλλων χαρακτηριστικών, παρουσιάζουν ένα πτερύγιο αρκετά βελτιωμένο. Από τα παραπάνω κρίνεται ότι ο νέος δρομέας έχει βελτιωθεί αρκετά σε όλα τα χαρακτηριστικά του σε σχέση με το αρχικό δρομέα σε $V_0=7-8\text{m/s}$.

5.1.3 Σενάριο 3: Υπολογισμός των χαρακτηριστικών του δρομέα για πτερύγιο που δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα βελτιστοποίησης για ταχύτητα ανέμου 6.5 , 7.5 και 8.5 m/s

Για την δημιουργία του πτερυγίου το πρόγραμμα βελτιστοποίησης χρησιμοποίησε τα ίδια αρχεία με την γεωμετρία των αεροτομών από τον ίδιο φάκελο στη θέση `c:\BEM\INPUT\ARF\`.

Στη δημιουργία του πτερυγίου επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές στην είσοδο του προγράμματος για τον υπολογισμό των σχεδιαστικών παραμέτρων του πτερυγίου:

- Λειτουργία σταθερών στροφών (Operation =1)
- Ταχύτητα περιστροφής $W=27,1\text{rpm}$
- Ολική ακτίνα δρομέα $R_t=20,5\text{ m}$
- Αριθμός σημείων ταχυτήτων ανέμου Points=3
- Ποσοστό συμμετοχής της κάθε ταχύτητας ανέμου: $V_1=0.33$, $V_2=0.34$, $V_3=0.33$
- Επιλογή ταχυτήτων ανέμου: $V_1=6.5\text{ m/s}$, $V_2=7.5\text{ m/s}$, $V_3=8.5\text{ m/s}$
- Αριθμός πτερυγίων Blades=3

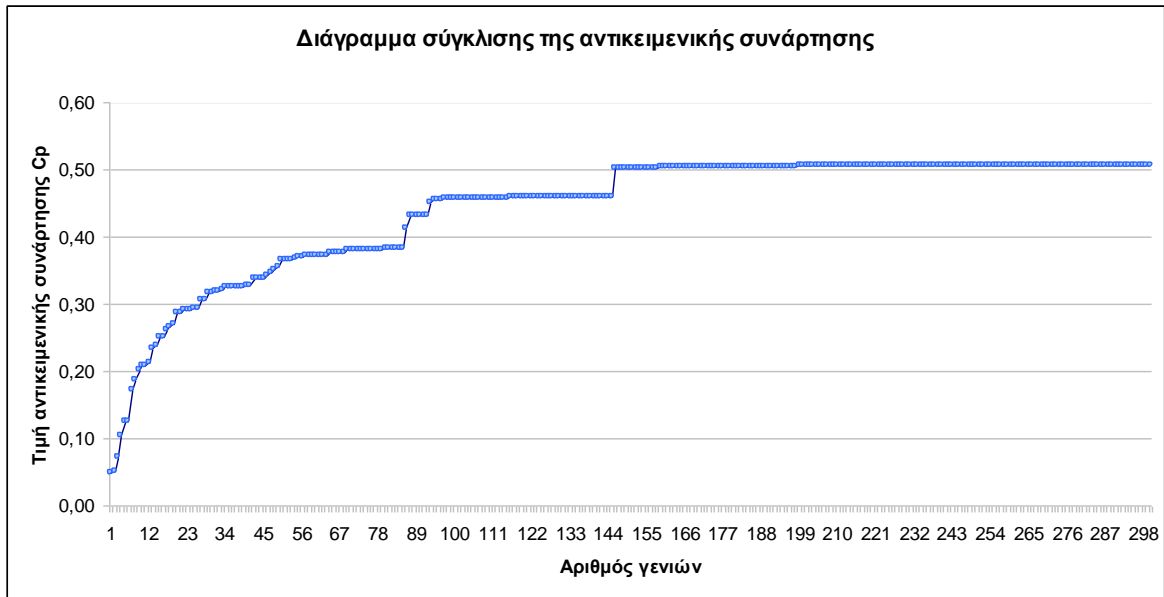
- Λόγος πλευράς $AR=19$
- Επιλογή τρισδιάστατης διόρθωσης του συντελεστή άνωσης ($Correction=0$)

Τα αρχεία εξόδου είναι τα αρχεία blade.dat, optimum blade.dat και LINEAR INTERPOLATION BLADE.dat στη θέση c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM GENETIC ALGORITHM\, το αρχείο generation.dat στη θέση c:\BEM\OUTPUT\GENERATION\ και τα αρχεία INPUT_PIK.dat και στη θέση c:\BEM\INPUT\INPUT PIKAI\ . Τα αρχεία blade.dat, linear interpolation blade.dat και generation.dat ανανεώνονται παράλληλα με την εκτέλεση του προγράμματος βελτιστοποίησης με σκοπό να δείχνουν την μεταβολή των τιμών. Το αρχείο generation.dat δείχνει την πορεία της σύγκλισης της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή του συντελεστή ισχύος του δρομέα στην επιθυμητή τιμή 0.59259. Η γεωμετρία του πτερυγίου δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα βελτιστοποίησης και παρουσιάζεται στα σχήματα 5.33, 5.34 και στον πίνακα 5.6.

Στο σχήμα 5.32 παρουσιάζεται το διάγραμμα σύγκλισης της εκτέλεσης. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο αριθμός των γενιών. Στον κατακόρυφο φαίνεται με θετικό πρόσημο η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Στη πραγματικότητα η βέλτιστη αεροτομή που θα προκύψει, θα έχει συντελεστή ισχύος που θα πλησιάζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης $C_p=0,59259$.

Η μορφή του σχήματος με κάποια ευδιάκριτα πλατό λύσεων είναι χαρακτηριστική. Στο πρώτο πλατό, όπου η αντικειμενική συνάρτηση διατηρεί τη τιμή 0,381519 για 7 συνεχόμενες γενιές όπου και επέρχεται η διαδικασία της μετάλλαξης. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι μικρή και κυμαίνεται από 0,5% έως 7% αλλά ο πληθυσμός μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικά μεγάλος ώστε κάποια άτομα να υποστούν μετάλλαξη. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται και στα επόμενα πλατό. Αποτέλεσμα αυτής της αναπροσαρμογής είναι η χαρακτηριστική μορφή του διαγράμματος με τα διακριτά πλατό τιμών.

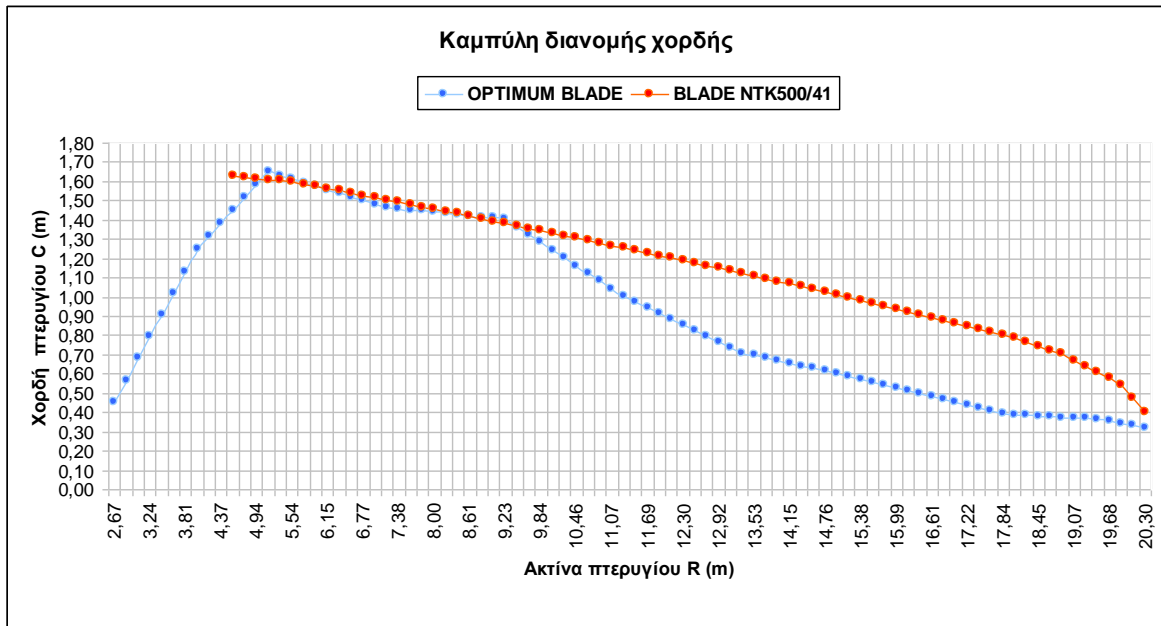
Η σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης, παρουσιάζει σημαντική αλλαγή ακόμη και στις 146 γενιές, που είναι το σημείο όπου η CP_GEN λαμβάνει την τιμή 0,501653 και μεταβάλλεται ελάχιστα μέχρι τις 300 γενιές λαμβάνοντας την τιμή 0,506042 φτάνοντας στο ποσοστό 0,8539 του ορίου του betz .



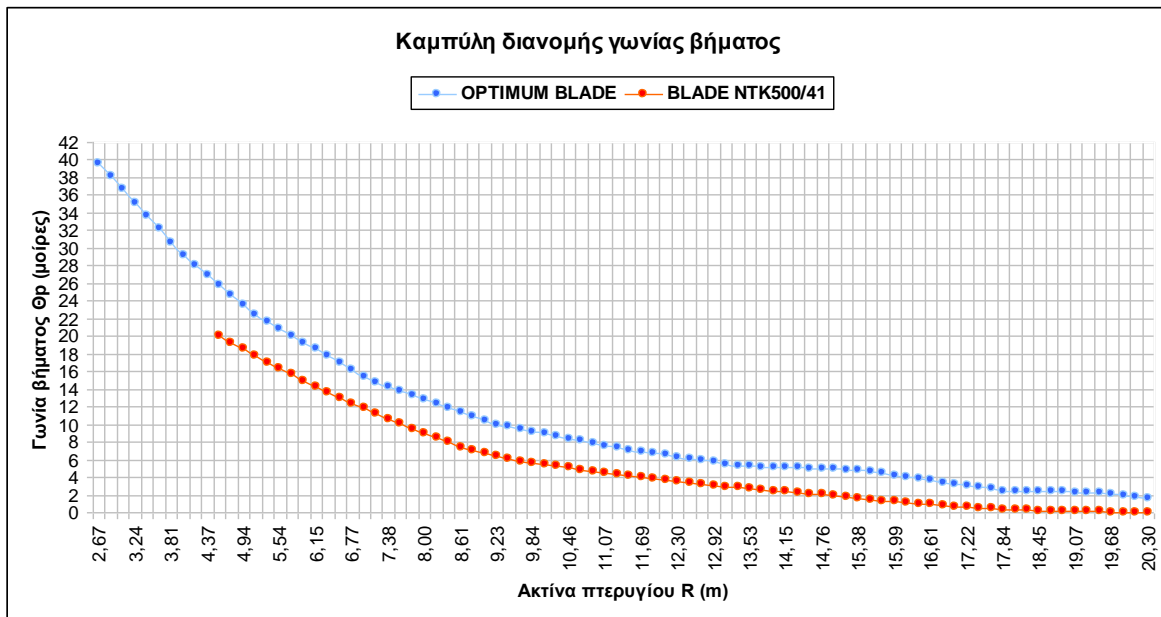
Σχήμα 5.32 : Διάγραμμα σύγκλισης της αντικειμενικής συνάρτησης Cp

Πίνακας 5.6 : Η γεωμετρία του περυγίου

Ακτίνα (m)	Χορδή (m)	Γωνία Βήματος (μοίρες)
2,665	0,455	39,669
3,997	1,247	29,184
5,125	1,648	22,379
7,175	1,465	14,681
9,225	1,404	9,997
11,275	1,004	7,318
13,325	0,709	5,295
15,375	0,576	4,824
17,835	0,391	2,448
19,475	0,365	2,272
20,3	0,32	1,605



Σχήμα 5.33: Η διανομή της χορδής του βελτιστοποιημένου πτερυγίου και του πτερυγίου της NTK500/41



Σχήμα 5.34: Η διανομή της γωνίας βήματος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου και του πτερυγίου της NTK500/41

Στον πίνακα 5.6 και στα σχήματα 5.33 και 5.34 παρουσιάζεται η νέα γεωμετρία του πτερυγίου, η οποία παρουσιάζει διαφορές με το αρχικό πτερύγιο. Το αρχικό πτερύγιο στο σημείο 4,5m παρουσιάζει το μέγιστο μήκος χορδής $c=1,63\text{m}$ και γωνία βήματος $\theta=20,0$ μοίρες ενώ το νέο πτερύγιο στο σημείο 5,12m παρουσιάζει μήκος $c=1,648\text{m}$ και $\theta=22,37$

μοίρες. Η μέγιστη χορδή στο νέο πτερύγιο εμφανίζεται στο σημείο 5,12m και είναι $c=1,648m$, ενώ στα προηγούμενα σημεία με κατεύθυνση προς τη βάση η χορδή μειώνεται γραμμικά. Η διαφορά στη γωνία βήματος και στο μήκος χορδής οφείλεται στο ότι το αρχικό πτερύγιο έχει σχεδιαστεί για βέλτιστη λειτουργία σε ταχύτητα ανέμου $6m/s$ δηλαδή $\lambda=9,7$ με χρήση και των άλλων αεροτομών στα υπόλοιπα σημεία του πτερυγίου, ενώ το νέο σε $V_0=6.5m/s, 7.5m/s$ και $8,5m/s$ δηλαδή από $\lambda=9$ έως $\lambda=6,82$ μόνο με χρήση της αεροτομής naca 63415. Για το λόγο αυτό παρατηρούμε ότι το νέο πτερύγιο είναι πιο λεπτό στο μεγαλύτερο μέρος του και η γωνία βήματος πιο μεγάλη κατά δύο έως τρεις μοίρες περίπου. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου και για σημεία πιο κοντά στη βάση απαιτούνται μεγαλύτερες γωνίες βήματος ώστε η γωνία πρόσπτωσης να βρίσκεται σε ιδανικές τιμές, οι οποίες είναι διαφορετικές για κάθε αεροτομή και αυτό επηρεάζει σημαντικά την γεωμετρία του πτερυγίου. Αυτό οφείλεται στο ότι τα σημεία κοντά στη βάση συμμετέχουν λιγότερο στην παραγωγή ισχύος και ο γενετικός αλγόριθμος το αντιλαμβάνεται με την αλλαγή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Καθοριστικό είναι και το ποσοστό συμμετοχής της κάθε ταχύτητας γιαυτό και το νέο πτερύγιο δεν διαφέρει πολύ από το πτερύγιο στο σενάριο 2, από το 40% έως και την άκρη του πτερυγίου τόσο στην χορδή όσο και στην γωνία βήματος. Αντίθετα από τη βάση έως το 40% παρατηρείται διαφορά και στη χορδή και στη γωνία βήματος αφού στα σημεία κοντά στη βάση υπερσχύει η μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου.

Το αρχείο όνομα.dat της γεωμετρίας του πτερυγίου τοποθετείται στον φάκελο BLADE. Τα δεδομένα εξόδου του προγράμματος εξάγονται στη θέση `c:\BEM\OUTPUTWIND TURBINE CHARACTERISTICS\` σε αρχεία της μορφής dat. Στο αρχείο `P_T_M_Vo.dat` εμφανίζονται για κάθε ταχύτητα ανέμου:

Τα δεδομένα εξόδου του προγράμματος εξάγονται στη θέση `c:\BEM\OUTPUTWIND TURBINE CHARACTERISTICS\` σε αρχεία της μορφής dat. Στο αρχείο `P_T_M_Vo.dat` εμφανίζονται για κάθε ταχύτητα ανέμου:

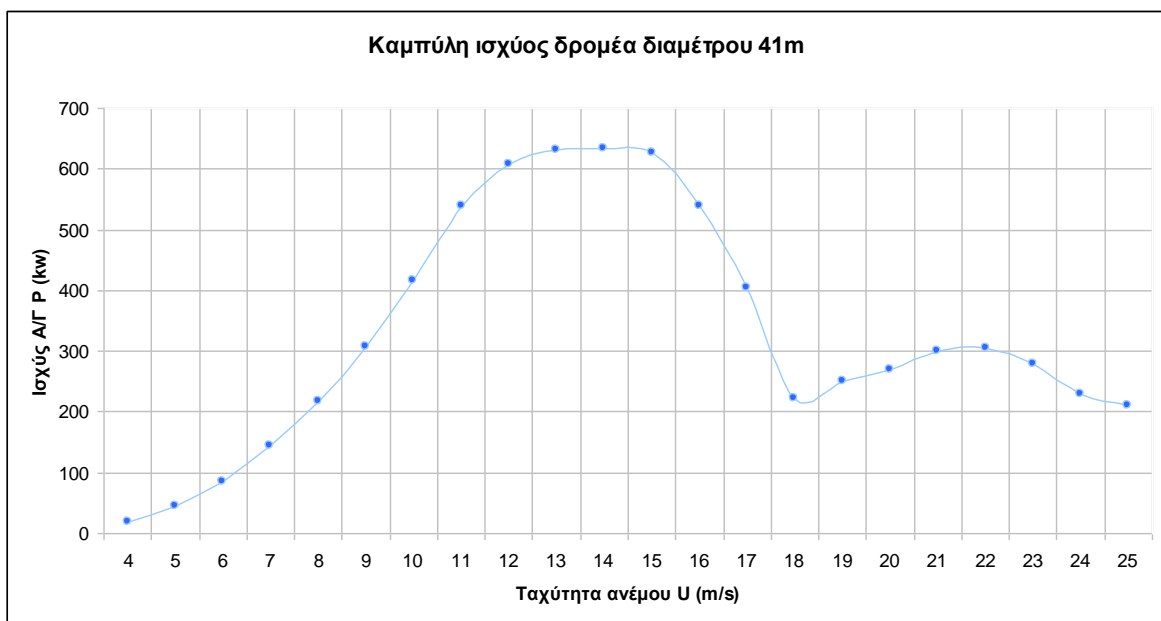
- η ισχύς P
- η ροπή M
- η δύναμη αντίστασης T
- οι αντίστοιχοι συντελεστές ισχύος C_p , ροπής C_m , αντίστασης C_t
- η μείωση της ταχύτητας επάνω στο δρομέα V_r
- η μείωση της ταχύτητας κατάντι του δρομέα V_d
- η ταχύτητα ακροπτερυγίου λ

- η ταχύτητα ανέμου V_0
- ο λόγος επιφάνειας ανάντι και κατάντι του δρομέα A_0/A_I

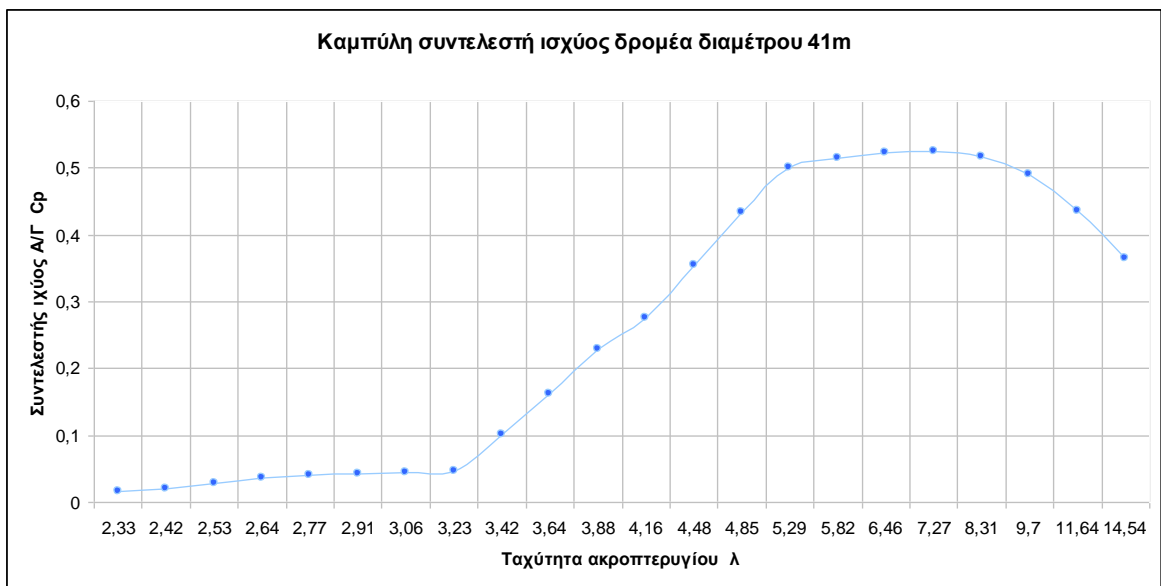
Στο αρχείο Th_M_P.dat εμφανίζονται για κάθε ακτινική θέση πάνω στο πτερύγιο:

- η ισχύς P
- η ροπή M
- η δύναμη αντίστασης T
- οι αντίστοιχοι συντελεστές ισχύος C_p , ροπής C_m , αντίστασης C_t
- ο συντελεστής αξονικής επαγωγής a
- η ταχύτητα ανέμου V_0
- η ακτινική θέση
- ο συντελεστής εφαιπτομενικής επαγωγής a'
- ο συντελεστής Prandtl

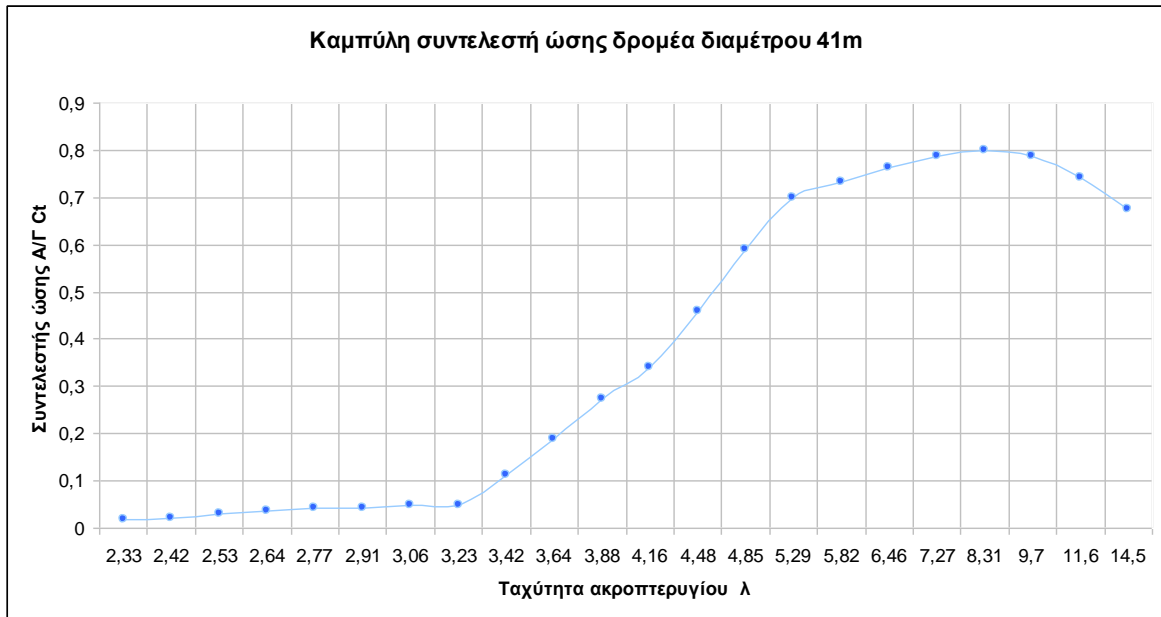
Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα ώστε να παρατηρηθεί αρχικά η συμπεριφορά του δρομέα αλλά και μία πρώτη εικόνα για την κατάσταση της ροής στο επίπεδο του δρομέα και πίσω από αυτό. Για τα παραπάνω δεδομένα εισόδου προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.



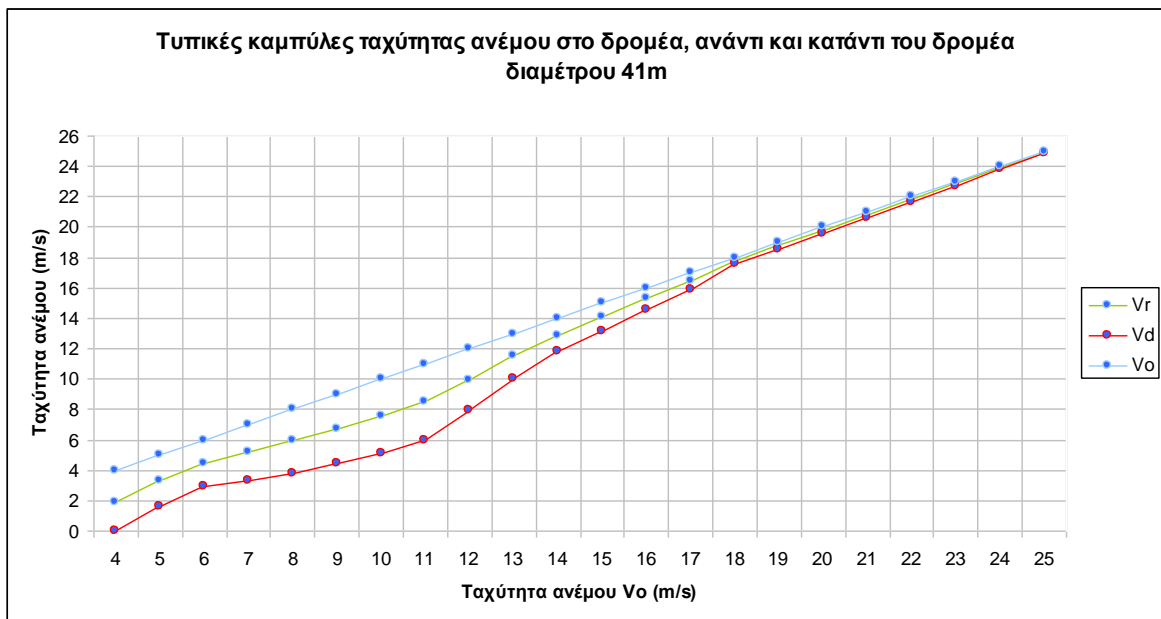
Σχήμα 5.35: Η καμπύλη ισχύος του δρομέα



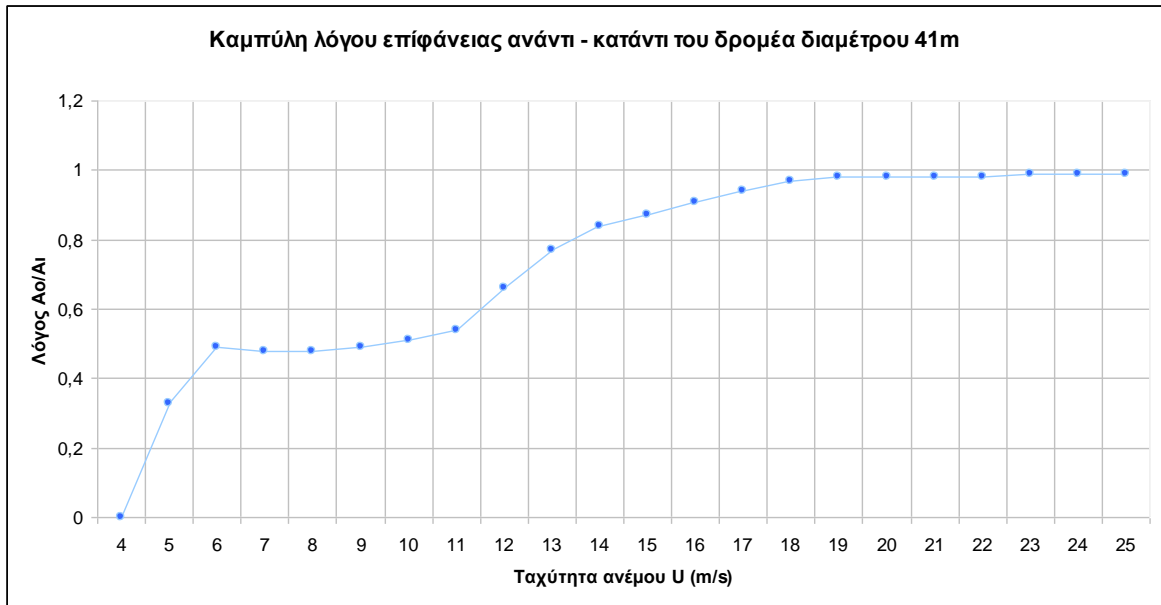
Σχήμα 5.36: Η καμπύλη συντελεστή ισχύος του δρομέα



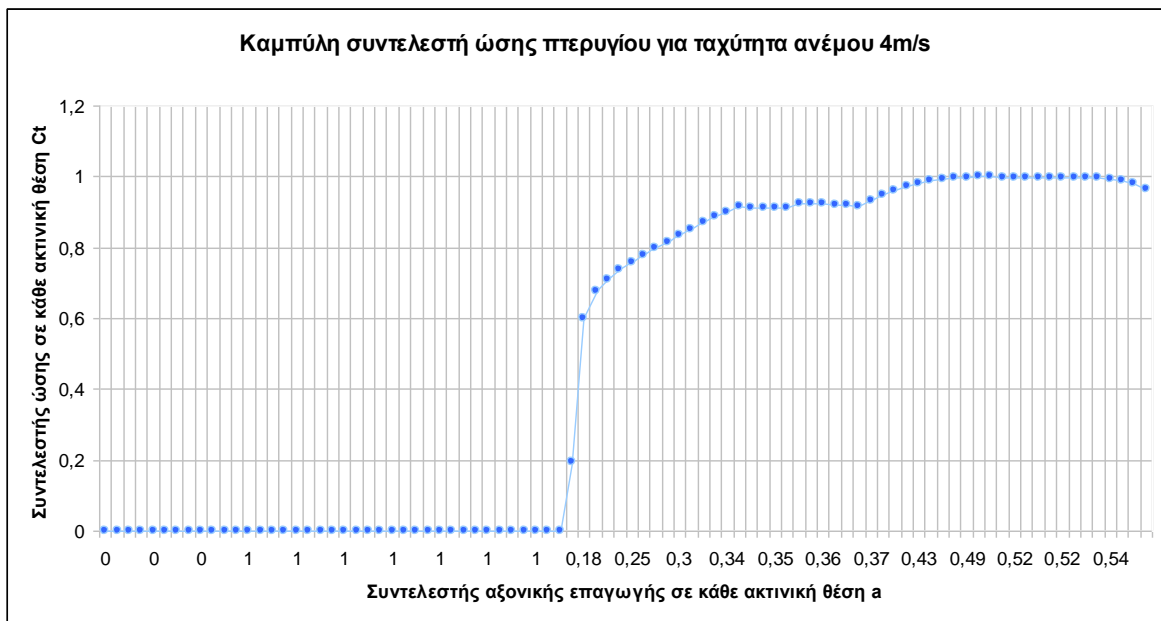
Σχήμα 5.37: Η καμπύλη συντελεστή ώσης του δρομέα



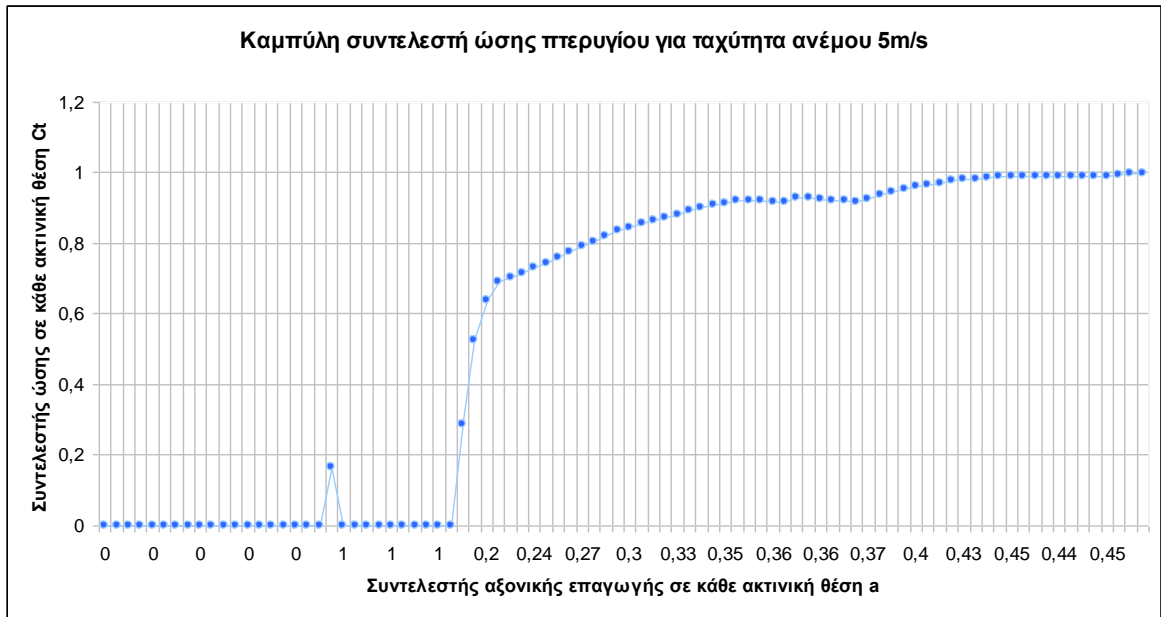
Σχήμα 5.38: Καμπύλες πτώσης της ταχύτητας στο δρομέα και κατάντι του δρομέα (Vo=ταχύτητα ανάντι, Vr=ταχύτητα στο δρομέα, Vd=ταχύτητα κατάντι)



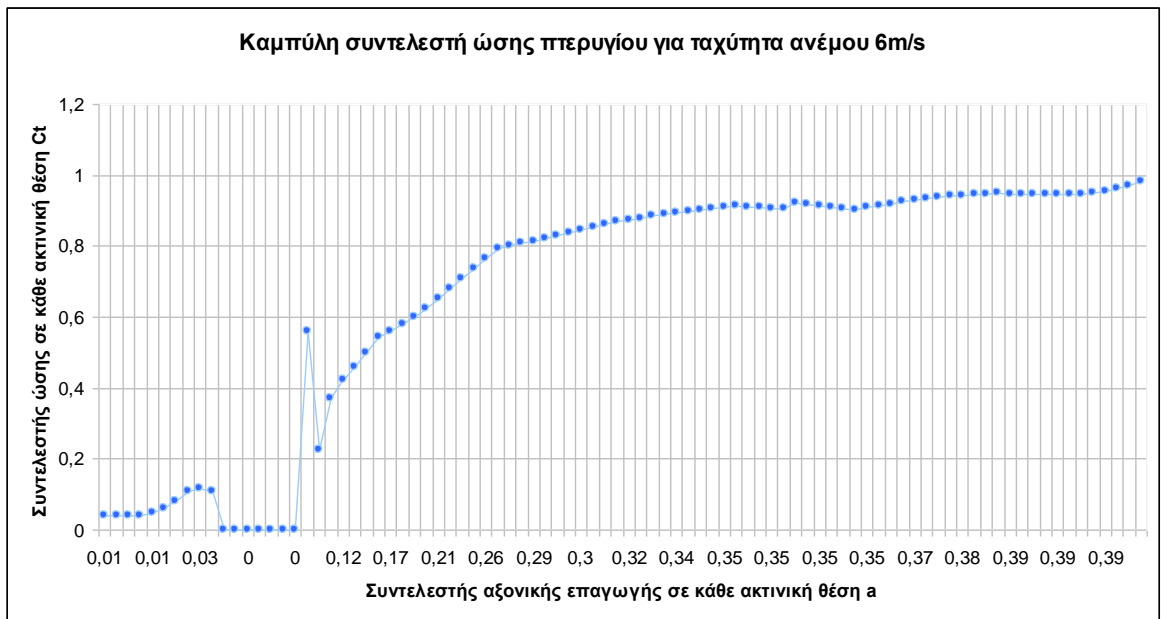
Σχήμα 5.39: Η καμπύλη του λόγου επιφάνειας ανάντι προς κατάντι του δρομέα



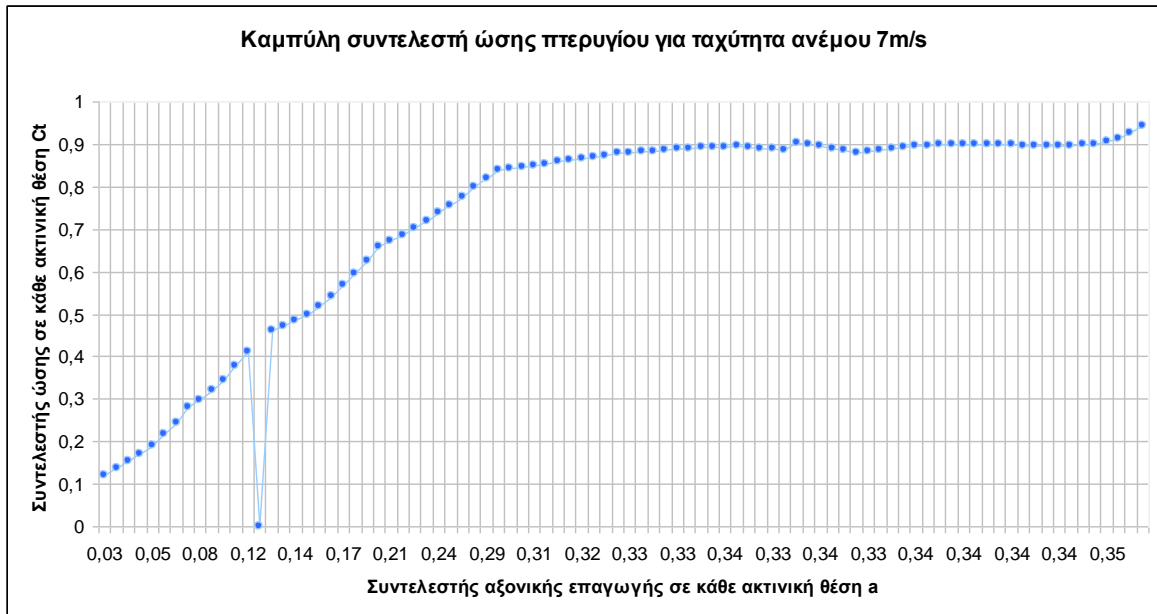
Σχήμα 5.40: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



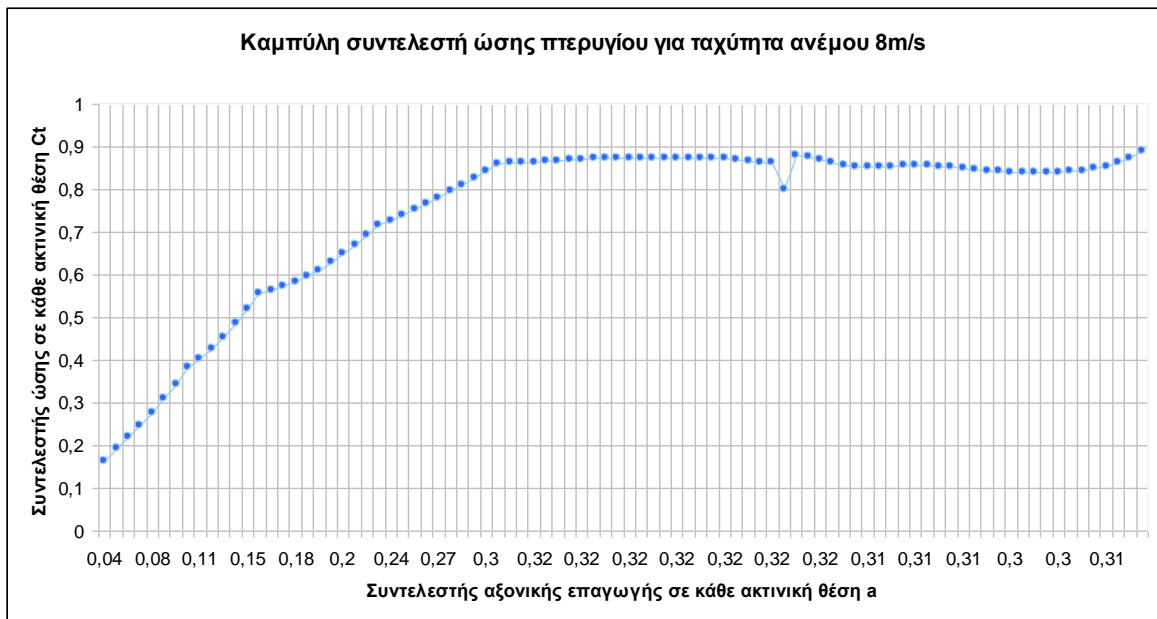
Σχήμα 5.41: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



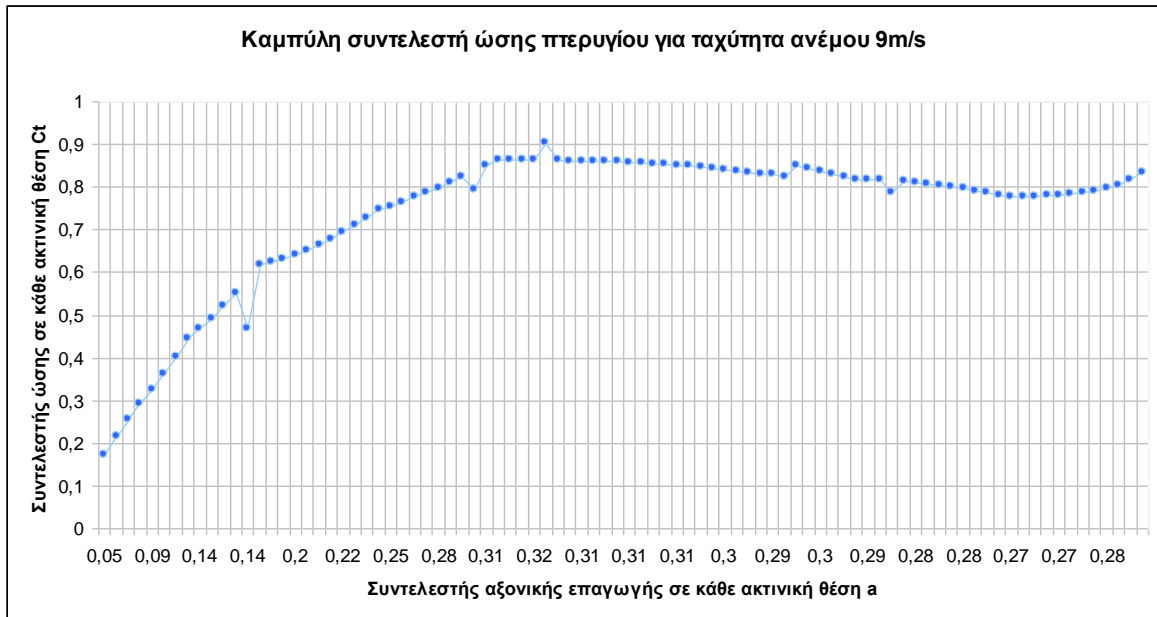
Σχήμα 5.42: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



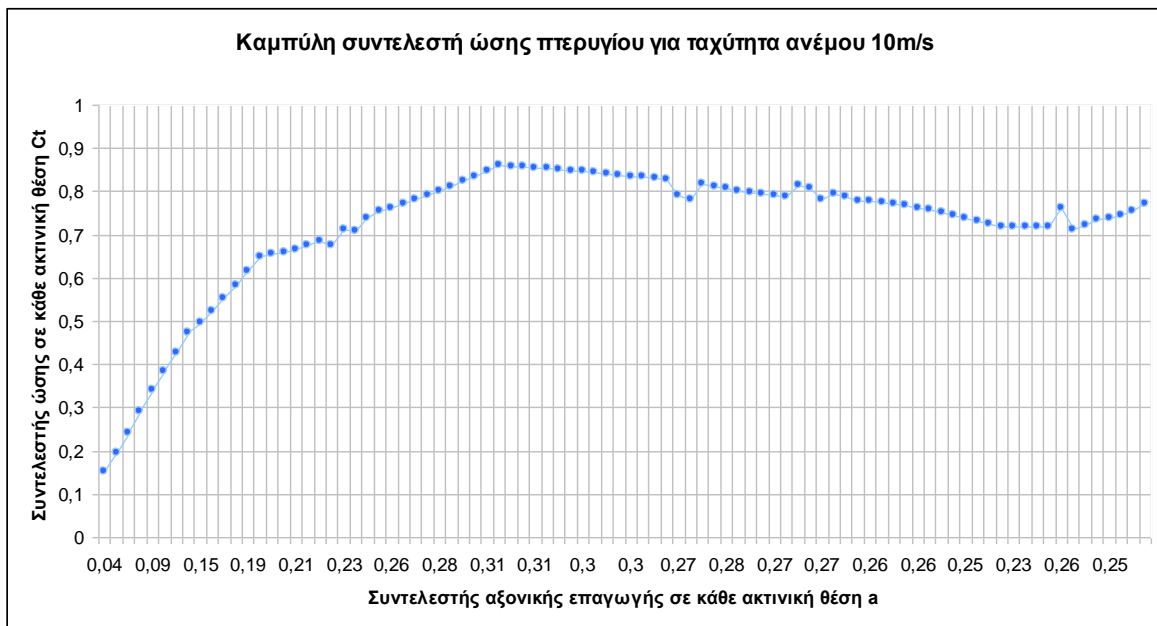
Σχήμα 5.43: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 5.44: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 5.45: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 5.46: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.35 ο δρομέας παρουσιάζει ένα επίπεδο μεγάλων τιμών ισχύος $P \sim 633 \text{kw}$ σε ταχύτητες ανέμου $V_0 = 13-15 \text{m/s}$ και στο σχήμα 5.36 μέγιστο συντελεστή ισχύος $C_p = 0,524$ σε $V_0 = 7 \text{m/s}$ ($\lambda = 8,28$) και πάλι ένα επίπεδο μεγάλων τιμών συντελεστών ισχύος από 6m/s -έως 11m/s δηλαδή κοντά στα σημεία που σχεδιάστηκε να είναι βέλτιστος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζει διαφορά στα χαρακτηριστικά με τον δρομέα που παρουσιάζεται στο 5.1.1 σενάριο 1 και με τον δρομέα NTK500/41 του βιβλίου. Η διαφορά στην παραγόμενη ισχύ φαίνεται στον πίνακα 5.7 και είναι εμφανής η

μεγάλη αύξηση της ισχύς στις χαμηλές ταχύτητες από 4m/s έως και 6m/s. Επίσης σημαντική είναι και η αύξηση στις μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Συγκρίνοντας την παραγόμενη ισχύ (πίνακας 5.7) του νέου δρομέα με την παραγόμενη ισχύ του δρομέα (σεναρίου 1) και με την παραγόμενη ισχύ του δρομέα της NTK500 [1] του βιβλίου παρατηρούμε σημαντική διαφορά σε όλες τις ταχύτητες ανέμου και συγκεκριμένα στη $V_0=7-9\text{m/s}$ δηλαδή στα σημεία βελτιστοποίησης παρατηρούμε 35,4-13% και 5,5-16% αύξηση ενώ στις ταχύτητες 4-6 συγκρίνοντας με τα αποτελεσματα του βιβλίου παρατηρούμαι μείωση της παραγόμενης ισχύος.

Πίνακας 5.7 : Η ποσοστιαία αύξηση της ισχύος για ένα εύρος ταχυτήτων 4m/s έως 12m/s

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ισχύς NTK500 σενάριο 1(kw)	Ισχύς του νέου δρομέα (kw)	Ποσοστιαία διαφορά (%)	Ισχύς NTK500 [1](kw)	Ποσοστιαία διαφορά (%)
4	7,0	18,9	170,3	19,2	-1,5
5	23,8	44,0	84,5	47,5	-7,4
6	54,9	85,8	56,2	87,3	-1,7
7	105,8	143,2	35,4	135,8	5,5
8	173,8	217,1	24,9	194,5	11,6
9	271,0	307,7	13,6	265,1	16,1
10	367,5	415,4	13,0	323,3	28,5
11	428,7	538,9	25,7	387,3	39,1
12	500,2	606,9	21,3	446,9	35,8

Στο σχήμα 5.37 ο συντελεστής ώσης του δρομέα παρουσιάζει σταθερή τιμή ανάμεσα από 0,77 και 0,78 στις ταχύτητες ανέμου 6m/s έως και 8m/s. Στο σχήμα 5.38 εμφανίζεται η ταχύτητα ανέμου ανάντι, πάνω και κατάντι του δρομέα. Η μείωση της ταχύτητας ανέμου σε V_r και V_d είναι μικρότερη σε όλες τις ταχύτητες ανέμου από ότι στο σχήμα 5.6. Η μικρή μείωση της V_r σε συνδυασμό με την μικρή τιμή του λόγου επιφάνειας ανάντι προς κατάντι όπως φαίνεται στο σχήμα 5.39 για τις ίδιες ταχύτητες ανέμου προκαλεί μείωση της ανάπτυξης τυρβώδους ροής στον ομόρρου και παράλληλα ικανοποιητικές ταχύτητες πίσω από τον δρομέα.

Στα σχήματα 5.40 έως 5.46 παρουσιάζεται ο συντελεστής αντίστασης C_t σε κάθε ακτινική θέση. Για ταχύτητες ανέμου 4m/s, 5m/s, 6m/s η διανομή του C_t είναι ανομοιόμορφη σε αρκετά σημεία, καλύτερη όμως από το σενάριο 2. Αλλά παραμένει ομοιόμορφη η διανομή στα σημεία που μετέχουν πιο πολύ στην παραγωγή ισχύος και βρίσκονται σε αρκετή απόσταση από την βάση. Στην τιμή 7m/s,8m/s και σε 9m/s είναι ομοιόμορφη στα περισσότερα σημεία ελέγχου πάνω στο πτερύγιο, πράγμα που δηλώνει την καλή λειτουργία από την πλευρά της κατανομής δυνάμεων πάνω στο πτερύγιο δηλαδή στο σημείο σχεδίασης. Σε όλες τις ταχύτητες ανέμου ο συντελεστή αντίστασης C_t στα περισσότερα σημεία έχει μειωθεί από την τιμή 1,00 που παρουσίαζε το αρχικό πτερύγιο στην τιμή 0,88. Η σημαντική αύξηση του συντελεστή ισχύος σε ένα έυρος ταχυτητών σε συνδυασμό με την μείωση, του συντελεστή αντίστασης σε κάθε ακτινική θέση πάνω στο πτερύγιο αλλά και η βελτίωση των άλλων χαρακτηριστικών, παρουσιάζουν ένα πτερύγιο αρκετά βελτιωμένο. Από τα παραπάνω κρίνεται ότι ο νέος δρομέας έχει βελτιωθεί αρκετά σε όλα τα χαρακτηριστικά του σε σχέση με το αρχικό δρομέα σε ένα έυρος ταχυτητών 6.5m/s -12m/s.

5.2 Λειτουργία σταθερής ταχύτητας ακροπτερυγίου λ

Στη λειτουργία σταθερής ταχύτητας ακροπτερυγίου λ επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές στην είσοδο του προγράμματος για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του δρομέα:

- Λειτουργία σταθερής ταχύτητας ακροπτερυγίου (Operation=2)
- Ταχύτητα ακροπτερυγίου $\lambda=9$
- Ολική ακτίνα δρομέα $R_t=20,5$ m
- Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας $V_c=4$ m/s
- Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας $V_f=25$ m/s
- Αριθμός πτερυγίων $Blades=3$
- Βήμα ταχύτητας $speedstep=1$
- Λόγος πλευράς $AR=19$
- Επιλογή τρισδιάστατης διόρθωσης του συντελεστή άνωσης (Correction=0)

Η ταχύτητα ακροπτερυγίου λ επιλέγονταν διαφορετική σε κάθε σενάριο. Η γεωμετρία της αεροτομής naca 63415 παρουσιάζεται στον πίνακα 5.14 και τα αρχεία των αεροτομών τοποθετούνται στον φάκελο ARF.

5.2.1 Σενάριο 4: Υπολογισμός των χαρακτηριστικών του δρομέα για πτερύγιο που δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα βελτιστοποίησης για ταχύτητα ακροπτερυγίου $\lambda=9$ και ταχύτητες ανέμου 7.5 m/s

Για την δημιουργία του πτερυγίου το πρόγραμμα βελτιστοποίησης χρησιμοποίησε τα ίδια αρχεία με την γεωμετρία των αεροτομών από τον ίδιο φάκελο στη θέση c:\BEM\INPUT\ARF\.

Στη δημιουργία του πτερυγίου επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές στην είσοδο του προγράμματος για τον υπολογισμό των σχεδιαστικών παραμέτρων του πτερυγίου:

- Λειτουργία σταθερής ταχύτητας ακροπτερυγίου (Operation=2)
- Ταχύτητα ακροπτερυγίου $\lambda=9$
- Ολική ακτίνα δρομέα $R_t=20,5$ m
- Αριθμός σημείων ταχυτήτων ανέμου Points=1
- Ποσοστό συμμετοχής της κάθε ταχύτητας ανέμου: $V=1\%$
- Επιλογή ταχυτήτων ανέμου: $V=7.5$ m/s
- Αριθμός πτερυγίων Blades=3
- Λόγος πλευράς $AR=19$
- Επιλογή τρισδιάστατης διόρθωσης του συντελεστή άνωσης (Correction=0)

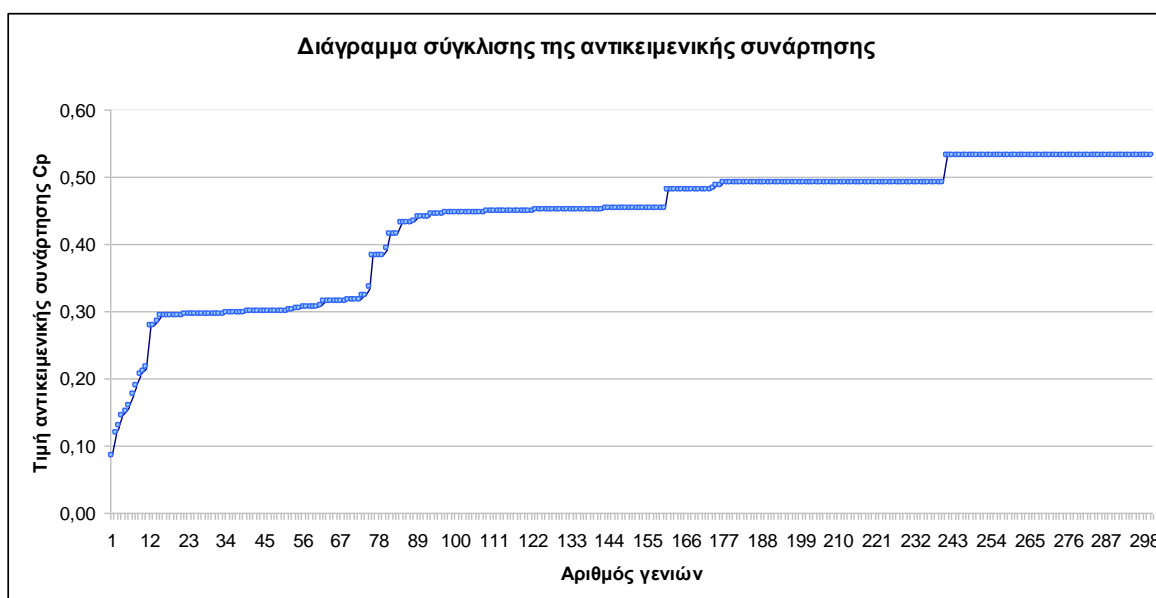
Τα αρχεία εξόδου είναι τα αρχεία blade.dat, optimum blade.dat και LINEAR INTERPOLATION BLADE.dat στη θέση c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM GENETIC ALGORITHM\, το αρχείο generation.dat στη θέση c:\BEM\OUTPUT\GENERATION\ και τα αρχεία INPUT_PIK.dat και στη θέση c:\BEM\INPUT\INPUT PIKAI\A\ . Τα αρχεία blade.dat, linear interpolation blade.dat και generation.dat ανανεώνονται παράλληλα με την εκτέλεση του προγράμματος βελτιστοποίησης με σκοπό να δείχνουν την μεταβολή των τιμών. Το αρχείο generation.dat δείχνει την πορεία της σύγκλισης της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή του συντελεστή ισχύος του δρομέα στην επιθυμητή τιμή 0.59259. Η γεωμετρία του πτερυγίου

δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα βελτιστοποίησης και παρουσιάζεται στα σχήματα 5.48, 5.49 και στον πίνακα 5.8.

Στο σχήμα 5.47 παρουσιάζεται το διάγραμμα σύγκλισης της εκτέλεσης. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο αριθμός των γενιών. Στον κατακόρυφο φαίνεται με θετικό πρόσημο η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Στη πραγματικότητα η βέλτιστη αεροτομή που θα προκύψει, θα έχει συντελεστή ισχύος που θα πλησιάζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης $C_p=0,59259$.

Η μορφή του σχήματος με κάποια ευδιάκριτα πλατό λύσεων είναι χαρακτηριστική. Στο τρίτο πλατό, όπου η αντικειμενική συνάρτηση διατηρεί τη τιμή 0,452276 για 10 συνεχόμενες γενιές όπου και επέρχεται η διαδικασία της μετάλλαξης. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι μικρή και κυμαίνεται από 0,5% έως 7% αλλά ο πληθυσμός μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικά μεγάλος ώστε κάποια άτομα να υποστούν μετάλλαξη. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται και στα επόμενα πλατό. Αποτέλεσμα αυτής της αναπροσαρμογής είναι η χαρακτηριστική μορφή του διαγράμματος με τα διακριτά πλατό τιμών.

Η σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης, παρουσιάζει σημαντική αλλαγή ακόμη και στις 240 γενιές, που είναι το σημείο όπου η CP_GEN λαμβάνει την τιμή 0,492157 και μεταβάλλεται ελάχιστα μέχρι τις 300 γενιές λαμβάνοντας την τιμή 0,532662, φτάνοντας στο ποσοστό 0,8988 του ορίου του betz .

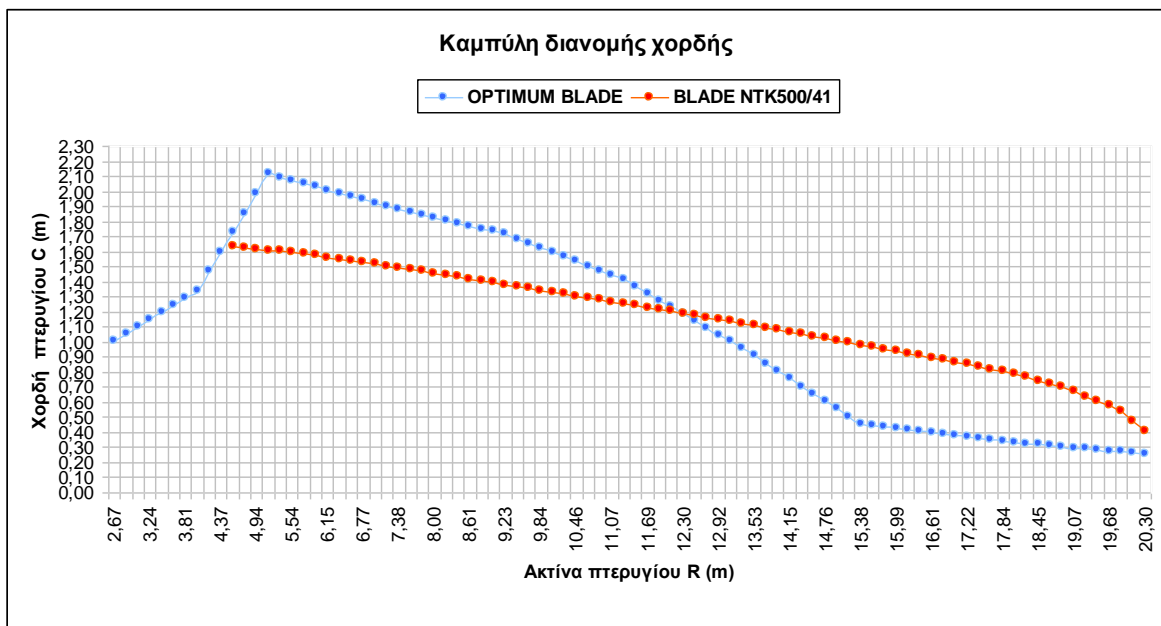


Σχήμα 5.47: Διάγραμμα σύγκλισης της αντικειμενικής συνάρτησης Cp

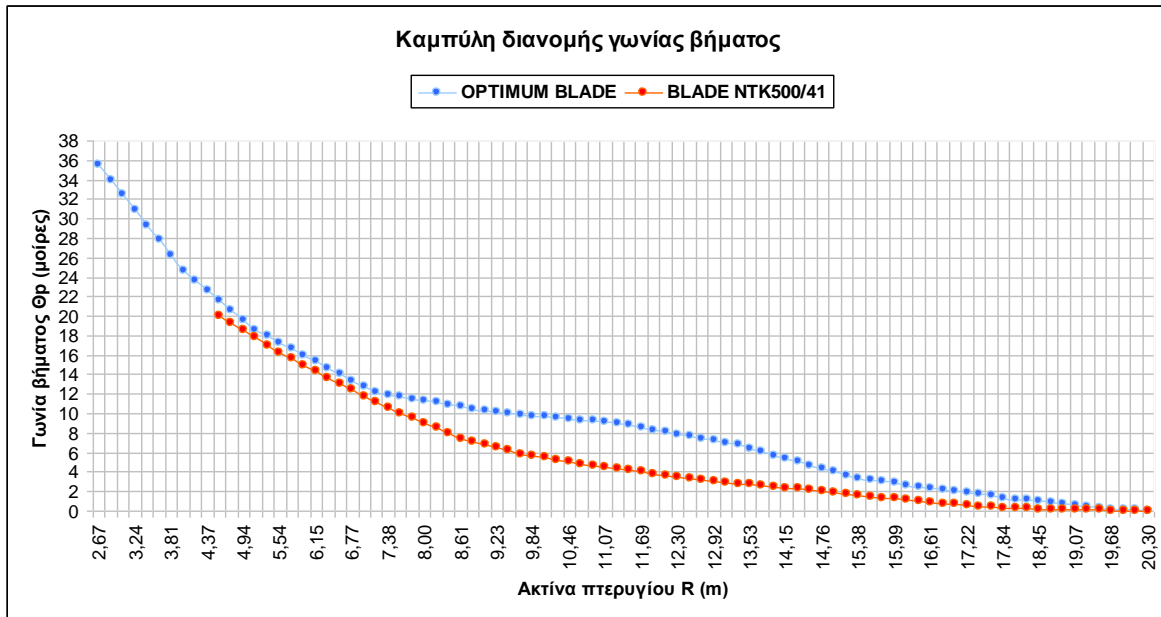
Πίνακας 5.8 : Η γεωμετρία του πτερυγίου

Ακτίνα (m)	Χορδή (m)	Γωνία Βήματος (μοίρες)
---------------	--------------	---------------------------

2,665	1,005	35,56
3,997	1,34	24,687
5,125	2,115	18,569
7,175	1,903	12,124
9,225	1,716	10,09
11,275	1,415	9,006
13,325	0,958	6,754
15,375	0,458	3,318
17,835	0,338	1,363
19,475	0,286	0,281
20,3	0,261	0,025



Σχήμα 5.48: Η διανομή της χορδής του βελτιστοποιημένου πτερυγίου και του πτερυγίου της NTK500/41



Σχήμα 5.49: Η διανομή της γωνίας βήματος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου και του πτερυγίου της NTK500/41

Στον πίνακα 5.8 και στα σχήματα 5.48 και 5.49 παρουσιάζεται η νέα γεωμετρία του πτερυγίου, η οποία παρουσιάζει αρκετές διαφορές με το αρχικό πτερύγιο. Το αρχικό πτερύγιο στο σημείο 4,5m παρουσιάζει το μέγιστο μήκος χορδής $c=1,63\text{m}$ και γωνία βήματος $\theta=20,0$ μοίρες ενώ το νέο πτερύγιο στο σημείο 5,12m παρουσιάζει μήκος $c=2,11\text{m}$ και $\theta=18,56$ μοίρες. Η μέγιστη χορδή στο νέο πτερύγιο εμφανίζεται στο σημείο 5,12m και είναι $c=2,11\text{m}$, ενώ στα προηγούμενα σημεία με κατεύθυνση προς τη βάση η χορδή μειώνεται γραμμικά. Η διαφορά στη γωνία βήματος και στο μήκος χορδής οφείλεται στο ότι το αρχικό πτερύγιο έχει σχεδιαστεί για βέλτιστη λειτουργία σε ταχύτητα ανέμου 6m/s δηλαδή $\lambda=9,7$ με χρήση και των άλλων αεροτομών στα υπόλοιπα σημεία του πτερυγίου, ενώ το νέο σε $V_0=7.5\text{m/s}$ δηλαδή $\lambda=9$ μόνο με χρήση της αεροτομής naca 63415. Για το λόγο αυτό παρατηρούμε ότι το νέο πτερύγιο είναι πιο λεπτό στο 50% και μετά και η γωνία βήματος πιο μεγάλη κατά δύο μοίρες περίπου μόνο στο μέσο ενώ είναι σχεδόν ίδια στα άλλα σημεία. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου και για σημεία πιο κοντά στη βάση απαιτούνται μεγαλύτερες γωνίες βήματος ώστε η γωνία πρόσπτωσης να βρίσκεται σε ιδανικές τιμές, οι οποίες είναι διαφορετικές για κάθε αεροτομή και αυτό επηρεάζει σημαντικά την γεωμετρία του πτερυγίου. Αυτό οφείλεται στο ότι τα σημεία κοντά στη βάση συμμετέχουν λιγότερο στην παραγωγή ισχύος και ο γενετικός αλγόριθμος το αντιλαμβάνεται με την αλλαγή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Το αρχείο όνομα.dat της γεωμετρίας του πτερυγίου τοποθετείται στον φάκελο BLADE. Τα δεδομένα εξόδου του προγράμματος εξάγονται στη θέση c:\BEM\OUTPUTWIND TURBINE CHARACTERISTICS\ σε αρχεία της μορφής dat. Στο αρχείο P_T_M_Vo.dat εμφανίζονται για κάθε ταχύτητα ανέμου:

Τα δεδομένα εξόδου του προγράμματος εξάγονται στη θέση c:\BEM\OUTPUTWIND TURBINE CHARACTERISTICS\ σε αρχεία της μορφής dat. Στο αρχείο P_T_M_Vo.dat εμφανίζονται για κάθε ταχύτητα ανέμου:

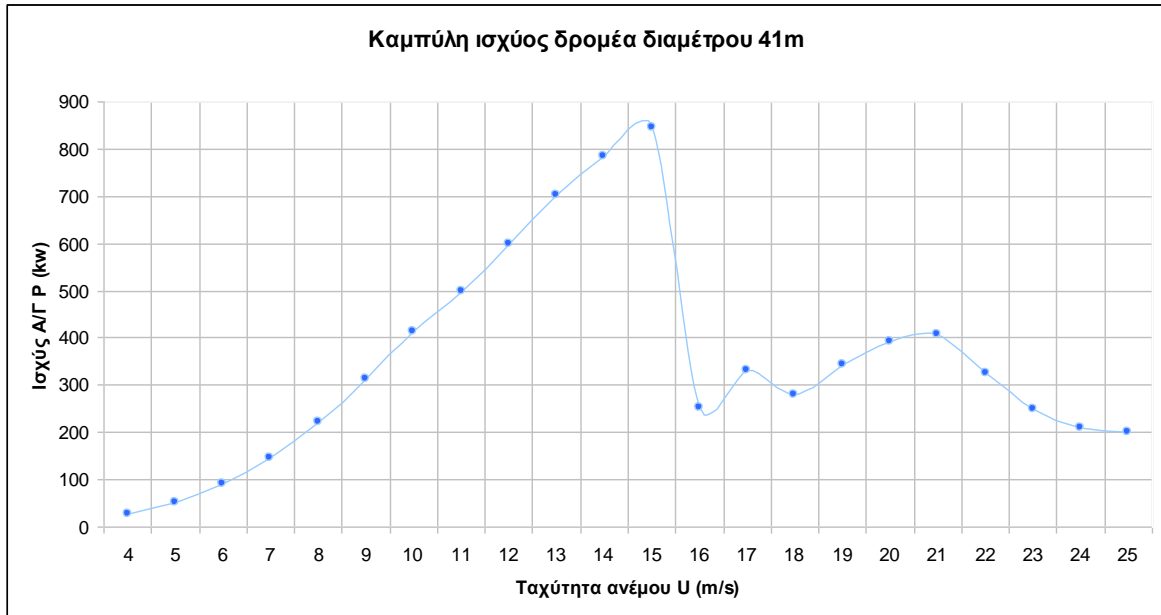
- η ισχύς P
- η ροπή M
- η δύναμη αντίστασης T
- οι αντίστοιχοι συντελεστές ισχύς C_p , ροπής C_m , αντίστασης C_t
- η μείωση της ταχύτητας επάνω στο δρομέα V_r
- η μείωση της ταχύτητας κατάντι του δρομέα V_d
- η ταχύτητα ακροπτερυγίου λ
- η ταχύτητα ανέμου V_o
- ο λόγος επιφάνειας ανάντι και κατάντι του δρομέα A_0/A_I

Στο αρχείο Th_M_P.dat εμφανίζονται για κάθε ακτινική θέση πάνω στο πτερύγιο:

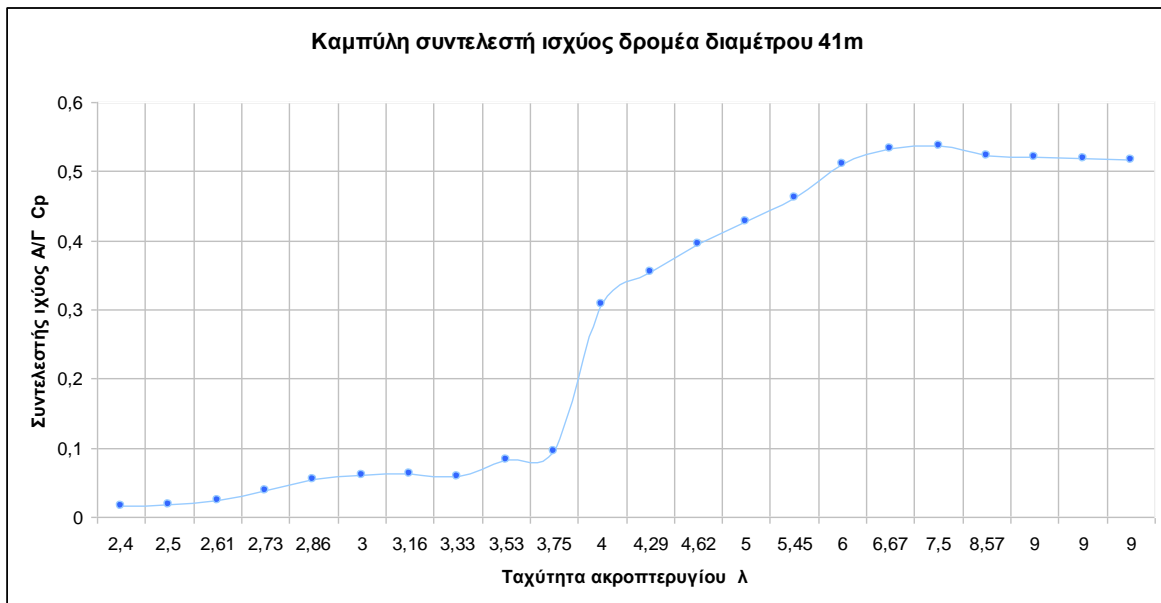
- η ισχύς P
- η ροπή M
- η δύναμη αντίστασης T
- οι αντίστοιχοι συντελεστές ισχύς C_p , ροπής C_m , αντίστασης C_t
- ο συντελεστής αξονικής επαγωγής a
- η ταχύτητα ανέμου V_o
- η ακτινική θέση
- ο συντελεστής εφαπτομενικής επαγωγής a'
- ο συντελεστής Prandtl

Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα ώστε να παρατηρηθεί αρχικά η συμπεριφορά του δρομέα αλλά και μία πρώτη εικόνα για την κατάσταση της ροής στο

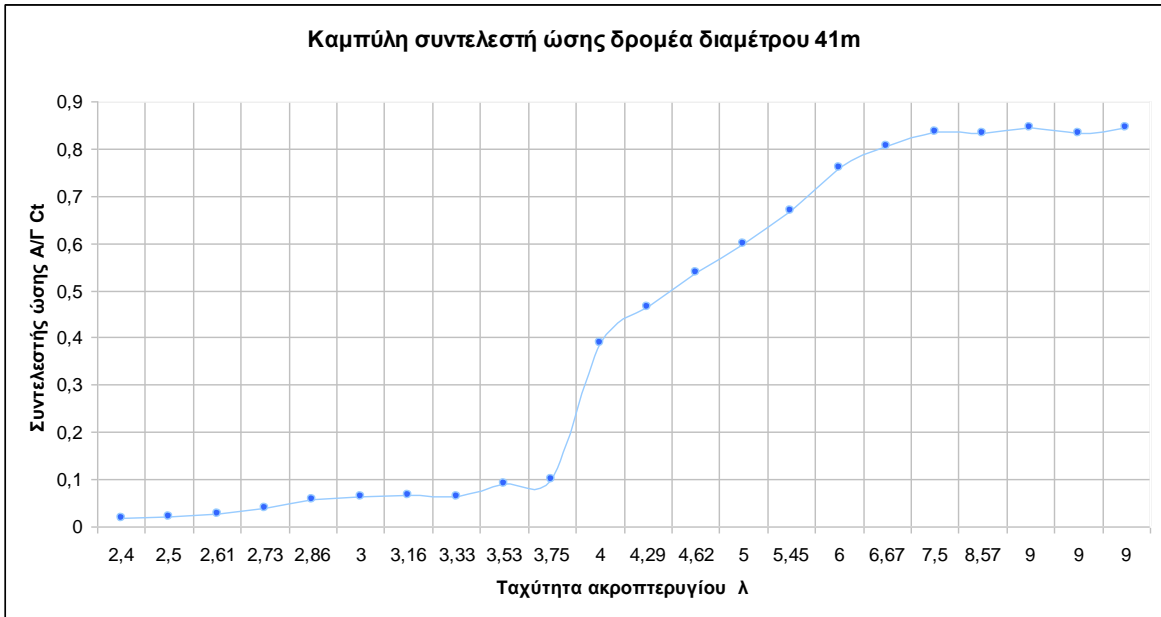
επίπεδο του δρομέα και πίσω από αυτό. Για τα παραπάνω δεδομένα εισόδου προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.



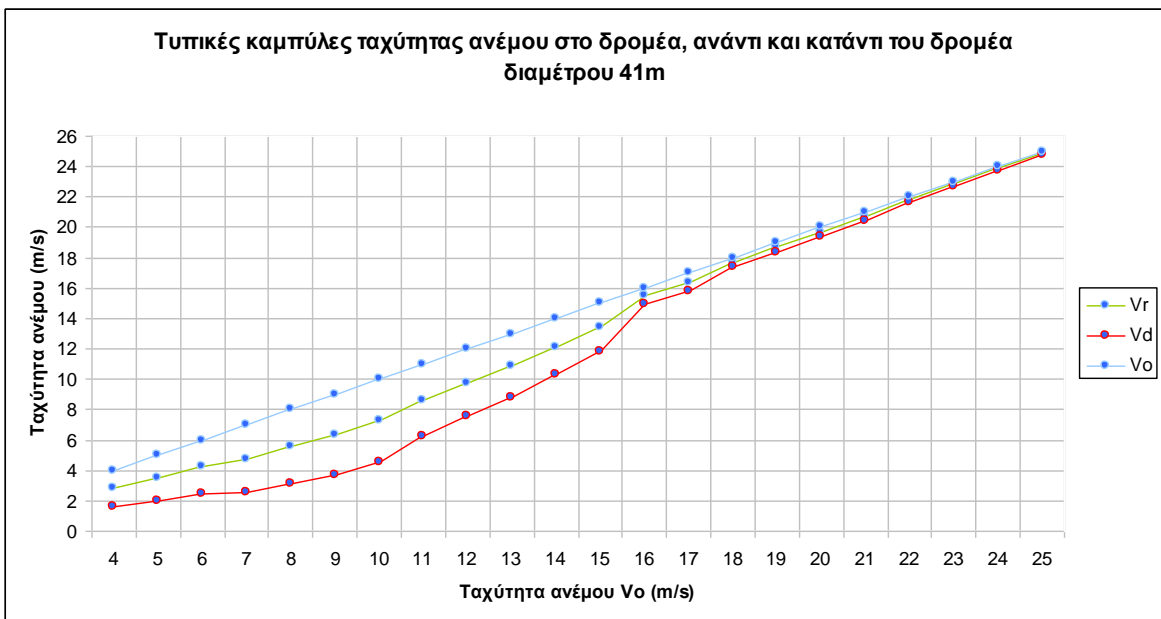
Σχήμα 5.50: Η καμπύλη ισχύος του δρομέα



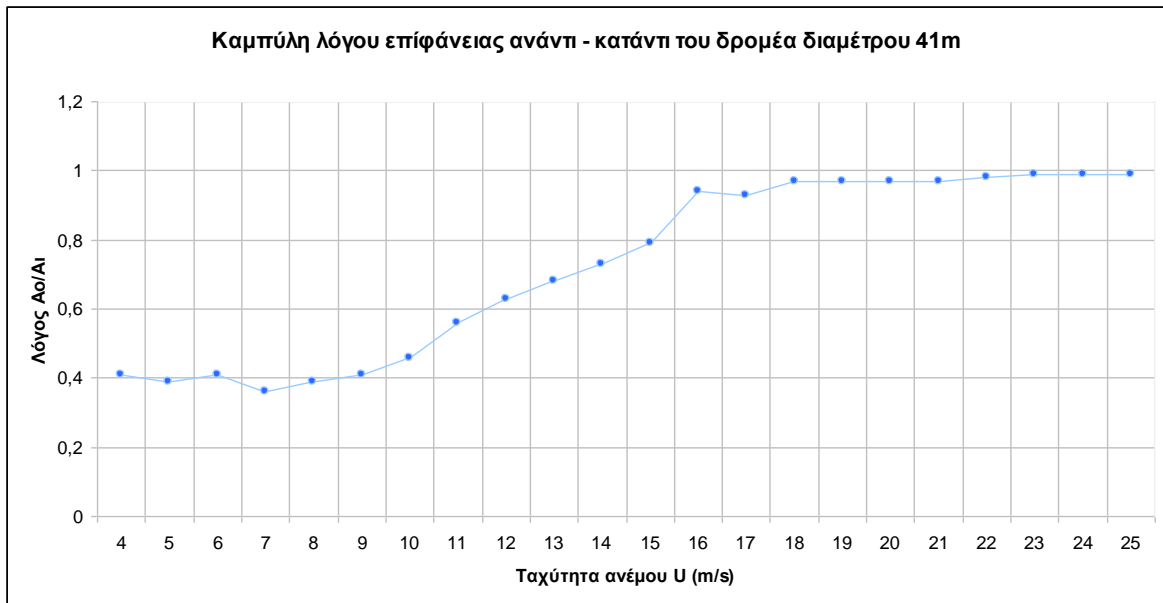
Σχήμα 5.51: Η καμπύλη συντελεστή ισχύος του δρομέα



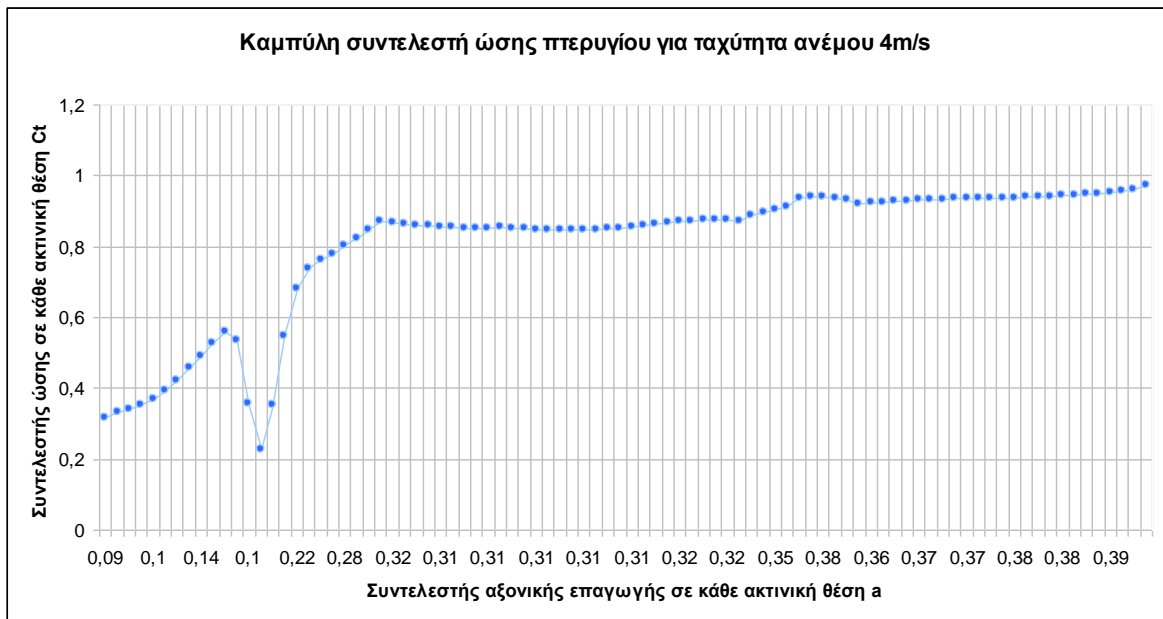
Σχήμα 5.52: Η καμπύλη συντελεστή ώσης του δρομέα



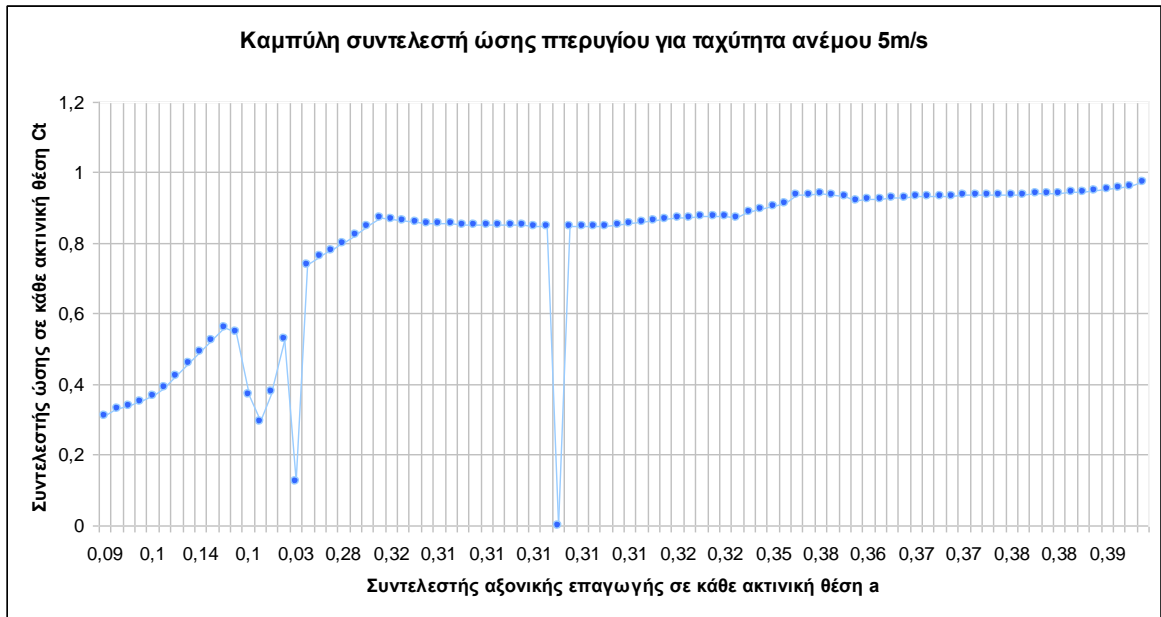
Σχήμα 5.53: Καμπύλες πτώσης της ταχύτητας στο δρομέα και κατάντι του δρομέα (Vo=ταχύτητα ανάντι, Vr=ταχύτητα στο δρομέα, Vd=ταχύτητα κατάντι)



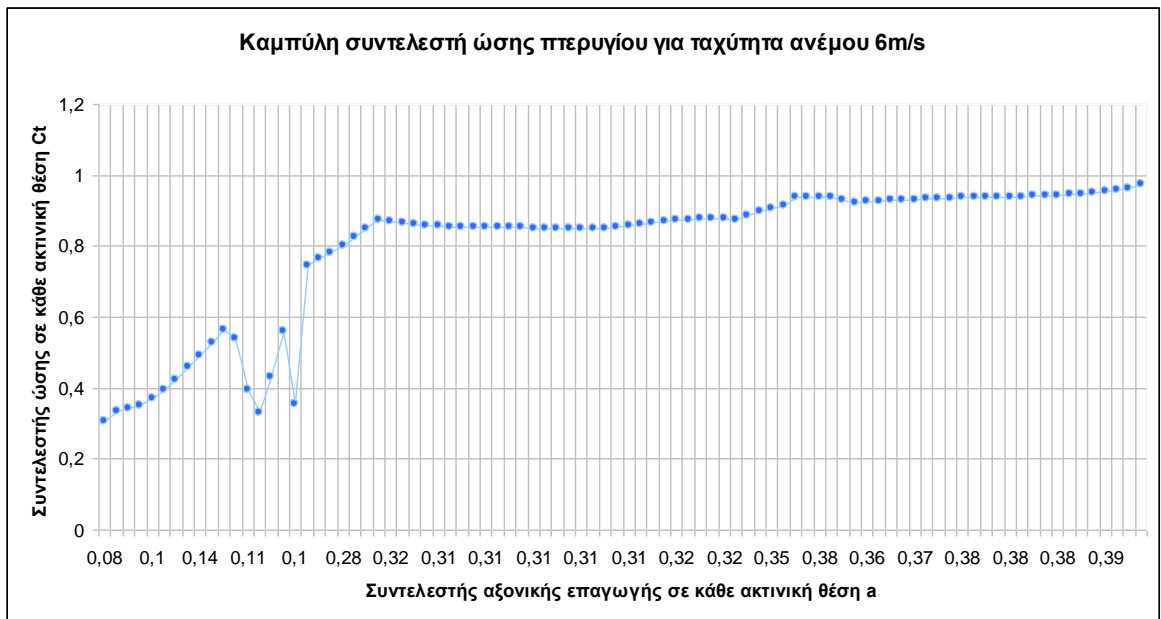
Σχήμα 5.54: Η καμπύλη του λόγου επιφάνειας ανάντι προς κατάντι του δρομέα



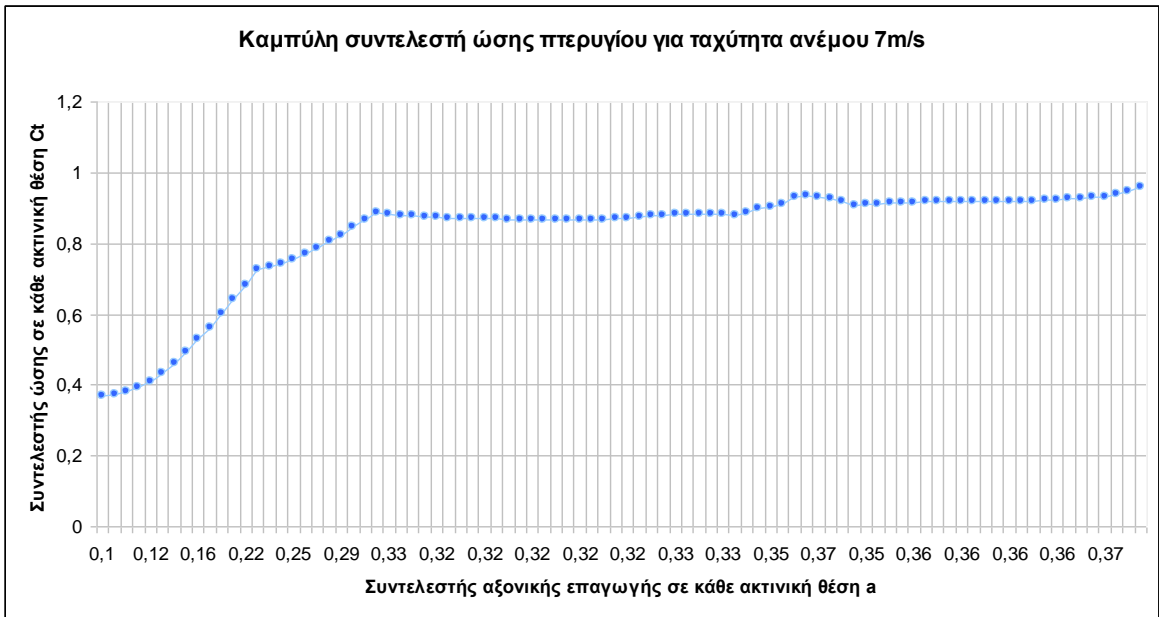
Σχήμα 5.55: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



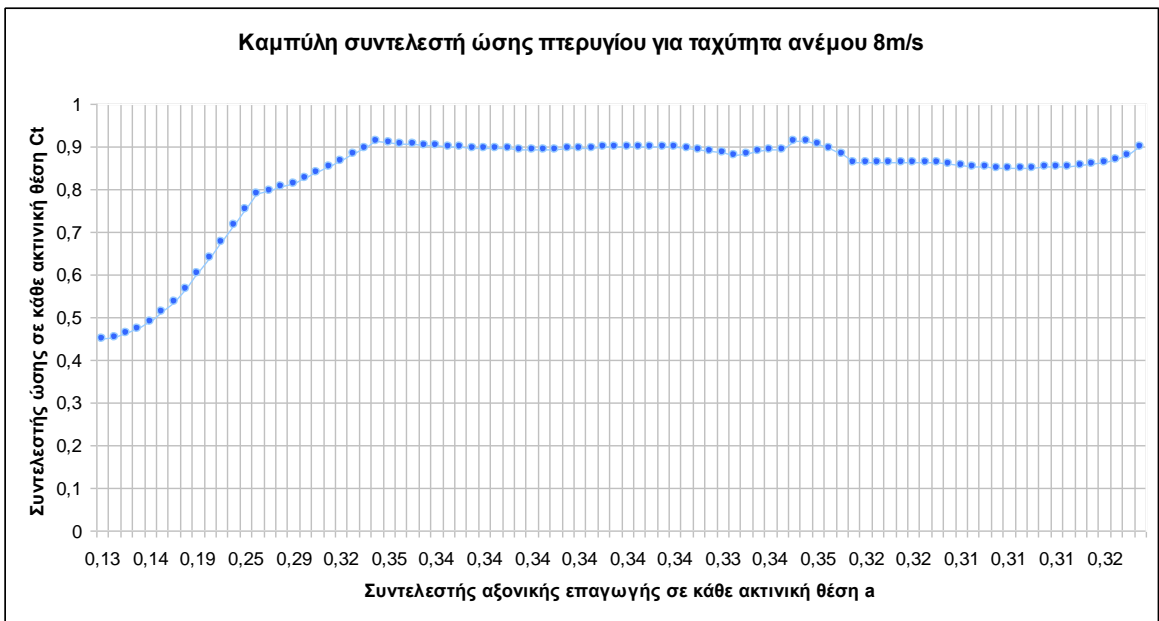
Σχήμα 5.56: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



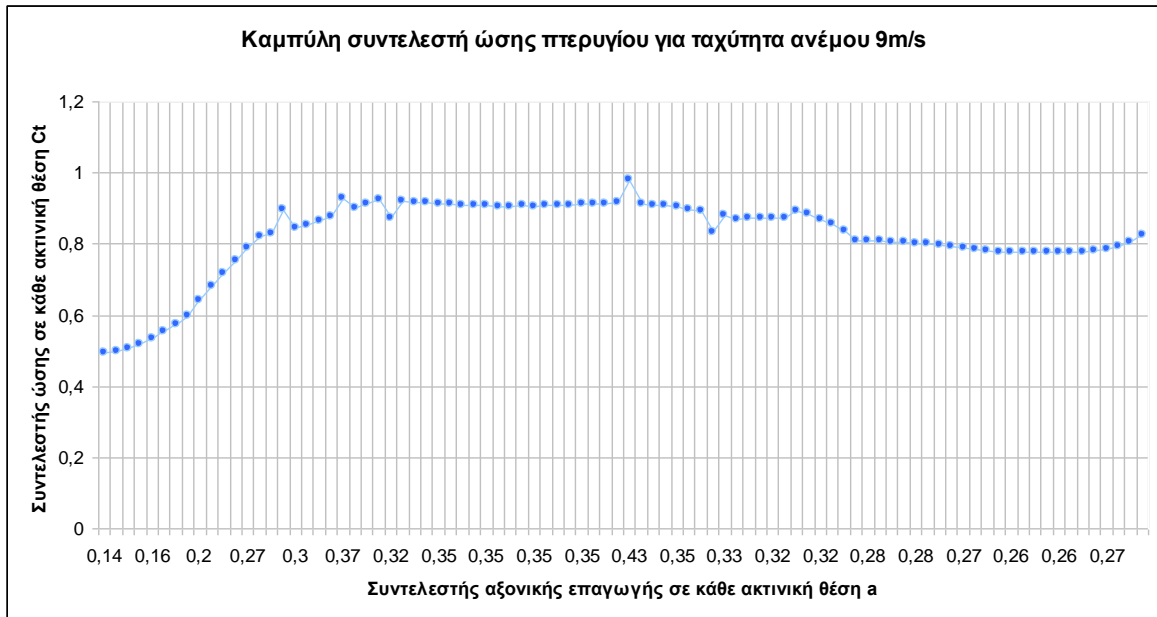
Σχήμα 5.57: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



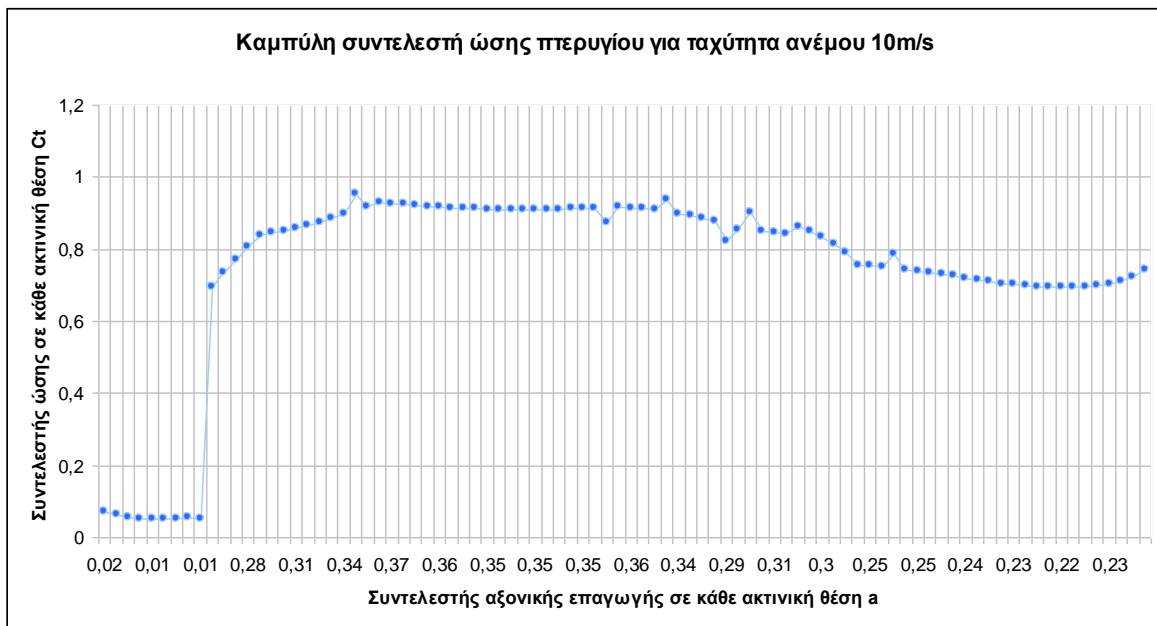
Σχήμα 5.58: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 5.60: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 5.61: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 5.62: Η διανομή του συντελεστή αντίστασης πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.50 ο δρομέας παρουσιάζει μέγιστη ισχύ $P=843\text{kw}$ σε ταχύτητα ανέμου $V_0=15\text{m/s}$ και στο σχήμα 5.51 μέγιστο συντελεστή ισχύος $C_p=0,538$ σε $V_0=8\text{m/s}$ ($\lambda=7,5$) δηλαδή κοντά στο σημείο που σχεδιάστηκε να είναι βέλτιστος στην τιμή 7.5m/s . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζει διαφορά στα χαρακτηριστικά με τον δρομέα που παρουσιάζεται στο 5.1.1 σενάριο 1 και με τον δρομέα NTK500/41 του βιβλίου. Η διαφορά στην παραγόμενη ισχύ φαίνεται στον πίνακα 5.9 και είναι εμφανής η μεγάλη αύξηση της ισχύς στις χαμηλές ταχύτητες από 4m/s έως και 12m/s . Συγκρίνοντας

την παραγόμενη ισχύ (πίνακας 5.9) του νέου δρομέα με την παραγόμενη ισχύ του δρομέα (σεναρίου 2) και με την παραγόμενη ισχύ του νέου δρομέα παρατηρούμε σημαντική διαφορά σε όλες τις ταχύτητες ανέμου και αυτό οφείλεται στην λειτουργία μεταβλητών στροφών.

Πίνακας 5.9 : Η ποσοστιαία αύξηση της ισχύος για ένα εύρος ταχυτήτων 4m/s έως 12m/s

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ισχύς σενάριο 2 (kw)	Ισχύς του νέου δρομέα (kw)	Ποσοστιαία διαφορά (%)
4	19,2	27,2	35,1
5	44,0	52,4	17,8
6	82,4	91,8	12,6
7	139,5	145,0	14,4
8	221,8	222,8	17,7
9	314,2	313,9	21,3
10	416,5	413,0	30,1
11	497,8	498,4	34,1
12	575,3	598,7	40,8

Στο σχήμα 5.52 ο συντελεστής ώσης του δρομέα παρουσιάζει σταθερή τιμή ανάμεσα από 0,8 και 0,9 στις ταχύτητες ανέμου 4m/s έως και 8m/s. Στο σχήμα 5.53 εμφανίζεται η ταχύτητα ανέμου ανάντι, πάνω και κατάντι του δρομέα. Η μείωση της ταχύτητας ανέμου σε V_r και V_d είναι σημαντικά μικρότερη σε όλες τις ταχύτητες ανέμου από ότι σε όλους τους υπόλοιπους δρομείς. Η μικρή μείωση της V_r σε συνδυασμό με την μικρή τιμή του λόγου επιφάνειας ανάντι προς κατάντι όπως φαίνεται στο σχήμα 5.54 για τις ίδιες ταχύτητες ανέμου προκαλεί μείωση της ανάπτυξης τυρβώδους ροής στον ομόρροο και παράλληλα ικανοποιητικές ταχύτητες πίσω από τον δρομέα.

Στα σχήματα 5.55 έως 5.61 παρουσιάζεται ο συντελεστής αντίστασης C_t σε κάθε ακτινική θέση. Στην τιμή 4m/s έως και σε 8m/s είναι ομοιόμορφη στα περισσότερα σημεία ελέγχου πάνω στο πτερύγιο, πράγμα που δηλώνει την καλή λειτουργία από την πλευρά της κατανομής δυνάμεων πάνω στο πτερύγιο δηλαδή στο σημείο σχεδίασης. Σε όλες τις

ταχύτητες ανέμου ο συντελεστή αντίστασης C_t στα περισσότερα σημεία έχει μειωθεί από την τιμή 1,00 που παρουσίαζε το αρχικό πτερύγιο στην τιμή 0,88. Η σημαντική αύξηση του συντελεστή ισχύος στις υψηλές ταχύτητες σε συνδυασμό με την μείωση, του συντελεστή αντίστασης σε κάθε ακτινική θέση πάνω στο πτερύγιο αλλά και η βελτίωση των άλλων χαρακτηριστικών, παρουσιάζουν ένα πτερύγιο αρκετά βελτιωμένο. Από τα παραπάνω κρίνεται ότι ο νέος δρομέας έχει βελτιωθεί αρκετά σε όλα τα χαρακτηριστικά του σε σχέση με το αρχικό δρομέα σε $V_0=4-8\text{m/s}$. Από τα παραπάνω κρίνεται ότι ο νέος δρομέας έχει βελτιωθεί αρκετά σε όλα τα χαρακτηριστικά του σε σχέση με το αρχικό δρομέα αλλά και με τα παραπάνω σενάρια.

6 Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε μια μέθοδος αεροδυναμικού σχεδιασμού πτερυγίων ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα με χρήση γενετικού αλγορίθμου, σε συνδυασμό με τη μέθοδο (BEM) υπολογισμού των χαρακτηριστικών του δρομέα. Τα πτερύγια αναπαρίστανται από τα σημεία των χορδών και τις γωνίες βήματος, των οποίων τα σημεία ελέγχου αποτελούν τις σχεδιαστικές μεταβλητές του προβλήματος, τις οποίες χειρίζεται ο γενετικός αλγόριθμος για την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας.

Για τον σχεδιασμό των πτερυγίων με την μέθοδο BEM, αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα Fortran 90, ο οποίος δοκιμάστηκε για αρκετές γεωμετρίες πτερυγίων και εξακριβώθηκε σε πιο βαθμό μπορεί να αναπαραστήσει με ακρίβεια οποιαδήποτε γεωμετρία. Όπως φάνηκε και στο κεφάλαιο 4, στη παράγραφο της αξιολόγησης των πτερυγίων, ο αλγόριθμος δουλεύει με πολύ καλή ακρίβεια για ένα εύρος ταχυτήτων 4m/s-13m/s. Η διαφορά που εντοπίζεται είναι στις περιπτώσεις όπου επιλέγονται αρκετά χαμηλές ταχύτητες ανέμου (π.χ. 4m/s και 5m/s) και για την προσέγγισή της με μέθοδο BEM, απαιτούνται περισσότερα σημεία βελτιστοποίησης και ως εκ τούτου αυξάνονται οι σχεδιαστικές μεταβλητές του προβλήματος και το υπολογιστικό κόστος. Ωστόσο, το αντικείμενο της εργασίας δεν ήταν να βρεθεί μια τέλεια μέθοδος σχεδιασμού των πτερυγίων με την μέθοδο BEM. Αυτό ήταν απλά το μέσον ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος που θα επέφερε πιθανώς η εισαγωγή όλων των σημείων της περιφέρειας μιας αεροτομής ως σχεδιαστικές μεταβλητές στον γενετικό αλγόριθμο.

Τα σημεία ελέγχου του πτερυγίου, εντάχθηκαν στον γενετικό αλγόριθμο ΡΙΚΑΙΑ(έκδοση 1.0) ως σχεδιαστικές μεταβλητές (μεταβλητές του προβλήματος). Ο ΡΙΚΑΙΑ διασυνδέθηκε με ένα λογισμικό αξιολόγησης το οποίο αναπτύχθηκε για τη παρούσα εργασία σε γλώσσα Fortran 90 και χρησιμοποιεί το λογισμικό XFOIL (έκδοση 6.96) για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών των αεροτομών (οι κώδικες που αναπτύχθηκαν παρατίθενται στα Παραρτήματα I και II).

Σκοπός της εργασίας, δεν ήταν απλά η ανάπτυξη λογισμικού βελτιστοποίησης πτερυγίων αλλά και η πρακτική εφαρμογή της βελτιστοποίησης σε πραγματικές πτερύγια. Επιλέχθηκε η αφετηρία της βελτιστοποίησης να μην είναι οποιοδήποτε πτερύγιο, αλλά κάποια πτερύγια που χρησιμοποιούνται ευρέως και αποτελούν πλέον το πεδίο των πτερυγίων για χρήση σε ανεμογεννήτριες. Έτσι επιλέχθηκε η οικογένεια το πτερύγιο της NTK500/41, με χρήση της αεροτομής naca 63415..

Για τη βελτιστοποίηση εκτελέστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια, τα δύο αφορούσαν την λειτουργία σε σταθερές στροφές και το τρίτο την λειτουργία σε σταθερή ταχύτητα ακροπτερυγίου. Τα σενάρια αυτά είχαν ως αντικειμενική συνάρτηση την εξίσωση του συντελεστή ισχύος του δρομέα σε επίπεδα υψηλότερα αυτών του πρωτότυπου και επιβλήθηκαν περιορισμοί στον συντελεστή αξονικής και εφαπτομενικής επαγωγής. Παράλληλα, στα σενάρια των παραγόμενων πτερυγίων τέθηκαν περιορισμοί για τη διατήρηση του της χορδής και της γωνίας βήματος σε χαμηλότερες τιμές κοντά στο ακροπτερύγιο δηλαδή μετά το 92% του πτερυγίου.

Αποτέλεσμα των επιμέρους εκτελέσεων των παραπάνω σεναρίων ήταν να παραχθούν πτερύγια με βελτιωμένα χαρακτηριστικά, σε σχέση με τα πρωτότυπα, αλλά και πτερύγια που δεν εμφάνισαν κάποια πολύ σημαντική βελτιστοποίηση.

Στο δεύτερο και τρίτο σενάριο που αφορούσε τη βελτιστοποίηση του πτερυγίου της NTK500/41 σε λειτουργία σταθερών στροφών, παρήχθησαν δύο πτερύγια τα οποία είναι εμφανίζουν τις αναμενόμενες διαφορές. Παρόλο που το πτερύγιο της τρίτου σεναρίου δεν εμφανίζει πολύ υψηλά επίπεδα συντελεστή ισχύος, έχει καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά, αφού το πτερύγιο της πρώτου και του δεύτερου σεναρίου δεν εμφανίζουν κάποια όχι και τόσο καλά χαρακτηριστικά (π.χ. υψηλή αντίσταση και ανομοιόμορφη διανομή πάνω στο πτερύγιο).

Από τα τρία σενάρια προέκυψαν τρία πτερύγια. Από αυτά, το πτερύγιο του σεναρίου 4 δεν θα συγκριθεί με το πρωτότυπο πτερύγιο λόγω της διαφορετικής λειτουργίας. Το πτερύγιο (σενάριο 2) παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές συντελεστή ισχύος στο σημείο σχεδιασμού αλλά και σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου και καλύτερη διανομή αντίστασης από το πρωτότυπο αλλά και πάλι ο συντελεστής ισχύος είναι χαμηλός στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου και δεν παραμένει σταθερός για μεγάλο εύρος ταχυτήτων, τουλάχιστον σε σχέση με την πρωτότυπο πτερύγιο και το πτερύγιο του σεναρίου 3 και αυτά είναι τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά. Μόνο το πτερύγιο του τρίτου σεναρίου αποτελεί μια πιθανή επιλογή αντικατάστασης του πρωτότυπου πτερυγίου. Παρουσιάζει όχι υπερβολικά αυξημένο μέγιστο συντελεστή ισχύος αλλά διατηρεί τον συντελεστή ισχύος σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων και ικανοποιητικά επίπεδα αντίστασης. Επίσης, τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά εμφανίζονται σε ικανοποιητικά επίπεδα και στα δύο σενάρια καθώς η γεωμετρία δε παρουσιάζει πολύ μεγάλες ιδιομορφίες. Τα επίπεδα του συντελεστών ροπής μέσω μιας μελέτης αεροελαστικότητας και υλικών θα δείξουν αν ένα τέτοιο πτερύγιο όπως το πτερύγιο (σενάριο 3) μπορεί να αντικαταστήσει το πτερύγιο της NTK500/41, για τη δημιουργία ενός βελτιστοποιημένου δρομέα.

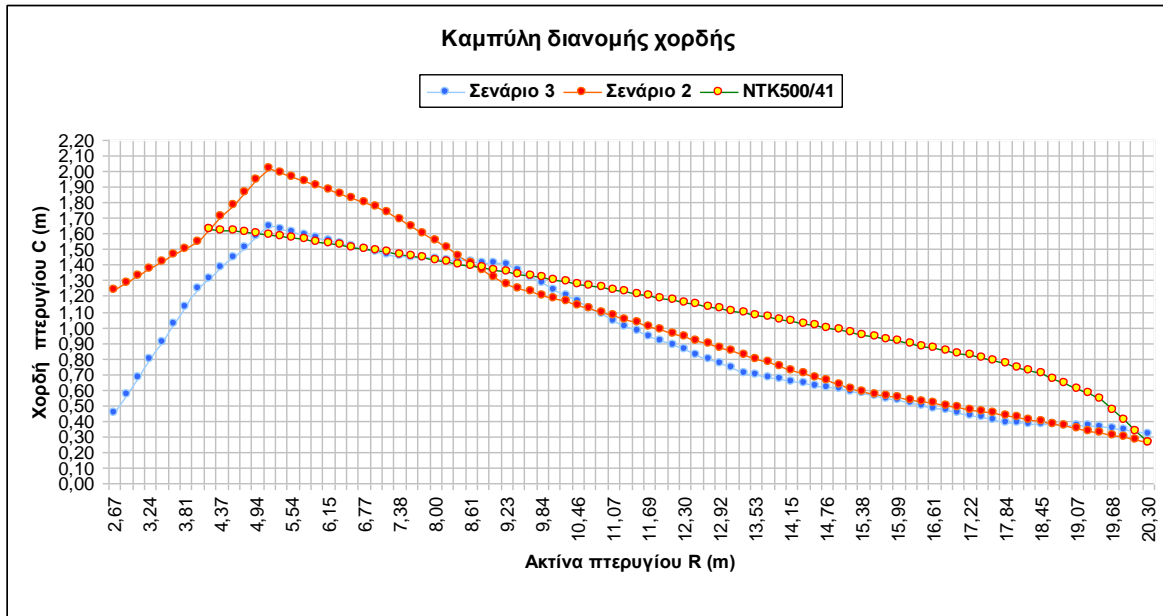
Τα πτερύγια των δύο σεναρίων που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση διαφέρουν ελάχιστα γεωμετρικά παρά μόνο από την βάση μέχρι το 40% του πτερυγίου. Στο σχήμα 6.2 και 6.1 φαίνεται ότι οι διαφορές στις τιμές των χορδών και των γωνιών σχετίζονται καθαρά με τις ταχύτητες σχεδιασμού και τα ποσοστά συμμετοχής τις κάθε μίας.

Ο στόχος του σχεδιασμού του σεναρίου 2 είναι να παρουσιάζει μέγιστο συντελεστή ισχύος σε μία ταχύτητα ανέμου και σε μεγαλύτερες τιμές ταχυτήτων ανέμου και του σεναρίου 3 να παρουσιάζει καλή τιμή συντελεστή ισχύος σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου αλλά και να διατηρεί την τιμή αυτή σε ένα εύρος ταχυτήτων σχήμα 6.3. Και τα δύο σεναρία παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά για τα οποία σχεδιάστηκαν όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4.

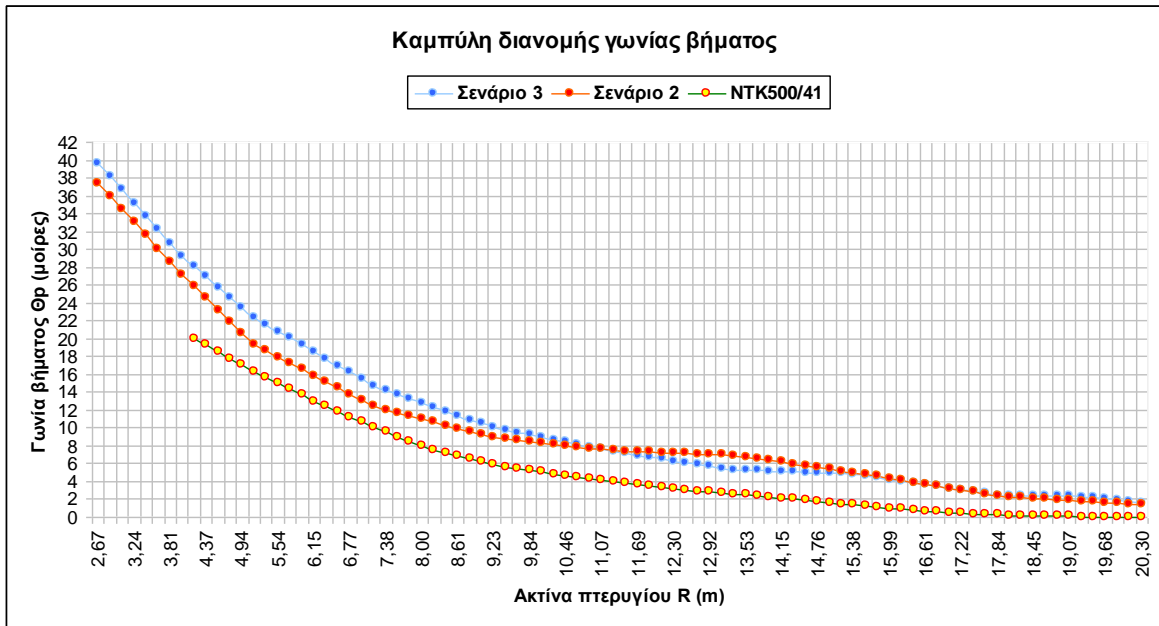
Αυτά τα πτερύγια μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής δουλειάς και έρευνας, με πιθανή κατασκευή μοντέλων και πραγματικών δοκιμών σε αεροσύραγγα. Σχετικά με τις πιθανές μελλοντικές δυνατότητες για έρευνα όσον αφορά την αεροδυναμική βελτιστοποίηση μπορούν να αναφερθούν κάποιες όπως:

- Δημιουργία προγράμματος αεροδυναμικού σχεδιασμού πτερυγίων ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα με χρήση της BEM με ανάλυση σε τρεις διαστάσεις.
- Μελέτη για την επίδραση της περιστροφής του δρομέα στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου λόγω της αύξησης της γωνίας πρόσπτωσης από την ταλάντωση και της παράτασης του φαινομένου της αποκόλλησης ροής με χρήση CFD.
- Μελέτη για σχεδιασμό “ευέλικτων” πτερυγίων ανεμογεννητριών με σκοπό την μείωση των απωλειών στο άκρο του πτερυγίου
- Δημιουργία προγράμματος για την προσομοίωση της ροής πίσω από τον δρομέα με σκοπό την μείωση των απωλειών και την βέλτιστη εκμετάλλευση του ανέμου.
- Επιπλέον θα μπορούσε να γίνει μελέτη αεροελαστικότητας η οποία θα αξιολογεί και το κατά πόσο μπορεί ένα πτερύγιο να αντέξει στις ροπές που του ασκούνται.
- Κατασκευή μοντέλου για πειράματα σε πραγματικές συνθήκες και πιθανώς σε αεροσύραγγα. Το XFOIL και οποιοδήποτε άλλο υπολογιστικό σύστημα δίνουν πολύ ακριβή αποτελέσματα, όμως συνήθως είναι πολύ σημαντικό να παραχθούν πειραματικά αποτελέσματα ώστε να αποτελούν σημεία αναφοράς για μελλοντικές μελέτες

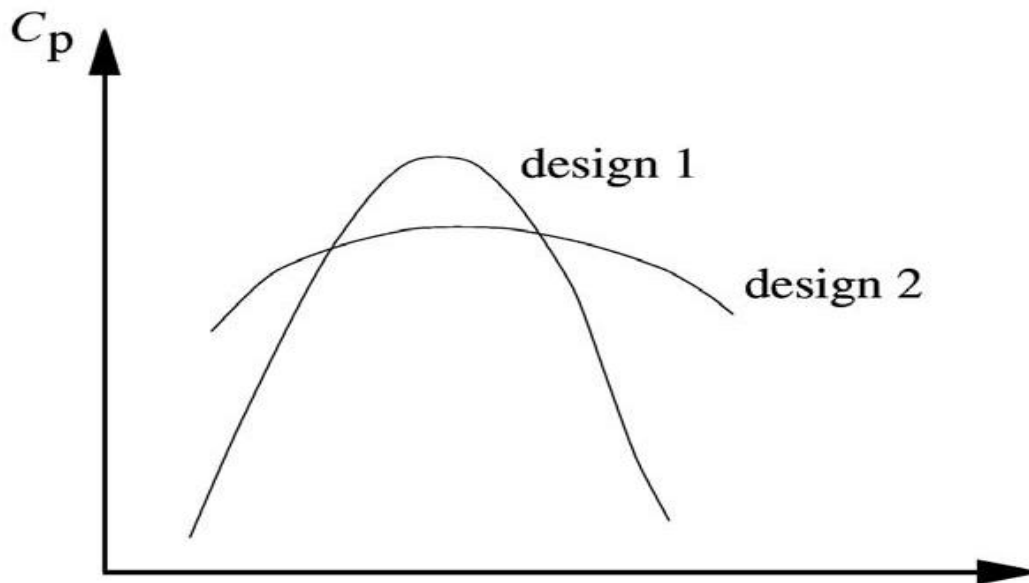
Γενικότερα, το παρόν έργο μπορεί να αποτελέσει βάση για μελέτη και νέες εργασίες πάνω στον τομέα της αεροδυναμικής βελτιστοποίησης.



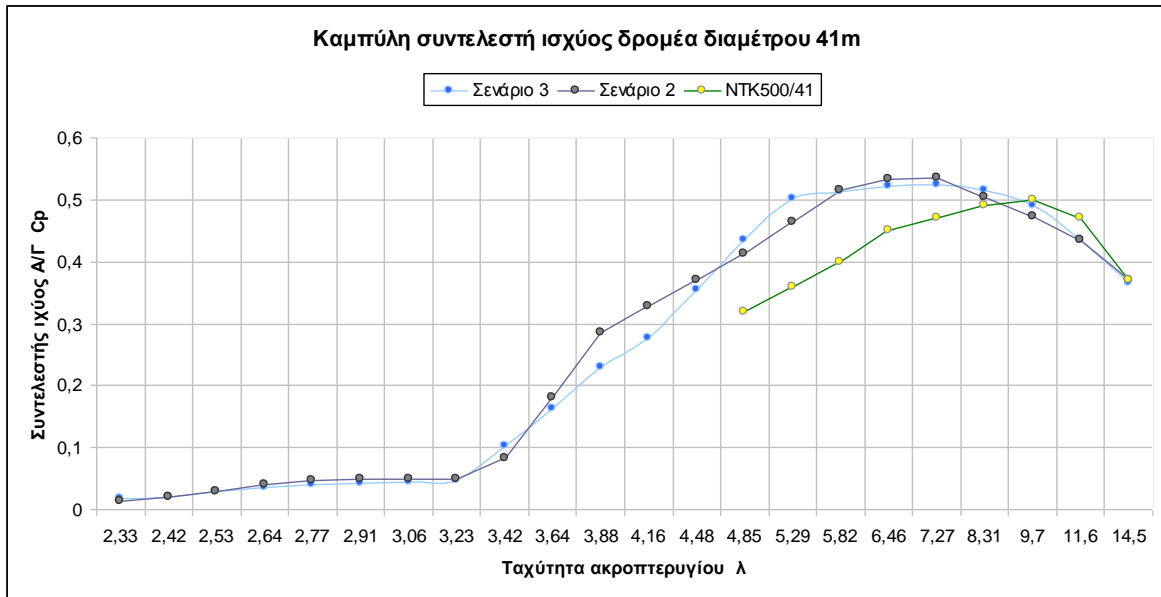
Σχήμα 6.1: Η διανομή της χορδής του πρωτότυπου και των δύο σεναρίων πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση



Σχήμα 6.2: Η διανομή της γωνίας βήματος του πρωτότυπου και των δύο σεναρίων πάνω στο πτερυγίου σε κάθε ακτινική θέση.



Σχήμα 6.3: Δύο διαφορετικά σχέδια, ένα (σχέδιο 1) με υψηλό C_p και απότομη πτώση του και ένα (σχέδιο 2) με χαμηλότερο C_p και διατηρησή του με μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων ανέμου



Σχήμα 6.4: Η καμπύλη ισχύος του δρομέα του πρωτότυπου πτερυγίου και των δύο σεναρίων

Βιβλιογραφία

- [1] **Aerodynamics of Wind Turbines, Second Edition, Martin O. L. Hansen London**
- [2] **Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd edition, Erich Hau**
- [3] **WIND ENERGY. HANDBOOK. Tony Burton. Wind Energy Consultant, Carno, UK. David Sharpe. CREST, Loughborough University, UK. Nick Jenkins. UMIST, Manchester, UK. Ervin Bossanyi. Garrad Hassan & Partners, Bristol, UK. JOHN WILEY & SONS**
- [4] **John Wiley Sons Wind Energy Explained Theory Design and Application 2002 ISBN:0471499722**
- [5] **Γ. Μπεργελέ Καθηγητού ΕΜΠ, “Ανεμοκινητήρες”, Εκδόσεις Συμεών , Αθήνα 2005**
- [6] **Βασικές αρχές στροβιλομηχανών, Γούλας, Απόστολος, Εκδόσεις Γιαχούδη**
- [7] **Technical report: NUMERICAL OPTIMIZATION1. Paul Charbonneau. High Altitude Observatory, NCAR, P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307, USA paulchar@hao.ucar.edu**
- [8] **Technical report: N.S. Çetin¹, M.A. Yurdusev², R. Ata³ and A. Özdemir¹. 1 Ege University, Mechanical Engineering Department, Bornova, İzmir-Turkey. 2 Celal Bayar University, Civil Engineering Department, Manisa-Turkey. 3 Celal Bayar University**
- [9] **Technical report: Fluid dynamics wind turbine design:Critical analysis, optimization and application of BEM theory R. Lanzafame, M. Messina_ DIIM— Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica, Faculty of Engineering, University of Catania, Viale A. Doria, 6– 95125 Catania, Italy Received 29 August 2006. accepted 15 December 2006 Available online 20 February 2007**
- [10] **Technical report: A practical approach for selecting optimum wind rotors. K. Y. Maalawi and M. A Badr. Mechanical Engineering Department, National Research Center, Dokki, Cairo, Egypt. Received 20 October 2001;. accepted 5 February 2002**

- [11] Technical report: A direct method for evaluating performance of horizontal axis wind turbines. Karam Y. Maalawi *, Mahdy T.S. Badawy Mechanical Engineering Department, National Research Center, Dokki, Cairo, Egypt Received 13 April 2000; received in revised form 26 October 2000; accepted 22 November 2000
- [12] Technical report: Increasing the efficiency of wind turbines. Asaf Varol a., *, Cumali 'Ilkılıcı b. , Yasin Varol c a Communications Faculty, Firat University, 23119 Elazığ, Turkey b Technical Education Faculty, Department of Material Science, Firat University, 23119 Elazığ, Turkey c Technical Education Faculty
- [13] Technical report: Blade Optimisation Tool. User Manual. E.T.G. Bot. P.J. van Langen. August 2006
- [14] Technical report: December 2003 • NREL/TP-500-34755. Modeling of the UAE Wind. Turbine for Refinement of. FAST_AD. J.M. Jonkman.
- [15] Technical report: AeroDyn Theory Manual P.J. Moriarty. National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado. A.C. Hansen. Windward Engineering. Salt Lake City, Utah ,A.C. Hansen. Windward Engineering. Salt Lake City, Utah. Prepared under Task No. WER4.3101 and WER5.3101
- [16] Technical report: UPWIND, Aerodynamics and aero-elasticity. Rotor aerodynamics in atmospheric shear flow. Niels N. Sørensen. Wind Energy Department, Risø National Laboratory &. Department of Civil Engineering, Aalborg University. Jeppe Johansen. Wind Energy Department, Risø National Laboratory, Denmark
- [17] Technical report: Einführung in die Aerodynamik der Windturbinen SZ-2011
- [18] Technical report: Design_Of_The_Wind_Turbine_Airfoil_Family_Riso-A-Xx_1998
- [19] Technical report: Aeroelastic Simulation of. Wind Turbine Dynamics by. Anders Ahlström. April 2005
- [20] Technical report: Estimation of the power coefficient in a wind conversion system. L Dodson, K Busawon and M Jovanovic
- [21] Graduation report. Flexible wind turbine blades: a FEM-BEM coupled model approach. David Verelst, January 2009.
- [22] Global Wind Report – Annual market update 2010'

- [23] Technical report: Investigation into Rotor Blade. Aerodynamics. Analysis of the stationary measurements on the UAE phase-VI rotor in the NASA-Ames wind tunnel. C. Lindenburg
- [24] KNOW-BLADE Task-2 report; Aerodynamic Accessories
Jeppe Johansen, Niels N. Sørensen, Frederik Zahle, ShunKang, Ilias Nikolaou, Evangelos S. Politis, Panagiotis K.Chaviaropoulos and John Ekaterinaris
- [25] Technical report: Post Stall Studies of Untwisted. Varying Aspect Ratio Blades . with NACA 44XX Series. Airfoil Sections — Part II
- [26] Technical report: NREL Airfoil Families for HAWTs L. Tangler National Renewable Energy Laboratory 1617 Cole Boulevard Golden, Colorado 80401-3393 D. M. Somers Airfoils Incorporated 122 Rose Drive Port Matilda, Pennsylvania 16870-948
- [27] Technical report: Online wind turbine measurement laboratory. Kurt S. Hansen. 1. , Knud Ole Helgesen Pedersen. 2. & Uwe Schmidt Paulsen ³. 1 Department of Mechanical Engineering, MEK, DTU, DK-2800 Lyngby, E-Mail: ksh@mek.dtu.dk. 2 Ørsted, DTU, DK-2800 Lyngby, E-Mail: khp@oersted.dtu.dk
- [28] Technical report: Airfoil characteristics for wind turbines Christian Bak, Peter Fuglsang, Niels N. Sørensen, Helge Aa. Madsen
- [29] Technical report: AERODYNAMICS OF ROTOR BLADES. © M. Ragheb. 4/15/2011
- [30] Technical report: OPTIMAL ROTOR TIP SPEED RATIO . © M. Ragheb. 4/15/2011
- [31] Technical report: Optimisation of wind turbine blades. M. Jureczko, M. Pawlak, A. Męczyk. *. Faculty of Mechanical Engineering, Silesian University of Technology, ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice, Poland
- [32] Technical report: Structural Dynamics, Stability And Control Of. High Aspect Ratio Wind Turbines. Forrest S. Stoddard
- [33] Technical report: WIND ENERGY. Wind Energ. 2002; 5:77–84 (DOI: 10.1002/we.72). Foreword. The NREL Full-Scale Wind Tunnel. Experiment†. Introduction to the Special Issue
- [34] Technical report: December 2004 • NREL/SR-500-36333. D.M. Somers. Airfoils, Inc. State College, Pennsylvania. The S816, S817, and S818. Airfoils. October 1991 – July 1992

- [35] Technical report: Wind blade chord and twist angle optimization by using genetic algorithms Juan Mendez and David Greiner Institute of Intelligent Systems and Numerical Applications in Engineering Univ. Las Palmas de Gran Canaria
- [36] Technical report: Wind Tunnel Tests of the FFA-W3-241,. FFA-W3-301 and NACA 63-430 Airfoils. Peter Fuglsang, Ioannis Antoniou, Kristian S. Dahl,. Helge Aa. Madsen
- [37] Technical report: Wind Tunnel Tests of the NACA 63-415 and a Modified NACA 63-415 Airfoil. Christian Bak, Peter Fuglsang, Jeppe Johansen, Ioannis. Antoniou
- [38] Wind. Turbine. Airfoil. Catalogue. Franck Bertagnolio, Niels s rensen, Jeppe Johansen and Peter Fuglsang
- [39] Technical report: WIND TURBINE LOAD PREDICTION USING THE. BEDDOES-LEISHMAN MODEL FOR UNSTEADY. AERODYNAMICS AND DYNAMIC STALL by. Kirk Gee Pierce.
- [40] Technical report: Wind Turbine Post-Stall Airfoil. Performance Characteristics. Guidelines for Blade-Element. Momentum Methods. Preprint. October 2004 • NREL/CP-500-36900. J. Tangler. National Renewable Energy Laboratory. J. David Kocurek. Computational Methodology Associates
- [41] Technical report: Wind Turbines: Unsteady Aerodynamics and Inflow Noise. Division: Wind Energy Division. Risø-PhD-47(EN). December 2009
- [42] A USER'S GUIDE TO PIKAIA 1.0. Paul Charbonneau. Barry Knapp. HIGH ALTITUDE OBSERVATORY. NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH. BOULDER, COLORADO
- [43] XFOIL 6.96 User Guide. Mark Drela, MIT Aero & Astro. Harold Youngren, Aerocraft, Inc. 10 Dec 2001
- [44] Numerical Recipes in Fortran 90. Second Edition. Volume 2 of. Fortran Numerical Recipes
- [45] Parallel Genetic Algorithms on. Programmable Graphics Hardware. Qizhi Yu¹, Chongcheng Chen², and Zhigeng Pan^{1,2}
- [46] Stellar Structure Modeling using a Parallel Genetic Algorithm for Objective Global Optimization Travis S. Metcalfe† and Paul Charbonneau, Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA, Theoretical Astrophysics Center, Institute of Physics and Astronomy, Aarhus

University, 8000 Aarhus C, Denmark , High Altitude Observatory, National Center for Atmospheric Research, P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307-3000, USA E-mail: tmetcalfe@cfa.harvard.edu, paulchar@hao.ucar.edu

[47] Parameter Estimation Using the Genetic. Algorithm in Terms of Quantitative. Precipitation Forecast. Yong Hee Lee, Seon Ki Park, Dong-Eon Chang, Jong-Chul Ha

[48] Technical report: Aeroacoustic Computation of. Low Mach Number Flow. Kristian Skriver Dahl.

[49] NUMERICAL RECIPES IN FORTRAN 90

[50] Aerodynamics for Engineering Students Fifth Edition E.L. Houghton and P.W. Data Houghton, E.L. (Edward Lewis) Aerodynamics for engineering students / E.L. and construction I Carpenter, P.W. (Peter William), 1942, ISBN 0 7506 5111

[51] Eppler, Richard. Airfoil Design and Data. Berlin-Heidelberg : Springer Verlag, 1990.ISBN: 9780387525051

[52] Technical report: Trailing Edge Noise Model Applied to. Wind Turbine Airfoils. Franck Bertagnolio. Risø-R-1633(EN)

[53] Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation

[54] ASSESSMENT OF OPTIMUM TIP SPEED RATIO OF WIND TURBINES N.S. Çetin¹, M.A. Yurdusev², R. Ata³ and A. Özdemir¹ 1 Ege University, Mechanical Engineering Department, Bornova, İzmir-Turkey. 2 Celal Bayar University, Civil Engineering Department, Manisa-Turkey. 3 Celal Bayar University, Electrical

[55] Μηχανική Ρευστών Εκδόσεις Γιαχούδη

[56] Description of Nordtank 50041 at Risø National Laboratories.pdf

[57] Κλιματικά δεδομένα Ελληνικών περιοχών

[58] Three-Dimensional Corrections of Airfoil Characteristics Based on Pressure Distributions Christian Bak, Jeppe Johansen, Peter B. Andersen¹ Risø National Laboratory DK-4000, Roskilde, Denmark

Παράρτημα I: Αλγόριθμος εύρεσης των χαρακτηριστικών του δρομέα

Ακολουθεί ο κώδικας υπολογισμού των χαρακτηριστικών του δρομέα και των συνθηκών πάνω στο πτερύγιο αλλά και πίσω από αυτό. Ο κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα Fortran 90 και περιλαμβάνει υπορουτίνες και module. Ο κώδικας με την εκτέλεση του ζητά να επιλέξουμε της μεταβλητές.

Κύριο μέρος

BEM COMPUTING.f90

```
PROGRAM BEM_COMPUTING
!1 Used module+++++++
USE MODULE_CONVERGENCE
USE MODULE_XFOILKEY
USE MODULE_LINEAR_INTERPOLATION_BLADE
!2 Definitions of variables and allocatable tables+++++++
implicit none
real(8)::an=0.0,at=0.0
real(8)::W
real(8)::Vo
real(8)::fr
real(8)::fd
real(8)::Cn
real(8)::Ct
real(8)::S
real(8)::AR
real(8)::a_at
real(8)::Cp
real(8)::Cth
real(8)::Cm
real(8)::Cpm
real(8)::Rt
real(8)::Pwt=0.0
real(8)::Mwt
real(8)::Twt
real(8)::TSR
real(8)::Cmwt
real(8)::Zc=0
real(8)::y,x,a1,c1,cd1,r1,r0,r_20,c1,b1,w1,t,max,min,cli,cdi,k1,sumTh=0,sumM=0,sumP=0,sum_an=0,an_average,an_point=0.0
real(8)::top_xtr,bot_xtr,Th,M,Po,Ftl,maxratio,W_relative
real(8)::par1,par2
real(8)::k
real(8)::kxk1
real(8)::rbmin,rbmax,rak1,distance
real(8)::MACHN,MACH1,MACH2
```

```

real(8)::area_ratio,Vrotor,Vdownstream
real(8)::w1_limit
real(8),parameter::Ad=1.225,Visc=0.00001568 !viscosity in kgr/m*s and air density in kgr/m*3
real(8),parameter::pi=3.141592654
real(8),parameter::Speed_of_sound=343.2
real(8),allocatable,dimension(:)::rb,cb,bb
real(8),allocatable,dimension(:)::ax,c1,cd
real(8),allocatable,dimension(:)::Xc,Yc
integer(4)::Vc,Vf
integer(4)::speedstep,Correction
integer(4)::i,j,q,status1,status2,loc,cnv,kxk,crfv
integer(4)::n,airfoils=17
integer(4)::rak
integer(4)::BLADES
integer(4)::points,crd
integer(4)::Re,Re1,Re2
integer(4)::Op
character(4)::jst,frt
character(60)::filename1
character(160)::dir
logical ::yn
character::yesno
character(60)::o='-----'
!3 User inputs+++++++
print*,'select Op (for fixed speed operation write "1" and for variable speed operation write "2")'
read *,Op
if (Op==1) then
print*,'select W(rotational speed in rpm)'
read *,W
else if (Op==2) then
print*,'select tsr(tip speed ratio)'
read *,tsr
else
print*,'wrong operation number'
stop
end if
print*,'select Rt(total radius in m)'
read *,Rt
print*,'select Vc (Cut-in wind speed in m/s)'
read *,Vc
print*,'select Vf (Cut-out wind speed in m/s)'
read *,Vf
print*,'select speedstep'
read *,speedstep
print*,'select the number of blades'
read *,BLADES
print*,'select the number of aspect ratio'
read *,AR
print*,'select 3D Correction(for 3D correction write "1" else write "0")'
read *,Correction
!4 Read blade geometry from "filename".dat+++++++

```

```

radius:do
print*,'give a filename of r(radius in m),c(chord in m),b(pitch angle in degrees)'
read(*,'(a)')filename1
dir="c:\BEM\INPUT\BLADE\"// FILENAME1
inquire (file=dir,exist=yn)
check1:if (.not.yn) then
print*,'folder not found'
else check1
print*,'the file exists'
print*,'press Y'
read(*,'(a)') yesno
op1:if (yesno=='y'.or.yesno=='Y') then
open(1,file=dir, status='old')
q=0
loop_q:do j=1,1000
read(1,*,end=10)
q=q+1
10 continue
end do loop_q
close(1)
exit radius
end if op1
end if check1
end do radius

!5 Open data outputs folders+++++++
open(24,file="c:\BEM\MATLABCALL\m4.m")
open (4,file="c:\BEM\OUTPUT\WIND TURBINE CHARACTERISTICS\Th_M_P.dat")
open (6,file="c:\BEM\OUTPUT\WIND TURBINE CHARACTERISTICS\P_T_M_Vo.dat")
open (15,file="c:\BEM\MATLABCALL\P_CP_CT_Vo.dat")
write (4,8)'Po','M','Th','Cp','Cm','Cth','an local','Vo','j','at'
write (6,9)'Pwt','Mwt','Twt','Cpm','Cmwt','Cth','an average','TSR','Vo','Vrotor','Vdownstream','area_ratio'

!6 Open data inputs folder+++++++
open(1,file=dir, status='old')
allocate(rb(q),cb(q),bb(q))
loop1r0:do j=1,q
read(1,*)rb(j),cb(j),bb(j)
r_20=rb(1)
rbmin=rb(1)
rbmax=rb(q)
end do loop1r0
close(1)
deallocate(rb,cb,bb)
distance=(rbmax-rbmin)/100
if ((rbmax-rbmin)>4) then
rak1=(rbmax-rbmin)/distance
else
rak1=(rbmax-rbmin)*5/distance
end if
rak=ANINT(rak1)
if (q<rak) then
call LINEAR_INTERPOLATION_BLADE(dir,q)

```

```

else
continue
end if
write(24,*)"cd('c:\BEM\OUTPUT\AERFOIL CHARACTERISTICS)"
!7 Input values of wind speed in BEM+++++
loopVo: do Vo=Vc,Vf,speedstep
r0=0.9*r_20
open(1,file=dir, status='old')
allocate(rb(q),cb(q),bb(q))
loop1:do j=1,q
read(1,*)rb(j),cb(j),bb(j)
r1=rb(j)
c1=cb(j)
b1=bb(j)
r0=r0
kxk1=(r1/rbmax)*20
kxk=ANINT(kxk1)
if (kxk>airfoils) kxk=airfoils
if (kxk==0.0) kxk=1
crfv=kxk
write (frt,'(I4)') crfv
frt=adjustl(frt)
cnv=j
write (jst,'(I4)') cnv
jst=adjustl(jst)
!8 Write MATLAB.key+++++
if (Vo==4) then
write(24,*)"load cha"//trim(jst)//".dat"
write(24,*)"[a cl cd]=textread('cha"//trim(jst)//".DAT'..."
write(24,*)" %f %f %f','headerlines',1);"
write(24,*)"plot(a,cl,'r-x');"
write(24,*)"grid on;"
write(24,*)"title('diagram Angle attack-Lift coefficient"//trim(jst)//"'..."
write(24,*)" ,FontSize',14,'fontweight','bold)'"
write(24,*)"xlabel('Angle attack a [degrees]','FontSize',14,'fontweight','bold)'"
write(24,*)"ylabel('Lift coefficient Cl','FontSize',14,'fontweight','bold)'"
write(24,*)"saveas(gcf,'c:\BEM\DIAGRAMS\CL_CD\diagram Angle attack-Lift coefficient"//trim(jst)//"'..."
write(24,*)" ,jpg)'"
write(24,*)"plot(a,cd,'r-x');"
write(24,*)"grid on;"
write(24,*)"title('diagram Angle attack-Drag coefficient"//trim(jst)//"'..."
write(24,*)" ,FontSize',14,'fontweight','bold)'"
write(24,*)"xlabel('Angle attack [degrees]','FontSize',14,'fontweight','bold)'"
write(24,*)"ylabel('Drag coefficient Cd','FontSize',14,'fontweight','bold)'"
write(24,*)"saveas(gcf,'c:\BEM\DIAGRAMS\CL_CD\diagram Angle attack-Drag coefficient"//trim(jst)//"'..."
write(24,*)" ,jpg)'"
else
continue
end if
!9 Read airfoils geometry from ARF"j".dat+++++
open(30,file='c:\BEM\INPUT\ARF\ARF"//trim(frt)//".dat')

```

```

crd=0
loopxyz:do points=1,1000
read(30,*,end=15)
crd=crd+1
15 continue
end do loopxyz
close(30)
open(30,file='c:\BEM\INPUT\ARF\ARF'//trim(frt)//'.dat')
open(40,file='c:\BEM\OUTPUT\AERFOIL XYZ FOR SOLIDWORKS\XYZ'//trim(jst)//'.txt')
allocate(Xc(crd),Yc(crd))
do points=1,crd
read (30,*)Xc(points),Yc(points)
write(40,65)Xc(points),Yc(points),Zc
end do
close(40)
close(30)
deallocate (Xc,Yc)

!I0 Calculation of rotational speed in rad/sec+++++++
if (Op==1) then
w1=W*2*pi/60.0
else if (Op==2) then
w1=(tsr*Vo)/Rt
w1_limit=60/Rt
if (w1>w1_limit) w1=w1_limit
end if

!I1 Find Reynolds and Mach number+++++++
y =(1-0.3)*Vo
x =(1+0.016)*w1*r1
fr=ATAN2(y,x)
W_relative=w1*r1*(1+0.01)/cos(fr)
RE=c1*W_relative/Visc
!MACHN=RE*Visc/(c1*Speed_of_sound)
MACHN=Vo/Speed_of_sound
if (MACHN>0.25) MACHN=0.25

!I2 Call XFOIL+++++++
CALL XFOILKEY(RE,MACHN,j,n,kxk)

!I3 Call subroutine+++++++
CALL
CONVERGENCE(W1,Vo,r1,c1,b1,BLADES,an,at,Cn,Ct,cl1,cd1,fr,fd,a_at,S,n,j,a1,max,min,Cp,Cth,Cm,Rt,Ad,Th,M,Po,sumTh,sumM,sumP,r0,Ftl,TSR,Re,sum_an,AR,C
orrection)
an_point=an
write (4,44)Po,M,Th,Cp,Cm,Cth,an_point,Vo,j,at,Ftl
an=0
at=0
r0=r1
end do loop1
an_average=sum_an/q
area_ratio=(1-2*an_average)
if (area_ratio <= 0.0) area_ratio=0.0001
Vrotor=(1-an_average)*Vo
if (Vrotor <= 0.0) Vrotor=0.0001
Vdownstream=(1-2*an_average)*Vo

```

```

if (Vdownstream <= 0.0) Vdownstream=0.0001
!13.1 Calculation of total coefficients+++++++
sumP=sumP-0.05*sumP
Cth=2*sumTh/(Ad*pi*(Rt**2)*Vo**2)
Cpm=2*sumP/(Ad*pi*(Rt**2)*Vo**3)
Twt=sumTh
!if(sumP>Pwt) then
Pwt=sumP
!else
!Pwt=Pwt-Pwt*0.03
!end if
Cmwt=2*sumM/(Ad*pi*(Rt**3)*Vo**2)
Mwt= sumM
!14 Write data outputs into file+++++++
write (6,66)Pwt,Mwt,Twt,Cpm,Cmwt,Cth,an_average,TSR,Vo,Vrotor,Vdownstream,area_ratio
write (15,75)Pwt,Cpm,Cth,Vo
close(1)
deallocate(rb,cb,bb)
sumTh=0.0
sumM =0.0
sumP =0.0
sum_an=0.0
r0=0.9*r_20
an=0
at=0
end do loopVo
!15 Close folders+++++++
write(24,*)"quit"
close (4)
close (6)
close (15)
close (24)
!16 Call MATLAB+++++++
call system ("c:\BEM\MATLABCALL\MatlabCall1.bat")
call system ("c:\BEM\MATLABCALL\MatlabCall4.bat")
open (15,file="c:\BEM\MATLABCALL\P_CP_CT_Vo.dat")
close (15,status='delete')
!17 Format+++++++
8 format(6x,a3,t20,a4,t34,a4,t44,a4,t54,a4,t66,a4,t74,a8,t84,a4,t94,a4,t102,a11)
9format(12x,a3,t27,a4,t46,a4,t59,a4,t69,a4,t78,a4,t86,a10,t96,a4,t106,a4,t116,a6,t126,a11,t139,a10)
44 format(f12.3,t15,f12.3,t30,f12.3,t45,f6.3,t55,f6.3,t65,f6.3,t75,f6.3,t85,f6.3,t95,i3,t105,f10.4,t120,f7.5)
66 format(f19.3,t21,f15.3,t39,f15.3,t57,f6.3,t67,f6.3,t77,f6.3,t87,f6.3,t97,f5.2,t107,f5.2,t117,f5.2,t127,f5.2,t137,f5.2)
65 format(f7.5,t9,f7.5,t17,f7.5)
75 format(f15.3,t21,f7.5,t31,f7.5,t41,f7.3)
END PROGRAM BEM_COMPUTING

```

Ynopoutiveç

CONVERGENCE.F90

```

SUBROUTINE_CONVERGENCE(W1,Vo,r1,c1,b1,BLADES,an,at,Cn,Ct,c1,c1,fr,fd,a_at,S,nj,a1,max,min,Cp,Cth,Cm,Rt,Ad,Th,M,Po,sumTh,sumM,sumP,r0,Ftl,TSR,
Re,sum_an,AR,Correction)

```

```

implicit none

```

```

!1 Definitions of variables and allocatable tables+++++
real(8),intent(inout)::an,at,sumTh,sumM,sum_an,sumP,r0,TSR,Vo,W1
real(8),intent(in)::r1,c1,b1,Rt,Ad,AR
real(8),intent(out)::Cn,Ct,c11,cd1,fr,fd,a_at,S,a1,max,min,Cp,Cth,Cm,Th,M,Po,Ftl
integer(4),intent(in)::n,BLADES,j,Re,Correction
real(8)::Ftl_tip,Ftl_root,f_tip,partip,parroot,f_root,Rroot
real(8)::y,x,t,cli,cdi,k1,dan,dat,andummy,atdummy,anp,ch,par4,par5,par6,par7,ftlx
real(8)::x1,x2,x3,dr,dr3,ar1,par1,ar2,par2,Clmin,Clmax,Cdmin,Cdmax,K,an1,maxratio,a1cr
real(8)::a,b,c,d,a0,a_s,cl_s,cd_s
real(8),parameter::pi=3.141592,tol=10e-5,e=2.718281828,ac=0.2
real(8)::Cd90,B2,A2,g,da
real(8),allocatable,dimension(:)::ax,cl,cd
integer(4)::i,qk=0.0
integer(4)::cnv,loc
character(4)::jst
!2 Determination of root radius point+++++
Rroot=0.06*Rt
!3 Start of BEM+++++
andummy=100
atdummy=100
dan=abs(an-andummy)
dat=abs(at-atdummy)
!3.1 Start of convergence+++++
loop_a:do while ((dan>=tol).or.(dat>=tol))
qk=qk+1
andummy=an
atdummy=at
!3.2 Calculation of flow angle+++++
tsr=(w1*Rt)/Vo
y=(1-an)*Vo
x=(1+at)*w1*r1
loopx:if (x.eq.0) then
x=0.00000000001
else loopx
x=x
end if loopx
fr=ATAN2(y,x)
loopfr:if (fr.eq.0.0) then
fr=0.00000000001
else loopfr
fr=fr
end if loopfr
fd=fr*180.0/pi
a1=fd-b1
t=ANINT(a1)
!3.3 Calculation of solidity+++++
S=(c1*BLADES)/(2*pi*r1)
!3.4 Calculation of Prandtl's tip loss factor+++++
f_tip=(BLADES*(Rt-r1))/(2*r1*sin(fr))
partip=(cos(exp(-f_tip))/pi)
looptip:if (partip.eq.0.0) then

```

```

partip=0.0000000001
else looptip
partip=partip
end if looptip
Ftl_tip=2*partip
ftlx=r1/Rt
if((ftlx)>=0.7) then
Ftl_tip=((Ftl_tip**0.85+0.5))/2
else
Ftl_tip=1-(r1/Rt)*(1-Ftl_tip)/0.7
end if
!3.5 Calculation of Prandtl's root loss factor++++++++++++++++++++++++++++++++++++
f_root=(BLADES*(r1-Rroot)/(2*r1*sin(fr))
parroot=(cos(exp(-f_root))/pi)
looproot:if (parroot.eq.0.0) then
parroot=0.0000000001
else looproot
parroot=parroot
end if looproot
Ftl_root=2*parroot
!3.6 Calculation of total Prandtl's loss factor++++++++++++++++++++++++++++++++++++
Ftl=Ftl_tip*Ftl_root
cnv=j
write (jst,'(I4)') cnv
jst=adjustl(jst)
!3.7 Read lift and drag coefficient++++++++++++++++++++++++++++++++++++
open(5,file='c:\BEM\OUTPUT\AERFOIL CHARACTERISTICS\cha'//trim(jst)//'.dat',status='old')
allocate(ax(n),cl(n),cd(n))
loopmax:do i=1,n
read(5,*)ax(i),cl(i),cd(i)
maxratio=maxval(cd)
loc = maxloc( cl , dim=1 , mask= cl.eq.maxratio)
a0=ax(1)
end do loopmax
close(5)
cl_s=cl(loc)
cd_s=cd(loc)
a_s=ax(1loc)
min=ax(1)
max=ax(n)
Clmin=cl(1)
Clmax=cl(n)
Cdmin=cd(1)
Cdmax=cd(n)
deallocate(ax,cl,cd)
open(5,file='c:\BEM\OUTPUT\AERFOIL CHARACTERISTICS\cha'//trim(jst)//'.dat',status='old')
allocate(ax(n),cl(n),cd(n))
loop2:do i=1,n
read(5,*)ax(i),cl(i),cd(i)
mangle:if(a1<min) then
Cl1=-1.5

```



```

Cd1=0.3
a_at=t
!3.8 Viterna's equations+++++++
else if(a1>(max).and.a1<(90)) then mangle
a1=a1*pi/180.0
a_s=a_s*pi/180.0
Cd90=1.11 + 0.018*AR
B2=(cd_s-Cd90*(sin(a_s))**2)/cos(a_s)
Cd1=Cd90*(sin(a1))**2 + B2*COS(a1)
A2=(cd_s-Cd90*sin(a_s)*cos(a_s))*sin(a_s)/((cos(a_s))**2)
Cl1= Cd90*sin(2*a1)/2 + A2*(cos(a1))**2/sin(a1)
else if(a1==90) then mangle
Cd1=1.11 + 0.018*AR
Cl1=0.0
else if(a1>90) then mangle
Cl1=-0.5
Cd1=1.0
!3.9 Linear interpolation+++++++
else mangle
in1:if(ax(i)==t)then
a_at=ax(i)
Cli=cl(i)
Cdi=cd(i)
k1=(a_at)-(a1)
in2:if(k1<0.0) then
ar1=((cl(i+1)-cl(i))*(a1-ax(i)))
par1=(ax(i+1)-ax(i))
cl1=cl(i) + (ar1/par1)
ar2=((cd(i+1)-cd(i))*(a1-ax(i)))
par2=(ax(i+1)-ax(i))
cd1=cd(i) + (ar2/par2)
else if(k1>0) then in2
ar1=((cli-cl(i-1))*(a1-ax(i-1)))
par1=(a_at-ax(i-1))
cl1=cl(i-1) + (ar1/par1)
ar2=((cdi-cd(i-1))*(a1-ax(i-1)))
par2=(a_at-ax(i-1))
cd1=cd(i-1)+(ar2/par2)
else in2
cl1=cli
cd1=cdi
end if in2
end if in1
end if mangle
end do loop2
close(5)
if (Correction==1) then
if (a1<30.and.a1>0) then
g=1
else if (a1<60.and.a1>=30) then
g=0.5*(1+cos((6*a1-180)*pi/180))

```

```

else
g=0
end if
da=(a1-a0)*pi/180
Cl1=c11 + ((3.1*tsr**2)/(1+tsr**2))*g*((c1/r1)**2)*((sin(da)-c11))
else
Cl1=Cl1
Cd1=Cd1
end if
deallocate(ax,cl,cd)
!3.10 Calculation of load coefficients+++++++
Cn=Cl1*cos(fr)+Cd1*sin(fr)
Ct=Cl1*sin(fr)-Cd1*cos(fr)
!3.11 Calculation of axial induction factor+++++++
par4=(S*Cn)
looppar4:if (par4.eq.0.0) then
par4=0.00000000001
else looppar4
par4=par4
end if looppar4
par5=((4.0*Ftl*sin(fr)**2)/par4+1)
looppar5:if (par5.eq.0.0) then
par5=0.00000000001
else looppar5
par5=par5
end if looppar5
an= 1.0/par5
!3.12 Calculation of tangential induction factor+++++++
par6=(S*Ct)
looppar6:if (par6.eq.0.0) then
par6=0.00000000001
else looppar6
par6=par6
end if looppar6
par7=((4.0*Ftl*sin(fr)*cos(fr))/par6-1)
looppar7:if (par7.eq.0.0) then
par7=0.00000000001
else looppar7
par7=par7
end if looppar7
at= 1.0/par7
!3.13 Restrictions+++++++
if (at<=0.0) at=0.001
if(qk>1 .and. an>(0.0) .and. an<1.0) anp=an
if (qk==100) then
an=anp
at=at
exit loop_a
else if (an<0.0.and.a1<0.0) then
an=0.0
at=at

```

```

exit loop_a
else if (an>1.0 ) then
an=0.999
at=at
else if (an<0.0) then
an=0.025
at=at
else
qk=qk
an=an
at=at
end if
!3.14 Glauert correction if (an>0.2)++++++
Cor :if (an>ac ) then
K=(4*Ftl*sin(fr)**2)/par4
x1=2+K*(1-2*ac)
x2=(K*(1-2*ac)+2)**2
x3=4*(K*ac**2-1)
an=0.5*(x1-(abs(x2+x3))**0.5)
Cth=4*(ac**2+(1-2*ac)*an)
else Cor
an=an
Cth=4*an*(1-an)
end if Cor
dan=abs(an-andummy)
dat=abs(at-atdummy)
end do loop_a
sum_an=sum_an+an
!3.15 Calculation of local coefficients and local power,moment,thrust+++++
Cth=4*an*(1-an)
Cm=4*at*(1-an)*(w1*r1/Vo)
Cp=4*an*(1-an)**2
dr=abs((r1**2-r0**2)/2)
dr3=abs((r1**3-r0**3)/3)
M=2*Ad*pi*dr3*(Vo**2)*Cm/2
Th=2*Ad*pi*dr*(Vo**2)*Cth/2
Po=2*Ad*pi*dr*(Vo**3)*Cp/2
!3.16 Calculation of total power,moment,thrust+++++
sumTh=Th+sumTh
sumM =M+sumM
sumP =Po+sumP
qk=0.0
END SUBROUTINE CONVERGENCE

```

LINEAR INTERPOLATION BLADE.f90

```

SUBROUTINE LINEAR_INTERPOLATION_BLADE(dir,q)
implicit none
character(160),intent(inout)::dir
integer(4),intent(inout)::q
real(8)::r1,c1,b1

```

```

real(8)::rakx2,rakx1
real(8)::rx,cx,bx,kx,drx,r1x,c1x,b1x
real(8),allocatable,dimension(:)::rb,cb,bb
integer(4)::jx,kxi,lx
integer(4)::j,rakx
integer(4)::cnv
character(4)::jst
rakx2=0.0
open(26,file='c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM GENETIC ALGORITHM\LINEAR INTERPOLATION BLADE.dat')
open(1,file=dir, status='old')
allocate(rb(q),cb(q),bb(q))
loop1r0:do j=1,q
read(1,*)rb(j),cb(j),bb(j)
r1=rb(j)
c1=cb(j)
b1=bb(j)
if (j>1.and.j<=q) then
rx=(rb(j)-rb(j-1))
cx=(cb(j)-cb(j-1))
bx=(bb(j)-bb(j-1))
kx=rx/0.2
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+rb(j-1)
c1x=cb(j-1)+cx*(r1x-rb(j-1))/rx
b1x=bb(j-1)+bx*(r1x-rb(j-1))/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else
continue
end if
rakx1=(rakx2+j+jx)/2
rakx=ANINT(rakx1)
rakx2=rakx1
write (26,24) r1,c1,b1
end do loop1r0
close(1)
deallocate(rb,cb,bb)
close(26)
dir='c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM GENETIC ALGORITHM\LINEAR INTERPOLATION BLADE.dat'
open(26,file=dir, status='old')
q=0
loop_q:do j=1,1000
read(26,*,end=10)
q=q+1
10 continue
end do loop_q
close(26)
dir='c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM GENETIC ALGORITHM\LINEAR INTERPOLATION BLADE.dat'
24 format(f10.5,t13,f10.5,t26,f10.5)

```

END SUBROUTINE LINEAR_INTERPOLATION_BLADE

XFOILKEY.F90

```
SUBROUTINE XFOILKEY(RE,MACHN,j,n,kxk)
!1 Definitions of variables+++++++
implicit none
integer(4),intent(in) ::j,RE,kxk
real(8),intent(in)::MACHN
integer(4),intent(out)::n
real(8)::alpha,cl2,cd2,xtrftop,xtrfbottom,mach,reynolds,logn
integer(4)::cnv,crfv,i,power
character(4)::jst,frt
character(1)::dummy
!2 Conversion from integer to character+++++++
crfv=kxk
write (frt,'(I4)') crfv
frt=adjustl(frt)
cnv=j
write (jst,'(I4)') cnv
jst=adjustl(jst)
!3 Write XFOILCALL.key+++++++
open(20,file="c:\BEM\XFOILCALL\XFOILCALL.key")
write(20,FMT='(A1)')
write(20,*)'Load C:\BEM\INPUT\ARF\ARF//trim(frt)/'.dat'
write(20,*)'Aerofoil'
write(20,FMT='(A4)')
write(20,*)'oper'
write(20,*)'iter'
write(20,*)'5000'
write(20,*)'visc'
write(20,*)'RE'
write(20,*)',RE'
write(20,*)'M'
write(20,*) MACHN
write(20,*)'PACC'
write(20,*)'C:\BEM\XFOILCALL\dpl.pol'
write(20,FMT='(A15)')
write(20,*)'aseq -5 15 1'
write(20,FMT='(A17)')
write(20,FMT='(A18)')
write(20,FMT='(A19)')
write(20,FMT='(A20)')
write(20,FMT='(A21)')
write(20,FMT='(A22)')
write(20,FMT='(A23)')
write(20,FMT='(A24)')
write(20,FMT='(A25)')
write(20,FMT='(A26)')
write(20,FMT='(A27)')
write(20,FMT='(A28)')
```

```

write(20,*)'QUIT'
close(20)
angle_attack:do
open(5,file=c:\BEM\OUTPUT\AERFOIL_CHARACTERISTICS\cha'//trim(jst) //' .dat')
!4 Call XFOIL+++++++
call system ("c:\BEM\XFOILCALL\XFOILCALL.bat")
open(2,file=c:\BEM\XFOILCALL\dpl.pol)
read (2,FMT=(A1)) dummy
read (2,FMT=(A2)) dummy
read (2,FMT=(A3)) dummy
read (2,FMT=(A4)) dummy
read (2,FMT=(A5)) dummy
read (2,FMT=(A6)) dummy
read (2,FMT=(A7)) dummy
read(2,(t8,f5.3,t30,f5.3)) xtrftop,xtrfbottom
read(2,(t8,f5.3,t30,f5.3,t38,i1,t54,f5.3)) mach,reynolds,power,logn
read (2,FMT=(A10)) dummy
read (2,FMT=(A11)) dummy
read (2,FMT=(A12)) dummy
n=0
loop_nk:do i=1,1000
read(2,*,end=20) alpha,c2,cd2
write (5,55) alpha,c2,cd2,cd2/cd2
n=n+1
20 continue
end do loop_nk
close(2,status='delete')
close(5)
exit angle_attack
end do angle_attack
!5 Format+++++++
55 format(f10.5,t13,f10.5,t26,f10.5,t39,f10.5,t53,f10.5)
END SUBROUTINE XFOILKEY

```

Modules

MODULE CONVERGENCE.f90

```

MODULE MODULE_CONVERGENCE
implicit none
! Used interface with external subroutine+++++++
interface
SUBROUTINECONVERGENCE(W1,Vo,r1,c1,b1,BLADES,an,at,Cn,Ct,cl1,cd1,fr,fd,a_at,S,n,j,a1,max,min,Cp,Cth,Cm,Rt,Ad,Th,M,Po,sumTh,sumM,sumP,r0,Ftl,TSR,Re,sum_an,AR,Correction)
real(8),intent(inout)::an,at,sumTh,sumM,sum_an,sumP,r0,TSR,Vo,W1
real(8),intent (in) ::r1,c1,b1,Rt,Ad,AR
real(8),intent(out) ::Cn,Ct,cl1,cd1,fr,fd,a_at,S,a1,max,min,Cp,Cth,Cm,Th,M,Po,Ftl
integer(4),intent(in)::n,BLADES,j,Re,Correction
END SUBROUTINE CONVERGENCE
end interface
END MODULE MODULE_CONVERGENCE

```

```

MODULE LINEAR INTERPOLATION BLADE.f90

MODULE MODULE_LINEAR_INTERPOLATION_BLADE
implicit none
interface
SUBROUTINE LINEAR_INTERPOLATION_BLADE(dir,q)
character(60),intent(inout)::dir
integer(4),intent(inout)::q
END SUBROUTINE LINEAR_INTERPOLATION_BLADE
end interface
END MODULE MODULE_LINEAR_INTERPOLATION_BLADE

```

```

MODULE XFOILKEY.f90

MODULE MODULE_XFOILKEY
implicit none
! Used interface with external subroutine+++++++
interface
SUBROUTINE XFOILKEY(RE,MACHN,j,n,kxk)
integer(4),intent(in) ::j,RE,kxk
real(8),intent(in)::MACHN
integer(4),intent(out)::n
END SUBROUTINE XFOILKEY
end interface
END MODULE MODULE_XFOILKEY

```

Τα δεδομένα εισόδου τοποθετούνται στη θέση c:\BEM\INPUT\BLADE\// FILENAME1.dat για το πτερύγιο και για τις αεροτομές στη θέση c:\BEM\INPUT\ARF\ARF1..17.dat. Ενώ τα δεδομένα εξόδου στη θέση c:\BEM\OUTPUT\WIND TURBINE CHARACTERISTICS στα αρχεία Th_M_P.dat και P_T_M_Vo.dat

Παράρτημά II: Αλγόριθμος εύρεσης των τιμών της χορδής και της γωνίας βήματος του νέου πτερυγίου

Ακολουθεί ο κώδικας υπολογισμού των τιμών της χορδής και της γωνίας βήματος του νέου βελτιωμένου πτερυγίου. Ο κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα Fortran 90 και περιλαμβάνει το πρόγραμμα και την εξωτερική συνάρτηση. Ο κώδικας με την εκτέλεση του ζητά να επιλέξουμε της μεταβλητές.

Κυρίως πρόγραμμα

OPTIMIZATION.f90

```
PROGRAM OPTIMIZATION
!1 Used module+++++++
use Genetic_Algorithm
implicit none
!2 Definitions of variables and allocatable tables+++++++
integer(4)::seed,status,ig
integer(4),parameter::n =22
real(8):: ctrl(12), x(n),f,c_cr
real(8)::W
real(8),allocatable,dimension(:)::ax,c1,cd
real(8),allocatable,dimension(:)::Xc,Yc
real(8)::xtrftop,xtrfbottom,mach,power,logn,reynolds,alpha,c12,cd2
real(8)::Rt,R90,DR90,a_cr
real(8)::R_D,V_D1,V_D2,V_D3,Vd
real(8)::Re1,Re2,Rex,rak1,distance
real(8)::percent1,percent2,percent3
real(8)::Zc=0,Cpy,Cpx,Cpmax
real(8)::MACHN
real(8)::tsr
real(8)::AR
real(8)::rak1,rak2,rak3,rak4,rak5,rak6,rak7,rak8,rak9,rak10
real(8)::r1,r2,r3,r4,r5,r6,r7,r8,r9,r10,r11
real(8)::c1,c2,c3,c4,c5,c6,c7,c8,c9,c10,c11
real(8)::b1,b2,b3,b4,b5,b6,b7,b8,b9,b10,b11
real(8)::rx,cx,bx,kx,drx,r1x,c1x,b1x
integer(4)::Re
integer(4)::BLADES,RADIOUSSTEP=11
integer(4)::Op
integer(4)::value
integer(4)::i,j,cnv
integer(4)::k,crfv
integer(4)::nr,Correction
integer(4)::points,crd,rak
integer(4)::jx,kxi,lx
real(8),parameter::Ad=1.225 !air density in kg/m*3
```



```

real(8),parameter::Speed_of_sound=343.2
real(8),parameter::Visc=0.0001568 !viscosity in kgr/m*s
real(8),parameter::pi=3.141592654
character(1)::dummy
character(4)::jst
character(4)::frrt
!3 Used interface with internal function+++++
INTERFACE
FUNCTION CP_GEN(n, x) RESULT(fn_val)
IMPLICIT NONE
INTEGER(4),INTENT(IN)::n
REAL(8),INTENT(IN):: x(:)
REAL(8):: fn_val
END FUNCTION CP_GEN
END INTERFACE
!4 User inputs+++++
print*,'select Operation (for fixed speed operation write "1" and for variable speed operation write "2")'
read *,Op
if (Op==1) then
print*,'select W(rotational speed in rpm)'
read *,W
else if (Op==2) then
print*,'select tsr(tip speed ratio)'
read *,tsr
else
print*,'wrong operation number'
stop
end if
print*,'select R_D (demanding total rotor radius in m)'
read *,R_D
print*,'select the number of wind speed points {1-3}(demanding points optimization) '
read *,value
if (value==1) then
print*,'select percent1 {0.0-1.0} (demanding percent of power) '
read *,percent1
if (percent1<0.0.or.percent1>1.0) then
print*,'wrong number of demanding percent of power';stop
else
print*,'select V_D1 (demanding wind speed m/s) '
read *,V_D1
seed=V_D1*10000/Op
end if
else if (value==2) then
print*,'select percent1,percent2 {0.0-1.0} (demanding percent of power) '
read *,percent1,percent2
if ((percent1+percent2)<0.0.or.(percent1+percent2)>1.0) then
print*,'wrong number of demanding percent of power';stop
else
print*,'select V_D1,V_D2 (demanding wind speeds m/s) '
read *,V_D1,V_D2
seed=(V_D1+V_D2)*10000/Op

```

```

end if
else if (value==3) then
print*,'select percent1,percent2,percent3 {0.0-1.0} (demanding percent of power) '
read *,percent1,percent2,percent3
if ((percent1+percent2+percent3)<0.0.or.(percent1+percent2+percent3)>1.0) then
print*,'wrong number of demanding percent of power';stop
else
print*,'select V_D1,V_D2,V_D3 (demanding wind speeds m/s) '
read *,V_D1,V_D2,V_D3
seed=(V_D1+V_D2+V_D3)*10000/Op
end if
else
print*,'wrong number of wind speed points'
stop
end if
print*,'select the number of blades [integer]'
read *,BLADES
print*,'select the number of aspect ratio'
read *,AR
print*,'select Reynolds number for the local radius points for root and for tip {x10^6}'
print*,'Reynolds1=';read *,Re1
print*,'Reynolds2=';read *,Re2
print*,'select 3D Correction(for 3D correction write "1" else write "0")'
read *,Correction
!5 Determination of local radius points and limit of chord and pitch angle+++++
Rt=R_D
r1=0.13*Rt
r2=0.195*Rt
r3=0.25*Rt
r4=0.35*Rt
r5=0.45*Rt
r6=0.55*Rt
r7=0.65*Rt
r8=0.75*Rt
r9=0.85*Rt
r10=0.95*Rt
r11=0.99024*rt
c_cr=0.22*Rt
a_cr=90.0
Cpy=16
Cpx=27
Cpmax = Cpy/Cpx
Vd=(V_D1*percent1+V_D2*percent2+V_D3*percent3)
!6 Export Cl and Cd coefficient+++++
!6.1 Determination of Reynolds and Mach number-----
distance=(r11-r1)/90
rak1=(r11-r1)/distance+7
rak=ANINT(rak1)
Rex=abs((Re2-Re1))/rak
loop1:do j=1,rak
if(Re1>Re2) then

```

```

RE=( Re1 - Rex*j)*1000000
else
RE=( Rex*j + Re1)*1000000
end if
MACHN=Vd/(Speed_of_sound)
if (MACHN>0.25) MACHN=0.25
!6.2 Conversion from integer to character-----
rakx1=ANINT(rak*0.13/3)
rakx2=ANINT(rak*(0.195+0.25)/2)
rakx3=ANINT(rak*(0.25+0.35)/2)
rakx4=ANINT(rak*(0.35+0.45)/2)
rakx5=ANINT(rak*(0.45+0.55)/2)
rakx6=ANINT(rak*(0.55+0.65)/2)
rakx7=ANINT(rak*(0.65+0.75)/2)
rakx8=ANINT(rak*(0.75+0.85)/2)
rakx9=ANINT(rak*(0.85+0.90)/2)
rakx10=ANINT(rak*(0.9+0.99024)/2)
if (rakx1<1) rakx1=1
if (j<=rakx1) k=1
if (j>rakx1.and.j<=rakx2) k=2
if (j>rakx2.and.j<=rakx3) k=3
if (j>rakx3.and.j<=rakx4) k=4
if (j>rakx4.and.j<=rakx5) k=5
if (j>rakx5.and.j<=rakx6) k=6
if (j>rakx6.and.j<=rakx7) k=7
if (j>rakx7.and.j<=rakx8) k=8
if (j>rakx8.and.j<=rakx9) k=9
if (j>rakx9.and.j<=rakx10) k=10
if (j>rakx10) k=11
crfv=k
write (frt,'(I4)') crfv
frt=adjustl(frt)
cnv=j
write (jst,'(I4)') cnv
jst=adjustl(jst)
!6.3 Read airfoils geometry from ARF"j".dat-----
open(30,file='c:\BEM\INPUT\ARF\ARF'//trim(frt)//'.dat')
crd=0
loopxyz:do points=1,1000
read(30,*,end=15)
crd=crd+1
print*,crd=',crd
15 continue
end do loopxyz
close(30)
open(30,file='c:\BEM\INPUT\ARF\ARF'//trim(frt)//'.dat')
open(40,file='c:\BEM\OUTPUT\AERFOIL XYZ FOR SOLIDWORKS\XYZ'//trim(jst)//'.txt')
allocate(Xc(crd),Yc(crd))
do points=1,crd
read (30,*)Xc(points),Yc(points)
write(40,65)Xc(points),Yc(points),Zc

```

```

end do
close(40)
close(30)
deallocate (Xc,Yc)
!6.4 Write XFOILCALL.key-----
open(20,file="c:\BEM\XFOILCALL\XFOILCALL.key")
write(20,FMT=(A1))
write(20,*)'Load C:\BEM\INPUT\ARF\ARF//trim(frt)//'.dat'
write(20,*)'Aerofoil'
write(20,FMT=(A4))
write(20,*)'oper'
write(20,*)'iter'
write(20,*)'5000'
write(20,*)'visc'
write(20,*)'RE'
write(20,*)RE
write(20,*)'M'
write(20,*) MACHN
write(20,*)'PACC'
write(20,*)'C:\BEM\XFOILCALL\dpl.pol'
write(20,FMT=(A15))
write(20,*)'aseq -5 15 1'
write(20,FMT=(A17))
write(20,FMT=(A18))
write(20,FMT=(A19))
write(20,FMT=(A20))
write(20,FMT=(A21))
write(20,FMT=(A22))
write(20,FMT=(A23))
write(20,FMT=(A24))
write(20,FMT=(A25))
write(20,FMT=(A26))
write(20,FMT=(A27))
write(20,FMT=(A28))
write(20,*)'QUIT'
close(20)
!6.5 Execution of XFOIL and write of Cha".dat-----
angle_attack:do
open(5,file="c:\BEM\OUTPUT\AERFOIL CHARACTERISTICS\cha//trim(jst)//'.dat')
!6.6 Call XFOIL-----
call system ("c:\BEM\XFOILCALL\XFOILCALL.bat")
open (2,file="c:\BEM\XFOILCALL\dpl.pol")
read (2,FMT=(A1)) dummy
read (2,FMT=(A2)) dummy
read (2,FMT=(A3)) dummy
read (2,FMT=(A4)) dummy
read (2,FMT=(A5)) dummy
read (2,FMT=(A6)) dummy
read (2,FMT=(A7)) dummy
read (2,(t8,f5.3,t30,f5.3)) xtrftop,xtrfbottom
read (2,(t8,f5.3,t30,f5.3,t38,i1,t54,f5.3)) mach,reynolds,power,logn

```

```

read (2,FMT='(A10)') dummy
read (2,FMT='(A11)') dummy
read (2,FMT='(A12)') dummy
nr=0
loop_nk:do i=1,1000
read(2,*,end=20) alpha,cl2,cd2
write (5,55) alpha,cl2,cd2,cl2/cd2
nr=nr+1
20 continue
end do loop_nk
close(2,status='delete')
close(5)
exit angle_attack
end do angle_attack
end do loop1
r1=0.13*Rt
r2=0.195*Rt
r3=0.25*Rt
r4=0.35*Rt
r5=0.45*Rt
r6=0.55*Rt
r7=0.65*Rt
r8=0.75*Rt
r9=0.85*Rt
r10=0.95*Rt
r11=0.99024*rt
!7 Write data inputs for the function+++++++
open(10,file="c:\BEM\INPUT\INPUT PIKAIA\INPUT_PIK.dat")
if (Op==1) then
write (10,11) W,BLADES,Rt,r1,c_cr,a_cr,RADIOUSSSTEP,AR,value,distance,Correction
write (10,12) V_D1,V_D2,V_D3,percent1,percent2,percent3
else if (Op==2) then
write (10,11) tsr,BLADES,Rt,r1,c_cr,a_cr,RADIOUSSSTEP,AR,value,distance,Correction
write (10,12) V_D1,V_D2,V_D3,percent1,percent2,percent3
end if
close (10)
open(16,file="c:\BEM\INPUT\INPUT PIKAIA\OPERATION.dat")
write (16,*)Op
close (16)
!8 Select PIKAIA operators+++++++
if (seed>123456) then
seed=1000*123456/seed
else
seed=seed
end if
print*,seed
CALL rninit(seed)
!8.1 PIKAIA Input/Output-----
ctrl(1)=200 !number of individuals in a population
ctrl(2)=80 !number of generations over which solution is to evolve
ctrl(3)=9 !number of significant digits

```

```

ctrl(4)=0.6 !crossover probability
ctrl(5)=2 !mutation mode; 1/2=steady/variable
ctrl(6)=0.005 !initial mutation rate
ctrl(7)=0.005 !minimum mutation rate
ctrl(8)=0.05 !maximum mutation rate
ctrl(9)=1 !relative fitness differential
ctrl(10)=3 !reproduction plan; 1/2/3
ctrl(11)=1 !elitism flag
ctrl(12)=0 !printed output 0/1/2=None/Minimal/Verbose
!9 Open BLADE.dat+++++++
open (3,file="c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM GENETIC ALGORITHM\BLADE.dat")
!10 CALL PIKAIA+++++++
CALL pikaia(CP_GEN,n,ctrl,x,f,STATUS,ig,c_cr)
WRITE (*,*) ' status: ', STATUS
WRITE (*,*) ' ig: ', ig
WRITE (*,*) ' x: ', x
WRITE (*,*) ' f: ', f
WRITE (*,5000) ctrl
close (3)
!10 Write OPTIMUM BLADE.dat
open (13,file="c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM GENETIC ALGORITHM\OPTIMUM BLADE.dat")
write (13,34)r1,x(1)*c_cr,x(2)*90
write (13,34)r2,x(3)*c_cr,x(4)*90
write (13,34)r3,x(5)*c_cr,x(6)*90
write (13,34)r4,x(7)*c_cr,x(8)*90
write (13,34)r5,x(9)*c_cr,x(10)*90
write (13,34)r6,x(11)*c_cr,x(12)*90
write (13,34)r7,x(13)*c_cr,x(14)*90
write (13,34)r8,x(15)*c_cr,x(16)*90
write (13,34)r9,x(17)*c_cr,x(18)*90
write (13,34)r10,x(19)*c_cr,x(20)*90
write (13,34)r11,x(21)*c_cr,x(22)*90
write (13,34) f,f*Cpmax
close (13)
!10.1 Linear interpolation of local radius points, local chord and local pitch angle+++++++
c1=x(1)*c_cr
b1=x(2)*a_cr
c2=x(3)*c_cr
b2=x(4)*a_cr
c3=x(5)*c_cr
b3=x(6)*a_cr
c4=x(7)*c_cr
b4=x(8)*a_cr
c5=x(9)*c_cr
b5=x(10)*a_cr
c6=x(11)*c_cr
b6=x(12)*a_cr
c7=x(13)*c_cr
b7=x(14)*a_cr
c8=x(15)*c_cr
b8=x(16)*a_cr

```

```

c9=x(17)*c_cr
b9=x(18)*a_cr
c10=x(19)*c_cr
b10=x(20)*a_cr
c11=x(21)*c_cr
b11=x(22)*a_cr
open(26,file='c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM GENETIC ALGORITHM\LINEAR INTERPOLATION OPTIMUM BLADE.dat')
loop_5:do lx=1,RADIOUSSSTEP
if (lx.eq.1) then
write (26,24) r1,c1,b1
rx=(r2-r1)
cx=(c2-c1)
bx=(b2-b1)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r1
c1x=c1+cx*(r1x-r1)/rx
b1x=b1+bx*(r1x-r1)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.2) then
write (26,24) r2,c2,b2
rx=(r3-r2)
cx=(c3-c2)
bx=(b3-b2)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r2
c1x=c2+cx*(r1x-r2)/rx
b1x=b2+bx*(r1x-r2)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.3) then
write (26,24) r3,c3,b3
rx=(r4-r3)
cx=(c4-c3)
bx=(b4-b3)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r3
c1x=c3+cx*(r1x-r3)/rx
b1x=b3+bx*(r1x-r3)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.4) then

```

```

write (26,24) r4,c4,b4
rx=(r5-r4)
cx=(c5-c4)
bx=(b5-b4)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r4
c1x=c4+cx*(r1x-r4)/rx
b1x=b4+bx*(r1x-r4)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.5) then
write (26,24) r5,c5,b5
rx=(r6-r5)
cx=(c6-c5)
bx=(b6-b5)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r5
c1x=c5+cx*(r1x-r5)/rx
b1x=b5+bx*(r1x-r5)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.6) then
write (26,24) r6,c6,b6
rx=(r7-r6)
cx=(c7-c6)
bx=(b7-b6)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r6
c1x=c6+cx*(r1x-r6)/rx
b1x=b6+bx*(r1x-r6)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.7) then
write (26,24) r7,c7,b7
rx=(r8-r7)
cx=(c8-c7)
bx=(b8-b7)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r7

```



```

c1x=c7+cx*(r1x-r7)/rx
b1x=b7+bx*(r1x-r7)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.8) then
write (26,24) r8,c8,b8
rx=(r9-r8)
cx=(c9-c8)
bx=(b9-b8)
kx=rx/distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r8
c1x=c8+cx*(r1x-r8)/rx
b1x=b8+bx*(r1x-r8)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.9) then
write (26,24) r9,c9,b9
rx=(r10-r9)
cx=(c10-c9)
bx=(b10-b9)
kx=rx/distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r9
c1x=c9+cx*(r1x-r9)/rx
b1x=b9+bx*(r1x-r9)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.10) then
write (26,24) r10,c10,b10
rx=(r11-r10)
cx=(c11-c10)
bx=(b11-b10)
kx=rx/distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r10
c1x=c10+cx*(r1x-r10)/rx
b1x=b10+bx*(r1x-r10)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.11) then
write (26,24) r11,c11,b11
else
stop
end if

```

```

end do loop_5
close (26)
STOP
5000 FORMAT (' ctrl: ', 6F9.5 / t11, 6F9.5)
11 format(f6.2,t8,i3,t13,f6.2,t21,f6.2,t29,f6.3,t37,f5.1,t43,i3,t47,f4.1,t55,i2,t60,f7.5,t70,i2)
12 format(f6.2,t8,f6.2,t16,f6.2,t24,f4.2,t30,f4.2,t36,f4.2)
55 format(f8.3,t10,f8.3,t20,f8.3,t30,f9.5,t42,f9.5,t53,f8.3,t63,i4,t70,f8.5,t80,f8.5)
33 format(2x,a4,t12,a4,t22,a4,t31,a4,t43,a4,t57,a4,t63,a4,t71,a6,t81,a3)
65 format(f7.5,t9,f7.5,t17,f7.5)
34 format(f6.3,t8,f6.3,t16,f6.3)
24 format(f10.5,t13,f10.5,t26,f10.5)
END PROGRAM OPTIMIZATION

```

FUNCTION CP_GEN(n,x) RESULT(fn_val)

```

!I1 Internal function CP_GEN+++++
FUNCTION CP_GEN(n,x) RESULT(fn_val)
IMPLICIT NONE
!I2 Definitions of variables and allocatable tables+++++
INTEGER(4), INTENT(IN):: n
REAL(8),INTENT(IN):: x(:)
REAL(8):: fn_val
real(8)::an=0.0,at=0.0
real(8)::W
real(8)::Vo
real(8)::fr
real(8)::fd
real(8)::Cn
real(8)::Ct
real(8)::S
real(8)::a_at
real(8)::Cp
real(8)::Cth
real(8)::Rt
real(8)::TSR
real(8)::Cd90,B2N,A2
real(8)::yr,xr,a1,c1,c2,b_c2,w1,w1_limit,t,max,min,cli,cdi,k1,anp
real(8)::r1,r2,r3,r4,r5,r6,r7,r8,r9,r10,r11
real(8)::c1,c2,c3,c4,c5,c6,c7,c8,c9,c10,c11
real(8)::b1,b2,b3,b4,b5,b6,b7,b8,b9,b10,b11
real(8)::rx,cx,bx,kx,drx,r1x,c1x,b1x
real(8)::r0,R90,DR90
real(8)::FtL,Cp1,Cp2,Cp3
real(8)::Cpy,Cpx,c_cr,a_cr
real(8)::par1,par2,par5,an1,par6,par7,Cpmax
real(8)::andummy,atdummy,dan,dat,Clmin,CImax,Cdmin,Cdmax,ar1,ar2,par4
real(8)::Rt1,Rt2,Rt3,V_D1,V_D2,V_D3
real(8)::percent1,percent2,percent3
real(8)::Cpm1,Cpm2,Cpm3,Cpmt
real(8)::x1,x2,x3
real(8)::Po1,Po2,Po3,sumPo1=0.0,sumPo2=0.0,sumPo3=0.0,sumPot,Po,dr,r0c,r1_in

```

```

real(8)::AR
real(8)::a0,g,da
real(8)::xg1,xg2
real(8)::k,ftlx,distance
real(8)::Ftl_tip,Ftl_root,f_tip,partip,parroot,f_root,Root
real(8),parameter::pi=3.141592654,tol=10e-5,ac=0.2,Ad=1.225
real(8),parameter::Visc=0.00001568 !viscosity in kgr/m*s

real(8),allocatable,dimension(:)::ax,c,l,cd
real(8),allocatable,dimension(:)::rb,cb,bb
integer(4)::nr,Correction

integer(4)::i,q,qk=0,step
integer(4)::BLADES,RADIOUSSTEP
integer(4)::j,cnv
integer(4)::Op
integer(4)::value
integer(4)::jx,kxi,lx
character(4)::jst
!13 Read operation+++++++
open(16,file="c:\BEM\INPUT\INPUT PIKAIA\OPERATION.dat")
read(16,*)Op
close (16)
!14 Read data inputs+++++++
open(10,file="c:\BEM\INPUT\INPUT PIKAIA\INPUT_PIK.dat")
if (Op==1) then
read(10,*)W,BLADES,Rt,r1,c_cr,a_cr,RADIOUSSTEP,AR,value,distance,Correction
read(10,*)V_D1,V_D2,V_D3,percent1,percent2,percent3
else if (Op==2) then
read(10,*)tsr,BLADES,Rt,r1,c_cr,a_cr,RADIOUSSTEP,AR,value,distance,Correction
read(10,*)V_D1,V_D2,V_D3,percent1,percent2,percent3
end if
close (10)
!15 Determination of local radius points and limit of chord and pitch angle+++++++
r1=0.13*Rt
r2=0.195*Rt
r3=0.25*Rt
r4=0.35*Rt
r5=0.45*Rt
r6=0.55*Rt
r7=0.65*Rt
r8=0.75*Rt
r9=0.85*Rt
r10=0.95*Rt
r11=0.99024*rt
a_cr=90.0
r1_in=r1
r0=0.95*r1_in
Cpy=16
Cpx=27
Cpmax = Cpy/Cpx
Rroot=0.06*Rt

```

```

c1=x(1)*c_cr
b1=x(2)*a_cr
c2=x(3)*c_cr
b2=x(4)*a_cr
c3=x(5)*c_cr
b3=x(6)*a_cr
c4=x(7)*c_cr
b4=x(8)*a_cr
c5=x(9)*c_cr
b5=x(10)*a_cr
c6=x(11)*c_cr
b6=x(12)*a_cr
c7=x(13)*c_cr
b7=x(14)*a_cr
c8=x(15)*c_cr
b8=x(16)*a_cr
c9=x(17)*c_cr
b9=x(18)*a_cr
c10=x(19)*c_cr
b10=x(20)*a_cr
c11=x(21)*c_cr
b11=x(22)*a_cr

!15.1 Linear interpolation of local radius points, local chord and local pitch angle+++++
open(26,file='c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM GENETIC ALGORITHM\LINEAR INTERPOLATION BLADE.dat')
loop_5:do lx=1,RADIOUSSTEP
if (lx.eq.1) then
write (26,24) r1,c1,b1
rx=(r2-r1)
cx=(c2-c1)
bx=(b2-b1)
kx=rx/distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r1
c1x=c1+cx*(r1x-r1)/rx
b1x=b1+bx*(r1x-r1)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.2) then
write (26,24) r2,c2,b2
rx=(r3-r2)
cx=(c3-c2)
bx=(b3-b2)
kx=rx/distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r2
c1x=c2+cx*(r1x-r2)/rx
b1x=b2+bx*(r1x-r2)/rx

```

```

write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.3) then
write (26,24) r3,c3,b3
rx=(r4-r3)
cx=(c4-c3)
bx=(b4-b3)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r3
c1x=c3+cx*(r1x-r3)/rx
b1x=b3+bx*(r1x-r3)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.4) then
write (26,24) r4,c4,b4
rx=(r5-r4)
cx=(c5-c4)
bx=(b5-b4)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r4
c1x=c4+cx*(r1x-r4)/rx
b1x=b4+bx*(r1x-r4)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.5) then
write (26,24) r5,c5,b5
rx=(r6-r5)
cx=(c6-c5)
bx=(b6-b5)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r5
c1x=c5+cx*(r1x-r5)/rx
b1x=b5+bx*(r1x-r5)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.6) then
write (26,24) r6,c6,b6
rx=(r7-r6)
cx=(c7-c6)
bx=(b7-b6)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)

```

```

drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r6
c1x=c6+cx*(r1x-r6)/rx
b1x=b6+bx*(r1x-r6)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do

else if (lx.eq.7) then
write (26,24) r7,c7,b7
rx=(r8-r7)
cx=(c8-c7)
bx=(b8-b7)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r7
c1x=c7+cx*(r1x-r7)/rx
b1x=b7+bx*(r1x-r7)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do

else if (lx.eq.8) then
write (26,24) r8,c8,b8
rx=(r9-r8)
cx=(c9-c8)
bx=(b9-b8)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r8
c1x=c8+cx*(r1x-r8)/rx
b1x=b8+bx*(r1x-r8)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do

else if (lx.eq.9) then
write (26,24) r9,c9,b9
rx=(r10-r9)
cx=(c10-c9)
bx=(b10-b9)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r9
c1x=c9+cx*(r1x-r9)/rx
b1x=b9+bx*(r1x-r9)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do

else if (lx.eq.10) then
write (26,24) r10,c10,b10

```

```

rx=(r11-r10)
cx=(c11-c10)
bx=(b11-b10)
kx=rx/ distance
kxi=ANINT(kx)
drx=rx/kxi
do jx=1,kxi-1
r1x=drx*jx+r10
c1x=c10+cx*(r1x-r10)/rx
b1x=b10+bx*(r1x-r10)/rx
write (26,24) r1x,c1x,b1x
end do
else if (lx.eq.11) then
write (26,24) r11,c11,b11
else
stop
end if
end do loop_5
close (26)
open(26,file='c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM GENETIC ALGORITHM\LINEAR INTERPOLATION BLADE.dat', status='old')
q=0
loop_q:do j=1,1000
read(26,*,end=10)
q=q+1
10 continue
end do loop_q
close(26)
!16 Start of BEM+++++++
open(26,file='c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM GENETIC ALGORITHM\LINEAR INTERPOLATION BLADE.dat', status='old')
allocate(rb(q),cb(q),bb(q))
loop1:do j=1,q
read(26,*)rb(j),cb(j),bb(j)
r1=rb(j)
c1=cb(j)
b1=bb(j)
!16.1 Input of adjustable parameters in to BEM+++++++
Po1=0.0
Po2=0.0
Po3=0.0
!16.2 Input values of wind speed in to BEM+++++++
loopvd: do step=1,value
if (step.eq.1) then
Vo=V_D1
else if (step.eq.2) then
Vo=V_D2
else if (step.eq.3) then
Vo=V_D3
else
stop
end if
qk=0

```

```

andummy=100
atdummy=100
dan=abs(an-andummy)
dat=abs(at-atdummy)
!16.3 Start of convergence+++++++
loop_a:do while ((dan>=tol).or.(dat>=tol))
qk=qk+1
andummy=an
atdummy=at
!16.4 Calculation of rotational speed in rad/sec+++++++
if (Op==1) then
w1=W*2*pi/60.0
else if (Op==2) then
w1=(tsr*Vo)/Rt
w1_limit=60/Rt
if (w1>w1_limit) w1=w1_limit
end if
tsr=(w1*Rt)/Vo
yr =(1-an)*Vo
xr =(1+at)*w1*r1
loopx:    if (xr.eq.0) then
xr=0.0000000001
else loopx
xr=xr
end if loopx
!16.5 Calculation of angle flow+++++++
fr=ATAN2(yr,xr)
loopfr:if (fr.eq.0.0) then
fr=0.0000000001
else loopfr
fr=fr
end if loopfr
fd=fr*180.0/pi
a1=fd-b1
t=ANINT(a1)
!16.6 Calculation of solidity
S=(c1*BLADES)/(2.*pi*r1)
!16.7 Calculation of Prandtl's tip loss factor+++++++
f_tip=(BLADES*(Rt-r1))/(2*r1*sin(fr))
partip=(cos(exp(-f_tip))/pi)
looptip:if (partip.eq.0.0) then
partip=0.0000000001
else looptip
partip=partip
end if looptip
Ftl_tip=2*partip
ftlx=r1/Rt
if((ftlx)>=0.7) then
Ftl_tip=((Ftl_tip**0.85+0.5))/2
else
Ftl_tip=1-(r1/Rt)*(1-Ftl_tip)/0.7

```



```

end if

!16.7.1 Calculation of Prandtl's root loss factor+++++++
f_root=(BLADES*(r1-Rroot))/(2*r1*sin(fr))
parroot=(cos(exp(-f_root))/pi)
looproot:if (parroot.eq.0.0) then
parroot=0.0000000001
else looproot
parroot=parroot
end if looproot
Ftl_root=2*parroot

!16.7.3 Calculation of total Prandtl's loss factor+++++++
Ftl=Ftl_tip*Ftl_root

!17 Read lift and drag coefficient+++++++
cnv=j
write (jst,'(I4)') cnv
jst=adjustl(jst)
open(5,file='c:\BEM\OUTPUT\AERFOIL CHARACTERISTICS\cha'//trim(jst)//'.dat',status='old')
nr=0
loop_nr:do w1=1,1000
read(5,*,end=25)
nr=nr+1
25 continue
end do loop_nr
close(5)
open(5,file='c:\BEM\OUTPUT\AERFOIL CHARACTERISTICS\cha'//trim(jst)//'.dat',status='old')
allocate(ax(nr),cl(nr),cd(nr))
loopmax:do i=1,nr
read(5,*)ax(i),cl(i),cd(i)
end do loopmax
close(5)
min=ax(1)
max=ax(nr)
Clmin=cl(1)
Clmax=cl(nr)
Cdmin=cd(1)
Cdmax=cd(nr)
a0=min
deallocate(ax,cl,cd)
open(5,file='c:\BEM\OUTPUT\AERFOIL CHARACTERISTICS\cha'//trim(jst)//'.dat',status='old')
allocate(ax(nr),cl(nr),cd(nr))
loop2:do i=1,nr
read(5,*)ax(i),cl(i),cd(i)
mangle:if(a1<min) then
cl1=-1.5
cd1=0.3
a_at=t
!17 Viterna's equations+++++++
else if(a1>max.and.a1<(90)) then mangle
a1=a1*pi/180.0
max=max*pi/180.0
Cd90=1.11 + 0.018*AR

```

```

B2N=(Cdmax-Cd90*(sin(max))**2)/cos(max)
Cd1=Cd90*(sin(a1))**2 + B2N*COS(a1)
A2=(Cdmax-Cd90*sin(max)*cos(max))*sin(max)/((cos(max))**2)
Cl1= Cd90*sin(2*a1)/2 + A2*(cos(a1))**2/sin(a1)
else if(a1==90) then mangle
Cd1=1.11 + 0.018*AR
Cl1=0.0
else if(a1>90) then mangle
Cl1=-0.5
Cd1=1.0
!19 Linear interpolation+++++
else mangle
in1:if(ax(i)==t)then
a_at=ax(i)
Cli=cl(i)
Cdi=cd(i)
k1=(a_at)-(a1)
in2:if(k1<0.0) then
ar1=((cl(i+1)-cl(i))*(a1-ax(i)))
par1=(ax(i+1)-ax(i))
cl1=cl(i) + (ar1/par1)
ar2=((cd(i+1)-cd(i))*(a1-ax(i)))
par2=(ax(i+1)-ax(i))
cd1=cd(i) + (ar2/par2)
else if(k1>0) then in2
ar1=((cli-cl(i-1))*(a1-ax(i-1)))
par1=(a_at-ax(i-1))
cl1=cl(i-1) + (ar1/par1)
ar2=((cdi-cd(i-1))*(a1-ax(i-1)))
par2=(a_at-ax(i-1))
cd1=cd(i-1)+(ar2/par2)
else in2
cl1=cli
cd1=cdi
end if in2
end if in1
end if mangle
end do loop2
close(5)
if (Correction==1) then
if (a1<30.and.a1>0) then
g=1
else if (a1<60.and.a1>=30) then
g=0.5*(1+cos((6*a1-180)*pi/180))
else
g=0
end if
da=(a1-a0)*pi/180
Cl1=cl1 + ((3.1*tsr**2)/(1+tsr**2))*g*((c1/r1)**2)*((sin(da)-cl1))
else
Cl1=Cl1

```

```

!Cd1=Cd1
end if
!19 Calculation of load coefficients+++++++
deallocate(ax,cl,cd)
Cn=C11*cos(fr)+Cd1*sin(fr)
Ct=C11*sin(fr)-Cd1*cos(fr)
!20 Calculation of axial induction factor+++++++
par4=(S*Cn)
looppar4:if (par4.eq.0.0) then
par4=0.0000000001
else looppar4
par4=par4
end if looppar4
par5=((4.0*Ftl*sin(fr)**2)/par4+1)
looppar5:if (par5.eq.0.0) then
par5=0.0000000001
else looppar5
par5=par5
end if looppar5
an= 1.0/par5
!21 Calculation of tangential induction factor+++++++
par6=(S*Ct)
looppar6:if (par6.eq.0.0) then
par6=0.0000000001
else looppar6
par6=par6
end if looppar6
par7=((4.0*Ftl*sin(fr)*cos(fr))/par6-1)
looppar7:if (par7.eq.0.0) then
par7=0.0000000001
else looppar7
par7=par7
end if looppar7
at= 1.0/par7
!21 Glauert correction if (an>0.2)+++++++
Corr:if (an>ac) then
K=(4*Ftl*sin(fr)**2)/par4
x1=2+K*(1-2*ac)
x2=(K*(1-2*ac)+2)**2
x3=4*(K*ac**2-1)
an=0.5*(x1-(abs(x2+x3))**0.5)
else Corr
an=an
end if Corr
!22 Restrictions+++++++
if (qk==40) then
an=0.0
at=at
exit loop_a
else if ( a1<min.or.a1>max) then
an=0.0

```

```

at=at
exit loop_a
else if (an>1.0 ) then
an=1.0
at=at
exit loop_a
else if (an<0.0) then
an=0.0
at=at
exit loop_a
else if (at<0.0) then
an=0.0
at=0.0
exit loop_a
else if (j==(q-8) .and. ( b1>b_c2 .or. c1>c_c2) ) then
an=0.0
at=0.0
exit loop_a
else if (j==(q-7) .and. ( b1>b_c2 .or. c1>c_c2) ) then
an=0.0
at=0.0
exit loop_a
else if (j==(q-6) .and. ( b1>b_c2 .or. c1>c_c2) ) then
an=0.0
at=0.0
exit loop_a
else if (j==(q-5) .and. ( b1>b_c2 .or. c1>c_c2) ) then
an=0.0
at=0.0
exit loop_a
else if (j==(q-4) .and. ( b1>b_c2 .or. c1>c_c2) ) then
an=0.0
at=0.0
exit loop_a
else if (j==(q-3) .and. ( b1>b_c2 .or. c1>c_c2) ) then
an=0.0
at=0.0
exit loop_a
else if (j==(q-2) .and. ( b1>b_c2 .or. c1>c_c2) ) then
an=0.0
at=0.0
exit loop_a
else if (j==(q-1) .and. ( b1>b_c2 .or. c1>c_c2) ) then
an=0.0
at=0.0
exit loop_a
else if (j==q .and. ( b1>b_c2 .or. c1>c_c2) ) then
an=0.0
at=0.0
exit loop_a
else

```

```

qk=qk
end if
dan=abs(an-andummy)
dat=abs(at-atdummy)
end do loop_a
!23 Calculation of local Cp coefficient and local Power+++++++
if(an>0.0) print*,an,qk
Cp=4*an*(1-an)**2
dr=abs((r1**2-r0**2)/2)
Po=2*Ad*pi*dr*(Vo**3)*Cp/2
if (step.eq.1) then
Po1=Po
Cp1=Cp
else if (step.eq.2) then
Po2=Po
Cp2=Cp
else if (step.eq.3) then
Po3=Po
Cp3=Cp
else
stop
end if
qk=0
an=0
at=0
end do loopvd
sumPo1 =Po1+sumPo1
sumPo2 =Po2+sumPo2
sumPo3 =Po3+sumPo3
c_c2=c1
b_c2=b1
qk=0
an=0
at=0
!24 Write BLADE.dat+++++++
write (3,55) r1,c1,b1,Cp1,Cp2,Cp3,percent1,percent2,percent3,j
r0=r1
end do loop1
if (value.eq.1) then
V_D1=V_D1
V_D2=0.000001
V_D3=0.000001
else if (value.eq.2) then
V_D1=V_D1
V_D2=V_D2
V_D3=0.000001
else if (value.eq.3) then
V_D1=V_D1
V_D2=V_D2
V_D3=V_D3
else

```

```

stop
end if
!25 Calculation of total Cp coefficient and total Power+++++++
sumPo1=sumPo1-0.05*sumPo1
sumPo2=sumPo2-0.05*sumPo2
sumPo3=sumPo3-0.05*sumPo3
Cpm1=2*sumPo1/(Ad*pi*(Rt**2)*V_D1**3)
Cpm2=2*sumPo2/(Ad*pi*(Rt**2)*V_D2**3)
Cpm3=2*sumPo3/(Ad*pi*(Rt**2)*V_D3**3)
Cpmt=percent1*Cpm1+percent2*Cpm2+percent3*Cpm3
if(Cpmt<=0.0) Cpmt=0.00000001
fn_val=Cpmt/Cpmax
sumPot=percent1*sumPo1+percent2*sumPo2+percent3*sumPo3
write (3,*)'f=', fn_val,'Cp=',fn_val*0.592592593
write (3,*)'sumPot=',sumPot/1000,(KW)'
write (3,*)'-----'
sumPo1 =0
sumPo2 =0
sumPo3 =0
Cpmt=0.0
qk=0
an=0
at=0
r0=0.9*r1_in
r1=r1_in
close(26)
deallocate(rb,cb,bb)
55 format(f10.5,t13,f10.5,t26,f10.5,t39,f11.9,t53,f8.5,t63,f8.5,t73,f8.5,t83,f8.5,t95,f8.5,t104,i4)
24 format(f10.5,t13,f10.5,t26,f10.5)
RETURN
END FUNCTION CP_GEN

```

Τα δεδομένα εισόδου τοποθετούνται για τις αεροτομές στη θέση c:\BEM\INPUT\ARF\ARF1..17.dat. Ενώ τα δεδομένα εξόδου στη θέση c:\BEM\OUTPUT\OPTIMUM BLADE FROM GENETIC ALGORITHM στα αρχεία BLADE.dat, OPTIMUM BLADE.dat και LINEAR INTERPOLATION OPTIMUM BLADE.dat

Παράρτημα III: Αποτελέσματα

Σενάριο 1

Ptotal	Mtotal	Ttotal	Cptotal	Cmtotal	Cttotal	a average	TSR	V ₀
0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	2
0	0	0	0	0	0	0	0	3
6994,373	2063,414	5199,253	0,135	0,008	0,402	0,794	14,54	4
23824,97	9156,431	13693,41	0,236	0,022	0,677	0,567	11,64	5
54902	25891,97	23606,32	0,314	0,043	0,811	0,538	9,7	6
105773,6	48741,32	34830,18	0,381	0,06	0,879	0,499	8,31	7
173823	76744,1	46711,23	0,42	0,072	0,903	0,475	7,27	8
270972,4	113778,7	59604,98	0,46	0,085	0,91	0,439	6,46	9
367521,5	149503,1	69416,42	0,454	0,09	0,858	0,377	5,82	10
428748,7	164744,7	69774,07	0,398	0,082	0,713	0,271	5,29	11
500236,5	178189,1	69481,02	0,358	0,075	0,597	0,204	4,85	12
523644,9	165131,8	60781,8	0,295	0,059	0,445	0,135	4,48	13
449134,5	111256,8	41761,36	0,202	0,034	0,263	0,073	4,16	14
381710,1	62904,41	29248,68	0,14	0,017	0,161	0,047	3,88	15
376328,3	34561,33	25839,53	0,114	0,008	0,125	0,041	3,64	16
356785,7	37830,35	31516,59	0,113	0,008	0,125	0,043	3,42	17
347480,9	41965,04	20923,48	0,074	0,008	0,08	0,019	3,23	18
368247	45679,23	20982,6	0,066	0,008	0,072	0,016	3,06	19
354726,6	49847,74	19142,38	0,055	0,008	0,059	0,013	2,91	20
323097,4	53815,82	16533,06	0,043	0,007	0,046	0,01	2,77	21
284638,9	57828,07	13834,03	0,033	0,007	0,035	0,008	2,64	22
232101,5	62360,55	10726,4	0,024	0,007	0,025	0,006	2,53	23
206350,2	66921,63	9116,478	0,018	0,007	0,02	0,004	2,42	24
215564,3	71000,62	9140,471	0,017	0,007	0,018	0,004	2,33	25

Σενάριο 2

Ptotal	Mtotal	Ttotal	Cptotal	Cmtotal	Cttotal	a average	TSR	V ₀
0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	2
0	0	0	0	0	0	0	0	3
19156,48	3910,204	8590,113	0,37	0,015	0,664	0,489	14,54	4
43963,32	13737,95	14931,38	0,435	0,033	0,739	0,396	11,64	5
82444,07	30518,53	23930,73	0,472	0,051	0,772	0,279	9,7	6
139516,6	52488,41	33169,84	0,503	0,065	0,817	0,295	8,31	7
221795,2	79188,27	42567,93	0,536	0,075	0,823	0,293	7,27	8
314192,1	111034,6	52431,98	0,533	0,083	0,8	0,287	6,46	9
416457,7	148206,9	62151,33	0,515	0,089	0,769	0,274	5,82	10
497810,4	170594,5	64482,69	0,463	0,085	0,659	0,2	5,29	11
575304,6	191336,9	65520,96	0,412	0,08	0,563	0,157	4,85	12
659119,1	212781	66861,61	0,371	0,076	0,489	0,131	4,48	13
724802,2	225166,3	65900,25	0,327	0,069	0,416	0,107	4,16	14
781309,1	231068,1	64030,75	0,286	0,062	0,352	0,089	3,88	15
598169,1	153647,2	43482,52	0,181	0,036	0,21	0,055	3,64	16
325245,8	47515,39	21043,11	0,082	0,01	0,09	0,033	3,42	17
235810,1	47296,81	14037,81	0,05	0,009	0,054	0,014	3,23	18
280035,4	52003,41	15783,65	0,05	0,009	0,054	0,014	3,06	19
314611,4	57422,34	16849,87	0,049	0,009	0,052	0,012	2,91	20
344500,2	62993,97	17569,44	0,046	0,009	0,049	0,011	2,77	21
340423,6	68516,46	16539,65	0,04	0,009	0,042	0,009	2,64	22
289629,7	74781,67	13415,41	0,029	0,009	0,031	0,006	2,53	23
215074,2	82056,54	9509,258	0,019	0,009	0,02	0,004	2,42	24
180500,3	88350,12	7642,874	0,014	0,009	0,015	0,003	2,33	25

Σενάριο 3

Ptotal	Mtotal	Ttotal	Cptotal	Cmtotal	Cttotal	a average	TSR	V ₀
0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	2
0	0	0	0	0	0	0	0	3
18903,05	4350,008	8715,59	0,365	0,016	0,674	0,538	14,54	4
43965,79	13974,3	14987,81	0,435	0,034	0,741	0,336	11,64	5
85775,76	29487,21	22978,96	0,491	0,049	0,789	0,253	9,7	6
143249,9	50725,85	31670,5	0,516	0,062	0,799	0,262	8,31	7
217096,4	76982,58	40789,58	0,524	0,073	0,788	0,262	7,27	8
307689,3	107800,2	50034,49	0,522	0,08	0,764	0,254	6,46	9
415436,5	143747,8	59236,02	0,514	0,087	0,733	0,243	5,82	10
538907,6	185302,6	68352,31	0,501	0,092	0,699	0,23	5,29	11
606893,6	206190,8	68807,98	0,434	0,086	0,591	0,169	4,85	12
630901,1	207362,6	62677,47	0,355	0,074	0,459	0,115	4,48	13
633248,2	192049,5	53941,98	0,276	0,059	0,34	0,079	4,16	14
627287,9	184661,5	49985,84	0,23	0,05	0,275	0,063	3,88	15
538591,8	140674	38878,93	0,163	0,033	0,188	0,045	3,64	16
405047,8	80978,27	26646,92	0,102	0,017	0,114	0,032	3,42	17
221929,6	44709,87	13208,49	0,047	0,008	0,05	0,013	3,23	18
251345,6	49324,08	14140,61	0,045	0,008	0,048	0,012	3,06	19
268900,8	53959	14344,52	0,042	0,008	0,044	0,011	2,91	20
299427,4	58646,9	15212,97	0,04	0,008	0,043	0,01	2,77	21
305944	63363,97	14830,72	0,036	0,008	0,038	0,008	2,64	22
278648,8	68792,36	12897,4	0,028	0,008	0,03	0,006	2,53	23
229378,7	74309,8	10151,66	0,021	0,008	0,022	0,004	2,42	24
211062,5	79746,96	8955,827	0,017	0,008	0,018	0,004	2,33	25

Σενάριο 4

Ptotal	Mtotal	Ttotal	Cptotal	Cmtotal	Cttotal	a average	TSR	V ₀
0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	2
0	0	0	0	0	0	0	0	3
27225,11	15186,36	10921,17	0,516	0,057	0,844	0,296	9	4
52425,82	23608,22	16856,59	0,519	0,057	0,834	0,303	9	5
91800,2	34564,83	24589,94	0,521	0,058	0,845	0,297	9	6
144972,1	49928,22	33011,63	0,523	0,061	0,833	0,32	8,57	7
222768,4	76902	43199,85	0,538	0,072	0,835	0,303	7,5	8
313933,6	107470	52877,98	0,533	0,08	0,807	0,297	6,67	9
413012,5	140426,5	61396,76	0,511	0,085	0,759	0,271	6	10
498408,7	167000	65414,2	0,463	0,083	0,669	0,218	5,45	11
598726	196011,9	69720,76	0,428	0,082	0,599	0,186	5	12
702003,8	223753	73328,42	0,395	0,08	0,537	0,161	4,62	13
785149,9	241064,5	73493,79	0,354	0,074	0,464	0,133	4,29	14
843775,1	245936,9	70918,43	0,309	0,066	0,39	0,107	4	15
252698,7	44266,61	17439,2	0,096	0,01	0,099	0,032	3,75	16
331228,6	44126,07	21431,85	0,083	0,009	0,092	0,035	3,53	17
280239,3	49992,41	16768,81	0,059	0,009	0,064	0,017	3,33	18
342347	56553,74	19427,72	0,062	0,009	0,067	0,017	3,16	19
391444	62757,86	21096,88	0,061	0,009	0,065	0,016	3	20
406809,1	69568,64	20829,28	0,054	0,01	0,058	0,013	2,86	21
323855,5	77626,35	15715,76	0,038	0,01	0,04	0,009	2,73	22
248094,1	85890,09	11465,96	0,025	0,01	0,027	0,006	2,61	23
210608,7	94322,48	9309,484	0,019	0,01	0,02	0,005	2,5	24
200068,9	103028,1	8478,729	0,016	0,01	0,017	0,004	2,4	25