

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΕΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΣΕΡΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΒΟΥΛΚΑΚΗΣ Α. ΙΩΑΝΝΗΣ
ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΤΟΙΛΑΣ

ΣΕΡΡΕΣ 30/09/2012

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν ο βέλτιστος σχεδιασμός της πτερύγωσης ανεμομηχανής οριζόντιου άξονα. Η μελέτη και ο σχεδιασμός έγιναν σύμφωνα με την μέθοδο “Βήμα προς Βήμα” του J. R. Park, ο οποίος ήταν από τους πρωτοπόρους στον σχεδιασμό και στην κατασκευή ανεμογεννητριών.

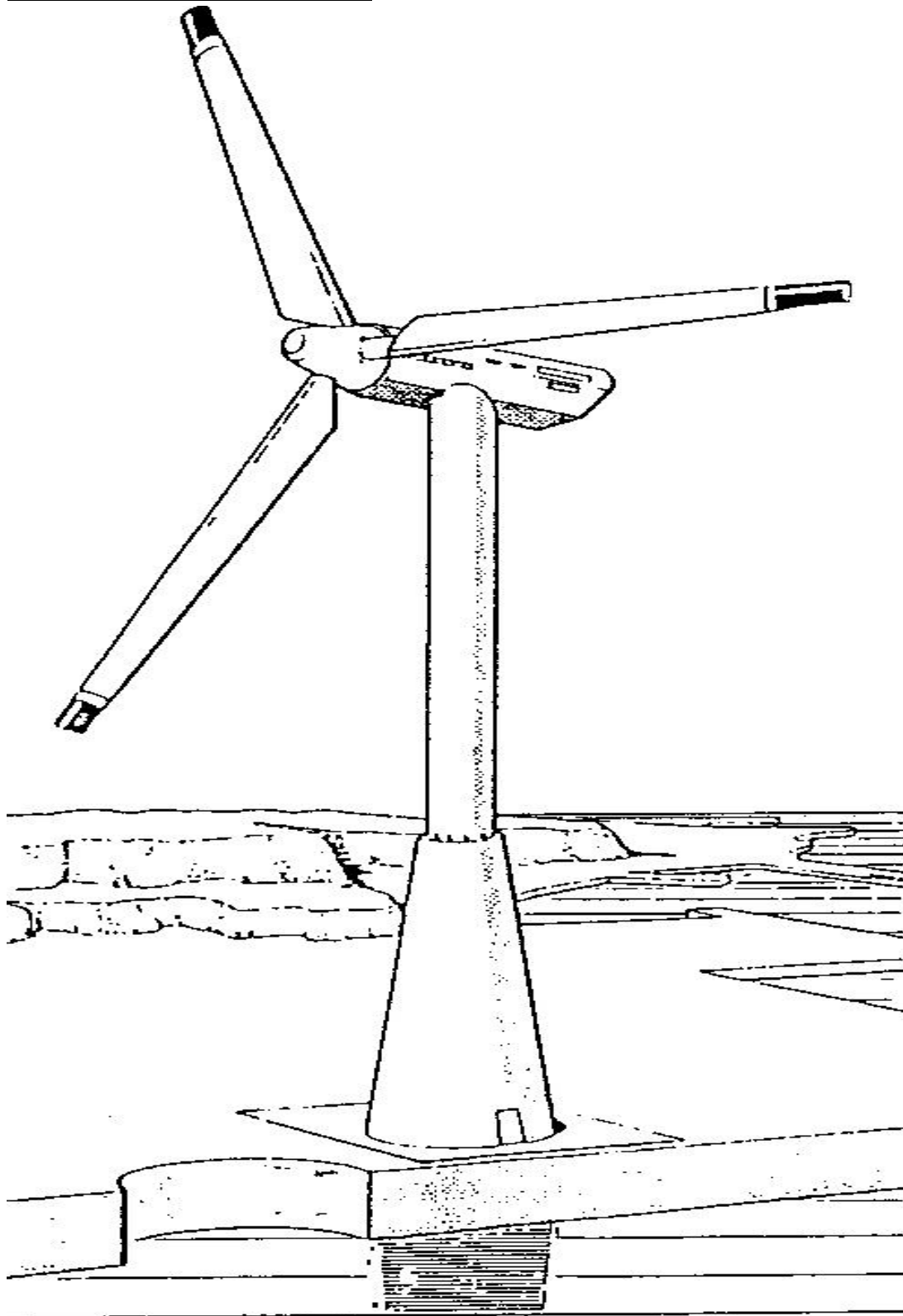
Στην εργασία γίνεται μια μικρή αρχική αναφορά στις ανεμογεννήτριες στο 1ο κεφάλαιο, όπως: Στην ιστορική αναδρομή τους, στα χαρακτηριστικά του ανέμου, στους τύπους των ανεμοκινητήρων και στις εφαρμογές αυτών.

Στην συνέχεια, στο 2ο κεφάλαιο, γίνεται μια εκτενέστερη ανάλυση των θεωριών που σχετίζονται με την μελέτη των ανεμομηχανών, όπως: Η θεωρία του δίσκου ενέργειας με τις εξισώσεις των νόμων μηχανικής και μάλιστα της μηχανικής των ρευστών και την εφαρμογή των, στους συντελεστές ισχύος-ανώσεως-αντίστασης κτλ, στο όριο του Betz, στα στοιχεία πτερύγωσης, στην δισδιάστατη αεροτομή, στις καταστάσεις του δρομέα, στις διορθώσεις της θεωρίας του δίσκου ενέργειας, στην ισχύ του ανέμου και της ανεμομηχανής, στον αεροδυναμικό σχεδιασμό του δρομέα, στον αριθμό των πτερυγίων, στον λόγο ακροπτερυγίου, στην βελτιστοποίηση σχεδίασης του δρομέα, στον άνεμο και στην αιολική ενέργεια, στην ενέργεια και την ισχύ του ανέμου και στις ενεργειακές απώλειες που εμφανίζονται στον ανεμοκινητήρα.

Στο 3ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην διαστασιολόγηση για τρίπτερο ανεμοκινητήρα οριζόντιου άξονα, σύμφωνα με την μέθοδο “Βήμα προς Βήμα” του J. R. Park, και εφαρμογή για μια μικρή ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος ενός ίππου (1 HP = 736 Watts), καθώς και της αεροτομής NACA 23012, μέσω του προγράμματος Excel των Windows υπολογισμού πτερύγωσης, που φτιάχτηκε ειδικά για αυτόν τον σκοπό και συνοδεύει την εργασία αυτή. Γίνεται επίσης αναφορά στην αποτύπωση της αεροτομής, στην αεροτομή NACA 23012, στα βασικά στοιχεία της αεροδυναμικής και κατασκευής των πτερυγίων, του συστήματος στήριξης - ελέγχου μηχανικής ισχύος - προσανατολισμού και ακόμη του απλού συστήματος furling (προστασίας από δυνατό άνεμο). Γίνεται αναφορά σε μελέτη παραδείγματος συστήματος ελέγχου μηχανικής ισχύος και προσανατολισμού του δρομέα, για τον δρομέα της εφαρμογής.

Στο τελευταίο 4ο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στον προγραμματισμό της όλης διαδικασίας, υπολογισμού και σχεδίασης των αεροτομών της πτερύγωσης του δρομέα, όπου δίνοντας μόνο τα απαιτούμενα στοιχεία για τον σχεδιασμό, και σε χρόνο dt υπολογίζονται όλα τα ζητούμενα, χωρίς να ψάχνουμε σε διαγράμματα, διότι όλα τα διαγράμματα εκφράζονται με πολυώνυμα μεγάλου βαθμού και τα οποία χειρίζεται ο υπολογιστής με τις κατάλληλες εντολές. Μόνο στην αποτύπωση της αεροτομής με την λειτουργία των διαγραμμάτων του Excel επεμβαίνουμε διότι διαφορετικά έπρεπε να έχουμε ειδικό πρόγραμμα αποτύπωσης των αεροτομών, όπως είναι το πρόγραμμα Daedalus.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο



ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Για να καταστεί κάποιος πτυχιούχος των Τ.Ε.Ι., σύμφωνα με τον ισχύοντα κανονισμό σπουδών του Τ.Ε.Ι., θα πρέπει να εκπονήσει μια εργασία, που καλείται «πτυχιακή εργασία», η παρούσα εργασία αποτελεί την εργασία της πτυχιακής.

Στην εργασία αυτή, που φέρει τον τίτλο «Σχεδιασμός Πτερύγωσης Ανεμοκινητήρος Οριζόντιου Άξονα», αναπτύσσονται οι θεωρίες, που διατυπώθηκαν από διάφορους επιστήμονες, για τον σχεδιασμό των πτερυγίων ενός ανεμοκινητήρος, και στο τέλος ακολουθεί ο υπολογισμός των απαραίτητων στοιχείων της ιδανικής πτερύγωσης.

Έγινε μεγάλη προσπάθεια για να παρουσιασθεί το μέρος της θεωρίας, έτσι ώστε να είναι απλό και κατανοητό, με σαφήνεια και ολοκληρωμένο, στο δυνατό μέγεθος που αφορά το συγκεκριμένο θέμα, πράγμα πολύ επίπονο λόγω της τεράστιας έκτασης της ύλης που διαπραγματεύεται η εργασία αυτή.

Ακολουθεί, στο τρίτο μέρος, όπου γίνονται οι υπολογισμοί, η διαστασιολόγηση δηλαδή, είναι το τμήμα των υπολογισμών, όπου αναπτύσσεται σύντομα αλλά και εκτενέστερα και με σαφήνεια, η μελέτη της διαστασιολόγησης, και δε στο 4ο μέρος γίνεται η αναφορά στο πρόγραμμα Excel των Windows, όπου ο καθένας μπορεί πολύ απλά, αλλάζοντας τα δεδομένα, να πειραματισθεί στην κατασκευή μιας απλής ανεμογεννήτριας.

Έγινε μεγάλη προσπάθεια ώστε να χρησιμοποιηθούν τα φυσικά μεγέθη του διεθνούς συστήματος μέτρων και σταθμών (S.I.).

Φρονώ, και είναι παγκόσμια φρόνηση, να καταφέρουμε να δαμάσουμε τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας που τελευταία γίνεται αρκετός λόγος για αυτές τις αστείρευτες οικολογικές πηγές ενέργειας και την αξιοποίησή τους. Η κρίση του πετρελαίου, η επικείμενη εξάντληση των ορυκτών επιβλαβών καυσίμων, η αυξανόμενη μόλυνση του περιβάλλοντος, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, και η βούληση των κρατών για εθνική και ανεξάρτητη ενεργειακή πολιτική με την αξιοποίηση των εγχώριων πηγών ενέργειας, οδηγούν στην χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που δίνουν σε μεγάλο βαθμό λύση στα παραπάνω προβλήματα. Πηγές ενέργειας όπως η αιολική, η ηλιακή κ.ά. έχουν ένα χαρακτηριστικό που τις δίνει την ονομασία **ανανεώσιμες**, ότι δηλαδή από τη φύση τους ανανεώνονται διαρκώς και προσφέρονται στον άνθρωπο δωρεάν για εκμετάλλευση.

Αποτελεί ιστορική πρόκληση για τον τόπο, η δημιουργία μιας εθνικής βιομηχανίας για την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Διότι, εκτός από την συνεισφορά τους στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας, συνεισφέρουν σημαντικά, αν αναπτυχθούν κατάλληλα, και στην δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Εκτός των άλλων, και οι τεχνολογίες εκμετάλλευσής των βρίσκονται μέσα στις κατασκευαστικές δυνατότητες των αναπτυσσομένων τεχνολογικά χωρών.

Και ένα τρίτο χαρακτηριστικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι ότι δεν είναι πάντα εξαγωγήσιμες, συνεπώς η εκμετάλλευσή τους πρέπει να γίνει στη θέση όπου εμφανίζονται, άρα πρόκειται για ένα αποκεντρωμένο σύστημα παραγωγής ενέργειας μέσα στην ανθρώπινη κλίμακα δραστηριότητας.

Η ευαισθητοποίησή μου στα οικολογικά θέματα, με έκαναν να ασχοληθώ στην πτυχιακή μου εργασία με την αιολική ενέργεια και ειδικά με τον σχεδιασμό

πτερύγωσης ανεμοκινητήρα. Τελειώνοντας θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν στην αποπεράτωση αυτής της εργασίας.

Βουλκάκης Ιωάννης

1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ

Η αιολική ενέργεια είναι μία από τις πιο παλιές φυσικές πηγές ενέργειας που αξιοποιήθηκε, από τον άνθρωπο, σε μηχανική μορφή.

Επειδή παρέχεται άμεσα από την φύση αυτή η πρωτογενής μορφή ενέργειας, έπαιξε αποφασιστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας, ιδιαίτερα με την χρήση της στην ναυτιλία για συγκοινωνίες και εξερευνήσεις. Η σημασία της ενέργειας του ανέμου φαίνεται στην ελληνική μυθολογία όπου ο Αίολος διορίζεται από τους θεούς ταμίας των ανέμων.

Σαν πρώτη χρήση της αιολικής ενέργεια από τον άνθρωπο έγινε για την κίνηση των πλοίων. Από αρχαιολογικές μαρτυρίες γνωρίζουμε ότι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν από τους Κινέζους τους Πέρσες, και τους Αιγυπτίους αιώνες πριν την γέννηση του Χριστού.

Στις χώρες της ανατολής, στην Περσία, στην Μικρά Ασία, στο Αιγαίο, οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν από πολύ παλαιά για την άλεση των δημητριακών.

Οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο και για την άντληση των υδάτων. Η μεγαλύτερη διάδοση ανεμόμυλων έγινε στην Ολλανδία, όπου με την βοήθειά των έγινε η αποστράγγιση, από τα θαλάσσια νερά, της χώρας που βρίσκεται κατά μεγάλο μέρος κάτω απ' την στάθμη της θάλασσας.

Στην Ελλάδα, χρησιμοποιήθηκαν οι ανεμόμυλοι κατά κόρον, για άντληση αρδευτικού νερού από πηγάδια στην ανατολική Κρήτη, όπου ο αριθμός τους ξεπερνούσε, προπολεμικά, τις 6.000.

Κατά τους αρχαίους χρόνους, χρησιμοποιήθηκαν οι ανεμόμυλοι κυρίως για το άλεσμα του σιταριού, για δε το πότισμα κήπων στην Περσία μέχρι και το 900 μΧ. Ακολουθεί η αναφορά των κυριοτέρων χρονικών σταθμών της εξελικτικής πορείας του ανεμόμυλου.

- 1200 μΧ Ανεμόμυλοι οριζοντίου άξονα χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη για το άλεσμα του σιταριού.
- 1500 Στα πεδινά της Ολλανδίας εμφανίζονται οι πρώτοι ανεμόμυλοι. Ο Don Quixote τους φέρνει στην Ισπανία.
- 1600 Άποικοι κατασκευάζουν ανεμόμυλους ευρωπαϊκού τύπου στα ανατολικά παράλια τη Αμερικής.
- 1700 Οι ατμομηχανές αρχίζουν να αντικαταστούν τους ανεμόμυλους.
- 1860 Οι αμερικανοί κατασκευάζουν πολυπτέρυγους ανεμόμυλους (multi-Bladed), για να χρησιμοποιηθούν για κίνηση αντλιών.
- 1870 Το Σικάγο γίνεται κέντρο βιομηχανικής παραγωγής ανεμόμυλων.
- 1900 Οι Δανοί παράγουν ηλεκτρισμό από τον άνεμο.
- 1920 Ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής χρησιμοποιούνται στην Αμερική
- 1930 Οι ανεμόμυλοι στις αγροτικές περιοχές αντικαθίστανται από την επέκταση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.
- 1940 Στο Vermont (Η.Π.Α.) κατασκευάζεται για πρώτη φορά πειραματικός ανεμοκινητήρας αρκετά μεγάλης ισχύος με δύο πτερύγια.
- 1950 Η ατομική ενέργεια μειώνει το ενδιαφέρον για χρησιμοποίηση της αι-

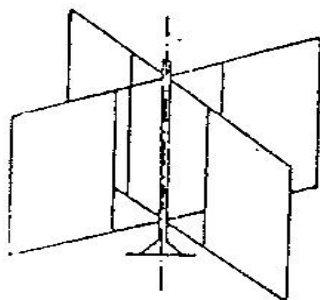
- ολικής ενέργειας.
- 1960 Η μόλυνση του περιβάλλοντος από τις υπάρχουσες πηγές ενέργειας (άνθρακας - πετρέλαιο) αρχίζει να γίνεται έντονη.
 - 1970 Η έλλειψη καυσίμων αναζωογονεί το ενδιαφέρον για αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου.
 - 1976 Τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες διαθέτουν για πρώτη φορά μεγάλο ύψος χρημάτων για προγράμματα γύρω από την τεχνοοικονομική διερεύνηση των ανεμοκινητήρων.
 - 1983 Κατασκευή ανεμοκινητήρων ισχύος 3 MW.
 - 1990 Κατασκευή ανεμοκινητήρων ισχύος 7 MW.

Αν και η αύξηση της ζήτησης ενέργειας οδήγησε ορισμένες τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες στην κατάσχεση προγραμμάτων για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, η επιδίωξη να συμπεσθεί το κόστος της αρχικής εγκατάστασης με την κατασκευή μονάδων μεγαλύτερης ισχύος, αντιμετώπισε την επίλυση δύσκολων τεχνικών προβλημάτων, και τελικά το ενδιαφέρον περιορίστηκε στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας μόνο σε απομονωμένες περιοχές.

Η πρόσφατη ενεργειακή κρίση με τις αλληπάλληλες αυξήσεις της τιμής του πετρελαίου, και η τεχνολογική πρόοδος που σημειώθηκε, έδρασαν ευνοϊκά ώστε σήμερα να δικαιολογείται η προσπάθεια κατασκευής μεγαλύτερων μονάδων για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, αλλά και της τυποποίησης στην κατασκευή των μικρότερων, για ορισμένες χρήσεις.

Στην Ελλάδα, μαρτυρίες δείχνουν την ύπαρξη ανεμόμυλων πολλές εκατοντάδες χρόνια προ Χριστού, αναπτύχθηκε ένας χαρακτηριστικός τύπος ανεμόμυλου οριζοντίου άξονα με πανιά, για άλεσμα σιταριού και κυρίως για άντληση νερού για πότισμα κήπων.

Σήμερα έχουν εγκατασταθεί πάρα πολλές ανεμογεννήτριες, σε όλη την Ελλάδα, που παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές. Σχεδόν σ' όλα τα νησιά της Ελλάδος έχουν εγκατασταθεί ανεμογεννήτριες, οι οποίες παρέχουν ανέξοδη ηλεκτρική ενέργεια. Τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται το ένα μετά το άλλο. Η σημαντική αυτή αύξηση οφείλεται ουσιαστικά στο ενδιαφέρον των ευρωπαϊκών Κοινοτήτων για την μείωση της ενεργειακής εξάρτησης, που μέσω χρηματοδοτούμενων ενεργειακών προγραμμάτων, επιχειρείται η ανάπτυξη μιας ευρωπαϊκής ενεργειακής τεχνολογίας.



Σχήμα 1.1 Περσικός ανεμόμυλος πλακών κατακόρυφου άξονα.

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι ανεμοκινητήρες αναπτύχθηκαν από αρχαιοτάτων χρόνων και για πολλούς αιώνες χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα, ιδιαίτερα σε αγροτικές εφαρμογές. Η εποχή

άλλωστε, που έγινε πολύ εκτεταμένη χρήση ανεμόμυλων, είναι σχετικά πρόσφατη. Οι ανεμόμυλοι, για πρώτη φορά στην ιστορία της ανθρωπότητας, χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ενέργειας στη Μέση Ανατολή πριν από 2500 και πλέον χρόνια. Αν και οι παλιοί ανεμόμυλοι στην Περσία είχαν τον άξονά τους κατακόρυφο, οι ανεμόμυλοι που σχεδιάστηκαν στη Μεσόγειο και την Δυτική Ευρώπη είχαν τον άξονά τους οριζόντιο, θέμα καθαρά αντίληψης των διαφορετικών πολιτισμών. Τα πτερύγια αυτών των ανεμοκινητήρων ήταν τρία ή τέσσερα και περισσότερα και χρησιμοποιήθηκαν για πολλούς αιώνες, μέχρι τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, για άντληση νερού, άλεση δημητριακών κ.α.. Ανεμομηχανές με διαμέτρους μέχρι 25m, μπορούσαν να παράγουν ισχύ μέχρι και 10 kw, σε τοποθεσίες κοντά στην ακτή. Το έργο που παρήγαγαν ισοδυναμούσε με το έργο εκατό ανθρώπων περίπου κι έτσι η σπουδαιότητά τους παρέμεινε για πολλούς αιώνες. Εκτοπίστηκαν απ' τις ατμομηχανές κατά τον 19ο αιώνα, διότι οι μηχανές αυτές έκαιγαν φθινό κάρβουνο κι έτσι οι ανεμομηχανές έπαυσαν να κατασκευάζονται.

Κατά τον 20ο αιώνα, η ανάπτυξη των μηχανών εσωτερικής καύσης και των συστημάτων ηλεκτρισμού, έχει επιτρέψει την ευρεία κατανάλωση ενέργειας, λόγω της μεγάλης διαθεσιμότητας και χαμηλού κόστους των καυσίμων. Με την κρίση των καυσίμων, στις αρχές της δεκαετίας του '70, πολλές χώρες έχουν επενδύσει μεγάλα κεφάλαια στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, περιλαμβάνοντας και την αιολική.

Η μεγάλη τεχνολογική πρόοδο, έφερε και μεγάλη πρόοδο στον σχεδιασμό και την κατασκευή των ανεμομηχανών. Έτσι μπήκαν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες πλέον συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο, καταργώντας έτσι μέρος των σταθμών παραγωγής και εξοικονομώντας καύσιμα. Η αξία τους αξιολογείται από την εξοικονόμηση καυσίμων και την προστασία του περιβάλλοντος.

Στην Καλιφόρνια και στην Δανία, η εμπορικότητα αυτού του τύπου λειτουργίας, έγινε επιστήμη από την δεκαετία του '80, με την εγκατάσταση ανεμογεννητριών ισχύος πολλών εκατοντάδων MW, συνεισφέροντας πολλά στην οικονομία. Ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου η κύρια πηγή ηλεκτρισμού είναι οι μηχανές Diesel, οι ανεμογεννήτριες συμπληρώνουν ή αντικαθιστούν αυτές τις μηχανές.

Πάντως το κόστος της ενέργειας απ' τις ανεμογεννήτριες είναι ανταγωνιστικό του κόστους από τις συμβατικές πηγές και αυτό διότι άνεμος αποτελεί μια ανταγωνίσιμη πηγή ενέργειας, καθ' ότι ανανεώσιμη.

1.2 Ο ΑΝΕΜΟΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΥΤΟΥ – ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Οι άνεμοι της γης παράγονται κυρίως από την άνιση θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο, έτσι λόγω της διαφορετικής θερμοχωρητικότητας της θάλασσας και της στεριάς και από την διαφορετική πυκνότητα του αέρος λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας, έχουμε την εμφάνιση του ανέμου, που λέγεται παραλιακό ρεύμα.

Λόγω της μεγαλύτερης θέρμανσης της επιφάνειας της γης κοντά στον Ισημερινό απ' ότι στους πόλους, παράγονται οι πλανητικοί άνεμοι. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κρύοι επιφανειακοί άνεμοι να φυσούν από τους πόλους προς τον ισημερινό, προς αντικατάσταση του αέρα που ανυψώνεται στις τροπικές περιοχές και κινείται στην ανώτερη ατμόσφαιρα προς τους πόλους.

Επίσης υπάρχουν και οι εποχιακοί άνεμοι, όπως οι Μουσσώνες, καθώς και οι ετήσιοι ή μελτέμια. Τα μελτέμια είναι άνεμοι του καλοκαιριού, βόρειο-βορειοανατολικοί κυρίως στο στην περιοχή του Αιγαίου, μέχρι και βορειοδυτικής κυρίως διεύθυνσης. Πνέουν από τον Μάιο έως τον Οκτώβριο.

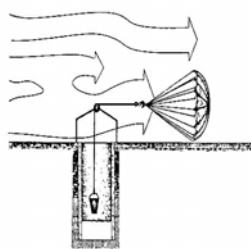
Η ενέργεια που έχει ο άνεμος λέγεται αιολική ενέργεια και είναι τόσο μεγάλη όσο μεγαλώνει η ταχύτητά του και μάλιστα όταν διπλασιάζεται η ταχύτητά του τότε η ενέργειά του οκταπλασιάζεται. Χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο χιλιάδες χρόνια πριν για την κίνηση των πλοίων της εποχής, τα ιστιοφόρα.

Το 1% περίπου της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Υπολογίζεται ότι η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στη γη για 10 ημέρες, έχει ενεργειακό περιεχόμενο ίσο με τα παγκόσμια αποθέματα των υποβαθμισμένων πηγών ενέργειας (άνθρακας, πετρέλαιο και αέρια καύσιμα), γίνεται αντιληπτό ότι ο άνεμος, ως φυσικός πόρος, είναι πολύ μεγάλος!

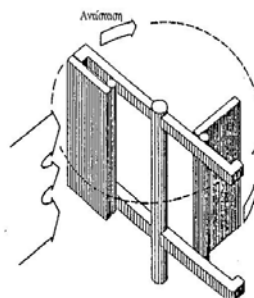
Μία πολλή μικρή ποσότητα της ημερήσιας αιολικής ενέργειας, το 1%, (δηλαδή το 0,01% της ηλιακής ενέργειας), είναι ίσο με την ημερήσια παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας! Κανείς δεν θα μπορούσε να πει πως η αιολική ενέργεια είναι μα πανάκεια, αλλά καθώς η τεχνολογία των συστημάτων μετατροπής της ενέργειας του ανέμου αναπτύσσεται και η οικονομικότητά της σταδιακά βελτιώνεται, είναι καλό να γνωρίζει κανείς ότι οι παγκόσμιοι πόροι του ανέμου είναι τόσο μεγάλοι. Ο Θεός εν Σοφία τα πάντα εποίησε!

Οι εκτιμήσεις που αφορούν τους παγκόσμιους πόρους, έχουν σίγουρα κάποια ανοχή, έτσι υπολογίζοντας τους πόρους μιας συγκεκριμένης περιοχής, απαιτείται περισσότερη και λεπτομερή ανάλυση. Μια τέτοια μελέτη έγινε το 1982, σύμφωνα με τι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Κοινότητας, που περιλάμβανε ειδικούς απ' όλες τις χώρες της ΕΟΚ. Η μελέτη αφού έλαβε υπόψη τους διάφορους περιορισμούς που υπάρχουν στην πράξη για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, κατέληξε στο ότι υπάρχουν στην Ευρώπη διαθέσιμες περιοχές για την τοποθέτηση ανεμογεννητριών, που θα είναι ικανές να παράγουν 400.000 MW, δηλαδή περίπου 4.000 TW ηλεκτρισμού το χρόνο. Το παραπάνω μέγεθος, είναι τρεις φορές περίπου η κατανάλωση της Ευρώπης σε ηλεκτρισμό και αντιστοιχεί σε μια πετρελαιοπηγή, που παράγει 16 εκατ. βαρέλια πετρέλαιο την ημέρα! Σημειώνεται συγκριτικά, ότι η συνολική παραγωγή του OPEC είναι περίπου 16,5 εκατ. βαρέλια την ημέρα! Γι' αυτό λοιπόν οι ευρωπαίοι ενεργειακοί πόροι που προέρχονται από τον άνεμο είναι από τους μεγαλύτερους!

Η αιολική ενέργεια αποτελεί συνεπώς μια αστείρευτη πηγή ενέργειας, με αξιοσημείωτο δυναμικό και με δωρεάν πρώτη ύλη στην διάθεση της ανθρωπότητας και προβάλλει σήμερα ως μία από τις πιο κατάλληλες εναλλακτικές πηγές, για την παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά και για άλλες χρήσεις.



Σχήμα 1.3α: Εκτέλεση έργου με εκμετάλλευση της αεροδυναμικής αντίστασης.



Σχήμα 1.3β: Εκμετάλλευση αντίστασης για παραγωγή έργου. Βελτίωση διάταξης 1.3α.

1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΗΜΕΡΑ

Η κλιμάκωση των ανεμοκινητήρων, σύμφωνα με τις κατασκευές που έχουν γίνει σήμερα, γίνεται βάσει της ισχύος τους και διακρίνονται σε:

- ✓ Ανεμοκινητήρες μικρής ισχύος μέχρι 20 KW.
- ✓ Ανεμοκινητήρες μέσης ισχύος 20-250 KW.
- ✓ Ανεμοκινητήρες μεγάλης ισχύος > 250 KW.

Οι ανεμοκινητήρες μικρής ισχύος χρησιμοποιούνται σε αποκρυσμένες περιοχές, για κάλυψη αγροτικών ή κτηνοτροφικών αναγκών, ιδιαίτερα για άντληση και θέρμανση νερού, θέρμανση κατοικίας, φωτισμό και άλλες μικροεφαρμογές. Τις περισσότερες φορές η λύση είναι και οικονομικότερη. Οι ανεμοκινητήρες του τύπου αυτού είναι ανεξάρτητοι, μη συνδεδεμένοι με δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούν γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που φορτίζει συσσωρευτές.

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με ανεμοκινητήρες μέσης και μεγάλης ισχύος, μπορεί να γίνεται σε συνεργασία με δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

(α) Λειτουργία ανεμοκινητήρα για εξοικονόμηση καυσίμου. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την νησιωτική Ελλάδα, όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι, και το κόστος της παραγόμενης KWh είναι υψηλό, λόγω του αυξημένου κόστους του kg καυσίμου, λόγω της θαλάσσιας μεταφοράς και του μικρού μεγέθους του σταθμού.

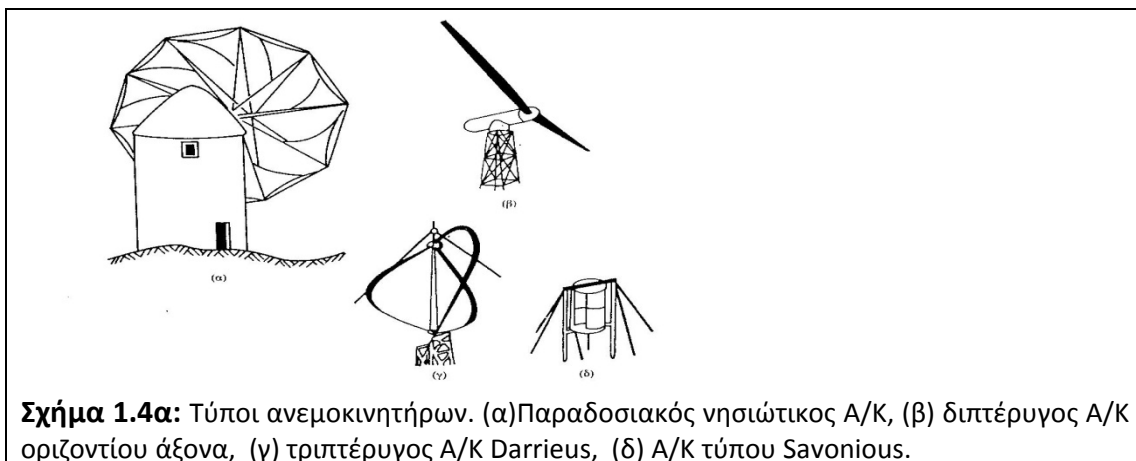
(β) Λειτουργία ανεμοκινητήρα ως σταθμού βάσεις θεωρώντας ότι η εγκαταστημένη ισχύς της Diesel μειώνεται κατά ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του ανεμοκινητήρα.

(γ) Λειτουργία ως αντλητικού σταθμού για αποθήκευση νερού και χρησιμοποίησή του στην υδροηλεκτρική εκμετάλλευση.

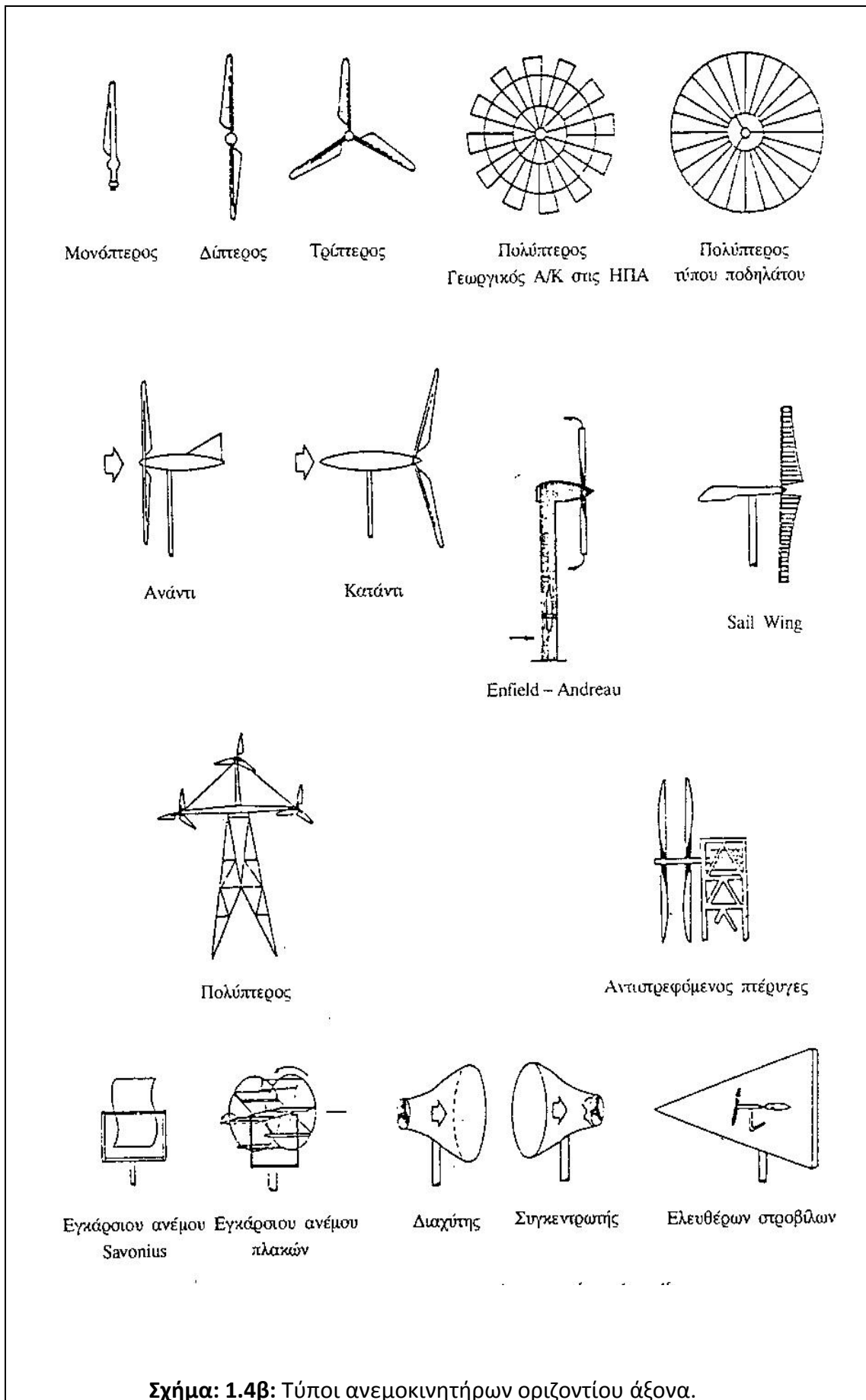
Ειδικότερα έχουμε τις εξής εφαρμογές:

- Εφαρμογές άντλησης νερού.
- Εφαρμογές παραγωγής θερμότητας.
- Εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρισμού.

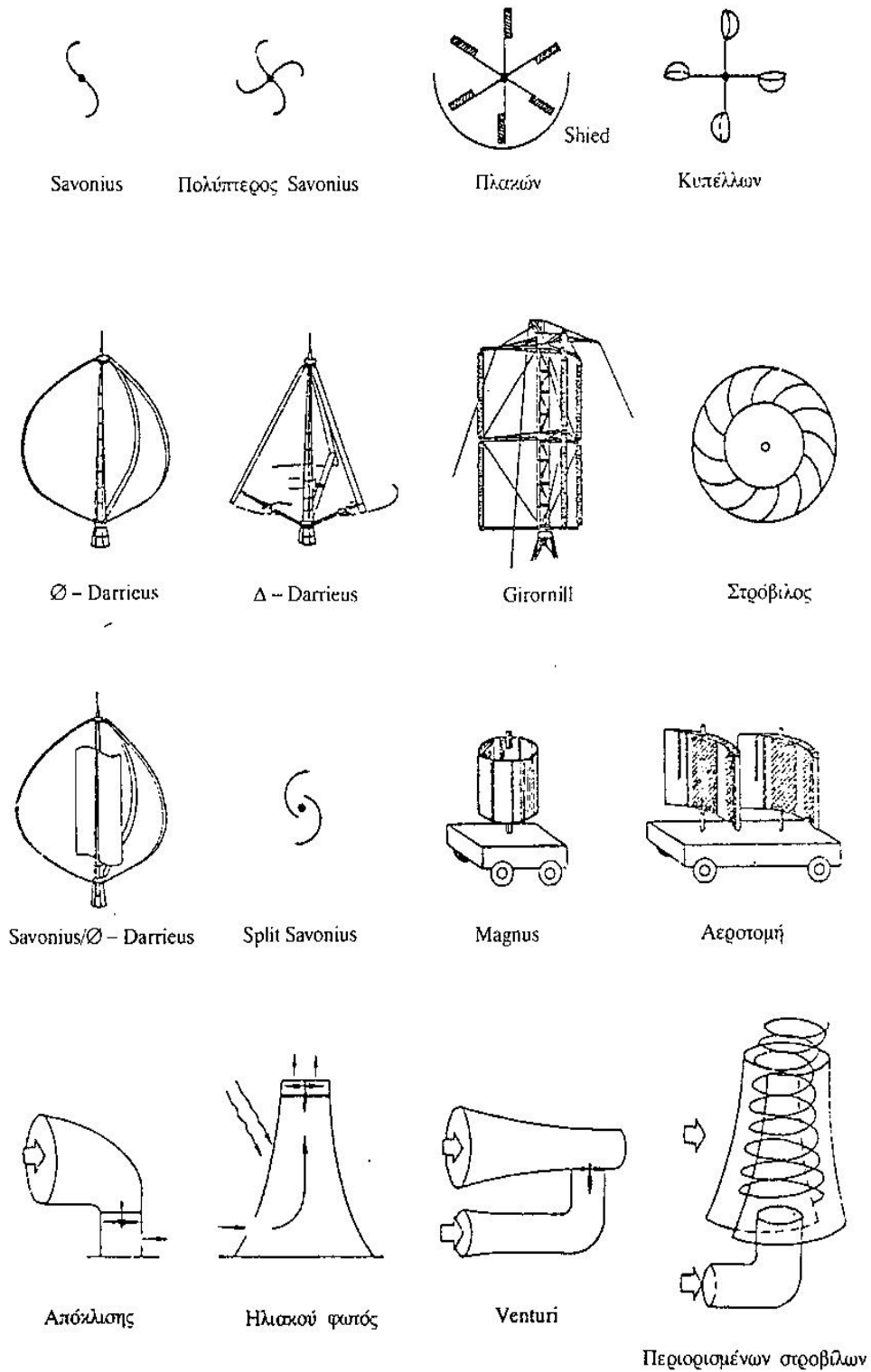
Μια άλλη δυνατότητα με πολύ καλές προοπτικές, είναι η χρήση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για ηλεκτρόλυση νερού και η αποθήκευσή του παραγόμενου υδρογόνου. Το υδρογόνο θα μπορούσε να μεταφερθεί σε άλλες θέσεις για καύση(π.χ. κινητήρες αυτοκινήτων) με προϊόν καύσης το νερό.



Σχήμα 1.4α: Τύποι ανεμοκινητήρων. (α) Παραδοσιακός νησιώτικος Α/Κ, (β) διπτέρυγος Α/Κ οριζοντίου άξονα, (γ) τριπτέρυγος Α/Κ Darrieus, (δ) Α/Κ τύπου Savonius.

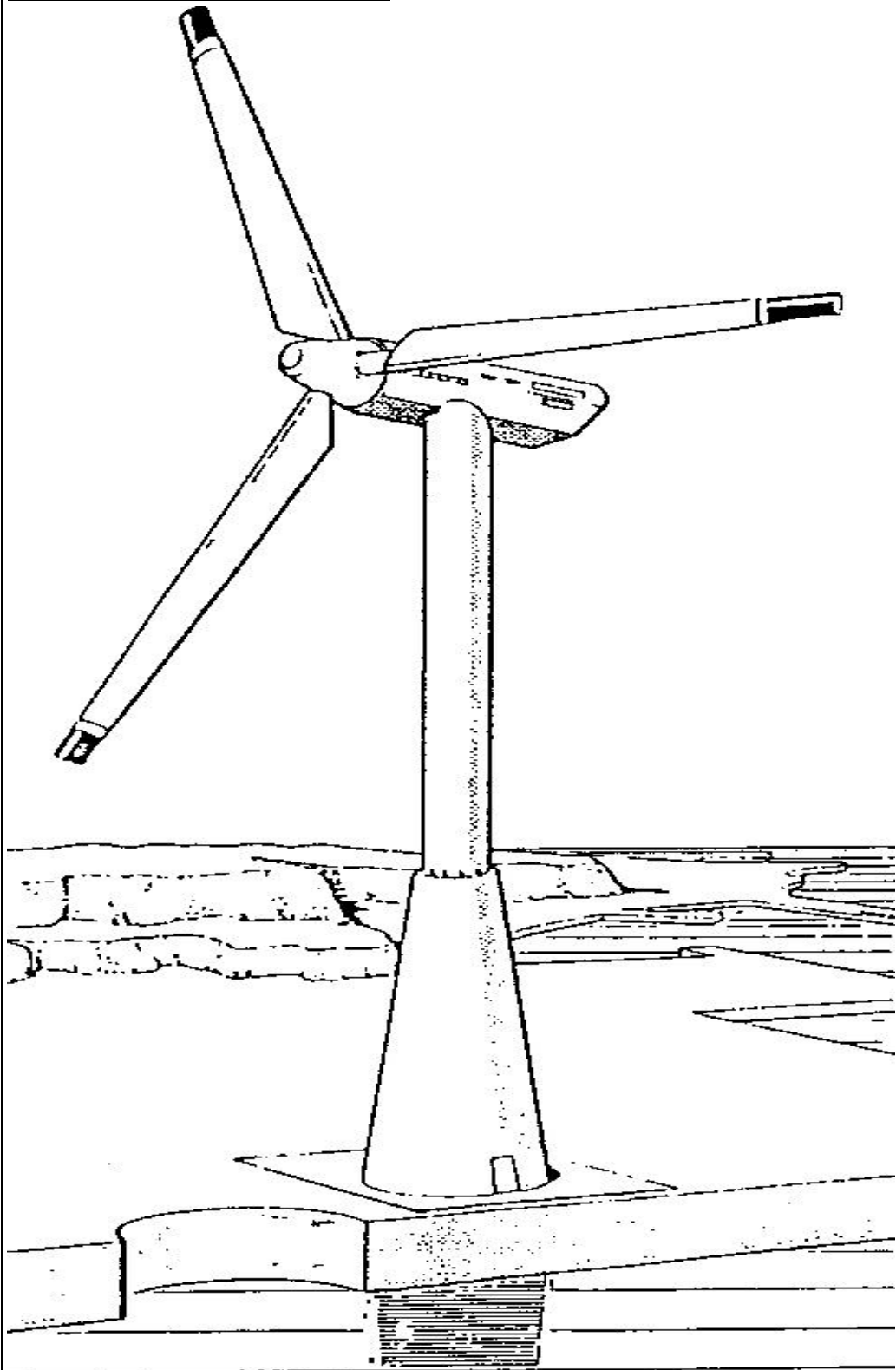


Σχήμα: 1.4β: Τύποι ανεμοκινητήρων οριζοντίου άξονα.



Σχήμα 1.4γ: Τύποι ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο



ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΩΡΙΩΝ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η μεθοδολογία σχεδίασης των ελίκων των ανεμοκινητήρων, έχει περάσει διάφορα στάδια εξέλιξης, από το έτος 400 π.Χ., όπου εμφανίζονται οι πρώτες ιστορικές μαρτυρίες ύπαρξης ελίκων. Η σχεδίαση των ελίκων μέχρι το 1870 περίπου, ήταν ημιεμπειρική, οπότε και εμφανίστηκε η πρώτη συστηματική θεωρία αεροδυναμικής σχεδίασης από τους Rankine & Froude και Betz.

Η θεωρία αυτή, γνωστή και ως θεωρία του δίσκου ενέργειας, χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα, είτε στην σχεδίαση είτε στην πρόβλεψη της αεροδυναμικής απόδοσης των ελίκων. Φυσικά υπήρξαν βελτιώσεις της θεωρίας, βελτιώσεις που προήλθαν κυρίως από την νέα θεωρία της γραμμής άνωσης του Prantl, που εμφανίστηκε γύρω στα 1910. Σήμερα με την ύπαρξη των υπολογιστών, είναι δυνατών να εφαρμοστούν πιο ακριβείς θεωρίες για την σχεδίαση των ελίκων, όπως θεωρία των δινοπλεγμάτων, της επιφάνειας άνωσης, προβλέπεται δε στο κοντινό μέλλον ότι θα είναι δυνατή η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier – Stokes πάνω στις καμπύλες επιφάνειας των πτερυγίων των ελίκων, οπότε οι επιδράσεις συμπίεσότητας και συνεκτικότητας θα λαμβάνονται υπόψη αυστηρά και όχι μέσω ημιεμπειρικών διορθώσεων, όπως γίνεται σήμερα.

Μια πιο σύνθετη θεωρία απ' αυτήν του δίσκου ενέργειας, είναι η θεωρία της δακτυλιοειδούς ορμής της δίνης (annular momentum vortex theory) ή αλλιώς ταινίας του Glauert. Σύμφωνα με αυτήν την θεωρία, κάθε ακτινικός τομέας ενός πτερυγίου αναλύεται ανεξάρτητα, χρησιμοποιώντας στοιχεία δισδιάστατης αεροτομής και εξισώσεις που βασίζονται στην αρχή διατήρησης της ορμής και της ροπής. Αν και η θεωρία αυτή είναι διατυπωμένη μόνο για άπειρο αριθμό πτερυγίων, κάποιοι μελετητές έκαναν ορισμένες διορθώσεις, βασισμένες σε εργασίες των Prantl και Goldstein, και την ανέπτυξαν για πεπερασμένο αριθμό πτερυγίων. Στην ανεπτυγμένη πια θεωρία έγιναν ορισμένες τροποποιήσεις με σκοπό να αποδείξουν την ακρίβειά της, αλλά και να επεκτείνουν την εφαρμογή της σε περιοχές όπου αποκολλάται η ροή από το πτερύγιο (φαινόμενο Stall) και γενικά σε περιοχές μη στρωτής ροής. Το ανεπτυγμένο μοντέλο που προέκυψε, είναι μια καλή προσέγγιση της πραγματικής ροής σε μερικά συστήματα λειτουργίας και είναι το πιο χρήσιμο σύγχρονο μοντέλο για τον βασικό σχεδιασμό των πτερυγίων.

Στο αμέσως επόμενο επίπεδο δυσκολίας, βρίσκεται η θεωρία της καθορισμένης περιδίνησης του στροβίλου που μπορεί να εφαρμοστεί σε αρκετές περιπτώσεις. Η βασική της αρχή είναι ότι οι δίνες με σπειροειδές ίχνος, οι οποίες παράγονται πίσω από τις άκρες των πτερυγίων του δρομέα, ορίζουν το πεδίο ροής γύρω από τον δρομέα σύμφωνα με το θεώρημα των biot – Savart.

Κάθε τομέας του πτερυγίου του ρότορα, παράγει μια δύναμη άνωσης που είναι ανάλογη με το τοπικό όριο της στροβιλότητας του ανέμου. Ολοκληρώνοντας ως προς τις τροχιές που ακολουθούν οι δίνες πίσω από το πτερύγιο, ορίζεται επαγομένη ροή και συνεπώς οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται στον δρομέα. Όπως όμως συμβαίνει και στην θεωρία της δακτυλιοειδούς ορμής της δίνης, χρησιμοποιούνται κι εδώ στοιχεία δισδιάστατης αεροτομής.

Το πρόβλημα με αυτό το μοντέλο, είναι ότι οι πραγματικές γραμμές ροής των δινών, πρέπει να οριστούν σύμφωνα με τις εξισώσεις του απορεύματος (wake), που παράγονται από προηγούμενες μελέτες. Η απλούστερη προσέγγιση προς την λύση του προβλήματος, είναι η υπόθεση ενός άκαμπτου ελικοειδούς απορεύματος πίσω

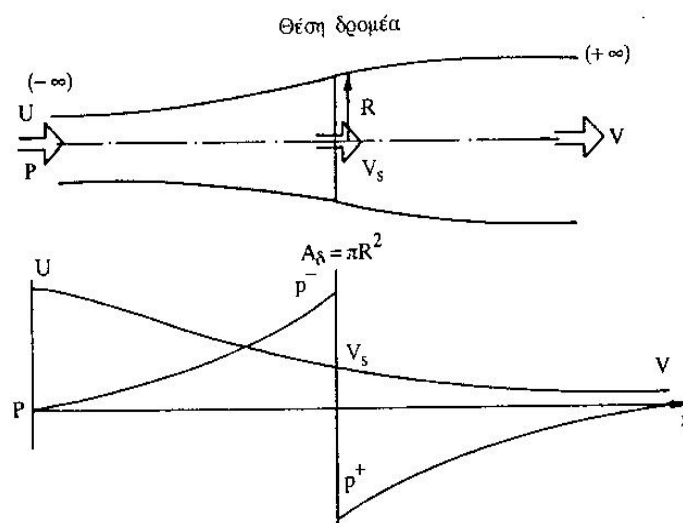
απ' τον ρότορα. Αυτή όμως η μέθοδος χρειάζεται περισσότερο υπολογιστικό χρόνο απ' αυτήν της ταινίας του Glauert και τα αποτελέσματα στις αλλαγές διαφόρων τιμών είναι δισδιάκριτα. Έτσι η θεωρία αυτή είναι χρήσιμη για να εκτιμηθούν μόνο ειδικά αποτελέσματα που δεν έχουν περιγραφεί με ακρίβεια στις απλούστερες μεθόδους, όπως π.χ. η επίδραση ενός βοηθητικού πτερυγίου που χρησιμοποιείται στον έλεγχο της ταχύτητας του ρότορα.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η θεωρία του δίσκου ενέργειας, με σχετικές ημιεμπειρικές διορθώσεις, όπως αυτή εφαρμόζεται στον υπολογισμό του δρομέα ανεμοκινητήρων.

2.2. ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (RANKINE – FROUDE)

Σύμφωνα με την θεωρία του δίσκου ενέργειας, ο μηχανισμός δέσμησης της κινητικής ενέργειας του ανέμου από τον δρομέα του ανεμοκινητήρα θεωρείται ιδανικός, δηλαδή άνευ απωλειών, σύμφωνα με τις παραδοχές που θα αναφερθούν στην συνέχεια, ο δε δρομέας εξετάζεται ως «μαύρο κουτί» δια μέσου του οποίου περνάει ο αέρας που υφίσταται μεταβολή της ενέργειάς του, μεταβολή που ουσιαστικά εκφράζεται με την πτώση της στατικής του πίεσης. Επιπλέον ο δρομέας θεωρείται ως δίσκος που ενεργεί πάνω στο ρευστό, εξ' ου και η ονομασία του «δίσκος ενέργειας».

Το σχήμα 2.1 δείχνει τον ροϊκό σωλήνα ανεμοκινητήρα, που ορίζεται από την διάμετρο του δρομέα. Ο αέρας πολύ μακριά (στο άπειρο) ανάντι από τον δίσκο έχει στατική πίεση p και πλησιάζει τον δίσκο με την ταχύτητα U . Ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα και συνεπώς, πολύ μακριά κατάντι από τον δίσκο, όπου η πίεση του αέρα θα έχει αποκατασταθεί στην πίεση περιβάλλοντος p , η ταχύτητα του ανέμου V θα είναι μικρότερη από την U , $V < U$. Για λόγους διατήρησης της μάζας μέσα στον ροϊκό σωλήνα, πρέπει η διατομή άρα και η διάμετρος του ροϊκού σωλήνα να μεγαλώνει πίσω από τον δρομέα, δηλαδή να υπάρχει διαστολή του ομόρρου του ανεμοκινητήρα, όπως ακριβώς διαγραμματικά παριστάνεται στο σχήμα 2.2α.



Σχήμα 2.2α: Ροϊκός σωλήνας δρομέα A/K.

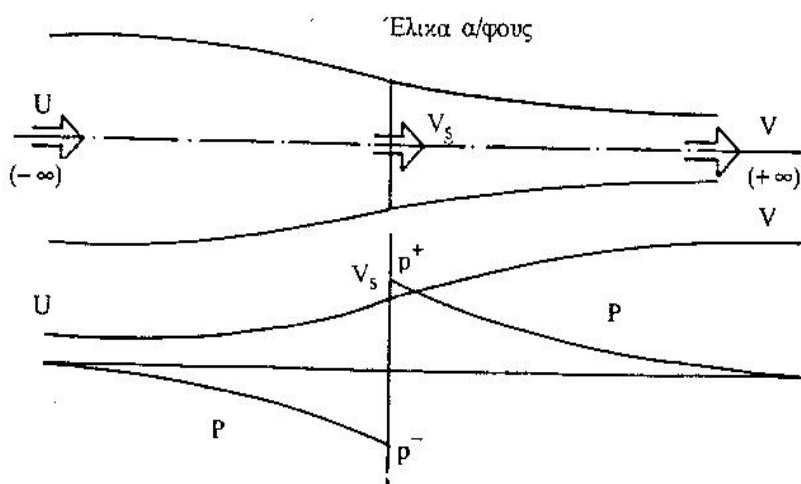
Το ρευστό μετά από τον δίσκο έχει μικρότερη ενέργεια απ' αυτήν πριν από τον δίσκο κι επειδή η αξονική ταχύτητα του ρευστού πάνω στον δίσκο και οριακά λίγο πριν και λίγο μετά από τον δίσκο παραμένει η ίδια για λόγους διατήρησης της μάζας (η διαφορά κινητικής ενέργειας του ανέμου πριν και μετά από τον δίσκο δεσμεύτηκε από τον ιδανικό δρομέα του ανεμοκινητήρα), τότε η στατική πίεση του ρευστού μετά από τον δίσκο θα είναι μικρότερη από την στατική πίεση του ρευστού πριν από τον δίσκο. Συνεπώς ο δίσκος αποτελεί μία επιφάνεια ασυνέχειας πίεσης, αλλά συνέχειας όμως της αξονικής ταχύτητας, όπως δε θα δούμε στη συνέχεια και ασυνέχειας της περιφερειακής ταχύτητας. Τυπική μεταβολή των μεγεθών της αξονικής ταχύτητας και πίεσης του ανέμου κατά μήκος του άξονα του ροϊκού σωλήνα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2α.

Το Σχήμα 2.2β παρουσιάζει την μορφή του ροϊκού σωλήνα, καθώς και την αξονική διανομή πίεσης και ταχύτητας για την περίπτωση έλικας αεροσκάφους ή πλοίου, όπου παρατηρείται συστολή πλέον του ομόρρου και ασυνέχεια της πίεσης του ρευστού καθώς αυτό διέρχεται από τον δίσκο, βεβαίως με αύξηση της πίεσής του.

Για την μελέτη του αεροδυναμικού πεδίου γύρω από τον δίσκο, θα εφαρμοσθούν οι γνωστοί νόμοι της μηχανικής της Μηχανικής των Ρευστών και συγκεκριμένα:

- Η εξίσωση διατήρησης της μάζας
- Η εξίσωση διατήρησης της ορμής
- Ενεργειακός ισολογισμός
- Η εξίσωση της ροπής της ορμής

1



Σχήμα 2.2β: Ροϊκός σωλήνας έλικας αεροσκάφους.

Σε πρώτη προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος, γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- (1) Η εναλλαγή ενέργειας μεταξύ ρευστού και δίσκου γίνεται χωρίς απώλειες.

(2) Ο ροϊκός σωλήνας του Σχ. 2.2α, αποτελεί ένα ρεύμα ολίσθησης. Το ρευστό μέσα στον σωλήνα έχει σταθερή ταχύτητα και πίεση πάνω στις διατομές κάθετα στον άξονά του, ενώ η επιφάνεια του ροϊκού σωλήνα αποτελεί επιφάνεια ασυνέχειας ταχύτητας.

(3) Η φόρτιση (διαφορά πίεσης πριν και μετά) πάνω σ' ολόκληρο τον δίσκο είναι σταθερή.

(4) Το ρεύμα αέρα μετά τον δίσκο στερείται συστροφής, ο δίσκος δηλαδή δεν περιστρέφει την φλέβα της ροής. Η παραδοχή αυτή πρακτικά μπορεί να επιτευχθεί, με την ύπαρξη δύο αντίθετα στρεφόμενων δρομέων, ενώ οι παραδοχές (2 & 3) απαιτούν άπειρο αριθμό και κατάλληλης σχεδίασης, πτερύγια.

Στην συνέχεια ορίζονται τα μεγέθη p και U ως η στατική πίεση και η ταχύτητα του ανέμου στο άπειρο ανάντι του δίσκου, p^- και p^+ η στατική πίεση του ρευστού πριν και μετά τον δίσκο πάνω στον δίσκο με V_s την ταχύτητα του ρευστού δια μέσου του δίσκου και τέλος p και V η στατική πίεση (πλήρης ανάκτηση πίεσης) και ταχύτητα του ρευστού στο άπειρο, κατάντι του δίσκου.

2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΝΟΜΩΝ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ

(α) Διατήρησης της μάζας.

Η μάζα που ρέει μέσα στον ροϊκό σωλήνα διατηρείται ίση με

$$\dot{m} = \rho A_\delta V_s = \rho \pi R^2 V_s$$

όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού, A_δ η διατομή του ροϊκού σωλήνα πάνω στον δίσκο (επιφάνεια δίσκου) ακτίνας R και V_s η ταχύτητα του ρευστού δια μέσου του δίσκου.

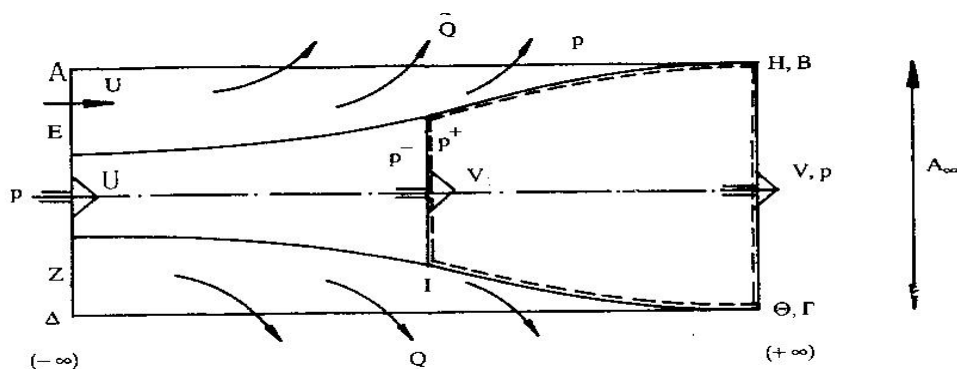
Για συνεχόμενη ροή μέσα στο ρεύμα, ισχύει, σύμφωνα με την εξίσωση της συνέχειας,

$$A_0 U = V_s A_\delta = V A$$

Όπου A_0 , A_δ και A είναι οι επιφάνειες ανάντι, στον δίσκο και κατάντι του δίσκου.

(β) Διατήρηση της ορμής.

Το θεώρημα διατήρησης της ορμής θα εφαρμοσθεί στον κυλινδρικό όγκο ισολογισμού ΑΒΓΔ, σχήμα 2.3α, ο οποίος περιβάλλει τον ροϊκό σωλήνα ΕΖΗΘ. Η παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου (ΑΒ-ΓΔ) τοποθετείται πολύ μακριά από τον δίσκο, ώστε εκεί η στατική πίεση του ρευστού να είναι ίση με την πίεση περιβάλλοντος, δηλαδή την ατμοσφαιρική.



Σχήμα 2.3α: Επιφάνεια ελέγχου.

Η παροχή Q δια μέσου της παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού όγκου ισολογισμού είναι,

$$Q = \rho A_{\infty} U - \rho A_{\delta} V_s$$

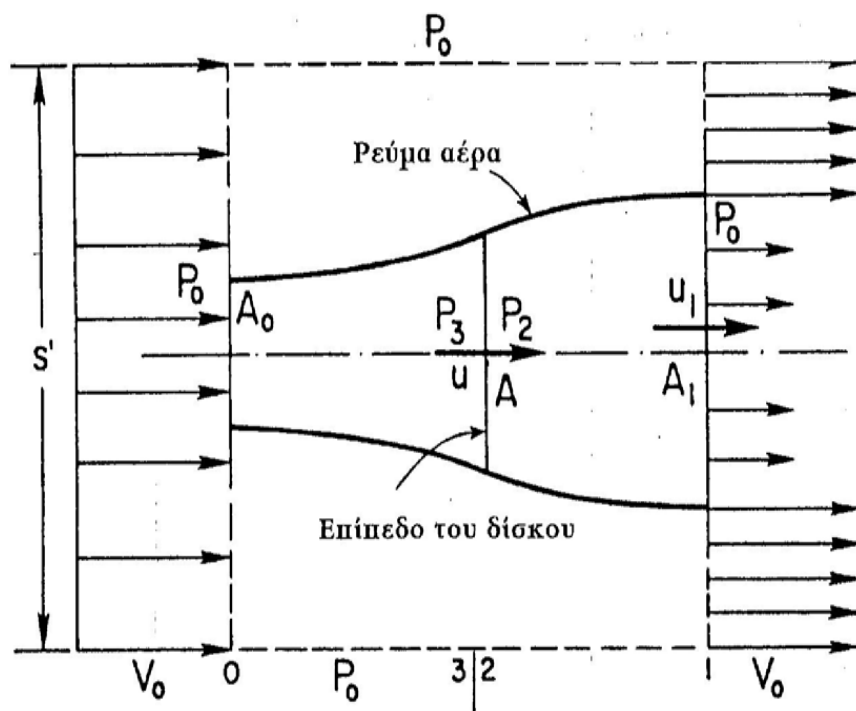
Το ρευστό εισέρχεται στον όγκο ισολογισμού με αξονική ταχύτητα ίση με U . Εφαρμόζοντας το θεώρημα διατήρησης της ορμής, δηλαδή η ώση ισούται με την εν θέσει μεταβολή της ροής της ορμής, προκύπτει ότι,

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

ή διαφορετικά είναι

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

(η θετική τιμή της ωστικής δύναμης T , επειδή $U > V$, δηλώνει ότι το ρευστό εξασκεί πάνω στον δρομέα δύναμη προς την κατεύθυνση κίνησης του ανέμου, που συμπίπτει με την θετική φορά του άξονα των x). Ας σημειωθεί ότι η συμβολή των δυνάμεων πίεσης στην παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου είναι μηδενική (παντού επικρατεί πίεση p). Αν είχε εφαρμοσθεί ο ισολογισμός της ορμής πάνω στον ροϊκό σωλήνα, τότε προκειμένου να προκύψει το ίδιο αποτέλεσμα, θα έπρεπε η συνεισφορά των δυνάμεων πίεσης κατά τον άξονα των x είναι μηδέν, γεγονός που βέβαια ισχύει αλλά δεν είναι τόσο προφανές για να αποδειχθεί.



Σχήμα 2.3β: Διάγραμμα ροής ανέμου.

(γ) Ενεργειακός ισολογισμός.

Το ρεύμα στερείται συστροφής ανάντι από τον δρομέα, έγινε δε η υπόθεση ότι στερείται συστροφής και κατόντι. Κατά συνέπεια, υπάρχει διατήρηση ενέργειας του

ρευστού (εξίσωση Bernoulli) στους δύο ανεξάρτητους υποχώρους πριν και μετά τον δίσκο μέσα στον ροϊκό σωλήνα, όχι όμως και μεταξύ των δύο υποχώρων, γιατί ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια απ' το ρευστό. Συνεπώς, για τον υποχώρο ανάντι από τον δρομέα ισχύει

$$p + \frac{\rho}{2}U^2 = p^- + \frac{\rho}{2}V_s^2$$

ενώ για τον υποχώρο κατάντι από τον δρομέα ισχύει

$$p + \frac{\rho}{2}V^2 = p^+ + \frac{\rho}{2}V_s^2$$

Αφαιρώντας τις ενεργειακές σχέσεις του Bernoulli κατά μέλη προκύπτει ότι

$$p^- - p^+ = \frac{\rho}{2}(U^2 - V^2)$$

Η εξίσωση της ώσης

$$T = \rho A_\delta V_s (U - V)$$

προσδιορίζει την ειδική ώση

$$\frac{T}{A_\delta} = \rho V_s (U - V) \quad [2.1]$$

η οποία δεν είναι τίποτα άλλο παρά η σταθερή φόρτιση του δίσκου

$$\frac{T}{A_\delta} = \Delta p = p^- - p^+$$

οπότε προκύπτει

$$\rho V_s (U - V) = \frac{\rho}{2}(U^2 - V^2)$$

ή

$$V_s = \frac{1}{2}(U + V) \quad [2.2]$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι η ταχύτητα του ανέμου πάνω στον δίσκο, είναι το ημίθροισμα των ταχυτήτων του ανέμου πολύ πριν και πολύ μετά από τον δίσκο. Έχει επικρατήσει η εισαγωγή του συντελεστή αξονικής επαγωγής που ορίζεται ως:

$$a = \frac{U - V_s}{U} \quad [2.3]$$

Ο συντελεστής αξονικής επαγωγής (θετική ποσότητα) εκφράζει την ποσοστιαία επιβράδυνση του αέρα πάνω στον δίσκο. Από την σχέση αυτή προκύπτει ότι:

$$V_s = U(1 - a) \quad [2.4]$$

Και από την σχέση (2.2)

$$V = U(1 - 2a) \quad [2.5]$$

Η τελευταία σχέση δηλώνει ότι η ποσοστιαία επιβράδυνση του ρευστού μακριά κατάντι του δίσκου είναι διπλάσια της ποσοστιαίας επιβράδυνσης του ρευστού στο επίπεδο του δίσκου.

Ο άνεμος του ροϊκού σωλήνα που πλησιάζει τον δίσκο έχει ισχύ

$$P_- = \left[\frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} \right] \dot{m}$$

Ενώ κατάντι του δίσκου έχει μικρότερη ισχύ

$$N_+ = \left[\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \right] \dot{m}$$

Η απώλεια ισχύος από το ρεύμα του ροϊκού σωλήνα είναι

$$P = \dot{m} \left[\frac{U^2 - V^2}{2} \right]$$

και αυτή ισούται με την ισχύ που δέσμευσε ο δίσκος. Εκτέλεση πράξεων στην τελευταία σχέση δίνει ότι

$$P = TV_s \quad [2.5]$$

σχέση που δηλώνει ότι η ισχύς που δεσμεύεται από τον ανεμοκινητήρα, ισούται με την ώση που το ρευστό εξασκεί πάνω στον δίσκο, επί την ταχύτητα ολίσθησης του ανέμου πάνω στον δίσκο.

2.4 ΟΡΙΟ ΤΟΥ BETZ

Οι προηγούμενες σχέσεις για την ισχύ του δρομέα και ώσης, μπορούν, μετά την εισαγωγή του συντελεστή αξονικής επαγωγής από τις εξισώσεις [2.2], [2.3], [2.4] και [2.5], να γραφούν ως:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_\delta U^3 [4a(1-a)^2] \quad [2.6]$$

$$T = \frac{1}{2} \rho A_\delta U^2 [4a(1-a)] \quad [2.7]$$

Ορίζονται συντελεστές ισχύος και αντίστασης του δρομέα

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 A_\delta} \quad [2.8]$$

$$C_T = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^2 A_\delta} \quad [2.9]$$

Η πρώτη σχέση υποδηλώνει το ποσοστό της ενέργειας που έχει ο άνεμος που πλησιάζει τον δίσκο (λίγο πριν από τον δίσκο) και που μετατρέπεται σε ισχύ πάνω στον δρομέα ($\frac{1}{2} \rho V_s^3 A_\delta$ είναι η ισχύς που έχει ο άνεμος ταχύτητας V_s που περνάει από επιφάνεια A_δ), ενώ η δεύτερη εκφράζει τον συντελεστή αντίστασης, που παρουσιάζει ο δρομέας στη ροή (μέγεθος χρήσιμο για τον υπολογισμό της δύναμης ανατροπής του πύργου στήριξης του ανεμοκινητήρα). Με εκτέλεση πράξεων προκύπτει ότι

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad [2.10]$$

$$C_T = 4a(1-a) \quad [2.11]$$

Η σχέση για τον συντελεστή ισχύος δηλώνει ότι αυτή έχει ακρότατο για τιμή συντελεστή αξονικής επαγωγής (μηδενίζοντας την πρώτη παράγωγο της

$\{4a(1-a)^2=C_p\}$ και λύνοντας μετά την προκύπτουσα δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς a), και έχουμε: $4a(1-a)^2=C_p \Leftrightarrow 4a(1-2a+a^2)=C_p \Leftrightarrow 4a-8a^2+4a^3=0 \Leftrightarrow 4-16a+12a^2=0$

$$a = \frac{1}{3} \quad \text{όταν} \quad \left(\frac{dC_p}{da} = 0 \right)$$

Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής ισχύος παίρνει μέγιστη τιμή ίση με

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0,5925925 = 59,259\%$$

μέγιστη τιμή, που καλείται **όριο του Betz**. Προκύπτει λοιπόν ότι ο βέλτιστος δρομέας και κάτω από ιδανικές συνθήκες λειτουργίας, μπορεί να δεσμεύσει μόνο το 59% της ισχύος του ανέμου. Τα όριο αυτό είναι κατά κάποιο τρόπο ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του συστήματος για ιδανική έλικα, ανάλογος με το βαθμό απόδοσης Carnot των θερμοδυναμικών κύκλων. Στην περίπτωση αυτή της βέλτιστης λειτουργίας, η ταχύτητα U του ανέμου μειώνεται στα $2/3 U$ πάνω στον δίσκο και στα $U/3$ πολύ μακριά κατάντι από τον δίσκο. Είναι δηλαδή:

$$V_s = \frac{2}{3}U \quad [2.12]$$

$$V = \frac{1}{3}U \quad [2.23]$$

Η ώθηση του δρομέα για $V_s = U(1-a)$ γίνεται

$$T = \frac{1}{2} \rho A_\delta U^2 [4a(1-a)] = q A_\delta [4a(1-a)] \quad [2.24]$$

Όπου q είναι η δυναμική πίεση. Έτσι ο συντελεστής ώθησης γίνεται:

$$C_T = \frac{T}{q A_\delta}$$

Ο συντελεστής αντίστασης C_T του δρομέα στην βέλτιστη λειτουργία, παίρνει τιμή 0,888, τιμή μικρότερη της μέγιστης που είναι:

$$C_{T_{\max}} = 1$$

και που επιτυγχάνεται για συντελεστή αξονικής επαγωγής $\alpha=0.5$, η οποία αυτή τιμή βγαίνει από τον μηδενισμό της πρώτης παραγωγού της εξίσωσης, $C_T = 4a(1-a)$, η οποία δίνει κατά σειρά:

$$4a(1-a) = C_T \Leftrightarrow (4a-4a^2)' = 0 \Leftrightarrow 4-8a = 0 \Rightarrow a = \frac{4}{8} = 0.5$$

Στην περίπτωση αυτή ο άνεμος στο επίπεδο του δρομέα έχει ταχύτητα $0.5U$ και μηδενική ταχύτητα πολύ μακριά κατάντι από τον δίσκο.

Αν υποθεθεί η ώθηση T σαν δύναμη αντίστασης πάνω σε μία επιφάνεια με εμβαδόν ίσο με το A_δ του δρομέα, τότε μπορεί να οριστεί ο συντελεστής αντίστασης:

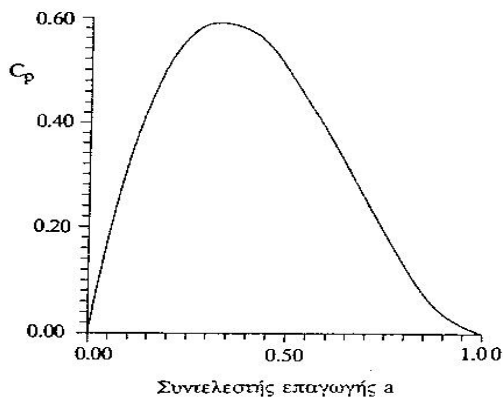
$$C_d = \frac{T}{q A_\delta}$$

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις, φαίνεται από την εξίσωση [2.11] ότι ισχύει:

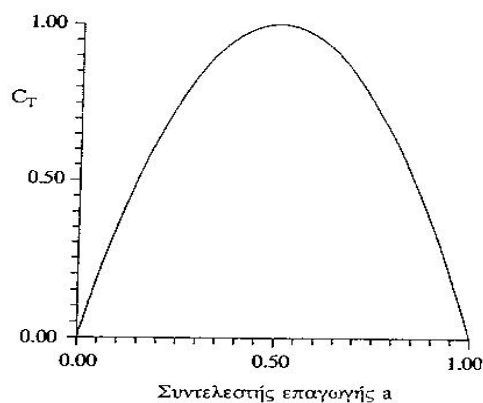
$$C_d = C_T = 4a(1-a) \quad [2.25]$$

Ένας επίπεδος δίσκος έχει συντελεστή αντίστασης περίπου $C_d = 1,28$, ενώ για $\alpha=1/3$, δηλαδή για έναν δρομέα που λειτουργεί σε συνθήκες μέγιστης ισχύος, έχουμε

συντελεστή αντίστασης $C_d = 0,888$. Γι' αυτό η ώθηση στον δρομέα σ' αυτήν την συνθήκη είναι περίπου 31 % λιγότερη απ' ό,τι σε μια επίπεδη πλάκα με διάμετρο ίση με την διάμετρο του δρομέα.



Σχήμα 2.4α: Καμπύλη C_p απόδοσης δρομέα $C_p=4a(1-a)^2$.



Σχήμα 2.4β: Συντελεστής ώθησης A/K.

Στα παραπάνω σχήματα 2.4α και 2.4β φαίνεται η μεταβολή των συντελεστών ισχύος C_p και ώθησης C_T του δρομέα για διάφορες τιμές του συντελεστή αξονικής επαγωγής.

Επιπλέον, ο συντελεστής αξονικής επαγωγής βοηθά στον υπολογισμό των διαστάσεων της φλέβας ροής. Εάν οι διάμετροι του ρεύματος του ανέμου ανάντι στον δρομέα και κατόντι είναι D_0 , D_δ και D_1 αντίστοιχα, τότε σύμφωνα με την αρχή της συνέχειας έχουμε την εξίσωση:

$$\pi \frac{D_0^2}{4} U = \pi \frac{D_\delta^2}{4} V_s = \pi \frac{D_1^2}{4} V \quad [2.26]$$

Απλοποιώντας την παραπάνω έχουμε:

$$D_0^2 U = D_\delta^2 V_s = D_1^2 V$$

Αντικαθιστώντας όπου $V_s = U(1 - \alpha)$ και $V = U(1 - 2\alpha)$, υπολογίζονται οι σχέσεις:

$$D_\delta = \frac{D_0}{\sqrt{1-\alpha}} \quad \text{και} \quad D_1 = D_\delta \sqrt{\frac{1-\alpha}{1-2\alpha}}$$

[2.27]

Για την μέγιστη εξαγόμενη ισχύ ισχύει $\alpha = 1/3$ οπότε:

$$D_\delta = 1,125 D_0 \quad \text{και} \quad D_1 = 1,141 D_\delta$$

[2.28]

Γι' αυτό, στην μέγιστη εξαγόμενη ισχύ, ο δρομέας λειτουργεί σε μια φλέβα ροής αέρα διαμέτρου $0,816 D_s$ και παράγει κατόντι μια φλέβα ροής $1,414 D_s$.

Η εφαρμογή της διατήρησης της μάζας στον ροϊκό σωλήνα, δίνει τις σχέσεις

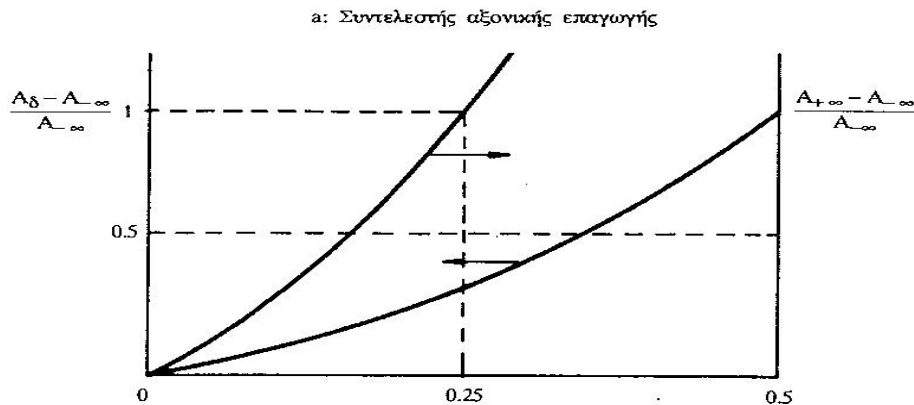
$$\frac{A_\delta - A_\infty}{A_\infty} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad \text{και} \quad \frac{A_{+\infty} - A_\infty}{A_\infty} = \frac{2\alpha}{1-2\alpha}$$

οι οποίες υποδεικνύουν τον τρόπο μεταβολής της διατομής του ομόρρου, γραφικά δε παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.4γ, για βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας.

2.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΟΜΟΡΡΟΥ

Ο όρος «ομόρρους» χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει το ρεύμα του αέρα που διαστέλλεται μέχρι το άπειρο, αφού περάσει τον ανεμοκινητήρα. Η επιστημονική του

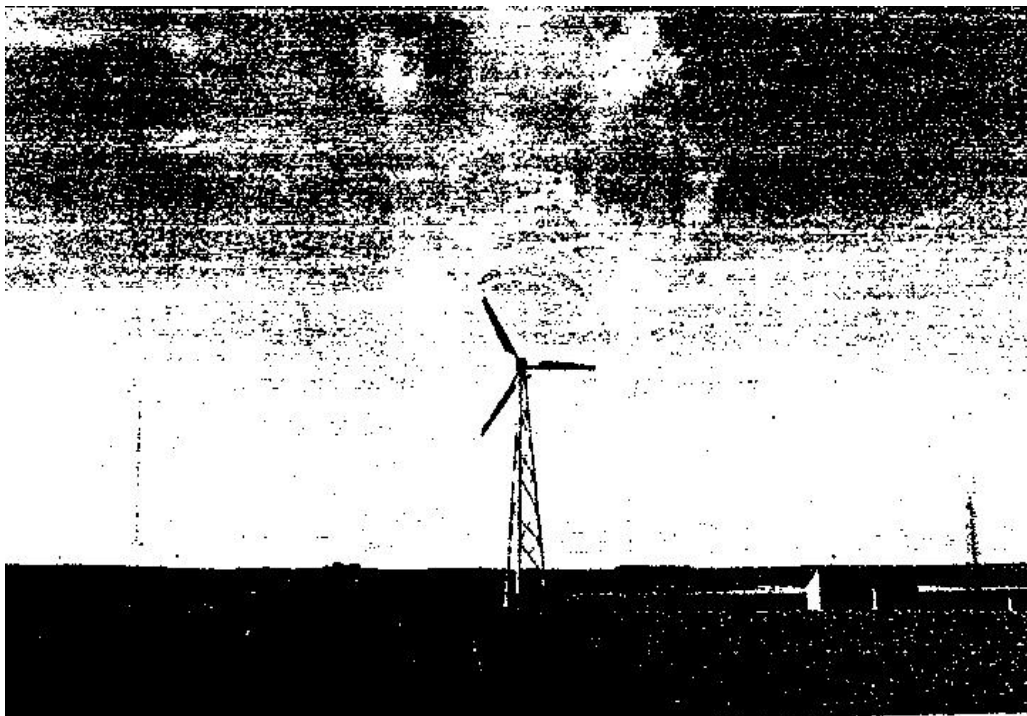
ονομασία είναι απόρευμα (wake) ή και ουριαίο ρεύμα, αλλά η ονομασία «ομόρρους» έχει επικρατήσει ως τεχνικός όρος.



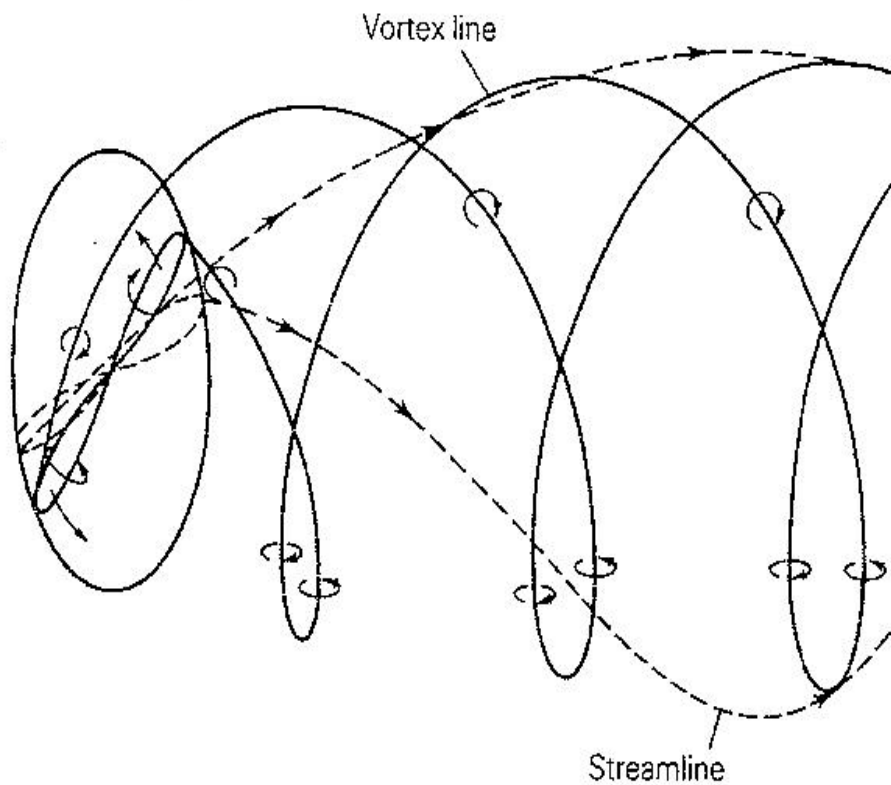
Σχήμα 2.4γ: Μεταβολή διατομών ροϊκού σωλήνα A/K.

Η προηγούμενη ανάλυση βασίστηκε στην υπόθεση ότι ο ομόρρους του πεδίου ροής (πεδίο ροής πίσω από τον δίσκο) στερείται συστροφής, πράγμα που αληθεύει όταν ο ανεμοκινητήρας έχει δύο αντίθετα στρεφομένους δρομείς. Στην πράξη όμως ο ανεμοκινητήρας έχει ένα δρομέα και ο ομόρρους ακόμα και στην ιδανικότερη των περιπτώσεων λειτουργίας του ανεμοκινητήρα έχει συστροφή που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση του ρεύματος του αέρα και του δρομέα.

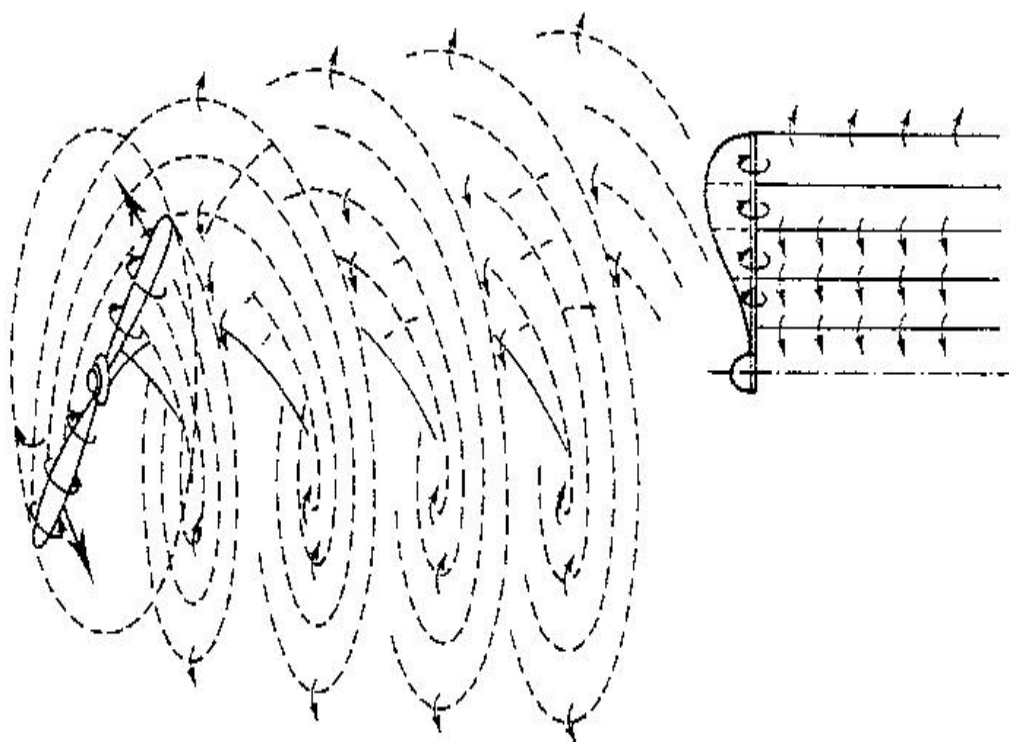
Στις φωτογραφίες Φ.1 και Φ.2 είναι σαφής η μορφή του περιστρεφόμενου ομόρρου, καθώς και η διαστολή του με την κατάντι απόσταση. Στο πείραμα οπτικοποίησης της ροής, απελευθερώνεται καπνός από το ακροπτερύγιο ενός πτερυγίου δρομέα.



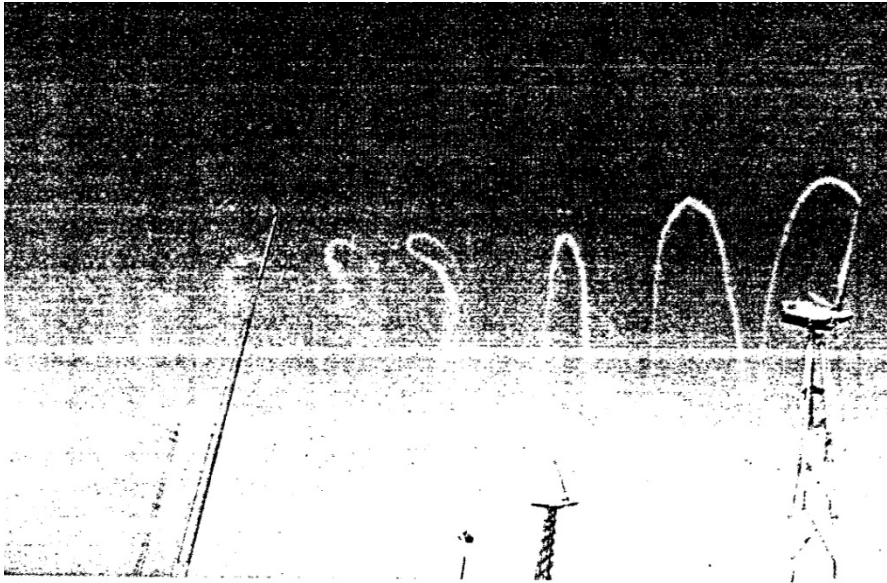
Φωτογραφία 2.5α: Οπτικοποίηση περιστρεφόμενου ομόρρου – Διαστολή ομόρρου.



Σχήμα 2.5α: Ελικοειδής ομόρρους ανεμοκινητήρα οριζοντίου άξονα.



Σχήμα 2.5β: Η ελικοειδής περιστρεφόμενη επιφάνεια του ομόρρους.



Φωτογραφία 2.5β: Οπτικοποίηση περιστρεφόμενου ομόρρου. Εκτίμηση βήματος (καταστροφή συστολής λόγω τύρβης μέσα σε 5 περιστροφές).

Για έλικα αεροσκάφους ο ομόρρος στρέφεται κατά την φορά περιστροφής της έλικας, ενώ για ανεμοκινητήρα ο ομόρρος έχει αντίθετη από τον δρομέα φορά περιστροφής (για ακίνητο παρατηρητή).

Στην περίπτωση του ανεμοκινητήρα (σε αντίθεση με την έλικα του αεροσκάφους), ο δρομέας έχει μικρή φόρτιση και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο ομόρρος να έχει πολύ μικρή συστρόφη. Η κινητική ενέργεια που έχει το ρευστό μετά τον δρομέα, αποτελείται από την κινητική ενέργεια που οφείλεται στην αξονική (μεταφορική) ταχύτητα του ανέμου και από την περιφερειακή κινητική ενέργεια (που οφείλεται στην συστρόφη του ρευστού). Η δεύτερη γενικά δεν μπορεί να ανακτηθεί στο άπειρο μακριά απ' τον δρομέα και να γίνει στατική πίεση και ως εκ τούτου αποτελεί ενεργειακή απώλεια του συστήματος. Η ενεργειακή αυτή απώλεια μειώνει τον συνολικό βαθμό απόδοσης του ανεμοκινητήρα. Το ρευστό ανάντι του δίσκου στερείται συστρόφης (αστρόβιλο), οπότε η κινητική του ενέργεια οφείλεται μόνο στην αξονική μεταφορική κίνησή του.

Το θεώρημα διατήρησης της ροπής της ορμής εφαρμοζόμενο σε όγκο ισολογισμού που δεν περιβάλλει τον δίσκο ενέργειας (διακοπτόμενη γραμμή στο σχήμα 2.5α) οδηγεί στο συμπέρασμα διατήρησης της συστρόφης

$$[2.29] \quad V_u \quad r \quad = \quad \text{σταθερό}$$

(για το πεδίο ροής κατάντι του δίσκου).

Επομένως η περιφερειακή ταχύτητα του ρευστού στην ανάντι επιφάνεια του δίσκου είναι μηδέν, είναι δε V_θ πάνω στην κατάντι επιφάνειά του και παραμένει η ίδια V_θ μακριά κατάντι στο άπειρο και φυσικά στην ίδια ακτινική απόσταση από τον άξονα. Άρα η περιφερειακή ταχύτητα του ρευστού πάνω στο δίσκο ισούται με το μισό του αθροίσματος της περιφερειακής ταχύτητάς του στις δύο πλευρές του δίσκου (στην ανάντι και κατάντι επιφάνειά του), δηλαδή το μισό της περιφερειακής ταχύτητας του ρευστού κατάντι στο άπειρο (στην ίδια ακτινική απόσταση).

$$V_{\theta_s} = \frac{1}{2} V_{\theta_\infty}$$

Ορίζεται συντελεστής περιφερειακής επαγωγής η ποσότητα a'

$$a' = \frac{V_{\theta_s}}{\Omega r} \quad [2.30]$$

όπου Ω η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό προκύπτουν οι σχέσεις

$$V_{\theta_s} = a' \Omega r \quad [2.31]$$

$$V_{\theta_\infty} = 2 a' \Omega r \quad [2.32]$$

(δ) Θεώρημα της ροπής της ορμής.

Το θεώρημα της ροπής της ορμής εκφράζει ότι η μεταβολή της εν θέσει ροπής της ορμής του ρευστού που διέρχεται δια μέσου του όγκου ισολογισμού ισούται με την ροπή των εξωτερικών δυνάμεων. Ως όγκος ισολογισμού λαμβάνεται ο δακτυλιοειδής ροϊκός σωλήνας του Σχήματος 2.5α, οπότε προκύπτει

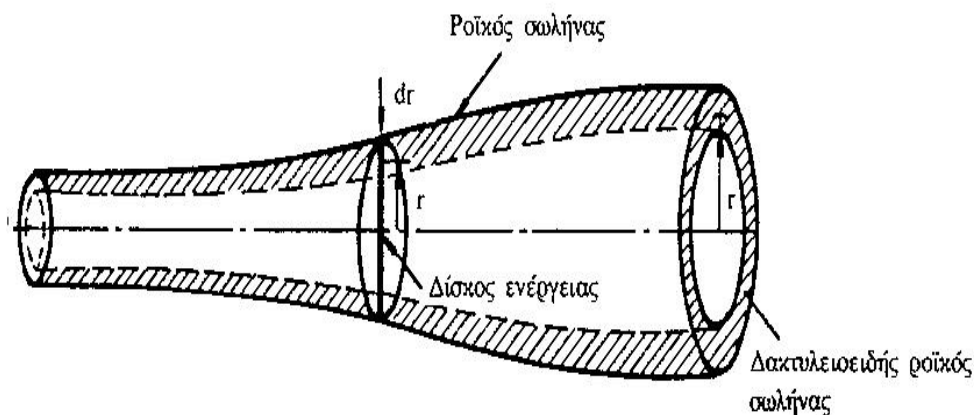
$$dM = \rho 2\pi r dr V_s \left[(V_{\theta r})_\infty - (V_{\theta r})_{-\infty} \right]$$

όπου dM η ροπή που εξασκείται από το ρευστό πάνω στην δακτυλιοειδή επιφάνεια του δίσκου ενέργειας. Επειδή $(V_{\theta r})$ ανάντι του δίσκου είναι μηδέν, προκύπτει μετά από ολοκλήρωση πάνω στην διατομή του δίσκου ότι ισχύει

$$M = \dot{m} V_s 2a' \Omega R^2 \quad [2.33]$$

Οι σχέσεις (2.7) & (2.33) εκφράζουν την δύναμη και ροπή που το ρευστό εξασκεί πάνω στον δίσκο ενέργειας.

Η προηγούμενη μονοδιάστατη ανάλυση των ισολογισμών μάζας, ορμής, ενέργειας και ροπής στον ροϊκό σωλήνα εφαρμόζεται και σε δακτυλιοειδείς ροϊκούς σωλήνες πάχους Δr , όπως τέτοιος σωλήνας φαίνεται στο Σχήμα 2.5γ.



Σχήμα 2.5γ: Δακτυλιοειδής ροϊκός σωλήνας πάχους dr και ακτίνας r .

Η εφαρμογή των νόμων διατήρησης οδηγεί σε συμπεράσματα ίδια με αυτά που ήδη προκύψαν, με την διαφορά ότι αυτά ισχύουν πλέον σε συγκεκριμένη ακτινική θέση. Επιτρέπεται έτσι η μεταβολή των λειτουργικών παραμέτρων πάνω στον δίσκο ενέργειας.

Συγκεκριμένα η στοιχειώδης παροχή μάζας δια του δακτυλιοειδούς ροϊκού σωλήνα είναι

$$d\dot{m} = \rho 2\pi r dr U (1-a) \quad [2.34]$$

η στοιχειώδης αξονική δύναμη που ενεργεί στον δίσκο είναι

$$dT = \rho 4\pi r dr (1-a) a U^2 = \rho C_T 2\pi r dr U^2 \quad [2.35]$$

και η στοιχειώδης ροπή που αναπτύσσεται πάνω στον δίσκο είναι

$$dM = \rho 4\pi r dr a' (1-a) \Omega r^2 U \quad [2.36]$$

ο τοπικός συντελεστής ισχύος είναι

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad [2.37]$$

ο τοπικός συντελεστής ώσης C_T είναι

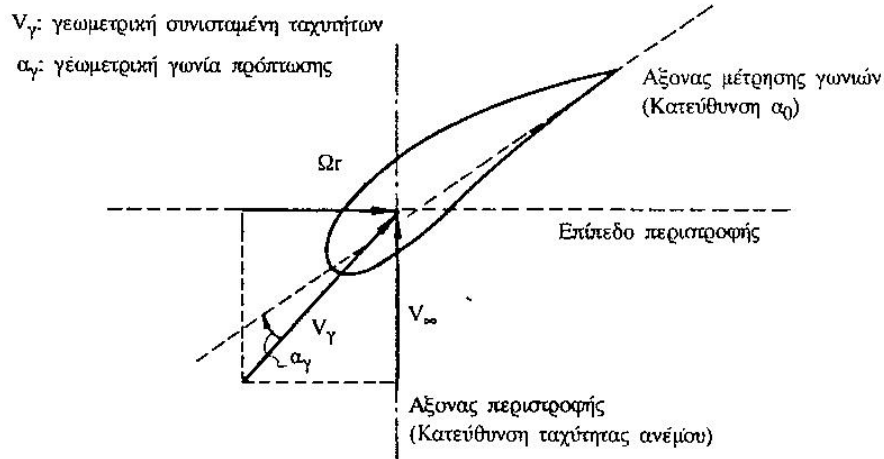
$$C_T = 4a(1-a) \quad [2.38]$$

και τέλος ο τοπικός συντελεστής ροπής C_M είναι

$$C_M = 4a'(1-a) \frac{\Omega r}{U} \quad [2.39]$$

2.6 ΘΕΩΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ

Η θεωρία των στοιχείων πτερύγωσης χωρίζει το πτερύγιο του δρομέα σε στοιχειώδεις λωρίδες πλάτους Δr και συνδέει τις δυνάμεις και ροπές που το ρευστό εξασκεί κατά την διέλευσή του δια μέσου του δακτυλιοειδούς τμήματος του δίσκου πάχους Δr πάνω στον δίσκο (μεγέθη που υπολογίστηκαν προηγούμενα) με τις αεροδυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω στις λωρίδες πτερυγίου του δρομέα. Κάθε δακτυλιοειδής ροϊκός σωλήνας τέμνει τα πτερά του δρομέα, που είναι Β το πλήθος και τα οποία πάνω στην κυλινδρική επιφάνεια του ροϊκού σωλήνα αφήνουν ίχνος που έχει την μορφή της αεροτομής. Το Σχήμα 2.6α αποτελεί (σε κάτοψη) το ανάπτυγμα της κυλινδρικής επιφάνειας του ροϊκού σωλήνα με το ίχνος της τομής της με ένα πτερύγιο του δρομέα.

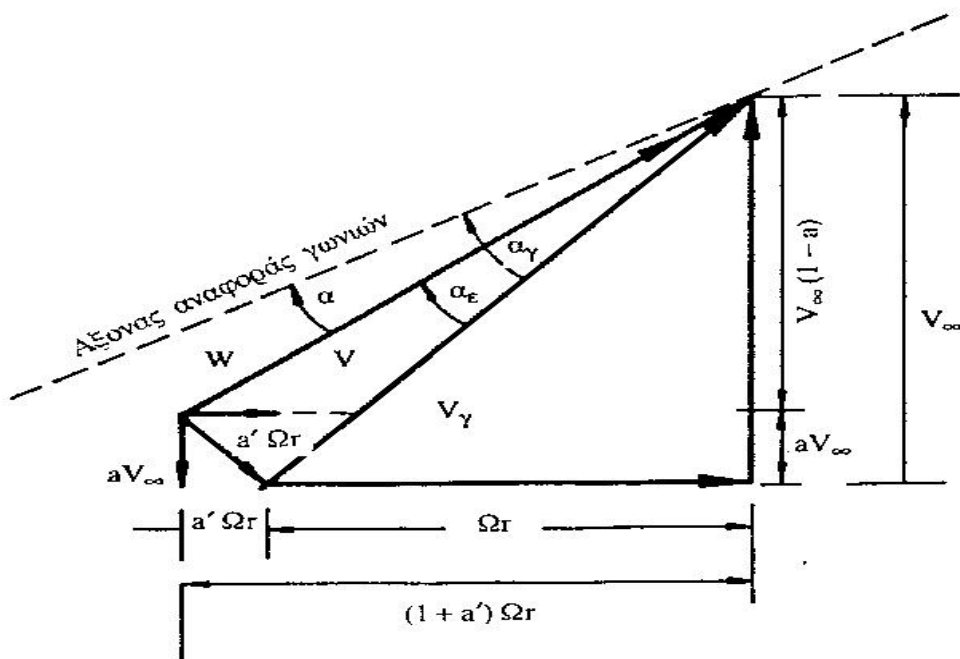


Σχήμα 2.6α: Τρίγωνο ταχυτήτων (γεωμετρικό).

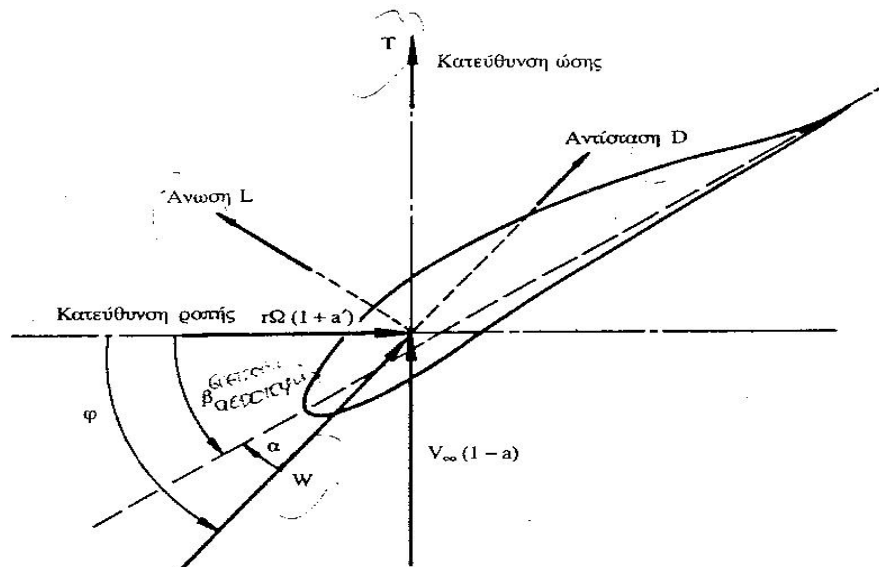
Για παρατηρητή που κινείται με το περύγιο, η αεροτομή βρίσκεται σε ένα πεδίο ταχυτήτων που έχει αξονική συνιστώσα $U(1-a)$ και περιφερειακή συνιστώσα $\Omega r(1+a')$ και (το θετικό πρόσημο δηλώνει ότι συνιστώσα αυτή έχει φορά αντίθετη προς την κατεύθυνση περιστροφής του δρομέα). Η συνισταμένη ταχύτητα W είναι τότε

$$W = \sqrt{U^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+a')^2} \quad [2.40]$$

η δε αεροτομή βρίσκεται σε γωνία πρόσπτωσης α ως προς την ταχύτητα W , Σχ. 2.6β. Η αλληλεπίδραση της ροής και της στοιχειώδους λωρίδας πτέρυγας (πτέρυγα με πλάτος dr) οδηγεί στην εμφάνιση των δυνάμεων άνωσης και αντίστασης όπως φαίνονται στο Σχ. 2.6β.



Σχήμα 2.6β: Επαγόμενη ταχύτητα – Πραγματικό τρίγωνο ταχυτήτων.



Σχήμα 2.6γ: Δυνάμεις που αναπτύσσονται στην αεροτομή του Α/Κ.

Οι εκφράσεις των δυνάμεων αυτών, σύμφωνα με τα γνωστά από την αεροδυναμική είναι:

$$\Delta L = C_L \frac{\rho}{2} W^2 C \Delta r \quad [2.41]$$

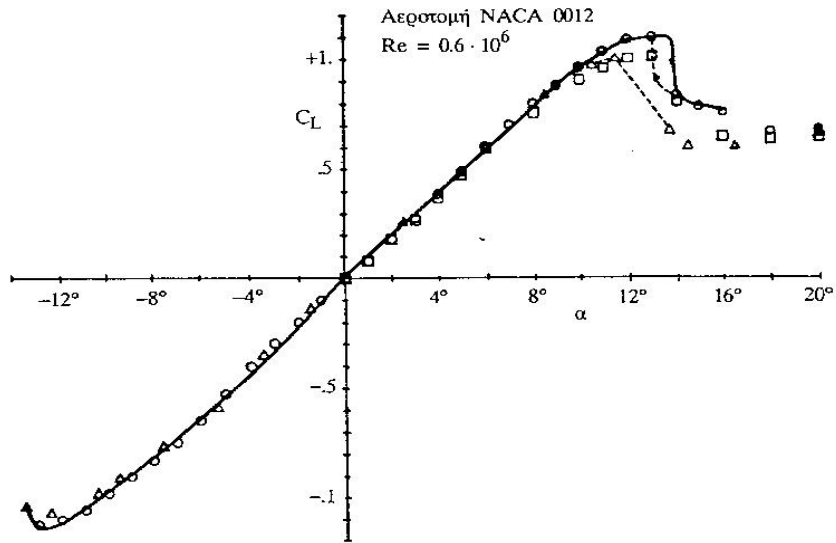
$$\Delta D = C_d \frac{\rho}{2} W^2 C \Delta r \quad [2.42]$$

όπου C_L και C_d οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης της αεροτομής και C η χορδή της αεροτομής. Τυπικές μεταβολές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης αεροτομής φαίνονται στα Σχήματα 2.6δ και 2.6ε για την αεροτομή NACA 4412, όπου διαπιστώνεται η γραμμικότητα της σχέσης συντελεστή άνωσης-γωνίας πρόσπτωσης ($C_L - \alpha^0$) και οι χαμηλές τιμές συντελεστή αντίστασης, γύρω από μία ευρεία περιοχή τιμών γωνιών πρόσπτωσης γύρω από την γωνία πρόσπτωσης χωρίς κρούση.

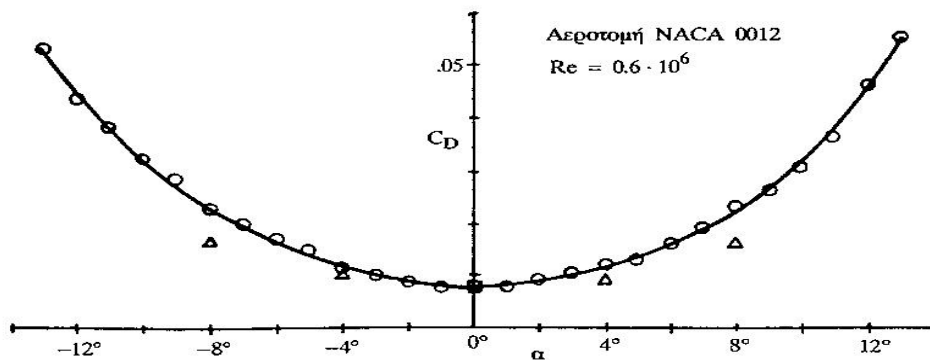
Οι δύο στοιχειώδεις δυνάμεις άνωσης και αντίστασης αναλύονται κατά την αξονική και την περιφερειακή κατεύθυνση (x και t) και δίνουν τις εκφράσεις:

$$\Delta F_x = \Delta L \cos \varphi + \Delta D \sin \varphi \quad [2.43]$$

$$\Delta D = C_d \frac{\rho}{2} W^2 C \Delta r \quad [2.44]$$



Σχήμα 2.6δ: Τυπική μεταβολή C_L με γωνία πρόσπτωσης. (Τα σύμβολα φανερώνουν μετρήσεις για διάφορους αριθμούς Re).



Σχήμα 2.6ε: Τυπική μεταβολή C_D με γωνία πρόσπτωσης.

Όπου $\phi = \alpha + \beta$ και β η γωνία θέσης του πτερυγίου ως προς το επίπεδο περιστροφής του δρομέα.

Ορίζονται συντελεστές αξονικής και περιφερειακής δύναμης οι:

$$C_x = C_L \cos \varphi + C_d \sin \varphi \quad [2.45]$$

$$C_t = C_L \sin \varphi - C_d \cos \varphi \quad [2.46]$$

Οπότε οι σχέσεις (2.43) (2.44) για την αξονική και περιφερειακή δύναμη γράφονται:

$$\Delta F_x = C_x \frac{\rho}{2} W^2 C \Delta r \quad [2.47]$$

$$\Delta F_t = C_t \frac{\rho}{2} W^2 C \Delta r \quad [2.48]$$

Από το τρίγωνο ταχυτήτων του Σχήματος 2.6β, προκύπτει ότι

$$W = U(1-a)\sin\varphi \quad [2.49]$$

Οπότε οι σχέσεις για την στοιχειώδη αξονική και περιφερειακή δύναμη γράφονται:

$$\Delta F_x = C_x \frac{\rho}{2} U^2 (1-a)^2 \sin^2 \varphi C \Delta r \quad [2.50]$$

$$\Delta F_t = C_t \frac{\rho}{2} U^2 (1-a)^2 \sin^2 \varphi C \Delta r \quad [2.51]$$

Αν Β είναι το πλήθος των πτερυγίων του δρομέα, τότε στον στοιχειώδη ροϊκό σωλήνα ακτίνας r και πάχους Δr , λόγω αλληλεπίδρασης με τον δρομέα, αναπτύσσονται η αξονική δύναμη Β ΔF_x και η περιφερειακή δύναμη Β ΔF_t .

Η περιφερειακή δύναμη Β ΔF_t παράγει το έργο του ανεμοκινητήρα, δημιουργώντας την στοιχειώδη ροπή

$$dM = B \Delta F_t r \quad [2.52]$$

Και την στοιχειώδη ισχύ

$$N = B \Delta F_t \Omega r \quad [2.53]$$

Η αξονική δύναμη καθώς και η ροπή συσχετίζονται, μέσω των νόμων διατήρησης της ορμής και της ροπής της ορμής, με τις αλλαγές των κινηματικών μεγεθών του ρευστού μέσα στον στοιχειώδη ροϊκό σωλήνα.

Η εξίσωση των εκφράσεων για την στοιχειώδη δύναμη (2.35) (2.47) και ροπή (2.36) (2.52) οδηγεί αντίστοιχα στις σχέσεις για τους συντελεστές αξονικής και περιφερειακής επαγωγής:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{B \cdot C \cdot C_L}{8\pi r \tan \varphi \sin \varphi} (1 + \varepsilon \tan \varphi) \quad [2.54]$$

$$\frac{a}{1-a} = \frac{B \cdot C \cdot C_L}{8\pi r \cos \varphi} (1 - \varepsilon \operatorname{ctg} \varphi) \quad [2.55]$$

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_L} \quad [2.56]$$

Στις σχέσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε και η σχέση

$$\tan \varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} \quad [2.57]$$

η οποία προκύπτει από το τρίγωνο ταχυτήτων.

Οι προηγούμενες τρεις σχέσεις μπορούν να αδιαστατοποιηθούν με την εισαγωγή της στερεότητας σ , που ορίζεται $B\bar{C}/R$, (\bar{C} η μέση χορδή) της αδιάστατης ακτινικής θέσης x , που ορίζεται $x=r/R$ και της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου λ , που ορίζεται $\lambda=U/\Omega R$, οπότε παίρνουν την μορφή:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma(C/\bar{C})C_L}{8x \tan \varphi \sin \varphi} (1 + \varepsilon \tan \varphi) \quad [2.58]$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma(C/\bar{C})C_L}{8x \cos \varphi} (1 - \varepsilon \operatorname{ctg} \varphi) \quad [2.59]$$

$$\tan \varphi = \frac{\lambda(1-a)}{x(1+a')} \quad [2.60]$$

Οι σχέσεις αυτές επαρκούν για να υπολογισθεί η αεροδυναμική απόδοση-συμπεριφορά δρομέα (γνωστών γεωμετρικών στοιχείων) σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας λ. Πράγματι, οι τρεις εξισώσεις έχουν σε κάθε ακτινική θέση x αγνώστους τους συντελεστές αξονικής επαγωγής a, περιφερειακής επαγωγής a' και τον συντελεστή άνωσης C_L (ή η γωνία πρόσπτωσης α). Συνεπώς, με μια επαναληπτική διαδικασία αριθμητικών δοκιμών, είναι δυνατόν σε κάθε ακτινική θέση να επιλυθεί το σύστημα των εξισώσεων και να προκύψει η αεροδυναμική κατάσταση του δρομέα. Μια τέτοια επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού των λειτουργικών παραμέτρων του δρομέα σε κάθε αδιάστατη ακτινική θέση, θα μπορούσε να ακολουθήσει τα εξής στάδια:

- ❖ Υποθέτουμε τιμές των a και a' (π.χ. a=0, a'=0)
- ❖ Υπολογίζουμε την γωνία φ (εξίσωση 2.60)
- ❖ Υπολογίζουμε την γωνία πρόσπτωσης α από την εξίσωση α = φ - β και κατόπιν του συντελεστές C_L και C_d.
- ❖ Ενημερώνουμε τις τιμές των συντελεστών a και a' από τις εξισώσεις (2.58), (2.59) και επαναλαμβάνεται η επαναληπτική διαδικασία μέχρι σύγκλισης.
- ❖ Μετά την σύγκλιση υπολογίζονται στην συγκεκριμένη ακτινική θέση οι στοιχειώδεις δυνάμεις και ο τοπικός συντελεστής ισχύος και
- ❖ Τα προηγούμενα βήματα επαναλαμβάνονται για όλες τις ακτινικές θέσεις από x=0 έως x=1.

Η δύναμη, η ροπή, ο βαθμός απόδοσης (συντελεστής ισχύος) και άλλα μεγέθη προκύπτουν τότε από την εφαρμογή των αντίστοιχων σχέσεων (2.35-2.37). Η συνολική δύναμη που ενεργεί στον δρομέα θα είναι:

$$T = \int_{r=0}^R \rho 2\pi r U^2 (1-a) 2a dr \quad [2.61]$$

Η συνολική ροπή που ενεργεί στον δρομέα θα είναι

$$M = \int_{r=0}^R \rho 2\pi r U (1-a) 2a' \Omega r dr \quad [2.62]$$

Η συνολική ισχύς του δρομέα είναι

$$P = \int \rho 2\pi r \frac{U^3}{2} C_p dr \quad [2.63]$$

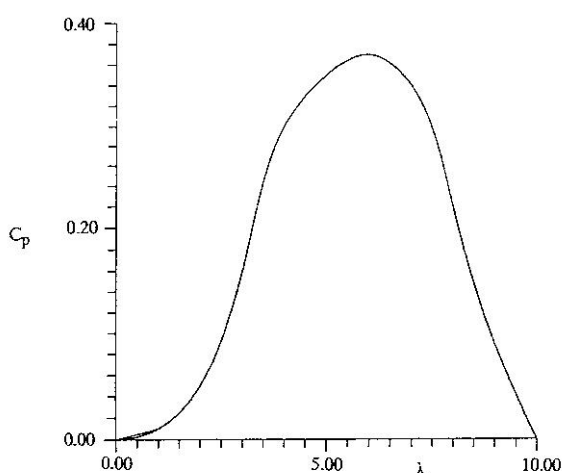
ενώ ο συντελεστής ισχύος του δρομέα προκύπτει από την σχέση

$$\bar{C}_p = \frac{P}{\rho \pi R^2 \frac{U^3}{2}} \quad [2.64]$$

Τα προηγούμενα ολοκληρώματα υπολογίζονται αριθμητικά χωρίζοντας την ακτίνα του δρομέα σε πλήθος λωρίδων πλάτους Δr (π.χ. Δr=R/20).

Είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα της ολοκλήρωσης εξαρτώνται μόνο από μία παράμετρο, την ταχύτητα του ακροπτερυγίου λ, οπότε η επανάληψη της προηγούμενης διαδικασίας για άλλες τιμές ταχύτητας ακροπτερυγίου, θα οδηγήσει στις καμπύλες λειτουργίας του δρομέα, αντιπρόσωπος των οποίων είναι η σχέση συντελεστή ισχύος και

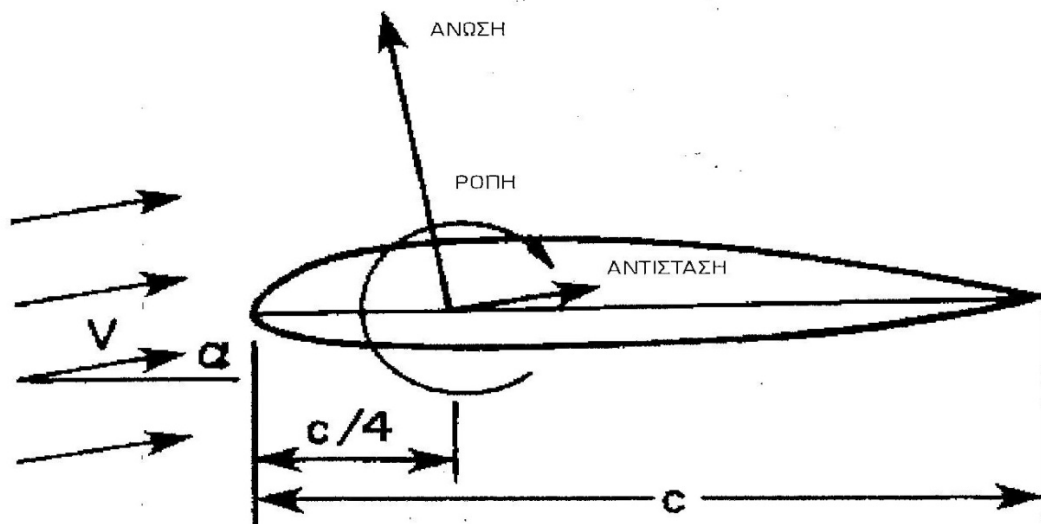
ταχύτητας λ με τυπική μορφή αυτή του σχήματος 2.6στ.



Σχήμα 2.6στ: Διάγραμμα ($\lambda - C_p$).

2.7 ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ

Ο αέρας ρέοντας γύρω από μια αεροτομή δημιουργεί πιέσεις κι από τις δύο πλευρές της, σε κάθε δε σημείο που ο αέρας αγγίζει αυτήν, αναπτύσσονται πιέσεις. Το σύνολο των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε μια αεροτομή, μπορούν να οριστούν με την ολοκλήρωση όλων των πιέσεων και των πιέσεων που εφαρμόζονται πάνω στην επιφάνειά της. Από την Στατική Μηχανική είναι γνωστό, ότι κάθε σύνολο δυνάμεων σ' ένα άκαμπτο σώμα μπορεί να αναλυθεί, σ' ένα αυθαίρετο σημείο, από δύο συνιστώσες δυνάμεις και μία ροπή. Στις αεροτομές προκύπτουν, η δύναμη αντίστασης D ή οπισθέλκουσα, η οποία εφαρμόζεται στην διεύθυνση του ελεύθερου ρεύματος του σχετικού ανέμου που προσπίπτει στην αεροτομή και η δύναμη άνωσης L , ή ανωστική, και εφαρμόζεται κατακόρυφα στην δύναμη αντίστασης. Η αεροδυναμική ροπή εφαρμόζεται στο σημείο που βρίσκεται 25% περίπου του ευθυγράμμου τμήματος που ξεκινά από το σημείο προσβολής της αεροτομής, ονομάζεται δε το σημείο αυτό, αεροδυναμικό κέντρο. Οι δυνάμεις και η ροπή φαίνονται στο σχήμα 2.7α.



Σχήμα 2.7α: Αεροδυναμικές δυνάμεις και ροπή, που εμφανίζονται σε μια αεροτομή.

Αποτελέσματα ερευνών πάνω σε δισδιάστατη ροή, η άνωση L , αντίσταση D και η ροπή M , δίνουν τις αδιάστατες αναλογίες C_L , C_d και C_m που ονομάζονται δεδομένα τμημάτων και είναι:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad [2.65]$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad [2.66]$$

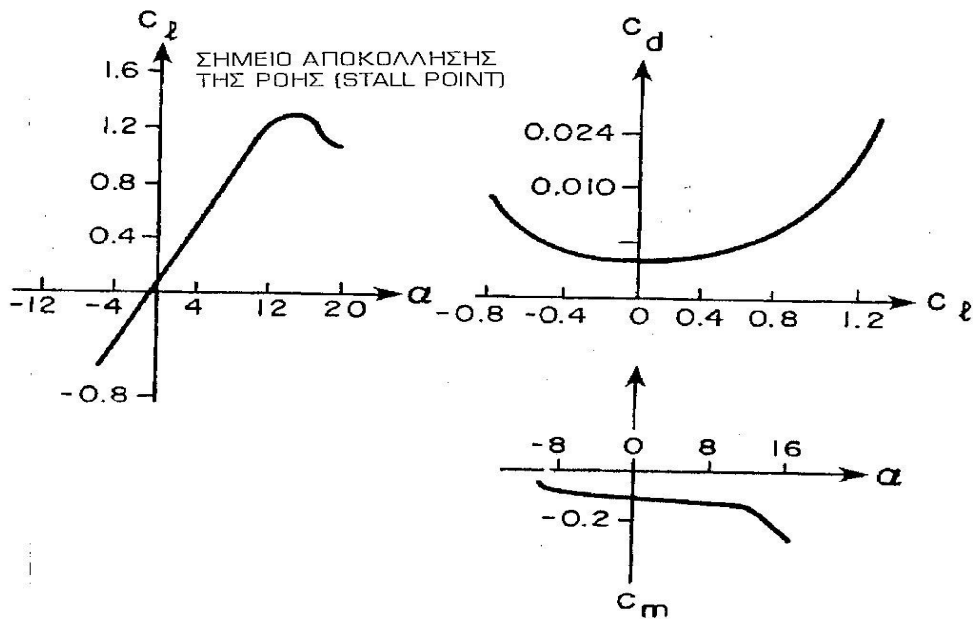
$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V^2 AC} \quad [2.67]$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, V σχετική ταχύτητα του ανέμου ως προς την αεροτομή, A είναι το εμβαδόν από την προβολή της αεροτομής σε επίπεδο κάθετο στο διάνυσμα της ταχύτητας του ανέμου και C είναι το μήκος της χορδής της αεροτομής. Χαρακτηριστικοί συντελεστές C_L , C_d και C_m μιας αεροτομής φαίνονται στο σχήμα 2.7β.

Οι συντελεστές άνωσης, αντίστασης και ροπής εξαρτώνται από την γωνία προσβολής α , η οποία σχηματίζεται από την διεύθυνση ροής του σχετικού ανέμου και την χορδή της αεροτομής.

Στο σχήμα 2.7β δίδονται οι γραφικές παραστάσεις αυτών των συντελεστών. Οι συντελεστές άνωσης και ροπής σχεδιάζονται σε συνάρτηση με την γωνία προσβολής α , ενώ ο συντελεστής αντίστασης σχεδιάζεται σε συνάρτηση με τον συντελεστή άνωσης. Η ευθεία που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και περνάει εφαπτομενικά της καμπύλης $C_L - C_d$, δίνει το σημείο της μέγιστης αναλογίας άνωσης προς αντίσταση L/D , όπου $L/D = C_L/C_d$. Όταν έχουμε την μέγιστη αναλογία έχουμε το καλύτερο δυνατό γλίστρημα του φτερού ενός αεροπλάνου στον αέρα. Στους δρομείς των ανεμογεννητριών το μέγιστο L/D δίνει την βέλτιστη γωνία

προσβολής για την μέγιστη συνισταμένη δύναμη που είναι υπεύθυνη για την δημιουργία της ροπής στρέψης του δρομέα.



Σχήμα 2.7β: Χαρακτηριστικοί συντελεστές μιας αεροτομής.

Το ρευστό προσκρούοντας σε μια αεροτομή χωρίζεται σε δύο μέρη, το ένα πάει από το πάνω μέρος και το άλλο από κάτω. Ένα λεπτό στρώμα ρευστού ξεκινά από το μέτωπο προσβολής της αεροτομής αυξάνοντας το πάχος του κατά το μήκος της αεροτομής και στις δύο επιφάνειες, πάνω και κάτω. Καθ' όσον η πίεση πέφτει, λόγω αύξησης της ταχύτητας του ρευστού, το ρευστό επιταχύνει λόγω της καμπυλότητας της αεροτομής, το λεπτό όμως στρώμα συνεχίζει να εφάπτεται στην επιφάνεια της αεροτομής. Όταν όμως η πίεση μειωθεί αρκετά, μπορεί να φρενάρει το ρευστό, τόσο που να εξαναγκάσει την ροή να ξεκολλήσει από την επιφάνεια της αεροτομής. Το παραπάνω φαινόμενο, μπορεί να συμβεί και όταν μεγαλώνει πάρα πολύ η γωνία προσβολής. Με αποτέλεσμα σ' αυτήν την περίπτωση να αυξηθεί η αντίσταση και να μειωθεί σημαντικά η άνωση. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως Stall (απώλεια στήριξης) όπως φαίνεται και στο διάγραμμα $C_L - \alpha$ του σχήματος 2.7γ. Σ' αυτήν την περίπτωση στα μεν αεροπλάνα έχουμε πτώση του αεροπλάνου, ενώ στον ανεμοκινητήρα έχουμε απώλεια ισχύος και αύξηση της αντίστασης στον δρομέα με δυσμενή για αυτόν αποτελέσματα αν συμβεί κάτι τέτοιο.

Τα χαρακτηριστικά της ροής εξαρτώνται από το μέγεθος της αεροτομής και την ταχύτητα του σχετικού αέρα W . Αυτή η εξάρτηση φαίνεται ποσοτικά σε μια αδιάστατη μεταβλητή, τον αριθμό Reynolds (Re).

$$Re = \frac{W \cdot c \cdot \rho}{\mu} = \frac{W \cdot c}{\nu} \quad [2.68]$$

Όπου W είναι ο σχετικός άνεμος σε ένα σημείο του πτερυγίου σε m/sec, και $\nu = \mu/\rho$ είναι το κινηματικό ιξώδες, μ είναι το δυναμικό ιξώδες ενός ρευστού, c χαρακτηριστικό μήκος, ρ η πυκνότητα του ρευστού. Ο αριθμός Re μπορεί να ερμηνευτεί ως ο λόγος της δύναμης αδράνειας προς την δύναμη ιξώδους του ρευστού.

Το γεωμετρικό σχήμα μια αεροτομής δίνεται σε πίνακα στον οποίο με τις συντεταγμένες x και y ορίζουμε την πάνω και κάτω επιφάνειά της. Οι συντεταγμένες είναι σχετικές με την χορδή την οποία παίρνουμε σαν γραμμή αναφοράς. Τα x και y δίνονται σε ποσοστό επί τοις εκατό του μήκους της χορδής. Οι κυρτωμένες αεροτομές δημιουργούνται ορίζοντας μια κυρτή γραμμή με μία εξίσωση τετάρτου βαθμού και προσθέτοντας ένα πάχος, που διανέμεται ισόπαχα από πάνω και από κάτω από την κυρτή γραμμή, σε κάθε θέση κατά μήκος της αεροτομής.

Το ακριβές σχήμα του μετώπου προσβολής της αεροτομής, καθορίζεται από ένα κυκλικό τόξο δοσμένης ακτίνας, με κέντρο πάνω στην κυρτή γραμμή με την οποία ορίζεται η αεροτομή. Οι κυρτές αεροτομές είναι ικανές να παράγουν ίδια άνωση με την μικρότερη αντίσταση, απ' ό,τι οι συμμετρικές αεροτομές. Επειδή τα πτερύγια μιας ανεμομηχανής καθέτου άξονα πρέπει να παράγουν και θετική και αρνητική άνωση κατά την διάρκεια της περιστροφής, δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν το πλεονέκτημα της χαμηλής αντίστασης των κυρτών αεροτομών. Αυτό δίνει μια πλεονεκτική αεροδυναμική απόδοση στις ανεμομηχανές οριζοντίου άξονα έναντι των ανεμομηχανών καθέτου άξονα.

Λόγω του σχήματός τους, όλες οι αεροτομές διαφέρουν στους συντελεστές άνωσης, αντίστασης και ροπής. Μερικά σχήματα είναι καλύτερα, άλλα όμως είναι ευκολότερα κατασκευάσιμα. Είναι δυνατόν να κρατηθεί μια επιθυμητή κλίση της πίεσης στο στρώμα του ρευστού, για μια μακρύτερη απόσταση κατά μήκος της αεροτομής, με την μετακίνηση του σημείου του μέγιστου πάχους προς το πίσω άκρο της αεροτομής. Αυτό διευκολύνει την κατασκευή, την οποία εφοδιάζει με πρόσθετη περιστροφική δύναμη, όπως οι αεροτομές με λεπτό μέτωπο προσβολής, παρά την καλή αεροδυναμικότητά τους, είναι ευαίσθητες σε μηχανική βλάβη κατά την λειτουργία τους. Μια σημαντική παράμετρος σε μια αεροτομή είναι το μέγιστο πάχος της. Αυτό δίνεται σαν κλάσμα του μήκους της χορδής επί τοις εκατό, π.χ. $10\%*C$.

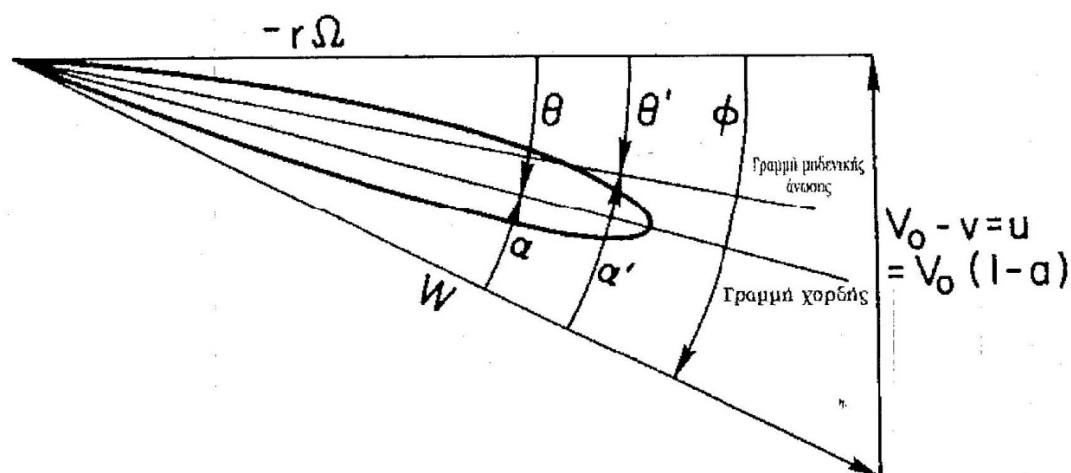
2.8 ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ (Διερεύνηση λειτουργίας δρομέα).

Μια από τις καταστάσεις λειτουργίας ενός ανεμοκινητήρα είναι που αυτός αφαιρεί ενέργεια από τον άνεμο και την μετατρέπει σε ροπή στον άξονα του δρομέα, ενώ παράλληλα μειώνεται η ταχύτητα του ανέμου που περνά μέσα απ' αυτόν. Κατά την λειτουργία ενός ανεμοκινητήρα μπορούν να συμβούν περισσότερες από μία λειτουργικές καταστάσεις. Η κάθε κατάσταση χαρακτηρίζεται από το φορτίο που επιδρά στον δρομέα, την δυναμική του κατάσταση και τις διακυμάνσεις της ταχύτητας. Παρακάτω θα αναλυθούν αυτές οι καταστάσεις, συνδυάζοντας τις καταστάσεις των πτερυγίων με την συμπεριφορά του ανεμοκινητήρα σαν σύνολο.

Επειδή οι περισσότεροι ανεμοκινητήρες χρησιμοποιούν κυρτωμένα πτερύγια, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η μετάπτωση από μία κατάσταση λειτουργίας στην άλλη, είναι περισσότερο συνδεδεμένη με την γραμμή μηδενικής άνωσης, παρά με την γραμμή της χορδής του πτερυγίου. Έτσι, για παράδειγμα, η κατάσταση ακινησίας συμβαίνει όταν $\alpha' = 0$ και όχι όταν $\alpha = 0$, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8α. Άρα για μια συμμετρική αεροτομή ισχύει, $\alpha = \alpha'$ και $\theta = \theta'$. Κρίνεται λοιπόν αναγκαίο να αναλυθούν αυτές οι καταστάσεις του δρομέα συναρτήσει της

ταχύτητας u του ανέμου που προσπίπτει στον ανεμιστήρα, όπως αυτή παρουσιάζεται αδιάστατη στον συντελεστή αξονικής επαγωγής.

Θεωρούμε έναν δρομέα και ένα ελεύθερο ρεύμα ανέμου με ταχύτητα u να πέφτει πάνω του. Η κλίση των πτερυγίων του δρομέα μπορεί για οποιαδήποτε τιμή από 0° έως 90° και οι στροφές του διατηρούνται σταθερές, προσθέτοντας ή αφαιρώντας ισχύ στον άξονά του. Οι καταστάσεις που συμβαίνουν φαίνονται στο σχήμα 2.8β.



Σχήμα 2.8α: Γεωμετρία μηδενικής άνωσης.

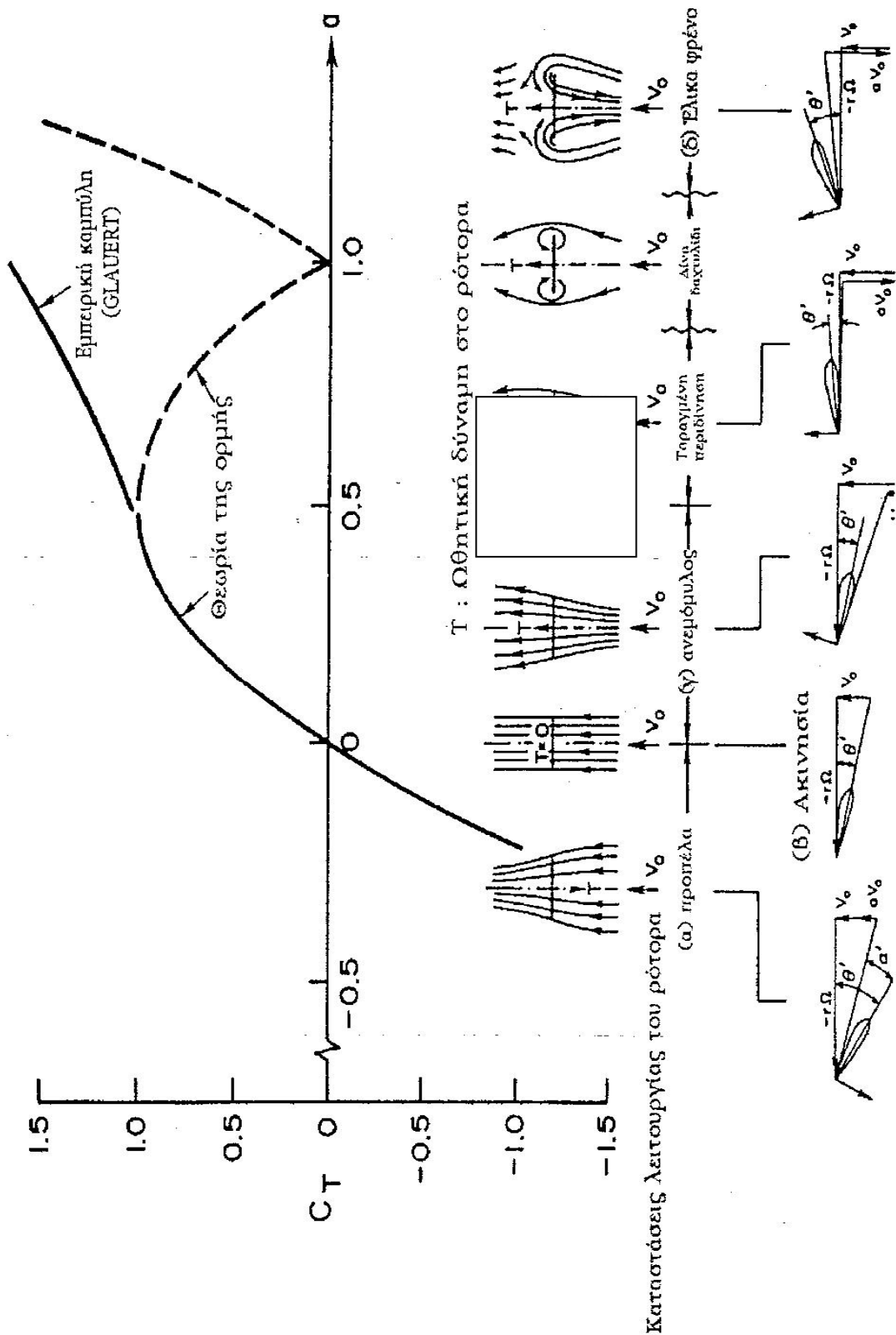
Έστω μια γωνία κλίσης πτερυγίου θ' και γωνία σχετικού ανέμου ϕ , όπως φαίνονται στο σχήμα 2.8α:·. Αν η γωνία θ' είναι μεγαλύτερη της ϕ , όπως την περίπτωση (α) του σχήματος 2.8β, τότε ο δρομέας βρίσκεται στην κατάσταση **προπέλας ή έλικας**, επιταχύνοντας έτσι τον άνεμο προς την αρχική του κατεύθυνση. Πρέπει ο δρομέας να παρέχεται με ισχύ για να διατηρήσει τις στροφές του και τα μεγέθη της ταχύτητας του ανέμου u και του συντελεστή αξονικής επαγωγής a να είναι αρνητικά ($u < 0$, $a < 0$).

Όταν ισχύει $\theta' = \phi$, όπως την περίπτωση (b), τότε ο δρομέας βρίσκεται στην κατάσταση **ακινησίας** και τα μεγέθη u και a είναι μηδέν ($u = 0$, $a = 0$).

Όταν ισχύει $\theta' < \phi$, όπως στην περίπτωση (c), τότε συμβαίνει η κατάσταση του ανεμόμυλου, όπου ισχύει $0 < a < 0,5$ και ο δρομέας αναπτύσσει ωφέλιμη ροπή στρέψης.

Όταν η γωνία θ' γίνεται αρνητική, φτάνει ένα σημείο όπου η ωφέλιμη ροπή στρέψης μηδενίζεται. Μετά από αυτό το σημείο ο δρομέας δρα σαν φρένο, σπρώχνοντας τον άνεμο πίσω από εκεί που ερχόταν, (περίπτωση ελάττωσης ταχύτητας αεροπλάνου κατά την προσγείωση), όπως φαίνεται και στην περίπτωση (d) του σχήματος 2.8β. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται κατάσταση **έλικας φρένου**, στην οποία η ταχύτητα u γίνεται ξανά θετική, ο συντελεστής αξονικής επαγωγής a γίνεται μεγαλύτερος από το μηδέν ($u > 0$, $a > 0$), και πρέπει να παρέχεται ροπή στρέψης στον άξονα του δρομέα, προκειμένου να διατηρεί τις στροφές του σταθερές. Η κατάσταση της έλικας φρένου, μπορεί να αναλυθεί σε δύο δευτερεύουσες καταστάσεις:

- Την κατάσταση του **ταραγμένου ομόρρου** για $0,5 < a < 1,0$.
- Την κατάσταση της **δίνης δακτυλίδι** για $a > 1,0$.



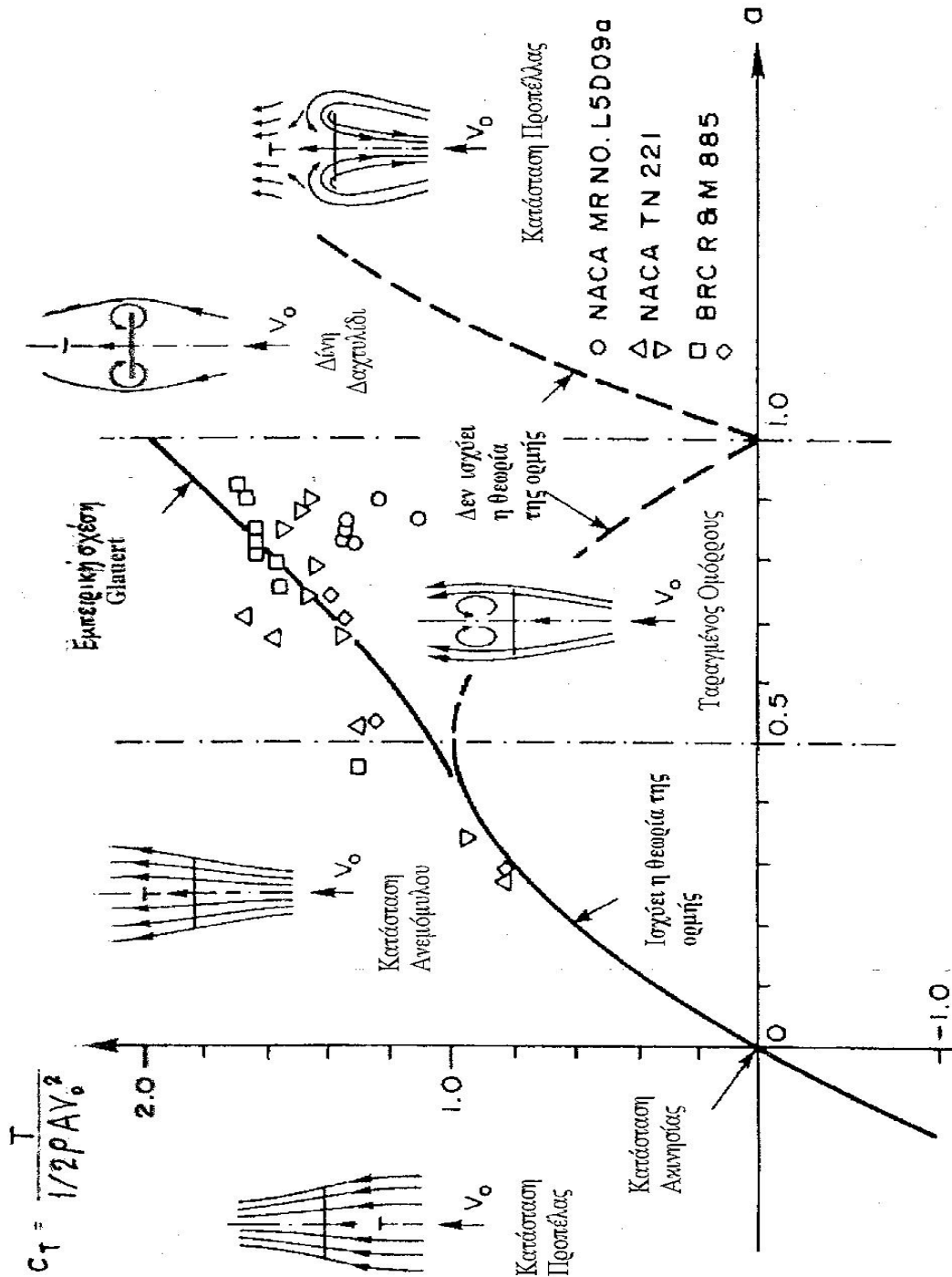
Σχήμα 2.8β: Καταστάσεις του δρομέα.

Αν και η θεωρία του δίσκου ενέργειας παραβιάζεται για $\alpha > 0,5$, εν τούτοις νεώτερες πειραματικές μελέτες επέκτειναν τις αλγεβρικές εξισώσεις των C_T και C_P ,

οι οποίες παράγονται από την θεωρία του δίσκου ενέργειας σε μια περιοχή όπου ισχύει $\alpha > 0,5$. Αυτές οι εξελιγμένες εξισώσεις είναι οι ακόλουθες:

$$C_T = 4a|1-a| \quad [2.69]$$

$$C_p = 4a(1-a)|1-a| \quad [2.70]$$

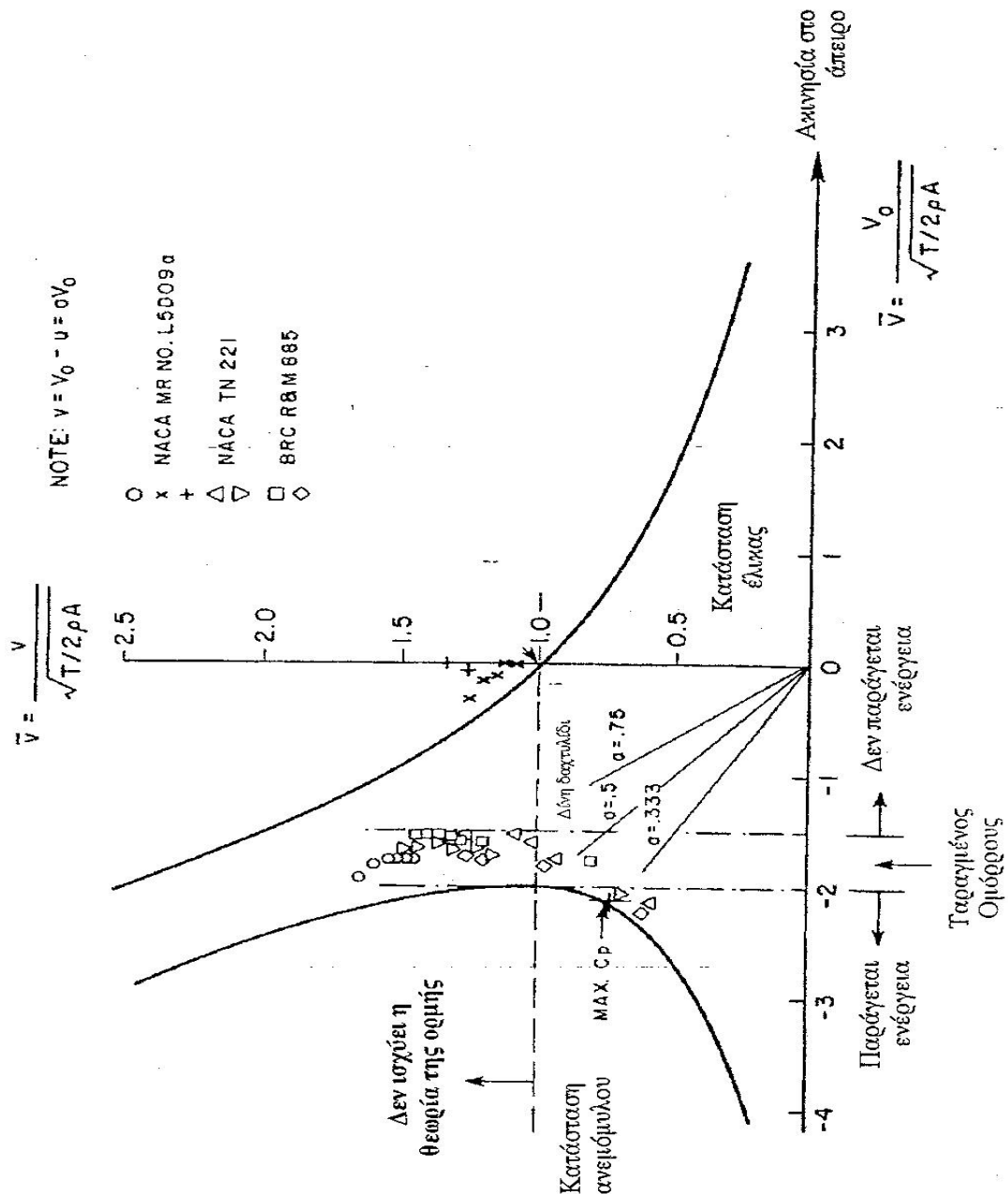


Σχήμα 2.8γ: Συντελεστής ώθησης C_T συναρτήσει του συντελεστή αξονικής απαγωγής a .

Στο σχήμα 2.8γ φαίνεται η εμπειρική γραμμή που έδωσε ο Glauert, όπου περιγράφονται πειραματικές μετρήσεις για τον συντελεστή ώθησης C_T , όταν ισχύει

$\alpha > 0,5$. Η καμπύλη ($C_T - \alpha$), όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, αποτυγχάνει να περιγράψει τις μετρήσεις των πειραμάτων για $0,5 < \alpha < 1,0$.

Για $\alpha > 0,5$ η θεωρία της ροπής της ορμής προβλέπει μηδενική ροή κατάντι του δρομέα, στην οποία περίπτωση ο δρομέας συμπεριφέρεται σαν ένα μεγάλο πλατύ επίπεδο, εξαναγκάζοντας τον αέρα να ρέει γύρω απ' αυτόν. Τότε ο συντελεστής C_T πλησιάζει στον συντελεστή μιας πλατιάς πλάκας, ο οποίος παίρνει τιμές $1,17 < C_d < 2,0$, όπως ακριβώς σε μια πλάκα. Σ' αυτήν την περίπτωση είναι δυνατόν να υπάρξουν πολύ υψηλά φορτία πτερυγίου, με αποτέλεσμα την καταστροφή των.



Σχήμα 2.8δ: Απεικόνιση κατάστασης έλικα ελικοπτέρου για $V_0 > 0$ και για $V_0 < 0$, απεικονίζει την κατάσταση απλού ανεμόμυλου.

Ένα επιπλέον σχήμα που απεικονίζει τις καταστάσεις της ροής της αδιάστατης ταχύτητας που μειώνεται $\bar{U} = \frac{U}{\sqrt{\frac{T}{2\rho A}}}$ συναρτήσει της αδιάστατης ταχύτητας

$\bar{V}_0 \frac{V_0}{\sqrt{\frac{T}{2\rho A}}}$ είναι το Σχήμα 2.8δ. Η θεωρία αυτή αναπτύχθηκε για δεδομένα

ελικοπτέρων, όπου η $V_0 > 0$ παριστάνει την κατάσταση της έλικας, την συνηθισμένη δηλαδή κατάσταση για τους δρομείς των ελικοπτέρων, και για $V_0 < 0$ απεικονίζει την κατάσταση του ανεμόμυλου, την συνηθισμένη δηλαδή κατάσταση για τους συνηθισμένους ανεμόμυλους των αγροκτημάτων. Να σημειωθεί ότι το α είναι η αναλογία της τάσης προς την αποκοπή του ανέμου.

Η καμπύλη αριστερά του σχήματος 2.8δ, η οποία προκύπτει σύμφωνα με την θεωρία της ορμής, παριστάνεται από την σχέση:

$$V_0 = -\left(\frac{1}{\bar{U}}\right) - \bar{U} .$$

Στην κατάσταση της ακινησίας του δρομέα ισχύει ότι η ωφέλιμη ροπή μηδενίζεται και η ταχύτητα τείνει να γίνει άπειρη ($V_0 \rightarrow \pm\infty$).

Σημείωση: Επειδή ο υπολογιστής στο πρόγραμμα εγγραφής εξισώσεων δεν αναγράφει τον λατινικό χαρακτήρα του a , θα πρέπει να δίδεται προσοχή για ποιο άλφα γίνεται λόγος!

2.9 ΔΙΟΡΘΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

(α) Κατάσταση πέδησης

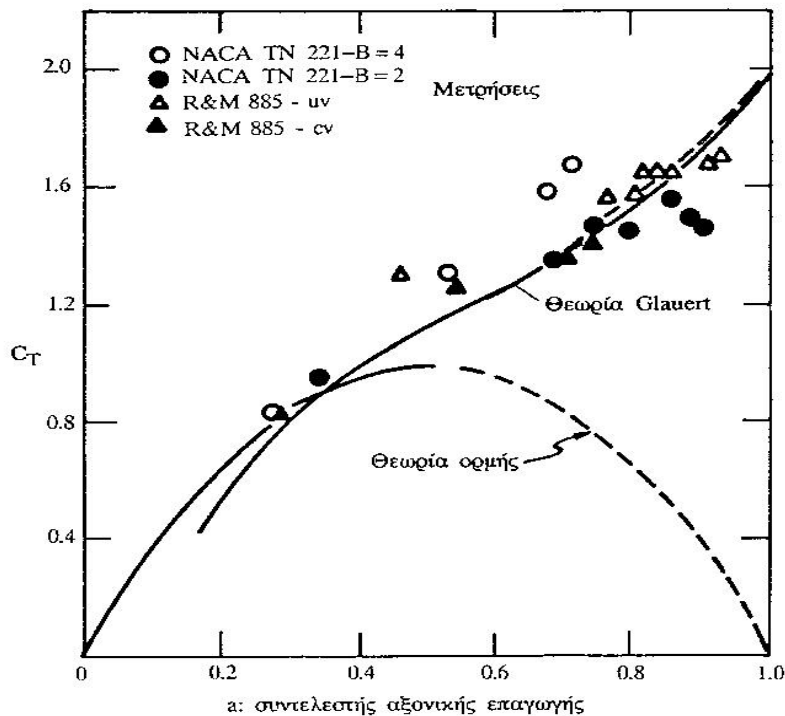
Η θεωρία του δίσκου ενέργειας δίνει ότι για μεγάλους συντελεστές αξονικής επαγωγής, η ταχύτητα του ρευστού πολύ μακριά κατάντι του δίσκου, μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές (για συντελεστές αξονικής επαγωγής μεγαλύτερους του 0.5). Σε τέτοιες συνθήκες λειτουργίας η θεωρία του δίσκου ενέργειας αποτυγχάνει, συνεπώς υπάρχει άνω όριο ισχύος της. Ο Glauert επεξέτεινε την περιοχή ισχύος της θεωρίας διορθώνοντας την σχέση για τον συντελεστή ώσης C_T για $a > 0,5$ σύμφωνα με το σχήμα 2.9α. Η προτεινόμενη από τον Glauert σχέση βασίστηκε σε πειράματα ελίκων σε αεροδυναμική σήραγγα και μπορεί να προσεγγιστεί αναλυτικά από την σχέση δευτέρου βαθμού:

$$C_T = \begin{cases} 4a(1-a) & \text{για } a < 0.4 \\ 1 - 8a^2 - 0.65a + 0.84 & \text{για } 0.4 < a < 1 \end{cases} \quad [2.71]$$

(β) Διορθώσεις ακροπτερυγίων – Διόρθωση Prandtl

Η θεωρία του δίσκου ενέργειας, που τα συμπεράσματα της υπό μορφή σχέσεων παρουσιάστηκαν προηγουμένως, δεν λαμβάνει υπόψη της αεροδυναμικής φύσης απώλειες λόγω των εκρεόντων στροβίλων από τα ακρότατα σημεία των

πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, που σημειωτέον είναι πεπερασμένου πλήθους και όχι απείρου όπως η θεωρία Betz υποθέτει. Είναι λοιπόν αναγκαίο να εισαχθούν διορθώσεις στην ανωτέρω θεωρία, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα που προκύπτουν από βασικές παραδοχές της. Η θεωρία Betz προϋποθέτει ομοιόμορφη ροή δια μέσου κάθε δακτυλίου του δικτύου της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.9α: Διόρθωση συντελεστή ώσης κατά Glauert.

Οι δίνες όμως που εκρέουν από τα ακροπτερύγια, δημιουργούν ένα επαγόμενο πεδίο ταχύτητας, το οποίο δεν είναι ομοιόμορφο και μεταβάλλεται περιοδικά, γύρω από κάθε δακτύλιο, με περίοδο που σχετίζεται προφανώς με τον αριθμό των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Συνέπεια αυτού του γεγονότος είναι η αύξηση και του αξονικού και του ακροπτερυγίου. Επίσης προκαλεί μείωση της γωνίας πρόσπτωσης, με συνέπεια την μείωση της περιφερειακής συνιστώσας της άνωσης, άρα και μείωση της ροπής. Οι επιδράσεις είναι πολύ έντονες στην περιοχή κοντά στο ακροπτερύγιο και μειώνεται στα εσωτερικά στοιχεία του πτερυγίου.

Μια καλή προσέγγιση των ανωτέρω απωλειών, έδωσε ο Prandtl. Ορίζεται έτσι ο «συντελεστής απωλειών ακροπτερυγίου του Prandtl», F_T ως:

$$F_T = \frac{2}{\pi} \arccos(e^{-f_T})$$

όπου

$$f_T = \frac{B}{2} \frac{r_T - r}{r_T \sin \varphi_T}$$

Αν το πτερύγιο τελειώνει πριν φτάσει στην πλήμνη, τότε ορίζεται και ένας συντελεστής απωλειών που δίνεται από έκφραση ανάλογη με το συντελεστή F_H στην θέση του F_T :

$$F_H = \frac{B}{2} \frac{r - r_H}{r_H \sin \varphi_H}$$

Ο συνολικός συντελεστής απωλειών προκύπτει ως:

$$F = F_T F_H$$

Οι συντελεστές διόρθωσης Prandtl εισάγονται στις σχέσεις (2.54), (2.57) και (275) πολλαπλασιάζοντάς τους α και α' με F.

Η πράξη απέδειξε ότι η επιτυχεστέρα διόρθωση προκύπτει με την μείωση κατά 3% της διαμέτρου του δρομέα (δηλαδή αγνοείται η ενεργειακή συμβολή του ακραίου 3% της ακτίνας) και εφαρμογή της θεωρίας του δίσκου ενέργειας ως έχει χωρίς περαιτέρω διορθώσεις απωλειών ακροπτερυγίων.

2.10 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΔΡΟΜΕΑ

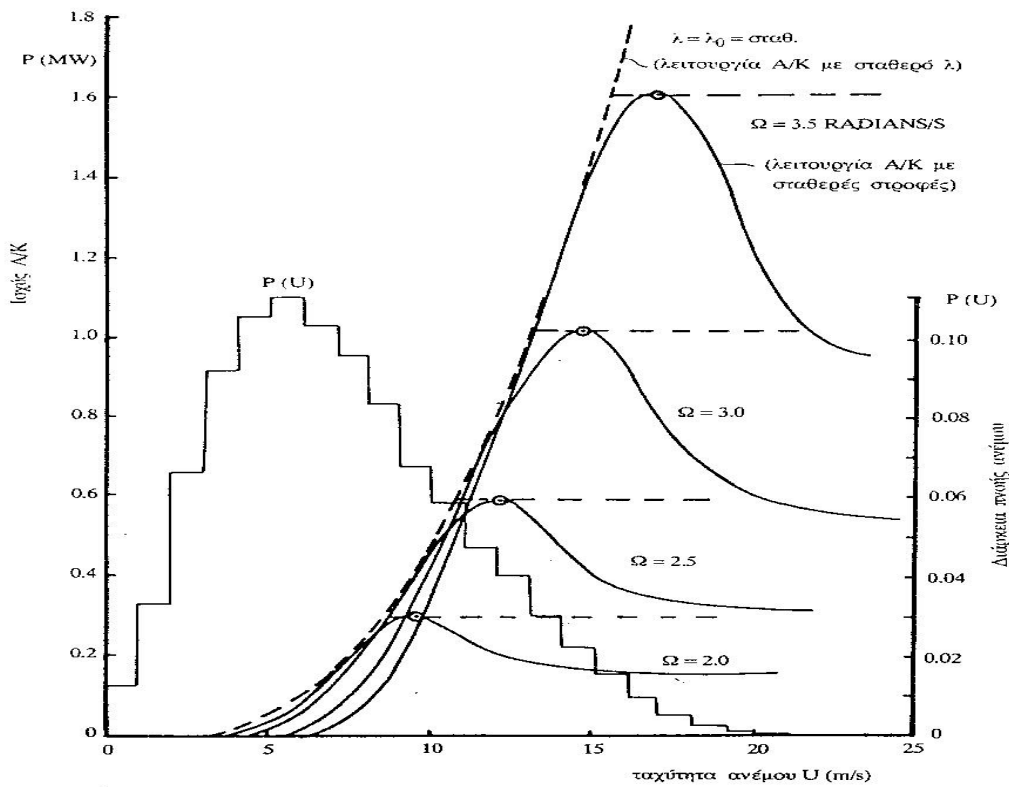
Από την καμπύλη του συντελεστή ισχύος του δρομέα ως συνάρτηση της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ, μπορούν να προκύψουν οι καμπύλες ισχύος του ανεμοκινητήρα για καθορισμένες στροφές του δρομέα, ως συνάρτηση της ταχύτητας πνέοντος ανέμου. Συγκεκριμένα από την καμπύλη συντελεστή ισχύος και για ορισμένες στροφές δρομέα, προκύπτει η καμπύλη συντελεστή ισχύος ταχύτητας ανέμου, η οποία στην συνέχεια με τις σχέσεις

$$P = \bar{C}_p \frac{\rho}{2} \pi R^2 U^3$$

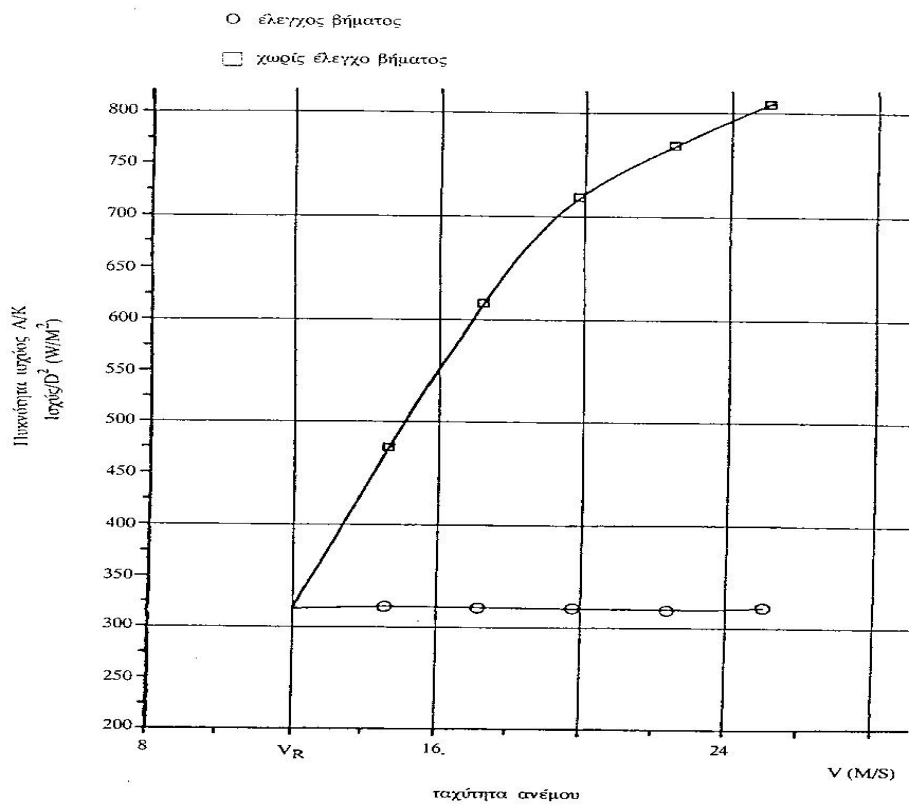
$$M = \frac{P}{\Omega}$$

μετατρέπεται σε καμπύλη ισχύος ή ροπής του δρομέα ως συνάρτηση ταχύτητας πνέοντος ανέμου. Τυπικές μορφές καμπυλών ισχύος και ροπής για δρομέα διαμέτρου 50 m, παρουσιάζονται στο σχήμα 2.10α. Η στρατηγική λειτουργίας μεταβλητού βήματος αλλά σταθερών στροφών, διατηρεί σταθερή την ισχύ για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής και μειώνει δραστικά τις καταπονήσεις των πτερυγίων, σχ. 2.10β και 2.10γ.

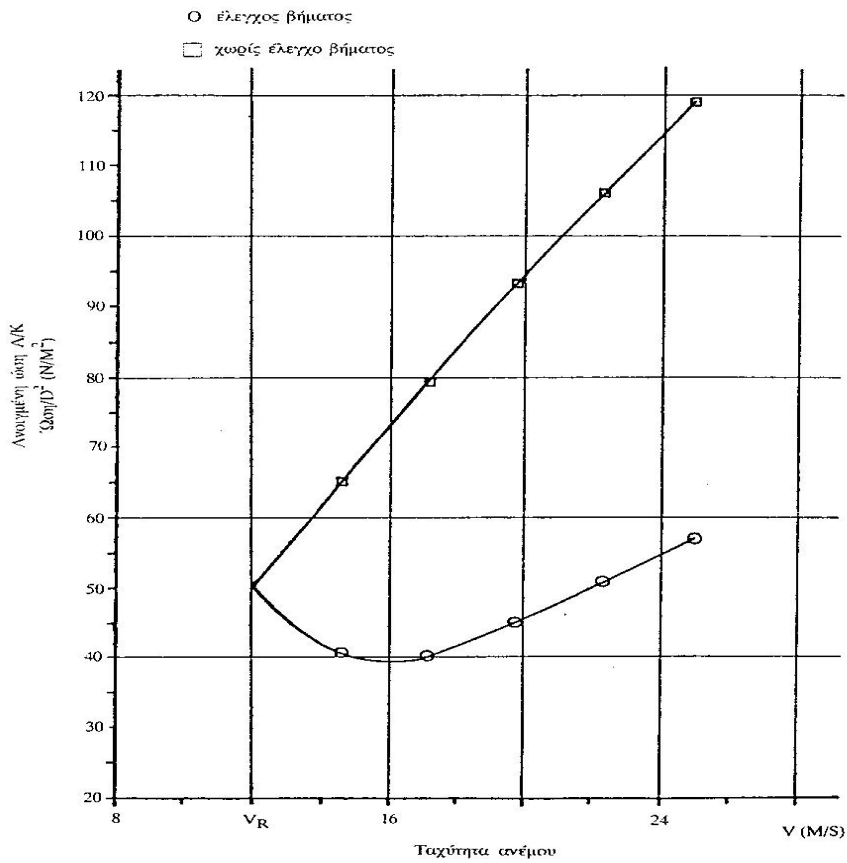
Όπως όμως είναι γνωστό, λόγω τριβών, η ανεμογεννήτρια αποδίδει στον άξονά της λιγότερη ενέργεια και ροπή. Η ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί από μία ελάχιστη ταχύτητα ανέμου και πάνω, την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας V cut-in, αποδίδει την ονομαστική της ισχύ P_R στην ονομαστική ταχύτητα V_R και για ταχύτητες ανέμου μέχρι την ταχύτητα V_F, στην οποία σταματάει να λειτουργεί η ανεμογεννήτρια, V cut-out, η δε ισχύς της διατηρείται σταθερή. Η πραγματική καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας πνέοντος ανέμου, θα προκύψει από την θεωρητική καμπύλη ισχύος, αφού ληφθούν υπόψη τόσο οι ενεργειακές μηχανικές απώλειες όσο και οι χαρακτηριστικές ταχύτητες V_c, V_R, και V_F. Τυπική καμπύλη ισχύος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10δ, ενώ με διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται η ισχύς του δρομέα χωρίς αεροδυναμικό έλεγχο της μέγιστης ισχύος.



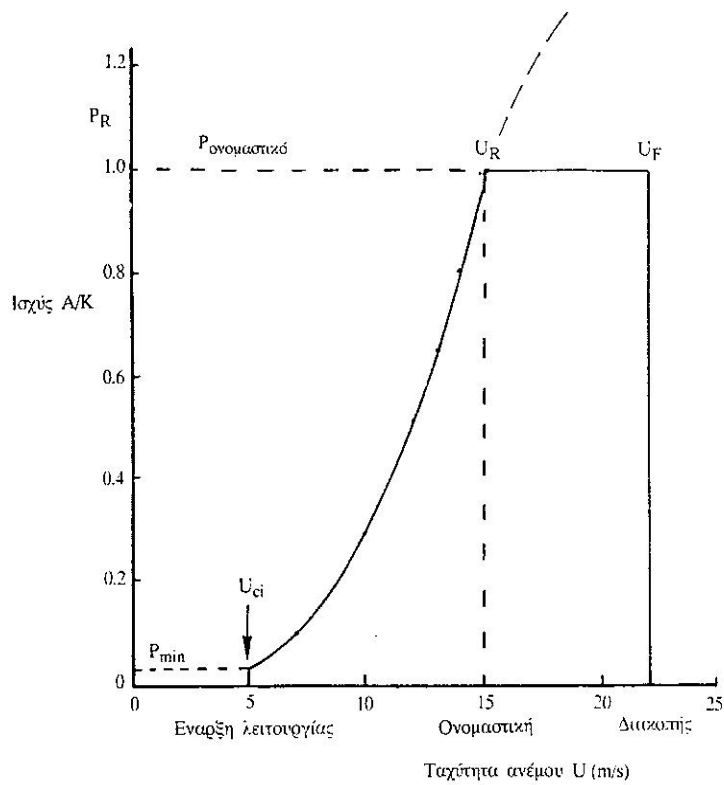
Σχήμα 2.10α: Καμπύλες ισχύος δρομέα διαμέτρου 50m. Διακρίνονται οι δύο στρατηγικές λειτουργίες του δρομέα: (α) Σταθερού λ , και (β) σταθερού βήματος – σταθερών στροφών.



Σχήμα 2.10β: Απόδοση δρομέα με και χωρίς ρύθμιση ακροπτερυγίου.



Σχήμα 2.10γ: Ωστική δύναμη στον δρομέα.



Σχήμα 2.10δ: Καμπύλη ισχύος Α/Γ διαμέτρου δρομέα 50m.

2.11 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΦΟΡΤΙΩΝ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΑ

Τα επί μέρους στάδια μελέτης που αντιμετωπίζονται στην σχεδίαση ανεμοκινητήρων είναι τα εξής:

1. Βελτιστοποίηση αεροδυναμικής σχεδίασης του δρομέα.
2. Συμπεριφορά του δρομέα σε ειδικές καταστάσεις όπως εκκίνηση, επιτάχυνση, επιβράδυνση, απότομο φρενάρισμα και άλλα δυναμικά φαινόμενα. Σχεδίαση για αποφυγή φαινομένων συντονισμού, ο οποίος συντονισμός έχει καταστροφικά αποτελέσματα.
3. Επιλογή είδους ρύθμισης βήματος πτερυγίων και επιλογή αυτοματισμών που αφορούν την ρύθμιση ισχύος, την έναρξη και παύση λειτουργίας του ανεμιστήρα.
4. Σύστημα προσανατολισμού του άξονα του δρομέα προς την κατεύθυνση του ανέμου.
5. Επιλογή υποσυστημάτων της γεννήτριας.
6. Μελέτη αντοχής των υλικών που αφορούν την κατασκευή και την στήριξη των πτερυγίων, των αξόνων, του κουβουκλίου κλπ.
7. Επιλογή ύψους του δρομέα πάνω απ' το έδαφος.
8. Σχεδίαση και θεμελίωση πύργου στήριξης. Έλεγχος αντοχής της κατασκευής σε σεισμό. Μελέτη ταλαντώσεων πύργου.
9. Αντιδιαβρωτική προστασία.
10. Αντικεραυνική προστασία.
11. Επίδραση του ανεμοκινητήρα στο περιβάλλον.
12. Τοποθέτηση ανεμοκινητήρων σε αιολικό πάρκο, αλληλεπίδραση.
13. Επιλογή τελικής θέσης εγκατάστασης ανεμοκινητήρα.

Για την μηχανολογική σχεδίαση του ανεμοκινητήρα απαιτείται η γνώση των δυνάμεων και των ροπών που εφαρμόζονται στα πτερύγια, στην κορυφή του πύργου (κουβούκλιο), στον πύργο και την θεμελίωσή του.

Εκτός των παραπάνω υπάρχουν και συνθήκες φόρτισης για υπερβολικό άνεμο.

- Κανονική λειτουργία ανεμοκινητήρα σε ταχύτητα ανέμου μικρότερη της V_R αλλά με παρουσία ριπής ανέμου 35 m/sec.
- Λειτουργία ανεμοκινητήρα σε ταχύτητα ανέμου V_F , αλλά και με ριπή ανέμου 60 m/sec.
- Λειτουργία ανεμοκινητήρα στα 25 m/sec με υπερτάχυνση δρομέα 40 %.
- Ακινητοποιημένος ανεμοκινητήρας και ταχύτητα ανέμου 60 m/sec.

Επίσης για την διευκόλυνση της κατασκευαστικής διαδικασίας, ο σχεδιαστής πρέπει να αποφασίσει για τον τύπο του δρομέα που απαιτείται. Αυτή και άλλες προκαταρκτικές αποφάσεις και περιορισμοί, μπορούν να αθροιστούν και να αποτελέσουν ένα σύνολο κατασκευαστικών στόχων. Αυτοί οι κατασκευαστικοί στόχοι για μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια είναι οι παρακάτω:

- ✓ Αεροδυναμική απόδοση.
- ✓ Εκτίμηση της ισχύος.
- ✓ Βάρος, ισορροπία της μάζας και απαιτήσεις ανοχής βάρους.
- ✓ Επιτρεπόμενη απόκλιση πτερυγίων.
- ✓ Απαιτήσεις στην κλίση του άξονα του δρομέα.
- ✓ Επιλογή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί.
- ✓ Περιγραφή των καταστάσεων μέγιστου φορτίου.
- ✓ Μέθοδος τοποθέτησης.

- ✓ Τύπος ρύθμισης της ταχύτητας του δρομέα.
- ✓ Μέθοδος έναρξης.
- ✓ Βασικός και δευτερεύον έλεγχος υπερβολικών ταχυτήτων.
- ✓ Χαρακτηριστικά κατασκευαστικής ζωής.
- ✓ Καταστάσεις του περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, αστραπές, μύκητες).
- ✓ Δοκιμαστικές απαιτήσεις.

2.12 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ

Εφ' όσον οι κατασκευαστικοί στόχοι επιτευχθούν, τότε μπορεί να αρχίσει ο αεροδυναμικός σχεδιασμός του δρομέα.

Για τον σχεδιασμό του δρομέα, απαιτείται η γνώση της επίδρασης διαφόρων αεροδυναμικών χαρακτηριστικών στην απόδοση του δρομέα. Αναλυτικότερα πρέπει να γίνεται σύγκριση αεροδυναμικών χαρακτηριστικών διαφόρων δρομέων, με σχετικές αδιάστατες παραμέτρους, όπως:

- Λόγος ταχύτητας κορυφής (TSR)
- Αριθμός Reynolds (Re).
- Συντελεστής άνωσης (C_L).
- Συντελεστής αντίστασης (C_d).
- Συντελεστής ώθησης (C_T)
- Συντελεστής ροπής (C_Q)
- Συντελεστής ισχύος (C_P).

Αυτές οι αδιάστατες παράμετροι, αποτελούν ουσιαστικά τον σύνδεσμο μεταξύ της πολύπλοκης πραγματικής ροής και του αριθμητικού μοντέλου αυτής.

Ο δρομέας, σαν το πιο σημαντικό μέρος του σχεδιασμού ενός ανεμοκινητήρα, πρέπει τουλάχιστον να έχει ικανοποιητική απόδοση. Όσον αφορά τον σχεδιασμό του, οι δύο ακραίες περιπτώσεις είναι:

- (α) Να σχεδιαστεί ο δρομέας χωριστά από τα υπόλοιπα μέρη του ανεμοκινητήρα.
- (β) Να σχεδιαστεί δρομέας μαζί με όλα τα υποσυστήματα, ώστε να επιτευχθεί μια βέλτιστη συνεργασία.

Το πλεονέκτημα της πρώτης περίπτωσης είναι η μείωση του κατασκευαστικού κόστους, χρησιμοποιώντας το απλούστερο πιθανό μοντέλο δρομέα. Μπορεί όμως έτσι να παρουσιαστούν ανεπιθύμητες καταστάσεις, όπως οι δονήσεις στον άξονα του δρομέα και στον πύργο στήριξης, αν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί κάποια όρια.

Ανάμεσα σε αυτές τις δύο ακραίες περιπτώσεις, πολλές πιθανότητες μπορούν να υπάρξουν, ώστε να επιλυθούν ή να μειωθούν σημαντικά οι κίνδυνοι υπερβολικών ταχυτήτων ή ευαισθησίας των πτερυγίων κ.ά..

Για κάθε ανεμοκινητήρα υπάρχει μια τιμή της ταχύτητας του ανέμου για της οποίας μεγιστοποιείται η ισχύς της γεννήτριας του συστήματος. Αν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει αυτήν την τιμή, τότε η πρόσθετη ενέργεια που παράγει ο δρομέας, θα πρέπει να απορρίπτεται, γιατί αλλιώς απειλείται η ακεραιότητα της μηχανής.

Από την άλλη μεριά, σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου, πρέπει να επιτυγχάνεται η βέλτιστη πιθανή απόδοση για αύξηση της ετήσιας ενεργειακής αποθήκευσης. Μελέτες σχεδιαστών, όπως οι Tangler & Somers, που προσπάθησαν

να πετύχουν τους κατασκευαστικούς στόχους και να βελτιώσουν την απόδοση του ανεμοκινητήρα, έδειξαν ότι στους δρομείς σταθερής ταχύτητας, αν επιτευχθεί το μέγιστο C_L στην περιοχή κοντά στην άκρη του πτερυγίου, τότε η τάση για υπερβολικές και ανεπιθύμητες ταχύτητες σε υψηλούς ανέμους μειώνεται αισθητά.

2.13 ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Ένα από τα πρώτα προβλήματα που μπορεί να συναντήσει ο σχεδιαστής ενός συστήματος ανεμοκινητήρα, είναι η εκλογή του αριθμού των πτερυγίων.

Παλιότερες κατασκευές που λειτούργησαν με επιτυχία, χρησιμοποίησαν από 1 έως και 40 πτερύγια, αλλά η πλειοψηφία των δρομέων που λειτουργούν με μεγάλους λόγους ταχύτητας κορυφής (TSR) έχουν 2 ή 3 πτερύγια. Οι δρομείς με μικρό λόγο ταχύτητας κορυφής που χρησιμοποιούνται για ειδικούς σκοπούς, όπως η άντληση νερού, πρέπει να έχουν υψηλή στερεότητα και πολλά πτερύγια, για την παραγωγή μεγάλης ροπής έναρξης λειτουργίας.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκλογή του αριθμού των πτερυγίων κατά σειρά προτεραιότητας είναι:

1. Ο λόγος ταχύτητας κορυφής λ .
2. Το κόστος της κατασκευής.
3. Το βάρος της κατασκευής.
4. Η επίδραση στον συντελεστή ισχύος.
5. Η δυναμική της κατασκευής.

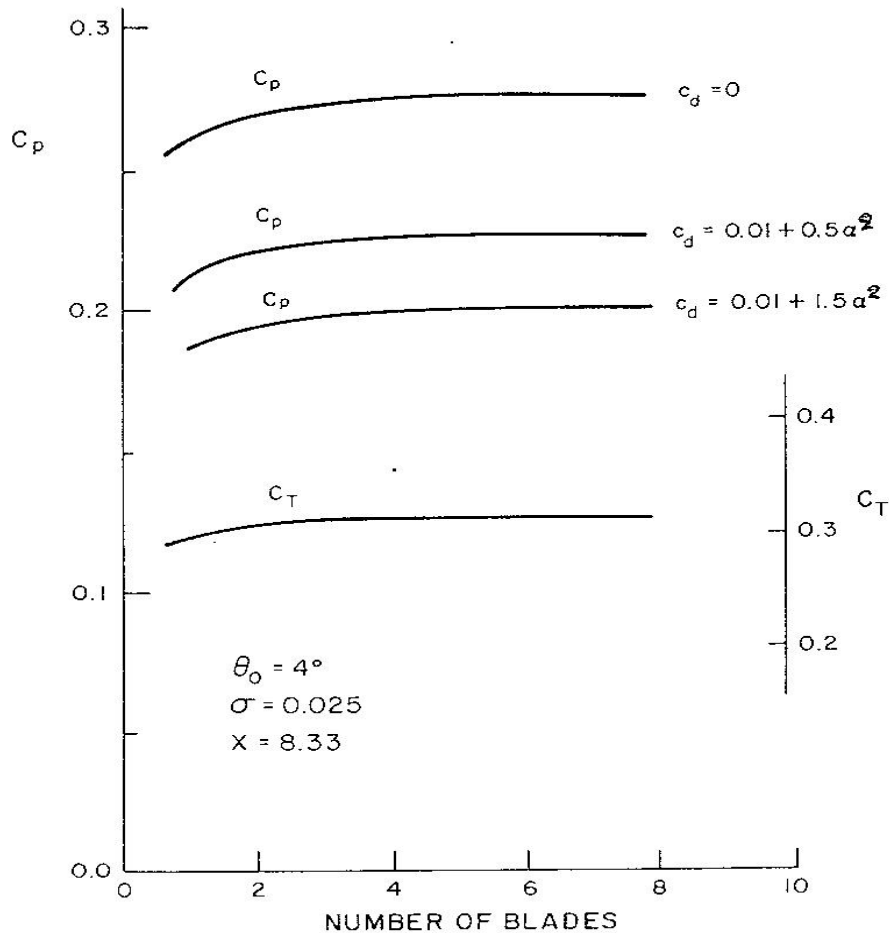
Στο σχήμα 2.13.β φαίνεται η επίδραση του αριθμού των πτερυγίων στους συντελεστές ισχύος και ώθησης, όταν ο συντελεστής αντίστασης έχει τις τιμές $C_d=0$, $C_d = 0,01-0,5a^2$, $C_d = 0,01+0,5a^2$. Είναι φανερή η αύξηση σε ένα ποσοστό 10% περίπου, περνώντας από το ένα πτερύγιο στα δύο.

Οι περισσότεροι σχεδιαστές ακολουθώντας την θεωρία του Glauert και την μέθοδο υπολογισμού ανεμοκινητήρα του Jack Park, εκλέγουν τον αριθμό των πτερυγίων από τον παρακάτω πίνακα 2.13α:

ΛΟΓΟΣ λ (TSR)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ B
1	6--20
2	4--12
3	3--8
4	3--5
5--8	2--4
8--15	1--2

Πίνακας 2.13α: Πίνακας εκλογής αριθμού πτερυγίων.

Τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων των δρομέων δεν έχουν ακόμα ξεκαθαρίσει εντελώς. Στους μικρούς ανεμοκινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως πολυουρεθάνη, υαλόνημα κα ξύλο, υλικά που δεν υποφέρουν από διάβρωση, αλλά έχουν όμως άγνωστη συμπεριφορά σε εναλλασσόμενη φόρτιση, φόρτιση που οδηγεί σε πρόωρη γήρανση του υλικού. Στους μεσαίου μεγέθους δρομείς, χρησιμοποιούνται υαλόνηματα με εναλλαγή της κατεύθυνσης των υαλονημάτων σε πολλές στρώσεις, ενώ στους μεγάλου μεγέθους ανεμοκινητήρες, χρησιμοποιείται η



Σχήμα 2.13β: Ενέργειες πεπερασμένου αριθμού πτερυγίων στους συντελεστές ισχύος και ώθησης.

τεχνολογία των ελίκων των αεροσκαφών (ανθρακονήματα με μηχανές αυτόματου τυλίγματος – Hamilton Standard) ή ακόμα και ξύλο ή και τεχνολογία πτερύγων αεροσκαφών.

Όσον αφορά το βήμα του πτερυγίου, υπάρχουν δρομείς με πτερύγια:

- Μεταβλητού βήματος.
- Σταθερού βήματος.

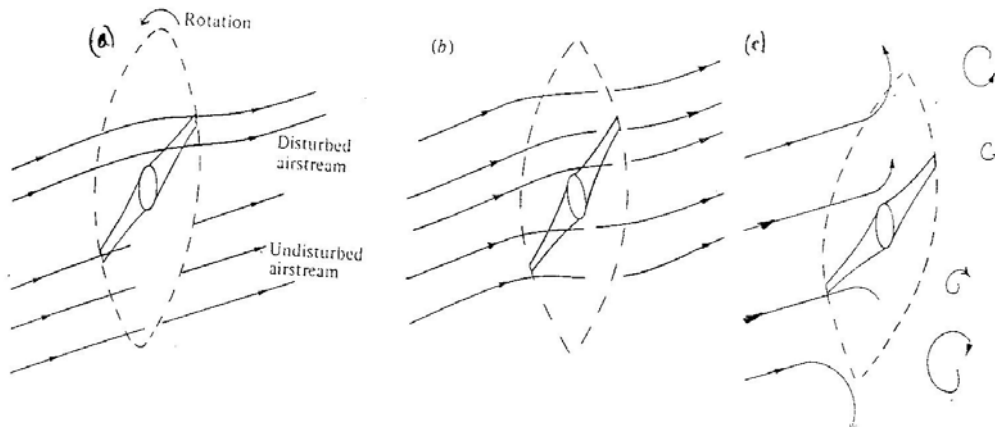
Η μηχανική ρύθμιση ισχύος σε μια ανεμογεννήτρια, έχει ως σκοπό να εξισορροπεί για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την ονομαστική, την ισχύ την παραγόμενη από την πτερύγωση με την ονομαστική ισχύ της εγκατάστασης (π.χ. γεννήτριας), ώστε η εγκατάσταση να μην υπερφορτίζεται.

2.14 ΛΟΓΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΟΡΥΦΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ (ΛΤΚ) Λ.

Το κριτήριο του Betz δίνει ένα αποδεκτό μέγιστο συντελεστή απόδοσης, αλλά δεν μας λέει τίποτε για την δυναμική περιστροφική κατάσταση της ανεμομηχανής, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση της. Μια ανεμομηχανή θα λειτουργεί με μειωμένη απόδοση εάν:

1. Τα πτερύγια είναι τόσο κοντά μεταξύ τους, ή περιστρέφονται πάρα πολύ γρήγορα, ώστε κάθε πτερύγιο να περιστρέφεται στην τύρβη του αέρα που δημιουργείται από το προηγούμενο πτερύγιο, ή.
2. Τα πτερύγια είναι τόσο μακριά μεταξύ τους, ή περιστρέφονται τόσο αργά, που ο περισσότερος αέρας να διέρχεται δια μέσω αυτών, χωρίς να έρχεται σε αλληλεπίδραση με κάποιο πτερύγιο.

Συνεπώς είναι απαραίτητο να προσαρμόζεται η συχνότητα περιστροφής των πτερυγίων με την εκάστοτε ταχύτητα του ανέμου, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο βέλτιστος συντελεστής απόδοσης της ανεμομηχανής.



Σχήμα 2.14α: Καταστάσεις μειωμένης απόδοσης ανεμομηχανής: α) Όταν τα πτερύγια στρέφονται με μικρή ταχύτητα ή είναι μακριά μεταξύ τους. β) Όταν τα πτερύγια στρέφονται κανονικά σε σχέση με την απόστασή τους. γ) Όταν τα πτερύγια είναι πολύ κοντά μεταξύ τους ή στρέφονται πολύ γρήγορα.

Η ισχύς η οποία αναπτύσσεται από την ανεμομηχανή, είναι συνάρτηση:

1. Του χρόνου t_b που κάνει ένα πτερύγιο για να πάει από την θέση που βρίσκεται μια δεδομένη στιγμή, στην θέση που είναι το επόμενο πτερύγιο και:
2. Του χρόνου t_w που μεσολαβεί για την αποκατάσταση διαταραχθέντος στρώματος αέρος κανονικής ροής. Ο χρόνος t_w μεταβάλλεται με το μέγεθος και την μορφή των πτερυγίων και επίσης μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου U_0 .

Για μια ανεμομηχανή με n πτερύγια, τα οποία περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα ω , ισχύει:

$$t_b \approx \frac{2\pi}{n\omega} \quad [2.72]$$

Μια διαταραχή στο στρώμα αέρος, που δημιουργείται από ένα πτερύγιο μέσα στην δυσχερή περιοχή περιστροφής των πτερυγίων, θα κινηθεί εκτός της περιοχής αυτής σε χρόνο t_w που δίνεται από την σχέση:

$$t_w = \frac{d}{U_0} \quad [2.73]$$

Όπου η απόσταση d είναι ένα μέτρο του μήκους ενός ισχυρά διαταραγμένου στρώματος αέρος, λόγω της εμπλοκής του με τα πτερύγια της ανεμομηχανής, μεταξύ του εμπρός και πίσω μέρους της περιοχής περιστροφής των πτερυγίων.

Η μέγιστη ισχύς αποσπάται από την μηχανή όταν $t_b \approx t_w$ στην κορυφή των πτερυγίων, όπου περιγράφεται το μέγιστο τμήμα της επιφάνειας από τα πτερύγια. Επομένως θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{n\omega}{U_0} \approx \frac{2\pi}{d} \quad [2.74]$$

Εάν πολλαπλασιάσουμε και τα δύο μέλη της εξίσωσης με R, που είναι η ακτίνα του κύκλου που περιγράφεται από τα πτερύγια και ορισθεί ο λόγος ταχύτητας κορυφής (ΛTK), λ:

$$\lambda = \frac{\text{ταχύτητα} \cdot \text{κορυφής}}{\text{ταχύτητα} \cdot \text{ανέμου}} = \frac{R\omega}{U_0} \quad [2.75]$$

οπότε για μέγιστη ισχύ προκύπτει:

$$\lambda \approx \frac{2\pi}{n} \left(\frac{R}{d} \right) = \frac{2\pi}{kn} \quad [2.76]$$

όπου το d αντικαταστάθηκε με k*R.

Πρακτικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι για $k \approx 1/2$ έχουμε μέγιστη ισχύ και συνεπώς μια ανεμομηχανή με n πτερύγια ισχύει:

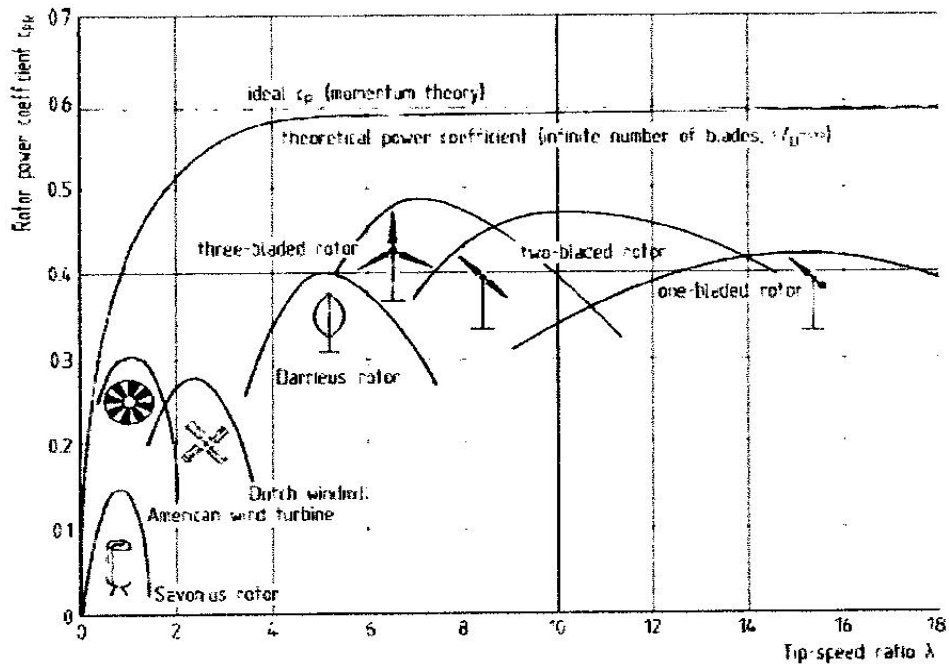
$$\lambda_0 \approx 4\pi/n \quad [2.77]$$

Οι παραπάνω σχέσεις δεν βασίζονται σε αυστηρές θεωρητικές αναλύσεις, αλλά παρ' όλα αυτά περιγράφουν τα πιο σπουδαία φαινόμενα. Με προσεκτικά σχεδιασμένες αεροτομές, η βέλτιστη τιμή του (λ_0) μπορεί να είναι και 30% πάνω από αυτές τις τιμές.

Επίσης ο συντελεστής (λ) σχετίζεται με την εφαπτομένη της γωνίας προσπτώσεως του ανέμου ως προς τα κινούμενα πτερύγια. Συνεπώς το κριτήριο του σταθερού (λ) για βέλτιστη απόδοση, μπορεί να ερμηνευτεί ως η ανάγκη να κρατήσουμε σταθερή την γωνία ϕ , ανεξάρτητα της ταχύτητας του ανέμου.

Το κριτήριο απόδοσης του Betz που αναπτύχθηκε παραπάνω, δεν λαμβάνει υπόψη του δυναμικές επιδράσεις. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες θεωρίες οι οποίες χρησιμοποιούν τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις (ανωστική και οπισθέλκουσα), που εμφανίζονται σε κάθε στοιχειώδες τμήμα του πτερυγίου κατά την ροή του ανέμου γύρω απ' αυτό.

Κάθε τμήμα του πτερυγίου περιστρέφεται με διαφορετική ταχύτητα και συνεπώς η γωνία προσβολής (α^0), αλλάζει κατά μήκος του πτερυγίου. Για να επιτευχθεί μια γωνία προσβολής βέλτιστη καθ' όλο το μήκος του πτερυγίου (μέγιστος λόγος άνωσης προς οπισθέλκουσα), θα πρέπει ο κατασκευαστής να εισαγάγει στα πτερύγια κατάλληλη συστροφή (διαφορετική γωνία κλίσης). Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν διάφορες άλλες τεχνικές, οι οποίες να αντανakλούν τις διαφορετικές κατασκευαστικές και αεροδυναμικές ιδιαιτερότητες της συμπεριφοράς του πτερυγίου στα διάφορα τμήματά του. Στο σχήμα 2.14β δείχνεται η μεταβολή του συντελεστή C_p σε σχέση με τον συντελεστή (λ) για διάφορους τύπους ανεμοκινητήρων.



Σχήμα 2.14β: Συντελεστής ισχύος C_p σε συνάρτηση του λ .

2.15 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΔΡΟΜΕΑ

Ως βέλτιστος δρομέας μπορεί να ορισθεί ο δρομέας δοσμένης διαμέτρου, που έχει ελάχιστο κόστος παραγόμενης αιολικής KWh. Στην διαμόρφωση του κόστους, σημαντική επίδραση έχει η ετήσια παραγόμενη αιολική ενέργεια και το κόστος του δρομέα. Το κόστος του δρομέα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μπορούμε όμως να δεχθούμε ότι είναι ανάλογο των διαστάσεων των πτερυγίων, δηλαδή της στερεότητας του δρομέα. Οι εξισώσεις που εκφράζουν τις συνθήκες λειτουργίας του δρομέα, έχουν εκτός των τριών αγνώστων a , a' , C_L , επιπλέον αγνώστους την στερεότητα σ , τον τρόπο μεταβολής της χορδής του πτερυγίου (π.χ. σταθερή χορδή δηλαδή ορθογωνικής μορφής κάτοψη ή τραπεζοειδούς μορφής κάτοψη πτέρυγας), την γωνία β θέσης της αεροτομής και την ταχύτητα ακροπτερυγίου. Είναι φανερός συνεπώς ο πολυπαραμετρικός χαρακτήρας της αεροδυναμικής βελτιστοποίησης του δρομέα, βελτιστοποίηση που μπορεί σήμερα να γίνει ακόμα και χωρίς αλγοριθμική καθοδήγηση από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή (συνδυασμός των δυνατών τιμών των παραμέτρων σ , β , λ , μορφής κάτοψης). Είναι όμως δυνατόν να μειωθούν οι δυνατοί συνδυασμοί των ανεξαρτήτων παραμέτρων, εισάγοντας κριτήρια βελτιστοποίησης που να οδηγήσουν την αριθμητική διαδικασία.

Ο συντελεστής ισχύος του δρομέα δίνεται από την σχέση:

$$\bar{C}_p = \int_0^1 C_p dx$$

Είναι φανερό ότι η ενεργειακή απόδοση του δρομέα εξαρτάται από τις παραμέτρους a και a' . Ο συντελεστής ισχύος για συγκεκριμένη ταχύτητα ακροπτερυγίου

, μπορεί να μεγιστοποιηθεί αν υπάρξει κάποια σχέση εξάρτησης μεταξύ των συντελεστών επαγωγής. Ο Glauert εξετάζοντας τον ιδανικό δρομέα με άπειρο

αριθμό πτερυγίων, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι θα πρέπει η επαγόμενη ταχύτητα να είναι κάθετη στην συνισταμένη ταχύτητα W του ρευστού, βλέπε τρίγωνο ταχυτήτων, Σχήμα 2.6β, σελ. 25. Με την παρατήρηση αυτή και για άπειρο αριθμό πτερυγίων, ισχύουν οι σχέσεις (από τρίγωνο ταχυτήτων)

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

Άρα για τον ιδανικό δρομέα ισχύει η επιπλέον σχέση

$$(1+a'^2)\lambda^2 x^2 = a(1-a) \quad [2.72]$$

Με την δεσμευτική αυτή σχέση και μετά από μαθηματική ανάλυση μεγιστοποίησης του ολοκληρώματος για τον τελεστή ισχύος του δρομέα, προκύπτει ότι για τον βέλτιστο δίσκο ενέργειας ισχύει η σχέση

$$\alpha' = \frac{1-3\alpha}{4\alpha-1} \quad [2.73]$$

οπότε προκύπτει και η σχέση:

$$\alpha'\lambda^2 x^2 = (1-a)(4a-1) \quad [2.74]$$

Συνοψίζοντας την διαδικασία βελτιστοποίησης του δίσκου κατά Glauert, οι τρεις λειτουργικές σχέσεις, καθώς και οι σχέσεις (2.73) – (2.74) με αγνώστους τα a , a' , C_L , β και C μπορούν να επιλυθούν με επαναληπτική διαδικασία και να οδηγήσουν στον βέλτιστο δρομέα. Στον βέλτιστο αυτόν δρομέα για «άπειρο πλήθος πτερυγίων», ο μέγιστος συντελεστής ισχύος προκύπτει για $a=1/3$, οπότε η περιφερειακή ταχύτητα μεταβάλλεται σύμφωνα με την σχέση:

$$V_{\theta_s} = \frac{4U^2}{9\Omega r}$$

Τα προηγούμενα ισχύουν για μεγάλο αριθμό πτερυγίων δρομέα (π.χ. δρομέας Καναδικού τύπου). Για μικρό πλήθος πτερυγίων επιδιώκεται η **μεγιστοποίηση του τοπικού συντελεστή ισχύος $C_p(r)$ σε κάθε ακτινική θέση**.

Πράγματι η σχέση

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

οδηγεί μετά από πράξεις στην συνθήκη βέλτιστου

$$\alpha = \frac{1}{2 + \frac{1}{\cos \varphi}} \quad (\text{για } \varepsilon = 0) \quad [2.75]$$

Η συνθήκη αυτή αν συνδεθεί με τις τρεις λειτουργικές σχέσεις (2.58) (2.59) (2.60) επιτρέπει τον υπολογισμό των μεγεθών a , a' , C_L και β με ανεξάρτητες παραμέτρους την στερεότητα, την μορφή κάτοψης της πτέρυγας και την ταχύτητα ακροπτερυγίου.

Συνήθως η κάτοψη της πτέρυγας είναι ορθογωνική ή τραπεζοειδής, με λόγο χορδής ακροπτερυγίου προς χορδή πλήμνης ίσον με 0.5.

Με βάση τα προηγούμενα δεν είναι πλέον δύσκολη η σύγχρονη αριθμητική επίλυση των εξισώσεων βελτιστοποίησης του δρομέα, με την βοήθεια αλγορίθμου, βασισμένου σε επαναληπτική διαδικασία δοκιμών. Παράμετροι της

βελτιστοποίησης είναι η στερεότητα και η ταχύτητα ακροπτερυγίου. Είναι φανερό ότι ο βέλτιστος δρομέας είναι εκείνος με την μέγιστη ετήσια ενεργειακή απόδοση, αφού βέβαια σταθμιστεί η συμβολή της στερεότητας στην διαμόρφωση του κόστους κατασκευής του δρομέα.

2.16 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΡΟΜΕΑ Α/Κ

Η ενεργειακή απόδοση του δρομέα ανεμοκινητήρα, εκφράζεται από την καμπύλη συντελεστή ισχύος C_p και της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ ($\lambda = \omega R/V$), όπου ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, R η ακτίνα του και V η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα. Τυπική καμπύλη $C_p(\lambda)$, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.16α.

Η ροπή περιστροφής M που αναπτύσσει ο δρομέας και η οποία έχει πρωταρχική σημασία για την κίνηση της μηχανής εκτέλεσης έργου (π.χ. γεννήτρια, αντλία, συμπιεστής), ισούται με:

$$M = \frac{P}{\omega}$$

όπου P η ισχύς του δρομέα και ω η γωνιακή ταχύτητά του. Αλλά

$$P = C_p \frac{\rho}{2} V^3 \frac{\pi}{4} D^2$$

ορίζεται συντελεστής ροπής

$$C_M = \frac{M}{\frac{\rho}{2} V^2 \frac{\pi}{4} D^2 R}$$

Οπότε από την σχέση ορισμού της ροπής προκύπτει

$$C_M = \frac{C_p}{\lambda}$$

Τυπική μεταβολή της σχέσης συντελεστή ροπής C_M και ταχύτητας ακροπτερυγίου, παρουσιάζεται στο ίδιο Σχήμα 2.16α.

Ένας δρομέας Α/Κ εργάζεται σε διάφορες ταχύτητες ανέμου, η δε γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του, επιβάλλεται από τον κινούμενο μηχανισμό παραπέρα μετατροπής του έργου. Για παράδειγμα, αν ο δρομέας κινεί ασύγχρονη ηλεκτρική γεννήτρια, τότε η συχνότητα του δικτύου επιβάλλει τις στροφές στην γεννήτρια (με κάποια μικρή ολίσθηση), οι οποίες με την σειρά τους, ανάλογα με το κιβώτιο ταχυτήτων μεταξύ δρομέα και ηλεκτρικής γεννήτριας, επιβάλλονται στον δρομέα.

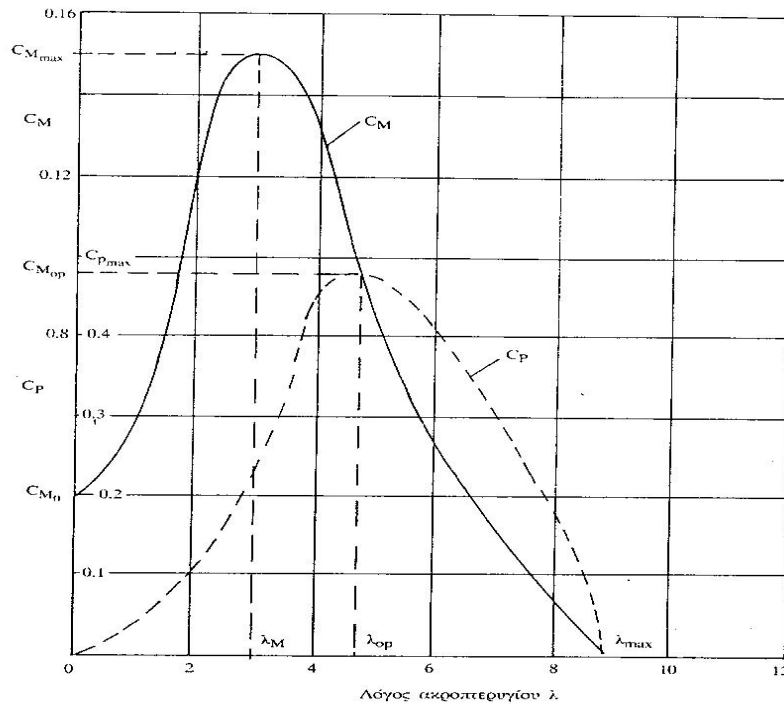
Στην περίπτωση που ο δρομέας κινεί αντλία, τότε η χαρακτηριστική της αντλίας σε συνδυασμό με την χαρακτηριστική αντίσταση του δικτύου, επιβάλλουν τις στροφές στον δρομέα του ανεμοκινητήρα.

Συνεπώς, για τον υπολογισμό του σημείου λειτουργίας του ανεμοκινητήρα, απαιτείται η γνώση των καμπυλών λειτουργίας του ανεμοκινητήρα, όπως αυτές εκφράζονται από σχέσεις της μορφής:

$$P = P(V, n)$$

$$M = M(V, n)$$

όπου (n) οι στροφές του δρομέα του Α/Κ.



Σχήμα 2.16α: Τυπικές καμπύλες C_M και C_P ενός ανεμοκινητήρα τριών πτερυγίων οριζοντίου άξονα.

Οι καμπύλες αυτές είναι εύκολο να προκύψουν από την καμπύλη του συντελεστή ισχύος $C_P(\lambda)$ του Α/Κ. Για παράδειγμα, από τις σχέσεις ισχύος ή ροπής και ταχύτητας

$$P = C_P \frac{\rho}{2} V^3 \frac{\pi}{4} D^2$$

$$M = C_M \frac{\rho}{2} V^2 \frac{\pi}{4} D^2 R$$

μπορεί να προκύψει η καμπύλη λειτουργίας της μηχανής για διάφορα V με παράμετρο τις στροφές, διότι για δοσμένη περιστροφική ταχύτητα n (rpm), υπολογίζεται η ταχύτητα ακροπτερυγίου $\lambda = 2\pi n R / 60 V$, από την σχέση $C_P(\lambda)$, η τιμή του συντελεστή του συντελεστή ισχύος και στην συνέχεια η ισχύς ή η ροπή του Α/Κ.

2.17 ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ

2.17α ΓΕΝΙΚΑ

Οι άνεμοι αποτελούν κίνηση αέριας μάζας στην ατμόσφαιρα, που κατά κύριο λόγο προκαλείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Ειδικότερα είναι αποτέλεσμα των θερμοκρασιακών διαφορών, που δημιουργούνται στην τροπόσφαιρα, είτε λόγω γεωγραφικού πλάτους, είτε λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς της επιφάνειας της

γης. Οι διαφορετικές γεωγραφικές θερμοκρασίες οφείλονται σε δύο κυρίους παράγοντες:

- ✓ Υψομετρική διαφορά δύο σημείων.
- ✓ Διαφορετική φύση της επιφάνειας (έδαφος ή νερό - στεριά ή θάλασσα).

Οι άνεμοι που δημιουργούνται λόγω διαφορετικού γεωγραφικού πλάτους, είναι φαινόμενα σχεδόν σταθερά ή μεταβλητά, με μεγάλη περίοδο μεταβολής (εποχιακά). Λόγω των μεγάλων γεωγραφικών αποστάσεων που καλύπτουν οι κινήσεις αυτές, καθώς και της μεγάλης ατμοσφαιρικής μάζας που μετακινείται, τα φαινόμενα αυτά επηρεάζονται και από την περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της.

Οι άνεμοι που οφείλονται στον δεύτερο παράγοντα, χαρακτηρίζονται από μικρή χρονική διάρκεια (ωριαία ή ημερήσια) και παρατηρούνται είτε κοντά σε ορεινούς όγκους, σε κοιλάδες ή σε λεκανοπέδια, είτε σε περιοχές κοντά σε θάλασσα ή λίμνη που υπάρχει διαφορετικός ρυθμός θέρμανσης ή ψύξης του εδάφους και του υδάτινου όγκου.

Η ένταση των τοπικών ανέμων και τα φαινόμενα που συνδέονται μ' αυτούς, εντείνονται ή εξασθενούν ανάλογα με τους συνοπτικούς ανέμους της πρώτης κατηγορίας.

Στην Ευρώπη, οι άνεμοι που πνέουν επηρεάζονται από τα ανατολικά ρεύματα του Ατλαντικού, τα ψυχρά βόρεια και τα θερμά τροπικά της Σαχάρας. Έτσι οι επικρατούντες άνεμοι είναι για μεν το χειμώνα οι Νοτιοδυτικοί, ενώ για το καλοκαίρι οι Δυτικοί και Βορειοδυτικοί. Ως προς την ένταση, οι άνεμοι της χειμερινής περιόδου είναι ισχυρότεροι, καθώς το καλοκαίρι τα τοπικά συστήματα, όπως οι θαλάσσιες αύρες, έχουν μεγαλύτερη ένταση και μειώνουν την επίδραση του συνοπτικού πεδίου..

Οι Δυτικοί και Βορειοδυτικοί άνεμοι επικρατούν κατά κύριο λόγο στον χώρο της Μεσογείου, καθώς στην περιοχή αυτή, το γενικό πεδίο υφίσταται μικρότερη επίδραση από τα βόρεια ρεύματα που πνέουν από την Ρωσία. Παρ' όλα αυτά, όμως, τα έντονα τοπικά συστήματα στις παράκτιες περιοχές μεταβάλλουν πολλές φορές την γενική αυτή κατεύθυνση των ανέμων.

Στον Ελλαδικό χώρο, λόγω και της μορφολογίας της Βαλκανικής Χερσονήσου, την χειμερινή περίοδο επικρατούν τοπικοί Βόρειοι-Βορειοανατολικοί άνεμοι, η ένταση των οποίων είναι μέση έως ισχυρή, την άνοιξη γίνονται νοτίων διευθύνσεων, ισχυρής επίσης έντασης, ενώ το καλοκαίρι η ένταση των ανέμων πέφτει, με συνέπεια πολλών ημερών με νηνεμία.

Η ενέργεια που η αέρια μάζα λαμβάνει από τον ήλιο, εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος, που η διαφοροποίηση στην θέρμανση εδάφους οδηγεί στην δημιουργία κλίσεων πίεσης, που μαζί με τις δυνάμεις Coriolis και τις φυγοκεντρικές, εξισορροπούν τις αδρανειακές δυνάμεις.

Από ιστορικούς λόγους έχει επικρατήσει στους μετεωρολόγους η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου στην κλίμακα Beaufort, αντί του σωστού σε m/sec. Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η αντιστοιχία κλίμακας ταχυτήτων ανέμου σε Beaufort, με το διάστημα ταχυτήτων ανέμου σε m/sec, στο οποίο κάθε κλίμακα αντιστοιχεί. Επίσης στον πίνακα 2.17.1, παρουσιάζονται και διάφορες ενδείξεις, που χαρακτηρίζουν την ταχύτητα σε Beaufort.

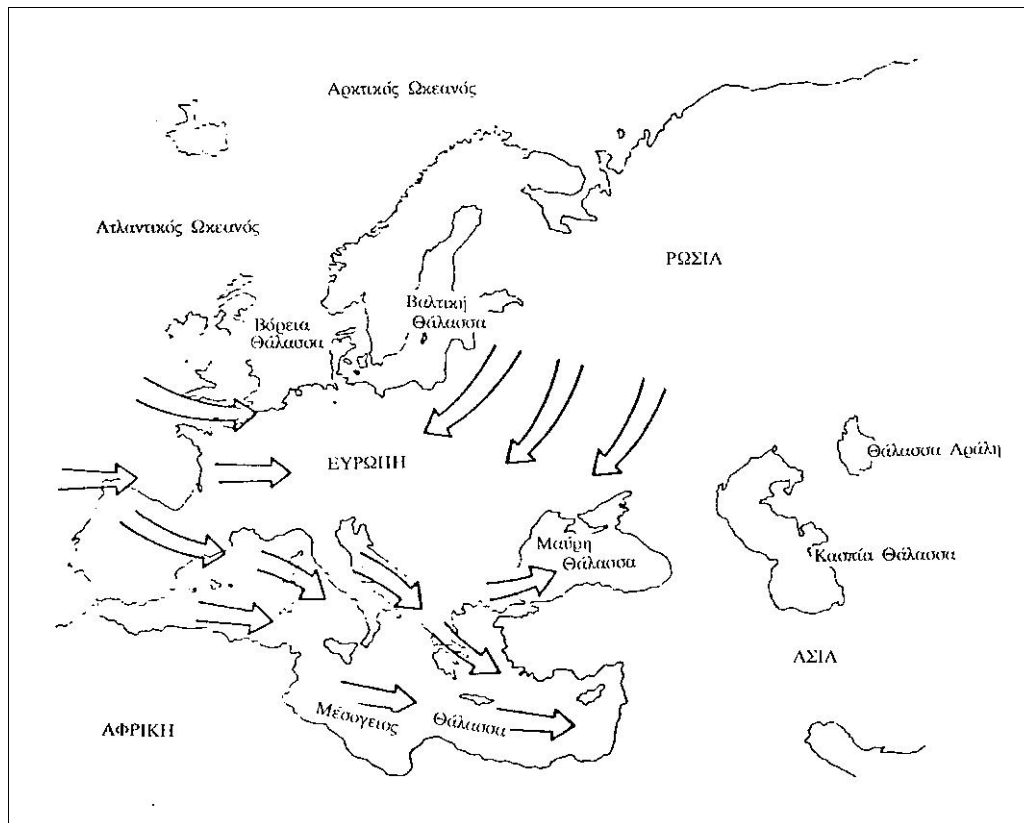
Beauf	Ταχύτητα (m/sec)	Μέση ταχ. (m/sec)	Ταχύτητα (knotts)	Ταχύτητα (mph)	Ταχύτητα (km/h)	Ονομασία	Ενδείξεις
0	0 - 0.2	0.1	κάτω του 1	κάτω του 1	κάτω του 2	Νηνεμία	Κάθετη άνοδος καπνού
1	0.3 - 1.5	0.9	1 - 3	1 - 3	2 - 6	Ελαφρός αέρας	Η διεύθυνση φαίνεται από καπνό. Όχι από ανεμοδείκτη
2	1.6 - 3.3	2.45	4 - 6	4 - 7	7 - 11	Ήλια αύρα	Γίνεται αισθητή στο πρόσωπο. Η διεύθυνση από ανεμοδείκτη
3	3.4 - 5.4	4.40	7 - 10	8 - 12	12 - 19	Μέτρια αύρα	Ξεδιπλώνει λεπτό ύφασμα (σημαία)
4	5.5 - 7.9	6.70	11 - 16	13 - 18	20 - 30	Δροσερή αύρα	Σηκώνει σιόνη. Τα μικρά κλαδιά κινούνται
5	8 - 10.7	9.35	17 - 21	19 - 24	31 - 40	Ισχυρή αύρα	Τα μικρά δένδρα ταλαντώνται
6	10.8 - 13.8	12.3	22 - 27	25 - 31	41 - 50	Μέτριος άνεμος	Μεγάλα κλωνάρια σε κίνηση. Σφουρίζουν τα καλώδια του τηλεγράφου
7	13.9 - 17.1	15.5	28 - 33	32 - 38	51 - 60	Μέσος άνεμος	Όλα τα δένδρα κινούνται
8	17.2 - 20.7	18.95	34 - 40	39 - 46	62 - 74	Ισχυρός άνεμος	Μικρά κλαδιά σπάζουν, εμποδίζεται το βάδισμα
9	20.8 - 24.4	22.6	41 - 47	47 - 54	75 - 87		Κίνδυνος για ελαφρές κατασκευές
10	24.5 - 28.4	26.45	48 - 55	55 - 63	88 - 102		Ξεριζώνει δένδρα
11	28.5 - 32.6	30.55	56 - 65	64 - 75	103 - 120	Θύελλα	
12	32.7 - 36.9	34.8	> 65	> 75	> 120	Καταιγίδα	

Πίνακας 2.17.1: Μετατροπή της κλίμακας Beaufort.

2.17β ΠΡΟΤΥΠΑ ΑΝΕΜΟΥ

Για να σχεδιάσουμε έναν ανεμοκινητήρα κατάλληλα, είναι αναγκαίο να χαρακτηρίσουμε τους ανέμους σε ποιον απ' αυτούς θα δουλεύει αυτός. Τα απαιτούμενα στοιχεία του ανέμου που απαιτούνται για να στηρίζουν το υπάρχων πρόβλημα που απευθύνονται, και ποικίλουν τα πρότυπα για την εκτίμηση απόδοσης, για την ανάλυση της ριπής ανέμου, για την σπουδή της καταπόνησης, για την ανάλυση των κραδασμών, και για τον σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου.

Για την ανάλυση της απόδοσης, οι ταχύτητες των ανέμων χαρακτηρίζονται από τις κατανομές ταχυτήτων τους σε σχέση με τον χρόνο. Για την ανάλυση της κατασκευής του δρομέα απαιτείται να καταγράφονται οι χειρότερες καταστάσεις των ανέμων, και να είναι γνωστό το φάσμα συχνότητας σε κανονικές ή περιστρεφόμενες συντεταγμένες, και τα πρότυπα διακριτών ριπών. Επειδή συγκεκριμένες καταστάσεις ασταθούς ροής δεν έχουν καλώς κατανοηθεί, αντιμετωπίζονται δυσκολίες στον χαρακτηρισμό του μεγέθους και της συχνότητας των αεροδυναμικών δυνάμεων όπου η ροή δεν καθορίζεται καλώς, τέτοια όπως στο καθεστώς της απώλειας στήριξης (stall). Ο σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου διευκολύνεται με την εκτίμηση αμφοτέρων των δεδομένων, της συχνότητας και κατανομής στην ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου. Έτσι γίνεται φανερό ότι τα πολλά διαφορετικά πρότυπα συμπεριφοράς του ανέμου, μπορούν να φανούν χρήσιμα στον σχεδιασμό.

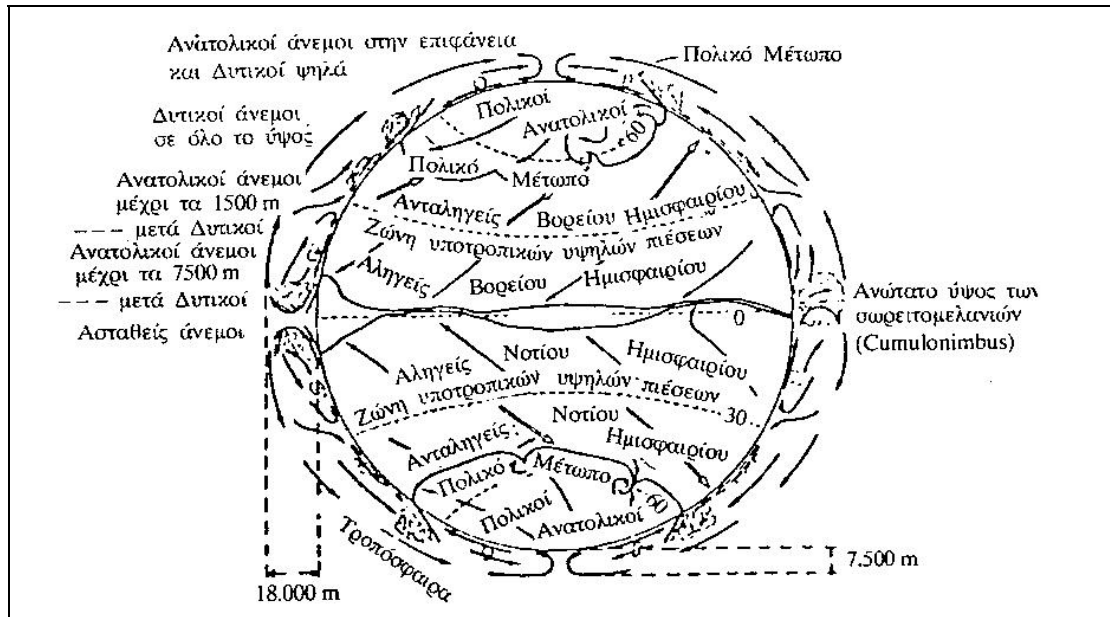


Σχήμα 2.17β1: Οι συνοπτικοί άνεμοι που κατά κύριο λόγο πνέουν στην Ευρώπη.

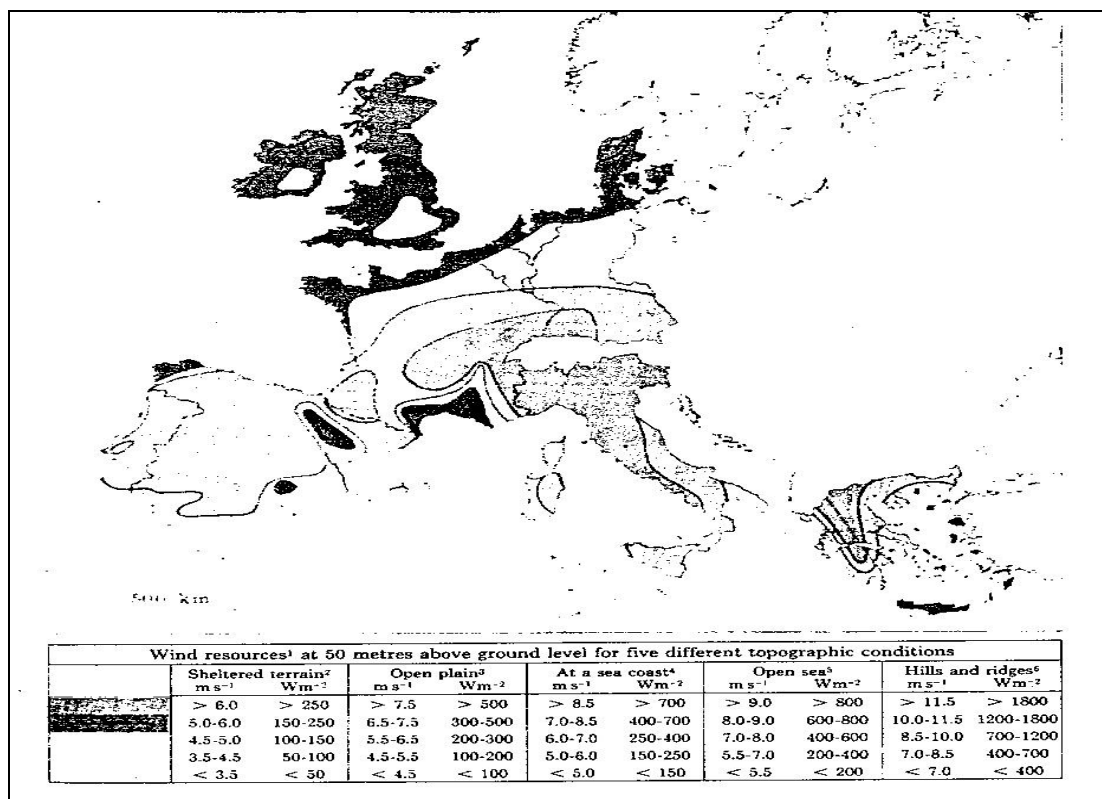
Τα χαρακτηριστικά του ανέμου ίσως μπορούν να απεικονισθούν καλύτερα με σταθερές συντεταγμένες. Στην κατασκευαστική ανάλυση, οπωσδήποτε, οι αεροδυναμικές δυνάμεις και ροπές μπορούν να απεικονισθούν καλύτερα με συντεταγμένες σχετικές με το πτερύγιο. Άρα, οι διάφορες ταχύτητες του ανέμου υφίστανται έναν πρόσθετο μετασχηματισμό που εξαρτάται από την ταχύτητα του πτερυγίου και αμφότερα τα χαρακτηριστικά τους του χρόνου και της συχνότητας κατανομής αλλάζουν στην μέθοδο, σαν να ήταν στερνή συζήτηση.

Σωστά όπως ένα οριακό στρώμα υπάρχει σε μια αεροτομή, έτσι το ίδιο υπάρχει στην επιφάνεια της γης. Το στρώμα αυτό ποικίλει σε πάχος και συμπεριφορά, εξαρτώμενο από την τραχύτητα της επιφάνειας κατά τον ίδιο τρόπο όπως πάνω στην αεροτομή. Επομένως, το οριακό στρώμα μπορεί να είναι ένα κλάσμα της ίντσας (ή μερικά χιλιοστά του μέτρου) παχύ, όπου στην γη το οριακό στρώμα μπορεί να είναι 1500 πόδια (ή 450 m) παχύ. Η μελέτη της απόκλισης της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος του πύργου δεν είναι τίποτε παραπάνω από τον χαρακτηρισμό της κλίσης της ταχύτητας του τοπικού οριακού στρώματος. Ενώ πάνω σ' αυτό το αντικείμενο, θα έπρεπε να σημειωθεί ότι σε μερικές περιοχές, οι παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι οι ταχύτητες του ανέμου δεν αυξάνονται πάνω από το ύψος της και πλήμνη και μπορεί ακόμη να μειωθεί, πρέπει να παρατηρείται η οφειλόμενη αιτία.

Πολύ καλές απόψεις για τις περιγραφές του ανέμου, δόθηκαν κατά καιρούς από τους Golding, Putman, και Holets.



Σχήμα 2.17β2: Πεδίο κυκλοφορίας των ανέμων στην επιφάνεια της γης.

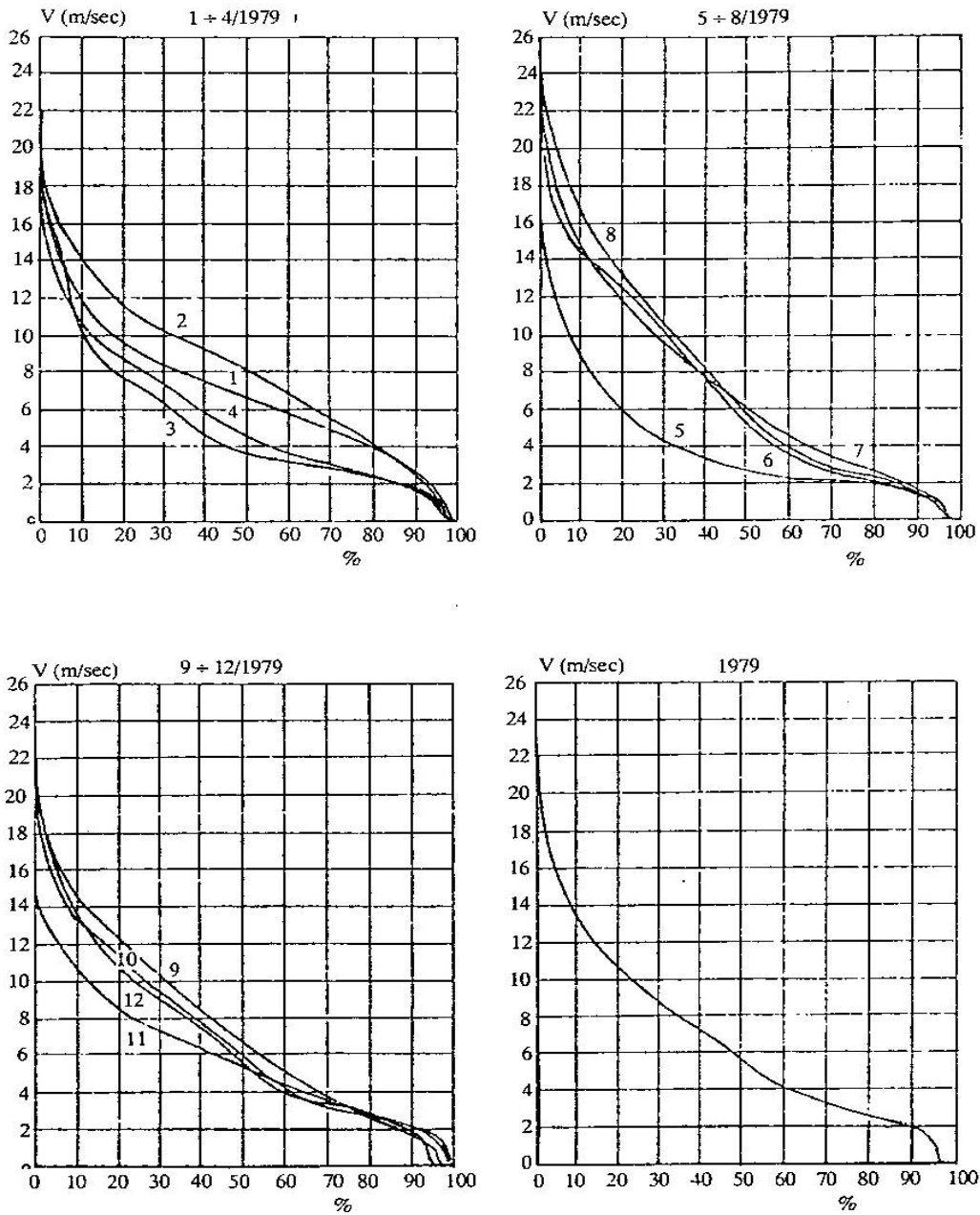


Σχήμα 2.17β3: Ευρωπαϊκός αιολικός χάρτης.

2.17γ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ.

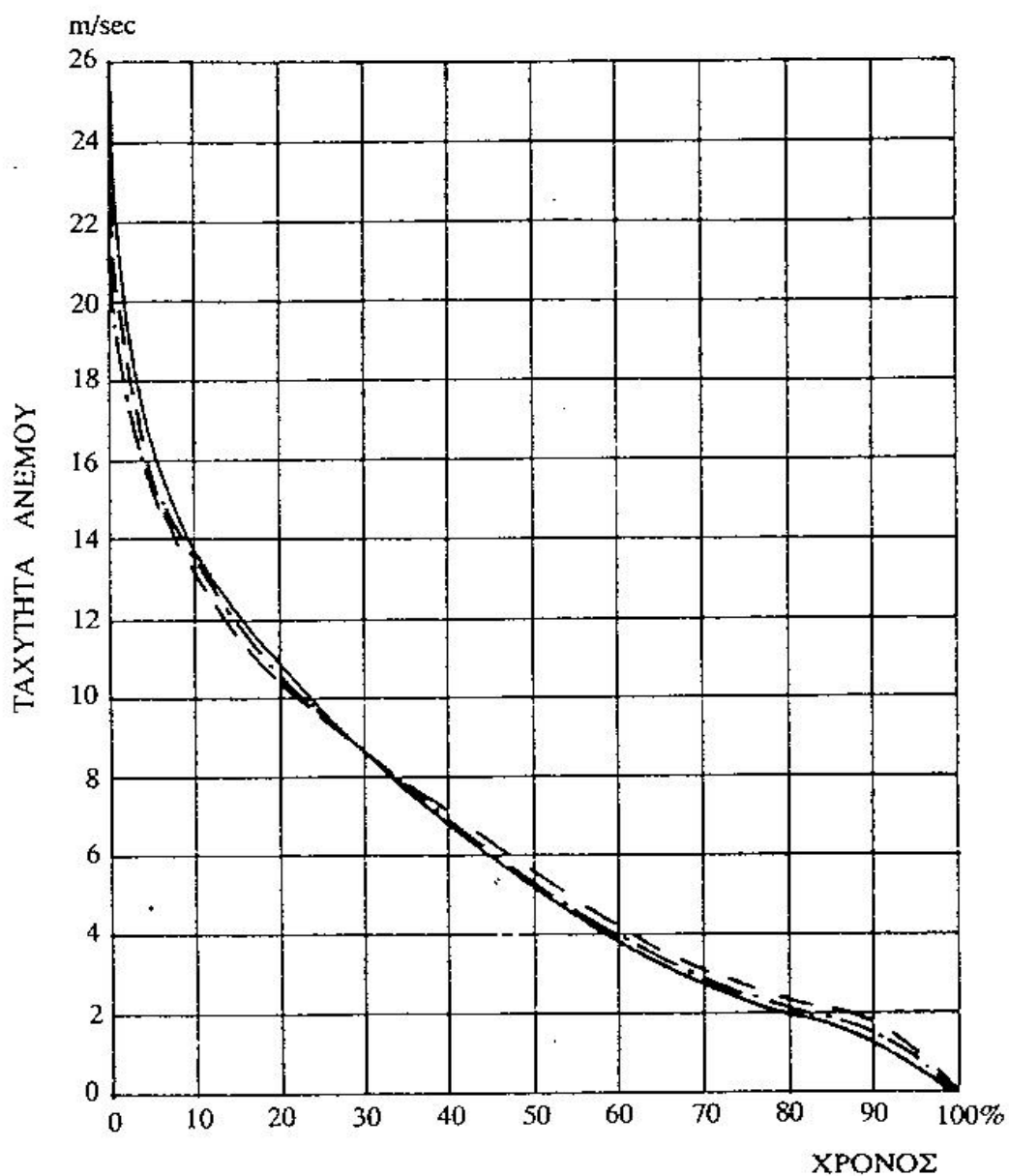
Η εποχιακή διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου, αποτελεί χρήσιμο στοιχείο για τον υπολογισμό της εποχιακής ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας και της ποιότητας προσαρμογής της καμπύλης ενεργειακής παραγωγής και ζήτησης. Τυπική καμπύλη μεταβολής φαίνεται στο σχήμα 2.17γ1.

ΣΤΑΥΡΟΠΕΔΑ ΑΝΔΡΟΥ



Σχήμα 2.17γ1: Εποχιακές καμπύλες διάρκειας πνοής ανέμου.

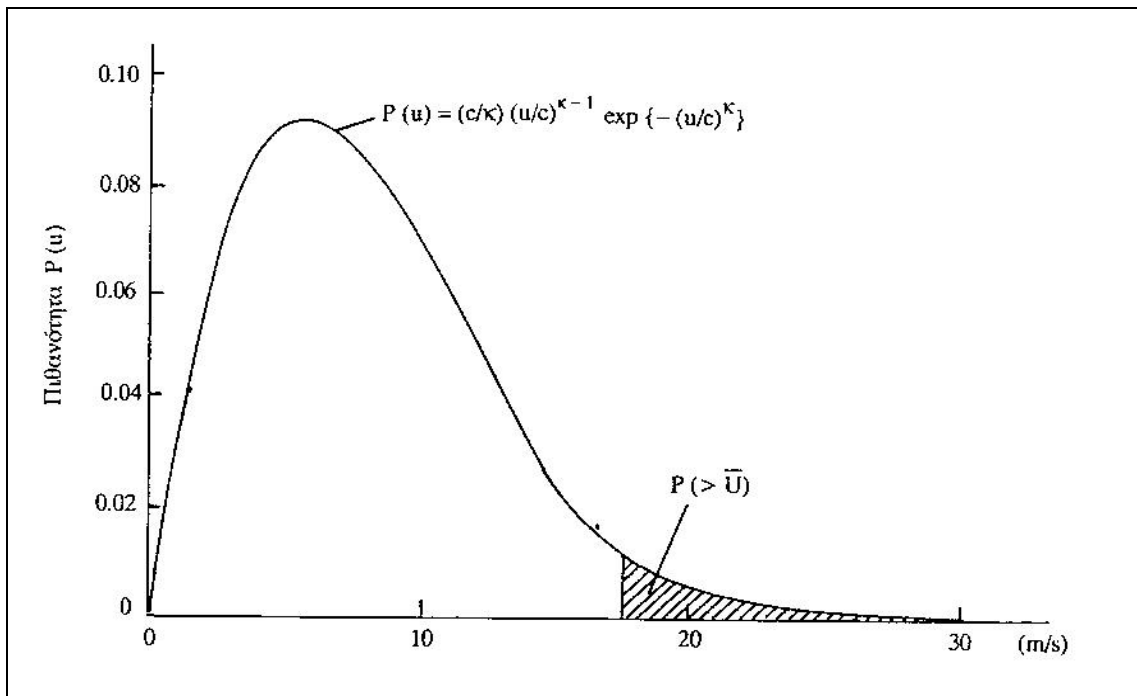
Η διάρκεια πνοής του ανέμου είναι από τα πλέον απαραίτητα στοιχεία που πρέπει να είναι γνωστά στην θέση εγκατάστασης της μηχανής. Η καμπύλη διάρκειας πνοής ανέμου, τυπική μεταβολή της οποίας φαίνεται στο σχήμα 2.17γ1, εκφράζει το ποσοστό του χρόνου (π.χ. τις ώρες του έτους από τις 8760), για τις οποίες πνέει άνεμος ταχύτητας μεγαλύτερης μιας συγκεκριμένης τιμής. Η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας ταχύτητας $P(V)$ αποτελεί με άλλη καμπύλη ισοδύναμη με την καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου και εκφράζει την πυκνότητα πιθανότητας ο άνεμος να έχει ταχύτητα μεταξύ $V - dV/2$ και $V + dV/2$. Είναι φανερό ότι η δεύτερη, τυπική μορφή της η οποία φαίνεται στο σχήμα 2.17γ2, μπορεί να προκύψει με παραγωγή της πρώτης.



ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ
ΑΝΔΡΟΣ

- ΙΟΥΝΙΟΣ 1977 + ΜΑΪΟΣ 1978
- - - - - ΙΟΥΝΙΟΣ 1978 + ΜΑΪΟΣ 1979
- · - · - · ΙΟΥΝΙΟΣ 1979 + ΜΑΪΟΣ 1980

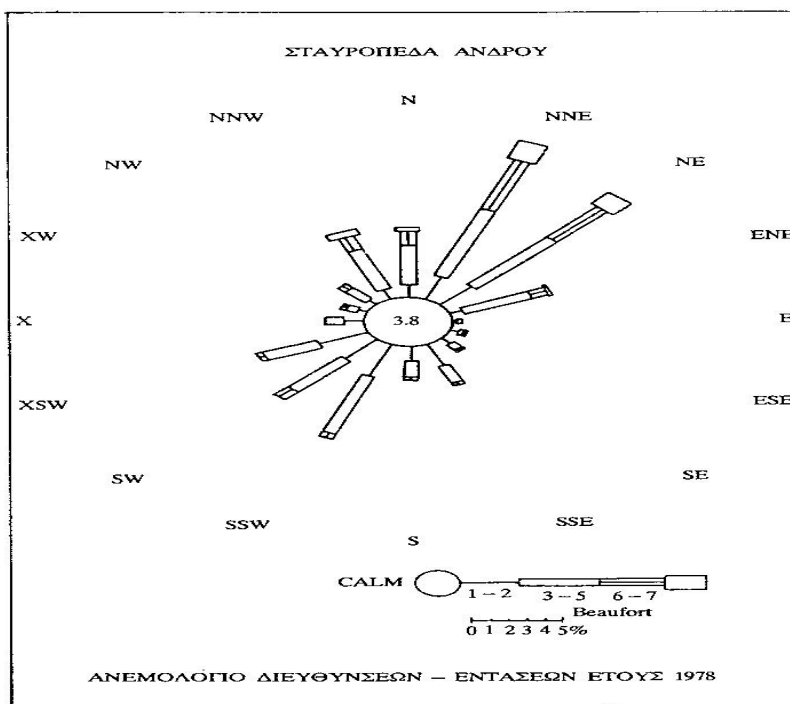
Σχήμα 2.17γ2: Τυπική καμπύλη διάρκειας πνοής ανέμου.



Σχήμα 2.17γ3: Πυκνότητα πιθανότητας κατανομής μέσης ταχύτητας.

Το εμβαδόν της επιφάνειας που ορίζεται κάτω από τις καμπύλες διάρκειας πνοής ανέμου και πυκνότητας πιθανότητας είναι ίσο με την μονάδα.

Ο πίνακας διπλής εισόδου συχνότητας πνοής ανά διεύθυνση μπορεί να παρασταθεί γραφικά με το ροδόγραμμα ανέμου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17γ4. Το ροδόγραμμα της θέσης είναι αρκετά εποπτικό διάγραμμα, που δίνει αμέσως την κατεύθυνση ανέμου που επικρατεί στην περιοχή και την διάρκεια πνοής ανέμου από κάθε κατεύθυνση. (Τα διαγράμματα προέρχονται από μετρήσεις της Διεύθυνσης Εναλλακτικών Μορφών ενέργειας της ΔΕΗ).



Σχήμα 2.17γ4: Ροδόγραμμα πνοής ανέμου.

2.17δ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να προσεγγίσουμε τις απαιτήσεις των στοιχείων του ανέμου για τον σχεδιασμό του δρομέα ενός ανεμοκινητήρα. Εάν ένας δρομέας είναι να σχεδιασθεί για μία ιδιαίτερη περιοχή, λεπτομερείς μετρήσεις επαρκούν για το υπολογισμό της περιεχόμενης ενέργειας των ανέμων στην προτεινόμενη περιοχή, και στο προτεινόμενο υψόμετρο της πλήμνης πάνω απ' το έδαφος για έναν αριθμό ετών, θα πρέπει να χρειάζονται. Με τέτοια δεδομένα, θα είναι δυνατόν να προσφερθεί ένας δρομέας να αναπτύσσει την απαιτούμενη ισχύ απ' αυτούς τους ανέμους.

Πολύ συχνά, ένας κατασκευαστής προτιμά να έχει έναν σχεδιασμό ο οποίος θα δίνει ικανοποιητική απόδοση για ολόκληρη την τάξη των περιοχών του ανέμου. Σε άλλη περίπτωση, είναι επιθυμητό να διευθετείται σειρά κύριου σχεδιασμού των διανομών της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό μπορεί μετά να χρησιμοποιηθεί στην διαδικασία σχεδιασμού αμφότερα και για την εκτίμηση απόδοσης και για την οικονομική ανάλυση.

Η εταιρεία Justus et al, έχει αναλύσει δεδομένα ταχύτητας ανέμου σε 138 περιοχές εντός των Ηνωμένων Πολιτειών. Αυτά τα δεδομένα έχουν καταγραφεί και προσαρμοσθεί για την στατιστική κατανομή Weibull. Για ταχύτητες ανέμων πάνω από τα 3m/sec, η κατανομή αυτή μπορεί συχνά να γίνεται για να προσαρμόζει πραγματικά δεδομένα σε δεδομένη περιοχή μάλλον καλώς. Σε άλλες περιπτώσεις η εφαρμογή είναι μικρή και θα έδινε λανθασμένες εκτιμήσεις του διαθέσιμου ανέμου. Ακριβείς εκτιμήσεις για μια ειδική περιοχή πρέπει να βασίζονται στις μετρήσεις ταχύτητας ανέμου σε εκείνη τη περιοχή, αφού μικρές αλλαγές στο φάσμα ανέμου δύνανται να κάνουν μεγάλες αλλαγές στην παρεχόμενη ισχύ.

Ο σχεδιασμός για έναν κατασκευαστή ανεμοκινητήρων μπορούσε να αρχίσει με την εκλογή του δένδρου ή των τεσσάρων κατανομών ταχύτητας ανέμου. Αυτές θα μπορούσαν να καταταγούν από περιοχές με την χαμηλότερη πρακτική μέση τιμή ταχύτητα ανέμου έως σε μία με υψηλούς ανέμους η οποία θα εφοδίαζε ουσιωδώς περισσότερη ισχύ από ότι η προτεινόμενη μηχανή θα μπορούσε να απορροφήσει. Οι βασικές σχέσεις για αμφότερες, Weibull και Rayleigh κατανομές, τα ακόλουθα αποτελούν μια ειδική περίπτωση, δίδονται σε εξισώσεις όπως παρακάτω παρουσιάζονται.

2.17ε ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ

Για τον υπολογισμό του Αιολικού Δυναμικού μια θέσης, απαιτείται η γνώση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας, ενέργειας που μεταβάλλεται όμως με τον χρόνο. Αντιπροσωπευτική τιμή της όμως μπορεί να είναι η μέση ετήσια τιμή, η οποία όμως για να υπολογισθεί, απαιτεί την γνώση της διάρκειας πνοής των ανέμων κάθε κατηγορίας ή κλίμακας ταχυτήτων.

Με την ύπαρξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, είναι επιθυμητή για την εκτίμηση του Αιολικού δυναμικού, η ύπαρξη αναλυτικής έκφρασης της διάρκειας πνοής του ανέμου ή της πυκνότητας πιθανότητας πνοής ανέμων.

Γι' αυτό έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι προσαρμογής αναλυτικών εκφράσεων σε διαθέσιμες ανεμολογικές μετρήσεις. Από τις διάφορες προτάσεις

φαίνεται ότι η αναλυτική σχέση Weibull για την πυκνότητα πιθανότητας έχει ευρύτερη προσαρμογή και γι' αυτό έχει γενικά καθιερωθεί. Αλλά και η μέθοδος Rayleigh αποτελεί κι αυτή μία από τις επικρατούσες κατανομές, είναι απλούστερη κατανομή διότι χρειάζεται μία μόνο παράμετρος.

(α) Πιθανότητα κατανομής ταχύτητας ανέμου Weibull. (Για την κατανομή Rayleigh, k=2)

Πιθανότητα κατανομής ταχύτητας ανέμου:

$$p(V \geq V_p) = \exp\left[-(V_p/c)^k\right]$$

=πιθανότητα το να είναι η ταχύτητα του ανέμου $\geq V_p$

Καμπύλη διάρκειας της ταχύτητας του ανέμου σε ώρες τον χρόνο [hr/χρόνο]:

$$H(V \geq V_p) = 8760 \exp\left[-(V_p/c)^k\right]$$

=ώρες της ταχύτητας ανέμου $\geq V_p$ ανά έτος

Κατανομή της πυκνότητας της ταχύτητας ανέμου:

$$p(V)dV = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] dV$$

= πιθανότητα ταχύτητας ανέμου μεταξύ V και V+dV

Κατανομή ταχύτητας ανέμου σε ώρες ανά έτος:

$$H(V \leq V_p \leq V + dV) = 8760 \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] dV$$

= ώρες ανά έτος του ανέμου μεταξύ V και V+dV

Σχέση μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου, \bar{V} :

$$\bar{V} = c\Gamma\left[1 + \left(\frac{1}{k}\right)\right]$$

$$\Gamma\left[1 + \left(\frac{1}{k}\right)\right] = \text{η συνάρτηση Γάμμα του } \arg\left[1 + \left(\frac{1}{k}\right)\right]$$

Όπου:

V = Ταχύτητα του ανέμου σε m/sec.

V_p = Ειδική (συγκεκριμένη) ταχύτητα του ανέμου σε m/sec.

\bar{V} = Μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου σε m/sec.

k = Συντελεστής σχήματος ή μορφής.

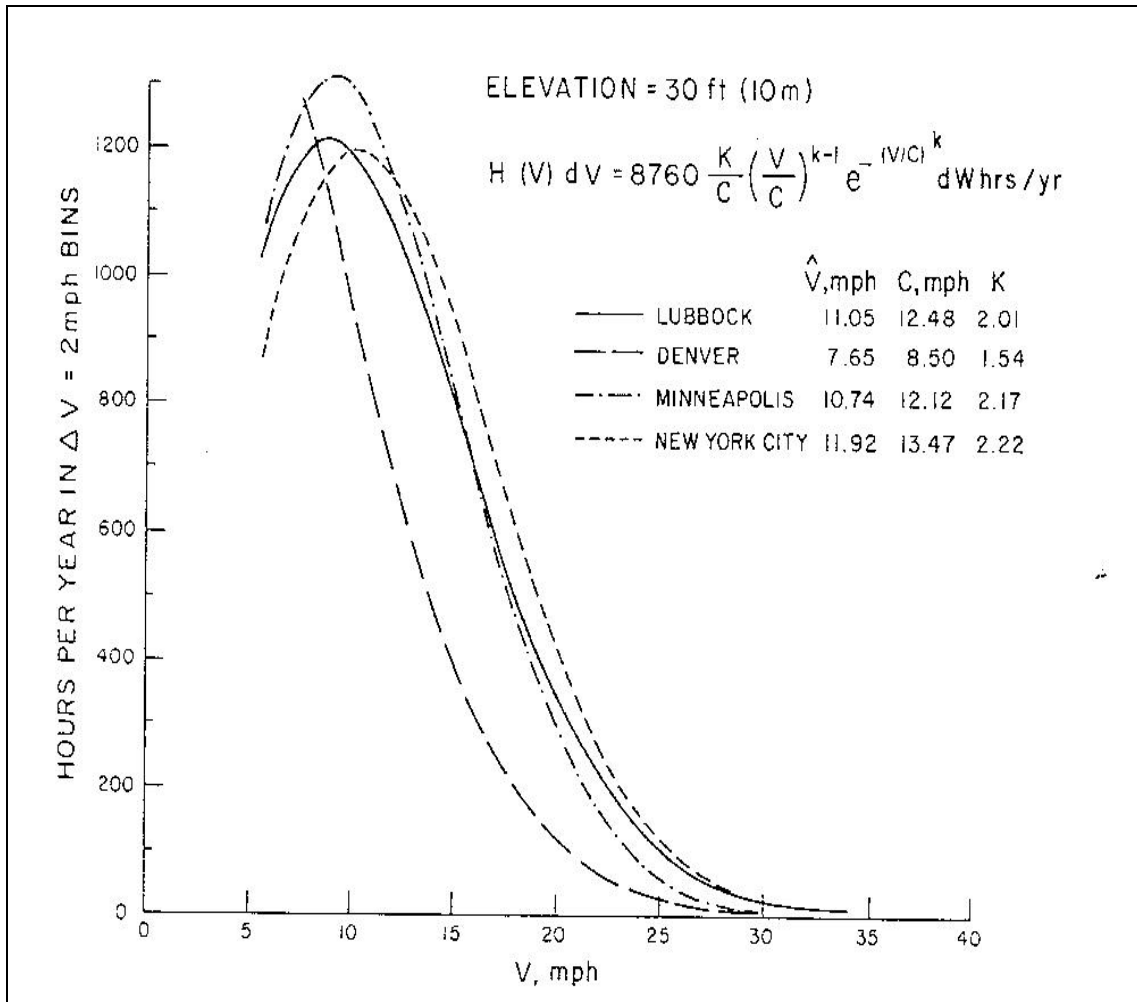
c = Συντελεστής κλίμακας ταχύτητας, των ιδίων διαστάσεων όπως η V.

Κατάλληλες τιμές των παραμέτρων της κατανομής Weibull για μερικές τυπικές τοποθεσίες στις ΗΠΑ και σε ύψος 30 ft (9,1 m) δίδονται στο σχήμα 2.17ε1. Αφού η ταχύτητα μεταβάλλεται με το ύψος, οι παράμετροι c, k, και n, της κατανομής Weibull, πρέπει να διορθώνονται για το ύψος στην πλήμνη του ανεμοκινητήρα. Αφού η απόκλιση του φάσματος της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος είναι πολύ ειδικό δεδομένο της περιοχής και μεταβάλλεται ομαλά μεταξύ ημέρας και νύχτας, διορθώσεις όπως αυτές πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή. Για τον εκπονητή

μελέτης, οπωσδήποτε, αυτές προβλέπουν έναν ορθολογιστικό τρόπο υπολογισμού για μικρές αποκλίσεις στο ύψος.

Οι αποκλίσεις των παραμέτρων της κατανομής Weibull με το ύψος δίδονται και ως ακολούθως:

$$k = k_{ref} \left[\frac{1 - 0,088 \ln(h_{ref}/10)}{1 - 0,088 \ln(h/10)} \right]$$



Σχήμα 2.17ε1: Προσαρμοσμένη κατανομή συχνότητας ταχύτητας ανέμου.

$$n = \left[\frac{0,37 - 0,088 \ln(c_{ref})}{1 - 0,088 \ln(h_{ref}/10)} \right]$$

$$c = c_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^n$$

Παράδειγμα 2.16ε-α: Προσδιορίστε τον αναμενόμενο αριθμό ωρών ανά έτος των ταχυτήτων ανέμου μεταξύ 18 και 20 mph εις το Lubbock, περιοχή Texas στο σχήμα 2.16ε1 σε ένα ύψος των 60 ft.

Λύση: Για το Lubbock στα 30 ft, $c = 12.48$ mph, $k = 2.01$, και $\bar{V} = 11.05$ mph. Διορθώνοντας για $h = 60$ ft, έχουμε:

$$n = \left[\frac{0.37 - 0.088 \ln(12.48)}{1 - 0.088 \ln(3)} \right] = 0.164$$

$$c = 12.48 \left(\frac{60}{30} \right)^n = 12.48 (2)^{0.164} = 13.98 \text{ Mph}$$

Τότε

$$H(18 < V < 20) = 8760(k/c) \left[(V/c)^{k-1} \right] \exp \left[-(V/c)^k \right] dV$$

$$= 8760(2.156/13.98) \left[(19/13.98)^{1.156} \right] \exp \left[-(19/13.98)^{2.156} \right] (2mph)$$

Ποιος παραχωρεί την εκτίμηση ότι $H = 554.9$ hr μεταξύ 18 και 20 mph σε ένα υψόμετρο των 60 ft στην περιοχή του Lubbock.

Παράδειγμα 2.16εβ: Ένας ανεμοκινητήρας στην περιοχή Denver στο Σχήμα 2.16ε1 θα τοποθετηθεί σε έναν πύργο 100 ft. Εάν ο δρομέας έχει ταχύτητα εκκίνησης των 30 mph (13.4 m/sec), πόσες ώρες μεγαλύτερης ταχύτητας ανέμου από 30 mph πιθανώς θα χάσει; (Για το αν θέλετε περισσότερα ακριβή δεδομένα, θα χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις 3.6 έως 3.8, αλλά η αλλαγή από τα 30 ft στα 100 ft δεν είναι μικρή αλλαγή, και αυτές οι εκτιμήσεις δεν μπορούν να είναι πιστευτές χωρίς να ελεγχθούν αυτές κατά τις μετρήσεις στην περιοχή του Denver σε ύψη των 100 ft ή ψηλότερα.)

Λύση: Στην περιοχή του Denver όπου πάρθηκαν τα δεδομένα, οι προσαρμοσμένοι παράμετροι της κατανομής Weibull ήσαν $c = 8.50$ mph (3.8m/sec), και $\bar{V} = 7.65$ mph (3.42 m/sec) για ύψος αναφοράς των 30 ft (9.14 m). Διορθώνοντας αυτές τις τιμές για $h = 100$ ft (30.48 μ), έχουμε

$$k = k_{ref} \left[\frac{1 - 0.088 \ln(h_{ref}/10)}{1 - 0.088 \ln(h/10)} \right]$$

$$= 1.54 \left[\frac{1 - 0.088 \ln(3)}{1 - 0.088 \ln(10)} \right] = 1.745$$

$$n = \left[\frac{0.37 - 0.088 \ln(c_{ref})}{1 - 0.088 \ln(h_{ref}/10)} \right]$$

$$= \left[\frac{0.37 - 0.088 \ln(8.50)}{1 - 0.088 \ln(30/10)} \right] = 0.201$$

$$c = c_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^n = 8.50(100/30)^{0.201} \text{ mph} = 10.83 \text{ mph} (4.84 \text{ m/sec})$$

Τότε

$$H(V > 30 \text{ mph}) = 8760 \exp \left[-(30/10.83)^{1.745} \right] = 23.6 \text{ Hr}$$

Έτσι, μια ολόκληρη μέρα λειτουργίας ανά έτος πιθανώς θα θυσιαζόταν αν χρησιμοποιούταν μια ταχύτητα ακινητοποίησης των 30 mph (13.41 m/sec).

Μέθοδοι υπολογισμού των παραμέτρων k και c.

Οι παράμετροι της κατανομής Weibull, k και c, μπορούν να υπολογιστούν με πολλές μεθόδους, ανάλογα με την μορφή των δεδομένων, όπως:

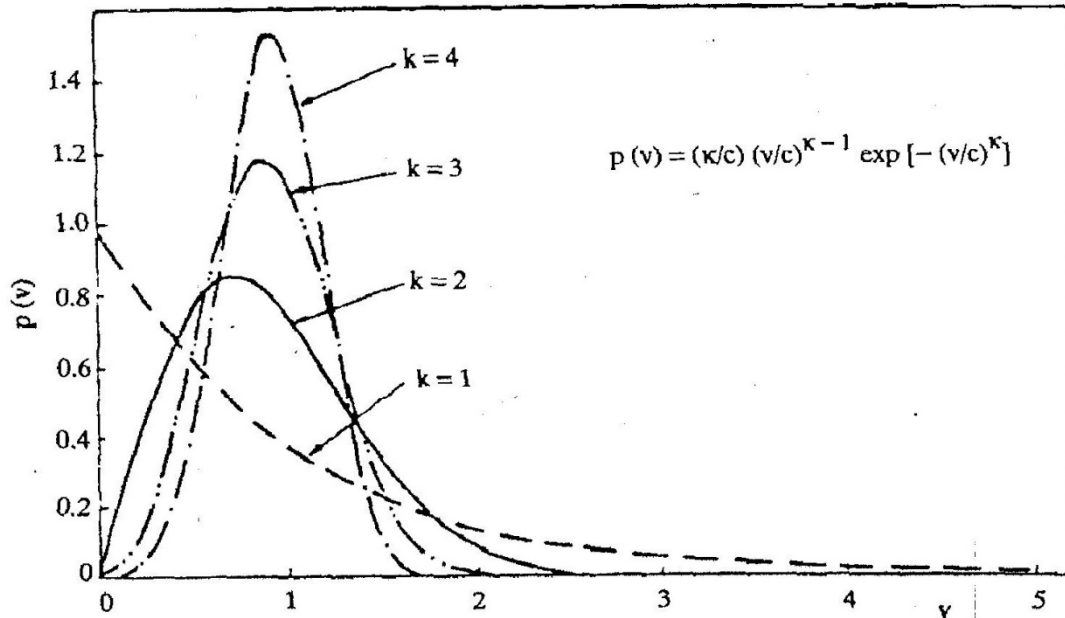
1η Μέθοδος

Αν υπάρχουν μετεωρολογικές μετρήσεις στην περιοχή από την Μετεωρολογία ή από αλλού, είναι δυνατόν να υπολογισθούν οι παράμετροι, προσαρμόζοντας τις παραπάνω αναλυτικές σχέσεις στα πειράματα, στον κανόνα των ελαχίστων τετραγώνων.

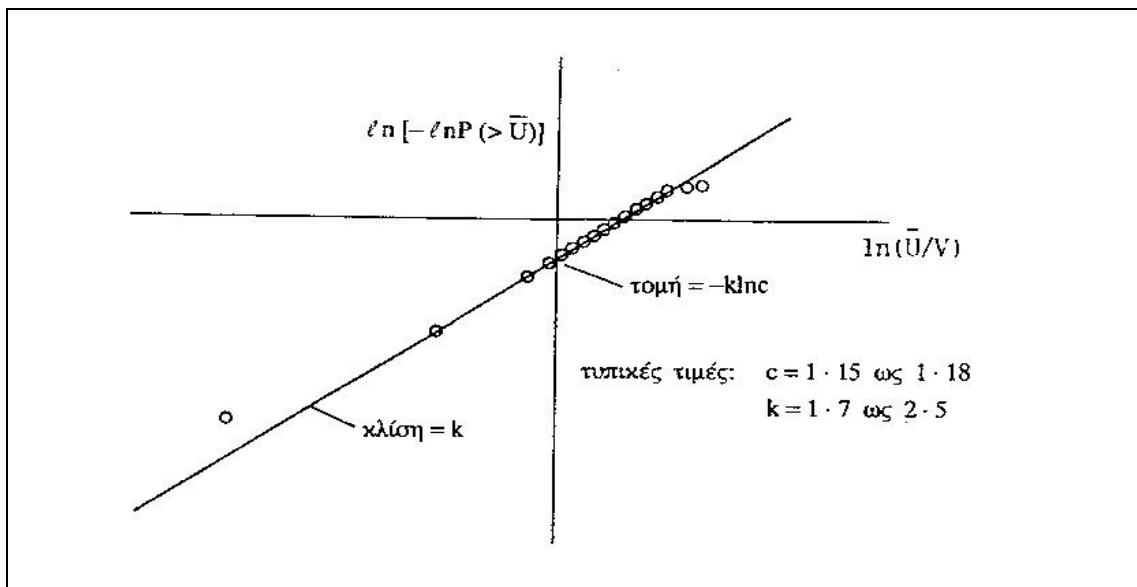
Συγκεκριμένα η αναλυτική σχέση διάρκειας πνοής του ανέμου, μπορεί να λογαριθμισθεί και να δώσει την γραμμική σχέση:

$$\ln \left[-\ln \left[1 - p(V \leq V_p) \right] \right] = k \cdot \ln(c) + k \cdot \ln(V_p)$$

Οπότε οι ανεξάρτητες μεταβλητές k και c μπορούν να υπολογισθούν με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, για αδιάφορες τιμές ταχυτήτων V_p . Τυπική μορφή της γραφικής παράστασης της πυκνότητας πιθανότητας κατά Weibull παρουσιάζεται στο σχήμα 2.17ε2 και η βέλτιστη προσαρμογή στο σχήμα 2.17ε3.



Σχήμα 2.17ε2: Τυπική μορφή της κατανομής Weibull.



Σχήμα 2.17ε3: Η βέλτιστη κατανομή Weibull σε λογαριθμική κλίμακα.

2η Μέθοδος

Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες είναι γνωστές οι τιμές της μέσης ταχύτητας \bar{V} και η τυπική απόκλιση σ του συνόλου των τιμών των ταχυτήτων του ανέμου, τότε εφαρμόζεται η μέθοδος αυτή. Με την βοήθεια της Γάμμα συνάρτησης, υπολογίζονται οι παράμετροι k και c από τις σχέσεις:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{V}} \right)^{-1,086} \quad c = \frac{\bar{V}}{[\Gamma(1+1/k)]}$$

Όταν όμως δίδονται οι δυνάμεις πρώτης, δεύτερης και τρίτης τάξεως, της μέσης τιμής των ταχυτήτων, τότε υπολογίζονται όπως το παρακάτω παράδειγμα.

Παράδειγμα 2.16εγ:

Από ένα δείγμα μετρήσεων μέσων ημερήσιων ταχυτήτων ανέμου (365 τιμές) της νήσου Λήμνου υπολογίσθηκαν τα εξής:

$$\bar{V} = 7.07m / sec \quad \bar{V}^2 = 61.24m^2 / sec^2 \quad \text{και} \quad \bar{V}^3 = 614.2m^3 / sec^3$$

Να βρεθούν οι παράμετροι της κατανομής Weibull.

Λύση:

Χρησιμοποιώντας την σχέση $\bar{V}^n = c^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right)$ έχουμε το σύστημα των εξισώσεων:

$$\bar{V} = c \Gamma(1+1/k)$$

$$\bar{V}^2 = c^2 \Gamma(1+2/k)$$

Το σύστημα είναι μη γραμμικό και επιλύεται με αριθμητικές μεθόδους (στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα του υπολογιστή MATLAB). Η λύση του συστήματος έδωσε:

$$c = 7.99 \quad \text{και} \quad k = 2.24$$

Επίσης χρησιμοποιώντας τις προσεγγιστικές σχέσεις: $c = \bar{V} / (\sqrt{\pi}/2)$ &

$$\bar{V}^3 = \sqrt{\pi} \frac{3c^3}{2k} \quad (\text{όπου } \pi=3,1416), \text{ προκύπτει:}$$

$$c = 7.98 \quad \text{και} \quad k = 2.21$$

3η Μέθοδος

Πιο παλιές μελέτες έχουν αποδείξει ότι υπάρχει μια εμπειρική σχέση μεταξύ της μέσης τιμής της ταχύτητας και της παραμέτρου σχήματος k. Η μαθηματική αυτή έκφραση δίνεται από την παρακάτω σχέση σε συνάρτηση με κάποιο συντελεστή:

$$k = 1,05 \cdot (\bar{V})^{1/2} \quad \text{αν} \quad \frac{\sigma}{\bar{V}} \leq 0,30$$

$$k = 0,94 \cdot (\bar{V})^{1/2} \quad \text{αν} \quad 0,30 \leq \frac{\sigma}{\bar{V}} \leq 0,70$$

$$k = 0,83 \cdot (\bar{V})^{1/2} \quad \text{αν} \quad \frac{\sigma}{\bar{V}} \geq 0,70$$

Η κατανομή Weibull έχει μεγαλύτερη εφαρμογή στις αιολικές εφαρμογές και μάλιστα περισσότερο στην εύκρατη ζώνη. Έχει το πλεονέκτημα να εφαρμόζεται ικανοποιητικά στην πραγματική κατανομή του ανέμου.

Οι τιμές της παραμέτρου οποιοδήποτε ύψους c, για την κατανομή Weibull, μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\frac{c_1}{c_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^n$$

[2.17.1]

Όμοια και για την ταχύτητα:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^n \quad [2.17.2]$$

Όπου c_1 και c_2 είναι οι τιμές της παραμέτρου c σε ύψος h_1 και h_2 αντίστοιχα. Για τον χώρο της Ελλάδας όταν το $h_2=10$ m, τότε ο εκθέτης n παίρνει τις εξής γενικές τιμές:

- Σε αστικές περιοχές με μεγάλες ανωμαλίες $n=0,25-0,40$
- Σε χωριά, προάστια και δασώδεις εκτάσεις $n=0,20-0,23$
- Σε πεδινά, με μικρές ανωμαλίες εδάφους $n=0,13-0,16$
- Σε παράκτιες περιοχές $n=0,08-0,12$

Η γεωγραφική κατανομή των μέγιστων τιμών των παραμέτρων k και c της κατανομής Weibull στον Ελλαδικό χώρο φαίνεται στο σχήμα 2.17ε4.

(β) Κατανομή Rayleigh

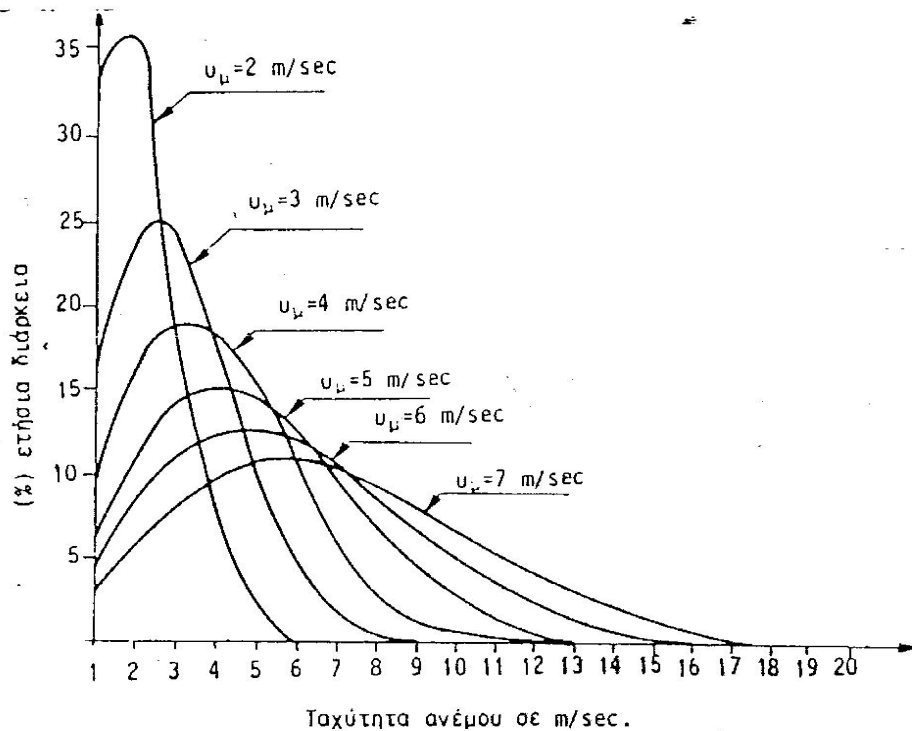
Η κατανομή αυτή αποτελεί ειδική περίπτωση της κατανομής Weibull και εκφράζεται από την γενική μαθηματική σχέση της πιθανότητας η ταχύτητα του ανέμου να είναι μεγαλύτερη ή ίση μιας τιμής V_p :

$$p(V \geq V_p) = \exp(-k \cdot i) \quad [2.17.3]$$

όπου: $k = \left(\frac{1}{4} \right) \cdot \left(\frac{V}{V_m} \right)$ και $i = V^2$

Αν παραγωγίσουμε την σχέση [2.17.3], προκύπτει η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, δηλαδή η πυκνότητα του ανέμου να βρίσκεται μεταξύ των τιμών V και $V+dV$:

$$p(V) \cdot dV = \left(\frac{n}{2} \right) \cdot \left(\frac{V}{V_m} \right) \cdot \exp(-k \cdot V^2) \cdot dV \quad [2.17.4]$$



Σχήμα 2.17ε4: Κατανομή Rayleigh για διάφορες μέσες ταχύτητες ανέμου.

Παρατηρώντας τις σχέσεις [2.17.3] & [2.17.4], διαπιστώνουμε ότι η κατανομή Rayleigh χαρακτηρίζεται μόνο από την παράμετρο k . Η συνάρτηση συμπληρωματικής πιθανότητας είναι:

$$p(V \leq V_p) = 1 - \exp(-k \cdot V^2) \quad [2.17.5]$$

Το πλήθος των ωρών κατά την διάρκεια του έτους που η ταχύτητα του ανέμου είναι μεταξύ V και $V+dV$ δίνεται από την σχέση:

$$H(V \leq V_p \leq V + dV) = 8760 \cdot p(V) \cdot dV \quad [2.17.6]$$

Στο σχήμα 2.17ε4 δίδονται διάφορες κατανομές του χρόνου για διάφορες μέσες ταχύτητες του ανέμου, βασισμένες στην κατανομή Rayleigh της σχέσης [2.17.5]. Ενώ η κατανομή Weibull προσαρμόζεται ικανοποιητικά στην πραγματική κατανομή του ανέμου, η δε κατανομή Rayleigh χρησιμοποιείται κυρίως, όταν είναι γνωστή μόνο η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου.

Να σημειωθεί ότι για τιμές του k , $1.6 \leq k \leq 3.0$, η τιμή της συνάρτησης Γάμμα $\Gamma(1+1/k)$ παραμένει σταθερή (σφάλμα της τάξης του 1%) και ίση περίπου με $\sqrt{\pi}/2$. Συνεπώς $c = \bar{V}/(\sqrt{\pi}/2)$ και επειδή η πυκνότητα πιθανότητας προκύπτει από την πυκνότητα πιθανότητας Weibull εάν όπου $k = 2$ προκύπτει ότι:

$$\bar{V} = c \cdot \Gamma(1+1/2) = \frac{\sqrt{\pi \cdot c}}{2} \quad \text{όπου} \quad \Gamma(1+1/2) = \sqrt{\pi}/2.$$

Η κατανομή αυτή χρησιμοποιείται κυρίως, όταν είναι γνωστή μόνο η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου.

2.17στ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Μία τοποθεσία χαρακτηρίζεται ανεμολογικά από την μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου V , ταχύτητα η οποία προκύπτει από την μέση τιμή των στιγμιαίων ταχυτήτων που δείχνουν τα ανεμολογικά όργανα για μεγάλη περίοδο.

Αν k και c είναι οι χαρακτηριστικές παράμετροι Weibull στην περιοχή, τότε η ετήσια ταχύτητα είναι:

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} V \cdot P(V) \cdot dV$$

Σχέση που ολοκληρώνει (μέση τιμή), το γινόμενο της στιγμιαίας ταχύτητας V με την πιθανότητα $P(V)dV$ να υπάρχει τέτοια ταχύτητα.

Η μέση ετήσια τιμή της ισχύος του ανέμου δεν είναι ίση με $1/2\rho V^3$, γιατί απλά δεν ισχύει να είναι (V^3) ίσον με $(\bar{V})^3$, διότι είναι:

$$(V^3) \neq (\bar{V})^3$$

αλλά η μέση ετήσια τιμή της ισχύος του ανέμου θα προκύψει από την σχέση:

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho V^3 P(V) dV$$

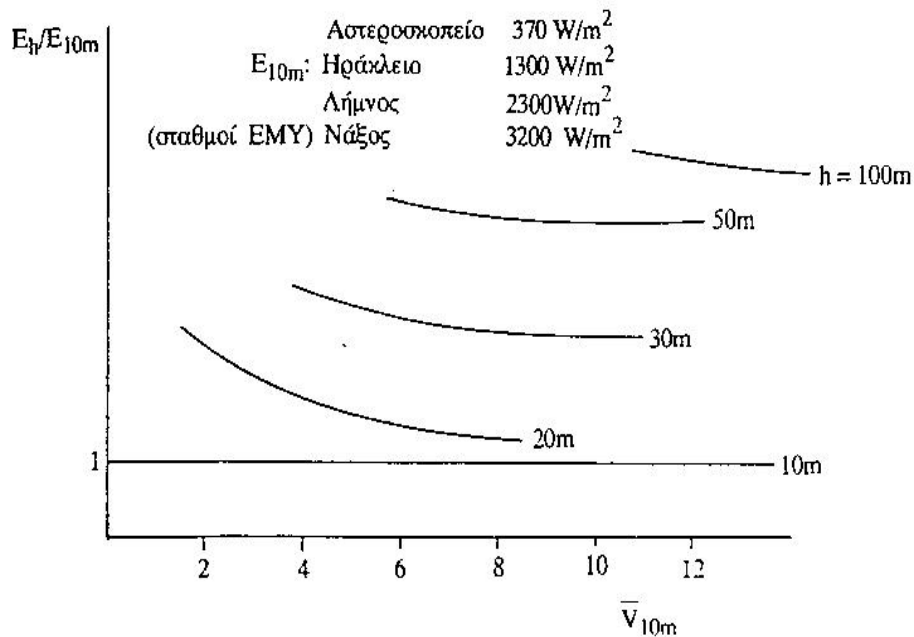
Η λύση του ολοκληρώματος οδηγεί προσεγγιστικά στην σχέση:

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

Δηλαδή η μέση ετήσια ισχύς του ανέμου είναι διπλάσια αυτής που προκύπτει χρησιμοποιώντας τον κύβο της μέσης ετήσιας τιμής της ταχύτητας του ανέμου.

Η συνολική ετήσια ενέργεια του ανέμου είναι τότε:

$$E = 8760 \bar{P}.$$



Σχήμα 2.17ε5: Αύξηση του αιολικού δυναμικού με την απόσταση από το έδαφος.

Στο παραπάνω σχήμα 2.17ε5 παρουσιάζεται η ανοιγμένη ετήσια αιολική ενέργεια ως συνάρτηση της μέσης ετήσιας τιμής ταχύτητας ανέμου για (την περιοχή του Αιγαίου) $k=2$.

Ως ύψος αναφοράς στο παραπάνω σχήμα λήφθηκε η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος 10 m από το έδαφος. Για διάφορα ύψη h από το έδαφος, η ταχύτητα μεταβάλλεται με το ύψος με βάση τον εκθετικό νόμο

$$\frac{U_h}{U_{10}} = \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha$$

Για επίπεδη τοπογραφία εδάφους ($\alpha = 0.14$) στο σχήμα 2.17ε5 έχουν παρασταθεί και καμπύλες ενέργειας για διάφορα ύψη h από το έδαφος, όπου διαπιστώνεται ότι υπάρχει αύξηση της ετήσιας αιολικής ενέργειας αυξάνοντας τα ύψη από 10 m στα 20 m. Τυπική τιμή για την τοπογραφία του Ελλαδικού χώρου ο εκθέτης (α) λαμβάνεται ίσος με 0.17.

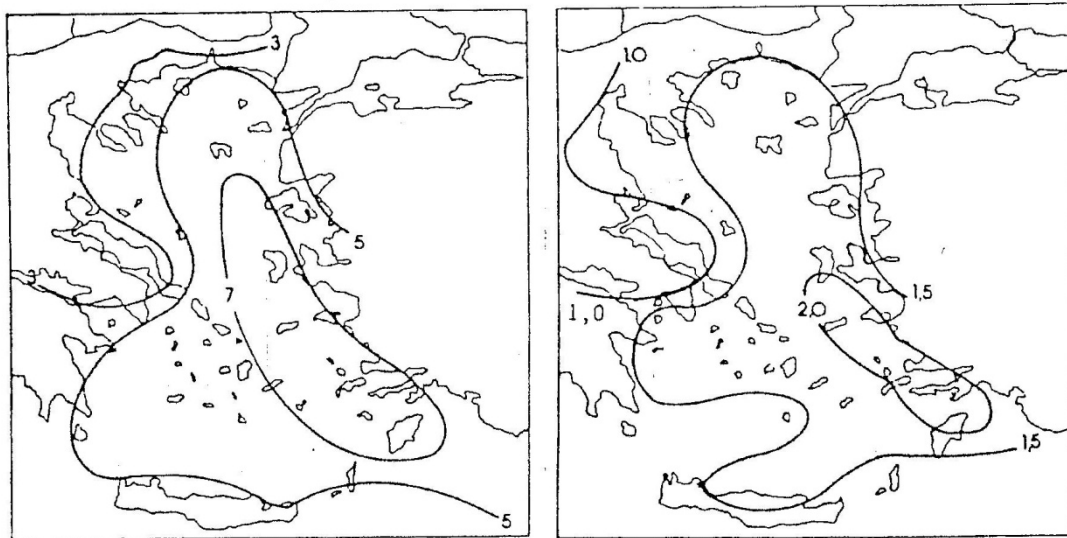
Από επιστημονικές παρατηρήσεις συνάγεται το ασφαλές συμπέρασμα της ύπαρξης υψηλού αιολικού δυναμικού στο νησιωτικό μας χώρο. Για την περιοχή αυτή η πυκνότητα πιθανότητας διανομής ταχύτητας, εκφράζεται ικανοποιητικά με

την καμπύλη διανομής Weibull και ότι η παράμετρος k είναι περίπου σταθερή και ίση με $k=2$. Παραμετρική μελέτη αναφορικά με την επίδραση του k στο ετήσιο δεσμευόμενο αιολικό δυναμικό από ανεμοκινητήρα δείχνει ότι η παράμετρος αυτή έχει μικρή επίδραση και ότι οι ετήσιες δεσμευόμενες αιολικά κιλοβατώρες (kWh) στο ύψος 10 m δίνονται από την έκφραση

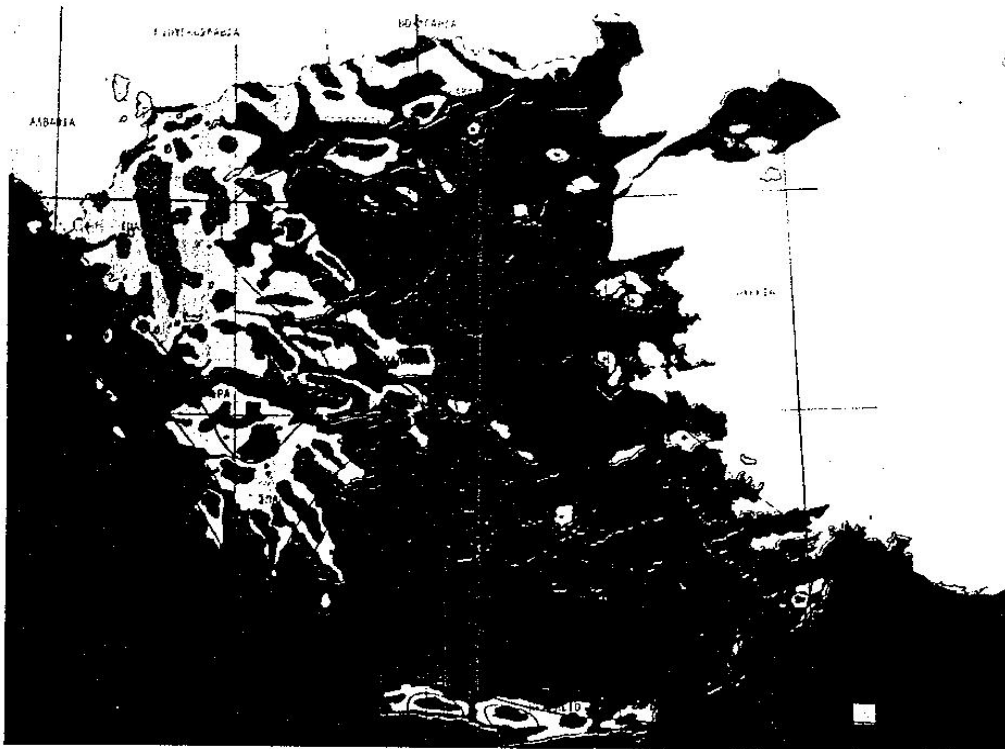
$$E = 10.5\bar{V}^3 \text{ kWh/ετησίως/m}^2$$

όπου \bar{V} η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου σε m/sec.

Με τις ισοταχείς καμπύλες και με την βοήθεια της παραπάνω σχέσης μπορεί να εκτιμηθεί το αιολικό δυναμικό που μπορεί να δεσμευτεί από ανεμογεννήτριες σε μια περιοχή. Ενδεικτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.17-2.



Σχήμα 2.17ε6: Παράμετροι c και k της κατανομής Weibull στον Ελλαδικό χώρο.



Σχήμα 2.17ε7: Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου στον ελληνικό χώρο, σε ύψος 10m.

Θέση	Μέση ταχύτητα (τυπική απόκλιση)			Ετησίως δεσμευομένη αιολική ενέργεια kWh/m ²
	(3) (ΔΕΗ)	(4) (ΕΜΥ)	(5)	
Αθήνα		4.0 (± 0.2)		141
Αθήνα (Αστεροσκοπείο)		2.3 (± 0.1)		27
Αλεξανδρούπολη		3.5 (± 0.5)		94
Άνδρος		—	6.7	662
Βόλος		3.9 (± 0.4)		130
Ζάκυνθος		—	6.6	632
Ηράκλειο		4.6 (± 0.8)		14
Θεσσαλονίκη		2.90 (± 0.6)		54
Θήρα		6.6 (± 0.8)		632
Καβάλα		1.6 (± 0.2)		9
Κύθηρα	6.2	5.4 (± 0.4)		429
Κύθνος		—	6.8	691
Κύμη		2.5 (± 0.1)		34
Κως	6.2	6.2 (± 0.5)		524
Λαύριο		—	6.4	576
Λήμνος	6.0	5.2 (± 0.4)		386
Μήλος		6.3 (± 0.4)		550
Μυτιλήνη	5.2	5.0 (± 0.6)		291
Νάξος	7.0	7.2 (± 0.6)		787
Ναύπλιο		3.9 (± 0.7)		130
Ρόδος		5.3 (± 0.6)	5.7	366
Σάμος	6.0	6.3 (± 0.5)		511
Σκύρος	7.0	6.5 (± 0.8)		677
Σητεία		3.3 (± 0.5)		79
Χανιά		2.4 (± 0.8)		30
Χίος		4.0 (± 0.3)	6.2	524

Πίνακας 2.17-2: Μέσες ταχύτητες ανέμου διαφόρων περιοχών.

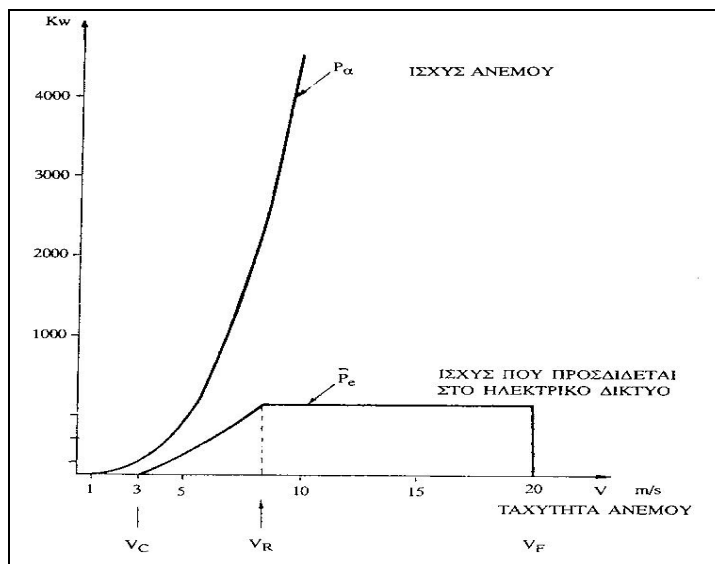
2.17. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Ο ανεμοκινητήρας δεν μπορεί να αξιοποιήσει όλη την ετήσια ενέργεια του ανέμου για τους ακόλουθους λόγους;

- I. Ο ανεμοκινητήρας είναι σε θέση να αποδώσει ωφέλιμη ισχύ μόνο όταν η ισχύς του ανέμου είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες κενού φορτίου (τριβές, άξονα, μειωτήρα, γεννήτριας). Την ταχύτητα του ανέμου στην οποία ο ανεμοκινητήρας ξεκινάει, ονομάζουμε ταχύτητα έναρξης λειτουργίας και συμβολίζεται με V_{cut-in} .
- II. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται, αυξάνει και η αποδιδόμενη ισχύς, μέχρι να φθάσει την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Κατόπιν, όσο και να αυξάνεται η ισχύς του ανέμου, επιδιώκουμε να διατηρήσουμε την ισχύ σταθερή. Αυτό γίνεται με την αλλαγή της γωνίας κλίσεως των πτερυγίων ή με τα μεταπτερύγια (flaps) ή με την αλλαγή της γωνιακής θέσης του δρομέα ως προς τον άνεμο, ή την αλλαγή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα, ανάλογα φυσικά με την γεννήτρια που έχει το σύστημα. Η μικρότερη

ταχύτητα ανέμου στην οποία ο δρομέας αναπτύσσει την ονομαστική ισχύ της μηχανής- γεννήτριας ορίζεται με V_R και ονομάζεται ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Άρα για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της V_R χάνεται ένα μεγάλο ποσό του αιολικού δυναμικού.

- III. Όταν ο άνεμος φθάνει σε υψηλές ταχύτητες, ενδείκνυται η διακοπή λειτουργίας της εγκατάστασης για λόγους ασφαλείας. Η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας (furling speed), συμβολίζεται με V_F και η ενέργεια του ανέμου για ταχύτητες μεγαλύτερες της παραμένει τελείως αναξιοποίητη.
- IV. Κατά την διάρκεια της κανονικής λειτουργίας έχουμε αεροδυναμικές απώλειες.
- V. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας έχουμε πρόσθετα μηχανικές απώλειες στον άξονα, μειωτήρα και γεννήτρια, που μπορούν να θεωρηθούν σταθερές και ίσες με τις απώλειες κενού φορτίου. Ανάλογα με τα υποσυστήματα του ανεμοκινητήρα, οι συνολικές απώλειες κενού φορτίου, μπορεί να ανέρχονται και στο 10% της ονομαστικής ισχύος της μηχανής.



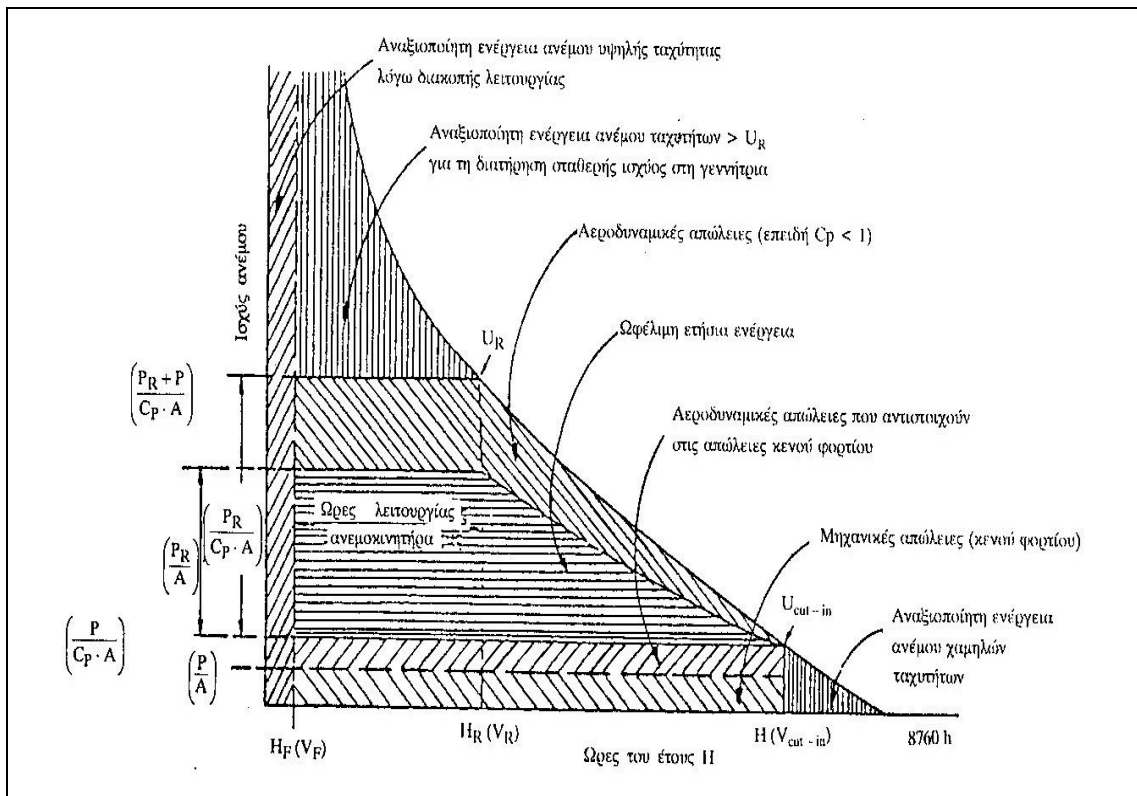
Σχήμα 2.17ζ1: Ισχύς ανέμου και ανεμοκινητήρα.

Στο σχήμα 2.17ζ1, παρουσιάζεται τυπική καμπύλη ισχύος ανεμοκινητήρα, διαμέτρου $D = 32$ m, ονομαστικής ισχύος $P_R = 225$ kW, ονομαστικής ταχύτητας $V_R = 9.0$ m/sec με ταχύτητα έναρξης και διακοπής λειτουργίας αντίστοιχα, ίση με 4.2 m/sec και 20 m/sec, μετρούμενες στα 10 m από το έδαφος.

Το σχήμα 2.17ζ2 παρουσιάζει τις ετήσιες ενεργειακές απώλειες τυπικού ανεμοκινητήρα, σύμφωνα με την προηγούμενη περιγραφή των απωλειών κατά κατηγορία.

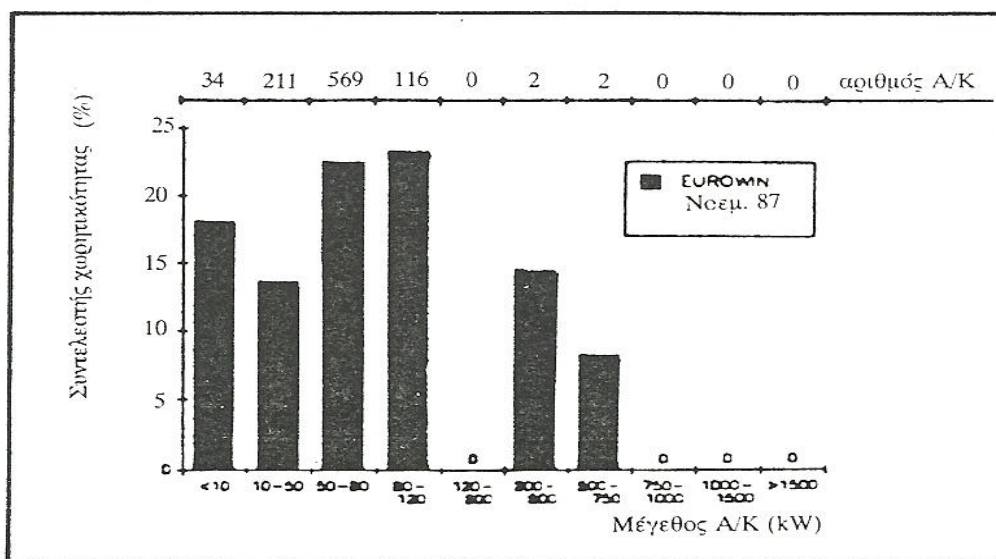
Είναι φανερό ότι η ετήσια ενεργειακή απόδοση ενός ανεμοκινητήρα είναι πολύ μικρότερη από την ποσότητα $8760 P_R$, δηλαδή την ενέργεια που θα απέδιδε ο ανεμοκινητήρας σε ετήσια βάση αν δούλευε συνεχώς στην ονομαστική του ισχύ. Στην πραγματικότητα όμως ο ανεμοκινητήρας αποδίδει ετησίως ενέργεια ίση με $8760 \bar{P}$, όπου \bar{P} η μέση ισχύς του ανεμοκινητήρα που βρίσκεται από την σχέση

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} C_p \frac{\rho}{2} V^3 P(V) dV$$



Σχήμα 2.17ζ2: Ενεργειακές απώλειες στην καμπύλη διάρκειας πνοής ανέμου.

Η μέση αυτή τιμή ισχύος εξαρτάται σοβαρότατα από τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας και ειδικότερα από την μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου \bar{V} . Ειδικότερα για την ανεμογεννήτρια με χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.17ζ3, διαπιστώνεται ότι η μέση ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι για $\bar{V} = 6m/sec$, $\bar{P} = 50kW$, και για $\bar{V} = 7m/sec$ $\bar{P} = 75kW$.

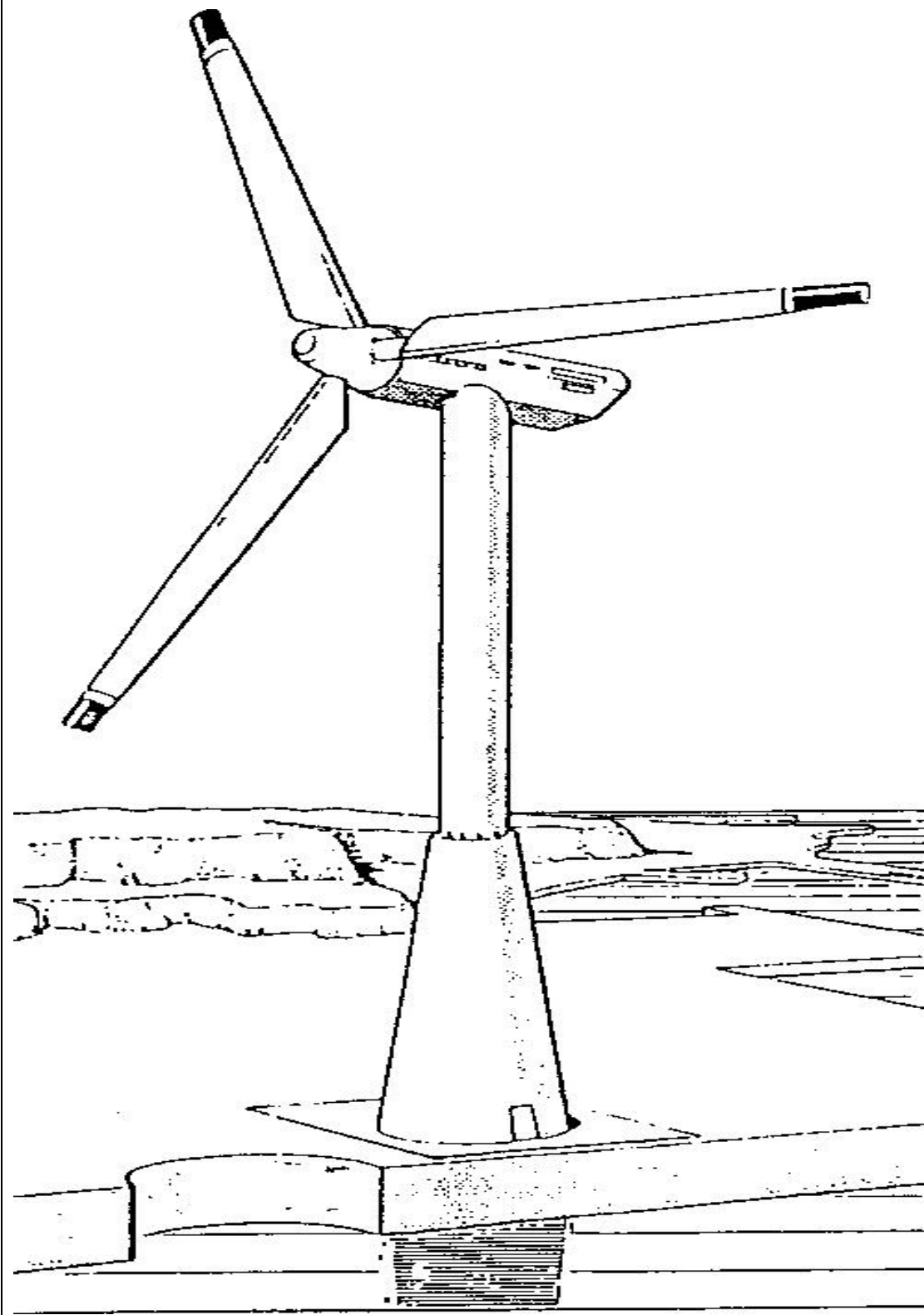


Σχήμα 2.17ζ3: Συντελεστής χωρητικότητας ευρωπαϊκών Α/Κ.

Ορίζεται συντελεστής χωρητικότητας (Capacity factor) ανεμοκινητήρα ο λόγος \bar{P}/P_R . Για την ανεμογεννήτρια $D = 32$ m, ο συντελεστής χωρητικότητας είναι 21.3% για $\bar{V} = 5$ m/sec, 32.4% για $\bar{V} = 6$ m/sec και 42.2% για $\bar{V} = 7$ m/sec. Το σχήμα 2.17ζ3 παρουσιάζει στατιστικά στοιχεία για του συντελεστές χωρητικότητας διαφόρων ανεμογεννητριών που είναι εγκατεστημένες στον Ευρωπαϊκό χώρο.

;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο



ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ

3.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ

Για την διαστασιολόγηση της πτερύγωσης πρέπει να ακολουθηθούν κατάλληλες μέθοδοι και διαδικασίες υπολογισμών και ελέγχων. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι υπολογισμού και σχεδιασμού πτερυγώσεων ανεμοκινητήρων, που η κάθε μια χρησιμοποιεί την δική της ιδιαίτερη επιστημονική μελέτη. Η επικρατέστερη και η πιο σύγχρονη μέθοδος είναι αυτή του J. R. Park, η οποία είναι και πολύ εύκολη και την οποία θα αναπτύξουμε παρακάτω.

Αναπτύχθηκε από τον Jack R. Park, το 1980, και αποτελεί μια απλή και γρήγορη διαδικασία δεκατριών βημάτων μέχρι τον τελικό σχεδιασμό του πτερυγίου.

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου αναλύεται η μέθοδος της διαστασιολόγησης αυτής. Η εφαρμογή που έχει αναπτυχθεί στο EXCEL αφορά την μέθοδο του J. R. Park ως την πρακτικότερη και πιο γρήγορη όσον αφορά την χρονική διάρκεια των υπολογισμών.

3.1α ΜΕΘΟΔΟΣ Βήμα προς Βήμα – J. R. Park.

ΒΗΜΑ 1ο

Σύμφωνα με την θεωρία των ανεμομηχανών, όπως αναφέρθηκε, η ισχύς εξόδου ενός πραγματικού ανεμοκινητήρα δίνεται από την σχέση της θεωρίας:

$$P_{out} = \frac{1}{2} \rho C_p (\eta_{μηχ.} \eta_{γεν.}) A V^3 \quad [3.1]$$

όπου: P_{out} η ωφέλιμη ισχύς σε Watt
 C_p ο συντελεστής ισχύος
 $\eta_{μηχ.}$ ο συντελεστής μηχανικής απόδοσης
 $\eta_{γεν.}$ ο συντελεστής ηλεκτρικής απόδοσης
 A η επιφάνεια σάρωσης του δρομέα σε m^2
 V η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec
 ρ η πυκνότητα του αέρα σε kg/m^3

Οι συντελεστές μηχανικής και ηλεκτρικής απόδοσης, σύμφωνα με την βιβλιογραφία κυμαίνονται ο μεν πρώτος $0,92 \div 0,97$ και ο δεύτερος $0.80 \div 0.93$.

Ο συντελεστής ισχύος C_p για έναν πραγματικό ανεμοκινητήρα κυμαίνεται από 0.25 έως 0.35 για κανονικές κατασκευές και σε ιδανικές καλομελετημένες περιπτώσεις φθάνει μέχρι 0.45, ποτέ όμως δεν μπορεί να ξεπεράσει το όριο του Betz, που είναι το 0.592.

Η πυκνότητα του αέρα είναι συνάρτηση του ύψους και της θερμοκρασίας:

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{-0.297h}{3048}\right) \quad [3.2]$$

$$T = 15 - 1.913\left(\frac{h}{304.8}\right) \quad [3.3]$$

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα σε kg/m^3
 T η θερμοκρασία του αέρα σε $^\circ\text{C}$
 h το ύψος σε m
 $\rho_0 = 1.22496 \text{ kg}/\text{m}^3$

Λύνοντας την σχέση 3.1 ως προς A προκύπτει:

$$A = \frac{2P_{out}}{\rho C_p (\eta_{μηχ.} \eta_{γεν.}) V^3} \quad [3.4]$$

Υπολογίζοντας την επιφάνεια σάρωσης του δρομέα και σύμφωνα με τον τύπο είναι:

$$A = \pi R^2 \text{ βρίσκουμε την ακτίνα του δρομέα σε m, λύνοντας ως προς R: } R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}.$$

ΒΗΜΑ 2ο

Εκλέγεται ηλεκτρική γεννήτρια ώστε να προσδιοριστεί επακριβώς ο λόγος ταχύτητας κορυφής πτερυγίου λ [Tip Speed Ratio, TSR].

Παράδειγμα εκλογής:

Έστω μια ηλεκτρική σύγχρονη γεννήτρια σταθερών στροφών εναλλασσομένου ρεύματος, με ονομαστικές στροφές 1800 rpm, δηλαδή 30 rps. Με μία σχέση μετάδοσης γεννήτριας-δρομέα 6:1, επιτυγχάνονται 300 rpm στον άξονα του δρομέα, ενώ με μία σχέση 12:1 επιτυγχάνονται 150 rpm. Σύμφωνα με την θεωρία του Glauert ο λόγος (λ) παίρνει τιμές σύμφωνα με την σχέση [2.75].

$\lambda = \frac{\Omega R}{V}$ Εάν εκλεγεί $\lambda = 6$, επειδή τα μεγέθη R , V είναι γνωστά, υπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα $\Omega_{δρ.}$

Κατόπιν υπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας $\Omega_{γεν.}$ και από τον γνωστό τύπο:

$i_{απ.} = \frac{\Omega_{γεν.}}{\Omega_{δρ.}}$ υπολογίζεται η απαιτούμενη σχέση μετάδοσης του μειωτήρα ταχύτητας.

Τυποποιώντας την σχέση μετάδοσης στον μεγαλύτερο ακέραιο όταν είναι πάνω απ' το μισό, ή στον μικρότερο ακέραιο όταν είναι πιο κάτω απ' το μισό, διορθώνεται έτσι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα.

$$\Omega_{γεν.τελ.} = \frac{\Omega_{γεν.}}{i_{εκλ.}} \text{ καθώς και ο λόγος ταχύτητας κορυφής: } \lambda_{τελ.} = \frac{R\Omega_{δρ.τελ.}}{V} \quad [3.5]$$

ΒΗΜΑ 3ο

Εκλέγεται ο αριθμός των πτερυγίων (B), σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

ΛΟΓΟΣ λ (TSR)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ B
1	6--20
2	4--12
3	3--8

4	3--5
5--8	2--4
8--15	1--2

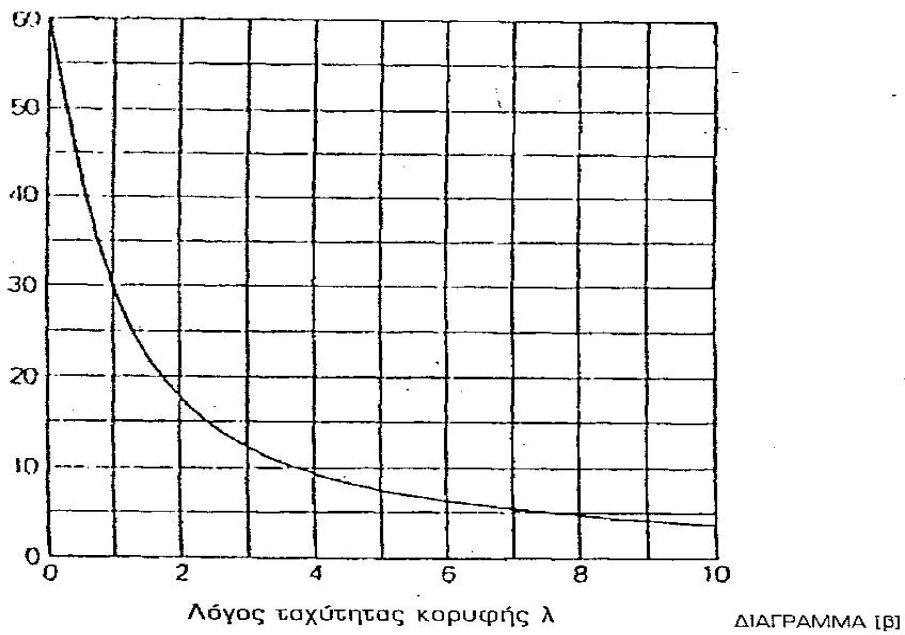
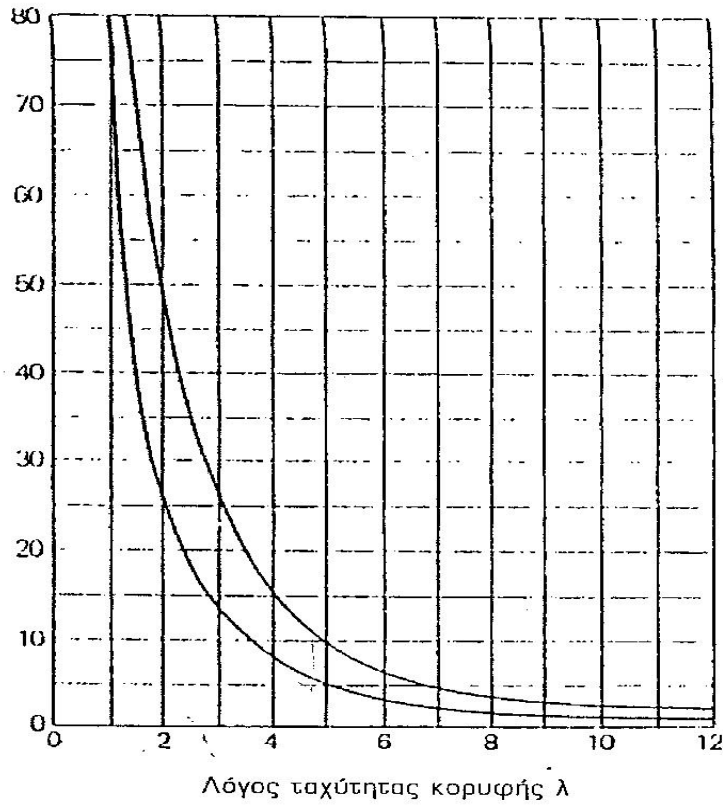
BHMA 4o

Εκλέγεται η στερεότητα σ του δρομέα, σύμφωνα με το διάγραμμα (α) του σχήματος 3.1, ή η ενδιάμεση τιμή των εξισώσεων του σ_1 και σ_2 , ή μεταξύ των τιμών σ_1 και σ_2 των επομένων εκθετικών εξισώσεων, οι οποίες εξήχθησαν με την χρήση του διαγράμματος και του προγράμματος γραφημάτων του υπολογιστή.

$$\sigma_1 = 76.997\lambda^{-1.665}$$

$$\sigma_2 = 157\lambda^{-1.779}$$

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$



Σχήμα 3.1α: (α) Διάγραμμα στερεότητας σ . (β) Διάγραμμα γωνίας ϕ και λόγου λ .

ΒΗΜΑ 5ο

Εκλέγονται τα σημεία των υπολογισμών του πτερυγίου, υπολογίζοντας τον τοπικό λόγο ταχύτητας κορυφής. Εφόσον για ακτίνα R ο λόγος είναι λ , για ακτίνα r θα είναι ο τύπος της παρακάτω σχέσης:

$$\lambda_T = \lambda \left(\frac{r_T}{R} \right) \quad [3.6]$$

όπου: R η ακτίνα του δρομέα σε m
 r_c η τοπική ακτίνα του δρομέα σε m

Πιθανές τιμές για τα σημεία των υπολογισμών είναι από 4 έως 10, αλλά μεγάλους ανεμοκινητήρες έως και 50 σημεία.

ΒΗΜΑ 6ο

Υπολογίζεται η γωνία ανέμου ϕ για κάθε σημείο υπολογισμού. Σύμφωνα με τον J.R. Park μπορεί να χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα (β) του σχήματος 3.1.α, για τον υπολογισμό της γωνίας ϕ συναρτήσει του τοπικού λόγου ταχύτητας κορυφής x . Σύμφωνα με την θεωρία του Glauert η γωνία ϕ υπολογίζεται από την σχέση:

$$\tan(\phi) = \left(\frac{R}{r \cdot x} \right) \left[\frac{(1-\alpha)}{(1-\alpha')} \right] \quad [3.7]$$

ή από την σχέση:

$$\tan(\phi) = \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left[(1-\alpha)(1-3\alpha) \right]^{\frac{1}{2}} \quad [3.8]$$

$$\text{όπου: } x = (4\alpha - 1) \left[\frac{(1-\alpha)}{(1-3\alpha)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [3.9]$$

όπως αυτές εμφανίζονται στην θεωρία του Glauert στις σχέσεις [2.57] και [2.60].

ΒΗΜΑ 7ο

Υπολογίζεται προαιρετικά η παράμετρος σχήματος (μορφής) SP για κάθε εκλεγμένο σημείο του πτερυγίου από το διάγραμμα του σχήματος 3.1β, δεν θα μας χρειασθεί στον υπολογισμό της χορδής, διότι η χορδή θα υπολογισθεί με άλλη σχέση.

ΒΗΜΑ 8ο

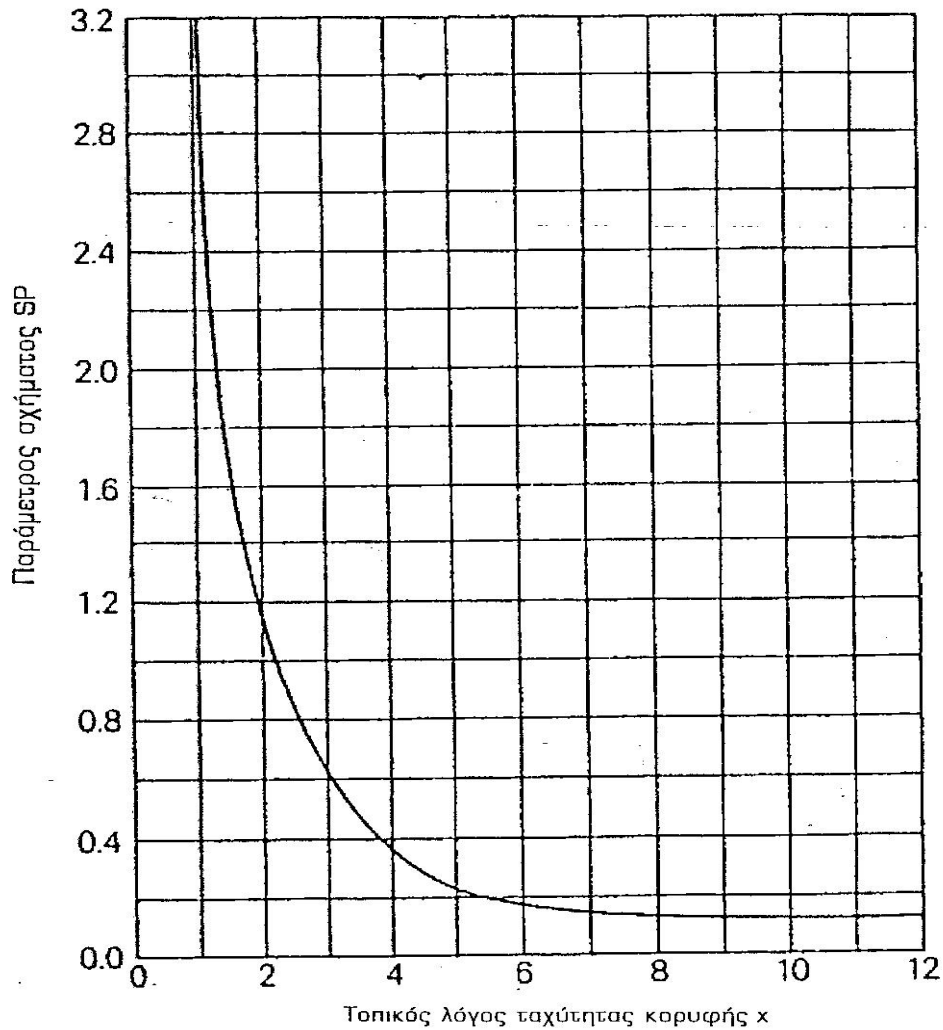
Εκλέγεται τυποποιημένη αεροτομή. Οι τύποι των αεροτομών είναι πάρα πολλοί και έχουν επικρατήσει οι παρακάτω:

- ✓ NACA xxx xx
- ✓ Mod-0, Mod-1, Mod-2
- ✓ Gedser
- ✓ UTRC-8, UTRC-10
- ✓ Caster
- ✓ Grum WS/33

Η επικρατέστερη τυποποίηση είναι η Αμερικάνικη τυποποιημένη σειρά της NACA, η πενταψήφια NACA xxx xx. Απ' αυτές η καλύτερη κι επικρατέστερη είναι η NACA 23012 την οποία και θα χρησιμοποιήσουμε στο παράδειγμα που ακολουθεί.

Από τα διαγράμματα της εκλεγμένης τυποποίησης υπολογίζεται ο μέγιστος λόγος $\varepsilon = D/L$ και τα C_L , C_d και η γωνία πρόσπτωσης α , τα οποία έχουν απεικονισθεί σε εξισώσεις μέσω των γνησίων διαγραμμάτων τους κι έτσι γίνεται

ευκολότερος ο υπολογισμός τους, χωρίς να χρειάζονται τα διαγράμματα, υπολογίζονται όλα αυτόματα στο πρόγραμμα με το cd που συνοδεύει το βιβλίο.



Σχήμα 3.1β: Διάγραμμα εκλογής παραμέτρου σχήματος SP.

ΒΗΜΑ 9ο

Για κάθε εκλεγμένο σημείο του πτερυγίου υπολογίζεται η χορδή c από την σχέση:

$$c = \frac{r \cdot SP}{B \cdot C_L}$$

Όπου: B ο αριθμός των πτερυγίων.

Σύμφωνα με την θεωρία του Glauert, η χορδή υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$C = 8\pi V (4\alpha - 1) \frac{[(1-a)(1-3a)]^{1/2}}{[(1-2a)B\Omega_{\delta\phi} C_L]} \quad [3.10]$$

και μετά η τοπική στερεότητα σ , η οποία δεν θα μας χρειασθεί στους υπολογισμούς, Εμείς θα υπολογίσουμε την χορδή της αεροτομής με τον παραπάνω τύπο του Glauert.

BHMA 10o

Υπολογίζεται προαιρετικά η αναλογία όψευς AR που ισούται με το μήκος του πτερυγίου δια την μέση χορδή:

$$C_m = \frac{C_1 + C_2 + \dots + C_n}{n} \quad \text{και} \quad AR = \frac{R}{C_m}$$

BHMA 11o

Διορθώνεται προαιρετικά η καμπύλη άνωσης και η γωνία προσβολής:

$$a = a_0 + \left(\frac{C_L}{0.11} \right) \left(1 + \frac{3}{AR} \right)$$

όπου a_0 η γωνία προσβολής για $C_L = 0$.

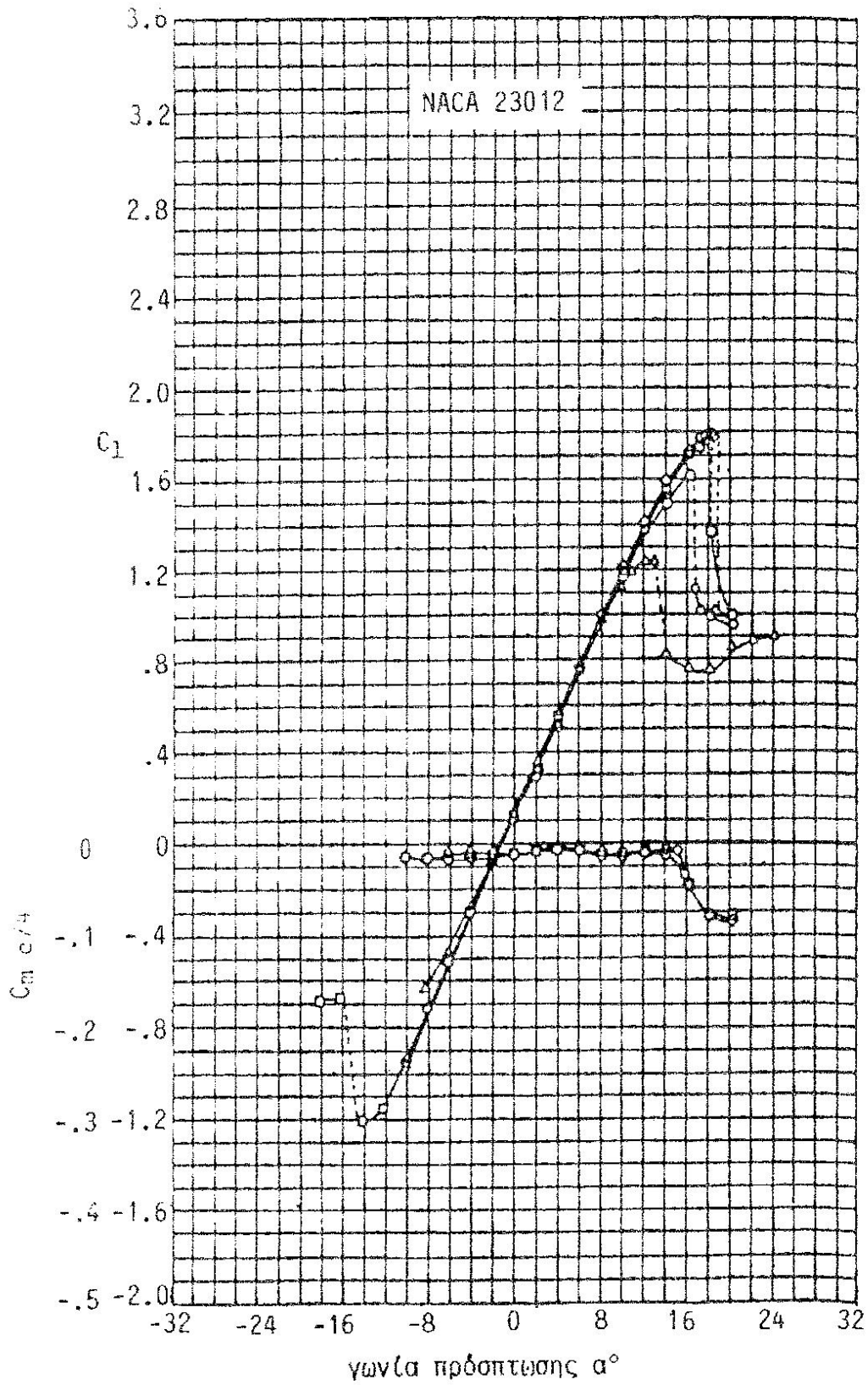
Ο J. R. Park δεν εγκρίνει αυτή την διόρθωση ως απαιτούμενη, διότι δεν επηρεάζει σημαντικά την γωνία προσβολής α . Αντίθετα ο R. D. Wood στο βιβλίο του 'Aircraft Design', σημειώνει ότι απαιτείται η διόρθωση κυρίως για πτερύγια αεροπλάνων. Εμείς στους υπολογισμούς μας δεν θα την λάβουμε υπό όψιν.

BHMA 12o

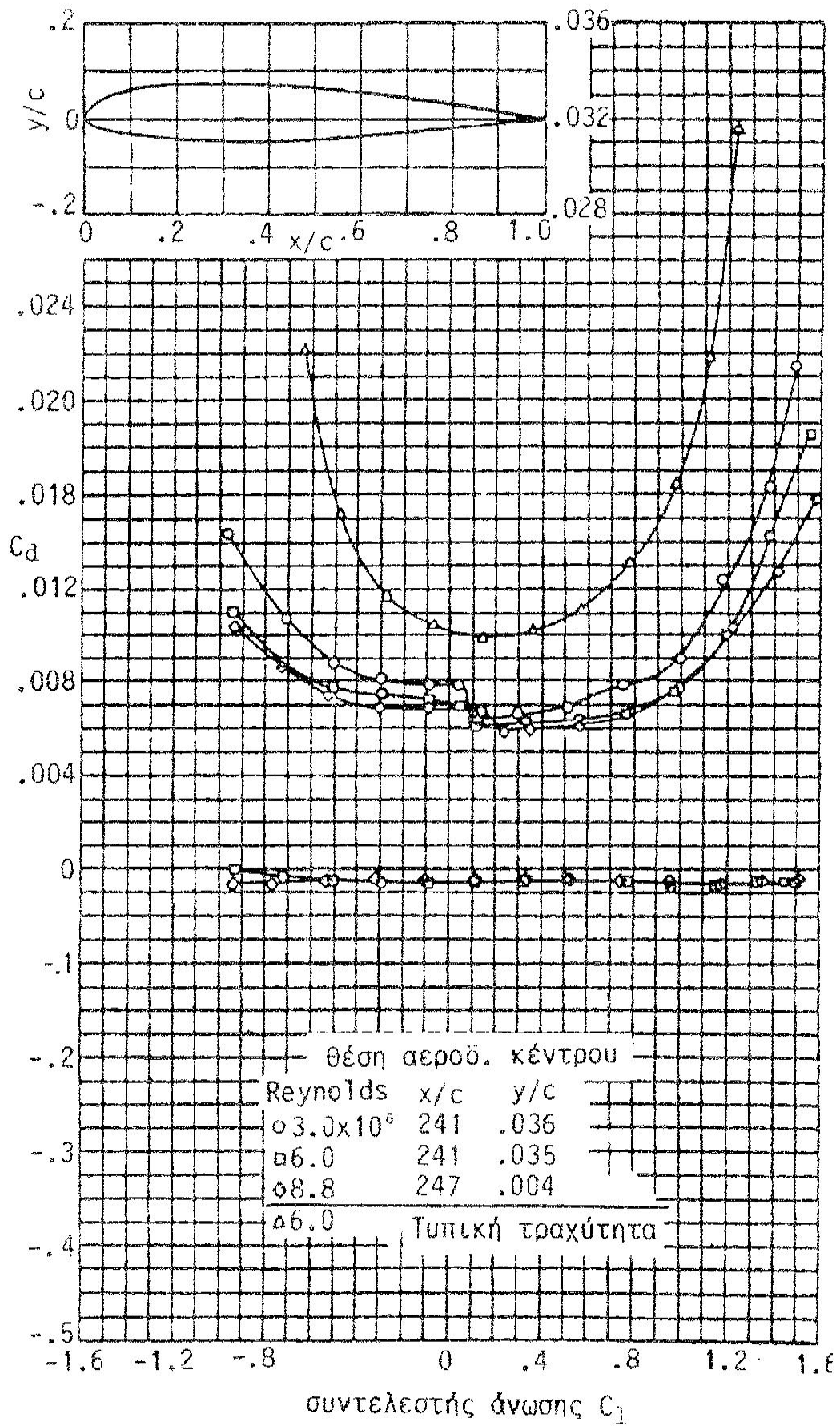
Υπολογίζεται η γωνία συστροφής (θ) από την σχέση: $\theta = \varphi - a$ για κάθε σημείο υπολογισμού. Η γωνία αυτή είναι η γωνία σφηνώσεως, με την οποία τοποθετείται η αεροτομή ως προς το επίπεδο περιστροφής των πτερυγίων του δρομέα και αλλάζει, μικραίνει, όσο αποκρινόμαστε προς το άκρον του πτερυγίου, διότι αυξάνεται το τοπικό (λ) από την σχέση: $\lambda_T = \frac{\Omega r}{V}$.

BHMA 13o

Δημιουργούνται τα σχέδια των αεροτομών του πτερυγίου, οι οποίες αεροτομές του κάθε τμήματος, θα ενσωματώσουν το πτερύγιο με τις κατάλληλες γωνίες τους. Δοσμένων των συντεταγμένων της αεροτομής από την NACA για τον τύπο 23012, σαν δεδομένα, σχεδιάζεται πάρα πολύ εύκολα με τον υπολογιστή με διάφορα προγράμματα, όπως το πρόγραμμα Daedalus. Εδώ θα σχεδιάσουμε τις αεροτομές με τα γραφήματα του excel των windows. Μπορούμε, με συντεταγμένες άλλων αεροτομών να σχεδιάσουμε όποια αεροτομή θέλουμε και να πειραματισθούμε με τις γωνίες, την ισχύ, την ταχύτητα του ανέμου κλπ., με το συνοδευτικό πρόγραμμα υπολογισμού. Προσοχή στα πολυώνυμα μεγάλου βαθμού, τα οποία αντικαθιστούν τα διαγράμματα, διότι με την αλλαγή ενός δεκάκις χιλιοστού αλλάζει τραγικά το αποτέλεσμα, άρα δεν τις ακουμπάμε καθόλου!_



Σχήμα 3.1γ: Διάγραμμα ($\alpha^\circ - C_L$), συντελεστού ανώσεως και γωνίας πρόσπτωσης.



Σχήμα 3.16: Διάγραμμα ($C_l - C_d$), συντελεστού ανώσεως και συντελεστού αντίστασης.

3.1β ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 1 HP (736 Watt)

Παραδοχές:

- 1) Ταχύτητα ανέμου για την πλήρη ισχύ της ανεμογεννήτριας : $V=10$ m/sec.
- 2) Ονομαστική ισχύς γεννήτριας: $P_{out} = 736$ Watt.
- 3) Ονομαστικές στροφές της γεννήτριας για ισχύ 736 Watt: $n = 1450$ rpm.
- 4) Λόγος ταχύτητας κορυφής πτερυγίου: $\lambda_{\epsilon\pi} = 6$.
- 5) Αριθμός πτερυγίων: $B = 3$.
- 6) Αποκοπή από την ρίζα: 15%.
- 7) Γωνία κώνου: $\varphi_{\kappa} = 0^{\circ}$.
- 8) Υποθετικός συντελεστής ισχύος: $C_p = 0.35$. Ο C_p υπολογίζεται με μεγάλη ακρίβεια από το παρακάτω πολυώνυμο, που το οποίο είναι 4^{ου} βαθμού:

$$C_p = 10^{-3} \cdot (0.185 \cdot \lambda^4 - 5.28 \cdot \lambda^3 + 40.7 \cdot \lambda^2 - 28.6 \cdot \lambda - 6.6)$$

- 9) Πυκνότητα αέρα: $\rho = 1.222575$ kg/m³.
- 10) Συντελεστής μηχανικής απόδοσης: $\eta_{μηχ.} = 0.92$.
- 11) Συντελεστής ηλεκτρικής απόδοσης: $\eta_{\gamma\epsilon\nu.} = 0.89$.
- 12) Εκλεγμένη αεροτομή της NASA: NACA 230 12.
- 13) Στοιχεία αεροτομής:

$$C_L = 0.85$$

$$C_d = 0.0081$$

$$C_{d,\min} = 0.0065$$

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_L} = \frac{0.0081}{0.85} = 0.0095$$

$$\alpha^{\circ} = 6,97^{\circ}$$

Σύμφωνα με τα διαγράμματα που αφορούν την συγκεκριμένη αεροτομή (σχήματα 3.1γ και 3.1δ) και την προσαρμοσμένη σχέση που τυπώθηκε μέσω του υπολογιστή, μεταξύ του (λ) και της γωνίας (α°), υπάρχει δηλαδή η εξίσωση που συνδέει τον λόγο ταχύτητας κορυφής πτερυγίου (TSR) ή (λ) και της γωνίας του ανέμου α° και είναι η παρακάτω:

$$a = -0.0051 \cdot \lambda^5 + 0.1648\lambda^4 - 2.053\lambda^3 + 12.543\lambda^2 - 39.184\lambda + 59.895$$

Υπολογίστηκε έτσι η γωνία ανέμου α° από το τελικό (λ), που είναι $\lambda = 5,853$ και είναι ίση με $\alpha^{\circ} = 6,97^{\circ}$.

Με την σειρά του υπολογίστηκε ο συντελεστής άνωσης C_L , πάλι με την προσαρμοσμένη εξίσωση πάνω στο διάγραμμα $\alpha^{\circ} - C_L$, $C_L = 0,1215 \cdot \alpha^{\circ}$ και είναι ίσος με $C_L=0,85$. Κατόπιν, από το γνωστό πλέον C_L , και με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκε ο συντελεστής αντίστασης C_d , από την προσαρμοσμένο πολυώνυμο μεγάλου βαθμού, που αντιπροσωπεύει το διάγραμμα $\alpha^{\circ} - C_L$ της αεροτομής της NACA 23012, και ο οποίος τύπος είναι ο παρακάτω:

$$C_d = 0,0025 \cdot C_L^5 + 0,0001 \cdot C_L^4 - 0,0049 \cdot C_L^3 + 0,0064 \cdot C_L^2 - 0,0015 \cdot C_L + 0,0066$$
 Η δε

τιμή του είναι ίση με: $C_d = 0,0081$, το δε $C_{d,\min}$ ισούται με $C_{d,\min} = 0,0065$ και παρουσιάζεται στο $C_L = 0,1$ και το οποίο είναι στάνταρ, σύμφωνα με το διάγραμμα $C_L - C_d$ της NACA 23012. Επίσης ο C_d υπολογίζεται και με την απλή εξίσωση:

$C_d = C_{d_0} + k \cdot C_L^2$, όπου το $C_{d_0} = 0.0065$ και το $k = 0.003$. Οι δε συντεταγμένες της εν λόγω αεροτομής, που είναι πολλαπλασιασμένες επί τοις εκατό του μήκους της

χορδής της αεροτομής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.1α: Το κάθε νούμερο των συντεταγμένων πολλαπλασιάζεται με το μήκος της εκάστοτε χορδής και διαιρείται με το εκατό, για να βρεθούν τα σημεία της αεροτομής. Υπολογίσθηκαν 104 σημεία για κάθε αεροτομή και για όλες συνολικά 1040 σημεία, τα οποία υπολογίζονται σε κλάσμα του δευτερολέπτου! Καταγράφηκαν σε πίνακες στο πρόγραμμα υπολογισμού στο cd, το οποίο συνοδεύει την εργασία, και ένας απ' αυτούς τους πίνακες παρουσιάζεται παρακάτω.

NACA 23012			
Σταθμοί και συντεταγμένες επί τοις εκατό της χορδής της αεροτομής NACA 23012			
Άνω επιφάνεια		Κάτω επιφάνεια	
Σταθμός	Τεταγμένη	Σταθμός	Τεταγμένη
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,1606	1,3218	0,8394	-1,0246
0,3477	1,6493	1,1523	-1,2093
0,7630	2,1871	1,7370	-1,4734
1,9153	3,2148	3,0847	-1,8822
4,4262	4,6635	5,5738	-2,3526
7,0503	5,6682	7,9497	-2,6833
9,7113	6,3761	10,2887	-2,9716
15,0005	7,1850	14,9995	-3,5054
20,1265	7,5040	19,8735	-3,9683
25,1313	7,5971	24,8687	-4,2825
30,1326	7,5471	29,8674	-4,4534
35,1314	7,3835	34,8686	-4,5108
40,1282	7,1275	39,8718	-4,4757
45,1233	6,7947	44,8767	-4,3640
50,1170	6,3976	49,8830	-4,1878
55,1094	5,9456	54,8906	-3,9568
60,1008	5,4462	59,8992	-3,6783
65,0913	4,9049	64,9087	-3,3581
70,0809	4,3259	69,9191	-3,0001
75,0698	3,7120	74,9302	-2,6071
80,0580	3,0644	79,9420	-2,1805
85,0453	2,3835	84,9547	-1,7206
90,0320	1,6683	89,9680	-1,2264
95,0178	0,9169	94,9822	-0,6959
100,0000	0,0000	100,0000	0,0000
Ακτίνα χείλους προσβολής επί % της C			1,587
Κλίση της μέσης χορδής στο χ.π. = 0,3053			

Πίνακας 3.1α: Συντεταγμένες αεροτομής NACA 23012.

Εφαρμογή

$$A = \frac{2 \cdot P_{out}}{\rho \cdot C_p \cdot (\eta_{μηχ.} \cdot \eta_{γεν.}) \cdot V^3} = \frac{2 \cdot 736}{1.222575 \cdot 0.35 \cdot (0.92 \cdot 0.89) \cdot 10^3} = 4.201 m^2$$

$$R_{\delta\rho} = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4.201}{3.1416}} = 1.156 m$$

Για $\lambda_{επ} = 6$ προκύπτει:

$$\lambda_{επ} = \frac{R_{\delta\rho} \cdot \Omega_{\delta\rho}}{V} \Rightarrow \Omega_{\delta\rho} = \frac{\lambda_{επ} \cdot V}{R_{\delta\rho}} = \frac{6 \cdot 10}{1.156} = 51.884 rad / sec$$

$$\Omega_{γεν.} = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 1450}{60} = 151.84 rad / sec$$

$$i = \frac{\Omega_{γεν.}}{\Omega_{\delta\rho}} = \frac{151.844}{51.884} = 2.927 \quad i = 2.927 \quad \text{Με την λογική εντολή (IF) όπου για } i$$

μεταξύ 2.5 και 3.49 λαμβάνεται ίσον με 3.0. Άρα τελικά εκλέγεται σχέση $i_{εκλ} = 3$ (3:1). Η λογική εντολή (IF) έχει εύρος επιλογής από $i = 2$ έως και $i = 12$, δύναται όμως να επεκταθεί.

Τα μεγέθη που προκύπτουν από την νέα σχέση μετάδοσης $i_{εκλ}$ είναι:

$$\Omega_{\delta\rho} = \frac{\Omega_{γεν.}}{i_{εκλ}} = \frac{151.844}{3} = 50.615 rad / sec$$

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{\delta\rho}}{V} = \frac{1.156 \cdot 50.615}{10} = 5.853$$

Για αποκοπή 15% από την ρίζα έχουμε:

$$\text{Ενεργό μέρος πτερυγίου: } L_{ε} = (1 - 15\%) \cdot R_{\delta\rho} = (1 - 0.15) \cdot 1.156 = 0.983 m$$

$$\text{Ανενεργό μέρος πτερυγίου: } R_{α} = 15\% \cdot R_{\delta\rho} = 0.15 \cdot 1.156 = 0.173 m$$

Στο ενεργό ($L_{ε}$) μέρος του πτερυγίου θα γίνουν οι δέκα τομές ($Z=10$), για τους υπολογισμούς των λοιπών στοιχείων της αεροτομής, ενώ το $R_{α}$ συνιστά την αποκοπή από την ρίζα και δεν παράγει έργο και το οποίο μπορεί και να γίνει και πιο μικρό, δηλαδή 12%. Αν γίνει 12%, θα επιφέρει αλλαγές στους υπολογισμούς οι οποίοι εξαρτώνται απ' αυτό, όπως, το $L_{ε}$, το r_T , λ_T , a , ϕ^0 , θ^0 και το κυριότερο οι χορδές και μάλιστα η χορδή της πρώτης αεροτομής θα γίνει μικρότερη από τη δεύτερη κατά σειρά και η οποία μηδενίζεται όταν η αποκοπή από την ρίζα γίνει 10.885%!!! Για δε πάνω από το 15% η χορδή της πρώτης αεροτομής γίνεται μικρότερη με μικρό ρυθμό, ώσπου στο ακροπτερύγιο, η χορδή θα φθάσει να είναι έξι με επτά δεκάδες χιλιοστά του μέτρου μόνο!

Με την διόρθωση ακροπτερυγίων, που είναι μείωση της ακτίνας του δρομέα κατά 3%, η ακτίνα R γίνεται: $R_{τελ.} = R - R \cdot 3\% = R(1 - 3\%) = 1.156 \cdot 0.97 = 1.121 m$

$$\boxed{R_{τελ.} = 1.121 m} \quad \text{Η τελευταία αεροτομή θα γίνει σ' αυτήν την ακτίνα.}$$

Υπολογισμοί στοιχείων στα σημεία των αεροτομών.

Τμήμα 1ο (Ρίζα)

Τοπική ακτίνα r:

$$r_1 = R_\alpha + \left[\frac{(t_1 - 1) \cdot L_\varepsilon}{Z - 1} \right] = 0.173 + \left[\frac{(1 - 1) \cdot 0.983}{10 - 1} \right] = 0.173m$$

Τοπικός λόγος ταχύτητας κορυφής: $\lambda_1 = \frac{\lambda \cdot r_1}{R_{\delta p}} = \frac{5.853 \cdot 0.173}{1.156} = 0.878$

Συντελεστής αξονικής επαγωγής:

$$\alpha = \left(\frac{1}{3} \right) - \left(\frac{2}{81 \cdot \lambda_1^2} \right) + \left(\frac{10}{729 \cdot \lambda_1^4} \right) - \left(\frac{418}{59049 \cdot \lambda_1^6} \right) =$$
$$\left(\frac{1}{3} \right) - \left(\frac{2}{81 \cdot 0.878^2} \right) + \left(\frac{10}{729 \cdot 0.878^4} \right) - \left(\frac{418}{59049 \cdot 0.878^6} \right) = 0.30893$$

Γωνία φ^0 : $\tan^2(\varphi) = \left(\frac{1}{\alpha} \right)^2 \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - 3 \cdot \alpha) = 0.5300622$

$$\tan(\varphi) = 0.728 \quad \tan^{-1}(\varphi^0) = 36.0566^0$$

Γωνία ϑ^0 : $\theta^0 = \varphi^0 - \alpha^0 \Rightarrow \theta^0 = 36.056 - 6.97 = 29.084^0$

Τοπική χορδή: $C = 8 \cdot \pi \cdot V \cdot (4 \cdot \alpha - 1) \cdot \frac{[(1 - \alpha) \cdot (1 - 3 \cdot \alpha)]^{1/2}}{[(1 - 2 \cdot \alpha)] \cdot B \cdot \Omega_{\delta p} \cdot C_L} = 0.234m$

ΤΜΗΜΑ 2ο

Τοπική ακτίνα: $r_2 = R_\alpha + \left[\frac{(t_2 - 1) \cdot L_\varepsilon}{Z - 1} \right] = 0.173 + \left[\frac{(2 - 1) \cdot 0.983}{10 - 1} \right] = 0.282m$

Τοπικός λόγος ταχύτητας κορυφής: $\lambda_2 = \frac{\lambda \cdot r_2}{R_{\delta p}} = \frac{5.853 \cdot 0.282}{1.156} = 1.431$

Συντελεστής αξονικής επαγωγής:

$$\alpha = \left(\frac{1}{3} \right) - \left(\frac{2}{81 \cdot \lambda_2^2} \right) + \left(\frac{10}{729 \cdot \lambda_2^4} \right) - \left(\frac{418}{59049 \cdot \lambda_2^6} \right) = 0.32372$$

Γωνία φ^0 : $\tan^2(\varphi) = \left(\frac{1}{\alpha} \right)^2 \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - 3 \cdot \alpha) = 0.1861155$

$$\tan(\varphi) = 0.43141 \quad \tan^{-1}(\varphi) = 23.336^0$$

Γωνία ϑ^0 : $\theta^0 = \varphi^0 - \alpha^0 = 23.336 - 6.97 = 16.364^0$

Τοπική χορδή: $C = 8 \cdot \pi \cdot V \cdot (4 \cdot \alpha - 1) \cdot \frac{[(1 - \alpha) \cdot (1 - 3 \cdot \alpha)]^{1/2}}{[(1 - 2 \cdot \alpha)] \cdot B \cdot \Omega_{\delta p} \cdot C_L} = 0.197m$

Παρομοίως υπολογίζονται τα στοιχεία και των υπολοίπων οκτώ τμημάτων του πτερυγίου και συμπληρώνεται ο πίνακας 3.1β.

Αυτά τα στοιχεία που υπολογίσθηκαν είναι αρκετά για τον σχεδιασμό των δέκα αεροτομών της πτερύγωσης και για την κατασκευή του φτερών του συγκεκριμένου

ανεμοκινητήρα. Για άλλον ανεμοκινητήρα, διαφορετικής ισχύος, απλά χρειάζεται να αλλάξουμε τα δεδομένα όπως, την ισχύ, την ταχύτητα του ανέμου, τον συντελεστή ισχύος, τους συντελεστές απόδοσης, το ποσοστό αποκοπής από την ρίζα τον λόγο ακροπερυγίου, την πυκνότητα του αέρα και την περιστροφική ταχύτητα της γεννήτριας, τους δε υπολογισμούς τους κάνει ο υπολογιστής βάσει του προγράμματος του excel που έχει γραφεί γι' αυτόν τον σκοπό.

Τμήματα (t)	Τοπική ακτίνα r(m)	Τοπικός λόγος λ	Συντελεστής αξον. επιαν. α	Γωνία ανέμου φ°	Γωνία συστροφής ϑ°	Μήκος χορδής C (m)
1	0,17346	0,87798	0,30893	36,056	29,084	0,234
2	0,28268	1,43078	0,32372	23,336	16,364	0,197
3	0,39190	1,98358	0,32783	17,818	10,846	0,161
4	0,50112	2,53639	0,32980	14,336	7,364	0,134
5	0,61034	3,08919	0,33089	11,954	4,982	0,113
6	0,71955	3,64199	0,33155	10,234	3,261	0,098
7	0,82877	4,19479	0,33197	8,938	1,966	0,086
8	0,93799	4,74759	0,33226	7,929	0,957	0,077
9	1,04721	5,30039	0,33247	7,122	0,150	0,069
10	1,15643	5,85320	0,33262	6,463	-0,509	0,063

Πίνακας 3.1β: Υπολογισμός στοιχείων αεροτομών.

Κατόπιν υπολογίζεται η μορφή του προφίλ της κάθε αεροτομής του περυγίου. Δημιουργούνται δέκα πίνακες, όσα και τα τμήματα των υπολογισμών, που

περιέχουν τις συντεταγμένες σε άξονες X και Y της αεροτομής. Οι πίνακες αυτοί δημιουργούνται βάσει του τυποποιημένου πίνακα συντεταγμένων, πίνακας 3.1α, που δίνεται από την NACA για την συγκεκριμένη τυποποιημένη αεροτομή NACA 23012, πολλαπλασιάζοντας κάθε στοιχείο του επί τοις εκατό του μήκους της εκάστοτε χορδής.

Ένας τέτοιος πίνακας είναι ο πίνακας 3.1γ και αναφέρεται στην 4_{ης} αεροτομή.

NACA 23012 ④			
Συντεταγμένες X-Y της 4 _{ης} αεροτομής			
Άνω επιφάνεια		Κάτω επιφάνεια	
Σταθμός	Τεταγμένη	Σταθμός	Τεταγμένη
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0002	0,0018	0,0011	-0,0014
0,0005	0,0022	0,0015	-0,0016
0,0010	0,0029	0,0023	-0,0020
0,0026	0,0043	0,0041	-0,0025
0,0059	0,0062	0,0074	-0,0031
0,0094	0,0076	0,0106	-0,0036
0,0130	0,0085	0,0137	-0,0040
0,0200	0,0096	0,0200	-0,0047
0,0269	0,0100	0,0265	-0,0053
0,0336	0,0101	0,0332	-0,0057
0,0402	0,0101	0,0399	-0,0059
0,0469	0,0099	0,0466	-0,0060
0,0536	0,0095	0,0532	-0,0060
0,0603	0,0091	0,0599	-0,0058
0,0669	0,0085	0,0666	-0,0056
0,0736	0,0079	0,0733	-0,0053
0,0803	0,0073	0,0800	-0,0049
0,0869	0,0065	0,0867	-0,0045
0,0936	0,0058	0,0934	-0,0040
0,1002	0,0050	0,1001	-0,0035
0,1069	0,0041	0,1068	-0,0029
0,1136	0,0032	0,1134	-0,0023
0,1202	0,0022	0,1201	-0,0016
0,1269	0,0012	0,1268	-0,0009
0,1335	0,0000	0,1335	0,0000
Ακτίνα χείλους προσβολής επί % της C			0,0021
Κλίση της μέσης χορδής στο χ.π. = 0,3053			

Πίνακας 3.1γ: Πίνακας συντεταγμένων σχεδιασμού 4_{ης} αεροτομής.

Η συνολική ροπή που ενεργεί στον δρομέα είναι:

$$T_{ολ} = \frac{P}{\Omega_{\delta\rho}} = \frac{736}{50,615} = 14,54 Ntm$$

Η ισχύς όμως αυτή των 736 watt είναι της εξόδου από την γεννήτρια, άρα πρέπει να διαιρέσουμε με τους βαθμούς απόδοσης, $\eta_{μηχ}=0,92$ και $\eta_{ηλ}=0,89$, άρα η ισχύς του δρομέα είναι τότε $P_{δρ}=736/\eta_{ολ}=899$ watt και η ολική ροπή του δρομέα είναι:

$$T_{ΟΛ} = \frac{P_{δρ}}{\Omega_{δρ}} = \frac{899}{50.615} = 17.76 Ntm$$

Άλλοι μελετητές χρησιμοποιούν ως κύρια παράμετρο την ταχύτητα κορυφής (λ), όπως κι εδώ στον υπολογισμό της ολικής μηχανικής ροπής στον άξονα του δρομέα, χρησιμοποιούν την παρακάτω σχέση, η οποία δίνει ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα:

$$T_{ΟΛ} = \frac{1}{2} \rho A R_{δρ}^2 C_p V^2 \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2} \cdot 1,222575 \cdot 4,201 \cdot 1,156 \cdot 0,35 \cdot 10^2 \cdot \frac{1}{5,853} = 17,76 Ntm$$

Και για την μηχανική ισχύ πάλι χρησιμοποιούν το (λ), και η σχέση είναι:

$$P_{δρ} = \frac{1}{2} \rho \pi R_{δρ}^5 \frac{C_p}{\lambda^3} \Omega^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,222575 \cdot 3,1416 \cdot 1,156^5 \cdot \frac{0,35}{5,853^3} \cdot 50,615^3 = 899 watt$$

Επίσης για να συσχετίσουν τον συντελεστή αεροδυναμικής απόδοσης C_p του ανεμοκινητήρα και την γωνία θέσης του πτερυγίου ως προς το επίπεδο περιστροφής του δρομέα, χρησιμοποιούν την σχέση:

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} \right] - 0.00184(\lambda - 3)\beta$$

Η σχέση αυτή μας λέει ότι όταν η γωνία β τείνει προς το μηδέν και το λ τείνει προς το 10,5 τότε έχουμε το μεγαλύτερο συντελεστή $C_p = 0.44!$ Επίσης ο δρομέας μας πρέπει να αναπτύξει περιστροφική ταχύτητα ίση με 867 rpm, για να εμφανίσει $C_p = 0.44!!$ Η δε ώθηση που ασκείται στον δρομέα είναι:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot [4a \cdot (1 - a)] = 226.4 Ntm$$

Άπαντα έχουν καταγραφεί σε ένα πρόγραμμα του excel και σε εκατοστό του δευτερολέπτου υπολογίζονται όλα τα ζητούμενα, αφού δοθούν όλα τα δεδομένα με το πάτημα ενός κουμπιού και μόνο! Τα διαγράμματα, $a^0 - C_L$ και $C_L - C_d$, φαίνονται στα σχήματα 3.1γ και 3.

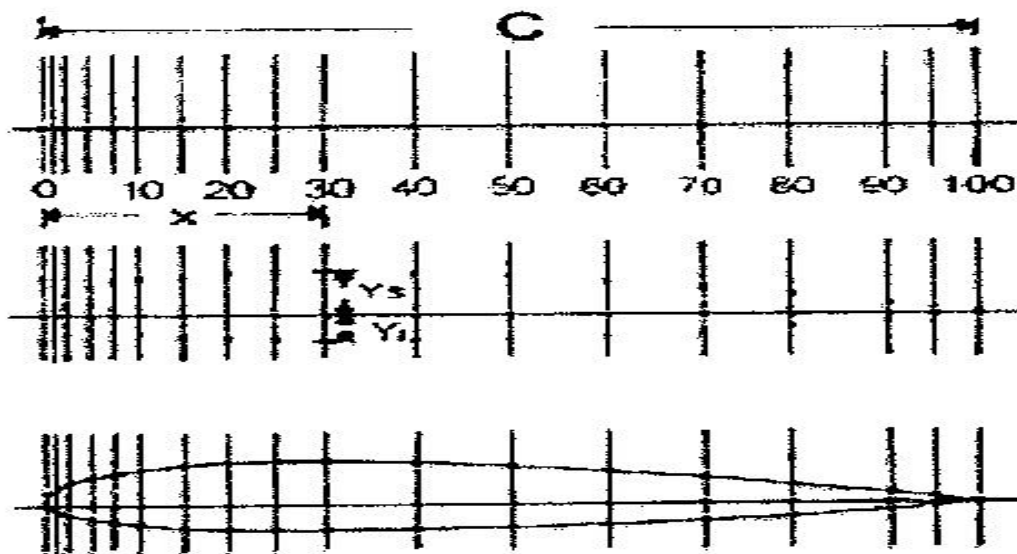
3.2 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ

α) Με κανόνα, διαβήτη και καμπυλόγραμμο.

1. Φέρουμε ένα ευθύγραμμο τμήμα, τον άξονα αναφοράς, ίσο με το μήκος της χορδής C της αεροτομής που επιθυμούμε να αποτυπώσουμε. **Προσοχή** όμως, ο άξονας αναφοράς δεν είναι υποχρεωτικά και η χορδή της αεροτομής! (Σχήμα 3.2α)

2. Σύρουμε κάθετες γραμμές στα σημεία που αντιστοιχούν στις υποδιαίρεσεις **X** που δίνει ο πίνακας των συντεταγμένων. Οι υποδιαίρεσεις **X** δείχνουν την “**επί τοις εκατό**” (%) **οριζόντια απόσταση** από την μία άκρη του άξονα που θεωρούμε ότι βρίσκεται το **σημείο 0**. Συμβουλευόμαστε τον πίνακα 3.1α. Στην πράξη, για να βρούμε την πραγματική απόσταση των σημείων **X** από το σημείο μηδέν, πολλαπλασιάζουμε τα νούμερα των υποδιαίρεσεων **X** επί τοις εκατό του μήκους της

χορδής. **Παράδειγμα:** Σε χορδή μήκους 234 mm τα πάντα θα πολλαπλασιάζονται επί 2,34 (234/100). Άρα το σημείο $X = 7,5$ θα απέχει από την αρχή του άξονα απόσταση ίση με 17,55 mm ($=7,5 \cdot 2,34$) κοκ.



Σχήμα 3.2α: Αποτύπωση αεροτομής με κανόνα, και καμπυλόγραμμο.

3. Μετά πολλαπλασιάζουμε όλες τις συντεταγμένες Y επί το ένα εκατοστό της χορδής και τα γινόμενα θα είναι αποστάσεις του περιγράμματος της αεροτομής από τον άξονα αναφοράς στο σημείο που αντιστοιχούν. Σημειώνουμε αυτά τα σημεία με τελείες. Αν η συντεταγμένη είναι αρνητική το σημείο θα σημειωθεί κάτω από τον άξονα αναφοράς.

4. Με την βοήθεια καμπυλόγραμμου ενώνουμε τα σημεία μεταξύ τους. Τουλάχιστον τέσσερα με πέντε σημεία, σε κάθε θέση, να ενώνει το καμπυλόγραμμο, για να βγει στρωτή η καμπύλη.

5. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στην αποτύπωση του χείλους προσβολής, δίνεται η ακτίνα της καμπύλης του (σε εκατοστά της χορδής), καθώς και η κλίση (η εφαπτομένη) της μέσης γραμμής καμπυλότητας της αεροτομής, πάνω στην οποία βρίσκεται το κέντρο της καμπύλης του χείλους προσβολής.

Στον πίνακα 3.1γ φαίνονται οι αποστάσεις των σημείων της 4^{ης} αεροτομής των 133,5 mm της εφαρμογής. Η ακτίνα του χείλους προσβολής είναι $r=2,1$ mm, η εφαπτομένη είναι 0,3053 και η οποία αντιστοιχεί σε γωνία $\varphi \cong 17^\circ$.

β) Με τον Η/Υ.

Και εδώ χρησιμοποιούνται οι συντεταγμένες της αεροτομής, απλά αυτές είναι ήδη καταχωρημένες (ή καταχωρούνται από εμάς) στο αντίστοιχο πρόγραμμα του Η/Υ. Προγράμματα αυτού του είδους υπάρχουν πολλά, όπως το πρόγραμμα Daidalus. Με τις κατάλληλες εντολές αποτυπώνουμε στον εκτυπωτή ή στον plotter, όποια αεροτομή και όποιο μέγεθος θέλουμε και φυσικά πολύ γρήγορα. Πολύ εύκολα γίνεται η αποτύπωση αεροτομής που βρίσκεται σε οποιοδήποτε σημείο του φτερού, αφού είναι περασμένα τα στοιχεία του φτερού στο πρόγραμμα. Στην εφαρμογή κάνουμε μία αναφορά στην αποτύπωση της αεροτομής με τα διαγράμματα του excel. Επίσης είναι δυνατή η αποτύπωση της αεροτομής με το AutoCAD.

3.3 Η ΑΕΡΟΤΟΜΗ NACA 23012

Οι αεροτομές NACA σχεδιάστηκαν κατά την διάρκεια της περιόδου από το 1929 μέχρι το 1947 υπό την καθοδήγηση του Eastman Jacobs στο εργαστήριο της NACA στο Langley της Virginia των ΗΠΑ όπου είναι η βάση της πολεμικής αεροπορίας. Οι περισσότερες από τις αεροτομές βασίστηκαν σε απλές γεωμετρικές περιγραφές, αν και οι σειρές 6 και 6A αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας θεωρητική ανάλυση και δεν έχουν τους απλούς ορισμούς των υπολοίπων σειρών.

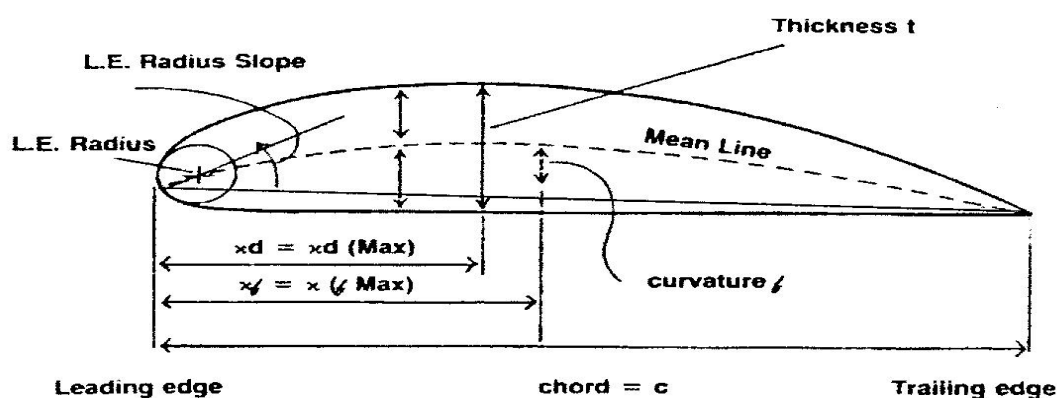
Αν και νέες γενιές αεροτομών έχουν προκύψει, ως αποτέλεσμα της βελτιωμένης κατανόησης της απόδοσης αεροτομών και της δυνατότητας να σχεδιασθούν οι νέες αεροτομές, χρησιμοποιώντας υπολογιστικές μεθόδους, οι αεροτομές NACA είναι ακόμα χρήσιμες σε πολλές εφαρμογές αεροδυναμικής σχεδίασης διαφόρων κατασκευών.

3.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αεροτομών NACA.

Μία αεροτομή συντίθεται από την άνω επιφάνεια (πλευρά υποπίεσης) και την κάτω πλευρά (πλευρά υπερπίεσης). Μια οικογένεια αεροτομών βασίζεται σε ένα μικρό αριθμό παραμέτρων, με την μεταβολή των οποίων υπολογίζονται διαφορετικές συντεταγμένες των δύο επιφανειών της αεροτομής. Μερικές από τις κύριες παραμέτρους, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διαφόρων οικογενειών αεροτομών είναι οι εξής (Abbott and Doenhoff, 1959) (σχήμα 3.3.1α).

- ✓ Μέγιστο πάχος (maximum thickness).
- ✓ Μέγιστη καμπυλότητα σε σχέση με την χορδή (maximum camber).
- ✓ Θέση του μέγιστου πάχους (position of maximum thickness).
- ✓ Θέση της μέγιστης καμπυλότητας (Position of maximum camber).
- ✓ Ακτίνα καμπυλότητας του χείλους προσβολής (nose radius).

Χρησιμοποιώντας πολυώνυμα συγκεκριμένου βαθμού και τις παραπάνω παραμέτρους μπορούν να παραχθούν διαφορετικές μορφές αεροτομών. Αυτό έγινε από τον Eastman Jacobs στις αρχές της δεκαετίας του 1930 για να δημιουργήσει μια οικογένεια αεροτομών, γνωστές ως αεροτομές NACA. Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας αεροτομής παρουσιάζονται στο σχήμα .. Οι αεροτομές NACA κατασκευάζονται με βάση μία διανομή μέσης γραμμής και μία διανομή πάχους. Η μέση γραμμή δημιουργεί την κύρτωση της αεροτομής. Η τελική αεροτομή προκύπτει εάν στην μέση γραμμή τοποθετηθούν κύκλοι με ακτίνα την διανομή πάχους στο συγκεκριμένο σημείο. Η περιβάλλουσα των κύκλων αποτελεί την τελική αεροτομή.



Σχήμα 3.3.1α: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας αεροτομής.

Αναλυτικά, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αεροτομής είναι:

- ✓ Leading edge ή χείλος προσβολής: είναι το σημείο της αεροτομής από το οποίο ξεκινά η μέση γραμμή της.
- ✓ Trailing edge ή χείλος εκφυγής: είναι το σημείο της αεροτομής στο οποίο καταλήγει η μέση γραμμή της.
- ✓ Chord ή χορδή: είναι το ευθύγραμμο τμήμα, που συνδέει τα άκρα της μέσης γραμμής, δηλαδή το χείλος προσβολής και το χείλος εκφυγής της αεροτομής.
- ✓ Mean camber line ή μέση γραμμή καμπυλότητας: Είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων, που απέχουν ίση απόσταση από την άνω και την κάτω επιφάνεια της αεροτομής.
- ✓ Thickness ή πάχος αεροτομής: είναι η συνάρτηση που καθορίζει την διανομή πάχους σε όλο το μήκος της μέσης γραμμής της αεροτομής.

Οι αρχικές εξισώσεις που διευθετήθηκαν για την δημιουργία των πρώτων αεροτομών NACA είναι εμπειρικές σχέσεις, χωρίς να υπάρχει καμία θεμελιώδης θεωρία που κρύβεται πίσω από την ανάπτυξή τους. Για παράδειγμα, οι εξισώσεις της μέσης γραμμής επιλέχθηκαν αυθαίρετα ως παραβολικές εξισώσεις, δεδομένου ότι μια εξίσωση αυτής της μορφής ταίριαζε με τις γραμμές καμπυλότητας που χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές από τις επιτυχημένες αεροτομές της εποχής. Πάντως είναι στην μορφή των ψαριών, όσο πιο αργοκίνητο είναι ένα ψάρι τόσο και μεγαλύτερη καμπούρα έχει για να έχει μεγάλη άνωση με την μικρή του ταχύτητα!

Οι αεροτομές NACA κατασκευάζονται συνδυάζοντας το πάχος (thickness) με την καμπυλότητα (camber) ή μέση γραμμή (mean line). Οι εξισώσεις που περιγράφουν που περιγράφουν αυτήν την διαδικασία για την πάνω επιφάνεια (upper surface) της αεροτομής είναι (Abbott and Doenhoff, 1959), (Mason, 1995):

$$x_u = x - y_t(x) \cdot \sin \theta$$

$$y_u = y_c(x) + y_t(x) \cdot \cos \theta$$

Και για την κάτω επιφάνεια (lower surface) είναι:

$$x_L = x + y_t(x) \cdot \sin \theta$$

$$y_L = y_c(x) - y_t(x) \cdot \cos \theta$$

όπου:

- ✓ $y_t(x)$ η συνάρτηση πάχους (thickness function)
- ✓ $y_c(x)$ η συνάρτηση καμπυλότητας της αεροτομής (camber line function)
- ✓ θ η κλίση της γραμμής καμπυλότητας (camber line slope) με εξίσωση:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{dy_c}{dx} \right)$$

Η συγκεκριμένη πενταψήφια αεροτομή NACA 23012, είναι μια επέκταση της τετραψήφιας σειράς, που παρέχει επιπρόσθετες παραμέτρους για την μέση γραμμή. Το σύστημα αρίθμησης για αυτές τις αεροτομές καθορίζεται ως:

NACA LPQXX

όπου:

- ✓ XX είναι το μέγιστο πάχος, t/c , σε ποσοστό χορδής.
- ✓ Το L δίνει την μέγιστη κύρτωση και τον συντελεστή άνωσης στο σημείο σχεδίασης (C_{L_i}), ο οποίος ισούται με $3/2 L$ (σε δέκατα).

- ✓ Το P προσδιορίζει την θέση της μέγιστης καμπυλότητας x_f , όπου $x_f = P/2$, και το P δίνεται σε δέκατα της χορδής.
- ✓ $Q = 0$ για τυποποιημένη λεπτή πενταψήφια αεροτομή (standard 5 digit foil camber),
 $Q = 1$ για αεροτομή με ανεστραμμένη καμπυλότητα (reflexed camber).

Παράδειγμα: NACA 23012

- ✓ είναι 12% παχιά αεροτομή
- ✓ ο συντελεστής άνωσης σημείου σχεδίασης (design lift coefficient) είναι 0,3
- ✓ η θέση της μέγιστης καμπυλότητας βρίσκεται στο $x/c = 0,15$ και
 Χρησιμοποιείται η “τυποποιημένη” λεπτή πενταψήφια αεροτομή ($Q = 0$)

Η διανομή πάχους είναι η ίδια με την διανομή πάχους αεροτομών 4-ψηφίων NACA, που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{y_t}{c} = \left(\frac{t}{c}\right) \left[a_0 \sqrt{x/c} - a_1 (x/c) - a_2 (x/c)^2 + a_3 (x/c)^3 - a_4 (x/c)^4 \right] \quad \text{με διαφορετικούς}$$

όμως συντελεστές.

Να σημειωθεί ότι η αεροτομή έχει ένα πεπερασμένο πάχος στο πίσω μέρος, δεν καταλήγει δηλαδή το πάχος σε μηδενική τιμή για $x/c = 1.0$. Περισσότερα στοιχεία ξεπερνούν τον προορισμό αυτής της εργασίας.

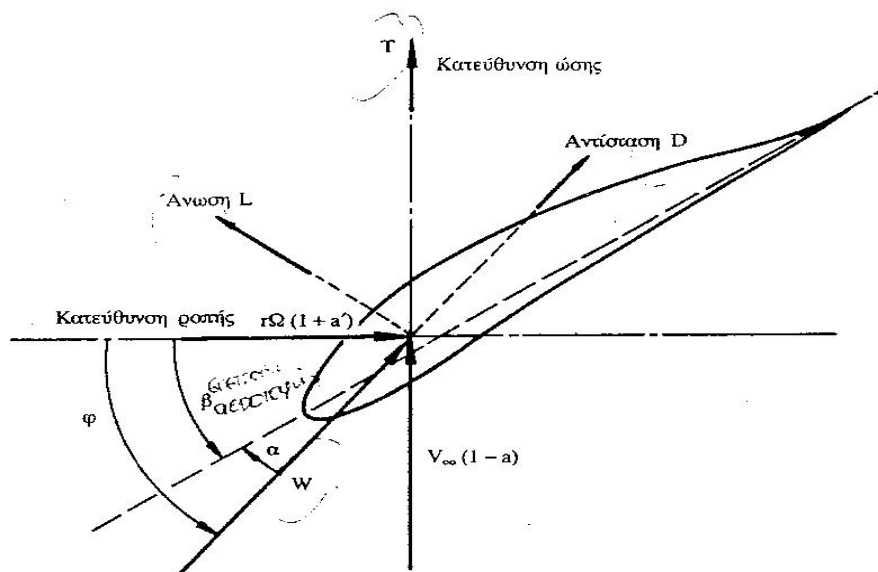
Στα σχήματα, 3.2β και 3.2γ, φαίνονται τα διαγράμματα $\alpha^0 - C_L$, συντελεστού γωνίας πρόσπτωσης - συντελεστού ανώσεως και $C_L - C_D$ συντελεστού ανώσεως - συντελεστού αντίστασης, για την αεροτομή NACA 23012 η οποία χρησιμοποιείται στο παράδειγμα μελέτης, απ’ όπου εξήχθησαν τα πολυώνυμα μεγάλου βαθμού, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα υπολογισμού στοιχείων της αεροτομής NACA 23012.

3.4 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Εδώ θα γίνει μια αναφορά στα βασικά στοιχεία της αεροδυναμικής για την κατανόηση του σχεδιασμού της έλικας και ο τρόπος συνοπτικής περιγραφής κατασκευής των πτερυγίων, του συστήματος προσανατολισμού και του αεροδυναμικού συστήματος προστασίας furling. Η έλικα αποτελείται από τρία πτερύγια, έχει οριζόντιο άξονα περιστροφής και πρόκειται να κατασκευασθεί από Σουηδικό πεύκο ή από σφένδαμο (μηλιάρι) που φύεται στο Παγγαίο. Η κατασκευή της έλικας από ξύλο έχει δοκιμαστεί και σε μεγάλες ανεμογεννήτριες, αλλά χρησιμοποιείται αρκετά σπάνια, εξαιτίας προβλημάτων αποσύνθεσης, των απαιτήσεων συντήρησης, καθώς και της δυσκολίας μαζικής παραγωγής. Τα βασικά πλεονεκτήματα του ξύλου είναι ότι είναι ελαφρύ, εύκολο στην επεξεργασία, έχει καλή αντοχή και το σημαντικότερο δε, δεν παρουσιάζει προβλήματα κόπωσης. Έτσι, ενδείκνυται για μικρές κατασκευές που χρησιμοποιούνται χωρίς καλούπια.

Οι μελέτες πάνω στην αεροδυναμική των πτερυγίων των ανεμογεννητριών βασίστηκαν πάνω σε μελέτες αεροδυναμικής για αεροσκάφη. Οι αεροτομές που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια των ανεμογεννητριών συχνά είναι οι ίδιες που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη. Η ακμή της αεροτομής στην οποία προσπίπτει ο

άνεμος, ονομάζεται ακμή πρόσπτωσης (leading edge) και η άλλη ακμή ονομάζεται ακμή διαφυγής (trailing edge). Η ευθεία γραμμή που ενώνει την ακμή διαφυγής με το μέσον της ακμής πρόσπτωσης ονομάζεται χορδή της αεροτομής. Θεωρώντας το άκρο του πτερυγίου ακίνητο «φαίνονται» δύο ταχύτητες του ανέμου: Η πραγματική ταχύτητα ανέμου και η ταχύτητα του ανέμου που προκαλείται από την περιστροφή του πτερυγίου και ισούται με την μεταφορική ταχύτητα του άκρου του πτερυγίου $u_{\mu} = \omega \cdot R$. Η συνισταμένη ταχύτητα ανέμου όπως φαίνεται από το ακίνητο άκρο ενός πτερυγίου, είναι η σχετική ταχύτητα ανέμου u_{σ} . Έτσι, ασκούνται στο άκρο του πτερυγίου δύο δυνάμεις. Η μία είναι η δύναμη τριβής του αέρα (drag force) που έχει την κατεύθυνση της σχετικής ταχύτητας και η άλλη είναι η δύναμη άνωσης (lift force). Η δύναμη άνωσης είναι αυτή που επιτρέπει στην άκρη του πτερυγίου να κινείται με μεγαλύτερη μεταφορική ταχύτητα από την ταχύτητα του ανέμου.

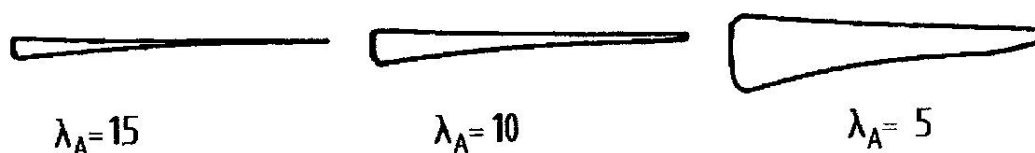


Σχήμα 3.4α: Δυνάμεις που αναπτύσσονται σε μια αεροτομή πτερυγίου Α/Κ.

Η δύναμη άνωσης είναι υπεύθυνη για την περιστροφική κίνηση των πτερυγίων, ενώ η δύναμη τριβής αντιτίθεται στην κίνηση. Για να επιτευχθεί υψηλός αεροδυναμικός συντελεστής του δρομέα, χρειάζεται ο λόγος της τριβής προς την άνωση (ϵ) να είναι ο ελάχιστος. Ο λόγος αυτός εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης α (attact), που ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της σχετικής του ανέμου και της χορδής της αεροτομής και φαίνεται στο σχήμα 3.3α. Η βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης, μετά από μελέτες σε αεροσήραγγες, είναι περίπου 4° . Γενικά όσο αυξάνεται η γωνία α αυξάνεται η άνωση μέχρι μία οριακή τιμή, από την οποία το πτερύγιο περνάει στην κατάσταση (stall) απώλειας στήριξης. Στο σχήμα 3.4α, φαίνεται και η γωνία β (pitch), μεταξύ της χορδής της αεροτομής και του επιπέδου περιστροφής. Σημειώτέον ότι η γωνία α εξαρτάται από την πραγματική ταχύτητα του ανέμου, ενώ η γωνία β (βήματος ή συστροφής) είναι κατασκευαστικό χαρακτηριστικό του πτερυγίου. Τέλος, ορίζεται η γωνία ροής (flow) ή γωνία ανέμου ϕ που είναι η γωνία μεταξύ της σχετικής ταχύτητας του ανέμου και του επιπέδου περιστροφής και ισούται με το άθροισμα των γωνιών α και β , $\phi = \alpha + \beta$.

Επειδή η μεταφορική ταχύτητα $u_{\mu} = \omega \cdot R$ δεν είναι σταθερή σε όλο το μήκος του πτερυγίου, αλλά μειώνεται όσο κινούμαστε προς το εσωτερικό του, για να παραμείνει σταθερή η γωνία $\alpha=4^{\circ}$, θα πρέπει η γωνία β να μεταβάλλεται. Έτσι, κοντά στον άξονα περιστροφής όπου η μεταφορική ταχύτητα είναι μικρή, η γωνία β πρέπει να είναι μεγάλη, ενώ όσο κινούμαστε προς το άκρο που η μεταφορική ταχύτητα αυξάνεται, η γωνία β μειώνεται, και μπορεί να φθάσει να είναι και αρνητική. Εδώ είναι αναγκαία η διόρθωση, διότι στις αεροτομές με αρνητική γωνία β περνάμε στην κατάσταση φρένου όπου αυξάνονται οι απώλειες, έτσι με την κοπή του πτερυγίου περίπου 3% της ακτίνας του και η κατάσταση φρένου μηδενίζεται.

Το μήκος χορδής της αεροτομής μεταβάλλεται σε σχέση με την απόσταση από τον άξονα και μειώνεται όσο πλησιάζουμε στο άκρο του πτερυγίου. Η σχέση που εκφράζει την μεταβολή του μήκους των χορδών είναι υπερβολική. Για δεδομένο αριθμό φτερών, όσο μεγαλώνει ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου της σχεδίασης, μειώνεται το μήκος της χορδής όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4β. Συνήθης τιμές του βέλτιστου λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου για μικρές ανεμογεννήτριες είναι 6 ή 7.



Σχήμα 3.4β: Μεταβολή του μήκους της χορδής αεροτομής, σε σχέση με την απόσταση από τον άξονα, για διαφορετικούς λόγους ταχύτητας ακροπτερυγίου.

Το μήκος των πτερυγίων, δηλαδή η ακτίνα της έλικας, υπολογίζεται από την επιθυμητή ονομαστική ισχύ στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, η ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι $V_w = 10m/sec$, η πυκνότητα του ανέμου $\rho = 1.2kg/m^3$, ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p θεωρείται 0.35, ο βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου $\lambda = 5.853$ και η αεροδυναμική ισχύς στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου για ονομαστική ηλεκτρική ισχύ $736W$ και απόδοση της γεννήτριας και μηχανική απόδοση $0.89 \cdot 0.92 = 0.782$. Έτσι, από την σχέση:

$$R_{\delta p} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{out}}{\rho \cdot C_p \cdot \eta_{μηχ} \cdot \eta_{γεν} \cdot \pi \cdot V^3}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 736}{1.222 \cdot 0.35 \cdot 0.92 \cdot 0.89 \cdot 3.1416 \cdot 10^3}} = 1.156m$$

Μετά, αφού χωρίσουμε το ενεργό τμήμα του πτερυγίου L_{ϵ} , που είναι: $L_{\epsilon} = R_{\delta p} - R_{\alpha} = 1.156 - 1.156 \cdot 15\% = 0.983m$, σε δέκα ισαπέχοντες σταθμούς, $L_{\epsilon}/9$, το καθένα, από τους οποίους υπολογίζουμε την γωνία β και το μήκος της κάθε χορδής, από τους παρακάτω τύπους:

$$\beta = \arctan\left(\frac{D}{3 \cdot r \cdot \lambda}\right) \cdot 57.3 - \alpha^{\circ} \quad \text{και} \quad C = \frac{1.4 \cdot D^2 \cdot \cos\left(\frac{\beta}{57.3}\right)^2}{r \cdot \lambda^2 \cdot 3 \cdot C_L}$$

ή τα παίρνουμε από τον πίνακα 3.1β, όπου και είναι υπολογισμένα. Όπου $D=2R$ η διάμετρος του δρομέα, r η απόσταση από τον άξονα περιστροφής, α^0 είναι η γωνία πρόσπτωσης που στην εφαρμογή λαμβάνεται ίση με 6.97^0 , διαφορετικά παίρνεται ίση με 4^0 μοίρες, και C_L ο συντελεστής άνωσης που είναι 0.85. Προσοχή, το λ που αναφέρεται στους τύπους είναι το λ στο r που αναφερόμαστε.

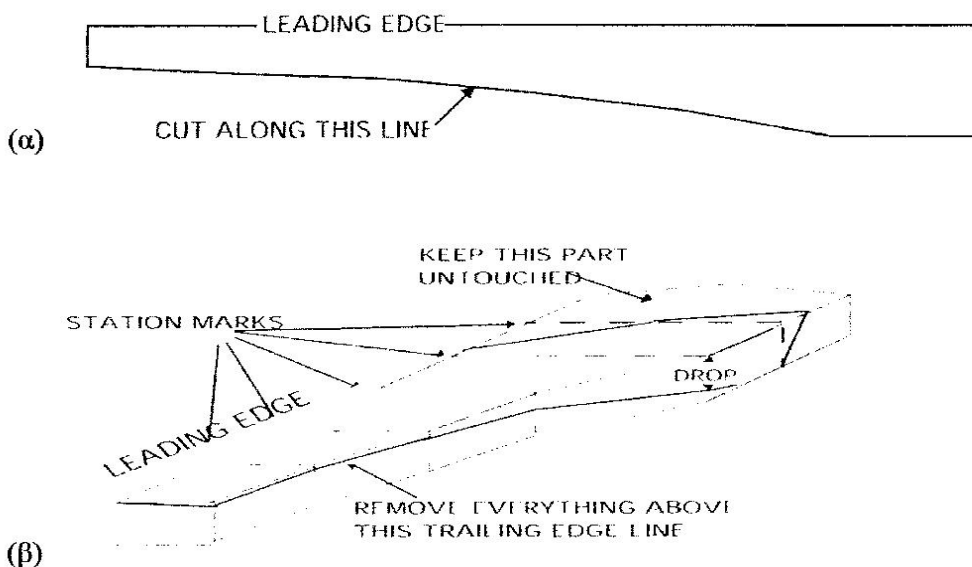
Στην εφαρμογή τα πάντα υπολογίζονται αυτόματα εφόσον δοθούν τα δεδομένα.

Έχοντας επιλέξει την αεροτομή που θα χρησιμοποιηθεί και υπολογίζοντας το μέγιστο πάχος της κάθε αεροτομής, μπορούμε να ξεκινήσουμε την κατασκευή των πτερυγίων.

3.4.1 Κατασκευή των πτερυγίων, του συστήματος προσανατολισμού και του συστήματος προστασίας.

Τα πτερύγια του δρομέα κατασκευάζονται από ξύλα σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου, χρησιμοποιώντας τα εξής ξυλουργικά εργαλεία: Λίμα, ράσπα, παστράγγουλο, πριόνι, ξύστρα, πλάνη και σκαρπέλο.

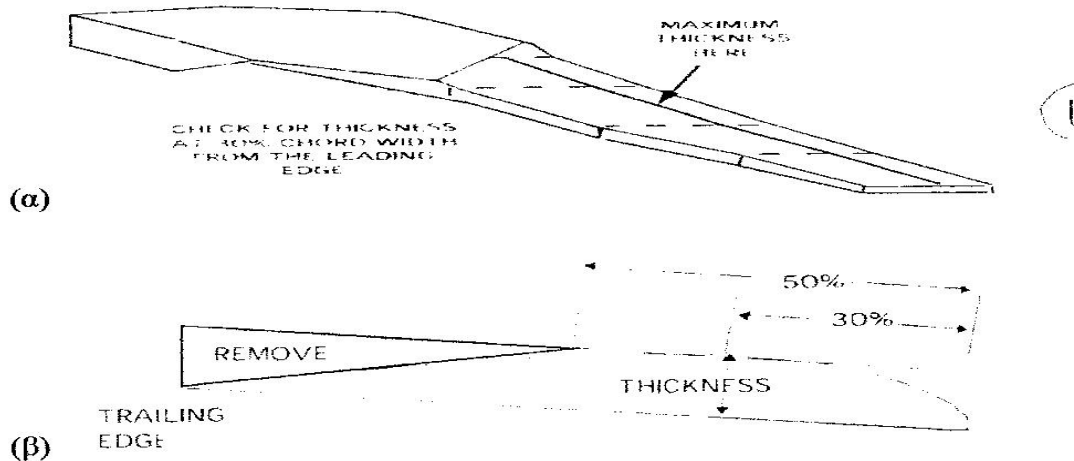
Το κάθε πτερύγιο, στο ενεργό πάντα τμήμα του, χωρίζεται σε δέκα ισαπέχοντες σταθμούς. Στο πρώτο βήμα της κατασκευής αφαιρείται σημαντικό μέρος του ξύλου, ώστε να αποκτηθούν οι επιθυμητές τιμές για το μήκος της χορδής σε κάθε σταθμό, σχήμα 3.4γ (α). Να σημειωθεί ότι οι διαστάσεις του ξύλου που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να έχει μήκος όσο και η ακτίνα του δρομέα, δηλαδή $1,156m$, πλάτος όσο το μήκος της πρώτης και μεγάλης χορδής $0.234m$ και πάχος τόσο όσο χρειάζεται να καλύψει το πάχος της μεγάλης χορδής και την γωνία β (συστροφής των αεροτομών), δηλαδή από τον πίνακα της πρώτης αεροτομής παίρνουμε το μέγιστο πάχος της αεροτομής, προσθέτοντας τις κυρτώσεις, της πάνω καμπύλης και της κάτω καμπύλης $0.0178+0,0106=0.0284m$, άρα το ξύλο που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να έχει διαστάσεις $1.156 \times 0.234 \times 0.0284 m$, τουλάχιστον.



Σχήμα 3.4γ: Διαμόρφωση του επιθυμητού μήκους χορδής (α) και της επιθυμητής γωνίας βήματος (β).

Στο δεύτερο βήμα αφαιρείται ξύλο από την εμπρόσθια πλευρά του πτερυγίου, σχήμα 3.4γ (β) και αποκτώνται οι επιθυμητές τιμές για την γωνία βήματος.

Στο τρίτο βήμα αφαιρείται ξύλο από το πίσω μέρος του πτερυγίου, ώστε να εξασφαλιστεί το σωστό πάχος για όλο το μήκος του πτερυγίου [σχήμα 3.4δ (α)]. Στο τέταρτο βήμα αφαιρείται ξύλο από το πίσω μέρος του πτερυγίου, ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμητή αεροτομή [σχήμα 3.4δ (β)].



Σχήμα 3.4δ: Διαμόρφωση του επιθυμητού πάχους (α) και της αεροτομής των πτερυγίων (β).

Στην συνέχεια διαμορφώνεται σε σχήμα τριγώνου η πλευρά του πτερυγίου που θα προσαρμοστεί στον άξονα, ώστε να είναι εφικτή η σύνδεση με τα άλλα δύο πτερύγια στην πλήμνη. Κατόπιν κόβονται δύο ξύλινοι δίσκοι, που αποτελούν την πλήμνη, ανάμεσα στους οποίους θα τοποθετηθεί η έλικα για να συγκρατείται. Γίνονται οι κατάλληλες τρύπες στα πτερύγια και στους δίσκους της πλήμνης, για να μπορούν να προσαρμοστούν στον άξονα περιστροφής της γεννήτριας. Να σημειωθεί ότι το άκρο αυτό κόβεται σε γωνία 120 μοιρών, σε μύτη, για να έχουν την συμμετρική γωνιακή απόσταση μεταξύ τους τα πτερύγια κατά την τοποθέτησή τους στην πλήμνη. Τρία επιπλέον κομμάτια ξύλου προστίθενται κοντά στην βάση των πτερυγίων ώστε να αυξηθεί η γωνία βήματος σε κοντινή απόσταση από τον άξονα.

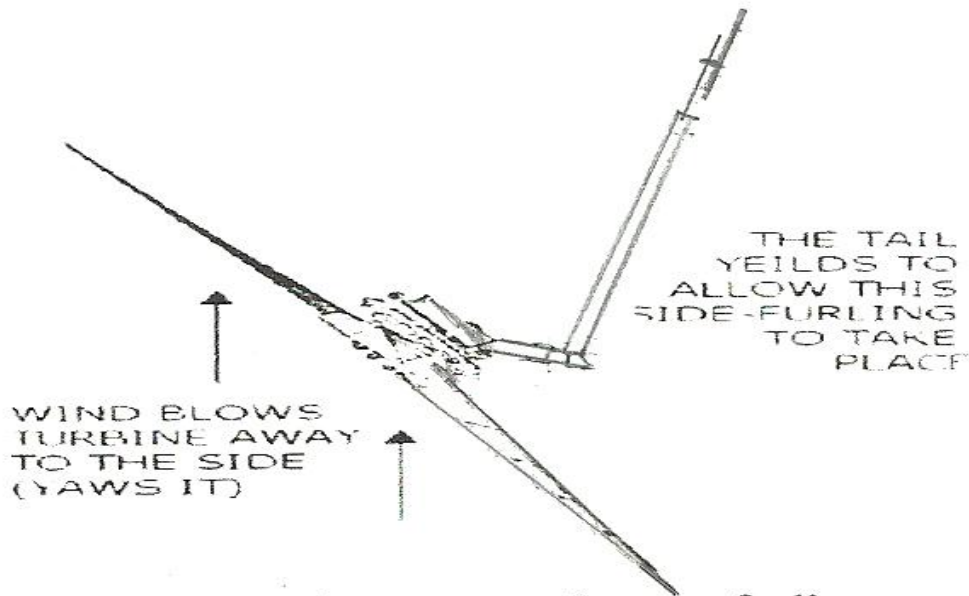
Μετά το πέρας της κατασκευής, πιθανές ατέλειες καλύπτονται με την έκχυση πολυεστερικής ρητίνης. Για την προστασία των ξύλων από τις εξωτερικές συνθήκες, τα πτερύγια εμποτίζονται με μυκητοκτόνο αστάρι και βερνίκι.

Το σύστημα γαω, δηλαδή το σύστημα που επιτρέπει στην ανεμογεννήτρια να ακολουθεί την κύρια κατεύθυνση του ανέμου, αποτελείται από το πτερύγιο κατεύθυνσης που βρίσκεται στο πίσω μέρος της (σχήμα 3.3ε). Κίνηση ως προς τον ιστό στήριξης επιτυγχάνεται με την κίνηση του μεγαλύτερου σωλήνα της χαλύβδινης κατασκευής στήριξης σε σχέση με τον ιστό (πύργος). Η ουρά αποτελείται από έναν χαλύβδινο σωλήνα και ένα ξύλινο κόντρα πλακέ, εμβαδού:

$$\frac{D^2}{40}, \text{ στην περίπτωση μας είναι: } \frac{D^2}{40} = \frac{2.312^2}{40} = 0.133m^2 = 1336cm^2 \cong 37*37cm.$$

Σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής ταχύτητας, ενεργοποιείται το αεροδυναμικό σύστημα περιορισμού της ισχύος *furling*. Στην περίπτωση αυτή, ο

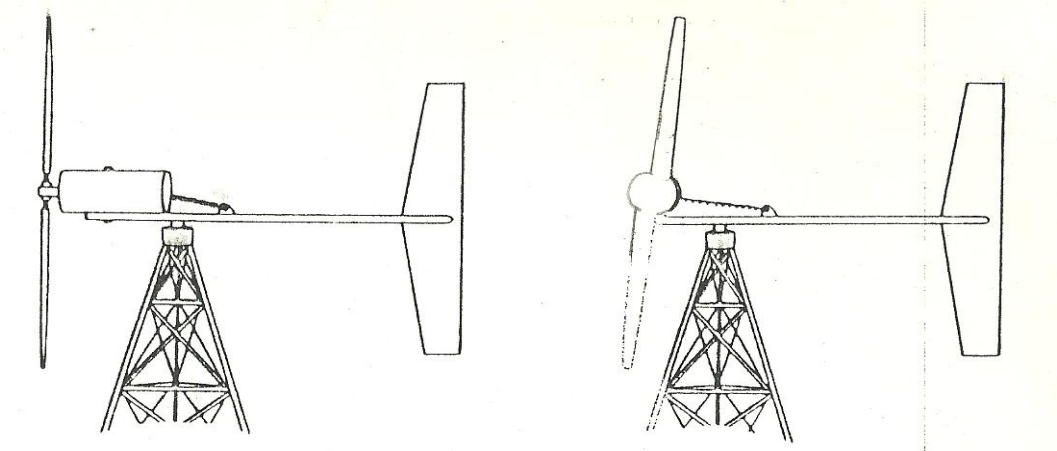
δρομέας στρίβει εκτός της κύριας κατεύθυνσης του ανέμου, δηλαδή η γωνία γ αυξάνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p του δρομέα και κατ' επέκταση και η ισχύς του. Για να γίνει αυτό εφικτό, ο σωλήνας της ουράς συνδέεται υπό κατάλληλη γωνία με την χαλύβδινη κατασκευή στήριξης και επιτρέπεται η σχετική κίνησή τους με την σχετική κίνηση δύο σωλήνων (σχήμα 3.4ε).



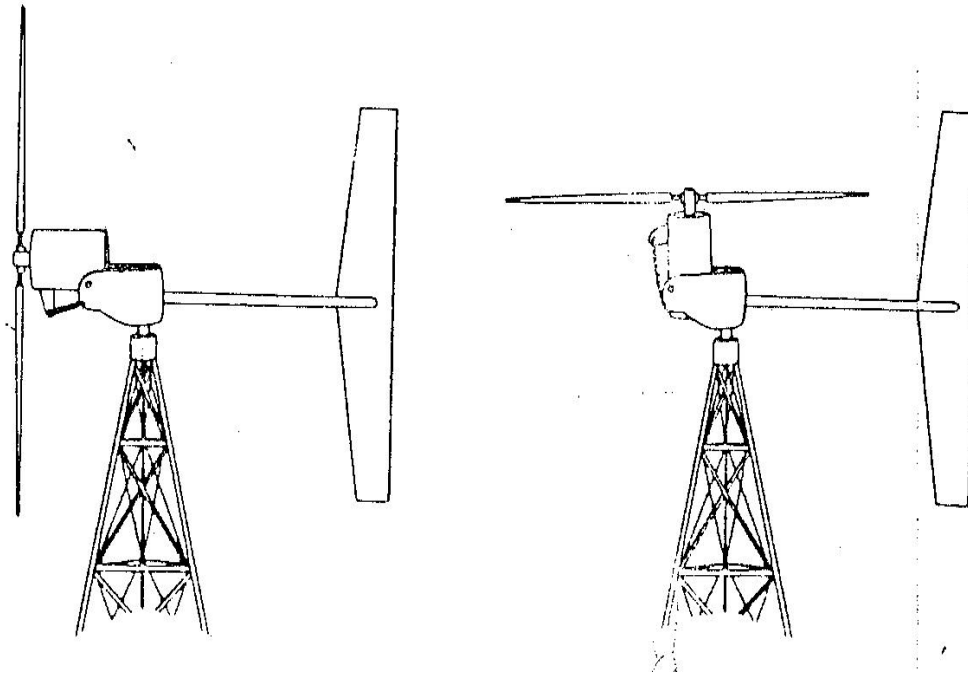
Σχήμα 3.4ε: Λειτουργία του συστήματος *furling* σε υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Υπάρχουν κι άλλα αεροδυναμικά συστήματα περιορισμού ισχύος, τα οποία φαίνονται στα σχήματα 3.4στ, 3.4ζ και 3.4η.

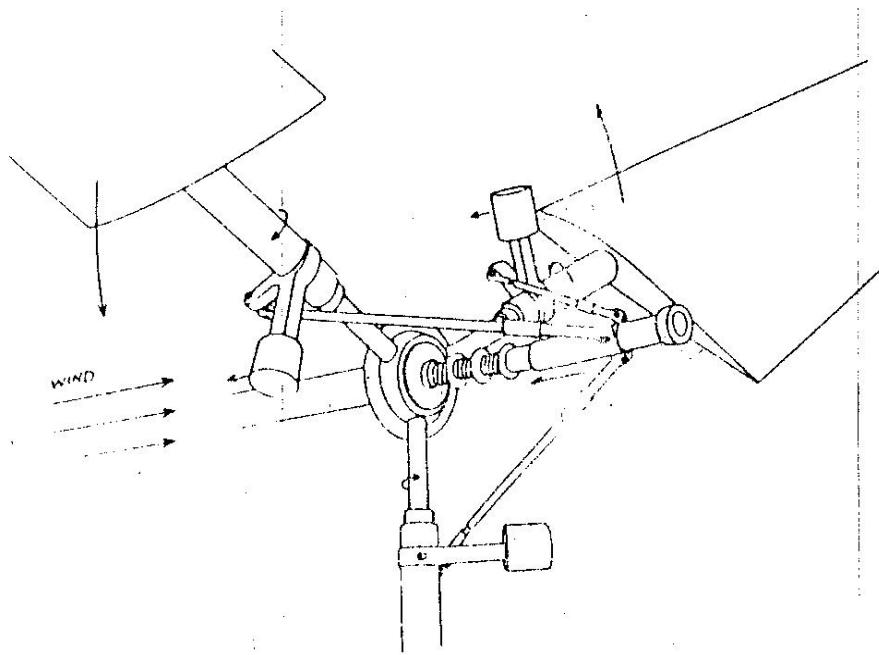
Έχοντας κατασκευάσει παράλληλα και την γεννήτρια, την χαλύβδινη κατασκευή και την ουρά, τα πτερύγια τοποθετούνται στον άξονα της γεννήτριας, ανάμεσα στους δύο ξύλινους δίσκους που αποτελούν την πλήμνη. Γίνεται ευθυγράμμιση και ζυγοστάθμιση της ανεμογεννήτριας, τοποθετώντας λεπτά φύλλα από μολύβι, ώστε να περιορίζονται οι ταλαντώσεις κατά την λειτουργία της. Έτσι, η ανεμογεννήτρια είναι έτοιμη να ανυψωθεί και να στηριχθεί με συρματόσχοινα στον τόπο εγκατάστασής της.



Σχήμα 3.4στ: Ρυθμιστής ισχύος πλευρικής μετατόπισης. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε μερικές μικρές ανεμογεννήτριες και σε αγροτικούς ανεμόμυλους.



Σχήμα 3.4ζ: Ρυθμιστής εγκάρσιας κλίσης. Μερικές μοντέρνες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν αυτήν την μέθοδο.



Σχήμα 3.4η: Φυγοκεντρικός ρυθμιστής ισχύος. Σε υψηλές στροφές του δρομέα, τα αντίβαρα του ρυθμιστή, λόγω της φυγόκεντρης δύναμης τείνουν να μετακινηθούν προς την περιφέρεια, αλλάζοντας έτσι την γωνία των πτερυγίων, μέσω των βραχιόνων και του ρυθμιστικού ελατηρίου.

Για κάθε μία από τις περιπτώσεις ρύθμισης ισχύος, απαιτείται ο υπολογισμός της αξονικής δύναμης που δέχεται ο δρομέας, σε σχέση με την ταχύτητα του

ανέμου και τις εμφανιζόμενες ροπές (σελίδα 88), που για την εφαρμογή μας είναι $F=226.4N$ (23kg). Υπολογίζεται το ελατήριο για μια ορισμένη ταχύτητα ανέμου πάνω από την οποία δεν θέλουμε να δουλεύει η ανεμογεννήτρια, ώστε να μην καταστραφεί. Σήμερα στις μεσαίες και μεγάλης ισχύος, όλα γίνονται ηλεκτρονικά και μάλιστα με το γύρισμα του πτερυγίου γύρω από τον άξονά του. Για πολύ μικρές ανεμογεννήτριες δύνανται να χρησιμοποιηθούν για το σύστημα *furling*, και ελατήρια στρέψεως.

Στις ανεμομηχανές μεγάλου μεγέθους. Χρησιμοποιείται σερβοκινητήρας ο οποίο ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και που προσανατολίζει τον δρομέα κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου.

3.4.2 Παράδειγμα υπολογισμού συστήματος ελέγχου μηχανικής ισχύος:

Για την περίπτωση μας θα αναφερθούμε στην περίπτωση του σχήματος 3.4στ, και που η αξονική δύναμη που δέχεται ο δρομέας από τον άνεμο ταχύτητας $V=10m$ είναι $F=226.4N$ (23kg). Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4θ, η ώση (F) που εμφανίζεται στον δρομέα ενεργεί παράκεντρα ως προς το σημείο στήριξης και περιστροφής του συνόλου του άξονος και της γεννήτριας, δημιουργώντας μία ροπή ίση με το γινόμενο της ώσης του δρομέα επί την κάθετη απόσταση (α) του σημείου (1) από τον άξονα του δρομέα. Για να αποτρέψουμε αυτή την ροπή να στρέψει τον δρομέα, αναπτύσσουμε μια αντίθετη ροπή με το ελατήριο, μέχρι την ταχύτητα του ανέμου που επιθυμούμε να δουλεύει ο A/K. Με την προτάμηση του ελατηρίου, κρατάμε τον δρομέα κάθετο ως προς τον άνεμο, πέραν αυτής της ταχύτητας του ανέμου που δεν θέλουμε να κινείται ο δρομέας για να μην καταστραφεί από υπερτάχυνση. Η ροπή της ώσης του δρομέα όταν αυξηθεί από την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, υπερνικά την ροπή του ελατηρίου και παρεκκλίνει της καθέτου ο άξονας του δρομέα, και μεγαλώνοντας έτσι την γωνία (ϕ) και με την σειρά της αυτή ελαττώνει τον συντελεστή ισχύος C_p , αφού θα φθάσει να συμπίπτει η γραμμή μηδενικής ισχύος με την γραμμή της διεύθυνσης του ανέμου ($\theta'=\phi$), όπου θα φθάσει να έχουμε μηδενική ισχύ, ρυθμίζοντας έτσι την μηχανική ισχύ από υπερφόρτωση και προστατεύει έτσι τον A/K από την καταστροφή.

Για το παράδειγμα της εφαρμογής έχουμε:

Αν η απόσταση (α) είναι 10cm και η απόσταση (β) είναι 30cm, τότε για να εργάζεται κανονικά ο A/K σε ταχύτητα ανέμου ίση με 10m/sec, θα πρέπει η προτάμηση του ελατηρίου να αναπτύσσει δύναμη ίση με:

$$F \cdot \alpha = S \cdot \beta \Rightarrow S = \frac{F \cdot \alpha}{\beta} = \frac{226.4 \cdot 10}{30} = 75.4N \quad \boxed{S = 75.4N}$$

Για να εργάζεται μέχρι και με 12m ταχύτητα ανέμου, τότε θα πρέπει το ελατήριο να αναπτύσσει δύναμη ίση με:

Η ώση τότε θα είναι:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 [4 \cdot a(1-a)] = \frac{1}{2} \cdot 1.222 \cdot 4.2 \cdot 12^2 [4 \cdot 0.309 \cdot (1-0.309)] = 315.6N$$

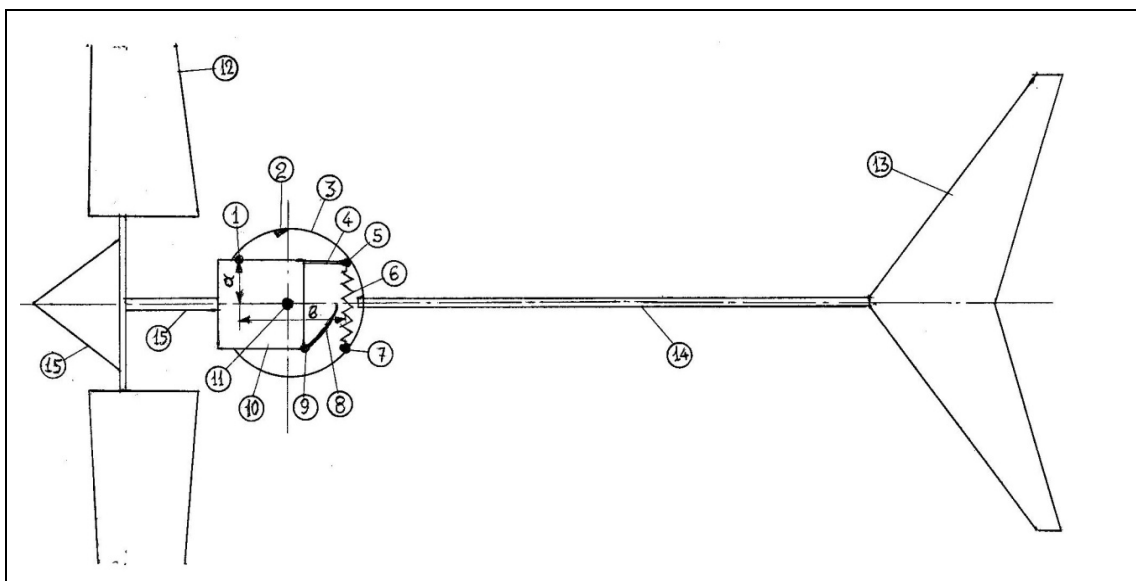
και η προτάνυση του ελατηρίου θα πρέπει να είναι ίση με:

$$S \cdot \beta = F \cdot \alpha \Rightarrow S = \frac{F \cdot \alpha}{\beta} = 315.6N \quad \boxed{S = 315.6N}$$

Για την περίπτωση ταχύτητας ανέμου ίση με $10m/sec$, το πρόγραμμα υπολογισμού σταθεράς ελατηρίου που υπάρχει στο cd, δίνει για ελατήριο με: $d=3mm$, $D=25mm$, $n=25$ σπείρες και ορίου ελαστικότητας υλικού ελατηρίων $G=8140 kg/mm^2$ ή $79,853 kN/mm^2$, το πρόγραμμα υπολογισμού σταθεράς ελατηρίου δίνει σταθερά αυτού του ελατηρίου $K=3.0372/mm$ και μήκος προτάνυσης $L_{\pi\pi}=25mm$:

$$L_{\pi\pi} = \frac{S}{K} = \frac{75.5}{3.037} \cong 25mm$$

Άρα θα έχουμε την παραπάνω δύναμη (S) αν τανύσουμε το εν λόγω ελατήριο κατά $25mm$. Στο ένα άκρο όπου προσαρμόζεται το ελατήριο, υπάρχει διάταξη τάνυσης του ελατηρίου και κατά επέκταση ρύθμισης της ισχύος του Α/Κ, έτσι ώστε στην ονομαστική ταχύτητα να συγκρατεί τον δρομέα στην θέση του, όταν όμως η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την κρίσιμη ταχύτητα, τότε η δύναμη της εμφανιζόμενης ροπής στο σύστημα furling επιμηκύνει το ελατήριο και ο δρομέας παρεκκλίνει της καθέτου προς τον άνεμο.



Σχήμα 3.4θ: Κάτοψη μηχανισμού στήριξης, ελέγχου ισχύος και προσανατολισμού του Α/Κ (Η ουρά είναι σε πρόσοψη).

Αναφορά στους αριθμούς του σχήματος 3.4θ:

1. Σημείο περιστροφής του συστήματος στήριξης του άξονος του Α/Κ και της γεννήτριας.
2. Τερματικό τακούι του συνόλου στήριξης άξονος και γεννήτριας.

3. Πλάκα περιστροφής για τον προσανατολισμό, όπου στερεώνονται όλα τ' άλλα, η οποία στερεώνεται στον στύλο ή πύργο του A/K.
4. Βραχίονας ελατηρίου, ο οποίος στερεώνεται στο σύνολο συστήματος στήριξης άξονος δρομέα και γεννήτριας.
5. Πείρος όπου πιάνει η μία άκρη του ελατηρίου.
6. Ελατήριο μηχανισμού ελέγχου ισχύος.
7. Πείρος όπου πιάνει η άλλη άκρη του ελατηρίου και είναι σταθερός στην πλάκα περιστροφής.
8. Γλισιέρα στήριξης του άλλου άκρου του συνόλου άξονος και γεννήτριας προς αποφυγήν ταλαντώσεων λόγω ροπών.
9. Πείρος ο οποίος ολισθαίνει στο αυλάκι της γλισιέρας.
10. Σύνολο συστήματος στήριξης άξονος και γεννήτριας.
11. Σημείο στήριξης και περιστροφής της πλάκας περιστροφής προσανατολισμού.
12. Φτερό του A/K.
13. Ουρά προσανατολισμού, που η επιφάνειά της είναι 1350cm^2 .
14. Άξονας ουράς, το μήκος της πρέπει να είναι το τριπλάσιο περίπου της απόστασης του δρομέα από το κέντρο περιστροφής και στήριξης του A/K.
15. Κώνος ομαλοποίησης της ροής του αέρα στο κουβούκλιο του A/K.

Ο έλεγχος και περιορισμός της μηχανικής ισχύος γίνεται σήμερα στις μεγάλες ανεμογεννήτριες, με δύο κύριους τρόπους:

- (α) Με μεταβολή της γωνίας βήματος (γωνίας προσανατολισμού) των πτερυγίων.
- (β) Με απώλεια στήριξης (stall).

Στην πρώτη περίπτωση, όταν η ισχύς ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή, το σύστημα ελέγχου μεταβάλλει κατάλληλα την κλίση των πτερυγίων. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται ο συντελεστής ισχύος C_p και κατά συνέπεια η ισχύς που απομαστεύεται από τον άνεμο, για ταχύτητες του ανέμου μεγαλύτερες από την ονομαστική ταχύτητα.

Ο δεύτερος τρόπος ρύθμισης της ισχύος εφαρμόζεται, όταν η γωνία βήματος των πτερυγίων είναι σταθερή. Από την εξίσωση ισχύος $P = 1/2 \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$, η ροπή που ασκεί ο άνεμος στον δρομέα είναι:

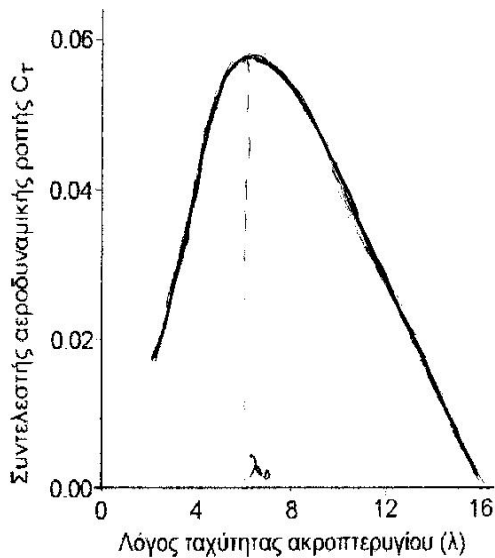
$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_T \cdot A \cdot V^2 \cdot R$$

όπου C_T είναι ο συντελεστής αεροδυναμικής ροπής του δρομέα και δίνεται από την σχέση:

$$C_T = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}. \text{ Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός των πτερυγίων γίνεται έτσι, ώστε το}$$

ονομαστικό σημείο λειτουργίας του δρομέα στην καμπύλη $C_T = C_T(\lambda)$ να βρίσκεται αριστερά του λ_0 στο σχήμα 3.4ι.

Με αυτόν τον τρόπο, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, το σημείο λειτουργίας μετακινείται αριστερότερα στην καμπύλη, μειώνεται ο C_T κι έτσι η μηχανή περιορίζεται κατασκευαστικά να μην υπερβεί την ονομαστική της ισχύ, θεωρώντας την γωνιακή της ταχύτητα σταθερή. Ο έλεγχος γίνεται ηλεκτρονικά.



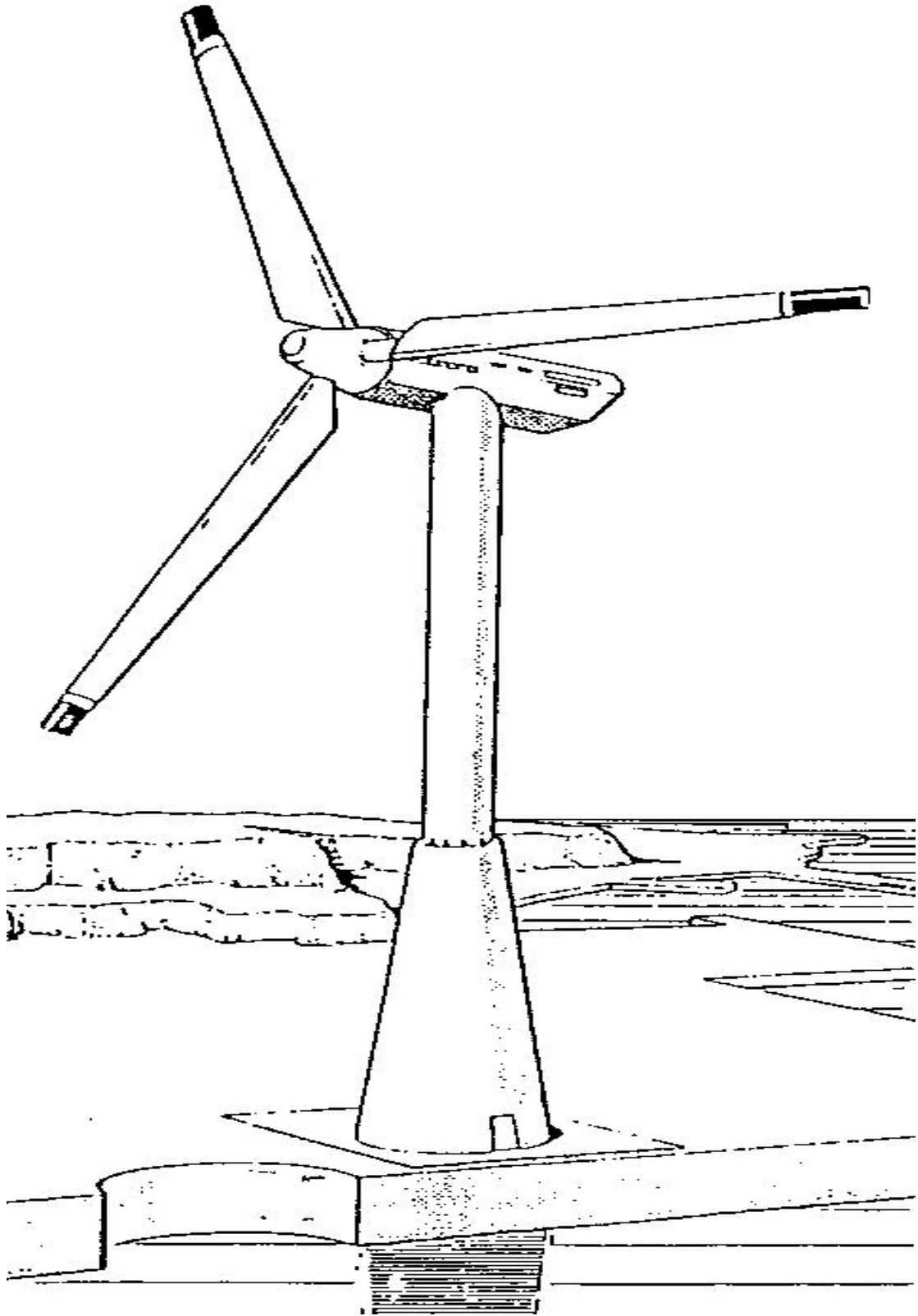
Σχήμα 3.4i: Τυπική μορφή αεροδυναμικού συντελεστή ροπής, C_T .

Επειδή, σε αντίθεση με το έλεγχο μεταβολής της γωνίας βήματος των πτερυγίων, δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη, ο έλεγχος αυτός αναφέρεται και ως **παθητικός έλεγχος**. Σήμερα, η πλειοψηφία των μεγάλων ανεμοκινητήρων χρησιμοποιούν αυτό το είδος ελέγχου.

Σε αρκετά μεγάλες μηχανές, ονομαστικής ισχύος πάνω από 1MW, τελευταία παρατηρείται η τάση να χρησιμοποιείται ο **ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης**. Στην περίπτωση αυτή, τα πτερύγια στρέφονται όπως και στην περίπτωση του ελέγχου με μεταβολή της γωνίας βήματος, με την διαφορά ότι όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή, η γωνία βήματος μεταβάλλεται αντίθετα, μεγαλώνει δηλαδή η γωνία με τον άνεμο, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο το φαινόμενο απώλειας στήριξης των πτερυγίων, αποκόπτοντας με αυτόν τον τρόπο την περίσσεια αεροδυναμικής ισχύος. Τα 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4ο



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΕ Η/Υ

4.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΕ ΤΟ EXCEL ΤΗΣ MICROSOFT.

Το Microsoft Excel είναι το πιο δημοφιλές και ισχυρό πρόγραμμα λογιστικών και υπολογιστικών φύλλων, και έχει σχεδιαστεί για το περιβάλλον των Microsoft Windows. Είναι ένα πρόγραμμα για την δημιουργία και την επεξεργασία λογιστικών φύλλων. Αυτό σημαίνει ότι τα βασικά αρχεία που φτιάχνουμε με την βοήθειά του, έχουν την μορφή των λογιστικών φύλλων. Κάτι δηλαδή σαν τις σελίδες με τις οριζόντιες γραμμές και στήλες που χρησιμοποιούσαν οι λογιστές, με την διαφορά ότι στην περίπτωση του Excel οι διάφοροι υπολογισμοί και συσχετισμοί γίνονται αυτόματα από τον υπολογιστή.

Με τα Excel μπορεί κανείς να ταξινομήσει, να διαχειριστεί και να χρησιμοποιήσει για υπολογισμούς έναν τεράστιο όγκο δεδομένων, έχοντας παράλληλα ως σύμμαχο τις ευκολίες που παρέχουν όλες οι παραθυρικές εφαρμογές. Οι δυνατότητές του, όμως, δεν σταματούν εδώ. Ένα λογιστικό φύλλο (ή “φύλλο εργασίας”) αποτελεί μια πολύ ευέλικτη “οντότητα”, η χρησιμότητα της οποίας μπορεί να ξεπεράσει τα αυστηρά όρια της “λογιστικής”.

Οι δυνατότητες του Excel περιλαμβάνουν και την δημιουργία γραφημάτων, τα οποία βασίζονται στα δεδομένα κάποιου από τα φύλλα εργασίας του εκάστοτε αρχείου. Επίσης στα φύλλα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε χρώμα, να σχεδιάσουμε, ακόμη και να εισάγουμε εικόνες. Παρέχει μια εναλλακτική λύση, για πολλούς υπολογισμούς που απαιτούνται για την ανάλυση των μακρο-επενδύσεων και μελετών. Παντού η παρουσία του και η ευκολία του στην χρήση το καταστούν μεταξύ των πιο ελκυστικών προγραμμάτων για τα βασικά χαρακτηριστικά του, όπου χρησιμοποιεί ένα πλέγμα από κύτταρα διατεταγμένα σε αριθμητικές σειρές και επιπλέον κάθετα που λέγονται στήλες για να οργανώνουν τους χειρισμούς των δεδομένων, όπως είναι οι αριθμητικές πράξεις.

Επιπλέον, μπορεί να εμφανίσει τα δεδομένα ως γραφήματα γραμμής, ιστογράμματα και διαγράμματα, με μία πολύ περιορισμένη οθόνη γραφικών. Ωστόσο, τα υπολογιστικά φύλλα είναι εμφανώς επικίνδυνα, αφού η λογική ενός συνόλου των υπολογισμών περιέχεται συνήθως σε τύπους διάσπαρτα γύρω από ένα φύλο (ή φύλλα). Χειρότερα ακόμα, οι τύποι είναι συνήθως κρυμμένοι από τα μάτια μας, πίσω από τους αριθμούς που αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα των υπολογισμών τους. Τα μειονεκτήματα αυτά είναι ιδιαίτερα μεγάλα όταν επιλέγεται κυρίως για υπολογισμούς μεγάλης σημασίας. Για ιδιαίτερους όμως σκοπούς, γλώσσες όπως η MATLAB που είναι ανώτερη από το υπολογιστικό φύλλο του Excel, έχει μεγαλύτερη προτίμηση.

Η κατάσταση δεν είναι όμως τόσο ζοφερή όσο ήταν κάποτε. Από την εισαγωγή της έκδοσης 5.0, το Excel έχει συμπεριλάβει μια πλήρη γλώσσα προγραμματισμού που επιτρέπει τα δομημένα, τεκμηριωμένα και αναγνώσιμα σετ εντολών. Η γλώσσα αυτή είναι η Visual Basic (VB). Στο Excel, οι διαδικασίες της VB ονομάζονται μακροεντολές. Με την χρήση της VB, επιτρέπει στον χρήστη να χρησιμοποιεί μια ευρεία ποικιλία αριθμητικών μεθόδων, για παράδειγμα, για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων της μαθηματικής φυσικής, και στην συνέχεια αναφέρει τα αποτελέσματα πίσω στο υπολογιστικό φύλλο. Έχει επίσης μια ποικιλία από διαδραστικές λειτουργίες που επιτρέπουν διασυνδέσεις χρήστη, που μπορεί να

κρύψει εντελώς το φύλλο από τον χρήστη, έτσι ώστε το φύλλο να παρουσιάζει τον εαυτό του ως λέγεται, εφαρμογή. Σε μια πιο λεπτομερή υλοποίηση, η εφαρμογή του Excel μπορεί αυτόματα να σταθμίσει τις εξωτερικές βάσεις δεδομένων και τα όργανα μέτρησης, χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα ενημέρωσης, αναλύει τα αποτελέσματα, να κάνει μία έκθεση του word ή προβολή διαφανειών (Power Point), ακόμη και αποστολή e-mail, και τα παρουσιάζει σε τακτική βάση σε μια λίστα των συμμετοχόντων.

Συνοπτικά, με το πρόγραμμα αυτό μπορούμε να:

- ✓ Επεξεργαζόμαστε δεδομένα.
- ✓ Εκτελούμε απλές και πολύπλοκες αριθμητικές πράξεις.
- ✓ Χρησιμοποιούμε τις εκατοντάδες συναρτήσεις που περιέχει το πρόγραμμα, για να πραγματοποιούμε σύνθετους υπολογισμούς, οι οποίες είναι, οι μαθηματικές, τριγωνομετρικές, στατιστικές, οικονομικές, οι λογικές κλπ.
- ✓ Ταξινομούμε δεδομένα.
- ✓ Δημιουργούμε γραφήματα.
- ✓ Χρησιμοποιούμε εικόνες και γραφικά για την παρουσίαση των δεδομένων μας.
- ✓ Και ακόμη, παρουσιάζει τα δεδομένα μας με εντυπωσιακό και αποτελεσματικό τρόπο.

Λόγω των πλεονεκτημάτων αυτών και της μη ιδιαίτερης γνώσης, χρησιμοποιούμε το Excel στην εφαρμογή, για τον υπολογισμό της πτερύγωσης και των λοιπών εξαρτημάτων, που για την περίπτωση μας η ταχύτητα και η αξιοπιστία του είναι πολύ μεγάλη.

4.2 Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ.

Το πρόγραμμα υπολογισμού πτερύγωσης, που όπως είπαμε είναι με το Excel, λαμβάνει τα δεδομένα από τον χρήστη, σε έναν πίνακα, τα οποία καταχωρούνται ένα προς ένα, και με την πληκτρολόγηση των απαιτούμενων δεδομένων μεγεθών, μπορεί ο χρήστης να δει τα αποτελέσματα των υπολογισμών του προγράμματος, σε χρόνο dt!

Εκτός αυτών, υπολογίζονται στο πρόγραμμα και άλλα επί πλέον στοιχεία όπως: Ο πραγματικός συντελεστής ισχύος, η ισχύς κτλ.

Τα δεδομένα που καταχωρούμε είναι με τη σειρά εισόδου:

- ✓ Ταχύτητα ανέμου (V) σε m/sec.
- ✓ Ισχύς γεννήτριας (P_{out}) σε Watt.
- ✓ Περιστροφική ταχύτητα γεννήτριας (U) σε rpm.
- ✓ Λόγος ταχύτητας κορυφής ($\lambda_{επ}$).
- ✓ Αριθμός πτερυγίων {B}.
- ✓ Υποθετικός συντελεστής ισχύος (C_p)
- ✓ Πυκνότητα αέρα (ρ) σε kg/m^3 .
- ✓ Συντελεστής μηχανικής απόδοσης ($\eta_{μηχ}$).
- ✓ Συντελεστής ηλεκτρικής απόδοσης γεννήτριας ($\eta_{γεν}$).
- ✓ Αποκοπή από την ρίζα (A.P.), (%).

- ✓ Αριθμός σημείων υπολογισμού (Z).

Με την διαδικασία εισόδου των δεδομένων, το πρόγραμμα κάνει όλους τους απαιτούμενους υπολογισμούς στο παρασκήνιο, και αποτυπώνονται στα ανάλογα κελιά σε κλάσμα δευτερολέπτου!

Αναλυτικότερα, υπολογίζονται πρώτα τα βασικά μεγέθη όπως:

- ✓ Η επιφάνεια σάρωσης (A) σε m^2 και η ακτίνα του δρομέα (R) σε m.
- ✓ Η περιστροφική ταχύτητα του δρομέα ($\Omega_{\delta\rho}$) και γεννήτριας ($\Omega_{\gamma\epsilon\nu}$) σε rad/sec.
- ✓ Η απαιτούμενη σχέση μετάδοσης, η τελική εκλεγόμενη σχέση μετάδοσης (όταν $i_n = a^{\pm} 0.5$ τότε γίνεται αυτόματα απ' το πρόγραμμα $i_n = a$).
- ✓ Η τελική περιστροφική ταχύτητα του δρομέα ($\Omega_{\delta\rho}$) σε rad/sec και σε rpm.
- ✓ Ο τελικός λόγος ταχύτητας κορυφής πτερυγίου λ .
- ✓ Η γωνία πρόσπτωσης (προσβολής) (α^0) σε μοίρες, η οποία υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα συναρτήσει του τελικού λόγου ακροπτερυγίου (λ), από ένα πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού, που προσεγγίζει πάρα πολύ το διάγραμμα ($\lambda - C_p$) του σχήματος 2.6στ σελ. 30.
- ✓ Ο συντελεστής άνωσης (C_L), ο οποίος υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα, με την σχέση $C_L = 0.1215 \cdot a^0$, λόγω της γραμμικότητας που παρουσιάζει στο διάγραμμα ($a^0 - C_L$) του σχήματος 3.1γ σελ. 80.
- ✓ Το ενεργό μήκος του πτερυγίου (L_ϵ) σε m.
- ✓ Το ανενεργό μήκος του πτερυγίου (R_α) σε m.

Κατόπιν δημιουργείται ένας πίνακας, ο πίνακας 3.1β σελ. 86, που περιέχει την τοπική ακτίνα (r), τον τοπικό λόγο (λ), τον συντελεστή αξονικής επαγωγής (a), την γωνία ανέμου (φ^0), την γωνία συστροφής (θ^0) και το μήκος της χορδής (C) για κάθε σημείο υπολογισμών του πτερυγίου.

Τα σημεία υπολογισμών του πτερυγίου μπορεί να είναι από δέκα έως και πενήντα, εδώ πήραμε δέκα σημεία. Τα σημεία υπολογισμού είναι ο αριθμός των κάθετων τομών που γίνονται στο πτερύγιο, για να υπολογιστούν τα σχετικά με την κάθε τομή μεγέθη και στην συνέχεια οι συντεταγμένες της αεροτομής του πτερυγίου.

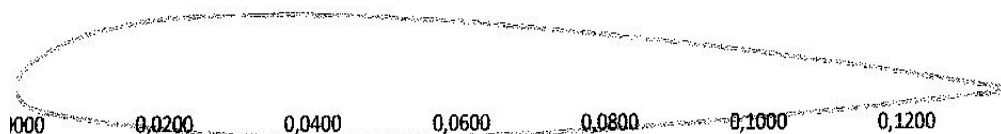
Οι συντεταγμένες των αεροτομών είναι ο επόμενος εσωτερικός υπολογισμός του προγράμματος. Για κάθε αεροτομή υπολογίζονται συνολικά 26 σημεία για την πάνω και 26 σημεία για την κάτω επιφάνεια. Τα στοιχεία των συντεταγμένων που παίρνονται από τον πίνακα 3.1α της σελίδας 83 της NACA 23012, πολλαπλασιάζονται με το εκάστοτε μήκος της χορδής και επί τοις εκατό για να έχουμε μετά τους δέκα πίνακες με της συντεταγμένες κάθε αεροτομής. Έχουμε δέκα τμήματα υπολογισμών που χωρίζεται κάθε πτερύγιο, άρα το πρόγραμμα θα υπολογίσει $10 \times 26 \times 2 = 520$ σημεία. Αυτά τα σημεία αν ενωθούν με ιδανική καμπύλη τότε η καμπύλη αυτή θα αποτελεί την όλη επιφάνεια του πτερυγίου.

Με τον οδηγό γραφημάτων του Excel, μπορούμε να παρουσιάσουμε την μορφή και το μέγεθος των αεροτομών.

Για τον χειρισμό του προγράμματος υπολογισμού δεν απαιτείται καμία απολύτως ειδική γνώση του Excel, απλά και μόνο θέτουμε τα δεδομένα και ο

υπολογιστής υπολογίζει σε χρόνο dt , όλα αυτά που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Μόνο την αποτύπωση των αεροτομών, χρειάζεται να επιλέξουμε πρώτα τις συντεταγμένες της αεροτομής που θέλουμε να αποτυπώσουμε και με τον οδηγό διαγραμμάτων του Excel και επιλέγουμε το διάγραμμα “Διασπορά με ομαλές γραμμές”, αποτυπώνουμε το προφίλ της αεροτομής.

Υπάρχουν προγράμματα, όπως το Daedalus, τα οποία είναι αποκλειστικά για να αποτυπώνουν αεροτομές. Παρακάτω φαίνεται το αποτύπωμα της 4ης αεροτομής και της 10ης αεροτομής (τελευταίας), την οποίαν μπορούμε να την διαμορφώσουμε σε όποιο μέγεθος θέλουμε, με το Excel, διότι όλες οι συντεταγμένες όλων των χορδών, έχουν τις ανάλογες με το μήκος τους συντεταγμένες!

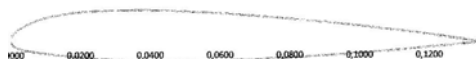


Σχήμα 4.2α: Αποτύπωμα της 4ης αεροτομής με το Excel.



Σχήμα 4.2β: Αποτύπωμα της 10ης αεροτομής (τελευταίας) με το Excel.

Η μετά την διόρθωση του ακροπτερυγίου της ακτίνας $R_{\text{τελ}}$. ($R-R*3\%=1.156-1.156/100 = 1.121$ m) αεροτομή, θα είναι η παρακάτω:



Σχήμα 4.2γ: Αποτύπωμα της τελευταίας αεροτομής μετά την διόρθωση.

ΤΕΛΟΣ

Πίνακας Περιεχομένων:

	Σελίδα
Περίληψη.....	2
ΚΑΦΑΛΑΙΟ 1ο.	3
Αντί προλόγου	4
1 Ιστορική ανασκόπηση.	5
1.1 Γενικά.	6
1.2 Ο άνεμος και τα χαρακτηριστικά του – Αιολική ενέργεια.	7
1.3 Εφαρμογές ανεμοκινητήρων σήμερα.	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο - Ανάλυση θεωριών.	11
2.1 Γενικά.	13
2.2 Θεωρία.	14
2.3 Εφαρμογή των νόμων διατήρησης.	16
(α) Διατήρηση της μάζας.	16
(β) Διατήρηση της ορμής.	16
(γ) Ενεργειακός ισολογισμός.	18
2.4 Όριο του Betz.	19
2.5 Επίδραση της περιστροφής του ομμόρου.	22
(δ) Θεώρημα της ροπής της ορμής.	25
2.6 Θεωρία στοιχείων περύγωσης.	26
2.7 Θεωρία δισδιάστατης αεροτομής.	31
2.8 Καταστάσεις του δρομέα (Διερεύνηση λειτουργίας δρομέα).	34
2.9 Διορθώσεις της θεωρίας του δίσκου ενέργειας.	39
(α) Κατάσταση πέδησης.	39
(β) Διορθώσεις ακροπτερυγίων – Διόρθωση Prantl.	39
2.10 Καμπύλη ισχύος δρομέα.	41
2.11 Συνθήκες υπολογισμού φορτίων του ανεμοκινητήρα.	44
2.12 Αεροδυναμικός σχεδιασμός του δρομέα.	45
2.13 Αριθμός πτερυγίων.	46
2.14 Λόγος ταχύτητας κορυφής πτερυγίου (ΛTK) λ.	47
2.15 Βελτιστοποίηση σχεδίασης δρομέα.	50
2.16 Καμπύλες λειτουργίας δρομέα Α/Κ.	52
2.17 Αιολικό δυναμικό και θεωρητικός υπολογισμός κατανομής συχνοτήτων ταχύτητας ανέμου.....	53
2.17α Γενικά.	53
2.17β Πρότυπα ανέμου.	55
2.17γ Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με τον χρόνο.	57
2.17δ Στοιχεία ανέμου για την εκτίμηση της λειτουργικής απόδοσης.	61
2.17ε Θεωρητικός υπολογισμός κατανομής συχνοτήτων ταχύτητας ανέμου....	61
(α) Πιθανότητα κατανομής ταχύτητας ανέμουWeibull.	62
(β) ΚατανομήRayleigh.	67
2.17στ Ενέργεια και ισχύς του ανέμου.....	68
2.17ζ Ενεργειακές απώλειες.	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο - ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ	75
3.1 Διαστασιολόγηση πτερύγωσης.	76
3.1α Μέθοδος Βήμα προς Βήμα – J.R. Park.	76
3.1β Παράδειγμα εφαρμογής για ανεμοκινητήρα 1 HP (736 watt).	84
3.2 Αποτύπωση αεροτομής.	90
(α) Με κανόνα και καμπυλόγραμμο.	90
(β) Με τον Η.Υ.	91
3.3 Η αεροτομή NACA 23012.	92
3.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αεροτομών NACA.	92
3.4 Τα βασικά στοιχεία της αεροδυναμικής και κατασκευή των πτερυγίων...	94
3.4.1 Κατασκευή των πτερυγίων, του συστήματος προσανατολισμού και του συστήματος προστασίας.	97
3.4.2 Παράδειγμα υπολογισμού συστήματος ελέγχου μηχανικής ισχύος.	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο	105
4.1 Προγραμματισμός με το Excel της Microsoft.	106
4.2 Η εφαρμογή στον υπολογισμό της πτερύγωσης.	107

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ-ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ-ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΤΩΝ

Σχήματα:

Σχήμα 1.1: Περσικός ανεμόμυλος πλακών κατακόρυφου άξονα.....	6
Σχήμα 1.3α: Εκτέλεση έργου με εκμετάλλευση της αεροδυναμικής ενέργειας.....	8
Σχήμα 1.3β: Εκμετάλλευση αντίστασης για παραγωγή έργου. Βελτίωση της διάταξης του σχ. 1.3α.....	8
Σχήμα 1.4α: Τύποι ανεμοκινητήρων. (α) Παραδοσιακός νησιώτικος Α/Κ, (β) διπτέρυγος Α/Κ οριζοντίου άξονα, (γ) τριπτέρυγος Α/Κ τύπου Darrieus, (d) Α/Κ τύπου Savonius.....	9
Σχήμα 1.4β: Τύποι ανεμοκινητήρων οριζοντίου άξονα.....	10
Σχήμα 1.4γ: Τύποι ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα.....	11
Σχήμα 2.2α: Ροϊκός σωλήνας δρομέα Α/Κ	14
Σχήμα 2.2β: Ροϊκός σωλήνας έλικας αεροσκάφους.....	15
Σχήμα 2.3α: Επιφάνεια ελέγχου.....	16
Σχήμα 2.4α: Καμπύλη C_p απόδοσης δρομέα $C_p=4a(1-a)^2$	21
Σχήμα 2.4β: Συντελεστής ώθησης Α/Κ.....	21
Σχήμα 2.4γ: Μεταβολή διατομών ροϊκού σωλήνα Α/Κ.....	22
Σχήμα 2.5α: Ελικοειδής ομόρρους ανεμοκινητήρα οριζοντίου άξονα.....	23
Σχήμα 2.5β: Η ελικοειδής περιστρεφόμενη επιφάνεια του ομόρρους.....	23
Σχήμα 2.5γ: Δακτυλιοειδής ροϊκός σωλήνας πάχους dr ακτίνας r	25
Σχήμα 2.6α: Τρίγωνο ταχυτήτων (γεωμετρικό).....	26
Σχήμα 2.6β: Επαγόμενη ταχύτητα – πραγματικό τρίγωνο ταχυτήτων.....	27
Σχήμα 2.6γ: Δυνάμεις που αναπτύσσονται στην αεροτομή του Α/Κ.....	27
Σχήμα 2.6δ: Τυπική μεταβολή C_L με γωνία πρόσπτωσης. (Τα σύμβολα φανερώνουν μετρήσεις για διάφορους αριθμούς Re).....	28

Σχήμα 2.6ε:	Τυπική μεταβολή C_D με γωνία πρόσπτωσης.....	28
Σχήμα 2.7α:	Αεροδυναμικές δυνάμεις και ροπή, που εμφανίζονται σε μια αεροτομή.....	32
Σχήμα 2.7β:	Χαρακτηριστικοί συντελεστές μιας αεροτομής.....	33
Σχήμα 2.8α:	Γεωμετρία μηδενικής άνωσης.....	35
Σχήμα 2.8β:	Καταστάσεις του δρομέα.....	36
Σχήμα 2.8γ:	Συντελεστής ώθησης C_T , συναρτήσει του συντελεστή αξονικής απαγωγής a	37
Σχήμα 2.8δ:	Απεικόνιση κατάστασης έλικας ελικοπτήρου για $V_0 > 0$ και $V_0 < 0$, απεικονίζει την κατάσταση απλού ανεμόμυλου.....	38
Σχήμα 2.9α:	Διόρθωση συντελεστή ώσης κατά Glauert.....	40
Σχήμα 2.10α:	Καμπύλες ισχύος δρομέα διαμέτρου 50m. Διακρίνονται οι δύο στρατηγικές λειτουργίες του δρομέα: - (α) Σταθερού λ , και (β) σταθερού βήματος – σταθερών στροφών.....	42
Σχήμα 2.10β:	Απόδοση δρομέα με και χωρίς ρύθμιση ακροπτερυγίου.....	42
Σχήμα 2.10γ:	Ωστική δύναμη στον δρομέα.....	43
Σχήμα 2.10δ:	Καμπύλη ισχύος A/K διαμέτρου δρομέα 50m.....	43
Σχήμα 2.13β:	Ενέργειες πεπερασμένου αριθμού πτερυγίων στους συντελεστές ισχύος και ώθησης.....	47
Σχήμα 2.14α:	Καταστάσεις μειωμένης απόδοσης ανεμομηχανής: α) Όταν τα πτερύγια στρέφονται με μικρή ταχύτητα ή είναι μακριά μεταξύ τους. β) Όταν τα πτερύγια στρέφονται κανονικά σε σχέση με την απόστασή τους. γ) Όταν τα πτερύγια είναι πολύ κοντά μεταξύ τους ή στρέφονται πολύ γρήγορα.....	48
Σχήμα 2.14β:	Συντελεστής ισχύος C_p σε συνάρτηση του λόγου λ	50
Σχήμα 2.16α:	Τυπικές καμπύλες C_M και C_p ενός ανεμοκινητήρα τριών πτερυγίων οριζοντίου άξονα.....	53
Σχήμα 2.17β1:	Οι συνοπτικοί άνεμοι που κατά κύριο λόγο πνέουν στην Ευρώπη.....	56
Σχήμα 2.17γ1:	Εποχιακές καμπύλες διάρκειας πνοής ανέμου.....	58
Σχήμα 2.17γ2:	Τυπική καμπύλη διάρκειας πνοής ανέμου.....	59
Σχήμα 2.17γ3:	Πυκνότητα πιθανότητας κατανομής μέσης ταχύτητας.....	60
Σχήμα 2.17γ4:	Ροδόγραμμα πνοής ανέμου.....	60
Σχήμα 2.17ε1:	Προσαρμοσμένη κατανομή συχνοτήτων ταχύτητας ανέμου.....	63
Σχήμα 2.17ε2:	Τυπική μορφή της κατανομής Weibull.....	65
Σχήμα 2.17ε3:	Η βέλτιστη κατανομή Weibull σε λογαριθμική κλίμακα.....	65
Σχήμα 2.17ε4:	Κατανομή Rayleigh για διάφορες μέσες ταχύτητες ανέμου.....	67
Σχήμα 2.17ε5:	Αύξηση του αιολικού δυναμικού με την απόσταση από το έδαφος.....	69
Σχήμα 2.17ε6:	Παράμετροι c και k της κατανομής Weibull στον Ελλαδικό χώρο.....	70
Σχήμα 2.17ε7:	Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου στον Ελλαδικό χώρο, σε ύψος 10m.....	70
Σχήμα 2.17ζ1:	Ισχύς ανέμου και ανεμοκινητήρα.....	72
Σχήμα 2.17ζ2:	Ενεργειακές απώλειες στην καμπύλη διάρκειας πνοής ανέμου.....	73
Σχήμα 2.17ζ3:	Συντελεστής χωρητικότητα Ευρωπαϊκών A/K	73
Σχήμα 3.2α:	Αποτύπωση αεροτομής με κανόνα και καμπυλόγραμμο.....	91
Σχήμα 3.3.1α:	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας αεροτομής.....	92
Σχήμα 3.4.α:	Δυνάμεις που αναπτύσσονται σε μια αεροτομή πτερυγίου A/K	95
Σχήμα 3.4β:	Μεταβολή του μήκους χορδής αεροτομής σε σχέση με την απόσταση από τον άξονα, για διαφορετικούς λόγους ταχύτητας ακροπτερυγίου.....	96
Σχήμα 3.4γ:	Διαμόρφωση του επιθυμητού μήκους χορδής (α) και της επιθυμητής γωνίας βήματος (β).....	97
Σχήμα 3.4δ:	Διαμόρφωση του επιθυμητού πάχους (α) και της αεροτομής των πτερυγίων (β).....	98
Σχήμα 3.4 ^ε :	Λειτουργία του συστήματος <i>furling</i> σε υψηλές ταχύτητες ανέμου.....	99
Σχήμα 3.4στ:	Ρυθμιστής ισχύος πλευρικής μετατόπισης. Αυτή η μέθοδος	

	χρησιμοποιείται σε μερικές μικρές ανεμογεννήτριες και σε αγροτικούς ανεμόμυλους.....	99
Σχήμα 3.4ζ:	Ρυθμιστής εγκάρσιας κλίσης. Μερικές μοντέρνες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν αυτήν την μέθοδο.....	100
Σχήμα 3.4η:	Φυγοκεντρικός ρυθμιστής ισχύος. Σε υψηλές στροφές του δρομέα, τα αντίβαρα του ρυθμιστή λόγω της φυγόκεντρης δύναμης, τείνουν να μετακινηθούν προς την περιφέρεια, αλλάζοντας έτσι την γωνία των πτερυγίων, μέσω των βραχιόνων και του ρυθμιστικού ελατηρίου.....	100
Σχήμα 3.4θ:	Κάτοψη μηχανισμού στήριξης, ελέγχου ισχύος και προσανατολισμού του Α/Κ (η ουρά είναι σε κάτοψη).....	102
Σχήμα 3.4ι:	Τυπική μορφή αεροδυναμικού συντελεστή ροπής C_T	104
Σχήμα 4.2α:	Αποτύπωση της 4 ^{ης} αεροτομής με το Excel.....	109
Σχήμα 4.2β:	Αποτύπωση της 10 ^{ης} αεροτομής με το Excel.....	109
Σχήμα 4.2γ:	Αποτύπωμα της τελευταίας αεροτομής μετά την διόρθωση.....	109

Διαγράμματα

Σχήμα 2.3β:	Διάγραμμα ροής ανέμου.....	17
Σχήμα 2.6στ:	Διάγραμμα (λ - C_p).....	31
Σχήμα 3.1α:	(α) Διάγραμμα στερεότητας σ. (β) Διάγραμμα γωνίας φ και λόγου λ.....	78
Σχήμα 3.1β:	Διάγραμμα εκλογής παραμέτρου SP.....	80
Σχήμα 3.1γ:	Διάγραμμα ($\alpha^0 - C_l$), συντελεστού ανώσεως και γωνίας προσπτώσεως.....	82
Σχήμα 3.1δ:	Διάγραμμα ($C_l - C_d$), συντελεστού ανώσεως και συντελεστού αντίστασης.....	83

Φωτογραφίες

Φωτογραφία 2.5α:	Οπτικοποίηση περιστρεφόμενου ομόρρου – Διαστολή ομόρρου.....	22
Φωτογραφία 2.5β:	Οπτικοποίηση περιστρεφόμενου ομόρρου. Εκτίμηση βήματος (καταστροφή συστολής λόγω τύρβης μέσα σε 5 περιστροφές).....	24

Πίνακες

Πίνακας 2.13α:	Πίνακας εκλογής αριθμού πτερυγίων.....	46
Πίνακας 2.17.1:	Μετατροπή της κλίμακας Beaufort.....	55
Πίνακας 2.17-2:	Μέσες ταχύτητες ανέμου διαφόρων περιοχών.....	71
Πίνακας 3.1α:	Συντεταγμένες αεροτομής NACA 23012.....	85
Πίνακας 3.1β:	Υπολογισμός στοιχείων αεροτομών.....	88
Πίνακας 3.1γ:	Πίνακας συντεταγμένες σχεδιασμού 4 ^{ης} αεροτομής.....	89

Χάρτες

Σχήμα 2.17β1:	Οι συνοπτικοί άνεμοι που κατά κύριο λόγο πνέουν στην Ευρώπη.....	56
Σχήμα 2.17β2:	Πεδίο κυκλοφορίας των ανέμων στην επιφάνεια της γης.....	57
Σχήμα 2.17β3:	Ευρωπαϊκός αιολικός χάρτης.....	57

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ήπιες μορφές ενέργειας – Αναστάσιος Ι. Μπαλουκτσής – Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών.
2. Ανεμοκινητήρες – Γ Μπεργελές – Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. Πρακτικά Εθνικών Συνεδρίων για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας – Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
4. Wind Energy Conversion Systems – L.L. Freris – Prestice Hall.
5. Wind Turbine Enginniring Design – David M. Enggleston/ Forest S. Stoddard.
6. Wind Machines – Frank R. Eldridge.
7. Ξένη και Ελληνική βιβλιογραφία μέσω internet.

