



**Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης**

**Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
Τμήμα Μηχανολογίας**



**Πτυχιακή εργασία**

**Μελέτη και σχεδιασμός πτερύγωσης ανεμογεννήτριας**

**Νουχάι Εσμεράλντ (ΑΜ: 5245)**

**E-mail: [themis\\_89@hotmail.gr](mailto:themis_89@hotmail.gr)**

**Ηράκλειο – 2013**

**Επόπτης Καθηγητής: Χρηστάκης Δημήτρης**

## **Ευχαριστίες**

Ευχαριστώ την οικογένεια μου που με στήριξαν για όλα αυτά τα χρόνια στις σπουδές και ήτανε πλάι μου σε κάθε μου πρόβλημα. Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στο εργαστήριο της αιολικής ενέργειας του ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ και ειδικότερα στους καθηγητές κ. Χρηστάκη Δημήτρη και κ. Κονταξάκη Κώστα που με βοήθησαν για την περάτωση αυτής της πτυχιακής εργασίας.

## Περίληψη

Αυτή η εργασία παρουσιάζει ένα γενικό πλαίσιο βελτιστοποίησης για τον σχεδιασμό των πτερυγίων των ανεμογεννητριών. Ο στόχος είναι να έχουμε μια καλή ισχύ εξόδου με τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της πτέρυγας, διατηρώντας ένα σταθερό κόστος και να είναι συμβατό με όλο το σύστημα της ανεμογεννήτριας. Οι πτέρυγες όμως εξελίσσονται μέρα με τη μέρα, γι 'αυτό θα πρέπει να υπάρξει μια καλή γνώση ώστε να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν καλύτερη μελέτη στο αντικείμενο.

Έγινε σχεδιασμός πτέρυγας ανεμογεννήτριας 20 KW, η πτέρυγα έχει μελετηθεί για ταχύτητα αέρα 14 m/sec διαπιστώθηκε όμως ότι η ιδανική της λειτουργία θα ήταν με αέρα 5 m/sec. Ακόμα, το πάχος του υλικού της πτέρυγας παίζει μεγάλο ρόλο στην κατανομή των τάσεων επάνω στην ανεμογεννήτρια, διαπιστώθηκε ότι με την βελτίωσή του μπορούν να επιτευχθούν καλά αποτελέσματα στην αντοχή και στο κόστος της πτέρυγας. Επίσης έγινε και μελέτη στην πλήμνη όπου συνδέονται οι πτέρυγες, στο πόδι θα τοποθετηθούν 16 βίδες και υπολογίστηκε η δύναμη που θα ασκείται σε μία βίδα στην δυσμενέστερη περίπτωση. Έγιναν προσομοιώσεις της βίδας ώστε να βρεθούν οι βέλτιστες λύσεις στην γεωμετρία καθώς επίσης ο έλεγχος στην αντοχή της.

Έγινε μελέτη της περύγωσης μιας ανεμογεννήτριας ισχύος 20 kW. Η πτέρυγα που προκύπτει σχεδιάστηκε, λύθηκαν τα κατασκευαστικά προβλήματα και μελετήθηκε η αντοχή της. Επίσης μελετήθηκε η πλήμνη όπου συνδέονται οι πτέρυγες αυτές. Η σχεδίαση έγινε με την βοήθεια λογισμικού (solidworks) και οι υπολογισμοί μέσω ειδικού προγράμματος στο excel.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>3</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....</b>	<b>4</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>6</b>
1.1 ΠΤΕΡΥΓΙΑ.....	6
1.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΤΕΡΥΓΑΣ .....	7
1.3 ΤΥΠΟΣ ΠΤΕΡΥΓΩΝ.....	7
1.4 ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΩΝ.....	8
1.5 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	8
1.6 ΠΩΣ ΟΙ ΠΤΕΡΥΓΕΣ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ;.....	9
1.7 ΣΥΣΤΡΟΦΗ.....	11
1.8 ΣΧΗΜΑ ΠΤΕΡΥΓΩΝ.....	11
1.9 ΚΑΤΟΨΗ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ.....	12
1.10 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ .....	13
1.11 ΠΛΗΜΝΗ.....	14
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΘΕΩΡΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΠΤΕΡΥΓΩΣΕΩΝ .....</b>	<b>15</b>
<b>ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ.....</b>	<b>15</b>
2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΤΗΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ .....	16
2.1.1 Αρχική εκτίμηση.....	16
2.1.2 Δεύτερη εκτίμηση.....	17
2.2 Η ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ Η ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΣΧΕΣΗΣ.....	18
2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΩΣΕΩΝ. ....	19
2.4 ΘΕΩΡΙΑ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ. ....	19
2.5 Η ΘΕΩΡΙΑ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΤΟΥ GLAUERT ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΑΠΟ ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ ΤΟΥ ΠΑΝ/ΜΙΟΥ ΑΜΗΕΡΣΤ ΤΗΣ ΜΑΣΑΧΟΥΣΕΤΗΣ .....	21
2.6 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ . ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ. .....	21
2.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΗΣ..	24
2.7.1 Πρώτος υπολογισμός.....	24
2.7.2 Δεύτερος υπολογισμός.....	24
2.8 ΤΟΠΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ. ....	25
2.8.1 Μέγιστος τοπικός συντελεστής ισχύος ενός ιδανικού δρομέα.....	25
2.9 ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ I ΚΑΙ ΤΟΥ CZ P L .....	26
2.10 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΠΟΥ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΙ ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΕΣ ΠΟΥ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΥΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ.....	31
2.11 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΩΝ.....	32
2.12 ΠΡΑΚΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΚΑΙ ΤΗ ΓΩΝΙΑΣ ΣΦΗΝΩΣΗΣ. ....	33
2.13 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ.....	34

2.14 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΘΕΩΡΙΕΣ .....	37
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ .....</b>	<b>38</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	38
3.2 Η ΠΤΕΡΥΓΑ ΣΑΝ ΜΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΟΚΟΣ .....	41
3.3 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ .....	42
3.4 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	42
3.5 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ .....	44
3.6 ΚΟΠΩΣΗ.....	44
3.7 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ.....</b>	<b>47</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟ ΦΤΕΡΟ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SOLIDWORKS).....</b>	<b>50</b>
5.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 20 KW .....	50
5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΦΤΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΠΛΗΜΝΗ. ....	53
5.2.1 Προσομοίωση πλήμνης μέσω του προγράμματος <i>solidworks</i> για πτερύγωση ανεμογεννήτριας ισχύος 20kw. ....	53
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>58</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>59</b>

## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

### 1.1 Πτερύγια

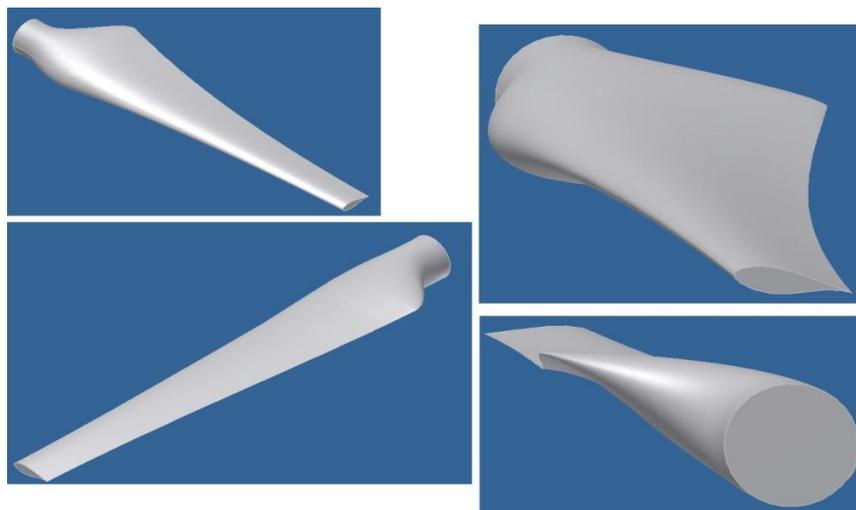
Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών σχεδιάζονται έτσι ώστε να αποδίδουν την μέγιστη ισχύ από τον άνεμο σε ελάχιστο κόστος. Από την αεροδυναμική φόρτιση, το βαθμό απόδοσης και το κόστος κατασκευής γίνεται και η επιλογή για το πλήθος των πτερυγίων.

Επιπλέον, θέματα που λαμβάνονται υπ' όψιν είναι η κυκλική ροπή μεταβολής της μηχανής λόγω της καθ' ύψους μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και η ζυγοστάθμιση των πτερυγίων.

Τα πτερύγια είναι εφοδιασμένα με συστήματα αεροδυναμικής πέδησης και σε ορισμένες περιπτώσεις διαθέτουν και μικρά αλεξίπτωτα που απελευθερώνονται φυγοκεντρικά μετά από ένα ορισμένο όριο στροφών.

Τα πτερύγια είναι μεταβλητού βήματος αλλά στις απλές περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν και σταθερού βήματος. Τα πτερύγια της πρώτης περίπτωσης πλεονεκτούν στο γεγονός ότι υπάρχει μεταβολή της γωνίας προσβολής τους στον άνεμο με αποτέλεσμα να διατηρείται σταθερή η ταχύτητα περιστροφής τους, να αυξάνεται η αεροδυναμική τους απόδοση και να έχουμε ελεγχόμενη παραγόμενη ισχύ. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών έχουν μια καμπυλόγραμμη αεροδυναμική διατομή που είναι στρογγυλεμένη κατά το ένα άκρο (είσοδος ανέμου) και αιχμηρή κατά το άλλο άκρο (έξοδος ανέμου).

Το σχήμα τους είναι και το κλειδί τους για το πώς μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε περιστροφική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Τα σχήματα αυτά είναι γνωστά ως αεροδυναμικά, όπως και αυτά των αεροπλάνων. Επίσης το σχήμα τους εφόσον μελετηθεί αεροδυναμικά, είναι αυτό που προκαλεί πέδηση (παθητική) σε μεγάλες ταχύτητες, ώστε να αποφεύγεται η (άνω) περιστροφή της Α/Γ.



Εικόνα 1.1: Σχήμα πτέρυγας από διάφορες όψεις

Η κατανομή του πλάτους των πτερυγίων προκύπτει από τη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης του δρομέα ενώ το πλήθος των πτερυγίων εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής του ανεμοκινητήρα.

## 1.2 Κατασκευαστικά στοιχεία πτέρυγας

Τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων δεν είναι ίδια για κάθε Α/Γ. Στις μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιείται κυρίως πολυουρεθάνη, υαλόνημα και ξύλο, δηλαδή υλικά που δεν επηρεάζονται από διάβρωση. Το μόνο πρόβλημα είναι ότι η μικρή διάρκεια ζωής τους καθώς δε γνωρίζουμε την συμπεριφορά του σε εναλλασσόμενη φόρτιση. Στις μεσαίου μεγέθους Α/Γ χρησιμοποιούνται πολλαπλές στρώσεις υαλονημάτων και στις μεγάλες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται πτερύγια κατασκευασμένα με τεχνολογία ίδιας με αυτής των πτερυγίων των αεροσκαφών.



Εικόνα 1.2: Πτερύγια κατασκευασμένα από υαλόνημα (fiberglass)

## 1.3 Τύπος πτερύγων

**A)** Πτερύγια με έλεγχο της μεταβολής του βήματος (pitch controlled), μπορούν να περιστραφούν κατά το διαμήκη άξονά τους. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατά συνέπεια η προσπίπτουσα σε αυτά αεροδυναμική ισχύς. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του σχήματος είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω του συστήματος ελέγχου τους, αλλά και της χρήσης υδραυλικών και ηλεκτρομηχανικών μέσων για τη στροφή των πτερυγίων.

**B)** Οι ανεμογεννήτριες με αεροδυναμικό έλεγχο της ροής και ισχύος του δρομέα (stall controlled), διαθέτουν πτερύγια σταθερής κλίσης τα οποία σε υψηλές ταχύτητες ανέμου (χαμηλές τιμές του  $\lambda$ ) εμφανίζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης. Έτσι περιορίζεται η αναπτυσσόμενη ροπή και η παραγόμενη ενέργεια.

**Γ)** Τελευταία παρατηρείται η τάση να χρησιμοποιείται ενεργός έλεγχος του βήματος των πτερυγίων στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες (active stall). Η διαφορά αυτού του τρόπου ελέγχου σε σχέση με τον κλασικό έλεγχο του βήματος των πτερυγίων είναι ότι όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή, η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα, μεγαλώνει δηλαδή η γωνία με τον άνεμο αποκόπτοντας με αυτόν τον τρόπο την περίσσεια αεροδυναμικής ισχύος. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η ισχύς εξόδου της γεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και κατά συνέπεια δεν καταπονείται το σύστημα σε περιόδους ριπών ανέμου. Ο ενεργός έλεγχος της γωνίας pitch χρησιμοποιείται σε μεγάλες ανεμογεννήτριες, άνω του 1 MW.

Οι ανεμογεννήτριες με σύστημα ρύθμισης του βήματος του πτερυγίου παρουσιάζουν τεχνολογική πολυπλοκότητα στο ρυθμιστικό μηχανισμό και τα πτερύγια είναι σαφώς ακριβότερα και βαρύτερα. Παρουσιάζουν όμως καλή ρύθμιση ισχύος, μειωμένα αεροδυναμικά φορτία, ευκολία στην εκκίνηση της ανεμογεννήτριας και συγχρόνως μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για πέδηση.

Οι ανεμογεννήτριες με πτερύγια σταθερού βήματος είναι απλούστερες τεχνολογικά και φυσικά φθηνότερες, έχουν όμως περίπου 5-10 % μικρότερη παραγωγή ενέργειας, μεγαλύτερα φορτία καταπόνησης και απαιτούν δισκόμενα ασφάλειας, ή αστοχίας ή/και αεροπέδες. Ανεμογεννήτριες σταθερού βήματος πτερυγίου είναι σχεδόν όλες οι ανεμογεννήτριες Δανίας μεσαίου μεγέθους.

## **1.4 Αριθμός πτερύγων**

Περιορισμός στη διαθέσιμη ισχύ από τον άνεμο σημαίνει ότι όσο περισσότερες πτέρυγες έχουμε τόσο είναι η λιγότερη ενέργεια που μπορεί να εξάγει το καθένα. Μια συνέπεια αυτού είναι ότι κάθε πτέρυγα πρέπει επίσης να είναι στενότερη για τη διατήρηση της αεροδυναμικής απόδοσης. Όσο περισσότερες πτέρυγες έχουμε τόσο στενότερες πρέπει να είναι. Για να περιστραφούν με ευκολία οι πτέρυγες πρέπει να είναι λεπτά σε σχέση με το πλάτος τους, έτσι η περιορισμένη σταθερότητα περιορίζει το πάχος των πτερύγων. Επιπλέον, καθίσταται δύσκολο να σχεδιάσουμε τις πτέρυγες αρκετά δυνατές εάν είναι πολύ λεπτές, πρέπει επίσης να λάβουμε υπ' όψη το κόστος των πτερύγων αν απαιτούνται ακριβά υλικά.

Για το λόγο αυτό, οι περισσότερες μεγάλες μηχανές δεν έχουν περισσότερες από τρεις πτέρυγες. Ο άλλος παράγοντας που επηρεάζει τον αριθμό των πτερύγων είναι και η αισθητική, είναι γενικά αποδεκτό ότι τρία πτερύγια είναι λιγότερο ενοχλητικά οπτικά απ' ότι ένα ή δύο πτερύγια.

## **1.5 Αιολική Ενέργεια**

Μπορεί να φαίνεται προφανές, αλλά η κατανόηση της αιολικής ενέργειας έχει θεμελιώδη σημασία για την περάτωση της σχεδίασης της ανεμογεννήτριας. Η διαθέσιμη ισχύς από τον



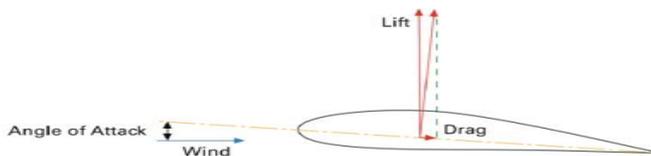
άνεμο είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου, έτσι το διπλάσιο της ταχύτητας του ανέμου σημαίνει οκταπλάσια ισχύ. Αυτός είναι ο λόγος που η τοποθεσία της ανεμογεννήτριας πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά και ειδικότερα κάτω από 5 m/s ο άνεμος δεν είναι ωφέλιμος. Αντιθέτως ο ισχυρός άνεμος παρέχει υψηλά επίπεδα ισχύος αλλά δεν είναι οικονομικά βιώσιμο να φτιάχνονται οι μηχανές ώστε να παράγουν πάρα πολύ ισχύ γιατί μπορεί να σπαταληθεί μεγάλη ενέργεια. Οπότε το ιδανικό είναι μια περιοχή με σταθερούς ανέμους και η ανεμογεννήτρια να είναι σε θέση να αξιοποιήσει στο έπακρο τον άνεμο.

Ο άνεμος διαφέρει από μέρα σε μέρα εξαιτίας και των στροβιλισμών που αναπτύσσονται κάθε δευτερόλεπτο, από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τις καιρικές συνθήκες. Η ένταση του αέρα είναι μεγαλύτερη υψηλότερα και μικρότερη χαμηλότερα προς το έδαφος λόγω της τριβής. Όλα αυτά έχουν επίδραση στην περύγωση ασκώντας σε αυτήν μεγάλα φορτία την ώρα που γυρίζει, αυτό σημαίνει ότι πρέπει να γίνει μια καλή αεροδυναμική και στατική μελέτη.

Με το να παράγει ισχύ η ανεμογεννήτρια επιδρά τον αέρα, ανάντη από την ανεμογεννήτρια ο αέρας έχει μικρότερη ένταση απ' ότι κατάντη. Ο άνεμος επιβραδύνει λίγο πριν φτάσει στην περύγωση, η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται λόγω του "δίσκου" ( ένας φανταστικός κύκλος που σχηματίζεται από τα ακροπτερύγια ) και συνεπώς μειώνεται η διαθέσιμη ισχύς. Έτσι, υπάρχει μία βέλτιστη ποσότητα ισχύος που μπορεί να εξαχθεί από μια δεδομένη διάμετρο δίσκου. Στην πραγματικότητα, το ιδανικό είναι να μειωθεί η ταχύτητα του αέρα που βρίσκεται κάτω από την ανεμογεννήτρια στα δύο τρίτα, έτσι η ανεμογεννήτρια θα χάσει το ένα τρίτο της ταχύτητας της. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να επωφεληθούμε θεωρητικά το 59 % της ενέργειας του αέρα ( αυτό λέγεται Betz limit ). Στην πράξη, μόνο το 40-50% επιτυγχάνεται με τις σημερινές τεχνικές.

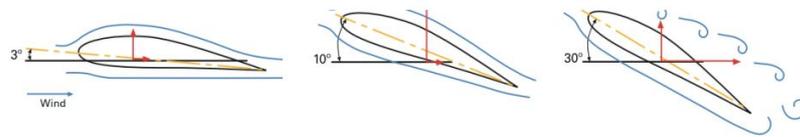
## 1.6 Πώς οι πτέρυγες λαμβάνουν την αιολική ενέργεια;

Όπως ακριβώς το φτερό ενός αεροπλάνου, τα πτερύγια σχεδιάζονται έτσι ώστε να δημιουργείται άνοση. Στην πλευρά όπου εκεί η πτέρυγα είναι περισσότερο καμπυλωτή έχουμε χαμηλή πίεση αέρα ενώ από την άλλη πλευρά έχουμε υψηλή πίεση αέρα, αποτέλεσμα αυτού είναι μια δύναμη άνοσης κάθετη προς τη κατεύθυνση της ροής του αέρα.



**Εικόνα 1.3:** Φορείς Άνοσης και Αντίστασης [3]

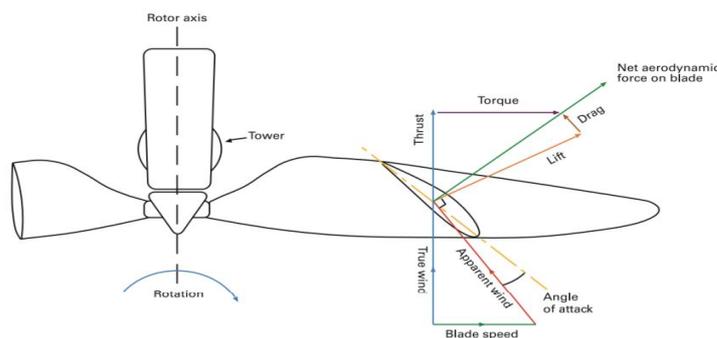
Η δύναμη της άνοσης αυξάνεται και η γωνία μεταξύ της πτέρυγας και του αέρα αυξάνεται. Αυτή η γωνία λέγεται γωνία προσβολής. Όταν η γωνία προσβολής γίνεται πολύ μεγάλη η πτέρυγα σταθεροποιείται και η άνοση μειώνεται. Έτσι, υπάρχει μια βέλτιστη γωνία προσβολής ώστε να έχουμε την βέλτιστη άνοση.



**Εικόνα 1.4:** Πτέρυγα σε χαμηλές, μεσαίες και υψηλές γωνίες προσβολής [3]

Υπάρχει, δυστυχώς, επίσης και μια δύναμη που επιβραδύνει την πτέρυγα, η αντίσταση. Αυτή η δύναμη βρίσκεται παράλληλα με την ροή του αέρα, και αυξάνεται με την γωνία προσβολής. Αν η πτέρυγα είναι καλή, η δύναμη της άνωσης είναι μεγαλύτερη της αντίστασης αλλά σε μεγάλες γωνίες προσβολής και ειδικά όταν η πτέρυγα σταθεροποιείται, η αντίσταση αυξάνεται δραματικά. Έτσι, σε μια γωνία ελαφρώς μικρότερη από τη μέγιστη γωνία ανύψωσης, η πτέρυγα φτάνει στη μέγιστη άνωση / αντίσταση. Το καλύτερο σημείο λειτουργίας θα είναι ανάμεσα σε αυτές τις δύο γωνίες.

Δεδομένου ότι η αντίσταση βρίσκεται στην κατεύθυνση του ανέμου, διαπιστώνουμε ότι δεν θα δημιουργήσει πρόβλημα στην ανεμογεννήτρια ενώ η αντίσταση θα είναι παράλληλα προς τον άξονα της ανεμογεννήτριας, οπότε δε θα την επιβραδύνει. Θα δημιουργήσει απλώς "ώθηση", η δύναμη που δρα παράλληλα προς τον άξονα στροβίλου δεν έχει καμία τάση να επιταχύνει ή να επιβραδύνει το στροφέιο. Όταν το στροφέιο είναι εν στάση (π.χ. λίγο πριν την εκκίνηση) είναι και αυτή η περίπτωση. Ωστόσο η κίνηση της πτέρυγας μέσω του αέρα από μόνη της σημαίνει ότι ο άνεμος φυσά από μια διαφορετική γωνία. Αυτό λέγεται φαινομενικός άνεμος. Ο φαινομενικός άνεμος είναι δυνατότερος του πραγματικού ανέμου αλλά η γωνία του είναι λιγότερο ευνοϊκή, περιστρέφει τις γωνίες της άνωσης και της αντίστασης για να μειώσει την επίδραση της δύναμης άνωσης τραβώντας την πτέρυγα και να αυξήσει την επίδραση της αντίστασης να την επιβραδύνει. Διαπιστώνουμε επίσης ότι η δύναμη της άνωσης συμβάλλει στην ώθηση του στροφέιου.

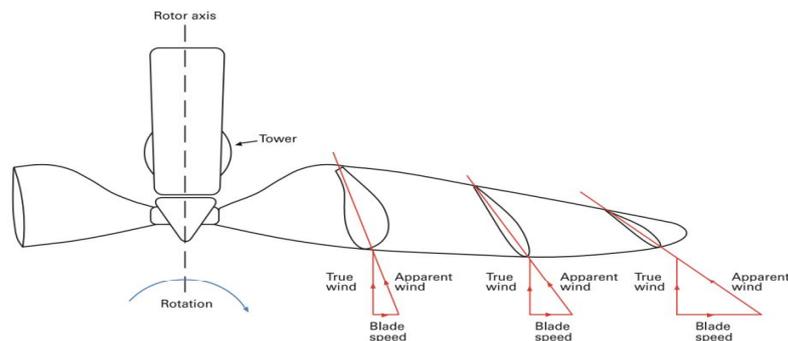


**Εικόνα 1.5:** Γωνία φαινομενικού ανέμου (apparent wind) [3]

Το αποτέλεσμα αυτής είναι ότι, για να διατηρηθεί μια καλή γωνία προσβολής, η πτέρυγα πρέπει να περιστραφεί περαιτέρω από την πραγματική γωνία ανέμου.

## 1.7 Συστροφή

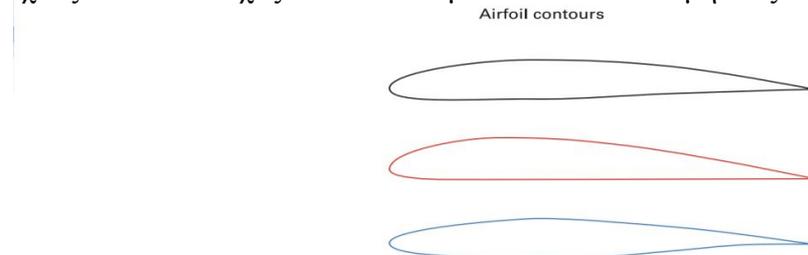
Όσο πιο κοντά στην άκρη της πτέρυγας, τόσο γρηγορότερα η πτέρυγα κινείται διαμέσου του αέρα και τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνία του φαινομενικού ανέμου. Η πτέρυγα πρέπει να γυρίσει περισσότερο στις άκρες απ' ότι στην ρίζα, με άλλα λόγια, θα πρέπει να κατασκευαστεί με μια συστροφή κατά μήκος της. Τυπικά η συστροφή είναι περίπου  $0-20^\circ$  από τη ρίζα ως τις άκρες. Η προϋπόθεση να στρίψει το περύνιο έχει συνέπειες για την ευκολία της κατασκευής.



Εικόνα 1.6: Συστροφή πτέρυγας [3]

## 1.8 Σχήμα πτερύγων

Εκτός από τη περιστροφή, τα πτερύγια ανεμογεννητριών έχουν παρόμοιες απαιτήσεις με τα φτερά του αεροπλάνου, οι διατομές τους συνήθως βασίζονται σε μια παρόμοια οικογένεια σχημάτων. Γενικά, τα καλύτερα χαρακτηριστικά άνωσης/αντίστασης από μια αεροτομή λεπτού πάχους είναι : το πάχος του να είναι μόνο 10-15 % του μήκους της χορδής.

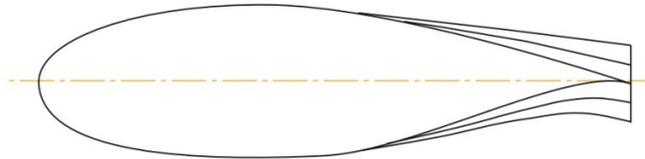


Εικόνα 1.7: Τυπικά σχήματα αεροτομών με καλή αναλογία άνωσης / αντίστασης [3]

Αν δεν υπήρχαν κατασκευαστικές απαιτήσεις, με αυτόν τον τρόπο μια πτέρυγα ανεμογεννήτριας θα καθοριζόταν αλλά πρέπει να λάβουμε υπ' όψη την άνωση, την αντίσταση και τις δυνάμεις βαρύτητας που ασκούνται πάνω σε αυτήν. Έτσι η αεροτομή χρειάζεται να είναι παχύτερη από το αεροδυναμικό βέλτιστο, ιδιαίτερα στα σημεία προς την ρίζα της πτέρυγας, όπου οι δυνάμεις κάμψης είναι οι μεγαλύτερες.

Επίσης, αυτός είναι ο λόγος που ο φαινομενικός άνεμος κινείται με πιο αργούς ρυθμούς και η πτερυγωση επηρεάζει ελάχιστα την πλήμνη, έτσι μερικά αεροδυναμικά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν δεν είναι τόσο σοβαρά όσο θα ήταν πλησιέστερα στην κορυφή. Κατόπιν τούτου το τμήμα αυτό δεν μπορεί να είναι πολύ παχύ γιατί η αντίσταση του θα αυξηθεί δραματικά.

Για να μεγαλώσει το πάχος της αεροτομής κοντά στη ρίζα χωρίς να δημιουργηθεί ένα χοντρό τμήμα αεροτομής κάποιοι σχεδιαστές κάνουν την “πλάτη” της αεροτομής επίπεδη (“flatback”). Αυτό μειώνει την αντίσταση σε σύγκριση με ένα στρογγυλό τμήμα αλλά παράγει περισσότερο θόρυβο, οπότε εξαρτάται από τις απαιτήσεις του αιολικού πάρκου.



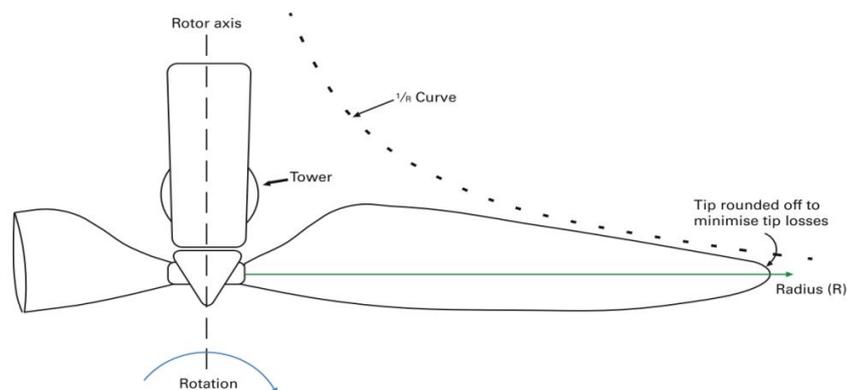
Εικόνα 1.8: Σχήμα αεροτομής με “flatback”. [3]

Υπάρχει ένας συγκερασμός που πρέπει να γίνει μεταξύ αεροδυναμικής απόδοσης και κατασκευαστικής απόδοσης. Μια πτερύγωση που είναι λεπτή, ισχυρή και αρκετά άκαμπτη χρησιμοποιώντας πολλά μέσα ενίσχυσης, θα μπορούσε να γίνει καλύτερη αν είναι λίγο παχύτερη γιατί θα γίνει εξοικονόμηση του κόστους του υλικού αλλά θα μειωθεί η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Ευτυχώς, ο άνεμος είναι δωρεάν, το μόνο που πληρώνουμε είναι το μηχάνημα. Οπότε υπάρχει μια συνεχώς διόρθωση του πάχους της πτερύγωσης μέχρι να βρούμε την βέλτιστη λύση.

## 1.9 Κάτοψη πτερύγωσης

Η σχεδίαση της κάτοψης της πτερύγωσης σχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί να επιβραδύνεται ο άνεμος σε όλη την ανεμογεννήτρια. Αυτό εξασφαλίζει στο να μην προκαλούνται στροβιλισμοί. Υπενθυμίζοντας το όριο Betz που είπαμε παραπάνω, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μέγιστη παραγωγή ισχύος.

Επειδή η κορυφή της πτερύγωσης κινείται γρηγορότερα από τη ρίζα, περνάει περισσότερος όγκος αέρα, ως εκ τούτου, πρέπει να δημιουργηθεί μια μεγαλύτερη δύναμη άνωσης για να επιβραδύνει αρκετά τον αέρα. Στην πραγματικότητα η πτερύγωση πρέπει να είναι στενότερη στην άκρη της απ’ ότι στην ρίζα και να έχουμε αρκετά μεγάλη άνωση. Η βέλτιστη κωνικότητα εξωτερικά της κάτοψης της εξωτερικά μπορεί να υπολογιστεί, σε γενικές γραμμές η χορδή πρέπει να είναι αντιστρόφως ανάλογη από την ακτίνα. Έτσι αν μια χορδή είναι 2 m με ακτίνα 10 m, πρέπει να είναι 10 m με ακτίνα 1 m. Στην πράξη, με μια αρκετά καλή κωνικότητα μπορεί να επιτευχθεί μια βέλτιστη σχεδίαση.

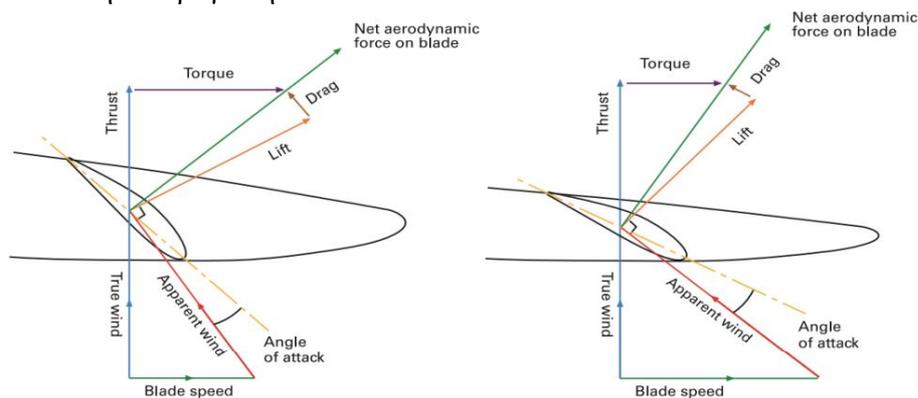


Εικόνα 1.9: Βέλτιστη κάτοψη πτερύγωσης [3]

## 1.10 Περιστροφική ταχύτητα

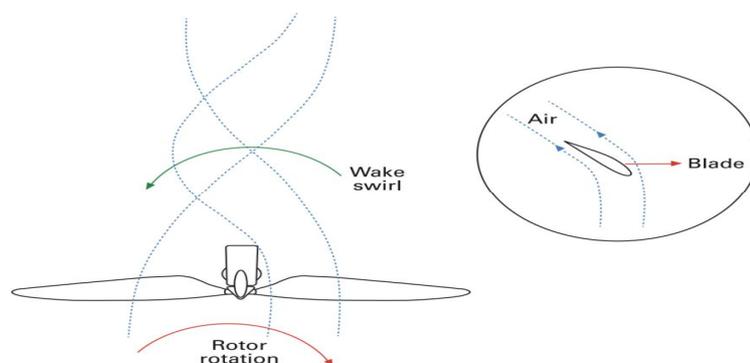
Η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται η ανεμογεννήτρια έχει μεγάλη σημασία για τον σχεδιασμό της και ορίζεται από την ταχύτητα των ακροπτερυγίων σε σχέση με την αιολική ταχύτητα. Αυτό ονομάζεται λόγος ταχυτήτων.

Υψηλός λόγος ταχυτήτων σημαίνει ότι τα αεροδυναμικά φορτία στις πτερυγώσεις είναι σχεδόν παράλληλα προς τον άξονα της ανεμογεννήτριας, οπότε βασίζεται σε μια καλή αναλογία άνωσης/αντίστασης. Ο λόγος άνωσης αντίστασης επηρεάζεται σοβαρά από την τραχύτητα ή λόγο ακαθαρσιών στην πτερύγωση.



**Εικόνα 1.10:** Η επίδραση του λόγου ταχυτήτων στην αντίσταση.[3]

Χαμηλός λόγος ταχυτήτων στα ακροπτερύγια μπορεί να φαίνεται σαν μια καλή επιλογή αλλά δυστυχώς οδηγεί σε χαμηλότερη αεροδυναμική απόδοση. Επειδή η δύναμη άνωσης για τις πτερυγώσεις παράγει ροπή, έχει μια ίση αλλά αντίθετη επίδραση επί του ανέμου, που τείνει να γυρίσει την πτερύγωση εφαπτομενικά προς την άλλη κατεύθυνση. Αποτέλεσμα είναι να δημιουργηθούν στροβιλισμοί, αέρας αντίθετος επί των πτερυγίων. Αυτοί οι στροβιλισμοί οδηγούν σε απώλεια ενέργειας οπότε μειώνει και την διαθέσιμη ισχύ που μπορεί να παραχθεί. Χαμηλή ταχύτητα περιστροφής απαιτεί μεγαλύτερη ροπή για την ίδια ισχύ ώστε με αυτόν τον τρόπο να μειωθούν και οι στροβιλισμοί.



**Εικόνα 1.11:** Η επίδραση των στροβιλισμών. [3]

### 1.11 Πλήμνη

Αποτελεί συστατικό της πτερωτής και είναι το μέρος της ανεμογεννήτριας πάνω στο οποίο προσαρμίζονται τα πτερύγια. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα. Η πλήμνη κατασκευάζεται από έναν ειδικό τύπο ισχυρού κράματος σιδήρου που ονομάζεται “SG χυτοσίδηρος”. Λόγω του περίπλοκου σχήματός της (είναι δύσκολο να κατασκευαστεί αλλιώς), είναι πολύ βολικό να χρησιμοποιηθεί χυτοσίδηρος.



Εικόνα 1.12: Τύπος σύνδεσης πλήμνης για μικρές ανεμογεννήτριες :



Εικόνα 1.13: Τύπος σύνδεσης πλήμνης μεσαίων και μεγάλων ανεμογεννητριών [5]

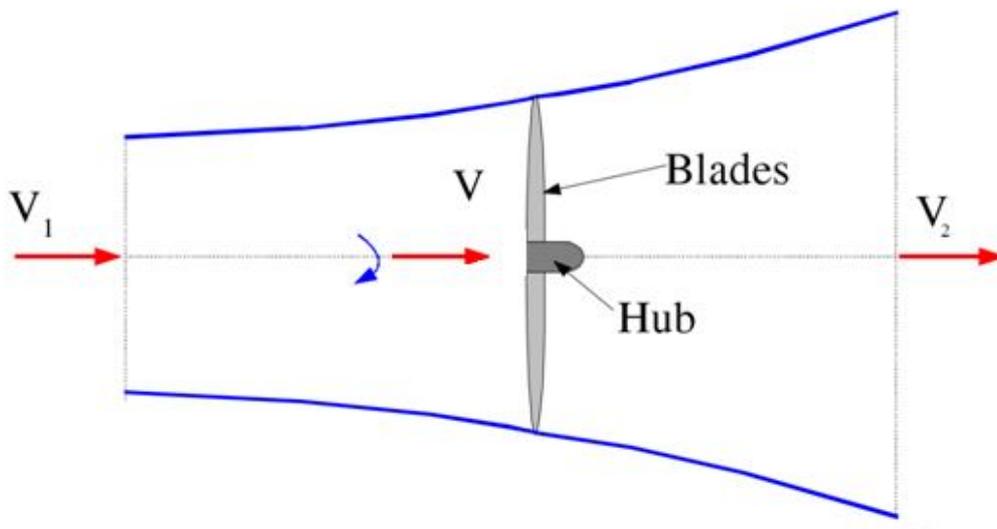
## Κεφάλαιο 2 Θεωρία υπολογισμών περυγώσεων Συμβολισμοί

F	ώση (Nt)
$\rho$	πυκνότητα αέρα ( $\text{kg/m}^3$ )
S	επιφάνεια της πτερωτής ( $\text{m}^2$ )
$V_1$	ταχύτητα ανάντη της πτερωτής (m/sec)
$V_2$	ταχύτητα κατόντη της πτερωτής (m/sec)
$\omega$	γωνιακή ταχύτητα (rad/sec)
U	περιφερειακή ταχύτητα ( $\frac{\text{rad}}{\text{sec}} m$ )
$\vec{V}$	απόλυτη ταχύτητα (m/sec)
$\vec{W}$	σχετική ταχύτητα (m/sec)
$C_z$	συντελεστής άνωσης (-)
$C_x$	συντελεστής αντίστασης (-)
l	μήκος της χορδής (m)
$\epsilon$	γωνία μεταξύ του dR και dR <sub>z</sub> (°)
r	ακτίνα ενός στοιχείου της πτερωτής (m)
R	ακτίνα όλης της περύγωσης (m)
I	γωνία κλίσης (°)
p	αριθμός των περυγών (-)
$\lambda$	λόγος ταχυτήτων (-)
$\lambda_0$	λόγος ταχυτήτων στο ακροπερύγιο (-)
i	γωνία σφήνωσης (°)
$\alpha$	γωνία προσβολής (°)
n	αεροδυναμική απόδοση της περύγωσης (-)
P	ισχύς που παράγεται πάνω στην περύγωση (W)
$\vec{H}_C$	μαγνητικό πεδίο στον κεντρικό αγωγό
$\vec{H}_M$	μαγνητικό πεδίο στο μεσημβρινό αγωγό
$\vec{H}_D$	μαγνητικό πεδίο στο δίσκο
$\vec{H}$	μαγνητικό πεδίο στον άξονα περιστροφής
$H_S$	αξονικό μαγνητικό πεδίο στο κέντρο του πηνίου
$v_\theta$	εφαπτομενική επαγόμενη ταχύτητα (m/sec)
$\Omega$	γωνιακή ταχύτητα στο ανάντη του δρομέα (rad/sec)
M	ροπή (Nt m)
$C_p$	τοπικός συντελεστής ισχύος (-)
$\theta$	βοηθητική γωνία (°)
k	συντελεστής αξονικής επαγωγής (-)
h	συντελεστής γωνιακής επαγωγής (-)
$\lambda_e$	λόγος ταχυτήτων σε βέλτιστες συνθήκες (-)
$\eta_p$	υποδηλώνει την μείωση της απόδοσης του δρομέα (-)
D	διάμετρος του δρομέα (m)
$C_F$	συντελεστής ώσης (-)
$C_M$	συντελεστής ροπής (-)

## 2.1 Υπολογισμός της χορδής της πτερύγωσης

Για το υπολογισμό της χορδής της πτερύγωσης, θα αξιολογήσουμε με δύο διαφορετικούς τρόπους την αξονική ώση που εφαρμόζεται στο δρομέα μεταξύ  $r$  και  $r + dr$ , στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας.

### 2.1.1 Αρχική εκτίμηση



**Εικόνα 2.1:** Η επίδραση των στροβιλισμών. [6]

Με βάση την θεωρία του Betz, η συνολική ώση επί του δρομέα της ανεμογεννήτριας ισούται με:

$$F = \rho S (V_1^2 - V_2^2) / 2$$

Η ταχύτητα του ανέμου κατά τη διέλευση του διαμέσου του δρομέα είναι :

$$V = (V_1 + V_2) / 2$$

$V_1$  και  $V_2$  υποδηλώνει την ταχύτητα του ανέμου, στο ανάντη και το κατόντη της πτερωτής.

Η ισχύς είναι η μέγιστη όταν  $V_2 = V_1 / 3$  (θεωρία του Betz)

Τότε :  $F = \frac{4}{9} \rho S V_1^2$  και  $V = \frac{2}{3} V_1$  και , επομένως :  $F = \rho S V^2$ .

Υποθέτουμε ότι κάθε στοιχείο της επιφάνειας σάρωσης συμβάλλει αναλογικά με το εμβαδόν του στην ώση. Η συμβολή στην ώση κάθε στοιχείου που βρίσκεται μεταξύ της αποστάσεις  $r$  και  $r+dr$  είναι :

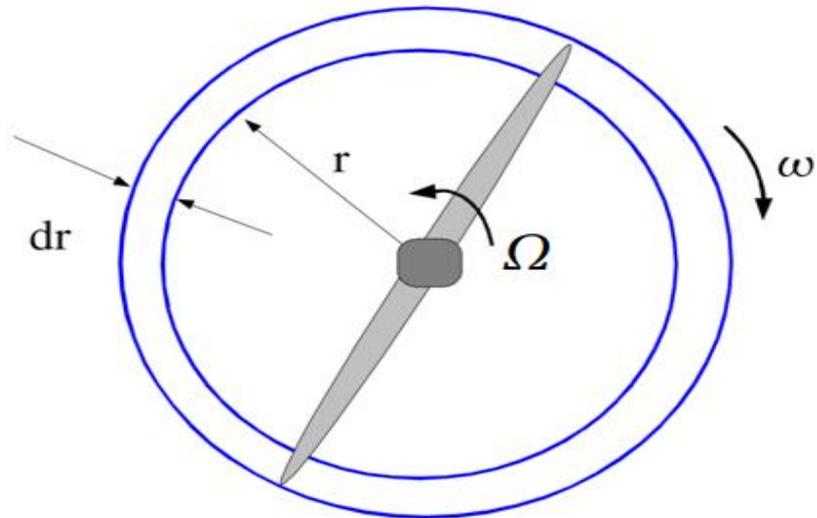
$$dF = \rho V^2 dS = 2 \pi \rho V^2 r dr$$



### 2.1.2 Δεύτερη εκτίμηση

Αν η γωνιακή ταχύτητα είναι  $\omega$  και η περιφερειακή ταχύτητα των στοιχείων της περύγωσης μεταξύ των ακτίνων  $r$  και  $r + dr$  είναι :

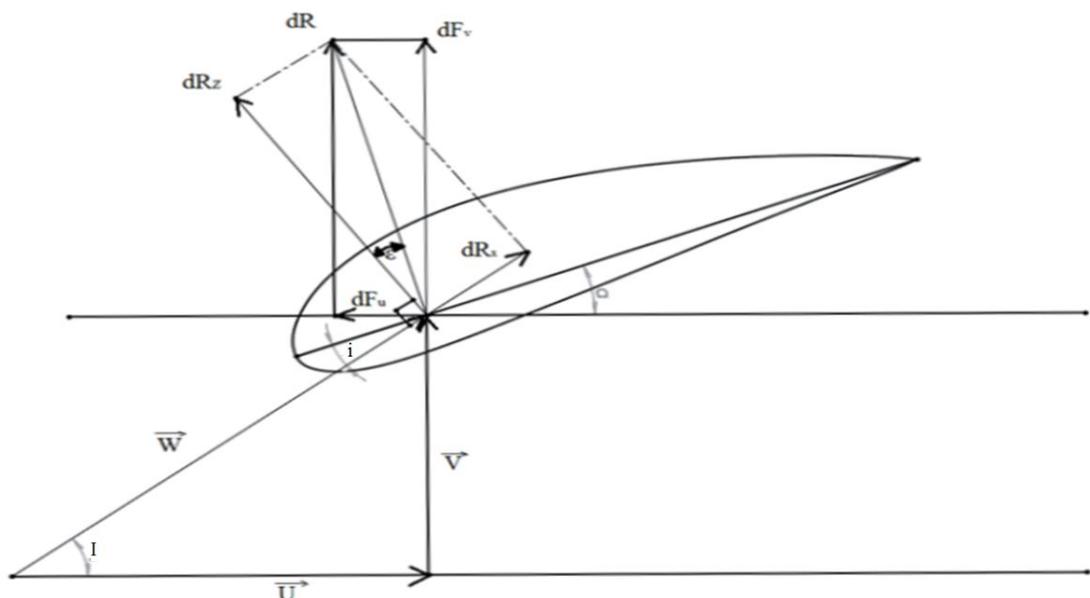
$$U = \omega r.$$



Εικόνα 2.2 : Γωνιακή ταχύτητα [6]

Μεταξύ της απόλυτης ταχύτητας του ανέμου  $\vec{V}$  που διασχίζει το δρομέα, της σχετικής ταχύτητας του ανέμου  $\vec{W}$ , που βλέπει η αεροτομή και της περιφερειακής ταχύτητας  $\vec{U}$ , ισχύει η σχέση  $\vec{V} = \vec{W} + \vec{U}$  μπορεί να γραφτεί επίσης  $\vec{W} = \vec{V} - \vec{U}$ .

Ένα στοιχείο της περύγωσης μήκους  $dR$  παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.3: Άνοση, αντίσταση και γωνίες που την περιβάλλουν

Οπότε, μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές της άνωσης  $R_z$ , και της αντίστασης  $R_x$ , στο στοιχείο αυτό:

$$dR_z = \frac{1}{2} \rho C_z W^2 l dr \quad \text{και} \quad dR_x = \frac{1}{2} \rho C_x W^2 l dr$$

και προκύπτει η συνισταμένη δύναμη:

$$dR = dR_z / \cos \varepsilon$$

όπου ( $\varepsilon$ ) είναι η γωνία μεταξύ του  $dR$  και  $dR_z$  και ( $l$ ) η χορδή του προφίλ στην απόσταση  $r$ .

Επίσης διαπιστώνουμε ότι :

$$W = \frac{V}{\sin I} \quad \text{και} \quad dR = \frac{1}{2} \rho C_z \frac{W^2 l}{\cos \varepsilon} dr = \frac{1}{2} \rho C_z \frac{V^2}{\sin^2 I} \frac{l dr}{\cos \varepsilon}$$

Η συνισταμένη δύναμη  $\vec{R}$  προβάλλεται στην κατεύθυνση του επιπέδου περιστροφής ( $dF_u$ ) και υπολογίζονται οι συνιστώσες  $dF_v$  και  $dF_u$  της συνισταμένης αεροδυναμικής δύναμης  $dF$  του σχήματος του στοιχείου που βρίσκεται μεταξύ των ακτίνων  $r$  και  $r + dr$ .

Αν οριστεί σαν ( $p$ ) ο αριθμός των πτερύγων, ο άνεμος :

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_z p \frac{V^2}{\sin^2 I} \frac{\cos(I-\varepsilon)}{\cos \varepsilon} l dr$$

Αυτή η σχέση εκφράζεται σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση του  $dF$  και ως εξής :

$$C_z p l = 4 \pi r \frac{\sin^2 I \cos \varepsilon}{\cos(I-\varepsilon)}$$

## 2.2 Η μελέτη και η απλούστευση της παραπάνω σχέσης.

Όσον αφορά την προηγούμενη σχέση μπορεί επίσης να γραφτεί αναπτύσσοντας το  $\cos(I-\varepsilon)$

$$C_z p l = 4 \pi r \frac{\tan^2 I \cos I}{1 + \tan \varepsilon \tan I}$$

Στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, η ταχύτητα του ανέμου κατά τη διέλευση διαμέσου του δρομέα είναι  $V = 2/3 V_1$ ,  $V_1$  είναι η ταχύτητα του ανέμου ανάντη του δρομέα.

Η γωνία  $I$  συνδέεται με την ταχύτητα του ανέμου  $V_1$  από την παρακάτω σχέση :

$$\cotan = \frac{\omega r}{V} = \frac{3}{2} \frac{\omega r}{V_1} = \frac{3}{2} \lambda$$

Αντικαθιστώντας στην έκφραση για το  $C_z p l$  :

$$C_z p l = \frac{16 \pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{9}} \left(1 + \frac{2}{3\lambda} \tan \varepsilon\right)}$$

Υπό κανονικές συνθήκες, η τιμή του  $\tan \varepsilon = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{C_x}{C_z}$  είναι σε γενικές γραμμές πολύ χαμηλή.

Η βέλτιστη τιμή του  $\tan \varepsilon$ , για μια συνηθισμένη αεροτομή είναι της τάξεως του 0,05, οπότε η παρένθεση  $\left(1 + \frac{2}{3\lambda} \tan \varepsilon\right)$  είναι περίπου ίση με τη μονάδα και η προηγούμενη σχέση μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$C_z p l = \frac{16 \pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{9}}}$$

Για μια συγκεκριμένη ταχύτητα  $\lambda$  σε απόσταση  $r$  από τον άξονα περιστροφής,  $\lambda = \omega r / V_1$  και στο ακροπτερύγιο ( $r=R$ ),  $\lambda_0 = \omega R / V_1$ . Τα  $\lambda$  και  $\lambda_0$  συνδέονται με τη σχέση :  $\lambda = \lambda_0 r / R$ .

Με βάση τα παραπάνω για  $C_z \rho l$  έχουμε :

$$C_z \rho l = \frac{16 \pi}{9} \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0^2 + \frac{r^2}{R^2} + 4/9}}$$

### 2.3 Υπολογισμός της χορδής των πτερυγώσεων.

Αν είναι γνωστά ο λόγος ταχυτήτων,  $\lambda$  και η διάμετρος του δρομέα, η γωνία κλίσης  $I$  για συγκεκριμένες τιμές  $r$  δίνεται από την σχέση :

$$\cotan I = \frac{3}{2} \lambda = \frac{3}{2} \lambda_0 \frac{r}{R}$$

Εάν η γωνία σφήνωσης,  $\alpha$ , είναι καθορισμένη, τότε μπορούμε να προσδιορίσουμε την γωνία προσβολής  $i$  ( $i = I - \alpha$ ). Στη συνέχεια μπορούμε τότε να βρούμε τον συντελεστή άνωσης  $C_z$  με τη βοήθεια κατάλληλων διαγραμμάτων  $C_z - i$ .

Εάν ο αριθμός των πτερυγίων,  $p$ , είναι δεδομένος, τότε χωρίς δυσκολία μπορούμε να υπολογίσουμε το  $C_z \rho l$  καθώς και τη χορδή  $l$  σε διάφορα σημεία κατά μήκος της πτέρυγας, αναλόγως της απόστασης  $r$  από τον άξονα περιστροφής της πτερύγωσης.

Η έκφραση  $C_z \rho l$  δείχνει ότι η χορδή του προφίλ στην απόσταση  $r$  από τον άξονα, είναι πολύ μικρότερη για λόγο ταχυτήτων  $\lambda_0$  υψηλό. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν ο λόγος ταχυτήτων  $\lambda_0$  είναι υψηλός η γωνιακή ταχύτητα είναι σημαντική. Οι πτερυγώσεις είναι τόσο ελαφρύτερες όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής.

Η σχέση δείχνει επίσης, ότι αν το  $C_z$  παραμένει σταθερό κατά το μήκος της πτέρυγας τότε το πλάτος της αυξάνεται από το ακροπτερύγιο προς τη βάση της πτέρυγας.

Για τις περισσότερες ανεμογεννήτριες, η τιμή του  $C_z$  αυξάνεται από το ακροπτερύγιο προς τη βάση της πτέρυγας έτσι ώστε η αύξηση του πλάτους της πτερύγωσης να είναι μειωμένη σε σύγκριση με την περίπτωση όπου  $C_z$  είναι σταθερό και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουμε τη μείωση της μάζας των πτερύγων.

### 2.4 Θεωρία αεροδυναμικής απόδοσης της πτερύγωσης. Βέλτιστη γωνία προσβολής.

Ορίζουμε την αεροδυναμική απόδοση,  $n$ , της πτερύγωσης μεταξύ των αποστάσεων  $r$  και  $r + dr$  σαν το λόγο μεταξύ της ισχύος που παράγεται πάνω στην πτερύγωση προς τη συνολική ισχύ που αναπτύσσεται από τον άνεμο που διασχίζει την πτερύγωση.

$$n = \frac{dP_u}{dP_t} = \frac{\omega dM}{V dF_v} = \frac{U dF_u}{V dF_v}$$

$dF_u$ ,  $dF_v$  είναι οι συνιστώσες του αεροδυναμικού φορτίου στο επίπεδο περιστροφής της πτερύγωσης και κάθετα σ' αυτόν αντίστοιχα (βλέπε **εικόνα 2.3**).

$$dF_u = dR_z \sin I - dR_x \cos I$$

$$dF_v = dR_z \cos I + dR_x \sin I$$

Εξάλλου:

$$\cotan I = U / V$$

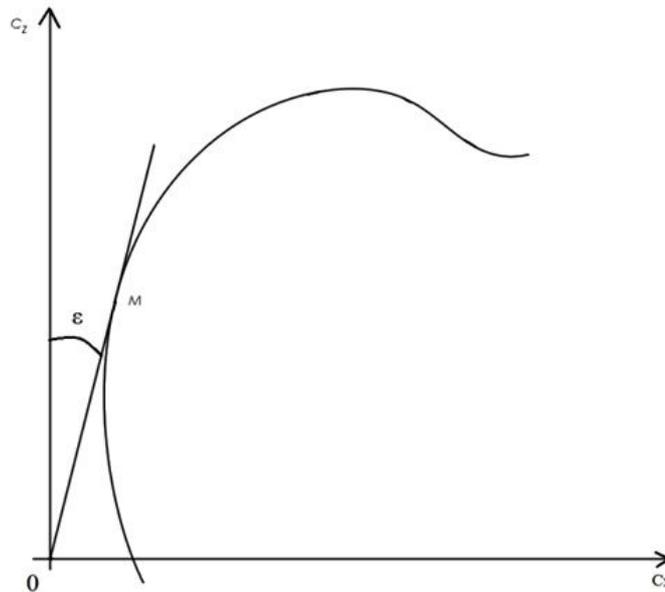
Υπό αυτές τις συνθήκες :

$$n = \frac{U dF_u}{V dF_v} = \frac{dR_z \sin I - dR_x \cos I}{dR_z \cos I + dR_x \sin I} \cotan I$$

Αυτή η έκφραση για την απόδοση, n, μπορεί να γραφτεί διαφορετικά, λαμβάνοντας υπόψη :

$$\tan \varepsilon = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{C_x}{C_z}$$

$$n = \frac{1 - \tan \varepsilon \cotan I}{\cotan I + \tan \varepsilon} \cotan I = \frac{1 - \tan \varepsilon \cotan I}{1 + \tan \varepsilon \tan I}$$



Εικόνα 2.4: Διάγραμμα  $C_z$ - $C_x$  [1]

Όσο πιο μικρό είναι το  $\tan \varepsilon$ , τόσο καλύτερη απόδοση, n, έχουμε. Αν το  $\tan \varepsilon$  είναι ίσο με μηδέν τότε η αεροδυναμική απόδοση ισούται με τη μονάδα.

Στην πραγματικότητα, η τιμή της  $\tan \varepsilon$  καθορίζεται από την τιμή της γωνίας προσβολής, i. Το  $\tan \varepsilon$  έχει ελάχιστη τιμή στο σημείο που η ΟΜ εφάπτεται στο διάγραμμα  $C_z$ - $C_x$ . (βλέπε εικόνα 2.4). Σε αυτό το συγκεκριμένο σημείο, η αεροδυναμική απόδοση είναι η μέγιστη.

## 2.5 Η θεωρία στροβίλων του Glauert βελτιωμένη από ερευνητές του Παν/μίου AMHERST Της Μασαχουσέτης

### Σύστημα στροβίλων στις πτέρυγες.

Πίσω από κάθε πτέρυγα ενός ρότορα δημιουργείται μια στιβάδα δινών που αποτελείται κυρίως από δύο στροβίλους που γεννιούνται ο ένας κοντά στον άξονα του δρομέα και ο άλλος στο ακροπερύγιο κάθε πτέρυγας.

Οι περιφερειακοί στροβίλοι, που γεννιούνται στο ακροπερύγιο κάθε πτέρυγας, σχηματίζουν έλικες που αποσπώνται, κατόπιν της περύγωσης, από τα ακροπερύγια. Η ακτίνα αυτών των ελίκων αυξάνεται κατόπιν του δρομέα μέχρι να σταθεροποιηθεί σ'ένα συγκεκριμένο επίπεδο.

Οι στροβίλοι που γεννιούνται κοντά στον άξονα του δρομέα περιστρέφονται και αυτοί σχηματίζοντας ένα σπирάλ γύρω από τον άξονα του δρομέα.

Εξάλλου από αεροδυναμική άποψη για τον προσδιορισμό του πεδίου ταχυτήτων, τα περύγια μπορούν να υποκατασταθούν από στροβίλους που έχουν σαν άξονα την κάθε πτέρυγα.

Το όλο σύστημα στροβίλων φαίνεται στις εικόνες 2.5 α και 2.5 β.

Σε ένα δεδομένο σημείο, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η συνισταμένη ταχύτητα του αέρα έχει σαν συνιστώσες τη φυσική ταχύτητα του ανέμου και την ταχύτητα που επάγεται από το σύστημα στροβίλων.

Το πεδίο ταχυτήτων που επάγονται από το σύστημα των στροβίλων μπορεί να θεωρηθεί σαν το αποτέλεσμα της υπέρθεσης των τριών παρακάτω συστημάτων στροβίλων:

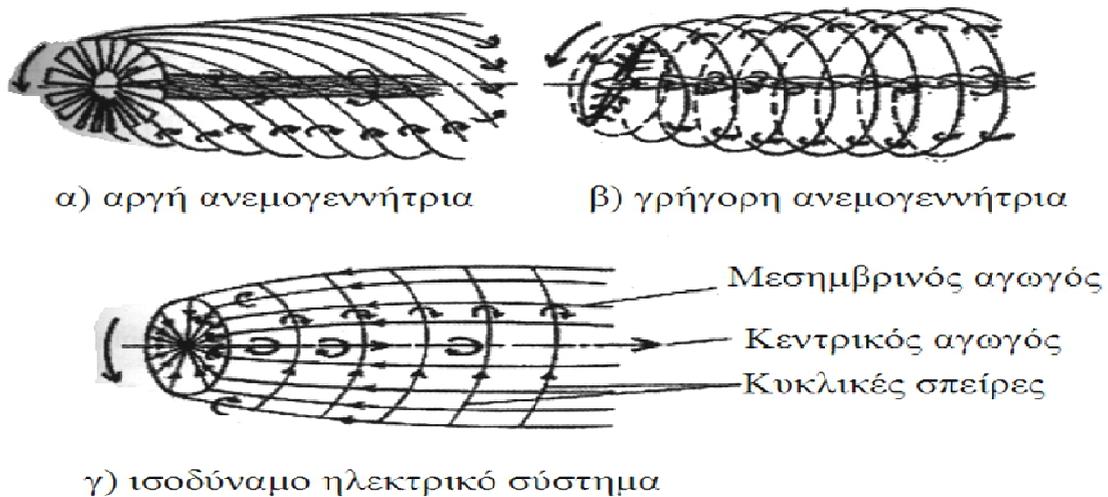
- ένα κεντρικός στροβίλος με άξονα τον άξονα του δρομέα και κυκλοφορία  $p\Gamma = \Gamma_0$  ( $\Gamma$  : η κυκλοφορία του στροβίλου μιας πτέρυγας,  $p$  : ο αριθμός των περύγων)
- τους στροβίλους που αναπτύσσονται στις πτέρυγες
- μια στιβάδα περιφερειακών στροβίλων αποτελούνται κυρίως από τις δίνες που στρέφονται σχηματίζοντας μια έλικα γύρω από τον άξονα του δρομέα.

## 2.6 Ισοδύναμο ηλεκτρικό σύστημα . Προσδιορισμός των ταχυτήτων που προκαλούνται.

Η ρευστομηχανική διδάσκει ότι οι επαγόμενες από το σύστημα των στροβίλων ταχύτητες μπορούν να υπολογιστούν με βάση τους νόμους των Biot και Savart ή το θεώρημα του Ampere, κατά τον ίδιο τρόπο που υπολογίζονται τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από ρεύματα που ρέουν σε κυκλώματα με που έχουν την ίδια μορφή με το σύστημα των στροβίλων.

Ας αντικαταστήσουμε το σύστημα των στροβίλων με ένα ηλεκτρικό σύστημα που φαίνεται στην εικόνα 2.5 γ και το οποίο αποτελείται από:

- Έναν κεντρικό αγωγό που διαρέεται από ρεύμα  $p I = I_0$ ,
- Ένα σύνολο  $p$  αγωγών μήκους  $R$  τοποθετημένα σε «αστέρα», το καθένα να διαρέεται από ρεύμα  $I$ , έχοντας σα κοινό σημείο τον προηγούμενο αγωγό με ρεύμα  $I_0$ .
- Ένα σύνολο αγωγών που περιστρέφονται σε έλικα γύρω από τον άξονα του δρομέα, παρέχοντας καθένας ένα ρεύμα  $I$  στους αγωγούς που αντιπροσωπεύουν τις πτέρυγες.



Εικόνα 2.5: Στροβιλισμοί και ισοδύναμο ηλεκτρικό σύστημα. [1]

Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, αυτή η ίδια στρώση φύλλου μπορεί να αντικατασταθεί από ένα σύνολο κυκλικών σπειρών με κέντρο τον άξονα της έλικας με μία πλειάδα αγωγών που βρίσκονται στο μεσημβρινό.

Τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τα συγκροτήματα αγωγών υπολογίζονται με την υπόθεση ότι οι πτερυγώσεις είναι άπειρες σε αριθμό, και μπορούν να αντικατασταθούν όλες από ένα πλήθος αγωγών με ένα δίσκο ρεύματος  $I_0$  στο κέντρο. Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, αυτή η στιβάδα αγωγών μπορεί να αντικατασταθεί από κυκλικές σπείρες με κέντρο τον άξονα του δρομέα και από περιφερειακούς αγωγούς πάνω σε κάθε μεσημβρινό επίπεδο.

Προκειμένου να υπολογιστούν τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από το σύνολο των αγωγών αυτών γίνεται η υπόθεση ενός απείρου αριθμού πτερύγων που επιτρέπει να αντικατασταθεί το σύνολο των αγωγών σε «αστέρα» από ένα δίσκο που διαρρέεται στο κέντρο του από ρεύμα  $I_0$ .

Ας προσδιορίσουμε καταρχήν το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον κεντρικό αγωγό, το δίσκο και τους μεσημβρινούς αγωγούς, σε επίπεδα κάθετα στον άξονα περιστροφής τοποθετημένα πολύ κοντά, ανάντη το ένα και κατόντη το άλλο του δίσκου που αντιπροσωπεύει την πτερύγωση. Οι γραμμές ροής του μαγνητικού πεδίου είναι κύκλοι με κέντρο πάνω στον άξονα του δρομέα, τόσο ανάντη όσο και κατόντη του δίσκου.

Μπορεί να παρατηρηθεί εξάλλου ότι τα μαγνητικά πεδία  $H_C$  και  $H_M$  όπου  $C$  συμβολίζει τον κεντρικό αγωγό και  $M$  τους μεσημβρινούς (θεωρητικά άπειρους), έχουν την ίδια τιμή για ίδια απόσταση από τον άξονα είτε ανάντη είτε κατόντη είτε πάνω στο δίσκο, λόγω της μικρής απόστασης που διαχωρίζει τα επίπεδα αυτά.

Αν εφαρμόσουμε το θεώρημα του Ampere ανάντη του δίσκου κατά μήκος ενός κύκλου με κέντρο πάνω στον άξονα του δρομέα, θα έχουμε ένα μηδενικό πεδίο αφού κανένα ρεύμα δεν διαπερνά την κυκλική αυτή περιφέρεια. Ανάντη του δίσκου το πεδίο  $\vec{H}_D$  που οφείλεται στα ρεύματα που περνάνε από το δίσκο ( $D$  συμβολίζει το δίσκο και ' ότι βρισκόμαστε ανάντη του δίσκου) είναι ίσο αλλά σε αντίθετη διεύθυνση με τα πεδία που δημιουργούνται από τον κεντρικό και τους μεσημβρινούς αγωγούς.

$$\vec{H}_D = -(\vec{H}_C + \vec{H}_M)$$

Αυτό το πεδίο  $\vec{H}_D'$  που ασκείται σ' ένα σημείο  $M'$  ανάντη του δίσκου είναι ίσο και αντίθετο με το πεδίο  $\vec{H}_D$  που ασκείται σ' ένα σημείο  $M$  που βρίσκεται σε απόσταση  $r$  από τον άξονα απέναντι από το σημείο  $M'$  αλλά ανάντη του δίσκου και οφείλεται και αυτό επίσης στα ρεύματα που διαρρέουν το δίσκο. Άρα:

$$\vec{H}_D = -\vec{H}_D' = \vec{H}_C + \vec{H}_M$$

Κατάντη του δίσκου, τα μαγνητικά πεδία  $\vec{H}_D, \vec{H}_C$  και  $\vec{H}_M$  προστίθενται. Το συνιστάμενο πεδίο  $\vec{H}$ , σε μια απόσταση  $r$  από τον άξονα είναι:

$$\vec{H} = \vec{H}_D + \vec{H}_C + \vec{H}_M = 2\vec{H}_D$$

Δηλαδή τα μαγνητικά πεδία από τον κεντρικό και τους μεσημβρινούς αγωγούς έχουν την ίδια τιμή εξαιτίας του ότι τα επίπεδα που περνούν από τα σημεία  $M$  και  $M'$  βρίσκονται πολύ κοντά στο δίσκο.

Πάνω στο δίσκο το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται στα ρεύματα που διαρρέουν το δίσκο είναι μηδενικό αφού το πεδίο που δημιουργείται από κάθε κυκλικό τομέα αναιρείται από το αντίθετό του πάν στο δίσκο. Σαν αποτέλεσμα το πεδίο πάνω στο δίσκο σε απόσταση  $r$  από τον άξονα περιστροφής είναι:

$$\vec{H} = \vec{H}_C + \vec{H}_M = \vec{H}_D$$

Ας προσδιορίσουμε τώρα το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τις κυκλικές σπείρες που σχηματίζουν ένα πηνίο. Έστω  $n_1$  ο αριθμός των σπειρών ανά μονάδα μήκους.

Στο κέντρο του πηνίου το αξονικό μαγνητικό πεδίο είναι:  $H_S = n_1 I$  και στο άκρο του πηνίου είναι:  $H_S / 2 = n_1 I / 2$

Ας επιστρέψουμε τώρα στην περύγωση για να δούμε τις αντιστοιχίσεις.

Κατάντη του δίσκου στο πεδίο  $2\vec{H}_D$  κάθετο στον άξονα αντιστοιχεί μια εφαπτομενική επαγόμενη ταχύτητα  $v_\theta$ . Παρατηρείται μια περιστροφή της ροής με γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$  και φορά αντίθετη ως προς την περιστροφή της περύγωσης. Πάνω στο δίσκο στο πεδίο  $\vec{H}_D$  αντιστοιχεί μια εφαπτομενική ταχύτητα  $v_\theta / 2$  και άρα μια γωνιακή ταχύτητα  $\Omega/2$ . Ανάντη του δίσκου το πεδίο είναι μηδενικό και γι' αυτό το λόγο και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της ροής είναι μηδενική.

Ας ονομάσουμε  $v$ , την επαγόμενη από το σύστημα των στροβίλων, αξονική ταχύτητα κατάντη του δίσκου του δρομέα. Αυτή η επαγόμενη ταχύτητα που αντιστοιχεί στο μαγνητικό πεδίο  $n_1 I$  έχει αντίθετη φορά με την ταχύτητα  $V_1$ . Πάνω στο επίπεδο περιστροφής της περύγωσης η αξονική επαγόμενη ταχύτητα είναι  $v/2$  που αντιστοιχεί με το μαγνητικό πεδίο  $n_1 I / 2$ .

Η συνισταμένη αξονική ταχύτητα είναι:

$$V = V_1 - v/2 \text{ πάνω στο δρομέα}$$

$$V_2 = V_1 - v \text{ κατάντη του δρομέα}$$

Απαλείφοντας το  $v$  σ' αυτές τις δύο εξισώσεις, παρατηρούμε ότι η σχέση του Betz  $V=(V_1+V_2)/2$  είναι σε ισχύ.

Η ταχύτητα περιστροφής της ροής σε σχέση με την περιστροφή της περύγωσης κατάντη του δρομέα είναι  $\omega + \Omega$ .

$$\text{Έστω } \omega + \Omega = h\omega. \text{ Τότε } \Omega = (h-1)\omega$$

Σ' αυτές τις συνθήκες η ταχύτητα περιστροφής της ροής σε σχέση με την περιστροφή της περύγωσης πάνω στο δρομέα  $\omega + \Omega/2$  γίνεται

$$\omega + \Omega/2 = (1+h)\omega/2$$

που αντιστοιχεί σε μια απόσταση  $r$ , σε μια εφαπτομενική ταχύτητα  $U' = (1+h)\omega r/2$

αν θέσουμε  $V_2 = k V_1$  η αξονική ταχύτητα πάνω στο δρομέα,  $V$  μπορεί να εκφραστεί σαν:

$$V=(V_1+V_2)/2 = (1+k) V_1 / 2$$

Η συνεφαπτομένη της γωνίας κλίσης I και η συνιστάμενη ταχύτητα  $\vec{W} = \vec{V} + \vec{U}$ , σε απόσταση r από τον άξονα δίδονται από:

$$\cotan I = \frac{U'}{V} = \frac{\omega r}{V_1} \frac{1+h}{1+k} = \lambda \frac{1+h}{1+k} = \lambda_c$$

$$W = \frac{V_1 (1+k)}{2 \sin I} = \frac{\omega r (1+h)}{2 \cos I}$$

## 2.7 Υπολογισμός των αξονικών και εφαπτομενικών δυνάμεων. Υπολογισμός ροπής.

Έστω το στοιχείο της πτέρυγας μεταξύ των αποστάσεων r και r + dr. Ο υπολογισμός θα γίνει με δύο τρόπους: πρώτον, εξετάζοντας τα αεροδυναμικά φορτία και στη συνέχεια εφαρμόζοντας τα γενικά θεωρήματα της μηχανικής.

### 2.7.1 Πρώτος υπολογισμός

Όπως και πριν, έχουμε (βλέπε **Εικόνα2.3**) :

$$dR_z = \frac{1}{2} \rho C_z W^2 l dr \quad \text{και} \quad dR_x = \frac{1}{2} \rho C_x W^2 l dr$$

Με προβολή στον άξονα του δρομέα έχουμε την αξονική συνιστώσα

$$dF_v = dR_z \cos I + dR_x \sin I = \frac{1}{2} \rho W^2 l dr (C_z \cos I + C_x \sin I)$$

και με προβολή στο επίπεδο περιστροφής (ταχύτητα U), έχουμε την εφαπτομενική συνιστώσα

$$dF_u = dR_z \sin I - dR_x \cos I = \frac{1}{2} \rho W^2 l dr (C_z \sin I - C_x \cos I)$$

Οι εκφράσεις αυτές μπορούν να γραφούν, θέτοντας  $\tan \varepsilon = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{C_x}{C_z}$ ,

$$dF_v = \frac{1}{2} \rho l W^2 C_z \frac{\cos(I-\varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad \text{και} \quad dF_u = \frac{1}{2} \rho l W^2 C_z \frac{\sin(I-\varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr$$

Η συνεισφορά των στοιχείων των p πτερυγίων του δρομέα που βρίσκονται μεταξύ των αποστάσεων r και r + dr αυξάνεται στην ώση καθώς και στη ροπή είναι αντίστοιχα :

$$dF = p dF_v = \frac{1}{2} \rho p l W^2 C_z \frac{\cos(I-\varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr$$

$$dM = r p dF_u = \frac{1}{2} \rho p l r W^2 C_z \frac{\sin(I-\varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr$$

### 2.7.2 Δεύτερος υπολογισμός

Τα δύο αυτά μεγέθη (dF και dM) θα υπολογιστούν στη συνέχεια εφαρμόζοντας τα γενικά θεωρήματα της μηχανικής σε μια δακτυλιοειδή φλέβα του ρευστού που διέρχεται από το δρομέα μεταξύ της ακτίνας r και r + dr.

Σύμφωνα με το θεώρημα του Euler η στοιχειώδης αξονική ώση



$$dF = \rho \pi r dr V^2 (1 - k^2)$$

και η στοιχειώδης ροπή:

$$dM = \rho \pi r^3 dr V_1 (1 + k) \Omega = \rho \pi r^3 dr \omega V_1 (1 + k) (h - 1)$$

Εξισώνοντας τα αποτελέσματα από τους δύο τρόπους υπολογισμού των αεροδυναμικών φορτίων και αν αντικαταστήσουμε την  $W$  με βάση την  $V_1$  έχουμε:

$$C_z p l = 2 \pi r \frac{V_1^2 (1 - k^2) \cos \varepsilon}{W^2 \cos(I - \varepsilon)} = 8 \pi r \frac{(1 - k) \cos \varepsilon \sin^2 I}{(1 + k) \cos(I - \varepsilon)}$$

Κάνοντας το ίδιο για το  $dM$ , παίρνουμε :

$$C_z p l = 2 \pi r \omega \frac{V_1 (1 + k) (h - 1) \cos \varepsilon}{W^2 \sin(I - \varepsilon)} = 4 \pi r \frac{(h - 1) \sin 2I \cos \varepsilon}{(h + 1) \sin(I - \varepsilon)}$$

Από αυτές τις ισότητες, μπορούμε να εξάγουμε τα εξής:

$$G = \frac{1 - k}{1 + k} = \frac{C_z p l \cos(I - \varepsilon)}{8 \pi r \cos \varepsilon \sin^2 I} \quad E = \frac{h - 1}{h + 1} = \frac{C_z p l \sin(I - \varepsilon)}{4 \pi r \sin 2I \cos \varepsilon}$$

Διαιρώντας κατά μέλη αυτό οδηγεί :

$$\frac{G}{E} = \frac{(1 - k)(h + 1)}{(h - 1)(1 + k)} = \cotan(I - \varepsilon) \cotan I$$

## 2.8 Τοπικός συντελεστής ισχύος.

Η ισχύς που μπορεί να εξαχθεί από τη στοιχειώδη φλέβα του ρευστού που περνά μέσα από το δρομέα μεταξύ  $r$  και  $r + dr$  δίνεται από την έκφραση:

$$dP_u = \omega dM = \rho \pi r^3 dr \omega^2 V_1 (1 + k) (h - 1)$$

Αυτή η τιμή αντιστοιχεί στον τοπικό συντελεστή ισχύος :

$$C_p = \frac{dP}{\rho \pi r dr V_1^3} = \frac{\omega^2 r^2}{V_1^2} (1 + k) (h - 1) = \lambda^2 (1 + k) (h - 1)$$

όπου :

$$\lambda = \omega r / V_1$$

### 2.8.1 Μέγιστος τοπικός συντελεστής ισχύος ενός ιδανικού δρομέα

Για να καθοριστεί ο μέγιστος συντελεστής ισχύος, θα εξετάσουμε ένα ιδανικό δρομέα, υποθέτοντας ότι οι αεροτομές των πτερύγων έχουν συντελεστή αντίστασης  $C_x = 0$  και επομένως  $\tan \varepsilon = C_x / C_z = 0$ .

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η σχέση  $G / E$  μπορεί να γραφτεί :

$$\frac{G}{E} = \frac{(1 - k)(h + 1)}{(h - 1)(1 + k)} = \cotan^2 I = \lambda^2 \frac{(1 + h)^2}{(1 + k)^2} \quad \text{και ακόμα} \quad \lambda^2 = \frac{1 - k^2}{h^2 - 1}$$

Αν λύσουμε ως προς  $h$ :

$$h = \sqrt{1 + \frac{1 - k^2}{\lambda^2}}$$

Επομένως ο συντελεστής ισχύος γίνεται :

$$C_p = \lambda^2 (1+k) \left( \sqrt{1 + \frac{1-k^2}{\lambda^2}} - 1 \right)$$

Για μια δεδομένη τιμή του  $\lambda$ , ο συντελεστής ισχύος διέρχεται από ένα μέγιστο ως συνάρτηση του  $k$  για :

$$\frac{dC_p}{dk} = 0$$

Υπολογίζοντας αυτήν την παράγωγο προκύπτει το μέγιστο  $C_p$  το οποίο επιτυγχάνεται για μια τιμή του  $k$  τέτοια ώστε:

$$\lambda^2 = \frac{1-3k+4k^3}{3k-1}$$

Αυτή η έκφραση μπορεί επίσης να γραφτεί ως εξής :

$$4k^3 - 3k(\lambda^2 + 1) + \lambda^2 + 1 = 0$$

Έστω  $k$  :

$$k = \sqrt{\lambda^2 + 1} \cos \theta$$

Αντικαθιστώντας το  $k$  στην προηγούμενη σχέση και διαιρώντας με το  $(\lambda^2 + 1)^{3/2}$  προκύπτει :

$$4 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} = 0$$

$$\text{αλλά : } 4 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta = \cos 3\theta$$

οπότε μπορεί να γραφτεί :

$$\cos 3\theta = \frac{-1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} \quad \text{ή αλλιώς} \quad : \cos(3\theta - \pi) = \frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}}$$

και αυτό ισοδυναμεί με :

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos \left( \frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} \right) + \frac{\pi}{3} = \frac{1}{3} \arctan \lambda + \frac{\pi}{3}$$

Για κάθε τιμή του  $\lambda$ , μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίστοιχη γωνία  $\theta$ , το  $k$  και ως εκ τούτου, τη μέγιστη δυνατή τιμή του συντελεστή ισχύος  $C_p$ .

## 2.9 Βέλτιστες τιμές της γωνίας κλίσης $I$ και του $C_z p l$ .

Η γωνία κλίσης  $I$  και το γινόμενο  $C_z p l$  είναι:

$$\cotan I = \lambda_e = \lambda \frac{1+h}{1+k} \quad C_z p l = 8 \pi r \frac{(1-k) \cos \varepsilon \sin^2 I}{(1+k) \cos(I-\varepsilon)}$$

Από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την προηγούμενη παράγραφο, ο υπολογισμός της γωνίας  $\theta$  μπορεί να γίνει για οποιαδήποτε τιμή του  $\lambda$ . Στη συνέχεια μπορούν να προσδιοριστούν οι τιμές του  $k$ ,  $h$ , και κατά συνέπεια εκείνα της  $\lambda_e$  και  $I$ .

Για τον υπολογισμό του  $C_z p l$ , θεωρούμε μια ιδανική πτερύγωση, στο οποίο το  $\varepsilon$  ισούται με μηδέν κατά τα προηγούμενα. Έτσι η τιμή για το  $C_z p l / r$  είναι:

$$\frac{C_z p l}{r} = 8 \pi \frac{(1-k)}{(1+k)} \tan^2 I \cos I$$

η οποία μπορεί να εκφραστεί επίσης λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση  $\cotan I = \lambda_e$

$$\frac{C_z p l}{r} = 8 \pi \frac{(1-k)}{(1+k)} \frac{1}{\lambda_e^2 \sqrt{\lambda_e^2 + 1}}$$

Οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τιμών του  $C_z p l / r$  και  $I$  σε βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας. Η γνώση αυτών των τιμών είναι απαραίτητη ώστε να οριστεί σε κάθε σημείο της πτερύγωσης η χορδή  $l$  του προφίλ και της γωνίας σφήνωσης,  $\alpha$ .

Για να διευκολυνθούν οι εφαρμογές, οι τιμές  $\lambda_e$ ,  $k$ ,  $h$ ,  $C_p$ ,  $C_z p l / r$  και  $I$  υπολογίζονται με ηλεκτρονικό υπολογιστή ( πρόγραμμα OPTI ) για τιμές του  $\lambda$  μεταξύ 0,1 και 10. Στον **πίνακα 2.1** βλέπουμε τις τιμές που ελήφθησαν.

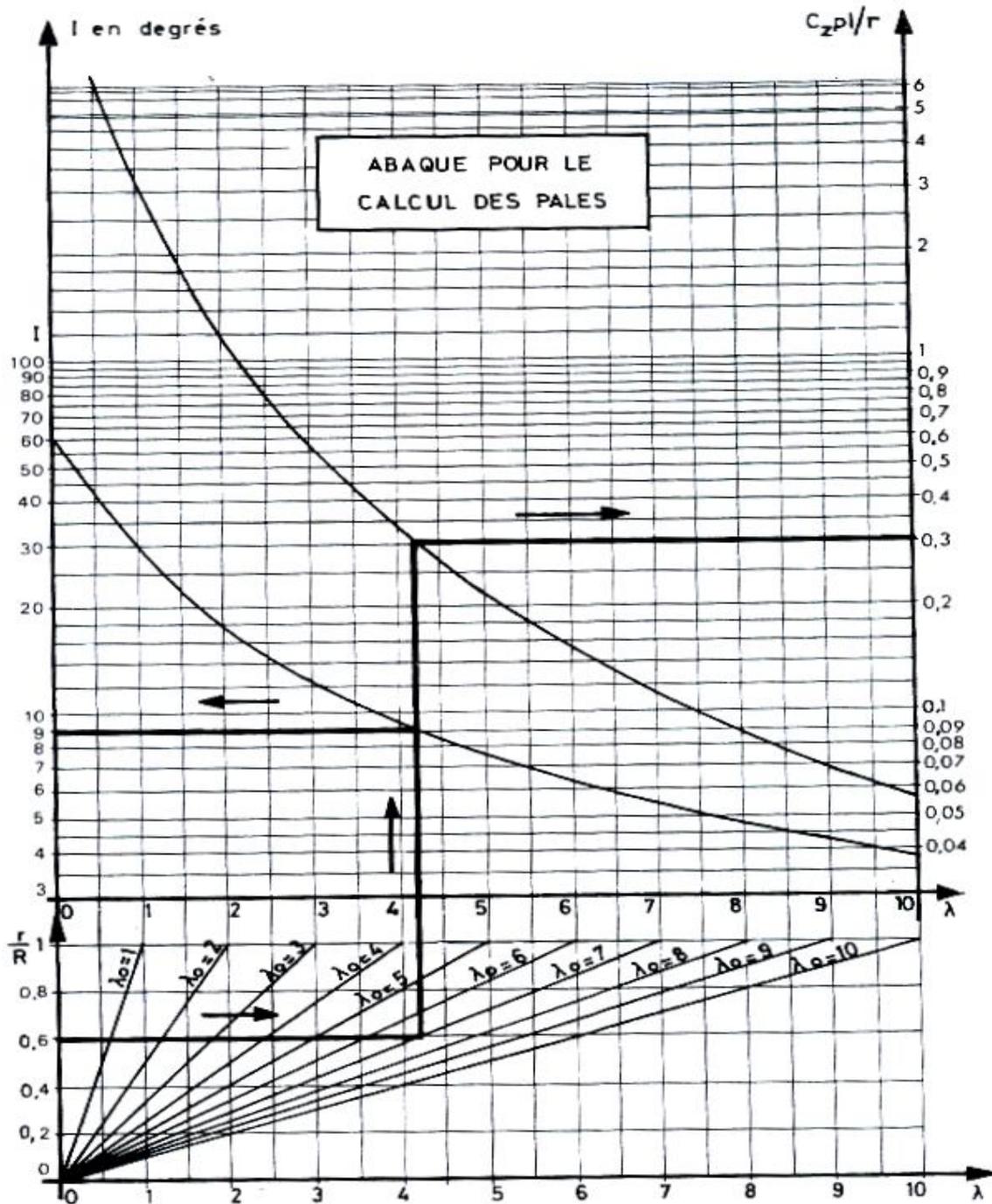
ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

$\lambda$	$\lambda e$	k	h	$C_p$	$C_{zpl/r}$	l	$\lambda$	$\lambda e$	k	h	$C_p$	$C_{zpl/r}$	l
0.100	0.670	0.473	8.866	0.116	11.149	56.193	5.000	7.555	0.335	1.018	0.587	0.217	7.540
0.200	0.768	0.451	4.574	0.207	9.819	52.460	5.100	7.704	0.335	1.017	0.588	0.029	7.396
0.300	0.873	0.432	3.168	0.279	8.600	48.867	5.200	7.853	0.335	1.016	0.588	0.201	7.257
0.400	0.984	0.416	2.483	0.336	7.506	45.466	5.300	8.002	0.335	1.016	0.588	0.194	7.123
0.500	1.099	0.403	2.086	0.381	6.541	42.290	5.400	8.151	0.335	1.015	0.588	0.187	6.994
0.600	1.219	0.393	1.830	0.416	5.700	39.358	5.500	8.300	0.335	1.015	0.588	0.180	6.870
0.700	1.343	0.384	1.655	0.444	4.975	36.672	5.600	8.449	0.335	1.014	0.588	0.174	6.750
0.800	1.470	0.377	1.530	0.465	4.353	34.227	5.700	8.598	0.335	1.014	0.588	0.168	6.634
0.900	1.600	0.371	1.437	0.485	3.821	32.009	5.800	8.747	0.335	1.013	0.589	0.163	6.522
1.000	1.732	0.366	1.366	0.500	3.367	30.000	6.000	9.046	0.335	1.012	0.589	0.157	6.413
1.100	1.866	0.362	1.311	0.512	2.980	28.183	6.100	9.195	0.335	1.012	0.589	0.152	6.308
1.200	2.002	0.359	1.267	0.522	2.648	26.537	6.200	9.344	0.335	1.011	0.589	0.147	6.207
1.300	2.140	0.356	1.232	0.531	2.363	25.046	6.300	9.494	0.335	1.011	0.589	0.143	6.108
1.400	2.279	0.353	1.203	0.538	2.118	23.692	6.400	9.643	0.335	1.011	0.589	0.138	6.013
1.500	2.419	0.351	1.179	0.544	1.906	22.460	6.500	9.792	0.334	1.010	0.589	0.134	5.920
1.600	2.560	0.349	1.159	0.549	1.723	21.337	6.600	9.942	0.334	1.010	0.589	0.130	5.831
1.700	2.702	0.348	1.142	0.553	1.563	20.310	6.700	10.091	0.334	1.010	0.590	0.126	5.744
1.800	2.844	0.346	1.128	0.557	1.423	19.370	6.800	10.241	0.334	1.010	0.590	0.122	5.659
1.900	2.988	0.345	1.115	0.560	1.300	18.506	6.900	10.390	0.334	1.009	0.590	0.119	5.577
2.000	3.132	0.344	1.105	0.563	1.191	17.710	7.000	10.539	0.334	1.009	0.590	0.116	5.498
2.100	3.276	0.343	1.095	0.568	1.095	16.976	7.100	10.689	0.334	1.009	0.590	0.112	5.420
2.200	3.421	0.343	1.087	0.568	1.010	16.296	7.200	10.838	0.334	1.009	0.590	0.109	5.345
2.300	3.566	0.342	1.080	0.570	0.934	15.666	7.300	10.988	0.334	1.008	0.590	0.106	5.271
2.400	3.711	0.341	1.074	0.571	0.865	15.080	7.400	11.137	0.334	1.008	0.590	0.103	5.200
2.500	3.857	0.341	1.068	0.573	0.804	14.534	7.500	11.287	0.334	1.008	0.590	0.101	5.131
2.600	4.003	0.340	1.063	0.574	0.749	14.025	7.600	11.436	0.334	1.008	0.590	0.098	5.063
2.700	4.150	0.340	1.059	0.576	0.699	13.549	7.700	11.586	0.334	1.007	0.590	0.096	4.997
2.800	4.296	0.339	1.055	0.577	0.654	13.103	7.800	11.735	0.334	1.007	0.590	0.093	4.933
2.900	4.443	0.339	1.051	0.578	0.613	12.684	7.900	11.885	0.334	1.007	0.590	0.091	4.871
3.000	4.590	0.339	1.048	0.579	0.586	12.290	8.000	12.034	0.334	1.007	0.591	0.088	4.810
3.100	4.737	0.338	1.045	0.580	0.542	11.919	8.100	12.184	0.334	1.007	0.591	0.086	4.750
3.200	4.884	0.338	1.042	0.580	0.511	11.569	8.200	12.334	0.334	1.007	0.591	0.084	4.692
3.300	5.032	0.338	1.040	0.581	0.482	11.239	8.300	12.483	0.334	1.006	0.591	0.082	4.635
3.400	5.180	0.337	1.038	0.582	0.456	10.926	8.400	12.633	0.334	1.006	0.591	0.080	4.580
3.500	5.328	0.337	1.036	0.582	0.431	10.630	8.500	12.782	0.334	1.006	0.591	0.078	4.526
3.600	5.476	0.337	1.034	0.583	0.409	10.349	8.600	12.932	0.334	1.006	0.591	0.077	4.473
3.700	5.624	0.337	1.032	0.583	0.388	10.083	8.700	13.082	0.334	1.006	0.591	0.075	4.422
3.800	5.772	0.337	1.030	0.584	0.369	9.829	8.800	13.231	0.334	1.006	0.591	0.073	4.371
3.900	5.920	0.336	1.029	0.584	0.351	9.588	8.900	13.381	0.334	1.006	0.591	0.071	4.322
4.000	6.068	0.336	1.027	0.585	0.334	9.358	9.000	13.531	0.334	1.005	0.591	0.070	4.274
4.100	6.217	0.336	1.026	0.585	0.334	9.138	9.000	13.680	0.334	1.005	0.591	0.068	4.227
4.200	6.365	0.336	1.025	0.585	0.305	8.928	9.100	13.830	0.334	1.005	0.591	0.067	4.181
4.300	6.514	0.336	1.024	0.586	0.291	8.728	9.200	13.980	0.334	1.005	0.591	0.065	4.136
4.400	6.662	0.336	1.023	0.586	0.278	8.536	9.300	14.129	0.334	1.005	0.591	0.064	4.092
4.500	6.811	0.336	1.022	0.586	0.267	8.353	9.400	14.279	0.334	1.005	0.591	0.063	4.048
4.600	6.960	0.336	1.021	0.586	0.255	8.177	9.500	14.429	0.334	1.005	0.591	0.061	4.006
4.700	7.108	0.336	1.020	0.587	0.245	8.008	9.600	14.578	0.334	1.005	0.591	0.060	3.965
4.800	7.257	0.335	1.019	0.587	0.235	7.846	9.700	14.728	0.334	1.005	0.591	0.059	3.924
4.900	7.406	0.335	1.018	0.587	0.226	7.690	9.800	14.878	0.334	1.005	0.591	0.058	3.884
							10.000	15.028	0.334	1.004	0.591	0.057	3.845
												0.070	3.807

Πίνακας 2.1: Τιμές των  $\lambda_e$ , k, h,  $C_p$ ,  $C_{zpl/r}$  [1]

**Διάγραμμα**

Έχουμε επίσης δημιουργήσει ένα διάγραμμα, **εικόνα 2.6**, με τις καμπύλες των τιμών  $C_z p I / r$  και  $I$  ως συνάρτηση του  $\lambda$ . Αυτό το γράφημα μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε γρήγορα, ανάλογα με τη θέση του προφίλ της περύγωσης που καθορίζεται από το  $r / R$ , τις τιμές της γωνίας κλίσης  $I$  και το ποσό του  $C_z p I / r$  έτσι ώστε μια ανεμογεννήτρια να παρουσιάζει τις καλύτερες επιδόσεις για την συγκεκριμένη ταχύτητα  $\lambda_0$  που έχει επιλεγεί. Η χρήση του διαγράμματος είναι απλή. Η συγκεκριμένη ταχύτητα  $\lambda_0$  που επιλέγεται για την οποία η ανεμογεννήτρια πρέπει να έχει τη μέγιστη απόδοση είναι γνωστή, αρκεί να προβεί από το σημείο τομής της λοξής γραμμής, που χαρακτηρίζεται από τη συγκεκριμένη ταχύτητα  $\lambda_0$  ( από την εξίσωση :  $\lambda = \lambda_0 r / R$  ) και αντιστοιχεί στην οριζόντια θέση του προφίλ που καθορίζεται από την τιμή του  $r / R$ , η οποία είναι μια κάθετη γραμμή. Αυτή η κάθετη γραμμή βρίσκεται στην κοπή των καμπύλων  $I ( \lambda_0 )$  και  $C_z p I / r$  σε δύο σημεία των οποίων οι συντεταγμένες είναι ίσο με τις τιμές της  $I$  και  $C_z p I / r$  που ψάχνουμε.



Εικόνα 2.6: Διάγραμμα [1]

Η εφαρμογή των κανόνων εργασίας οδηγεί στα ακόλουθα αποτελέσματα :

$$I = 9^\circ \quad C_z p l / r = 0,3$$

Αυτές οι τιμές μπορούν επίσης να προσδιοριστούν από τον **Πίνακα 2.1**. Για αυτήν την ενότητα με συγκεκριμένη ταχύτητα  $\lambda$  θεωρείται ίση με 4,2 ( $\lambda = \lambda_0 r / R$ ). Για αυτή τη τιμή του  $\lambda$ , ο πίνακας δείχνει :

$$I = 8^\circ,93 \quad \text{και} \quad C_z p l / r = 0,305$$

Με την επανάληψη της λειτουργίας για άλλες τιμές του  $r$  λαμβάνεται η γωνία κλίσης  $I$  και η ποσότητα  $C_z p l / r$  σε όλο το μήκος της πτέρυγας. Έν συνεχεία, μπορούμε να καθορίσουμε τις χορδές των διαφόρων προφίλ και τις γωνίες σφήνωσης. Το ίδιο ισχύει και για την γωνία σφήνωσης  $\alpha$  όπου συνδέεται με τη γωνία προσβολής με τη σχέση  $\alpha = I - i$ . Για την επίλυση του προβλήματος, πρέπει να επιλεγεί και η γωνία προσβολής.

## 2.10 Συντελεστής ισχύος που μπορεί να επιτευχθεί με πτέρυγες που παρουσιάζουν αντίσταση. Βέλτιστη γωνία προσβολής.

Εστω τα στοιχεία των περυγών μεταξύ  $r$  και  $r+dr$ . Όπως αποδείχτηκε προωύτερα ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  δίνεται από τη σχέση:

$$C_p = \frac{\omega dM}{\rho \pi r dr V_1^3} = \frac{V dF}{\rho \pi r dr V_1^3} \frac{\omega dM}{V dF} = \frac{V dF}{\rho \pi r dr V_1^3} \frac{U dF_u}{V dF_v}$$

Εφόσον  $dF = p dF_v$  και  $dM = p r dF_u$

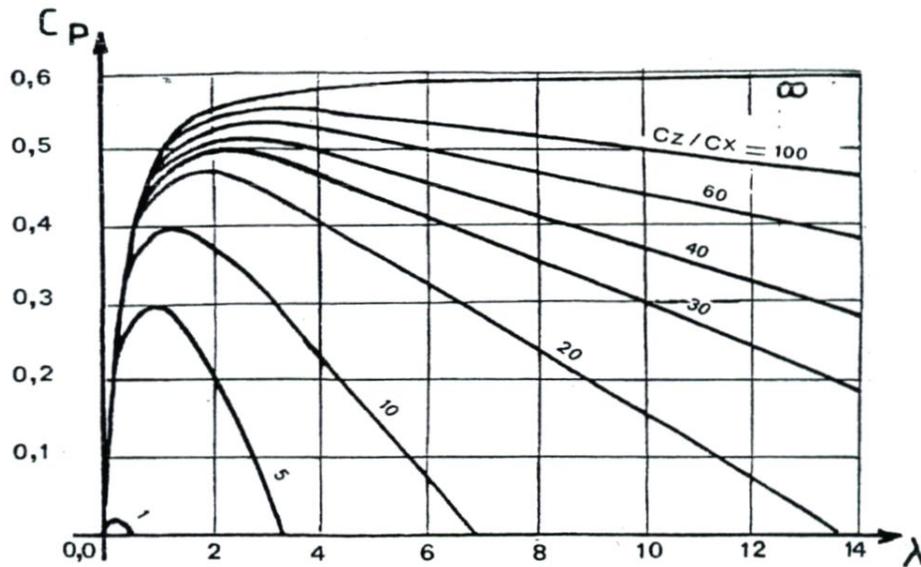
Αντικαθιστώντας τα  $dF_u$ ,  $dF_v$  και  $V$  και παίρνοντας υπόψη τις σχέσεις  $\cotan I = \lambda \frac{1+h}{1+k}$  και

$\tan \varepsilon = \frac{c_x}{c_z}$  έχουμε:

$$C_p = \frac{(1+k)(1-k^2)}{(1+h)} \frac{1 - \tan \varepsilon \cotan I}{1 + \tan \varepsilon \tan I}$$

Όταν το  $\tan \varepsilon = 0$ , ο πρώτος παράγοντας του δευτέρου μέλους της παραπάνω σχέσης (ο δεύτερος γίνεται ίσος με τη μονάδα) εκφράζει το συντελεστή ισχύος σε μια απόσταση  $r$  από τον άξονα, ενός δρομέα με πτέρυγες που δεν παρουσιάζουν αντίσταση. Ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  μεγιστοποιείται για τις συνθήκες του πίνακα.

Υποθέτοντας ότι το  $\tan \varepsilon$  δεν είναι μηδέν (πτέρυγες με μη μηδενικό συντελεστή αντίστασης), το **εικόνα 2.6** δείχνει τις μέγιστες τιμές του συντελεστή αντίστασης που είναι δυνατόν να επιτευχθούν σε συνάρτηση με το συντελεστή  $\lambda$  και για διάφορες τιμές του λόγου  $C_z/C_x$ . Στο διάγραμμα φαίνεται ότι για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση, σε μεγάλο  $\lambda$ , είναι απαραίτητο οι πτέρυγες να παρουσιάζουν τη μέγιστη δυνατή λεπτότητα που οδηγεί στην κατασκευή των περυγών με τέλεια αεροδυναμικά προφίλ. Για ένα δεδομένο λόγο ταχυτήτων ακροπτερυγίου,  $\lambda$ , ο συντελεστής ισχύος,  $C_p$ , είναι τόσο μεγαλύτερος όσο μικρότερο είναι το  $\tan \varepsilon$ . Ο συντελεστής ισχύος γίνεται μέγιστος για μια γωνία προσβολής που καθιστά το  $\tan \varepsilon$  ελάχιστο, δηλαδή για μια γωνία προσβολής που αντιστοιχεί στο σημείο επαφής της εφαπτομένης με την καμπύλη στο διάγραμμα  $C_z-C_x$ . (βλέπε **εικόνα 2.7**). Ξαναβρίσκουμε έτσι το αποτέλεσμα στο οποίο είχαμε οδηγηθεί με την απλουστευμένη θεωρία.



Εικόνα 2.7 :Γραφική παράσταση  $C_p$ ,  $\lambda$  και καμπύλες  $C_z/C_x$ . [1]

## 2.11 Επίδραση του αριθμού των πτερυγών.

Η θεωρία που περιγράφηκε προηγουμένως υποθέτει ένα άπειρο αριθμό πτερυγών. Αυτό δεν είναι αληθινό. Προκύπτουν έτσι απώλειες ενέργειας που οφείλονται σε μια μεγαλύτερη πύκνωση των στροβίλων. Αυτή η απώλεια ενέργειας μελετήθηκε ειδικά από τους Rohrbach, Worobel, Goldstein και Prandtl.

Κατά τον Prandtl η μείωση της απόδοσης που προκύπτει για ένα δρομέα με  $p$  πτέρυγες δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_p = \left( 1 - \frac{1,39}{p} \sin I \right)^2$$

όπου  $I$  είναι η γωνία κλίσης στο ακροπτερύγιο κάθε πτέρυγας.

Υποθέτοντας ότι ο δρομέας λειτουργεί στην περιοχή των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας:

$$\sin I = \frac{1}{\sqrt{1 + \cotan^2 I}} = \frac{2}{3 \sqrt{\lambda_0^2 + 4/9}}$$

Υποθέτοντας ότι σ' αυτές τις συνθήκες ισχύει η σχέση του Prandtl, εξάγεται:

$$\eta_p = \left( 1 - \frac{0,93}{p \sqrt{\lambda_0^2 + 0,445}} \right)^2$$

Επισημαίνεται ότι η σχέση του Prandtl ισχύει για δρομείς με χαμηλή φόρτιση. Πρακτικά η χρήση της σχέσης αυτής στα προγράμματα υπολογισμού για δρομείς που δοκιμάστηκαν σε αεροσήραγγα, υπό κανονική φόρτιση, οδηγεί σε συντελεστές ροπής και ισχύος που βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.



## 2.12 Πρακτικός προσδιορισμός της χορδής και τη γωνίας σφήνωσης.

Δεν υπάρχει μια καθιερωμένη και μοναδική μέθοδος για την επιλογή των γωνιών κλίσης και κατά συνέπεια για τον υπολογισμό μιας πτέρυγας.

Οι πτέρυγες μπορούν να υπολογίζονται επιλέγοντας σαν γωνία προσβολής, σε κάθε τομή τους, τη γωνία προσβολής που αντιστοιχεί στη μέγιστη απόδοση. Έχοντας υπολογίσει το γινόμενο  $C_z p l$ , ο υπολογισμός της χορδής,  $l$ , δεν παρουσιάζει καμιά δυσκολία αφού το  $C_z$  και το  $p$  είναι επίσης γνωστά. Η γνώση της γωνίας κλίσης  $I$  καθώς και της γωνίας προσβολής  $i_0$  επιτρέπει τον υπολογισμό της γωνίας σφήνωσης  $\alpha$  ( $\alpha = I - i_0$ ).

Στην πραγματικότητα αυτή η μέθοδος δεν εφαρμόζεται ποτέ ολοκληρωμένα. Αν μια γωνία προσβολής κοντά στη βέλτιστη είναι απαραίτητη για τα προφίλ που βρίσκονται κοντά στα ακροπερύγια όπου η επιφάνεια σάρωσης ανά μονάδα μήκους είναι μέγιστη, μια τέτοια γωνία στα προφίλ που βρίσκονται κοντά στον άξονα περιστροφής έχει σαν αποτέλεσμα πολύ μεγάλες χορδές και άρα πλάτη των πτερύγων και πολλές φορές απαγορευτικά. Η τιμή του  $C_z$  για μια βέλτιστη γωνία προσβολής είναι σχετικά χαμηλή για τα συνήθη προφίλ και η τιμή του γινομένου  $C_z p l$  πολύ μεγάλη στην περιοχή κοντά στον άξονα περιστροφής σαν αποτέλεσμα των χαμηλών τιμών του  $l$  που επικρατούν στην περιοχή αυτή. Έτσι όταν προσεγγίζεται η περιοχή κοντά στον άξονα περιστροφής της πτερύγωσης επιλέγονται γωνίες προσβολής όλο και μεγαλύτερες, μένοντας όμως πάντα στην περιοχή ανόδου (περιοχή αριστερά της μέγιστης τιμής) του διαγράμματος του  $C_z$  και πέρα από το  $i = i_0$ , που αντιστοιχεί σε τιμές του  $\tan \epsilon$  μικρότερες από 0,02 έτσι ώστε να μην μειωθεί υπερβολικά η αεροδυναμική απόδοση.

Μπορεί να υιοθετηθεί σαν κατανομή της γωνίας προσβολής σαν συνάρτηση της απόστασης,  $r$ , από τον άξονα περιστροφής, η σχέση  $i = i_0 - 5 + 5 \sqrt{(R/r)}$ . Αυτή η σχέση δίνει καλά αποτελέσματα για την πλειοψηφία των αεροδυναμικών προφίλ και στην απόσταση  $R$  (ακροπερύγιο) η γωνία προσβολής  $i = i_0$ . Για τις υπόλοιπες θέσεις,  $r$ , οι γωνίες προσβολής,  $i$  αυξάνονται παραμένοντας όμως σε μέτρια επίπεδα.

Αυτό έχει μόνο μικρή επίδραση στην απόδοση. Αν κοιτάξει κανείς τα χαρακτηριστικά των αεροδυναμικών προφίλ, θα παρατηρήσει ότι ο λόγος  $C_z/C_x$  που είναι αντίστροφος με το  $\tan \epsilon$ , παραμένει πολύ ψηλός και πέρα του  $i_0$ , όσο περιοριζόμαστε σε 5 ή 6 μοίρες. Παραδείγματος χάρη για ένα προφίλ NACA 4412 η τιμή του  $C_z/C_x$  που φθάνει το 85 για  $i = i_0 = 5^\circ$ , γίνεται 70 για  $i = 11^\circ$  και 60 για  $i = 13^\circ$ . Επίσης η επιφάνεια σάρωσης ανά μονάδα μήκους μικραίνει όλο και περισσότερο όσο πλησιάζουμε κοντά στον άξονα περιστροφής. Η αεροδυναμική απόδοση αυτών των πτερύγων είναι πολύ καλή.

Μερικοί σχεδιαστές, επιλέγουν γωνίες προσβολής στο ακροπερύγιο μερικές μοίρες μεγαλύτερες από τη βέλτιστη με σκοπό να ελαττώσουν τις χορδές κοντά στο ακροπερύγιο. Το γινόμενο  $C_z p l$  είναι σταθερό για ένα δεδομένο λόγο ταχυτήτων,  $\lambda$ , το  $C_z$  αυξάνεται με τη γωνία προσβολής και κατά συνέπεια η χορδή μειώνεται. Γι αυτές τις πτέρυγες η απόδοση δεν είναι τόσο υψηλή όσο για εκείνες που έχουν υπολογιστεί με  $i = i_0$  στο ακροπερύγιο, αλλά η μείωση της απόδοσης παραμένει αποδεκτή όσο δεν ξεπερνιέται υπερβολικά η τιμή του  $i_0$ . Είναι εξάλλου δυνατό να ισοσκελιστεί αυτό το μειονέκτημα αυξάνοντας λίγο τη διάμετρο του δρομέα. Υπολογίζεται ότι για να ισοσκελιστεί μια μείωση του συντελεστή ισχύος κατά 1%, χρειάζεται να αυξηθεί η διάμετρος  $D$  του δρομέα κατά  $\Delta D = 0,005D$ . Η μείωση της ροπής εκκίνησης που προκύπτει από την ταυτόχρονη μείωση των χορδών και της γωνίας σφήνωσης στην περιοχή κοντά στον άξονα περιστροφής, μπορεί να αποδειχτεί περισσότερο ενοχλητική. Αλλά συχνά η ανεμογεννήτρια ξεκινά, μόλις η ταχύτητα ανέμου περάσει το όριο της παραγωγικότητας, με τη

βοήθεια της γεννήτριας που λειτουργεί σαν κινητήρας. Πολλές φορές υιοθετείται αυτή η λύση γιατί έχει σαν αποτέλεσμα πιο ελαφρούς δρομείς. Είναι ενδιαφέρουσα σα λύση κυρίως για ανεμογεννήτριες μεγάλων διαμέτρων γιατί τότε οι καμπτικές ροπές γίνονται κύριες σε σχέση με τις υπόλοιπες ροπές. Η μεταβολή τους κατά τη διάρκεια κάθε περιστροφής της πτερύγωσης είναι μια πηγή εναλλασσόμενης κόπωσης.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που πρέπει να πάρει υπόψη του ο σχεδιαστή μιας πτερύγωσης είναι η ευκολία της κατασκευής των πτερύγων.

Συχνά για ευκολία της κατασκευής της πτέρυγας χρειάζεται τα χείλη προσβολής και εκφυγής της να είναι ίσια (ευθεία). Η πτερύγωση υπολογίζεται με την κλασική μέθοδο. Στη συνέχεια παίρνονται υπόψη μόνο δύο-τρία προφίλ σαν προφίλ αναφοράς. Οι χορδές και οι γωνίες σφήνωσης των ενδιάμεσων προφίλ σχεδιάζονται ευθυγραμμίζοντας τα χείλη προσβολή και εκφυγής των προφίλ αναφοράς. Ο υπολογισμός της ροπής και ισχύος δείχνει ότι η διόρθωση των εξωτερικών ακμών της πτέρυγας οδηγεί σε μείωση της απόδοσης αλλά αυτή η μείωση είναι πολύ μικρή αν τα προφίλ αναφοράς έχουν επιλεγεί σωστά.

## 2.13 Πρόβλεψη χαρακτηριστικών πτερύγωσης.

Η πρόβλεψη των μηχανικών χαρακτηριστικών μιας πτερύγωσης (καμπύλες των συντελεστών αντίστασης, ροπής και ισχύος) μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου, πριν την κατασκευή της είναι πολύ σημαντικό. Η γνώση αυτών των χαρακτηριστικών της πτερύγωσης πριν την κατασκευή της μπορεί να επιτρέψει τις διορθώσεις στον αρχικό σχεδιασμό με σκοπό να επιτευχθεί μια καλύτερη απόδοση ή να γίνει πιο οικονομική.

Στις προηγούμενες παραγράφους αποδείχτηκε ότι η στοιχειώδης ώση,  $dF$  και η στοιχειώδης ροπή,  $dM$ , που οφείλονται στα αεροδυναμικά φορτία που αξασκούνται πάνω στα στοιχεία των πτερύγων σε απόσταση μεταξύ  $r$  και  $r+dr$  από τον άξονα εκφράζεται από τις σχέσεις:

$$dF = \rho \pi r V_1^2 (1 - k^2) dr$$

$$dM = \rho \pi r^3 \omega V_1 (1 + k) (h - 1) dr$$

Στη συνέχεια καθορίσαμε  $G$  και  $E$ , παίρνοντας υπόψη τις σχέσεις που συνδέουν τα  $I$  και  $W$  με τα  $V_1$ ,  $k$  και  $h$ :

$$W = \frac{V_1(1+k)}{2 \sin I} = \frac{\omega r (1+h)}{2 \cos I} \quad \text{και} \quad \cotan I = \lambda \frac{1+h}{1+k} = \lambda_0 \frac{r}{R} \frac{1+h}{1+k}$$

$$G = \frac{1-k}{1+k} = \frac{C_z \rho l \cos(I-\varepsilon)}{8 \pi r \cos \varepsilon \sin^2 I} \quad \text{και} \quad E = \frac{h-1}{h+1} = \frac{C_z \rho l \sin(I-\varepsilon)}{4 \pi r \sin 2I \cos \varepsilon}$$

Για να υπολογιστεί η ώση και η ροπή αρκεί να ολοκληρωθούν οι σχέσεις που δίνουν τα  $dF$  και  $dM$ :

$$F = \int_0^R \rho \pi V_1^2 (1 - k^2) r dr$$

$$\text{και} \quad M = \int_0^R \rho \pi V_1 \omega (1 + k) (h - 1) r^3 dr$$

Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν στους παρακάτω συντελεστές ώσης και ροπής:

$$C_F = \frac{2F}{\rho S V_1^2} = 2 \int_0^1 (1 - k^2) \frac{r}{R} d\left(\frac{r}{R}\right)$$

$$C_M = \frac{2M}{\rho S V^2} = 2 \int_0^1 \lambda (1 + k) (h - 1) \frac{r^2}{R^2} d\left(\frac{r}{R}\right)$$

Παίρνοντας υπόψη τις σχέσεις:

$$\lambda = \frac{1+k}{1+h} \cotan I \quad \text{και} \quad E = \frac{h-1}{h+1}$$

ο συντελεστής ροπής γίνεται:

$$C_M = 2 \int_0^1 (1 + k)^2 E \cotan I \frac{r^2}{R^2} d\left(\frac{r}{R}\right)$$

Θέτοντας:

$$f_r = (1 - k^2) \frac{r}{R} \quad \text{και} \quad m_r = (1 + k)^2 E \cotan I \frac{r^2}{R^2}$$

Οι συντελεστές ώσης και ροπής γράφονται σαν:

$$C_F = 2 \int_0^1 f_r d\left(\frac{r}{R}\right) \quad \text{και} \quad C_M = 2 \int_0^1 m_r d\left(\frac{r}{R}\right)$$

Στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας τα  $k$  και  $h$  είναι γνωστά για κάθε αεροτομή πάνω στην πτέρυγα. Έτσι ο υπολογισμός της αξονικής ώσης, της ροπής, της ισχύος καθώς και των αντίστοιχων συντελεστών δεν παρουσιάζουν καμία δυσκολία.

Αν ο δρομέας στρέφεται με ένα λόγο ταχυτήτων,  $\lambda_0$ , διαφορετικό από αυτόν για τον οποίο υπολογίστηκε τότε η γωνία προσβολής αλλάζει τιμή όπως και τα  $k$  και  $h$ , η ώση, η ροπή και οι αντίστοιχοι συντελεστές επίσης.

Πρακτικά, για τον προσδιορισμό των  $C_p$  και  $C_M$ , θεωρούνται διάφορες τιμές της σχέσης  $r/R$  (παραδείγματος χάρη 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1). Στις αντίστοιχες αποστάσεις από τον άξονα περιστροφής, θα μεταβάλλεται η γωνία προσβολής αυθαίρετα κατά μια μοίρα και θα υπολογίζονται για κάθε  $r/R$  και κάθε γωνία προσβολής, σύμφωνα με τον **πίνακα 2.2** τα παρακάτω:

- η γωνία κλίσης  $I$  προσθέτοντας τη γωνία προσβολής στη γωνία σφήνωσης του στοιχείου που υπολογίζεται σύμφωνα με τις παραπάνω μεθόδους,
- το  $C_z$  και η γωνία  $\varepsilon$
- οι τιμές των  $G$ ,  $E$ ,  $k$ ,  $h$ ,  $\lambda_0$ ,  $f_r$  και  $m_r$  από τις αντίστοιχες σχέσεις.

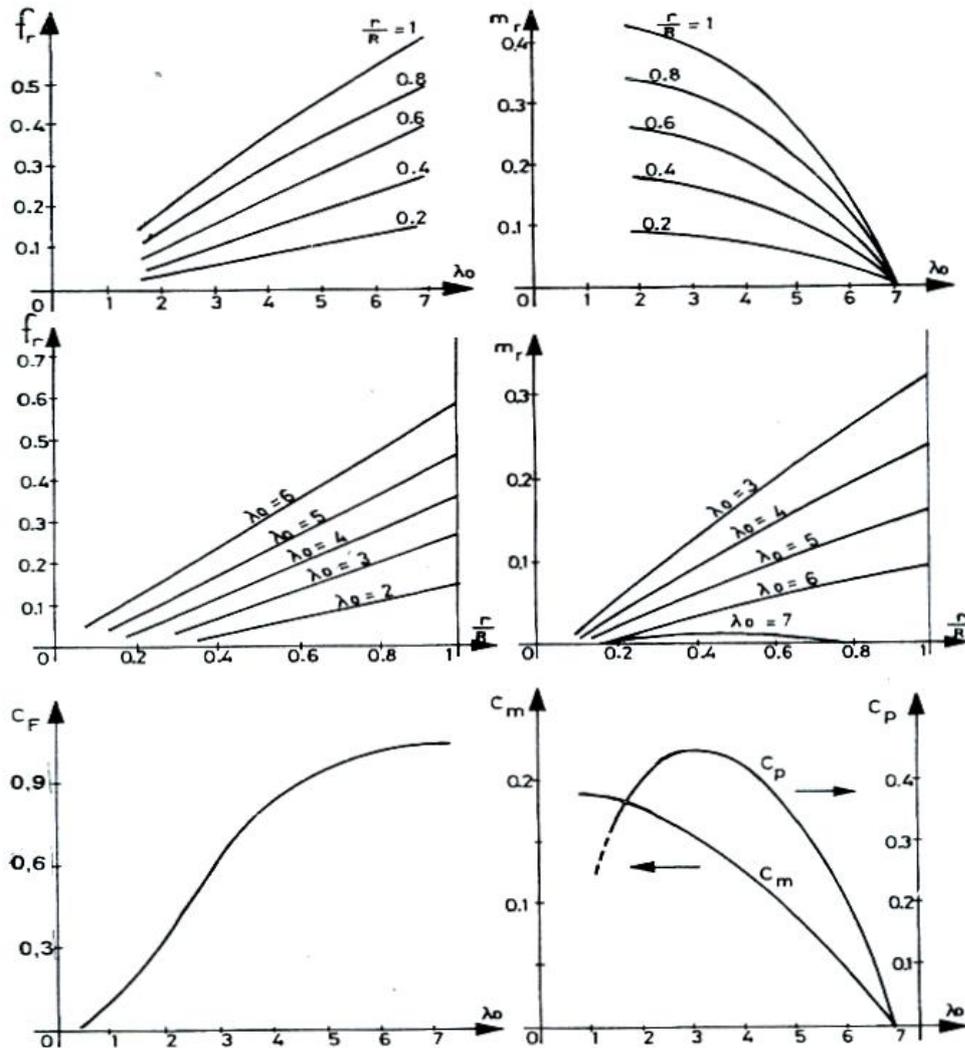
$r/R$	$r_1/R_1$					$r_2/R_2$
$\alpha$	$\alpha_1$					$\alpha_2$
$I$	$I_1$					$I_2$
$i$	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	
$C_z$						
$\text{tg } \varepsilon$						
$I = \alpha + i$						
$G = \frac{1 - k}{1 + k} = \frac{C_z \rho l \cos(I - \varepsilon)}{8 \pi r \cos \varepsilon \sin^2 I}$						
$k = \frac{1 - G}{1 + G}$						
$E = \frac{h - 1}{h + 1} = \frac{C_z \rho l \sin(I - \varepsilon)}{4 \pi r \sin 2I \cos \varepsilon}$						
$h = \frac{1 + E}{1 - E}$						
$\lambda_0 = \frac{R}{r} \frac{1 + k}{1 + h} \cotg I$						
$f_r = (1 - k^2) \frac{r}{R}$						
$m_r = (1 + k)^2 E \cotg I \frac{r^2}{R^2}$						

**Πίνακας 2.2:**  $C_z$ ,  $I$  και οι τιμές των  $G, E, k, h, \lambda_0, f_r$  και  $m_r$ . [1]

Αφού έχουν γίνει οι υπολογισμοί χαράζονται οι καμπύλες των  $f_r$  και  $m_r$  σαν συνάρτηση του  $\lambda_0$ , μια καμπύλη για κάθε  $r/R$ . Στη συνέχεια σε νέα διαγράμματα χαράζονται ξανά οι καμπύλες των

$f_r$  και  $m_r$  σαν συνάρτηση του  $r/R$  με τις τιμές των προηγούμενων διαγραμμάτων που αντιστοιχούν στις ίδιες τιμές του  $\lambda_0$ . Αρκεί στη συνέχεια να μετρηθεί η επιφάνεια των επιφανειών μεταξύ του άξονα των  $X$ , την κάθετη που περνά από το  $X=1$  και τις διάφορες καμπύλες που αντιστοιχούν στις διάφορες τιμές του  $\lambda_0$ , για να υπολογιστούν μετά διπλασιασμό οι συντελεστές της ώσης και της ροπής συναρτήσει του λόγου ταχυτήτων,  $\lambda_0$ .

Ο συντελεστής ισχύος υπολογίζεται από την καμπύλη  $C_M$  ( $\lambda_0$ ) πολλαπλασιάζοντας τις τεταγμένες της καμπύλης με τις αντίστοιχες τεταγμένες της:  $C_P = C_M \lambda$ .



Εικόνα 2.8: Υπολογισμός συντελεστή ισχύος ( $C_P = C_M \lambda$ ) [1]

## 2.14 Σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις διάφορες θεωρίες

Υπάρχουν πολλές άλλες θεωρίες σαν αυτές που περιγράφηκαν παραπάνω όπως των Stefaniak, Hutter και Sabinin. Για να γίνουν αντιληπτές οι διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα κάθε μιας, υπολογίστηκε η ποσότητα  $C_z p l / r = f(\lambda)$  για κάθε τιμή του  $\lambda$  και οι αντίστοιχες γωνίες κλίσης  $I$  σε βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας (βλέπε πίνακες 2,3 και 2,4).

$\lambda$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Méthode simplifiée	4,65	1,32	0,608	0,345	0,222	0,155	0,114	0,087	0,069	0,056
Hütter	3,5	1,20	0,58	0,32	0,215	0,155	0,12	0,08	0,07	0,055
Stéfaniak	3,37	1,19	0,572	0,33	0,216	0,152	0,114	0,088	0,069	0,056
Sabinin	3,71	1,31	0,63	0,363	0,237	0,167	0,125	0,097	0,076	0,062
Théorie tourb. de Glauert, d'Amherst	3,37	1,19	0,576	0,334	0,217	0,152	0,112	0,086	0,068	0,056

Πίνακας 2.3 : Τιμές  $C_z p l / r$ . (1)

$\lambda$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Méthode simplifiée	33,7°	18°	12°	9,5°	7,6°	6,3°	5,5°	4,8°	4,2°	3,8°
Hütter	30°	18°	12°	9,2°	7,6°	6,3°	5,5°	4,5°	4,2°	3,8°
Stéfaniak	30°	17,7°	12,3°	9,36°	7,54°	6,3°	5,5°	4,5°	4,2°	3,8°
Sabinin	30°	17,5°	12°	9,5°	7,6°	6,3°	5,5°	4,5°	4,2°	3,8°
Théorie tourb. de Glauert, d'Amherst	30°	17,7°	12,29°	9,36°	7,54°	6,3°	5,42°	4,75°	4,23°	3,8°

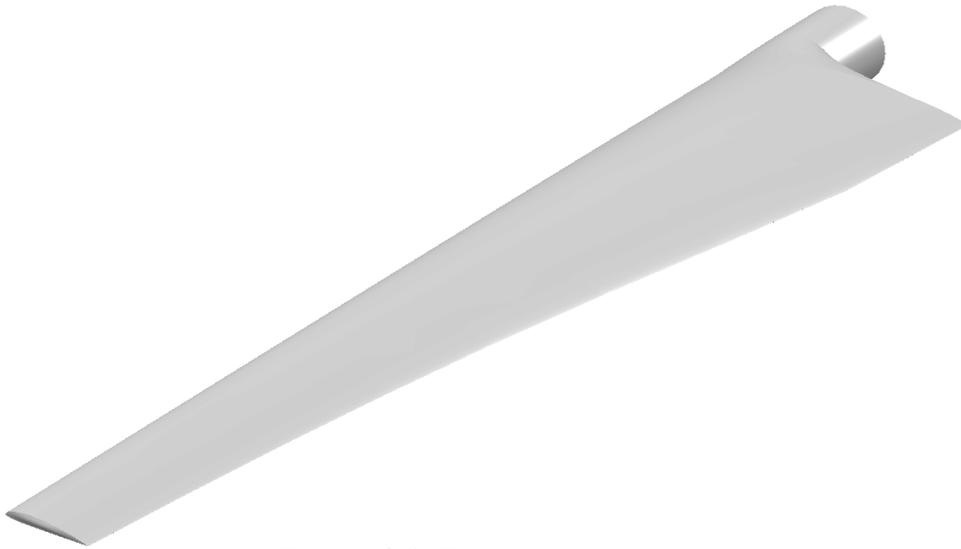
Πίνακας 2.4 : Τιμές της γωνίας κλίσης  $I$  σε μοίρες. [1]

Οι πίνακες δείχνουν ότι οι διαφορές είναι ελάχιστες. Οι τιμές που υπολογίστηκαν για τη ποσότητα  $C_z p l / r$  με τη θεωρία του Sabinin είναι μεγαλύτερες κατά 10% από τις τιμές που υπολογίζονται με τις άλλες μεθόδους. Η απλουστευμένη μέθοδος οδηγεί για μικρά  $\lambda$  σε τιμές για τη ποσότητα  $C_z p l / r$  λίγο πιο αυξημένες από τις τιμές που υπολογίζονται με τη βοήθεια των υπολοίπων θεωριών.

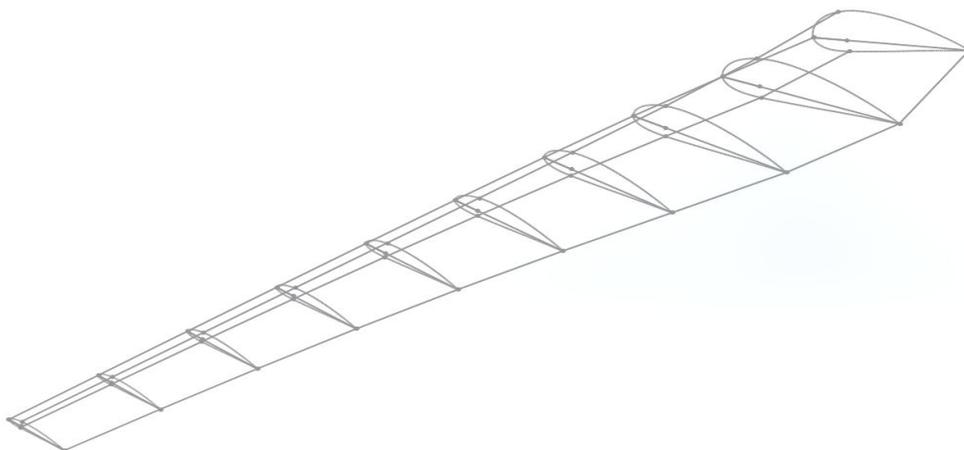
## Κεφάλαιο 3 Σχεδιασμός πτερύγωσης ανεμογεννήτριας

### 3.1 Εισαγωγή

Για να σχεδιάσουμε μία πτέρυγα ανεμογεννήτριας (wind turbine blade), προσεγγίζουμε τη γεωμετρία της με ένα αριθμό  $n$  αεροτομών με τα κατάλληλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ώστε η σύνθεση αυτών να μας παρέχει τη γεωμετρία της επιθυμητής πτέρυγας. Στις εικόνες 3.1 και 3.2 φαίνεται μία πτέρυγα και η γεωμετρία αυτής ως ένα σύνολο αεροτομών, καθιστώντας εμφανή τη διαδικασία προσέγγισης της υπό σχεδίασης γεωμετρίας.

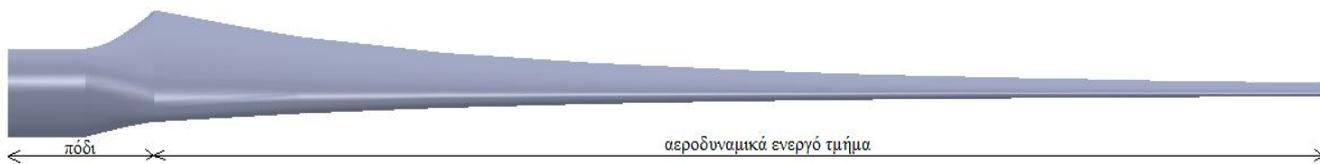


Εικόνα 3.1: Πτερύγωση ανεμογεννήτριας



Εικόνα 3.2: Γεωμετρία πτερύγωσης ανεμογεννήτριας

Στις  $n$  αεροτομές που συνιστούν τη γεωμετρία της πτέρυγας, ορισμένες αποτελούν το πόδι (root) αυτής, που είναι το τμήμα της πτέρυγας που παραλαμβάνει όλες τις δυνάμεις και ροπές και οι υπόλοιπες είναι το αεροδυναμικά ενεργό μέρος αυτής, **εικόνα 3.3**.



**Εικόνα 3.3:** Πτερύγωση ανεμογεννήτριας

Για να προσδιορίσουμε έκαστη αεροτομή, οφείλουμε να διαθέτουμε τις διαστάσεις:

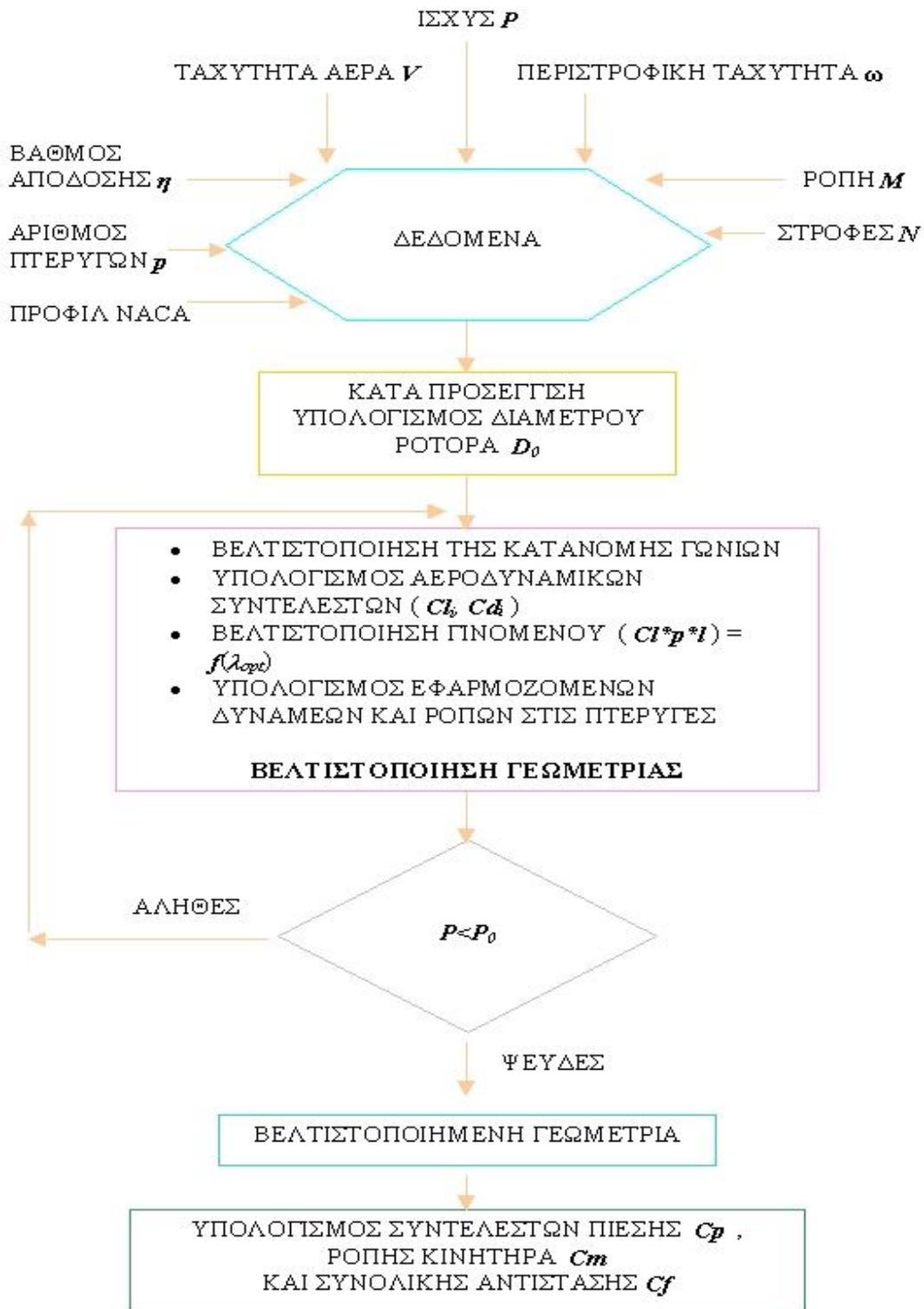
- του μήκους χορδής
- του μέγιστου πάχους
- της γωνίας σφήνωσης (pitch angle)
- την απόσταση από την αρχή της πτέρυγας
- και τέλος την οικογένεια αυτής.

Γωνία σφήνωσης αεροτομής είναι η γωνία μεταξύ χορδής της αεροτομής και του επίπεδου περιστροφής.

Προσδιορίζοντας με τον συγκεκριμένο τρόπο κάθε μία από τις  $n$  αεροτομές, προσεγγίζουμε εν' τέλει τη γεωμετρία της πτέρυγας.

Τα δεδομένα διαστασιολόγησης, προκύπτουν από προγράμματα που υπολογίζουν και βελτιστοποιούν τη γεωμετρία της πτέρυγας, ανάλογα με τα επιθυμητά αεροδυναμικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά. Η διαδικασία που πραγματοποιούν τα εν' λόγω προγράμματα είναι αυτή του σχεδιασμού (design). Στην εικόνα 3.4 φαίνεται το διάγραμμα λειτουργίας ενός τέτοιου προγράμματος.

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ



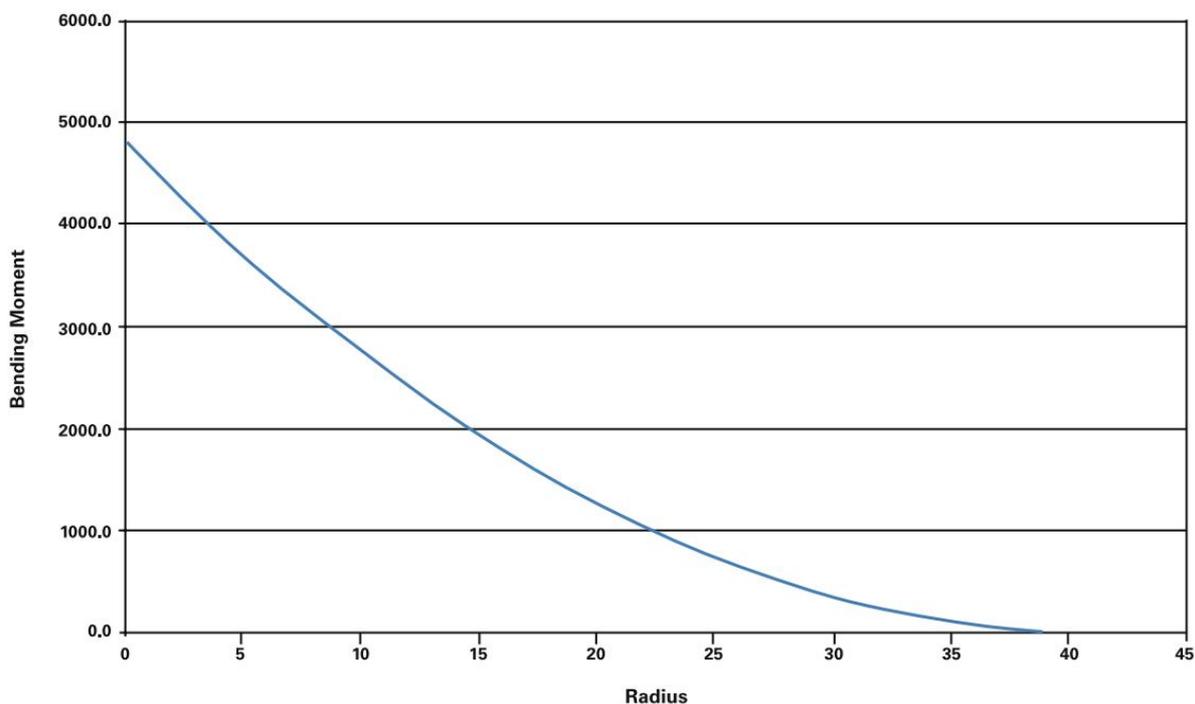
Εικόνα 3.4: Διάγραμμα λειτουργίας προγράμματος σχεδιασμού και βελτιστοποίησης πτέρυγας.



### 3.2 Η Πτέρυγα σαν μια κατασκευαστική δοκός

Η δύναμη άνωσης στη περύγωση, που κινεί τον δρομέα γύρο, διανέμεται κατά μήκος της περύγωσης περίπου ανάλογα με την ακτίνα, δηλαδή υπάρχει περισσότερη δύναμη άνωσης κοντά στο άκρο απ' ότι υπάρχει κοντά στο κέντρο.

Η δύναμη άνωσης τείνει να περιστρέψει την περύγωση. Αν κοιτάξουμε ένα τμήμα του περυγίου σε κάποια σημεία κατά το μήκος του, όλες οι δυνάμεις άνωσης εξωτερικά από αυτό το σημείο θα επιδράσουν στο να λυγίσει η πτέρυγα. Η επίδραση αυτή λέγεται ροπή κάμψης. Η ροπή κάμψης είναι μεγαλύτερη στο πόδι της πτέρυγας ενώ στο άκρο μειώνεται, πέφτει στο μηδέν.



**Εικόνα 3.5 :** Ροπή κάμψης συναρτήσει της ακτίνας για μεγάλες πτέρυγες. [3]

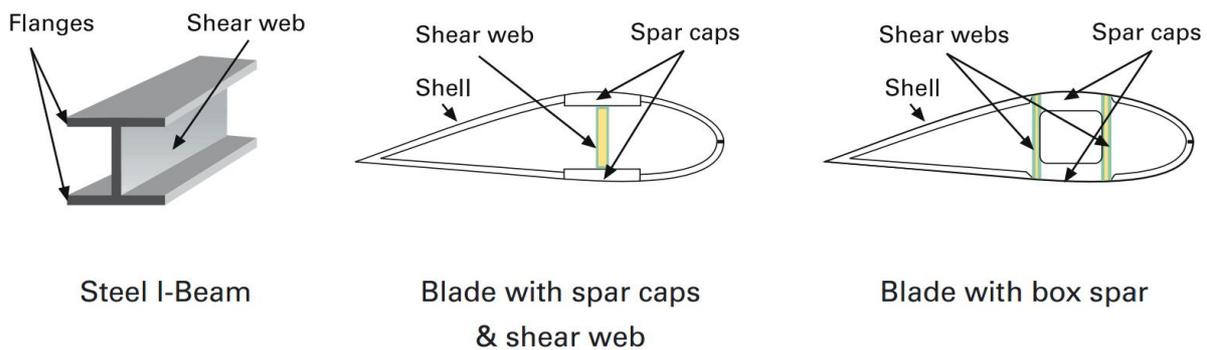
Γι' αυτό και η πτέρυγα πρέπει να είναι παχύτερη, δηλαδή ισχυρότερη, στη ρίζα απ' ότι προς το άκρο, όπου η ροπή κάμψης είναι μικρότερη. Σύμφωνα με την αεροδυναμική, η πτέρυγα πρέπει να είναι λεπτή στην άκρη όπου οι δυνάμεις αντίστασης είναι μεγάλες και η χορδή της πτέρυγας είναι μικρή. Πιο κοντά στη ρίζα η χορδή είναι μεγαλύτερη αλλά για να αποφύγουμε το μεγάλο μήκος της χορδής (κοστίζει), η πτέρυγα πρέπει να είναι παχύτερη για να δημιουργηθεί αρκετή άνωση δεδομένης και της χαμηλής ταχύτητας του αέρα κοντά στην πλήμνη.

Δυστυχώς το πάχος που απαιτείται για να καταστεί η πτέρυγα δύσκαμπτη και αρκετά ισχυρή είναι μεγαλύτερη από εκείνη που απαιτείται για την αεροδυναμική απόδοση, έτσι πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός μεταξύ του βάρους (= κόστος) και της αεροδυναμικής απόδοσης.

### 3.3 Εσωτερική δομή της πτέρυγας

Εάν το πτερύγιο ήταν στερεό και όχι κούφιο, το απαιτούμενο πάχος σε κάθε σημείο κατά μήκος της πτέρυγας καθορίζεται από την ροπή κάμψεως σε εκείνο το σημείο. Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι το πτερύγιο είναι στερεό, ενώ η πτέρυγα λυγίζει κατάντη του ανέμου, το υλικό από την ανάντη πλευρά του ανέμου τεντώνεται και στο κατάντη του αέρα συμπιέζεται. Έτσι στην μέση της πτέρυγας δεν υπάρχει ούτε ένταση ούτε συμπίεση, το οποίο δεν θέλουμε να συμβεί. Έτσι, για να μειωθεί το κόστος της πτέρυγας έχει νόημα να αφαιρέσουμε υλικό και να γίνει η πτέρυγα κούφια.

Στην ακραία περίπτωση που θα πρέπει να μείνει με δύο λωρίδες υλικού, μία για την πλευρά προς το ανάντη και μία για το κατάντη. Αυτό δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει για δύο λόγους: λόγω της διατμητικής δύναμης και της αεροδυναμικής. Για την αεροδυναμική είναι προφανές, πρέπει να υπάρχει ένα συνεχές κέλυφος ώστε να έχουμε ένα κατάλληλο αεροδυναμικό σχήμα. Όσο για την διατμητική δύναμη είναι λιγότερο προφανές αλλά είναι εύκολο να σκεφτούμε το τι θα συμβεί με τις δύο λωρίδες του υλικού, εφόσον δεν ενωθούν με τίποτα. Θα ολισθαίνουν και θα ενεργούν μαζί σαν δύο διαφορετικά, πολύ λεπτά, πτερύγια. Έτσι, για να λειτουργήσει πρέπει να ενωθούν δομικά μεταξύ τους, αυτή η ένωση ονομάζεται ιστός διάτμησης. Η κλασική υλοποίηση αυτής της ιδέας είναι η steel I-beam.



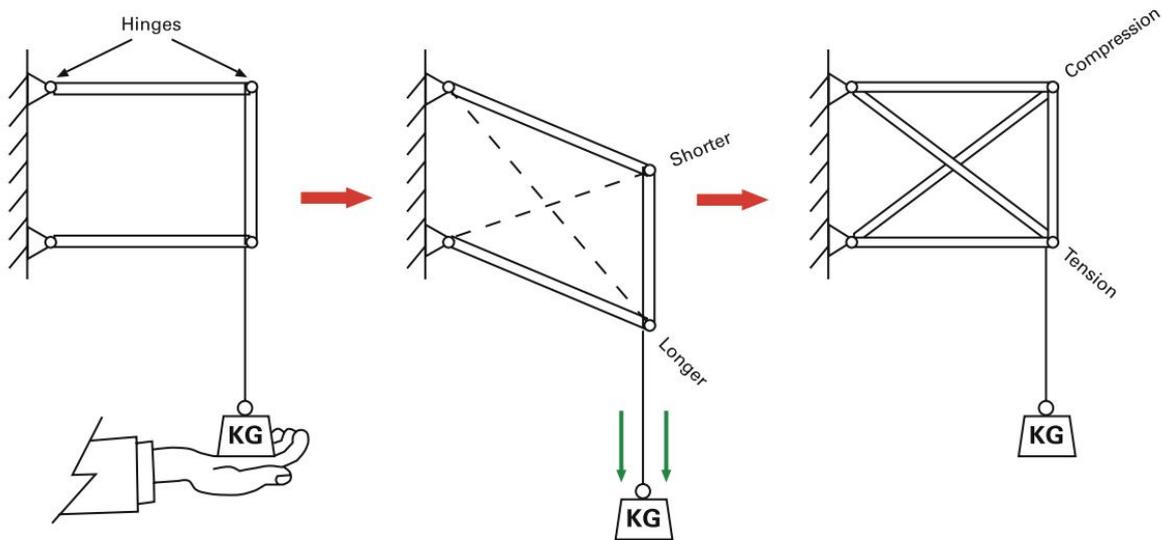
Εικόνα 3.6 : Διάφορες κατασκευαστικές δομές [3]

Το βασικό πράγμα που πρέπει να καταλάβουμε για τους κατασκευαστικούς δοκούς είναι ότι το υλικό που μεταφέρει φορτία κάμψης θα πρέπει να διαχωρίζονται όσο το δυνατόν πιο μακριά αλλά να ενώνονται με έναν ιστό διάτμησης. Η πτέρυγα ανεμογεννήτριας λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο όπως το steel I-beam εκτός του ότι υπάρχει κέλυφος γύρω από το εξωτερικό που σχηματίζουν το αεροδυναμικό σχήμα. Το κέλυφος συνεισφέρει στην αντοχή σε κάμψη αλλά η πλειοψηφία προέρχεται από το κάλυμμα δοκαριού, που ισοδυναμεί με τις φλάντζες του steel I-beam. Υπάρχουν δύο κοινά τρόποι για να επιτευχθεί η σύνδεση με ιστό διάτμησης :είτε καλύμματα δοκαριού ως μέρος του κελύφους και ένα ξεχωριστό ιστό διάτμησης που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους ή ο ιστός διάτμησης και τα καλύμματα δοκαριού να είναι χτισμένα μαζί ως ένα κουτί δοκαριού και κολλημένα στο κέλυφος.

### 3.4 Προσανατολισμός ελάσματος

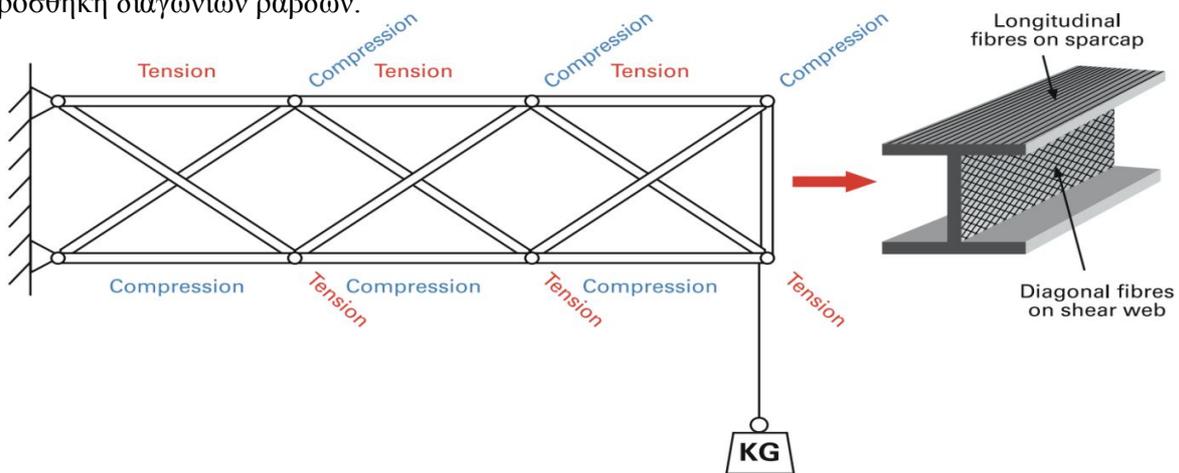
Τα σύγχρονα πτερύγια ανεμογεννητριών κατασκευάζονται από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες (FRP) λόγω της υψηλής αναλογίας των υλικών αντοχής προς βάρος σε σχέση με το ξύλο και τα

μέταλλα. Το FRP είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για τις μακριές και λεπτές δομές, πτέρυγες ανεμογεννητριών, επειδή οι καταπονήσεις είναι προς μια κατεύθυνση και οι ίνες μπορούν να ανταπεξέλθουν σε αυτό. Είναι αρκετά προφανές ότι οι περισσότερες από τις ίνες στα καπάκια δοκαριού θα πρέπει να είναι προσανατολισμένη κατά μήκος της πτέρυγας, δεδομένου της κατεύθυνσης των καμπτικών φορτίων. Είναι ίσως λιγότερο προφανές ότι οι ίνες στα πλέγματα διάτμησης πρέπει να καθοριστούν διαγωνίως έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στα καλύμματα δοκαριού στις 45 μοίρες προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Σκεφτείτε ένα πλαίσιο κατασκευασμένο από τρεις ράβδους, με πείρο στα άκρα τους, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.7 : Διάτμηση και ενίσχυση ενός απλού πλαισίου. [3]

Αν ένα φορτίο εφαρμόζεται στο πλαίσιο, θα παραμορφωθεί σε ένα σχήμα ρόμβου ("διάτμηση"). Το βασικό πράγμα που πρέπει να σημειώσουμε εδώ είναι ότι οι ράβδοι εξακολουθούν να έχουν το ίδιο μήκος αλλά οι (φανταστικές) διαγώνιες γραμμές όχι, η μία είναι μικρότερη και η άλλη είναι μεγαλύτερη. Συνεπώς, ο καλύτερος τρόπος για να σκληρύνει το πλαίσιο θα ήταν η προσθήκη διαγώνιων ράβδων.



Εικόνα 3.8 : Εκτεταμένο πλαίσιο με ενίσχυση σε διάτμηση [3]

Το πλαίσιο θα μπορούσε να επεκταθεί με την προσθήκη περισσότερων ράβδων για να σχηματίσουν μια μεγαλύτερη δέσμη. Κάθε τμήμα θα χρειαστεί ένα ζευγάρι διαγωνίως ώστε να δημιουργηθεί δυσκαμψία. Χρειάζονται δύο διαγώνιοι, το ένα να δουλεύει σε θλίψη και το άλλο σε τάση. Αυτές οι δυνάμεις εξισορροπούν εγκάρσιως ώστε να κρατήσουν το κάλυμμα δοκαριών σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα να αποτρέψουν τα καλύμματα δοκαριού από την ολίσθηση.

### **3.5 Βέλτιστη γεωμετρία**

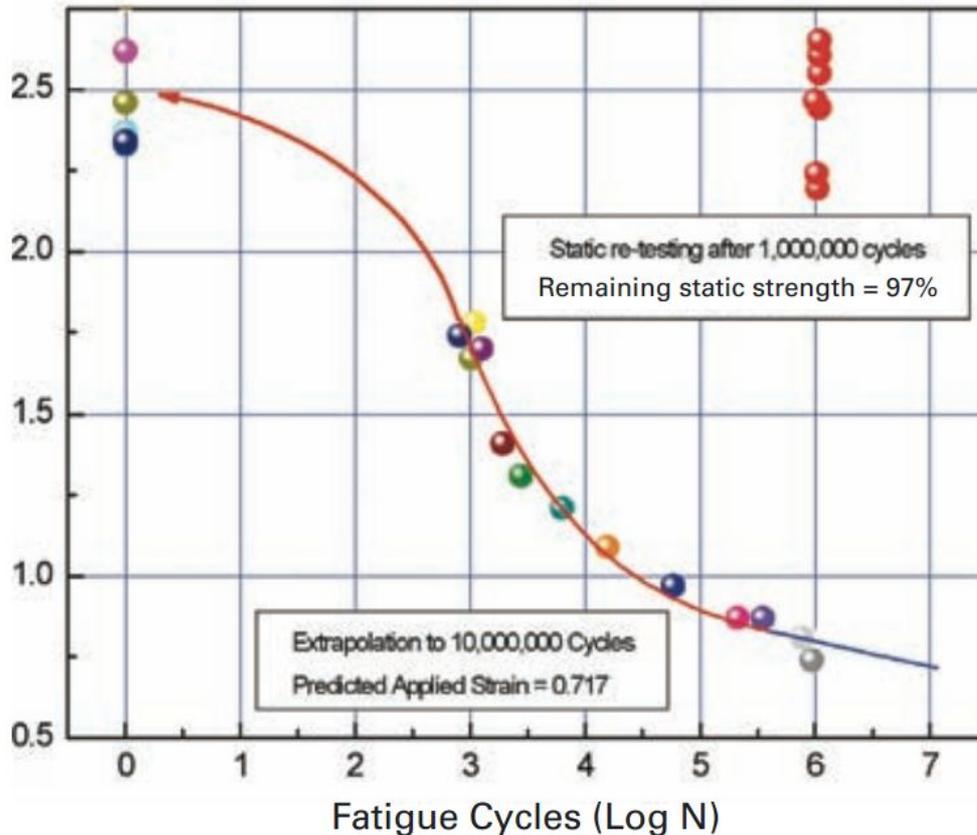
Η δυνατότητα να μεταβάλλεται το σχήμα της πτέρυγας χωρίς να αλλάζει το εξωτερικό σχήμα (κάνοντας τα καλύμματα δοκαριού χοντρά ή λεπτά) μας δίνει κάποια ελευθερία για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού στο ελάχιστο κόστος. Αν η πτέρυγα είναι λεπτή, μπορεί να έχει καλύτερη αεροδυναμική απόδοση αλλά θα χρειαστούν χοντρά καλύμματα δοκαριού, καθιστώντας την πτέρυγα ακριβή. Η βέλτιστη γεωμετρία επιτυγχάνεται με την διαδοχικά επαναλαμβανόμενη εξέταση του σχεδιασμού του δρομέα, φορτία, στατική μελέτη και κόστος παραγωγής.

### **3.6 Κόπωση**

Είναι γνωστό ότι οι κατασκευές τείνουν να αποτύχουν σε χαμηλότερο φορτίο από ό,τι αναμενόταν. Για μεταλλικές κατασκευές η έκφραση "κόπωση του μετάλλου" είναι γνωστή και κατανοητή και εύκολα αποδεικνύεται με ένα κουτάλι αν προσπαθήσουμε να το λυγίσουμε μπροστά και πίσω μέχρι να σπάσει. Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρείται και σε άλλα υλικά, σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, συμπεριλαμβανομένης της FRP. Το ξύλο είναι σχετικά καλό να αντισταθεί στην κόπωση και αυτός είναι ο λόγος που επιλέγεται σε κατασκευές πτερυγών μικρών ανεμογεννητριών αλλά το ξύλο έχει χαμηλή αναλογία αντοχής/βάρους σε σχέση με την FRP και αποκλείει την χρήση της σε μεγαλύτερες πτέρυγες.

Η κόπωση μπορεί να αποδοθεί σε ένα απλό επίπεδο από το σχεδιασμό για μια χαμηλότερη επιτρεπόμενη τάση στο υλικό. Η δοκιμή στην κόπωση του υλικού από την φόρτωση και την εκφόρτωση τους, χιλιάδες ή εκατομμύρια φορές, μπορεί να εκφραστεί από την σχέση μεταξύ της τάσης (S) και τον αριθμό των κύκλων (N) μέχρι την βλάβη. Το αποτέλεσμα ονομάζεται καμπύλη S-N.

SPX 8080 / EGL 1600 / 32%. FVF=54%. 24 Micron OCF R25H  
R=0.1 Frequency=4Hz



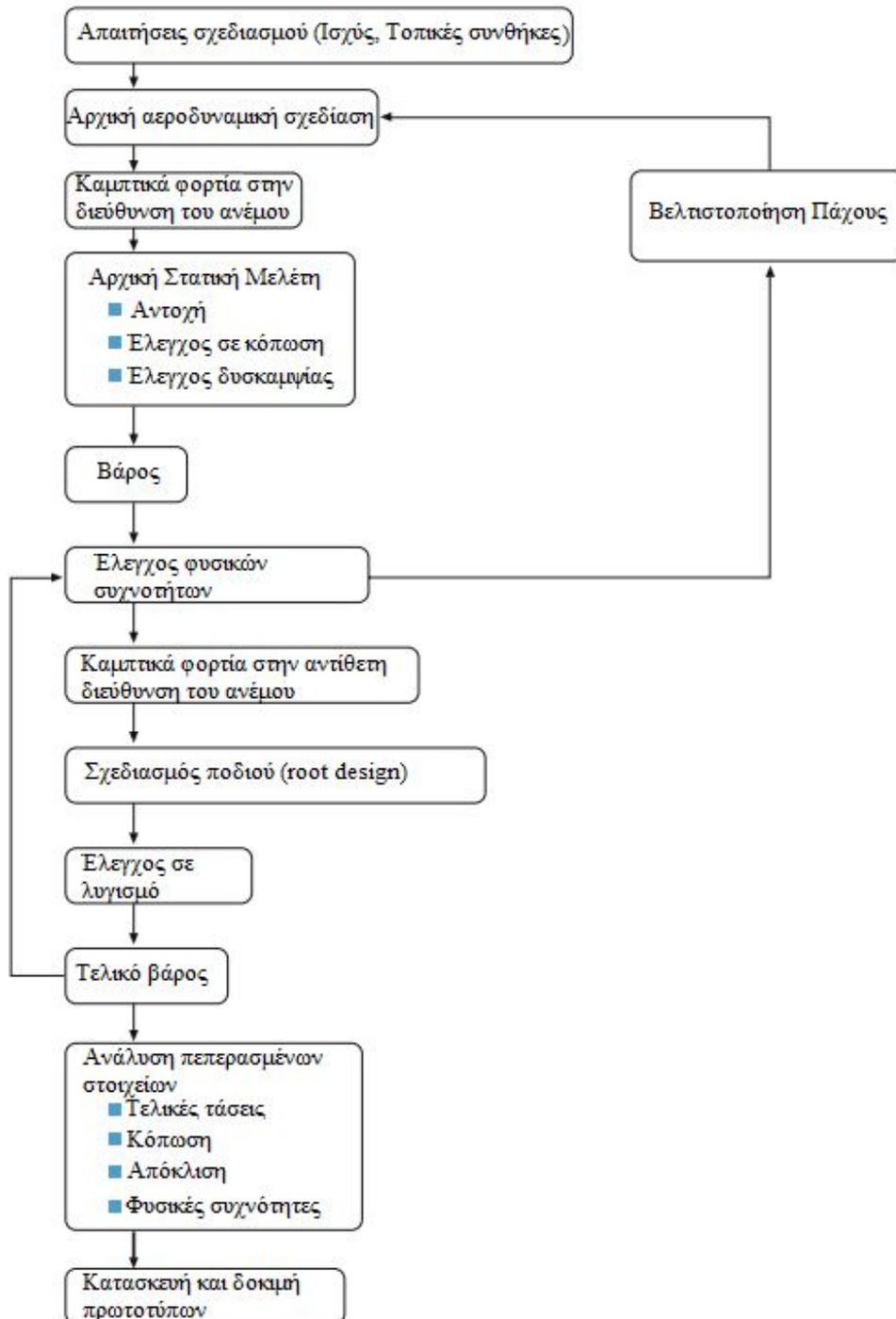
Εικόνα 3.9 : S-N καμπύλη για μια τυπική πτέρυγα ανεμογεννήτριας [3]

Έτσι για 10 εκατομμύρια κύκλους, το οποίο αντιστοιχεί περίπου στα 20 χρόνια χρήσης μιας πτέρυγας η επιτρεπόμενη καταπόνηση θα μπορούσε να είναι περίπου 30% της τελικής δύναμης αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό ίνες άνθρακα σε εποξειδική ρητίνη μπορεί να αντέξει 50% του μέγιστου φορτίου τους για 10000000 κύκλους, ενώ μία χαμηλότερη ποιότητας ίνες υάλου ελάσματος με ρητίνη βινυλεστερική μπορεί να διαρκέσει λιγότερο από 20% του μέγιστου φορτίου του.

Με απλά λόγια αν μελετήσουμε την πτέρυγα με τη χαμηλότερη μέγιστη τάση είναι καλά αλλά αν η κόπωση είναι ο κινητήριος μοχλός του σχεδιασμού τότε δεν έχουμε αρκετή βεβαιότητα. Για να ξεπεράσουμε την αβεβαιότητα χρησιμοποιούμε έναν μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας το οποίο θα μας οδηγήσει και στην αύξηση του κόστους των υλικών.

### 3.7 Κατασκευαστική διαδικασία σχεδιασμού

Η κατασκευαστική διαδικασία σχεδιασμού φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα.



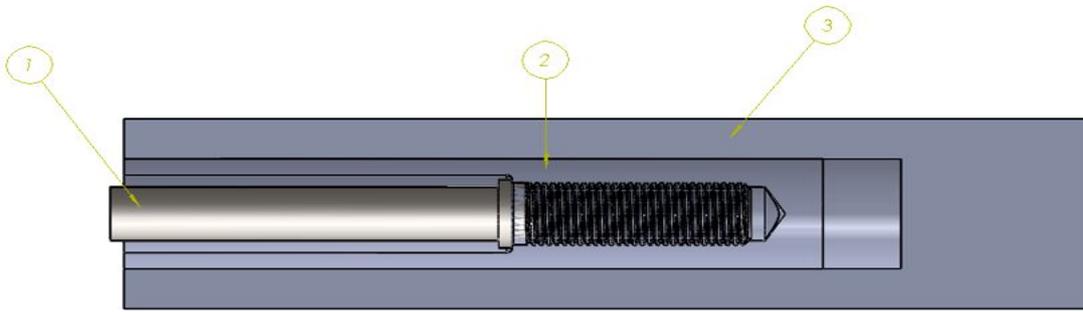
Εικόνα 3.10 : Κατασκευαστική διαδικασία σχεδιασμού

## Κεφάλαιο 4 Υπολογιστικά φορτία

### Υπολογισμός αντοχής κοχλιών συγκράτησης φτερών.

Η προσαρμογή του φτερού στην πλήμνη γίνεται με 16 κοχλίες M20x2. Οι κοχλίες αυτοί βιδώνονται σε ειδικά κατασκευασμένα βίσματα που φαίνονται στην **εικόνα 4.1**.

ΙΤΕΜ ΝΟ.	PART NUMBER	ΥΛΙΚΟ	QTY.
1	ΒΙΔΑ	ΧΑΛΥΒΑΣ	1
2	ΥΠΟΔΟΧΗ ΒΙΔΑΣ	ΧΑΛΥΒΑΣ	1
3	ΥΛΙΚΟ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ	GFRP	1



**Εικόνα 4.1:** Μέρη πλήμνης

Ο έλεγχος της αντοχής γίνεται με τους εξής τύπους:

$$F_{επ} = \sigma_{επ.χ} \cdot \frac{\pi d_k^2}{4} > \frac{M}{D} = F_{πρ}$$

Όπου

$F_{επ}$ : επιτρεπόμενη δύναμη

$\sigma_{επ.χ}$ : η επιτρεπόμενη τάση του χάλυβα

$d_k$ : η διάμετρος του κορμού του κοχλία

$D$ : η διάμετρος του ποδιού της πτέρυγας στο κέντρο της κάθε τρύπας.

$F_{πρ}$  : η πραγματική δύναμη που ασκείται πάνω στην πτερωτή

Και:

$$f = \frac{F_{επ}}{F_{πρ}}$$

Όπου

$f$ : ο συντελεστής ασφαλείας.

### Υπολογισμοί

Υπολογισμός ροπής:

$M = \sum_{i=1}^{10} r_i + F_i$  είναι το άθροισμα όλων των δυνάμεων επί την ακτίνα που αναπτύσσονται πάνω στην πτερύγωση.

Η δύναμη θα υπολογιστεί από τον εξής τύπο:

$$F = C_D \frac{\rho}{2} \cdot V_a^2 \cdot S$$

Όπου

$C_D$  : συντελεστής αντίστασης και είναι ίσος με 1,1

$\rho$  : η πυκνότητα του αέρα και είναι με  $1,22 \frac{kg}{m^3}$

$V_a$  : η ταχύτητα του αέρα και ισούται με  $14 \frac{m}{sec}$  ( το βάζουμε τόσο λόγω της ασφάλειας που θέλουμε να έχουμε πάνω στο φορτίο. Η φτερωτή προβλέπεται να εργάζεται με έλεγχο βήματος. Έτσι όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί τα 10 m/s η γωνία σφήνωσης θα αυξηθεί με αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή αντίστασης. Γι αυτό επιλέγομε ως κατάσταση μέγιστου φορτίου την ταχύτητα των 14m/s και τι στροφές που αναπτύσσονται λόγω αυτής της ταχύτητας χωρίς την επενέργεια του μεταβλητού βήματος.)

$S$  : η διατομή της πτερύγωσης και ισούται με  $\pi \cdot R^2$  όπου

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{n_{\eta\lambda} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot V^3}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20000}{0,8 \cdot 1,22 \cdot 0,368 \cdot \pi \cdot 10,4^3}} = 5,615 \text{ m} \Rightarrow R = 5,615 \text{ m}$$

$P$ : ισχύς της ανεμογεννήτριας 20 KW

$N_{\eta\lambda}$ : η ηλεκτρική απόδοση 0,8

$C_p$  : συντελεστής ισχύος 0,368

$V$  : ταχύτητα του αέρα. Ορίζεται  $10,4 \frac{m}{sec}$  ( ορίζεται αυτή λόγω του ότι είναι μια μέση ταχύτητα)

$$\text{Οπότε } F = C_D \frac{\rho}{2} \cdot V_a^2 \cdot S = 1,1 \frac{1,22}{2} \cdot 14^2 \cdot \pi \cdot 5,615^2 = 13027 \text{ Nt} \Rightarrow F = 13027 \text{ Nt}$$

Λόγω ασφάλειας η δύναμη γίνεται  $F = 13027 \cdot 2 = 26054 \text{ Nt}$ . Επειδή όμως έχουμε 3 πτέρυγες, η δύναμη που ασκείται σε κάθε πτέρυγα είναι  $F = \frac{26054}{3} = 8684,3 \text{ Nt}$  Οπότε :

$F = 8684,3 \text{ Nt}$  για κάθε πτέρυγα.

Βρίσκουμε την ροπή με την δύναμη που ασκείται σε κάθε κομμάτι της πτέρυγας, η οποία είναι χωρισμένη σε 10 κομμάτια. Επίσης βρέθηκαν οι ακτίνες για το κάθε κομμάτι μέσω προγράμματος στο excel.



Οι δυνάμεις πάνω στην περρωτή κατανέμονται τριγωνικά και είναι οι εξής:

F <sub>1</sub>	157,89 Nt
F <sub>2</sub>	315,79 Nt
F <sub>3</sub>	473,69 Nt
F <sub>4</sub>	631,59 Nt
F <sub>5</sub>	789,48 Nt
F <sub>6</sub>	947,40 Nt
F <sub>7</sub>	1105,3 Nt
F <sub>8</sub>	1263,2 Nt
F <sub>9</sub>	1421,1 Nt
F <sub>10</sub>	1579 Nt

Οι ακτίνες είναι οι εξής:

r <sub>1</sub>	0,561 m
r <sub>2</sub>	1,123 m
r <sub>3</sub>	1,684 m
r <sub>4</sub>	2,246 m
r <sub>5</sub>	2,807 m
r <sub>6</sub>	3,368 m
r <sub>7</sub>	3,930 m
r <sub>8</sub>	4,491 m
r <sub>9</sub>	5,052 m
r <sub>10</sub>	5,614 m

Οπότε:

$$M = r_1 \cdot F_1 + r_2 \cdot F_2 + r_3 \cdot F_3 + r_4 \cdot F_4 + r_5 \cdot F_5 + r_6 \cdot F_6 + r_7 \cdot F_7 + r_8 \cdot F_8 + r_9 \cdot F_9 + r_{10} \cdot F_{10} = 34126,3 \text{ Nt m}$$

$$\Rightarrow M = 34126,3 \text{ Nt m}$$

Έλεγχος αντοχής:

$$F_{\varepsilon\pi} = \sigma_{\varepsilon\pi} \cdot \frac{\pi d_k^2}{4} > \frac{M}{D} = F_{\pi\rho} \quad f = \frac{F_{\varepsilon\pi}}{F_{\pi\rho}}$$

$$F_{\varepsilon\pi} = \sigma_{\varepsilon\pi} \cdot \frac{\pi d_k^2}{4} = 620422000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,022^2}{4} = 23584,7 \text{ Nt} \Rightarrow F_{\varepsilon\pi} = 23584,7 \text{ Nt}$$

$$F_{\pi\rho} = \frac{M}{D} = \frac{34126,3}{0,260} = 131255 \text{ Nt} \Rightarrow F_{\pi\rho} = 131255 \text{ Nt}$$

$$F_{\varepsilon\pi} = 23584,7 \text{ Nt} > F_{\pi\rho} = 131255 \text{ Nt}$$

$$f = \frac{F_{\varepsilon\pi}}{F_{\pi\rho}} = \frac{23584,7 \text{ Nt}}{131255 \text{ Nt}} = 1,8 \Rightarrow f = 1,8$$

Τα παραπάνω ισχύουν με βάση την διεθνής νομοθεσία INTERNATIONAL STANDARD IEC 61400-2.

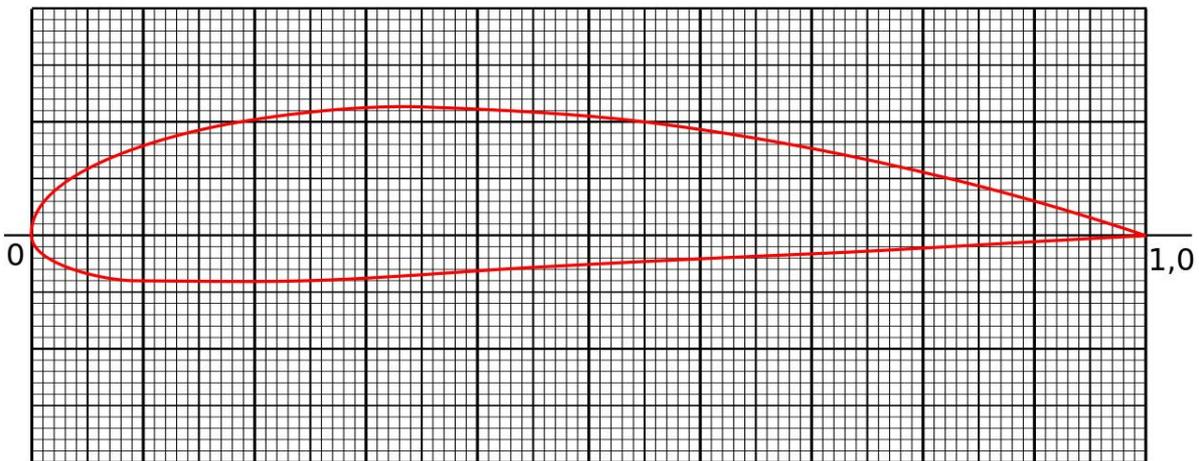
## Κεφάλαιο 5 Υπολογισμός των τάσεων στο φτερό με πεπερασμένα στοιχεία (με τη χρήση του λογισμικού solidworks)

### 5.1 Υπολογισμός τάσεων για πτερύγωση ανεμογεννήτριας 20 kw

Έγινε προσομοίωση της πτερύγωσης με βάση του λογισμικού solidworks και έγινε έλεγχος στην αντοχή της πτερύγωσης καθώς και διόρθωση του σχεδιασμού της έτσι ώστε με το ελάχιστο υλικό να πάρουμε τις αναπτυσσόμενες τάσεις.

Τα χαρακτηριστικά της πτερύγωσης ανεμογεννήτριας 20 KW τα οποία βρέθηκαν μέσω προγράμματος στο excel είναι τα εξής :

- Το μήκος της πτερύγωσης είναι 5,614 m.
- Η οικογένεια της αεροτομής που επιλέχθηκε είναι η NACA 44XX (**Εικόνα 5.1**).
- Το μέγιστο πάχος της αεροτομής που βρέθηκε είναι 215,56 mm και ελάχιστο 39,94 mm.
- Το υλικό της πτερύγωσης που επιλέχθηκε είναι GFRP.



Εικόνα 5.1: Αεροτομή NACA 4415. [4]

Επίσης, μελετήθηκε το κατάλληλο πάχος του υλικού της πτερύγωσης το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στη διακύμανση των τάσεων. Το πάχος του υλικού φαίνεται στην **εικόνα 5.2**.



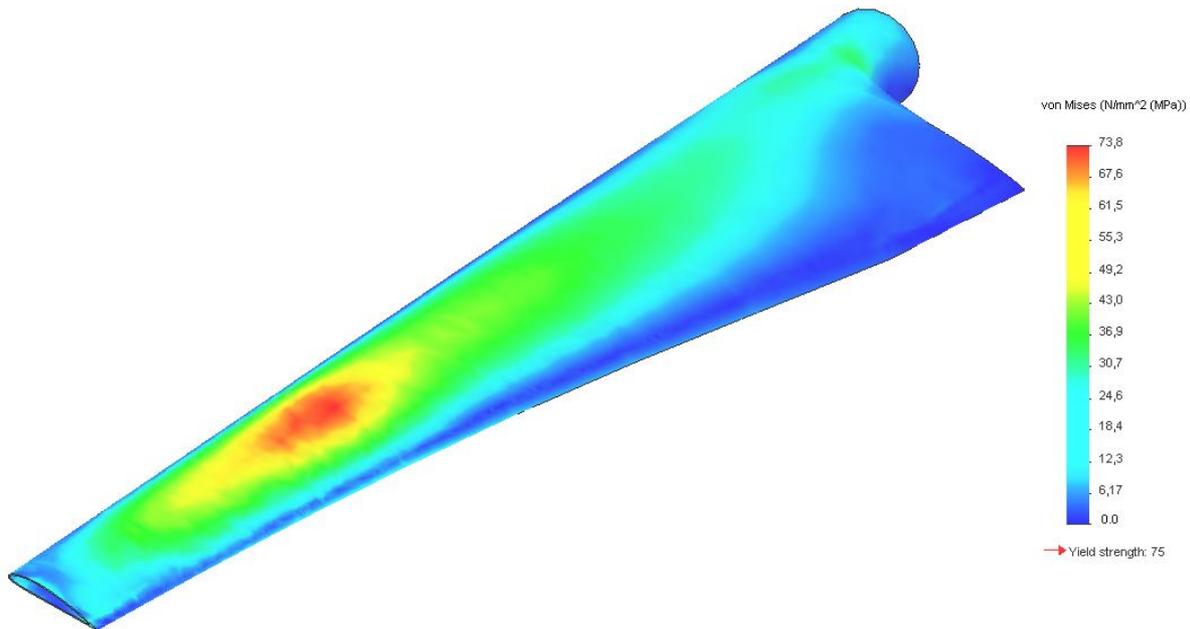
Εικόνα 5.2 : Πάχος του υλικού της πτερύγωσης σε τομή.

Η πτέρυγα έχει χωριστεί σε 10 κομμάτια, το πάχος που εκτιμήθηκε αρχικά σε κάθε κομμάτι ξεχωριστά ήταν ως εξής:

α/α (κομμάτι)	πάχος (mm)
0-1	18
1-2	16
2-3	14
3-4	12
4-5	10
5-6	8
6-7	6
7-8	5
8-9	4
9-10	3

**Πίνακας 5.1:** Πάχος του υλικού της πτερύγωσης (αρχικά).

Τα αποτελέσματα που πήραμε μετά την προσομοίωση (simulation) στο solidworks φαίνονται στην **εικόνα 5.3**.



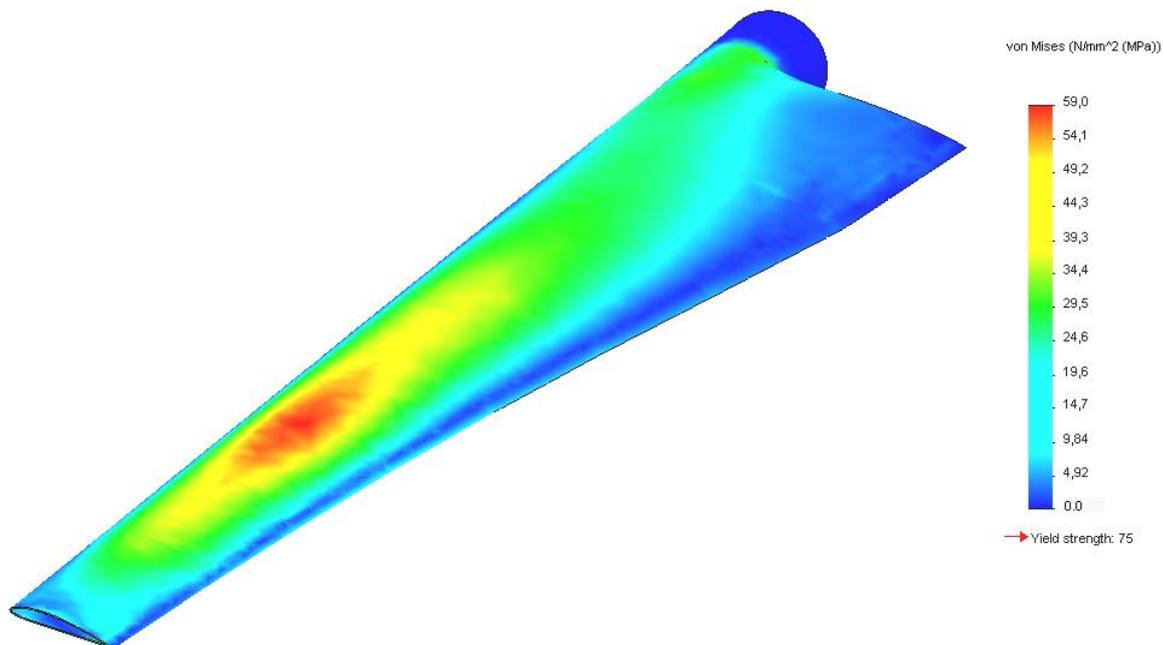
**Εικόνα 5.3:** Η καταπόνηση με βάση το πάχος που φαίνεται στον **πίνακα 5.1**.

Μετά από πολλές διορθώσεις που έγιναν βρέθηκε το κατάλληλο πάχος και έχει ως εξής:

α/α (κομμάτι)	πάχος (mm)
0-1	14
1-2	13
2-3	12
3-4	11
4-5	10
5-6	9
6-7	8
7-8	7
8-9	6,5
9-10	6

**Πίνακας 5.2:** Τελικό πάχος του υλικού της πτερύγωσης.

Τα φορτία που μπήκανε για την προσομοίωση έγινε με βάση το κεφάλαιο 4, έτσι στην **εικόνα 5.2** φαίνονται οι νέες τάσεις επάνω στην πτερύγωση.

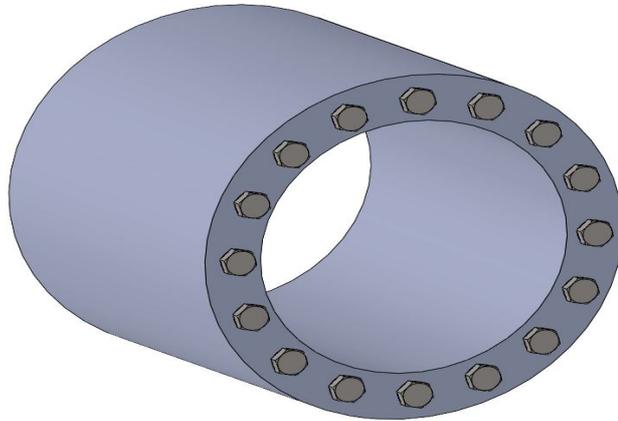


**Εικόνα 5.4:** Η καταπόνηση με το τελικό πάχος του υλικού της πτερύγωσης που φαίνονται στον **Πίνακα 5.2**.

Παρατηρήσεις: Η πτέρυγα έχει μελετηθεί για ταχύτητα αέρα 14 m/sec, η ιδανική της λειτουργία της με βάση υπολογισμών θα ήταν για ταχύτητα αέρα περίπου 5 m/sec καθώς ο συντελεστής ασφαλείας που σύμφωνα με την διεθνής νομοθεσία IEC 61400-2 είναι για GFRP, 7,4.

## 5.2 Σχεδιασμός προσαρμογής του φτερού στην πλήμη.

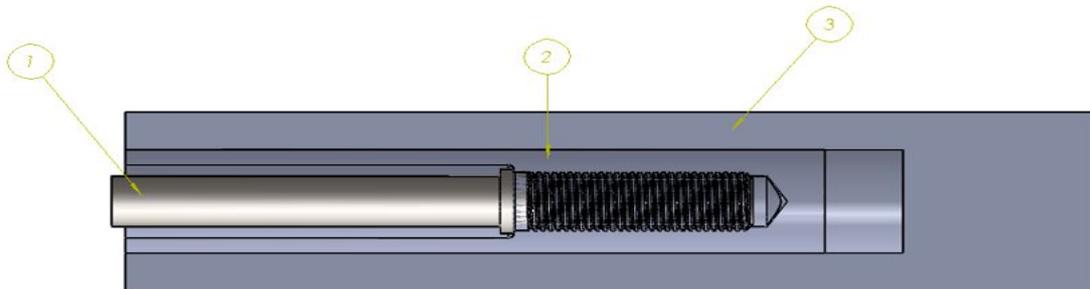
### 5.2.1 Προσομοίωση πλήμης μέσω του προγράμματος solidworks για περύγωση ανεμογεννήτριας ισχύος 20kw.



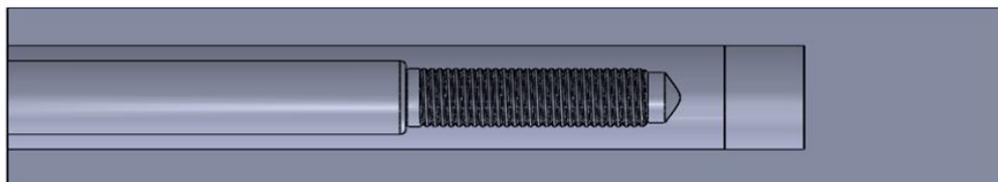
Εικόνα 5.5: Πόδι περύγωσης:

Αναλυτικά τα μέρη της πλήμης φαίνονται στην εικόνα 5.8:

ΙΤΕΜ ΝΟ.	PART NUMBER	ΥΛΙΚΟ	QTY.
1	ΒΙΔΑ	ΧΑΛΥΒΑΣ	1
2	ΥΠΟΔΟΧΗ ΒΙΔΑΣ	ΧΑΛΥΒΑΣ	1
3	ΥΛΙΚΟ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ	GFRP	1

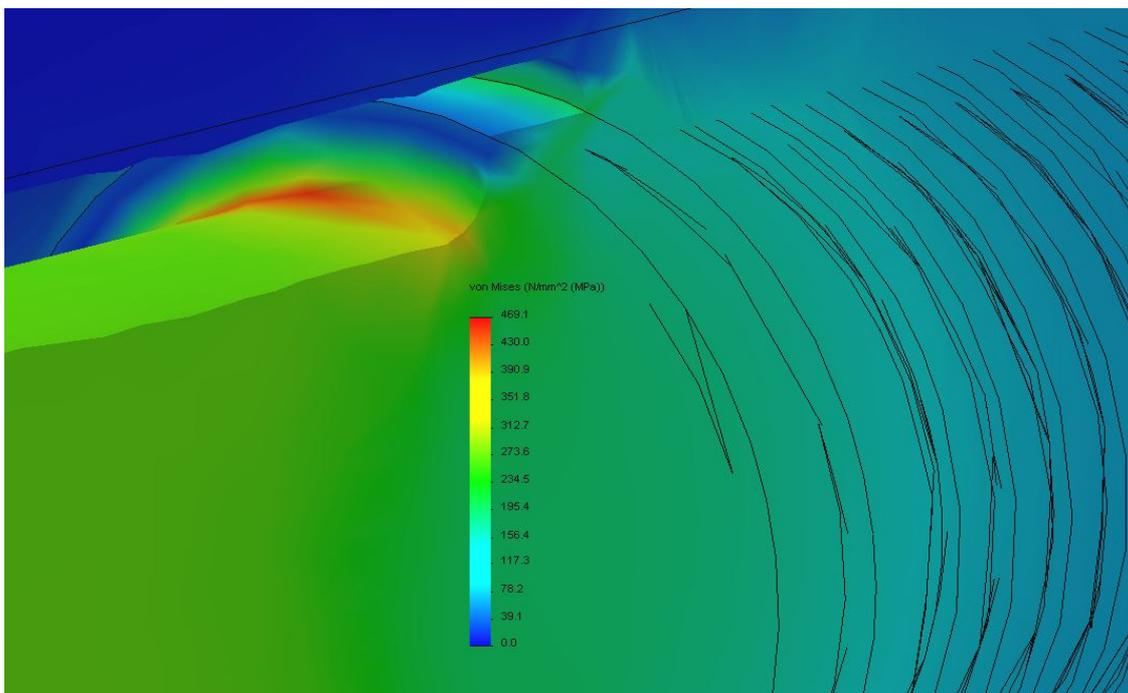
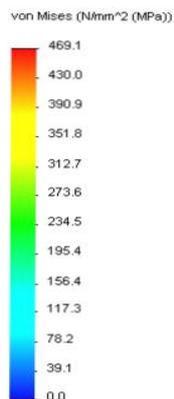
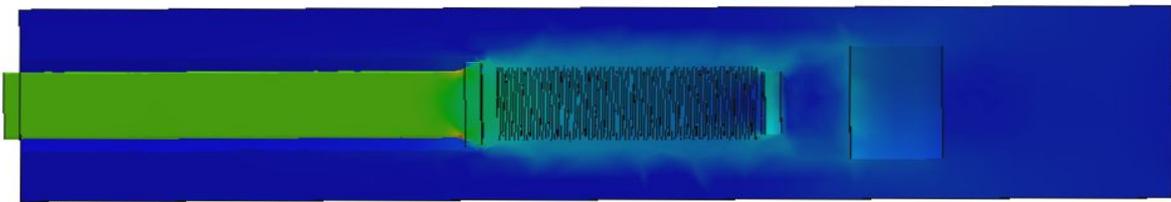


Εικόνα 5.6: Μέρη πλήμης



Εικόνα 5.7: Βύσμα

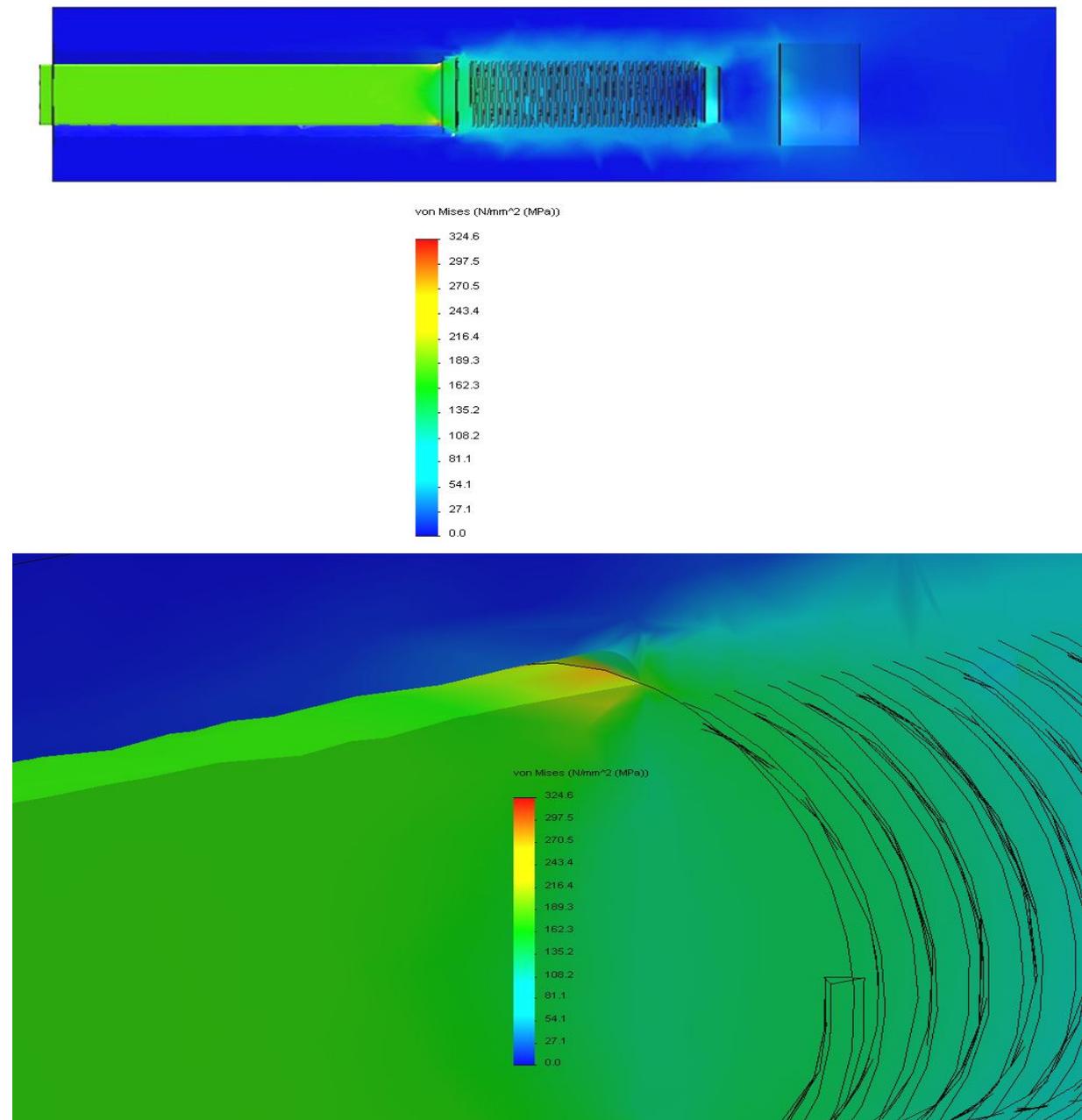
Προσομοίωση (simulation) 1:



Βλέπουμε ότι σε αυτήν την περίπτωση η βίδα μας έχει μία καταπόνηση μέγιστη 469,1 Μπα η οποία ξεπερνάει τον συντελεστή ασφαλείας το οποίο είναι 1.9. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι τάσεις(κόκκινο χρώμα) προς το τέλος του κορμού δεν είναι ισοκατανεμημένες, οπότε χρειάζεται να διορθώσουμε αυτή την περίπτωση. Η διόρθωση μπορεί να γίνει με το να μικρύνουμε την

διάμετρο του υλικού της υποδοχής της βίδας ή να μεγαλώσουμε την διάμετρο του κορμού στην βίδα ώστε να πετύχουμε καλύτερα αποτελέσματα.

Προσομοίωση (simulation) 2 μετά από αφαίρεση υλικού στην υποδοχή της βίδας και αύξάνοντας την διάμετρο του κορμού της βίδας:



Τώρα φαίνεται ξεκάθαρα ότι το αποτέλεσμα είναι πολύ καλύτερο από το προηγούμενο καθώς έχουμε μία μέγιστη καταπόνηση στα 324,6 Μpa, καλύπτοντας έτσι και τον συντελεστή

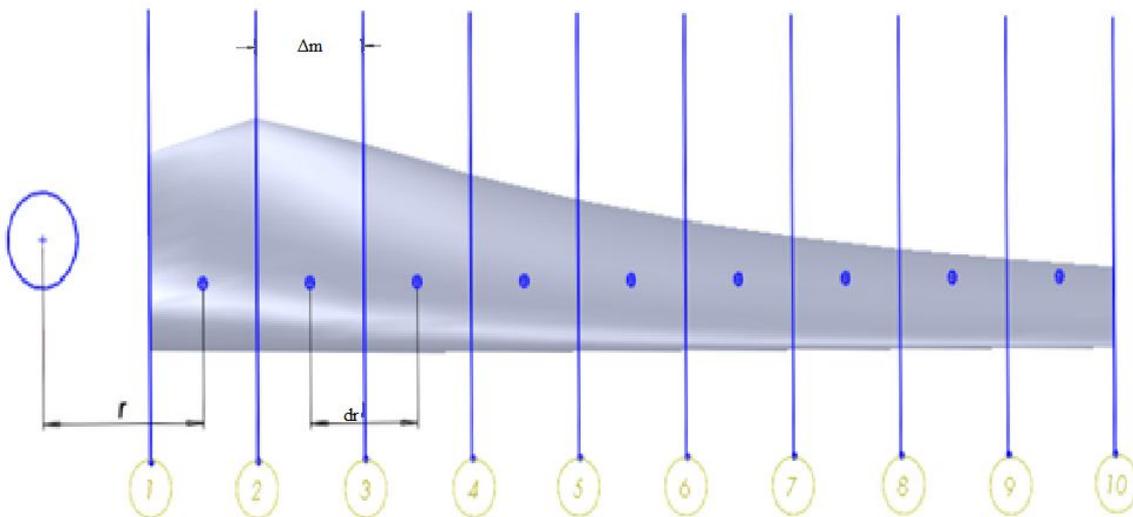
**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ**

ασφαλείας που είναι 1.9.  $\sigma_{\max}=324,6$  MPA, με  $\sigma_{\epsilon\pi}=620$  MPA οπότε έχουμε ένα συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1,91. Ακόμα βλέπουμε ότι έχουμε καλή ισοκατανομή των τάσεων σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.

Υπολογισμός της δύναμης στην βίδα M20x2:

Ο υπολογισμός έγινε με βάση τα παρακάτω:

a/a (κομμάτια)	$\Delta V$ (m <sup>3</sup> ) (Όγκος)	$\Delta m = \rho * \Delta m$ (kg) (μάζα)	r (m) (ακτίνα)	$\Delta m * \omega^2 * r$ (Nt ) (φυγόκεντρος δύναμη)
1...2	0.015	46.52	0.84	4737.2
2...3	0.014	44.61	1.40	7570.3
3...4	0.012	37.37	1.96	8878.6
4...5	0.009	27.72	2.52	8466.0
5...6	0.007	20.52	3.09	7660.8
6...7	0.005	14.49	3.65	6391.3
7...8	0.003	9.79	4.21	4985.3
8...9	0.002	6.83	4.77	3943.3
9...10	0.001	4.46	5.61	3027.1
			Σύνολο	55660 Nt



**Εικόνα 5.8:** Το  $r$  και το  $\Delta m$  της πτερύγωσης

Η φυγόκεντρος δύναμη υπολογίζεται από τον τύπο:

$$F_{\phi} = \Delta m * \omega^2 * r \text{ (Nt ) (φυγόκεντρος δύναμη)}$$



Αντικαθιστώντας σε αυτό τον τύπο τις  $\Delta m$  και τις αποστάσεις τους από το κέντρο περιστροφής βρίσκουμε για  $\omega=11\text{r/s}$ . Η γωνιακή αυτή ταχύτητα είναι διπλάσια από την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του ρότορα.

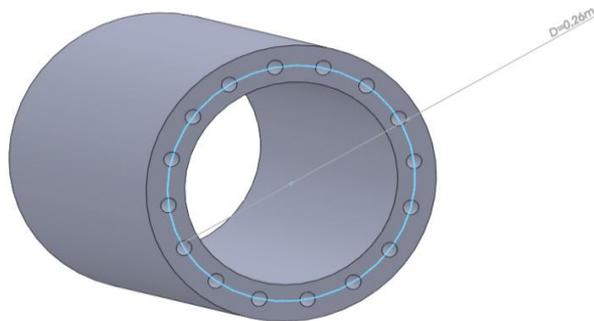
Θα τοποθετηθούν 16 βίδες οπότε η φυγόκεντρος δύναμη που ασκείται σε μία βίδα φαίνεται παρακάτω.

$$F_{\varphi} = \frac{55660}{16} = 3478.75 \text{ Nt για κάθε βίδα.}$$

Η δύναμη της κάμψης υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$F_{\text{καμπτικό}} = \frac{M}{2D} \text{ (δύναμη κάμψης)}$$

όπου  $M$  η ροπή που βρέθηκε στο κεφάλαιο 4,  $M=34126,3 \text{ Nt m}$  και  $D$  η διάμετρος του ποδιού στο μέσο του κελύφους όπου έχουν τοποθετηθεί οι τρύπες, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 5.8:** Η διάμετρος  $D$  του ποδιού.

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω βρίσκουμε ότι :

$$F_{\text{καμπτικό}} = \frac{34126.3}{2 \cdot 0.26} = 65627.5 \text{ Nt}$$

Οπότε η συνολική δύναμη που εφαρμόζεται πάνω στην βίδα είναι :

$$F_{\text{βιδας}} = F_{\varphi} + F_{\text{καμπτικό}} = 3478.75 + 65627.5 = 69106.2 \text{ Nt.}$$

#### ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΣΧΟΛΙΑ:

Πρέπει να τονίσουμε ότι οι βίδες επηρεάζουν η μία την άλλη και δεν φορτίζονται όλες το ίδιο. Έτσι η μελέτη γίνεται για την δυσμενέστερη περίπτωση.

Στην πρώτη προσομοίωση το υλικό μας έχει μία μέγιστη καταπόνηση στα  $\sigma_{\max}=469,1$  MPA με διάμετρο κορμού να είναι  $d_k=17,5$  mm. Ενώ στην δεύτερη έχουμε μέγιστη καταπόνηση στα  $\sigma_{\max}=324,6$  MPA λόγω του ότι μεγαλώσαμε την διάμετρο του κορμού  $d_k=22$  mm. Συμπεραίνουμε ότι με το να μεγαλώσουμε την διάμετρο του κορμού πετύχαμε:

- Μικρότερες καταπονήσεις από  $\sigma_{\max}=469,1$  MPA μειώθηκε στα  $\sigma_{\max}=324,6$  MPA, με  $\sigma_{\text{επ}}=620$  MPA οπότε έχουμε ένα συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1,91.
- Στο δεύτερο κομμάτι οι τάσεις είναι ισοκατανεμημένες , αντιθέτως με την πρώτη περίπτωση.
- Με το να μεγαλώσουμε την διάμετρο η κατασκευή γίνεται ευκολότερη.

Οι συντελεστές ασφαλείας των υλικών που λήφθηκαν υπόψη σύμφωνα με την διεθνή νομοθεσία IEC 61400-2 είναι :

- Χάλυβας 1,9 και
- GFRP 7,4.

## **Συμπεράσματα**

Σύμφωνα με την εργασία αυτή η κατασκευή μιας πτέρυγας Ανεμογεννήτριας ισχύος 20 kW είναι εφικτή με τα σύγχρονα υλικά (GFRP κλπ.)

Για την συγκράτηση της πτέρυγας στην πλήμνη επιλέχτηκε η τεχνική των εμφυτευμένων κοχλιών με βύσματα. Ο υπολογισμός των κατανομών των τάσεων των εμφυτευμένων βυσμάτων έδειξε ότι δεν παρουσιάζονται συγκεντρώσεις τάσεων επικίνδυνες για την αντοχή του φτερού. Η μελέτη σε κόπωση δεν έγινε. Ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του κανονισμού IEC 61400\_2 και γίνονται αναφορές σε αυτόν.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) D. LE GOURIERES, LES ÉOLIENNES *Théorie, conception et calcul pratique*.
- 2) Ιστοσελίδα Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας και Σύνθεσης Ενεργειακών Συστημάτων, [www.wel.teiher.gr](http://www.wel.teiher.gr)
- 3) GURIT - DELIVERING THE FUTURE OF COMPOSITE SOLUTIONS, [www.gurit.com](http://www.gurit.com)
- 4) Βικιπαίδεια Ηλεκτρονική Εγκυκλοπαίδεια, [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- 5) CANADIAN MANUFACTURING ,THE ONLINE CENTRE WHERE INDUSTRY CONNECTS, [www.canadianmanufacturing.com](http://www.canadianmanufacturing.com)
- 6) Grant Ingram, (2011). Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method, <http://www.dur.ac.uk>