

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

3.1. Εισαγωγή

Ο ανεμοκινητήρας από την εποχή της εμφάνισης του μέχρι σήμερα έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο του (οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματα του (πτερύγια, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί, γεννήτρια κ.λπ.). Εξελίξεις έχουν επίσης σημειωθεί και στον τρόπο δέσμευσης, αξιοποίησης, αποθήκευσης ή μεταφοράς της ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται από τον ανεμοκινητήρα σε άλλη «αναβαθμισμένη» μορφή ενέργειας.

Μια εικόνα των βασικών μερών που αποτελούν μια διάταξη εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας καθώς και της ροής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Διάταξη εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας.

Η διάταξη αυτή είναι μια γενική περίπτωση όπου η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με τη βοήθεια μιας αεροδυναμικής διάταξης (π.χ. μιας έλικας). Αυτό το μηχανικό έργο μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμο επί τόπου (π.χ. άντληση νερού). Στη γενικότερη όμως περίπτωση απαιτείται η μετατροπή του σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, είτε γιατί δεν χρειαζόμαστε μόνο μηχανικό έργο, είτε γιατί ο τόπος της κατανάλωσης δεν συμπίπτει με τον τόπο που είναι εγκατεστημένος ο ανεμοκινητήρας, δηλαδή απαιτείται η μεταφορά της δεσμευόμενης αιολικής ενέργειας. Σ' αυτήν την περίπτωση η πιο πρόσφορη διάταξη είναι εκείνη που μετατρέπει το μηχανικό έργο σε άλλη μορφή ενέργειας, που μπορεί να μεταφέρεται εύκολα και

αποδοτικά στο τόπο της κατανάλωσης. Εδώ και πολύ καιρό μάλιστα οι περισσότερες έρευνες στρέφονται προς τη κατεύθυνση της μετατροπής του μηχανικού έργου του δρομέα του ανεμοκινητήρα σε ηλεκτρική ενέργεια, λόγω της εύκολης μεταφοράς ή της παραγωγής επί τόπου υδρογόνου (με ηλεκτρόλυση) που μπορεί να αποθηκευτεί ή να μεταφερθεί και να καεί ως αέριο καύσιμο. Η τελευταία περίπτωση αποτελεί ίσως και την βέλτιστη από πολλές απόψεις πρόταση αξιοποίησης γενικότερα των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, δεδομένου ότι είναι οικολογικά αποδεκτή διότι την καύση του υδρογόνου παράγεται μόνο νερό.

Είναι γνωστές οι μεγάλες διακυμάνσεις της ενέργειας του ανέμου με το χρόνο. Είναι επίσης γεγονός ότι πολλές φορές δεν πνέει καθόλου άνεμος για ορισμένα χρονικά διαστήματα. Αυτά έχουν ως συνέπεια χρονική ασυμφωνία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής ενέργειας. Η λύση στο πρόβλημα βρίσκεται βασικά στην αποθήκευση της ενέργειας. Η αποθηκευμένη ενέργεια καλύπτει το ενεργειακό έλλειμμα που παρατηρείται, όταν η ισχύς του ανέμου πέφτει κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο. Το επίτευξη αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά ενεργειακής ζήτησης και τα χαρακτηριστικά των άλλων πηγών ενέργειας που υπάρχουν για την ικανοποίηση της ζήτησης αυτής, π.χ. «στιβαρότητα του ηλεκτρικού δικτύου», είδος σταθμών παραγωγής κ.λπ.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός πλήρους συστήματος εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας περιλαμβάνει:

1. Μελέτη των χαρακτηριστικών του ανέμου με σκοπό την εκλογή της βέλτιστης τοποθεσίας για την εγκατάσταση του ανεμοκινητήρα και την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας.
2. Σχεδιασμός της αεροδυναμικής διάταξης, που να μετατρέπει κατά τον αποδοτικότερο τρόπο την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο.
3. Μελέτη της περίπτωσης μετατροπής του μηχανικού έργου σε άλλη πιο συμφέρουσα μορφή ενέργειας και βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος μετατροπής του μηχανικού έργου του δρομέα.
4. Εύρεση του καλύτερου τρόπου αντιμετώπισης των διακυμάνσεων της ενέργειας του ανέμου.
5. Μελέτη του βέλτιστου τρόπου μεταφοράς ενέργειας, αν απαιτείται.
6. Διερεύνηση της καλύτερης προσαρμογής της μεταβαλλόμενης παραγωγής ενέργειας του συστήματος προς την κατανάλωση.

Οι λέξεις «καλύτερος», «βέλτιστος», υποδηλώνουν βελτιστοποίηση τόσο από οικονομικής όσο και (κυρίως) οικονομικής σκοπιάς. Μία οποιαδήποτε επιστημονική έρευνα ή και βέλτιστη διάταξη αιολικής εγκατάστασης θα έχανε το μεγαλύτερο μέρος της αξίας της, αν στους στόχους της δεν είχε να καταστήσει την αιολική ενέργεια οικονομικά ανταγωνιστική με τις άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας.

3.2. Τύποι συλλογής της αιολικής ενέργειας

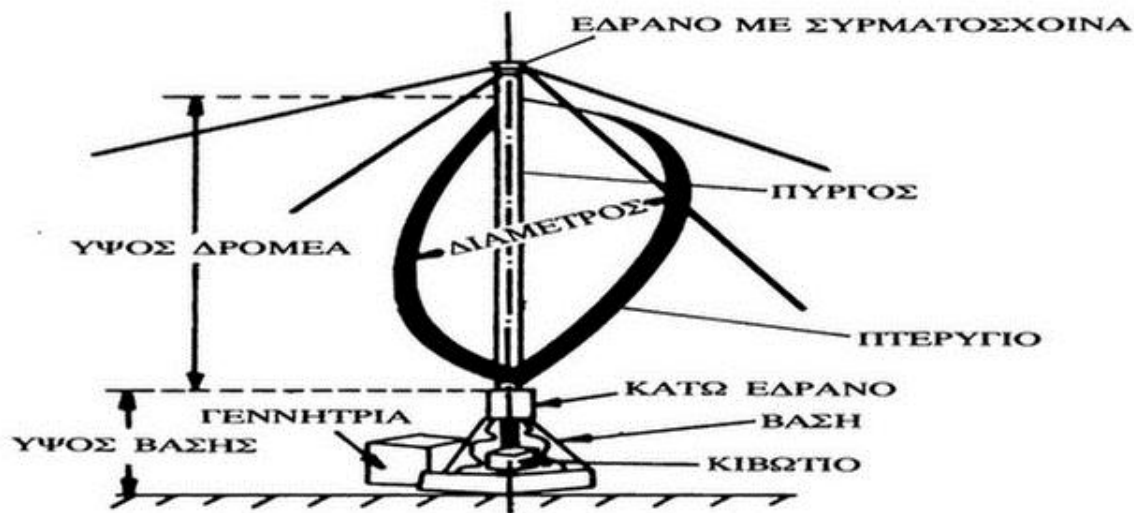
Λέγεται ότι μέχρι σήμερα έχουν επινοηθεί και εφαρμοστεί στην πράξη περισσότεροι τύποι ανεμομηχανών από οποιοδήποτε άλλο τύπο εφεύρεσης.

Οι ανεμοκινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με την ροή του ανέμου σε:

- ❑ Οριζόντιου άξονα, στους οποίους ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου, σχήμα 3.2
- ❑ Οριζόντιου άξονα (Cross - Wind), στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης αλλά κάθετος στην κατεύθυνση της ροής του ανέμου.
- ❑ Καθέτου άξονα στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης και κάθετος στη ροή του ανέμου, σχήμα 3.3



Σχήμα 3.2: Ανεμοκινητήρας οριζόντιου άξονα.

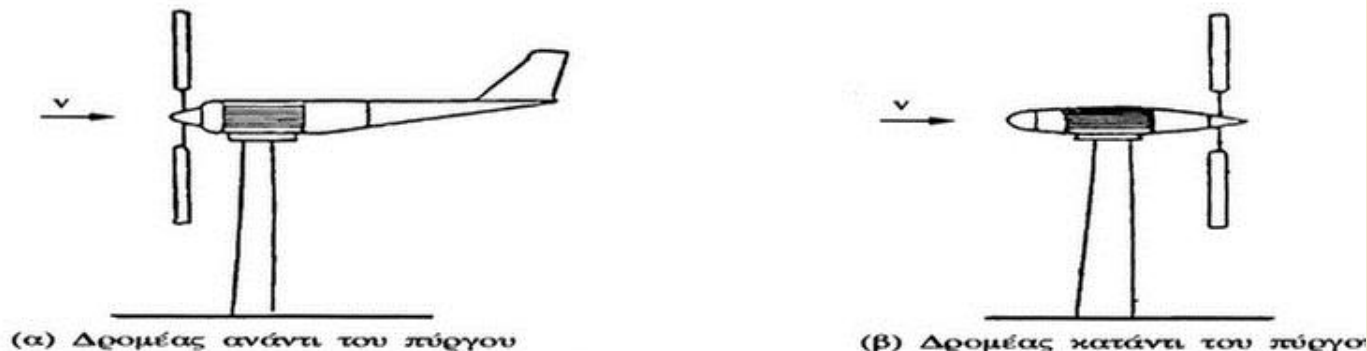


Σχήμα 3.3: Ανεμοκινητήρας κατακόρυφου άξονα.

Επίσης έχουν επινοηθεί και άλλοι τύποι ανεμοκινητηρών, όπως του τύπου με φοράς, στον οποίο υπάρχουν «μικρά» οχήματα που κινούνται σε μία καθορισμένη διαδρομή (τύπου σιδηροδρομικών βαγονιών) και είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρογνήτρια κ.λπ.

3.3. Τυπικές μορφές ανεμοκινητηρών οριζοντίου άξονα

Ο περιστρεφόμενος μηχανισμός τέτοιων μηχανών, που καλείται δρομέας, μπορεί να έχει από ένα πτερύγιο (μονόπτερος) μέχρι 30 ή και περισσότερα (πολύπτερος) σχήμα 1.3. Σε σχέση με τη θέση του δρομέα ως προς τον πύργο στήριξης και



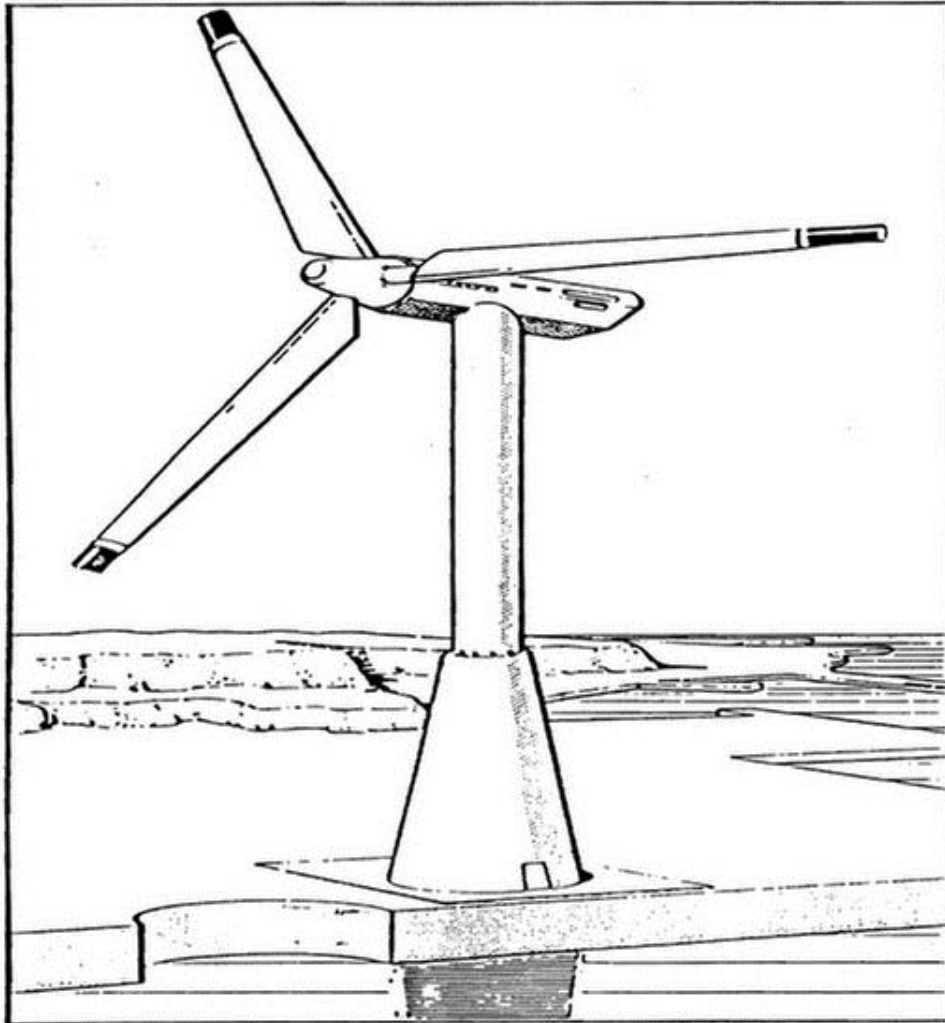
Σχήμα 3.4: Θέση δρομέα ως προς πύργο.

διεύθυνση του ανέμου, οι ανεμοκινητήρες αυτού του τύπου μπορούν να έχουν δρομέα μπροστά από τον πύργο (ανάντι) ή πίσω (κατάντι), σχήμα 3.4 (α,β). Για μεγιστοποίηση δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου απαιτείται όπως

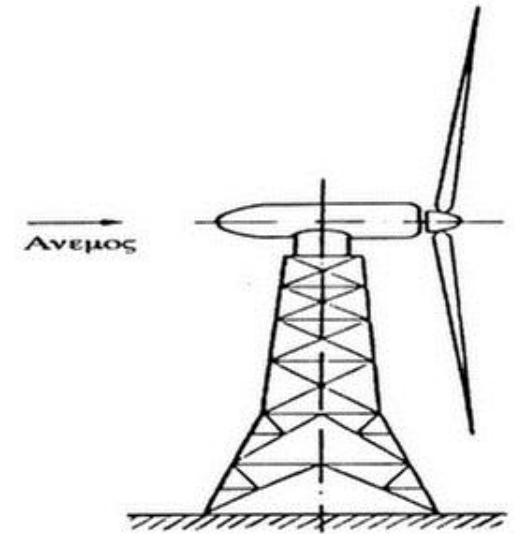


Σχήμα 3.5: Α/Κ με πτερύγιο προσανατολισμού.

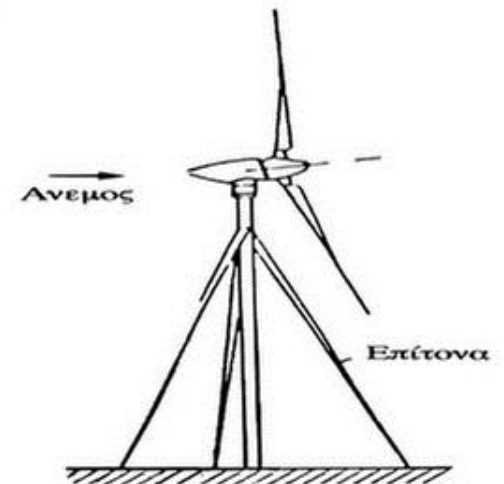
επίπεδο του δρομέα του ανεμοκινητήρα να είναι κάθετο στην τεύθυνση του ανέμου. Για το σκοπό αυτό στους μεν μικρής ισχύος ανεμοκινητήρες (και στον ανάντι τύπο) υπάρχει συνήθως πτερύγιο: ευθυγραμμίζει τον άξονα του δρομέα στον άνεμο (σχήμα 3.5), στα δε μεγάλους ανεμοκινητήρες εφαρμόζονται συστήματα αυτόματης ρύθμισης της σωστής θέσης δρομέα ως προς τον άνεμο με αισθητήρες και μηχανισμούς αυτορρομισμού. Στους «κρούς» ανεμοκινητήρες με το δρομέα κατάντι δεν τοποθετείται πτερύγιο προσανατολισμού γιατί



Σχήμα 3.6: Α/Κ με σωληνωτό πύργο.



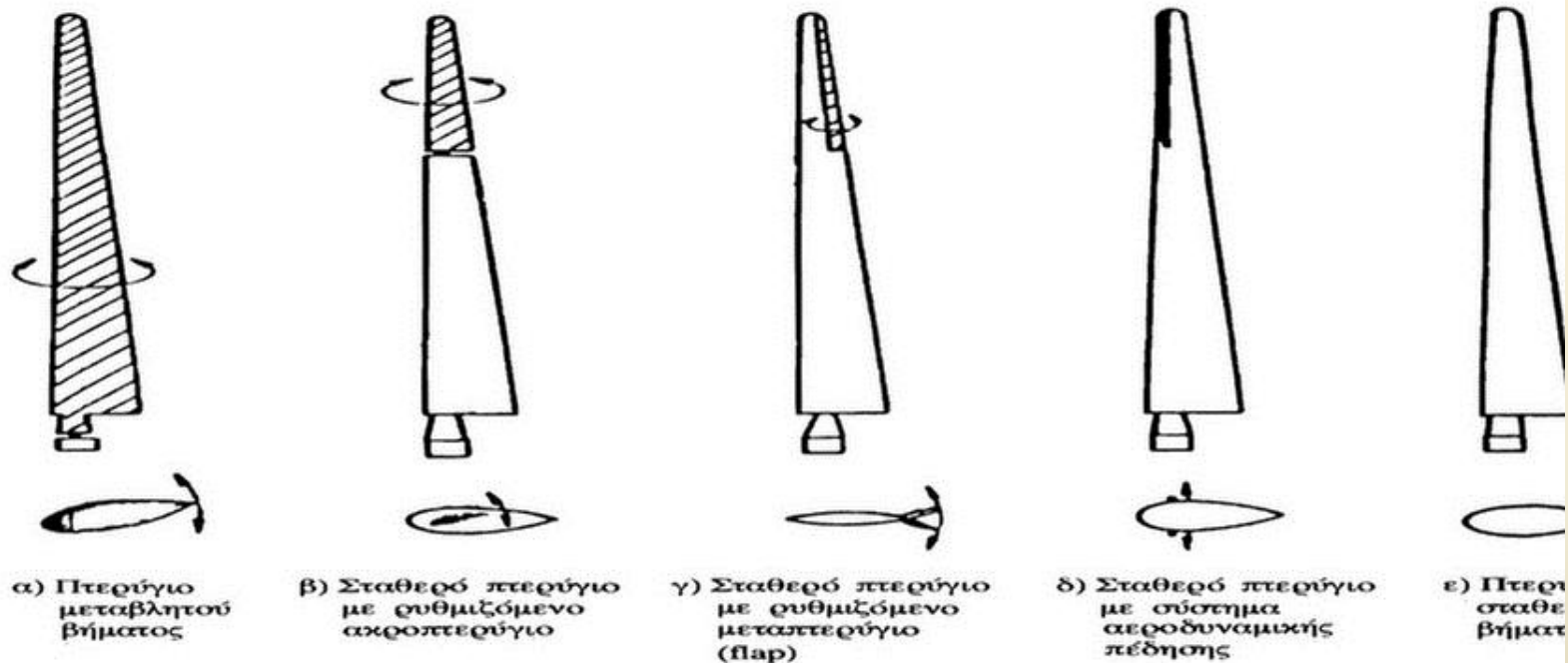
Σχήμα 3.7: Α/Κ με πύργο δικτυώματος.



Σχήμα 3.8: Α/Κ με στήριξη επιτόνων.

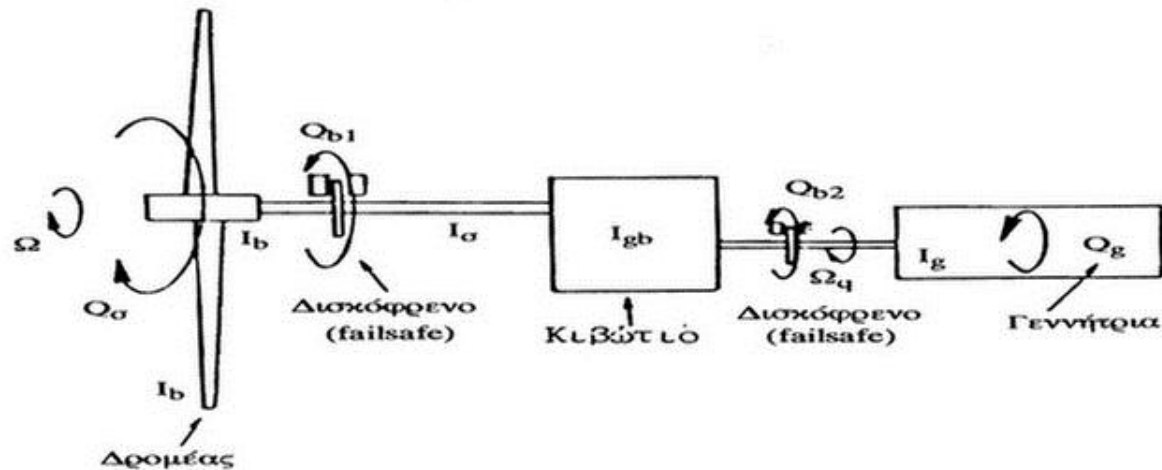
κουβούκλιο που καλύπτει τα εξαρτήματα της διάταξης μετατροπής της ενέργειας η δρομέα έχει τέτοιο σχήμα ώστε το ίδιο να αποτελεί πτερύγιο προσανατολισμού, σχήμα 3.4β. Ο πύργος στήριξης του ανεμοκινητήρα μπορεί να είναι σωληνωτού τύπου, σχήμα 3.6, τύπου δικτυώματος, Σχήμα 3.7. Οι δύο αυτοί τύποι είναι αυτοστηριζόμενοι, ενώ ο τρίτος τύπος λεπτής κολώνας, Σχήμα 3.8, απαιτεί πρόσδεση με συρματόσχοινα.

Ο δρομέας του ανεμοκινητήρα δεν πρέπει να ξεπερνάει κάποια μέγιστη γωνιακή ταχύτητα για λόγους προστασίας των πτερυγίων από μηχανικές καταπονήσεις που προέρχονται από φυγόκεντρες δυνάμεις. Για την προστασία έναντι υπερτάχυνσης έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αυτοματισμοί, όπως λειτουργία αεροπέδης στα ακροπ



Σχήμα 3.9: Μέθοδοι ρύθμισης βήματος - ισχύος Α/Κ.

ρύγια του δρομέα, γωνιακή στροφή του δρομέα ως προς τη διεύθυνση πνοής του ανέμου κ.λπ., σχήματα 3.9α και 3.9β. Στην περίπτωση ανάγκης πέδησης του δρομέα είτε γιατί υπερταχύνθηκε ο δρομέας (π.χ. δεν λειτούργησε η αεροπέδη των ακροπτερυγίων) ή υπερβολική ταχύτητα ανέμου ή μηδενική ενεργειακή ζήτηση (π.χ. διακοπή ΔΕΗ), χρησιμοποιείται αυτόματη ενέργεια πέδη (fail safe) ασφάλειας αστοχίας που δίσκου που ενεργεί είτε στον χαμηλόστροφο άξονα του δρομέα (πριν από τα κιβώτια ταχυτήτων) είτε στον υψηλόστροφο (μετά το κιβώτιο ταχυτήτων), σχ. 3.



Σχήμα 3.10: Τυπική διάταξη κουβουκλίου Α/Κ.

Το σύστημα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας του δρομέα σε άλλη μορφή ενέργειας, το οποίο στεγάζεται μέσα στο κουβούκλιο της μηχανής, συνήθως βρίσκεται πάνω στον πύργο του ανεμοκινητήρα, ενώ στις περιπτώσεις απ' ευθείας χρήσης της μηχανικής ενέργειας του δρομέα π.χ. για άντληση νερού, το κιβώτιο ταχυτήτων βρίσκεται κάτω στη βάση του πύργου και από την κορυφή του πύργου μέχρι κάτω κατεβαίνει ο άξονας κίνησης, συνήθως σε υψηλότερες στροφές απ' αυτές του δρομέα.

Κατά καιρούς έγιναν εισηγήσεις για συστήματα πολλών δρομέων πάνω σ' ένα πύργο, χωρίς όμως να τύχουν πρακτικής αξιοποίησης.

3.4. Τυπική μορφή ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμοκινητήρες αυτού του τύπου είναι κατασκευαστικά απλούστεροι του ανεμοκινητήρα οριζοντίου άξονα γιατί:

- ❑ δεν απαιτούν περύγιο ή σύστημα αυτοματισμού για τον προσανατολισμό του δρομέα στη διεύθυνση πνοής του ανέμου.
- ❑ το σύστημα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας του δρομέα σε άλλη μορφή ενέργειας βρίσκεται στο έδαφος, στη βάση του ανεμοκινητήρα.

Συνεπώς τα έξοδα αυτοματισμού, συντήρησης ή επισκευών είναι σαφώς μικρότερα σε σύγκριση με τον ανεμοκινητήρα οριζοντίου άξονα.

3.4.1. Χαρακτηριστικά ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα τύπου Savonius

Οι ανεμοκινητήρες αυτού του τύπου που πρωτοπαρουσιάστηκαν το 1931 από τον Savonius έχουν τη χαρακτηριστική μορφή του σχήματος 3.11.



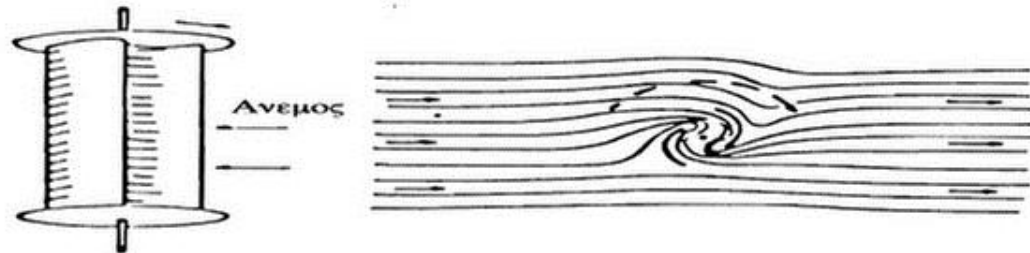
Savonius



Πολύπτερος Savonius



Split Savonius



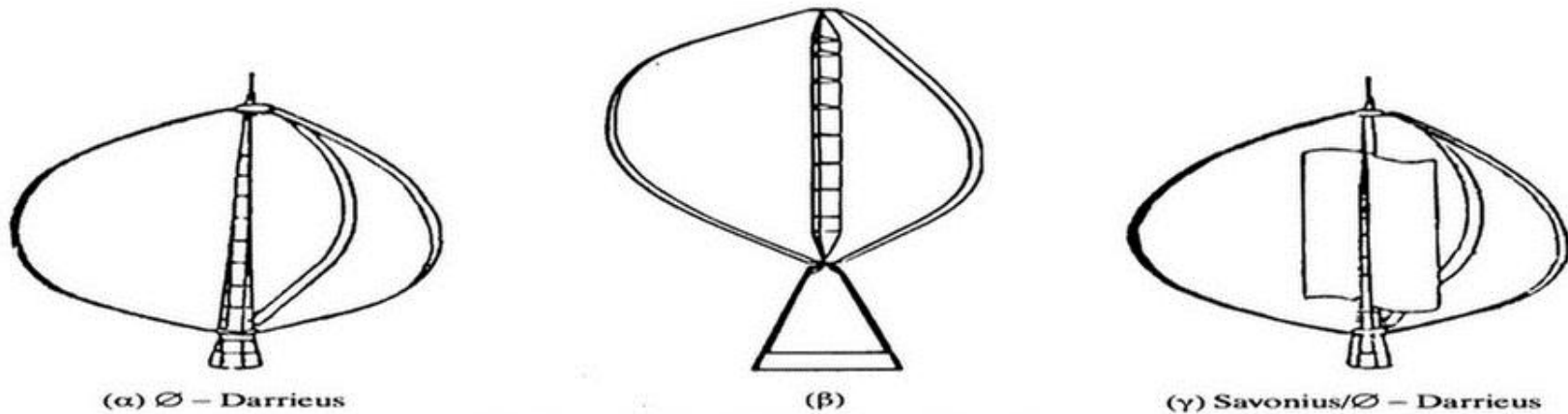
Σχήμα 3.11: Α/Κ τύπου Savonius.

Τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι ο χαμηλός συντελεστής ισχύος, ο μικρός λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου λ για βέλτιστο συντελεστή ισχύος (δηλ. μικρή ακροπτερειακή ταχύτητα), το περιορισμένο μέγεθος και η εξαιρετική απλότητα οικονομικότητα της κατασκευής. Παρά τα μειονεκτήματα, το τελευταίο πλεονέκτημα σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν χρειάζεται σύστημα προσανατολισμού προς τον άνεμο, έχει δώσει ώθηση σε μια σειρά από έρευνες πάνω στο δρομέα Savonius στην εύρεση του καλύτερου συνδυασμού των διαφόρων παραμέτρων. Τέτοιες παράμετροι είναι ο λόγος ύψους προς διάμετρο, το άνοιγμα χ (βλέπε σχήμα 3.11), ο αριθμός των πτερυγίων (2,3 ή και περισσότερα), το σχήμα των πτερυγίων κ.λ.π.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απλότητα κατασκευής του δρομέα Savonius φθάσε μέχρι το σημείο να μπορεί να κατασκευαστεί με ερασιτεχνικά μέσα, ακόμα και ο βαρέλια πετρελαίου, έχει λοιπόν άμεσες δυνατότητες εφαρμογής για οικιακή χρήση ή για χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές (π.χ. άντληση νερού από πηγάδια).

3.4.2. Χαρακτηριστικά ανεμοκινητήρα κατακόρυφου άξονα Darrieus

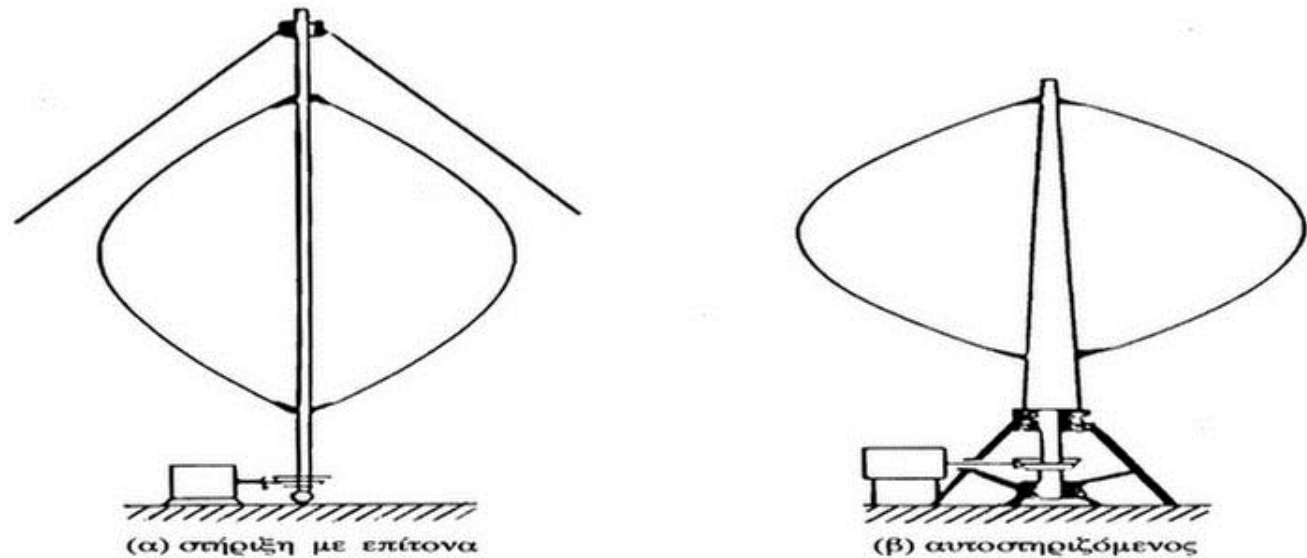
Ο ανεμοκινητήρας τύπου DARRIEUS, σχήμα 3.12, επινοήθηκε από τον Γάλλο G.J.M.Darrieus γύρω στα 1920 και έτυχε εκτεταμένης ανάπτυξης και εφαρμογής στην Καναδά, κυρίως στη δεκαετία του 1970 οπότε και έγινε ευρύτερα γνωστός. Ο ανεμοκινητήρας Darrieus είναι μηχανή που χαρακτηρίζεται από καμπυλωτά πτερά (Egg beater). Έχει σχετικά χαμηλή αρχική ροπή εκκίνησης και ως εκ τούτου έχει μειονέκτημα να μη ξεκινάει μόνος του όταν φυσάει ο άνεμος. Συνδυασμός όμως ανεμοκινητήρα Darrieus και ενός μικρού Savonius επιλύει το τεχνολογικό αυτό πρόβλημα, σχ. 3.12γ.



Σχήμα 3.12: Α/Κ τύπου Darrieus.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μορφές ανεμοκινητήρων Darrieus, όπως:

- με δύο ή τρία πτερύγια, σχήματα 3.12α και 3.12β.
- με ευθύγραμμα πτερύγια ή
- με σπαστά πτερύγια, για ρύθμιση ισχύος.



Σχήμα 3.13: Στήριξη Α/Κ κατακόρυφου άξονα Darrieus.

Ο άξονας περιστροφής του δρομέα αποτελεί συνήθως και τον πύργο στήριξης της αιολικής μηχανής. Συνηθέστερα ο πύργος αυτός προσδένεται και με σφραγισμούς, ενώ τώρα τελευταία κατασκευάζονται πύργοι αυτοστηριζόμενοι, σχήμα 3.13.

Τα λοιπά υποσυστήματα του ανεμοκινητήρα κατακόρυφου άξονα, ως το κιβώτιο ταχυτήτων, σύστημα πέδησης αξόνων, γεννήτρια κ.λπ. δεν διαφέρουν ως προς το σκελετικό επιλογή των από τα υποσυστήματα του ανεμοκινητήρα οριζοντίου άξονα.

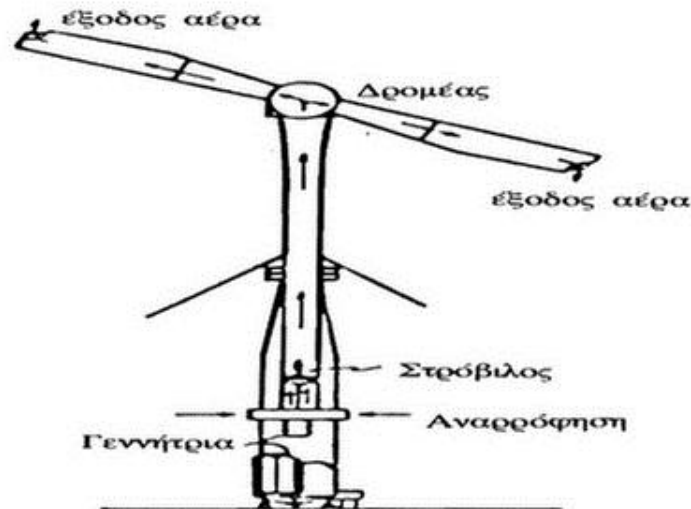
Οι προηγούμενοι τρεις τύποι ανεμοκινητήρων είναι αυτοί που ουσιαστικά έχουν επιβληθεί για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Πρωταρχικός παράγοντας για τη βελτιστοποίηση της αιολικής διάταξης είναι το ποσό της ενέργειας, ανά μονάδα κόστους του συστήματος, το οποίο παράγεται σε μία δεδομένη ταχύτητα του ανέμου και αυτό ίσως είναι το μοναδικό κριτήριο επιλογής του βέλτιστου τύπου ανεμοκινητήρα.

3.5. Άλλοι τύποι ανεμοκινητήρων

Υπάρχει ένα πλήθος αεροδυναμικών διατάξεων που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο. Είναι χρήσιμο να αναφερθούμε σύντομα στους βασικούς τύπους, που έχουν τύχει λιγότερης προσοχής, είτε γιατί είναι πρόσφατες επινοήσεις, είτε γιατί παρουσιάστηκαν μειονεκτήματα ή δυσκολίες κατά τη υλοποίηση των σχεδίων στην πράξη:

Ανεμοκινητήρες οριζοντίου άξονα τύπου Andreau-Enfield (σχήμα 3.14).

Είναι μια έλικα τύπου αεροπλάνου με κοίλα πτερύγια που, καθώς περιστρέφεται από τον άνεμο, ενεργεί σαν φυγοκεντρική αντλία αέρα. Το ρεύμα αέρα που εκτοπίζεται μέσα από τα πτερύγια κινεί ένα στρόβιλο στη βάση του πύργου. Κατασκευάστηκαν

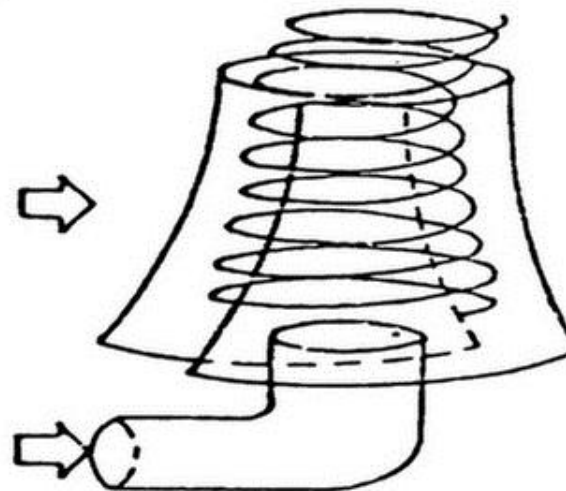


Σχήμα 3.14: Α/Κ Enfield -Andreau.

μια μεγάλη εγκατάσταση 100 KW αλλά διακόπηκε η λειτουργία της λόγω μηχανικών προβλημάτων. Οι ανεμοκινητήρες αυτού του τύπου είναι σχετικά ελαφρές κατασκευές, με χαμηλό όμως βαθμό απόδοσης.

Σύστημα τεχνητού ανεμοστρόβιλου (σχήμα 3.15)

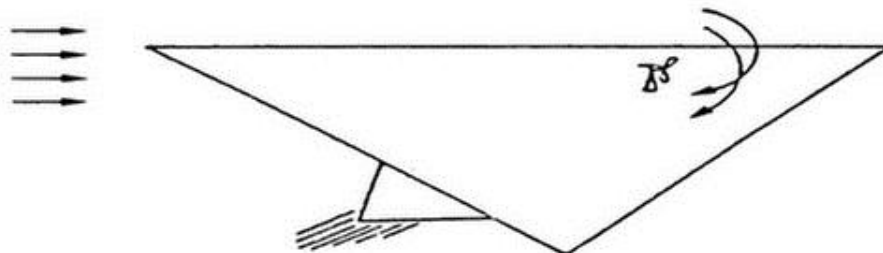
Στον ανεμοκινητήρα αυτόν ο αέρας εισρέει μέσα από πλευρικά ανοίγματα σε ένα κούλο κυλινδρικό κτίριο δημιουργώντας έτσι ένα ανεμοστρόβιλο στο εσωτερικό του, σχήμα 3.15. Ο πυρήνας του ανεμοστρόβιλου έχει χαμηλή πίεση, οπότε δημιουργείται ένα ισχυρό ρεύμα αέρα λόγω της διαφοράς πίεσης του περιβάλλοντος και της χαμηλής πίεσης του πυρήνα. Η υψηλή ισχύς του ρεύματος αξιοποιείται από κατάλληλο δρομέα. Αυτή η διάταξη είναι μια τελευταία επινόηση και προβάλλεται σαν ο μόνος τρόπος κατασκευής μηχανών της τάξης των 10-100 MW. (Οι άλλοι τύποι ανεμοκινητήρων περιορίζονται για κατασκευαστικούς λόγους σε ισχύς κάτω των 10 MW). Οι έρευνες πάνω σ' αυτόν τον τύπο βρίσκονται σε πρώτο στάδιο.



Σχήμα 3.15: Α/Κ τύπου ανεμοστρόβιλου.

Εκμετάλλευση στρόβιλων με συγκεντρωμένη κινητική ενέργεια που σχηματίζονται σε πτέρυγες Δέλτα (σχήμα 3.16)

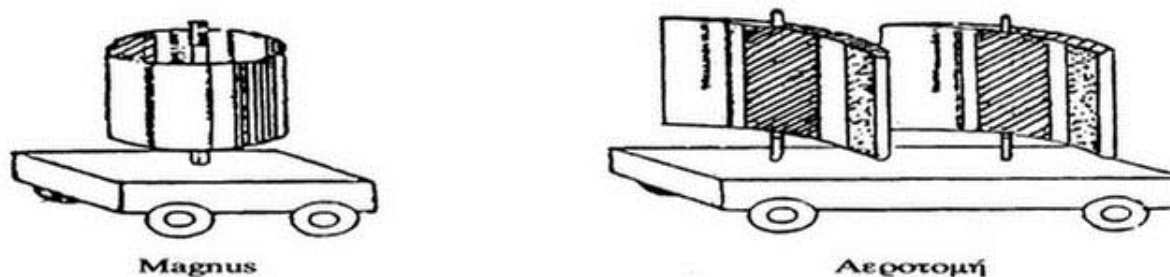
Στη ροή γύρω από πτέρυγα τύπου Δέλτα και σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης δημιουργούνται στην ακμή προσβολής της πτέρυγας ισχυρότατοι στρόβιλοι με συγκεντρωμένη υψηλή κινητική ενέργεια την οποία και είναι δυνατό να εκμεταλλευτούμε με κατάλληλη διάταξη.



Σχήμα 3.16: Στρόβιλοι από πτέρυγα τύπου Δέλτα.

Περιστρεφόμενοι κατακόρυφοι κύλινδροι σε ρεύμα αέρα (σχήμα 3.17α)

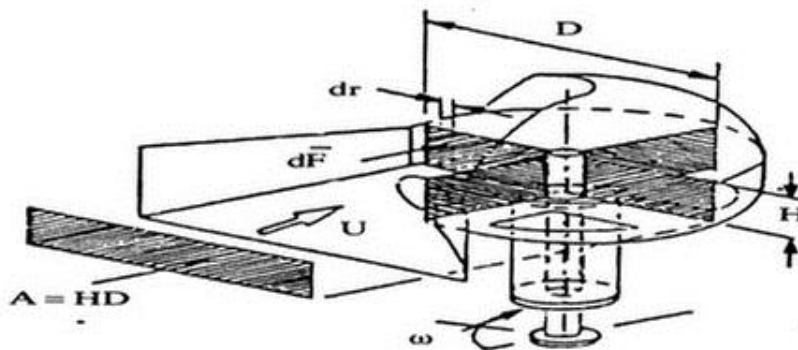
Είναι μια επινόηση που στηρίζεται στην αξιοποίηση του φαινομένου Magnus, καθώς οι κύλινδροι είναι πάνω σε βαγόνια, που μπορούν να κινούνται σε κυκλικές τροχιές. Είναι ένα παλιό σχέδιο, που εγκαταλείφθηκε λόγω τεχνικών δυσκολιών κατά την υλοποίησή του στην πράξη.



Σχήμα 3.17: Βαγονέτα κινούμενα σε τροχιά.

Ανεμοκινητήρες *Lebost*

Είναι μια επινοήση, που αποτελείται από ένα δρομέα κατακορύφου άξονα και ένα συγκλίνον ακροφύσιο (βλ.σχήμα 3.18), που καθοδηγεί τον αέρα και αυξάνει τη ισχύ του ρεύματός του.



Σχήμα 3.18: Ανεμοκινητήρας *Lebost*.

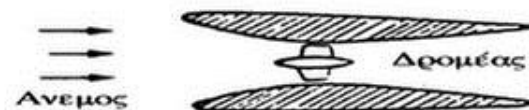
Διατάξεις με ακίνητα πτερόγυια ή σωλήνες *Venturi*

Ο αέρας, κατά τη διέλευσή του γύρω από τα πτερόγυια ή μέσα από το λαιμό το *Venturi* επιταχύνεται, κατά συνέπεια πέφτει η στατική πίεσή του. Μπορούμε να μεταλλευτούμε τη διαφορά των πιέσεων για τη δημιουργία ενός ισχυρού ρεύματι αέρα που κινεί ένα δρομέα.

Ανεμοκινητήρες οριζοντίου άξονα σε σωλήνες *Venturi*

Η έλικα τύπου αεροπλάνου και οι δρομείς *Darrieus* υφίστανται τους περιορισμο που θέτει η θεωρία του *Betz*. Σύμφωνα με τη θεωρία του *Betz* ο συντελεστής ισχύι μιας μηχανής που κινείται από τον άνεμο μπορεί στην ιδανική περίπτωση να φθάσ το πολύ την τιμή $19/27$ (όριο του *Betz*). Η διαπίστωση αυτή οδήγησε σε προσπάθει

να σχεδιαστούν διατάξεις που δίνουν ένα ρεύμα αέρος με συγκεντρωμένη ισχύ. Μια τέτοια διάταξη είναι ο σωλήνα Venturi, Σχ. 3.19α. Στο λαιμό μπορεί να τοποθετηθεί ένας δρομέας. Ο δρομέας μπορεί να είναι είτε έλικα αεραπλάνου είτε πτερωτή τύπου στροβιλομηχανής. Εκτός από τη συγκέντρωση ισχύος υπάρχει το πρόσθετο πλεονέκτημα της μείωσης των αεροδυναμικών απωλειών. Ανάμεσα στα μειονεκτήματα καταλογίζεται το μεγάλο βάρος που προβλέπεται να έχει μια τέτοια κατασκευή και οι δυσκολίες που θα παρουσιάζονται για το συνεχή προσανατολισμό μιας τέτοιας βαρειάς κατασκευής προς τον άνεμο. Παρά τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τέτοιες διατάξεις, υπάρχει ένα αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον των επιστημόνων προς την κατεύθυνση αυτή, που αποδεικνύεται από μια σειρά ενδιαφέρουσες εργασίες.



Σχήμα 3.19α: Ανεμοκινητήρας σωληνωτού τύπου.



Σχήμα 3.19β: Ανεμοκινητήρας στατού τύπου.

3.6 . Σύγκριση των επικρατέστερων διατάξεων αιολικών μηχανών

Ένα μέτρο σύγκρισης των διαφόρων ανεμοκινητήρων είναι ο συντελεστής ισχύος C_p που εκφράζει την απόδοση του δρομέα και που ορίζεται ως ο λόγος της δεσμευόμενης αιολικής ισχύος (στον άξονα του δρομέα) προς την ισχύ του ρεύματος του αέρα, που διέρχεται διά μέσου της μηχανής. Ο συντελεστής ισχύος εξαρτάται από τον τύπο του ανεμοκινητήρα και από το λόγο της περιφερειακής ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου, λ . Για κάθε δρομέα υπάρχει ένα συγκεκριμένο διάγραμμα που δίνει πληροφορίες για την απόδοση του δρομέα σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Ενδεικτικά δίνονται στο σχήμα 1.2β συγκεντρωμένα διαγράμματα απόδοσης για διάφορους τύπους ανεμοκινητήρων. Με τα διαγράμματα αυτά μπορούμε να συγκρίνουμε την απόδοση των διαφόρων τύπων στους λόγους λ ταχύτητας ακροπτερυγίου, οπότε προκύπτει και η διάκριση των ανεμοκινητήρων σε βραδύστροφους (π.χ. Savonius) και ταχύστροφους (π.χ. έλικες). Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που προκύπτει από το λειτουργικό διάγραμμα απόδοσης των ανεμοκινητήρων είναι ότι ο ιδανικός ανεμοκινητήρας έχει άνω όριο στο συντελεστή ισχύος του ίσο με $19/27$, που καλείται και όριο του Betz. Η ισχύς που αποδίδεται από κάθε ανεμογεννήτρια εκφάζεται από τη σχέση

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

όπου A η μετωπική επιφάνεια του ανεμοκινητήρα, V η ταχύτητα του ανέμου στο άξονα του δρομέα, ρ η πυκνότητα του αέρα. Η σχέση ισχύος υποδηλώνει ότι η παραγόμενη ενέργεια από την ανεμοκίνηση είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό σημαίνει ότι με διπλασιασμό της ταχύτητας του ανέμου οκταπλασιάζει η παραγόμενη ενέργεια από τη μηχανή. Το σχήμα 1.2β υποδεικνύει ότι ο ελικοφόρος ανεμοκινητήρας επιτυγχάνει συντελεστή ισχύος γύρω στα 40% έως 45%, ενώ ο τακόρυφος άξονας τύπου Darrieus ελαφρώς μικρότερο. Με την αύξηση όμως της διαστάσεων των ανεμοκινητήρων αυτών και τη σχετική μείωση της επίδρασης του αριθμού Reynolds και του πάχους του οριακού στρώματος στο συντελεστή ισχύος βαθμοί απόδοσης των A/K αυτών τείνουν να εξισωθούν.

3.7. Χαρακτηριστικά ανεμοκινητήρων οριζοντίου άξονα

3.7.1. Δρομέας

Ο σχεδιασμός του δρομέα είναι ίσως το πιο βασικό ζήτημα στη σχεδίαση ολόκληρου συστήματος.

Στόχος είναι να βρεθεί ένας βέλτιστος συνδυασμός των διαφόρων παραμέτρων που συνθέτουν τον δρομέα: ταχύτητα περιστροφής, διάμετρος δρομέα, αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους πτερυγίου, κατάλληλη αεροτομή ή αεροτομές, συστρωτό μέσο γεωμετρικό βήμα. Τα κριτήρια επιλογής είναι η μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής της. Η διάμετρος του δρομέα θα εξαρτηθεί από την απαιτούμενη ονομαστική ισχύ της μηχανής και αεροδυναμικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης του ανεμοκινητήρα. Η γωνιακή ταχύτητα λειτουργίας του δρομέα επιλέγεται έτσι ώστε ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου προς την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται στην περιοχή της βέλτιστης τιμής του συντελεστή ισχύος του ανεμοκινητήρα. Η κατανομή του πλάτους των πτερυγίων προκύπτει από τη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης του δρομέα ενώ ο αριθμός πτερυγίων (η στερεότητα του δρομέα) θα εξαρτηθεί από το είδος εφαρμογής του ανεμοκινητήρα.

Ανάλογα με τη μορφή του δρομέα διακρίνουμε δύο διαφορετικούς τύπους:

(α) Δρομείς με πολλά λεπτά πτερύγια (πολυπτερυγούς)

Χαρακτηριστικό των δρομέων αυτών είναι η μικρή διάμετρος, η μικρή περιμετρική ταχύτητα και η μεγάλη ροπή. Στο παρελθόν κατασκευάστηκαν σε βιομηχανικό κλίμακα (οι γνωστοί Αμερικανικοί πολυπτερυγοί ανεμόμυλοι) και βρήκαν πλατφόρμα εφαρμογής για άντληση νερού. Η κατασκευή τέτοιων ανεμοκινητήρων καθώς και έρευνα προς την κατεύθυνση αυτή τείνουν να εγκαταληφθούν για πολλούς λόγους όπως ο μικρός συντελεστής ισχύος και η μικρή διάμετρος που μπορούν να κατασκευαστούν. Στοιχεία για αυτούς τους ανεμοκινητήρες δίνει ο γνωστός Γερμανός ερευνητής Hutter.

(β) Δρομείς με λίγα πτερύγια

Οι δρομείς αυτοί έχουν συνήθως δύο ή τρία πτερύγια (τελευταία κατασκευάστηκαν δρομείς με ένα πτερύγιο, μονόπτερος). Έχουν τη μορφή των πτερυγίων των ελίκων των αεροσκαφών με αρκετή συστροφή από τη βάση μέχρι το ακροπτερύγιο και μεταβαλλόμενη χορδή με λέπτυνση προς το ακροπτερύγιο. Η τεχνολογία κατασκευής του είναι παρόμοια με εκείνη των ελίκων αεροπλάνων, δανείζεται δε και μερικά στοιχεία από εκείνη του δρομέα των ελικοπτέρων. Τα βασικά χαρακτηριστικά του δρομέα είναι ο μεγάλος συντελεστής ισχύος και η βέλτιστη λειτουργία του σε μεγάλο σχετικά λόγο ταχυτήτων ακροπτερυγίου λ. Οι παλαιότεροι δρομείς είχαν πλατειά πτερύγια, ενώ οι σύγχρονοι δρομείς, λόγω αεροδυναμικής βελτιστοποίησης, έχουν λεπτά πτερύγια. Οι αεροτομές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πτερυγίων είναι σύγχρονες αεροτομές που παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή άνωσης σε μικρές σχετικά γωνίες πρόσπτωσης ενώ συγχρόνως διατηρούν χαμηλό συντελεστή αντίστασης σε ευρεία περιοχή γωνιών πρόσπτωσης. Τυπικός εκπρόσωπος τέτοιων αεροτομών είναι η αεροτομή NACA 4412.

Οι δρομείς αυτοί είναι πιο ταχύστροφοι από τους πολυπτερυγους δρομείς και ελαφρώς οικονομικότεροι, παρουσιάζουν δε ευκολία στην επιτόπου συναρμολόγηση του ανεμοκινητήρα. Γενικά ο τρίπτερος δρομέας είναι κατά 5% περισσότερο αποδοτικός από τον δίπτερο και τα φορτία που ενεργούν σε κάθε πτερύγιο είναι μικρότερα. Είναι όμως ακριβότερος. Αντίθετα ο μονόπτερος δρομέας είναι φθηνότερος, έχει 10% μικρότερη ενεργειακή απόδοση από τον δίπτερο, αλλά έχει θορυβώδη λειτουργία και η ζυγοστάθμισή του παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα.

(γ) Μέγεθος ανεμοκινητήρα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα κατασκευάζονται από ισχείς μερικών 100άδων W μέχρι πάνω από 1 MW. Γενικά διακρίνουμε μικρά μεγέθη (έως λίγα KW) (διάμετρος έως 10 μέτρα) μεσαία μεγέθη (50-250 KW) (διάμετρος έως 25 μέτρα) και μεγάλα μεγέθη (500-2500 KW). Είναι γενικά δύσκολο να ξεπεράσουμε την ισχύ των 2500 KW, γιατί απαιτείται κατασκευή δρομέων πολύ μεγάλης διαμέτρου (άνω των 80 m) κατασκευή που συνεπάγεται μεγάλα προβλήματα.

(δ) Υλικά πτερυγίων

Τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων των δρομέων δεν έχουν ακόμα ξεκαθαρίσει εντελώς. Στους μικρούς ανεμοκινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως πολυουρεθάνη, υαλόνημα και 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 υαλονήματα με εναλλαγή της κατεύθυνσης των υαλονημάτων σε πολλαπλές στρώσεις ενώ στους μεγάλου μεγέθους ανεμοκινητήρες χρησιμοποιείται η τεχνολογία των ελίκων των αεροσκαφών (ανθρακονήματα με μηχανές αυτόματου τυλίγματος - Hamilton Standard) ή ακόμα και ξύλο ή και τεχνολογία πτερυγίων αεροσκαφών.

(ε) Το βήμα του πτερυγίου:

Υπάρχουν δρομείς με πτερύγια:

- μεταβλητού βήματος
- σταθερού βήματος

Η μηχανική ρύθμιση ισχύος σε μία 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.

(ζ) Τρόποι μηχανικής ρύθμισης ισχύος

α) Είναι δυνατόν να μειωθεί το μέγεθος της παραγόμενης από την πτερύγωση ισχύος με την αλλαγή του προσανατολισμού ολόκληρου του πτερυγίου ή μέρους του (κροποτερύγιο) ως προς τη διεύθυνση του ανέμου. Ο τρόπος αυτός απαιτεί ύπαρξη σερβομηχανισμού και έχει εφαρμογή στις ανεμογεννήτριες μικρής και κυρίως μεγάλης ισχύος.

β) Ρύθμιση με τη βοήθεια αεροδυναμικών φρένων στα άκρα των πτερυγίων

Η διάταξη αυτή αποτελεί περισσότερο μέσον προστασίας της ανεμογεννήτριας έναντι υπερτάχυνσής της και τίθεται σε λειτουργία όταν η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα υπερβεί την επιτρεπόμενη τιμή. Αυτό μπορεί να συμβεί σε περίπτωση υπερβολικής ταχύτητας ανέμου (μεγαλύτερης της ταχύτητας ανέμου στην οποία η ανεμογεννήτρια σταματάει, V_F) ή όταν ο δρομέας παράγει έργο, ενώ δεν υπάρχει κατανάλωση.

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

Οι ανεμογεννήτριες που δεν έχουν μηχανική ρύθμιση ισχύος (πτερύγιο σταθερού βήματος) είναι απλούστερες τεχνολογικά και φυσικά φθηνότερες, έχουν όμως περίπου 5-10% μικρότερη παραγωγή ενέργειας, μεγαλύτερα φορτία καταπόνησης και απαιτούν δισκόφρενα ασφάλειας αστοχίας ή αεροπέδες. Ανεμογεννήτριες σταθερού βήματος πτερυγίου είναι σχεδόν όλες οι ανεμογεννήτριες κατασκευής Δανίας μεσαίου μεγέθους.

3.7.2 . Σύστημα Αύξησης Στροφών (Σ.Α.Σ)

Η σχεδίαση του συστήματος αύξησης των στροφών του δρομέα για να προσμοστεί ο δρομέας στις στροφές της γεννήτριας ή της αντλίας δεν αφορά άμεσα σχεδίαση της ανεμογεννήτριας. Η τεχνολογική εξέλιξη των ΣΑΣ, λόγω απαιτήσεων της βιομηχανίας, έχει δώσει πολλούς και καλούς τύπους κιβωτίου ταχυτήτων απλοποιημένης αντοχής υλικού, φθοράς, μεταφερόμενης ισχύος και διαστάσεων. Βασικά κριτήρια επιλογής του είναι η διάρκεια ζωής του, ο βαθμός απόδοσής του και ο θόρυβος λειτουργίας του. Λόγω της συνεχούς μεταβολής της ισχύος του ανέμου, το κιβώτιο ταχυτήτων λειτουργεί συνεχώς με κρουστικά φορτία τα οποία οδηγούν σε πρόωγη φθορά υλικού και μείωση της διάρκειας ζωής του κιβωτίου. Για το λόγο αυτό

κιβώτιο ταχυτήτων της ανεμογεννήτριας επιλέγεται να έχει ονομαστικό μέγεθος ισχύος πολύ μεγαλύτερο από το ονομαστικό μέγεθος της μηχανής, ακόμα και ονομαστική ροπή 200% μεγαλύτερη της ονομαστικής ροπής της μηχανής. Διακρίνονται δύο είδη κιβωτίων. Το κιβώτιο με παράλληλες οδοντώσεις γραναζιών (κιβώτιο παραλλήλων αξόνων) και το κιβώτιο στο οποίο οι οδοντωτοί τροχοί που χρησιμοποιούνται έχουν ελικοειδή οδόντωση (συνήθως κιβώτιο με πλανητικό σύστημα οδοντωτών τροχών). Το πρώτο είδος κιβωτίου είναι απλούστερο κατασκευαστικά, έχει χαμηλότερο κόστος συντήρησης. Το κιβώτιο με ελικοειδή οδόντωση έχει υψηλότερο κόστος αγοράς και συντήρησης αλλά καλύτερο βαθμό απόδοσης και χαμηλότερη στάθμη θορύβου.

Για την αύξηση της ζωής του κιβωτίου και τη μείωση των κρουστικών φορτίων λειτουργίας, σε ορισμένες περιπτώσεις το κιβώτιο ταχυτήτων στηρίζεται πάνω σε ελατήρια απόσβεσης κραδασμών.

3.7.3 . Σύστημα πέδησης άξονα δρομέα

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ακινητοποίησης του δρομέα του ανεμοκινητήρα.

- Μεταβολή του βήματος του πτερυγίου ή του ακροπτερυγίου ή και ενεργοποίησης της αεροπέδης στο ακροπτερύγιο
- Στροφή του ίδιου του δρομέα ώστε να γυρίσει παράλληλα προς τον άνεμο
- Αύξηση της αεροδυναμικής αντίστασης του πτερυγίου με την ενεργοποίηση αεροπέδης (τύπου spoiler).
- Πέδηση του άξονα

Είναι φανερό ότι ο προτιμότερος τρόπος ακινητοποίησης της μηχανής είναι η σταδιακή μείωση των αεροδυναμικών φορτίων στη μηχανή με παράλληλη αύξηση της αντιρροπής. Με τον τρόπο αυτό δεν αναπτύσσονται κρουστικά φορτία στη φάση πέδησης της μηχανής. Σε περίπτωση αστοχίας όμως των μηχανισμών ρύθμισης του βήματος του πτερυγίου ή των άλλων μεθόδων ρύθμισης ισχύος απαιτείται η πέδηση του άξονα του δρομέα. Η πέδηση αυτή γίνεται συνήθως με δισκόφρενο τύπου ασφάλειας αστοχίας που ενεργεί αυτόματα στον άξονα. Το δισκόφρενο αυτό συνήθως τοποθετείται στον υψηλόστροφο άξονα της μηχανής (μετά το κιβώτιο ταχυτήτων) διότι έτσι η απαιτούμενη ροπή πέδησης είναι πολύ μικρή (λόγω υψηλής γωνιακής ταχύτητας) και κατά συνέπεια το δισκόφρενο είναι μικρού κόστους. Συνήθως η πέδη αυτή είναι ηλεκτρομαγνητικού τύπου που ενεργοποιείται αυτόματα με τη διακοπή του ρεύματος, δηλαδή η πέδη παραμένει πάντα ανοικτή με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητών και σε περίπτωση διακοπής ρεύματος ενεργοποιείται από τα ελατήρια. Τοποθετώντας όμως την πέδη στον υψηλόστροφο άξονα υπερφορτίζουμε το κιβώτιο ταχυτήτων στη διάρκεια της πέδησης (η ακινητοποίηση της μηχανής γίνεται εντός 2 ή 3 πλήρων στροφών του δρομέα) ενώ συγχρόνως η αντικατάσταση, συντήρηση του κιβωτίου ή και η επισκευή του γίνεται προβληματική. Τοποθέτηση του δισκόφρενου στον χαμηλόστροφο άξονα απαιτεί ογκώδες δισκόφρενο και υψηλού κόστους. Το δισκόφρενο αυτό είναι συνήθως υδραυλικού τύπου ασφαλείας αστοχίας. Στην περίπτωση χρήσης υδραυλικού δισκόφρενου αντιμετωπίζονται προβλήματα διαρροής λαδιού, λειτουργίας αισθητηρίων μέτρησης στάθμης και θερμοκρασίας λαδιού κ.λπ.

3.7.4 . Ελαστικοί σύνδεσμοι

Για τη σύνδεση αξόνων μεταξύ των (π.χ. άξονας δρομέα με κιβώτιο ή δισκόφρεμα με γεννήτρια κ.λπ) απαιτείται ελαστικός σύνδεσμος απορρόφησης κραδασμών. Σίθως οι σύνδεσμοι αυτοί βασίζονται στην απορροφητική ικανότητα του καουτσούκ ακριβές κατασκευές χρησιμοποιείται και υδραυλικού τύπου συμπλέκτης ο οποίος χρόνως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέσο προσαρμογής των στροφών του δρομέα στις στροφές της γεννήτριας και έτσι η μηχανή να δουλεύει σε σταθερές σύγχρονη στροφές ή σε στροφές μέγιστου συντελεστή ισχύος.

3.7.5. Ηλεκτρική γεννήτρια

Υπάρχουν δύο δυνατές λύσεις:

- ασύγχρονη γεννήτρια
- σύγχρονη γεννήτρια

Η απλότητα στην κατασκευή και η ευκολία με την οποία συνδέεται στο δίκτυο η ασύγχρονη γεννήτρια, είναι τα πλεονεκτήματά της. Όμως η ανάγκη να παρήγαγε ρεύμα μαγνήτισης από το δίκτυο δημιουργεί προβλήματα όταν η ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι συγκρίσιμη με την ισχύ του ηλεκτρικού δικτύου. Φυσικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, πράγμα που γίνεται στις εφαρμογές φόρτισης συσσωρευτών. Αλλά οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι ογκώδεις ακριβές.

3.7.6 . Σύστημα προσανατολισμού

Όπως αναφέρθηκε, ο δρομέας μπορεί να βρίσκεται πριν από τον πύργο ή μετά από αυτόν (ανάντι και κατάντι μηχανές). Στους ανεμοκινητήρες με ανάντι τοποθέτηση του δρομέα απαιτείται σύστημα προσανατολισμού του δρομέα. Στις μικρού μεγέθους ή και μεσαίου μεγέθους Ανεμογεννήτριες για τον προσανατολισμό χρησιμοποιείται καθοδηγητικό πτερύγιο (ουρά) που τόσο η επιφάνεια της ουράς όσο και η θέση της ως προς τον άξονα του πύργου επιλέγονται έτσι ώστε σε απόκλιση του ανέμου > 10 μοίρες να εξασκεύεται ροπή επαναπροσανατολισμού του δρομέα στον άξονα και να υπερνικήσει την αντιροπή λόγω γυροσκοπικού φαινομένου.

Στις Ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους χρησιμοποιείται σεροκινητήρας ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και που προσανατολίζει τον δρομέα κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου. Η τοποθέτηση του δρομέα κατάντι τον πύργο νομενικά τουλάχιστον φαίνεται να οδηγεί σε απλούστερη κατασκευή ανεμοκινητήρα γιατί δεν απαιτείται σύστημα προσανατολισμού, αλλά στην περίπτωση αυτή ο ανεμοκινητήρας είναι περισσότερο θορυβώδης στη λειτουργία του λόγω της σκίασης του πύργου πάνω στον δρομέα και επίσης δημιουργούνται αυξημένες καταπονήσεις στα πτερύγια λόγω της περιοδικότητας φορτίσεων του πτερυγίου καθώς αυτό σε περιστροφή σκιάζεται από τον πύργο. Τέλος απαιτείται κάποιο είδος αποσβεστήρα για τον περιορισμό των ασκόπων μετακινήσεων του κουβουκλίου λόγω πλευρικής «τύρβης» του ανέμου.

3.7.7. Πύργος

Κριτήρια επιλογής του είδους του πύργου είναι, εκτός από το κόστος του, η ευκολία μεταφοράς του στον τόπο εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας και η ευκολία ανέγερσής του. Συνυφασμένο με το τελευταίο είναι και η διαδικασία στησίματος της μηχανής, ιδιαίτερα σε μεγάλες μονάδες, πράγμα που εξαρτάται από την ευκολία οδικής πρόσβασης στη θέση, την ύπαρξη ικανοποιητικού ανυψωτικού μέσου τόσο σε ανυψωτική ικανότητα όσο και σε ύψος ανύψωσης. Δύο είναι κυρίως οι τύποι πύργων που έχουν επικρατήσει, ο σωληνωτός και ο τύπου δικτυώματος.

Ο πύργος τύπου δικτυώματος είναι ευκολότερος στην επιτόπου συναρμολόγηση και ανάρτηση, ελαφρότερος και φθηνότερος. Επειδή έχει πολλά μικρά κομμάτια είναι ευκολότερο να υποστεί ψυχρό γαλβάνισμα σε μικρά γαλβανιστήρια.

Ο σωληνωτός πύργος είναι αισθητικά καλλίτερος, το εσωτερικό του πύργου μπορεί να αποτελεί και το θάλαμο στέγασης όλων των οργάνων της ανεμογεννήτριας και να έχει εσωτερική σκάλα ή και ασανσέρ πρόσβασης στο κουβούκλιο στην κορυφή του. Παρουσιάζει όμως δυσκολία στην μεταφορά του, ιδίως από κάποιο ύψος και πάνω, δυσκολία στην ανέγερσή του (απαιτείται οπωσδήποτε γερανός), και αν είναι μεγάλος πρέπει να γαλβανισθεί σε κομμάτια και να συγκολληθεί επί τόπου, αλλά τότε καταστρέφεται το γαλβάνισμα τοπικά.

Ο σωληνωτός πύργος έχει χαμηλή ιδιοσυχνότητα (μικρότερη από την ιδιοσυχνότητα του δρομέα) γι' αυτό κατά την εκκίνηση του δρομέα η περιοχή ιδιοσυχνότητας του πύργου πρέπει να περνιέται γρήγορα για αποφυγή φαινομένων συντονισμού. Αντίθετα ο δικτυωτός πύργος έχει υψηλή ιδιοσυχνότητα ως προς την ιδιοσυχνότητα ή και τις πρώτες αρμονικές του δρομέα.

3.8. Εξαγωγή ισχύος

Ο μεγάλες μάζες του ανέμου που διαρκώς μετακινούνται στην ατμόσφαιρα περιέχουν τεράστια ποσά ενέργειας που προσφέρονται περισσότερο από κάθε άλλη μορφή ενέργειας για μετατροπή και εκμετάλλευση.

Η στιγμιαία ισχύς που περιέχεται σε ένα ρεύμα αέρα διατομής A ομοιόμορφης στιγμιαίας ταχύτητας V και πυκνότητας ρ υπολογίζεται από τη σχέση

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

και είναι ανάλογη του κύβου της στιγμιαίας ταχύτητας του ανέμου. Αυτό όμως έχει τεράστια σημασία αφού η ταχύτητα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται σε ευρύτατα όρια με το χρόνο. Το γεγονός της ευρύτατης χρονικής μεταβολής μας επιβάλλει ένα ξεχωριστό τρόπο επεξεργασίας των μετεωρολογικών δεδομένων όταν ενδιαφερόμαστε για την εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου και την εύρεση του κατάλληλου ανεμοκινητήρα για μια ορισμένη περιοχή.

Η ισχύς όμως που παρέχει η έλικα είναι μικρότερη από την ισχύ του ανέμου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_{\Lambda K} = C_p \frac{\rho}{2} V^3 A$$

Το μέγεθος C_p λέγεται συντελεστής ισχύος. Προσοχή χρειάζεται στο ότι το δεν είναι αυστηρά ο βαθμός απόδοσης του δρομέα, αφού αναφέρεται σε μια που δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε ολόκληρη, ακόμη και με μια ιδανική έλξη. Όπως έδειξε ο Betz, η μέγιστη τιμή του είναι

$$C_p = \frac{19}{27}$$

Το όριο αυτό καλείται το όριο του Betz.

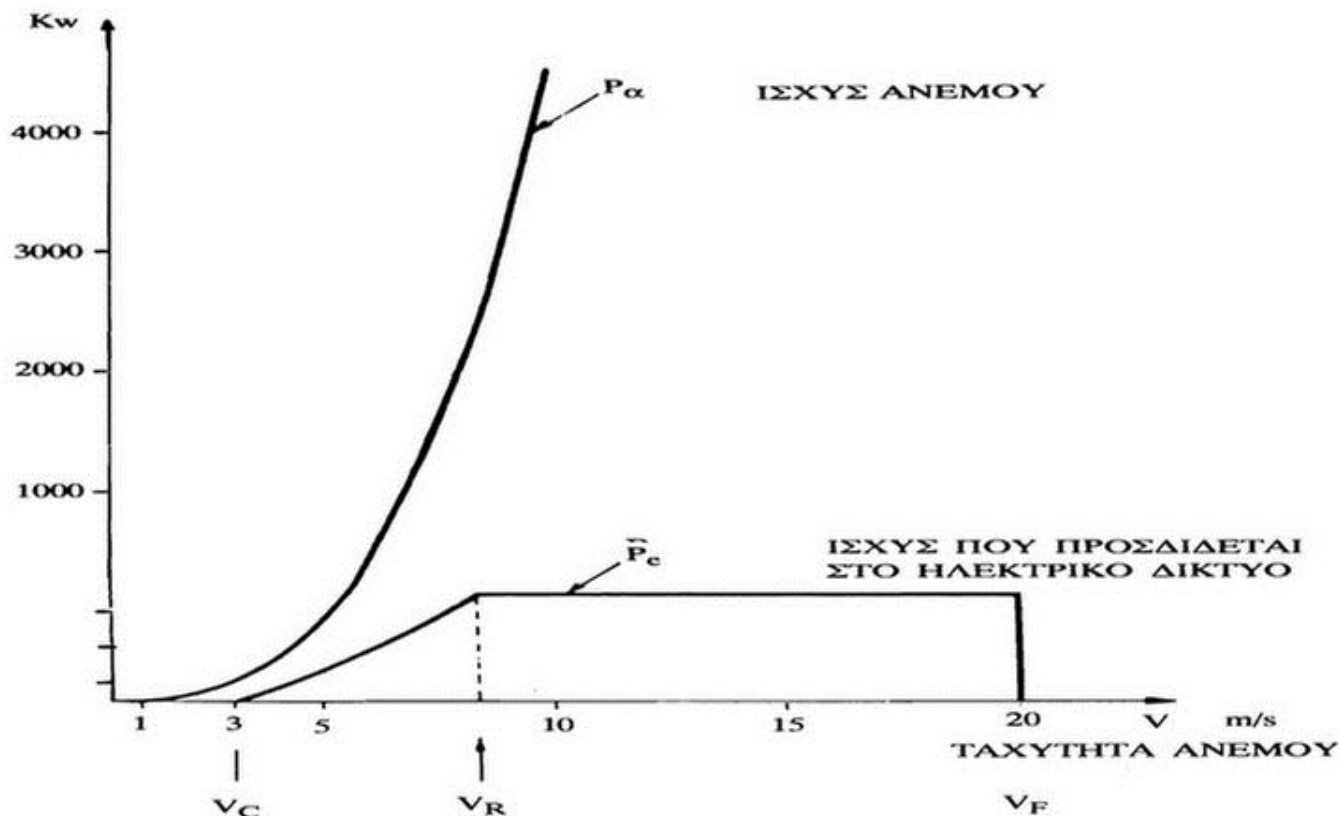
Στην πραγματικότητα ο συντελεστής ισχύος του δρομέα θα είναι ακόμα μικρότερος λόγω φαινομένων συνεκτικότητας, πεπερασμένου αριθμού πτερυγίων και της υστέρησης συστροφής του ρεύματος του αέρα πίσω από το δρομέα η οποία τελικά αποτελεί απώλεια ενέργειας λόγω μη μετατροπής της σε πίεση.

3.9 . Ενεργειακές απώλειες

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

- (α) Ο ανεμοκινητήρας είναι σε θέση να αποδώσει ωφέλιμη ισχύ μόνο όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες κενού φορτίου (τριβές, άξονες, μειωτήρα, γεννήτριας). Την ταχύτητα του ανέμου στην οποία ο ανεμοκινητήρας ξεκινάει ονομάζουμε ταχύτητα έναρξης λειτουργίας και συμβολίζεται με V_{cut} .
- (β) 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 μεταπτερώγια (flap) 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 χρησιμοποιεί 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 ποσό του αιολικού δυναμικού.
- (γ) Όταν ο άνεμος φθάνει σε υψηλές ταχύτητες ενδεικνύεται η διακοπή λειτουργίας της εγκατάστασης για λόγους ασφαλείας. Η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας (cut-off speed), συμβολίζεται με V_F και η ενέργεια του ανέμου για ταχύτητες μεγαλύτερες της παραμένει τελείως αναξιοποίητη.
- (δ) Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας έχουμε αεροδυναμικές απώλειες.
- (ε) Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας έχουμε πρόσθετα μηχανικές απώλειες στα αξονα, 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% ονομαστικής ισχύος της μηχανής.

Στο σχήμα 3.20, παρουσιάζεται τυπική καμπύλη ισχύος ανεμοκινητήρα, διαμέτρου $D = 32m$, ονομαστικής ισχύος $P_R = 225kW$, ονομαστικής ταχύτητας $V_R=9.0m/s$



Σχήμα 3.20: Ισχύς ανέμου και ανεμοκινητήρα.

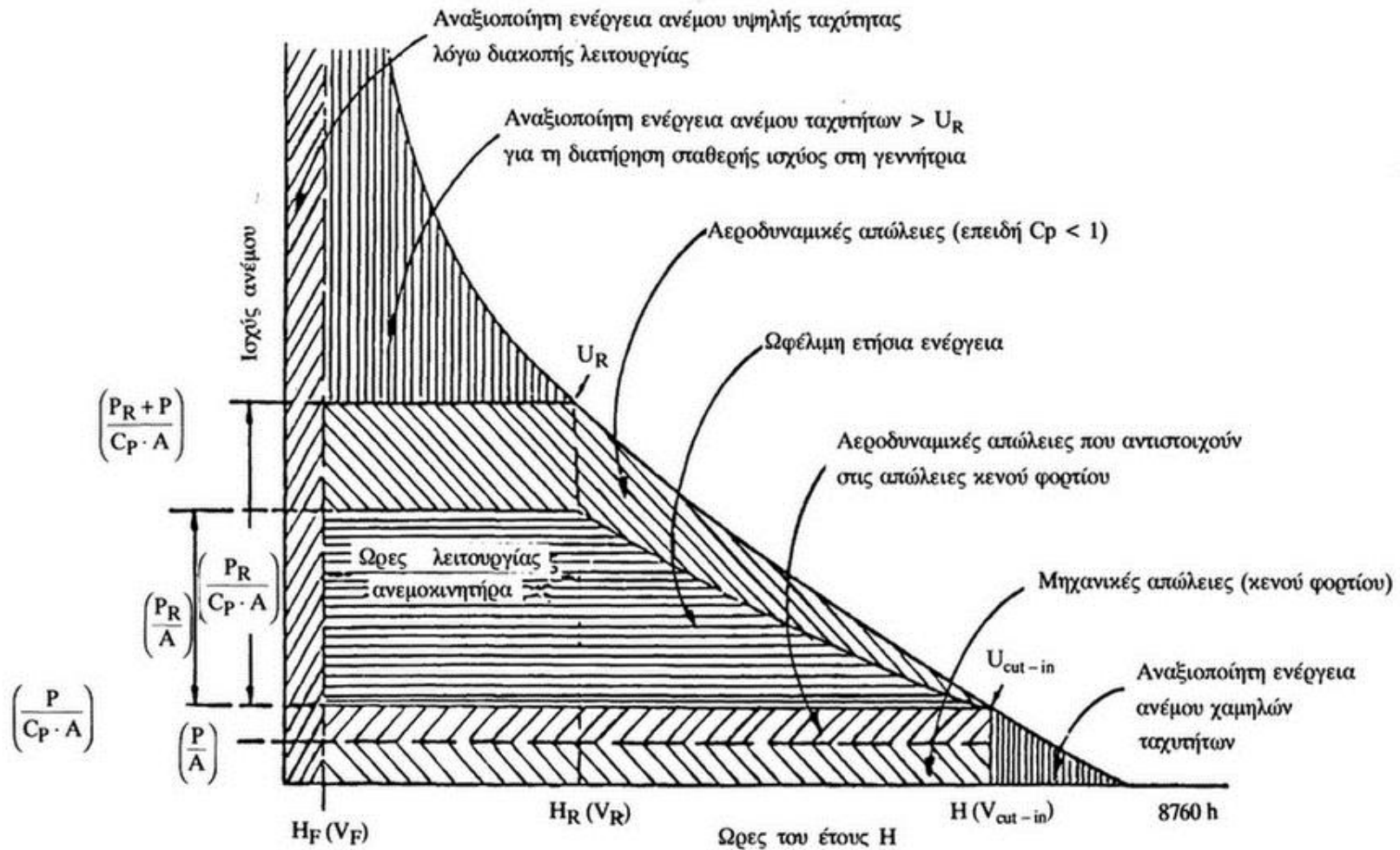
ταχύτητα έναρξης και διακοπής λειτουργίας αντίστοιχα ίση με 4.2m/s και 20 m/s, μετρούμενες στα 10 m από το έδαφος.

Το σχήμα 3.21 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 τη σχέση

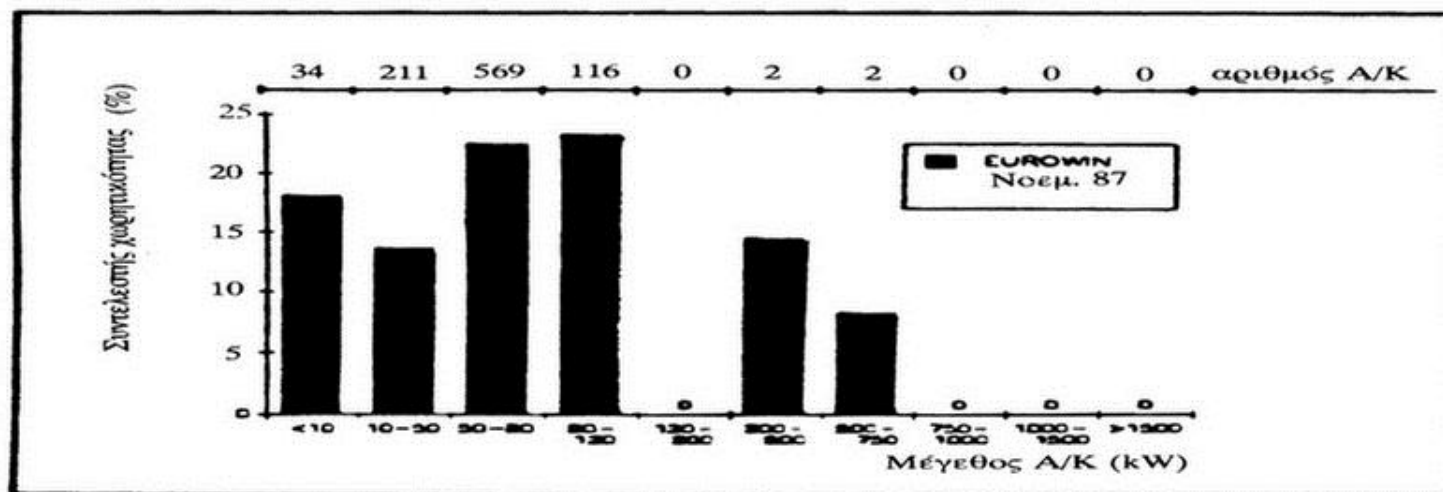
$$\bar{P} = \int_0^{\infty} C_p \frac{\rho}{2} v^3 P(v) dv$$

ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»



Η μέση αυτή τιμή ισχύος εξαρτάται σοβαρότατα από τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας και ειδικότερα από τη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου \bar{V} . Ειδικότερα για την ανεμογεννήτρια με χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στο σχήμα 3.20, διαπιστώνεται ότι η μέση ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι για $\bar{V} = 6 \text{ m/s}$, $\bar{P} = 50 \text{ kW}$ και για $\bar{V} = 7 \text{ m/s}$ $\bar{P} = 75 \text{ kW}$.

Ορίζεται συντελεστής χωρητικότητας (Capacity factor) ανεμοκινητήρα ο λόγος \bar{P}/P_R . Για την ανεμογεννήτρια $D=32 \text{ m}$, ο συντελεστής χωρητικότητας είναι 21.3% για $\bar{V} = 5 \text{ m/s}$, 32.4% για $\bar{V} = 6 \text{ m/s}$ και 42.2% για $\bar{V} = 7 \text{ m/s}$. Το σχήμα 3.22 παρουσιάζει στατιστικά στοιχεία για τους συντελεστές χωρητικότητας διαφόρων ανεμογεννητριών που είναι εγκατεστημένες στον Ευρωπαϊκό χώρο.



Σχήμα 3.22: Συντελεστής χωρητικότητας ευρωπαϊκών Α/Κ.

3.10. Συνθήκες υπολογισμού φορτίων του ανεμοκινητήρα

Τα επί μέρους στάδια μελέτης που αντιμετωπίζονται στη 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.
3. Επιλογή είδους ρύθμισης βήματος πτερυγίων και επιλογή αυτοματισμών που αφορούν τη ρύθμιση ισχύος, την έναρξη και παύση λειτουργίας του ανεμοκινητήρα.

4. Σύστημα προσανατολισμού του άξονα του δρομέα προς την κατεύθυνση του ανέμου.
5. Επιλογή υποσυστημάτων της ανεμογεννήτριας.
6. Μελέτη αντοχής των υλικών που αφορούν την κατασκευή και την έδραση πτερυγίων, των αξόνων, του κουβουκλίου κ.λπ.
7. Επιλογή ύψους του δρομέα πάνω από 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 τη μηχανολογική σχεδίαση του ανεμοκινητήρα απαιτείται η γνώση των νόμων και των ροπών που εφαρμόζονται στα πτερύγια, στην κορυφή του πύργου (κουβούκλιο), στον πύργο και τη θεμελίωση του. Στη συνέχεια αναφέρονται οι περιπτώσεις λειτουργίας του ανεμοκινητήρα στις οποίες οι δυνάμεις και οι ροπές αναπτύσσονται, χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση.

Συνθήκες φόρτισης για υπερβολικό άνεμο

- α. κανονική λειτουργία ανεμοκινητήρα σε ταχύτητα ανέμου μικρότερη της V_R αλλά με παρουσία ριπής ανέμου 35 m/s.
- β. Λειτουργία ανεμοκινητήρα σε ταχύτητα ανέμου V_F , αλλά με ριπή ανέμου 60 m/s.
- γ. Λειτουργία ανεμοκινητήρα στα 25 m/s με υπερτάχυνση δρομέα 40%.
- δ. Ακίνητοποιημένος ανεμοκινητήρας και ταχύτητα ανέμου 60 m/s.

Συνθήκες αστοχίας

- α. Φόρτιση ανεμοκινητήρα λόγω απώλειας πτερυγίου.

Συνθήκες σεισμού

Η αντιμετώπιση όλων αυτών των περιπτώσεων σχεδίασης απαιτεί τη συνεργασία πολλών ειδικών εκτός του αεροδυναμικού, όπως του μηχανολόγου κατασκευαστή, του δομοστατικού, του ηλεκτρολόγου, ηλεκτρονικού κ.λπ. Κατά συνέπεια η σχεδίαση ανεμογεννήτριας ιδίως μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους αποτελεί τεχνολογική πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπίζεται με την δέουσα προσοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

Η μεθοδολογία σχεδίασης των ελίκων έχει περάσει διάφορα στάδια εξέλιξης από το έτος 400 π.χ. στο οποίο 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 Prandtl που εμφανίστηκε γύρω στα 1910. Σήμερα με την ύπαρξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν πιο ακριβείς θεωρίες για την σχεδίαση των ελίκων, όπως η θεωρία των δινοπλεγμάτων, της επιφάνειας άνωσης, προβλέπεται δε στο όχι μακρινό μέλλον ότι θα είναι δυνατή η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier - Stokes πάνω στις καμπύλες επιφάνειες των πτερυγίων των ελίκων οπότε οι επιδράσεις συμπίεστικότητας και συνεκτικότητας θα λαμβάνονται υπόψη αυστηρά και όχι μέσω ημιεμπειρικών διορθώσεων όπως γίνεται σήμερα.

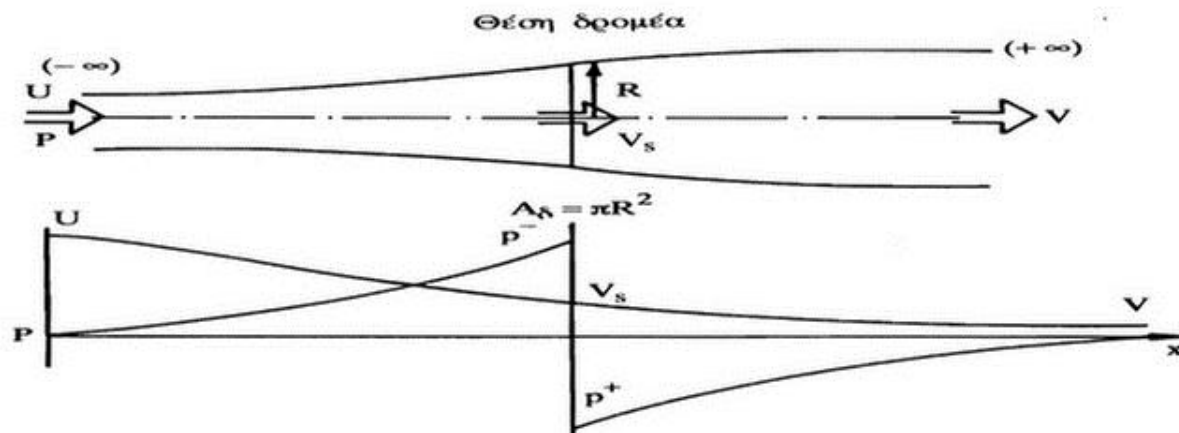
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η θεωρία του δίσκου ενέργειας με σχετικές ημιεμπειρικές διορθώσεις όπως αυτή εφαρμόζεται στον υπολογισμό του δρομέα ανεμοκινητήρων.

4.1. Θεωρία του δίσκου ενέργειας

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

Το σχήμα 4.1α δείχνει το ροϊκό σωλήνα ανεμοκινητήρα που ορίζεται από τη διάμετρο του δρομέα. Ο αέρας πολύ μακριά (στο άπειρο) ανάντι από το δίσκο έχει στατική πίεση p και πλησιάζει το δίσκο με τη ταχύτητα U . Ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα και συνεπώς πολύ μακριά κατόντι από το 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 στο

ροϊκό σωλήνα, θα πρέπει η διατομή άρα και η διάμετρος του ροϊκού σωλήνα να μεγαλώνει πίσω από το δρομέα, δηλαδή να υπάρχει διαστολή του ομόρρου του ανεμοκινητήρα, όπως ακριβώς διαγραμματικά παριστάνεται στο σχήμα 4.1α.



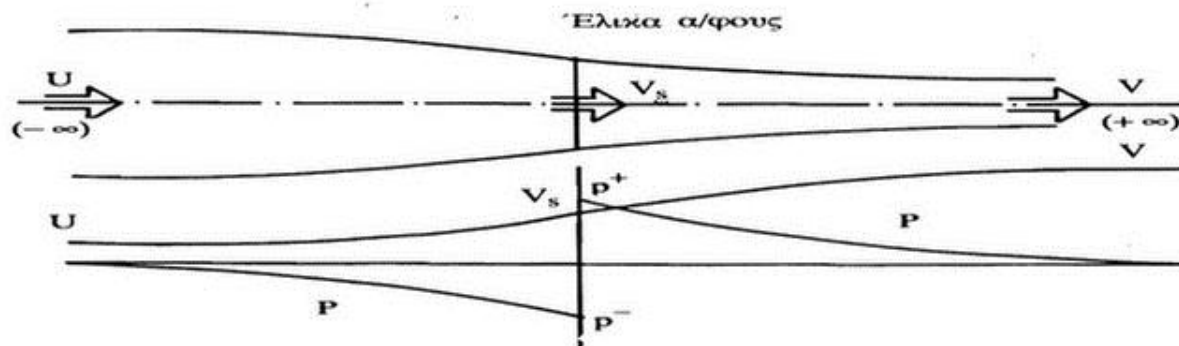
Σχήμα 4.1α: Ροϊκός σωλήνας δρομέα Α/Κ.

Το ρευστό μετά από το δίσκο έχει μικρότερη ενέργεια απ' αυτήν πριν από το δίσκο και επειδή η αξονική ταχύτητα του ρευστού πάνω στο δίσκο και οριακά λίγο πριν και λίγο μετά από τον δίσκο παραμένει η ίδια για λόγους διατήρησης της μάζας (η διαφορά κίνητικης ενέργειας του ανέμου πριν και μετά από το δίσκο δεσμεύθηκε από τον ιδανικό δρομέα του ανεμοκινητήρα) τότε η στατική πίεση του ρευστού μετά από το δίσκο θα είναι μικρότερη από την στατική πίεση του ρευστού πριν από το 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 4.1α.

Το Σχήμα 4.1β παρουσιάζει τη 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 το δίσκο, βεβαίως με αύξηση της πίεσής του.

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

- η εξίσωση διατήρησης μάζας
- η εξίσωση διατήρησης της ορμής
- ενεργειακός ισολογισμός
- η εξίσωση της ροπής της ορμής



Σχήμα 4.1β: 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. 4.1α, αποτελεί ένα ρεύμα ολίσθησης. Το ρευστό μέσα στον σωλήνα έχει σταθερή ταχύτητα και πίεση πάνω στις διατομές κάθετα στον άξονα του ενώ η επιφάνεια του ροϊκού σωλήνα αποτελεί επιφάνεια ασυνέχειας ταχύτητας.
- (3) Η φόρτιση (διαφορά πίεσης πριν και μετά) πάνω σ' ολόκληρο το δίσκο είναι σταθερή.
- (4) Το ρεύμα αέρα μετά το δίσκο στερείται συστροφής. Η παραδοχή αυτή πρακτικά μπορεί να επιτευχθεί με την ύπαρξη δύο αντίθετα στρεφομένων 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 το δίσκο πάνω στο 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.

4.2. Εφαρμογή των νόμων διατήρησης

(α) Διατήρηση μάζας

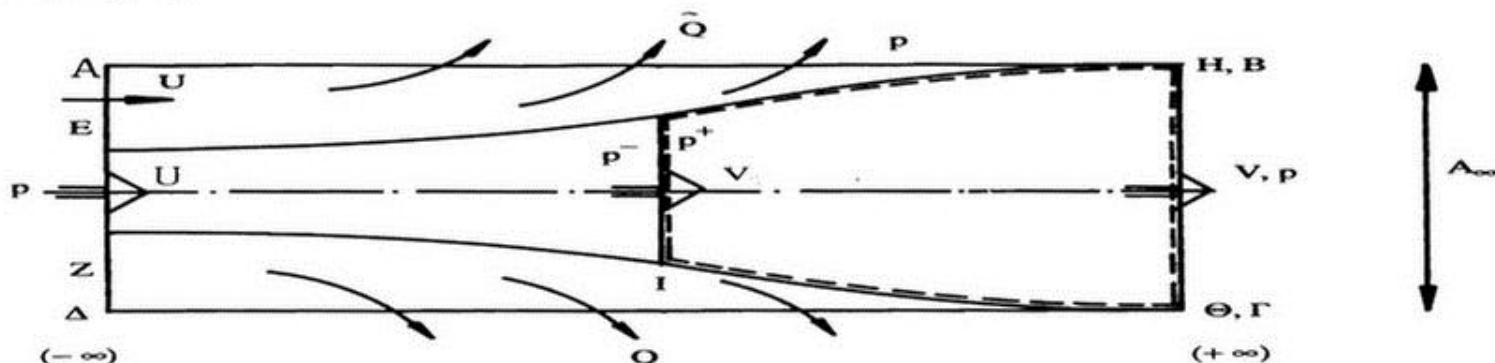
Η μάζα που ρέει μέσα στο ροϊκό σωλήνα διατηρείται σταθερή ίση με

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

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

(β) Διατήρηση της ορμής

Το θεώρημα διατήρησης της ορμής θα εφαρμοσθεί στον κυλινδρικό όγκο ισολογισμού ΑΒΓΔ, σχήμα 4.2, ο οποίος περιβάλλει το ροϊκό σωλήνα ΕΖΗΘ. Η παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου (ΑΒ-ΓΔ) τοποθετείται πολύ μακριά από το δίσκο ώστε εκ η στατική πίεση του ρευστού να είναι ίση με την πίεση περιβάλλοντος, δηλαδή τη ατμοσφαιρική.



Σχήμα 4.2: Επιφάνεια ελέγχου.

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

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

Το ρευστό εισέρχεται στον όγκο ισολογισμού (αυστηρά εξέρχεται, προσοχή στη πρόσημο) 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

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

ή

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

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

γ) *Ενεργειακός ισολογισμός*

Το ρεύμα στερείται συστροφής ανάντι από τον δρομέα, έγινε δε η υπόθεση ότι στερείται συστροφής και κατάντι. Κατά συνέπεια, υπάρχει διατήρηση ενέργειας του ρευστού (εξίσωση Bernoulli) στους δύο ανεξάρτητους υποχώρους πριν και μετά το δίσκο μέσα στο ροϊκό σωλήνα όχι όμως και μεταξύ των δύο υποχώρων γιατί ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από το ρευστό. Συνεπώς για τον υποχώρο ανάντι απο το δρομέα ισχύει:

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

ενώ για τον υποχώρο κατάντι από το δρομέα ισχύει

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

Αφαιρώντας τις ενεργειακές σχέσεις του Bernoulli κατά μέλη προκύπτει

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

Η εξίσωση της ώσης

$$T = \rho A_s V_s (U - V)$$

προσδιορίζει την ειδική ώση

$$\frac{T}{A_s} = \rho V_s (U - V) \quad (4.1)$$

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

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

οπότε προκύπτει

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

ή

$$V_s = \frac{1}{2} (U + V) \quad (4.2)$$

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

$$a = \frac{U - V_s}{U} \quad (4.3)$$

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

$$V_s = U (1 - a) \quad (4.4)$$

και από την σχέση (4.2)

$$V = U (1 - 2a) \quad (4.1)$$

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

Ο άνεμος του ροϊκού σωλήνα που πλησιάζει το δίσκο έχει ισχύ

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

Ενώ κατόντι 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

$$P = T V_s \quad (4.2)$$

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

Όριο του Betz

Οι προηγούμενες σχέσεις για την ισχύ του δρομέα και την ώση μπορούν, με την εισαγωγή του συντελεστή αξονικής επαγωγής να γραφούν ως:

$$P = 2\rho A_s U^3 a (1 - a)^2 \quad (4.3)$$

$$T = 2\rho A_s U^2 a (1 - a) \quad (4.4)$$

Ορίζονται συντελεστές ισχύος και αντίστασης του δρομέα

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 A_s} \quad (4.5)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U^2 A_s} \quad (4.6)$$

Η πρώτη σχέση υποδηλώνει το ποσοστό της ενέργειας που έχει ο άνεμος που πλησιάζει το δίσκο (λίγο πριν από το δίσκο) και που μετατρέπεται σε ισχύ πάνω στο δρομέα ($1/2 \rho V_s^3 A_s$ είναι η ισχύς που έχει ο άνεμος ταχύτητας V_s που περνάει από επιφάνεια A_s) 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

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (4.11)$$

$$C_T = 4a(1-a) \quad (4.12)$$

Η σχέση για τον συντελεστή ισχύος δηλώνει ότι αυτή έχει ακρότατο για τιμή συντελεστή αξονικής επαγωγής

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

Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής ισχύος παίρνει μέγιστη τιμή ίση με

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 59\%$$

μέγιστη τιμή που καλείται όριο του Betz. Προκύπτει λοιπόν ότι ο βέλτιστος δρομέας και κάτω από ιδανικές συνθήκες λειτουργίας μπορεί να δεσμεύει μόνο το 59% της ισχύος του ανέμου. Το όριο αυτό είναι κατά κάποιον 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 στο δίσκο και στα $U/3$ πολύ μακριά κατάντι από το δίσκο.

Ο συντελεστής αντίστασης C_T του δρομέα στη βέλτιστη λειτουργία παίρνει την τιμή $8/9$, τιμή μικρότερη της μέγιστης που είναι:

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

και που επιτυγχάνεται για συντελεστή αξονικής επαγωγής $a=0.5$

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

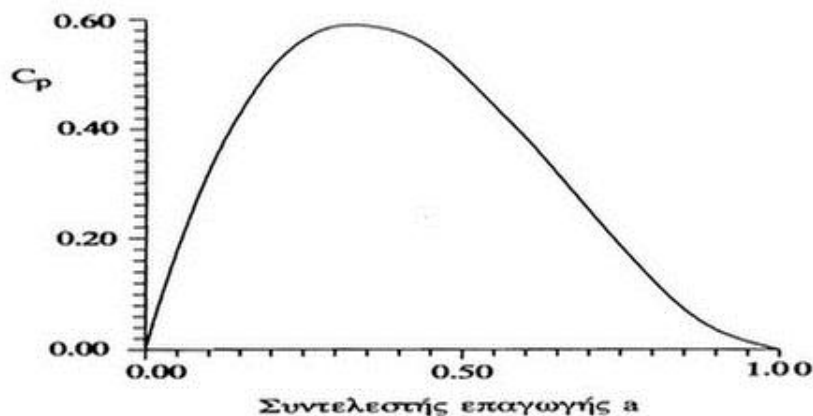
Τα Σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζουν τη μεταβολή των συντελεστών ισχύος και αντίστασης του δρομέα για διάφορες τιμές του συντελεστή αξονικής επαγωγής.

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

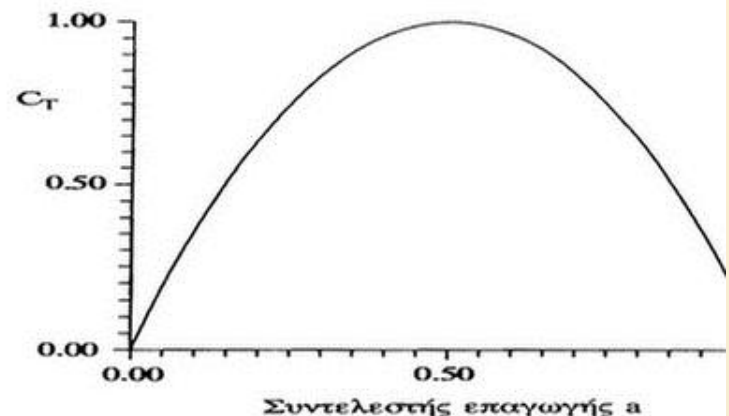
$$\frac{A_s - A_\infty}{A_\infty} = \frac{a}{1-a} \quad \frac{A_{t\infty} - A_\infty}{A_\infty} = \frac{2a}{1-2a}$$

οι οποίες υποδεικνύουν τον τρόπο μεταβολής της διατομής του ομόρρου, γραφικά δε παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5 για βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας.

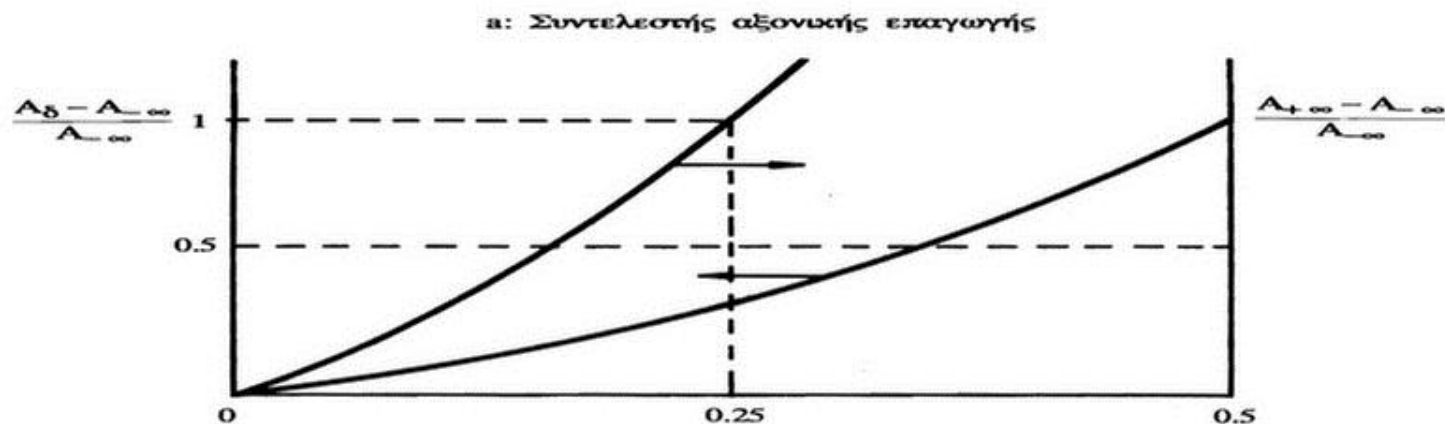
ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»



Σχήμα 4.3: Καμπύλη C_p απόδοσης δρομέα $C_p = 4a(1-a)^2$.



Σχήμα 4.4: Συντελεστής ώσης A/F



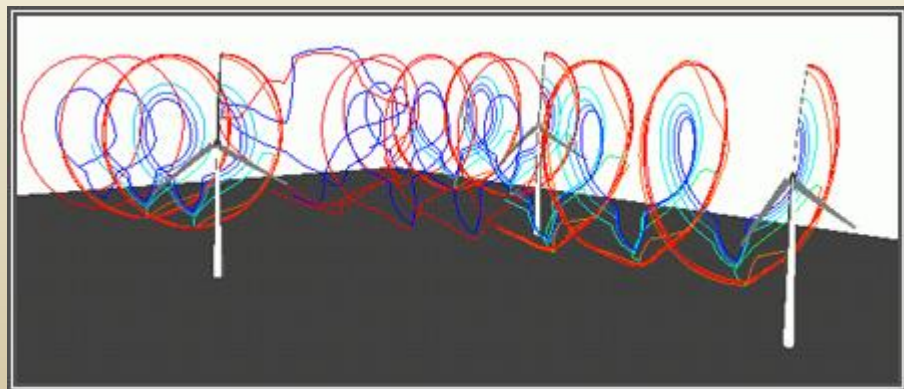
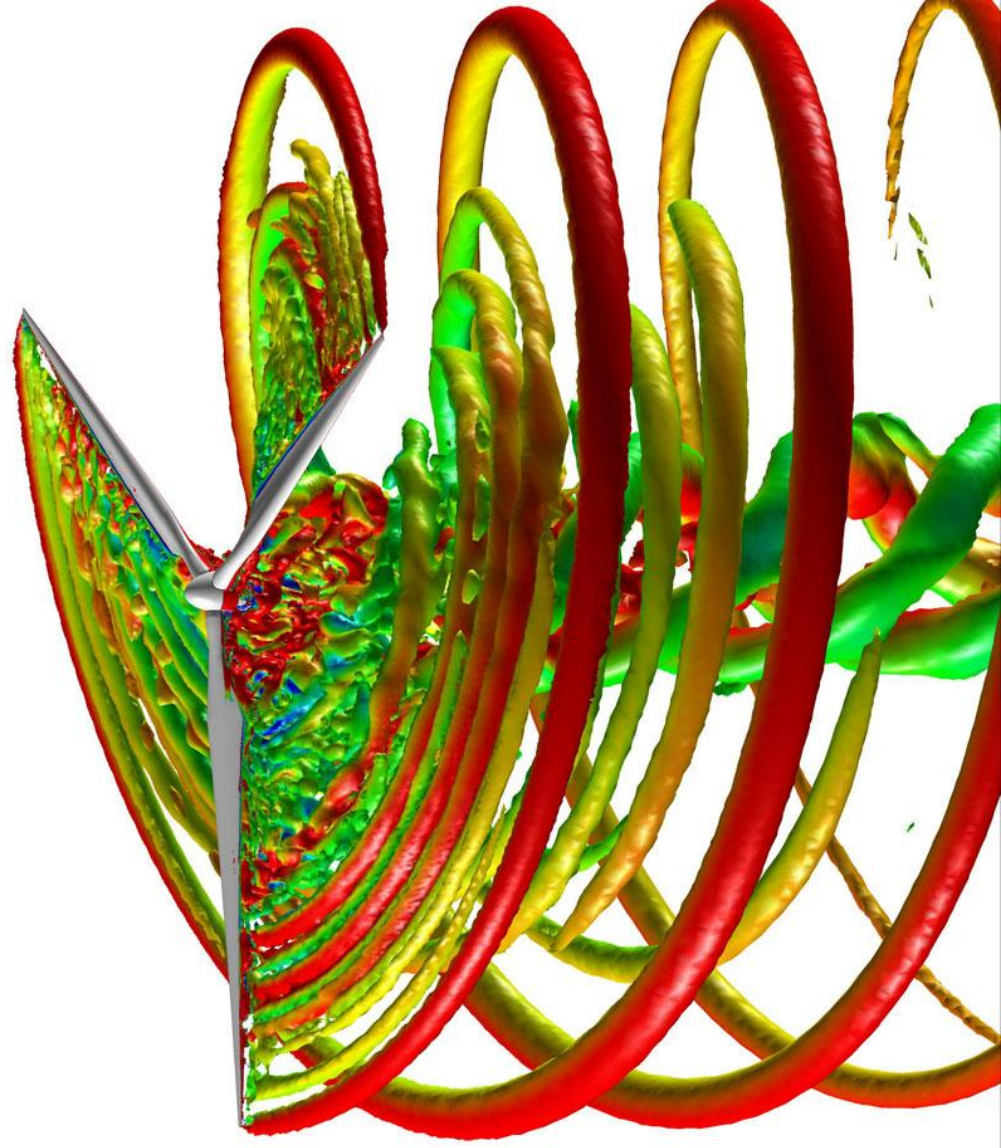
Σχήμα 4.5: Μεταβολή διατομών ροϊκού σωλήνα δρομέα A/K .

Επίδραση της περιστροφής του ομόρρου

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

ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»





ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

Στις φωτογραφίες Φ.16 και Φ.17 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 ακροπερὺγιο ενός πτερυγίου δρομέα (από την έρευνα του I. Αντωνίου).

Για έλικα αεροσκάφους ο ομόρρους στρέφεται κατά τη φορά περιστροφής της έλικας ενώ για ανεμοκινητήρα ο ομόρρους έχει αντίθετη από το δρομέα φορά περιστροφής (φυσικά 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 ομόρρους να έχει πολύ μικρή συστροφή. Η κινητική ενέργεια που έχει το ρευστό μετά το δρομέα αποτελείται από την κινητική ενέργεια που οφείλεται στην αξονική (μεταφορική) ταχύτητα του ανέμου και από την περιφερειακή κινητική ενέργεια (που οφείλεται στην συστροφή του ρευστού). Η δεύτερη γενικά δεν μπορεί να ανακτηθεί στο άπειρο μακρυνά απ' το 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. Να σημειωθεί ότι το ρευστό ανάντι του δίσκου στερείται συστροφής (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 το δίσκο ενέργειας (διακοπτόμενη γραμμή στο σχήμα 4.2) οδηγεί στο συμπέρασμα διατήρησης της συστροφής

$$V_{\theta} \quad r = \text{σταθερό} \quad (4.13)$$

(για το πεδίο ροής κατάντι του δίσκου).

Συνεπώς 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} μακρυνά 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 ταχύτητας 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).

$$V_{\theta_+} = 1/2 V_{\theta_-}$$

Ορίζεται συντελεστής περιφερειακής επαγωγής η ποσότητα a'

$$a' = \frac{V_{\theta_+}}{\Omega r} \quad (4.14)$$

όπου Ω η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό προκύπτουν οι σχέσεις

$$V_{\theta_+} = a' \Omega r \quad (4.15)$$

$$V_{\theta_-} = 2a' \Omega r \quad (4.16)$$

δ) **Θεώρημα της ροπής της ορμής.**

Το θεώρημα της ροπής της ορμής εκφράζει ότι η μεταβολή της εν θέσει ροής της ορμής του ρευστού που διέρχεται διά μέσου του όγκου ισολογισμού ισούται με τη ροπή των εξωτερικών δυνάμεων. Ως όγκος ισολογισμού λαμβάνεται ο δακτυλιοειδής ροϊκός σωλήνας του Σχήματος 4.5, οπότε προκύπτει

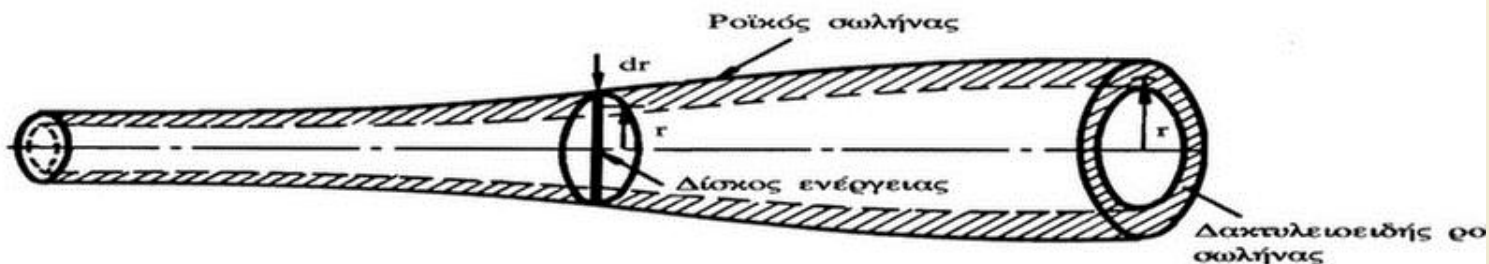
$$dM = \rho 2\pi r dr V_s [(V_\theta r)_\infty - (V_\theta r)_{-\infty}]$$

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

$$M = \dot{m} V_s 2a' \Omega R^2 \quad (4.17)$$

Οι σχέσεις (4.8) & (4.17) εκφράζουν τη δύναμη και ροπή που το ρευστό εξασκεί πάνω στο δίσκο ενέργειας.

Η προηγούμενη μονοδιάστατη ανάλυση των ισολογισμών μάζας, ορμής, ενέργειας και ροπής στο ροϊκό σωλήνα εφαρμόζεται και σε δακτυλιοειδείς ροϊκούς σωλήνες πάχους dr , όπως τέτοιος σωλήνας φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Δακτυλιοειδής ροϊκός σωλήνας πάχους dr και ακτίνας r .

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

Συγκεκριμένα η στοιχειώδης παροχή μάζας δια του δακτυλιοειδούς ροϊκού σωλήνα είναι

$$d\dot{m} = \rho 2\pi r dr U (1 - a) \quad (4.18)$$

η στοιχειώδης αξονική δύναμη που ενεργεί στο δίσκο είναι

$$dT = \rho 4\pi r dr (1 - a) a U^2 = \rho C_T 2\pi r dr U^2 \quad (4.19)$$

και η στοιχειώδης ροπή που αναπτύσσεται πάνω στο δίσκο είναι

$$dM = \rho 4\pi r dr a' (1 - a) \Omega r^2 U \quad (4.20)$$

ο τοπικός συντελεστής ισχύος είναι

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (4.21)$$

ο τοπικός συντελεστής ώσης C_T είναι

$$C_T = 4a(1-a) \quad (4.22)$$

και τέλος ο τοπικός συντελεστής ροπής C_M είναι

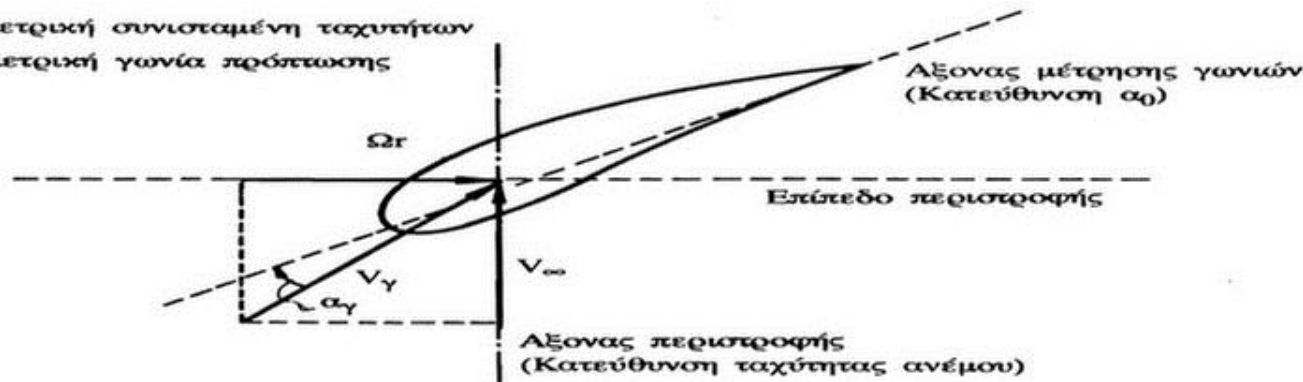
$$C_M = 4a'(1-a) \frac{\Omega r}{U}$$

Θεωρία στοιχείων πτερύγωσης

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 τη διέλευσή του διά μέσου του δακτυλιοειδούς τμήματος του δίσκου πάχους Δr πάνω στο δίσκο (μεγέθη που υπολογίστηκαν προηγούμενα) με τις αεροδυναμικές που αναπτύσσονται πάνω στις λωρίδες πτερυγίου του δρομέα. Κάθε δακτυλίοειδής ροϊκός σωλήνας τέμνει τα πτερά του δρομέα που είναι B το πλήθος και τα οποία πάνω στην κυλινδρική επιφάνεια του ροϊκού σωλήνα αφήνουν ίχνος που έχει την μορφή της αεροτομής. Το Σχήμα 4.7α αποτελεί (σε κάτοψη) το ανάπτυγμα της κυλινδρικής επιφάνειας του ροϊκού σωλήνα με το ίχνος της τομής της με ένα πτερύγιο του δρομέα.

V_γ : γεωμετρική συνισταμένη ταχυτήτων

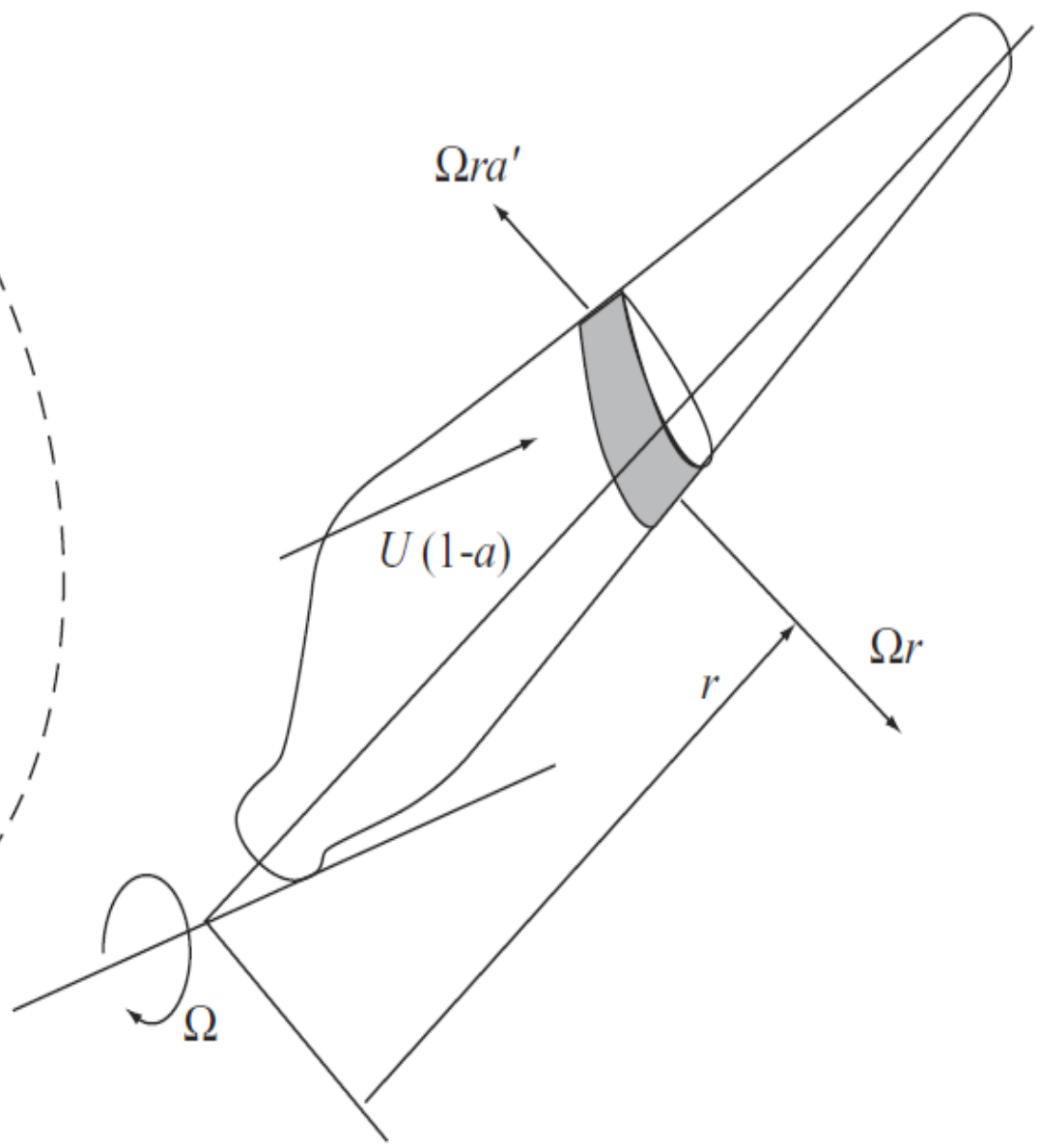
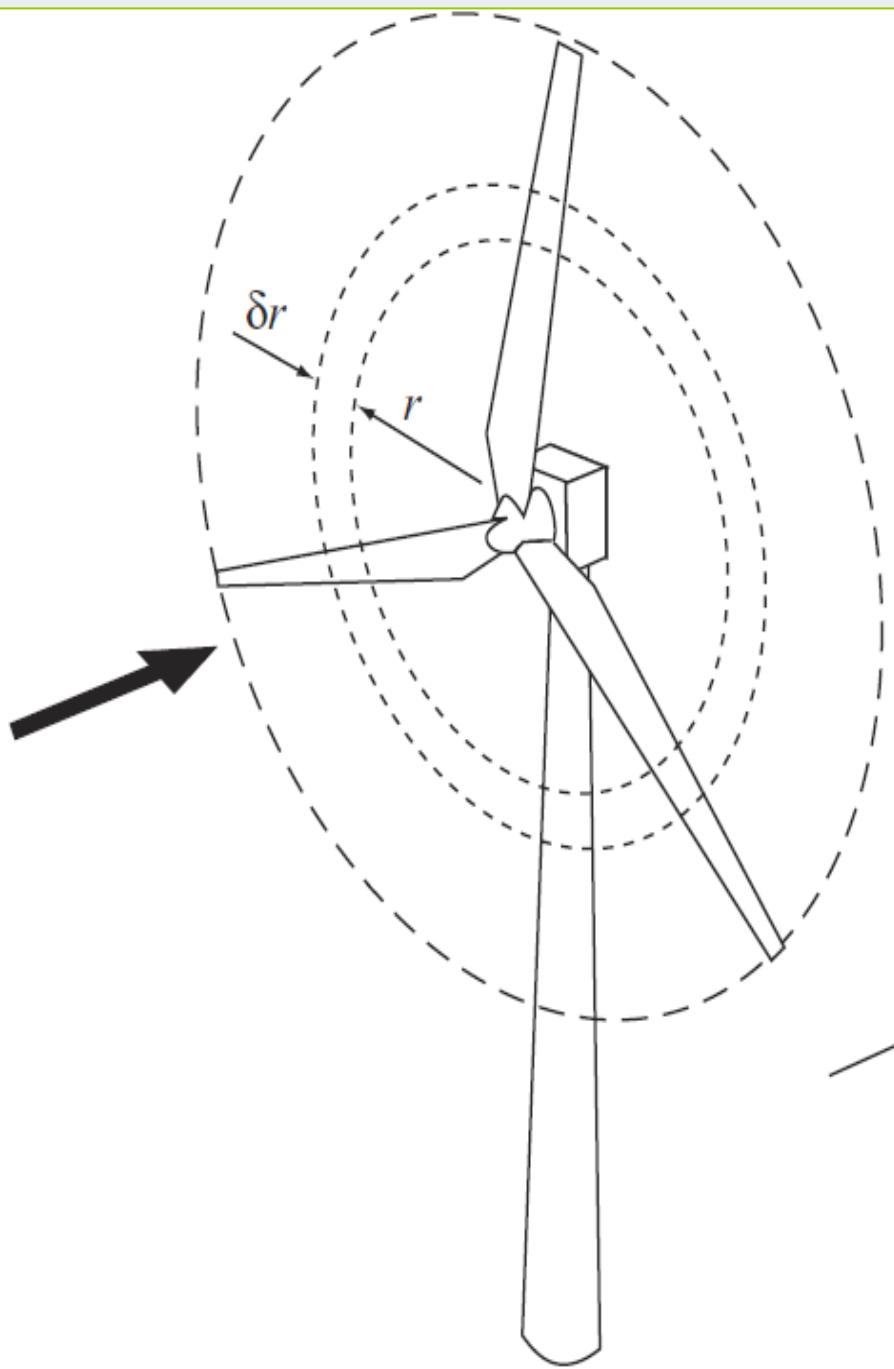
α_γ : γεωμετρική γωνία πρόσπτωσης



Σχήμα 4.7α: Τρίγωνο ταχυτήτων (γεωμετρικό).

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

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



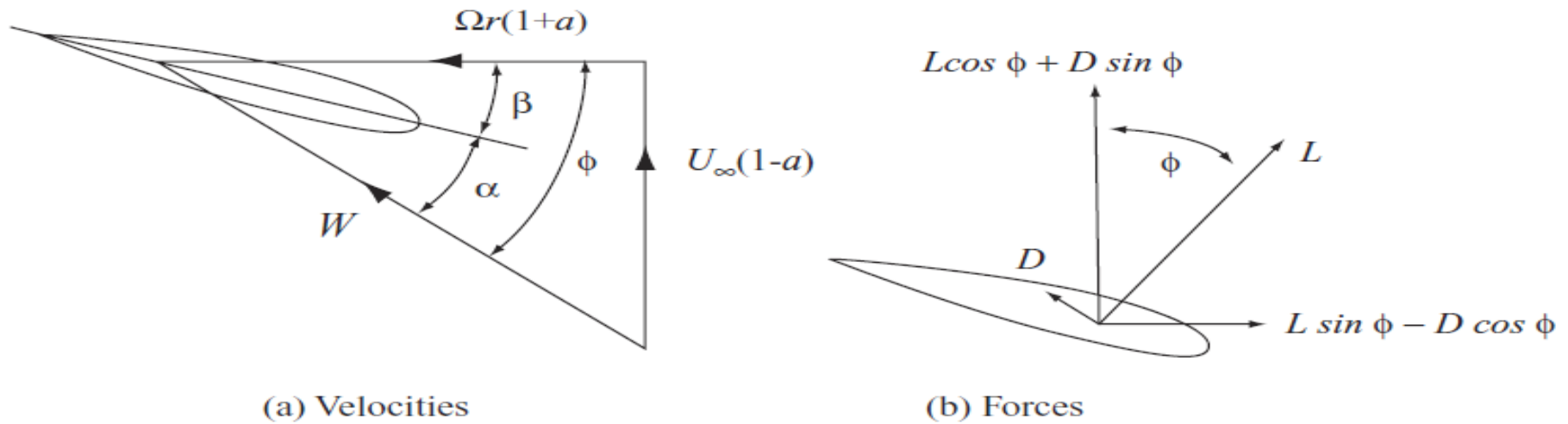


Figure 3.14 Blade Element Velocities and Forces

$$\sin \phi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{W} \quad \text{and} \quad \cos \phi = \frac{\Omega r(1+a')}{W} \quad (3.42)$$

The angle of attack α is then given by

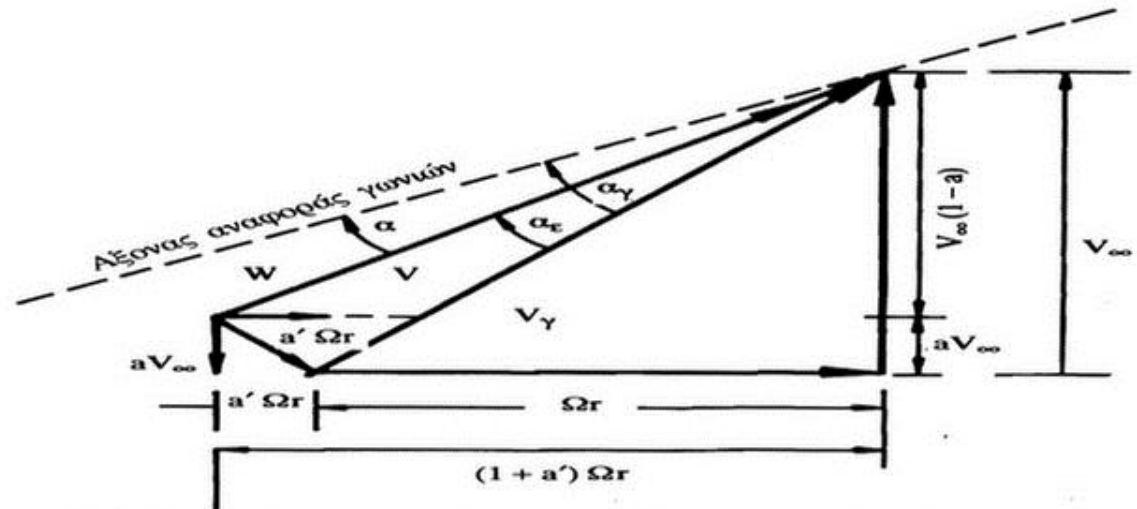
$$\alpha = \phi - \beta \quad (3.43)$$

The lift force on a span-wise length δr of each blade, normal to the direction of W , is therefore

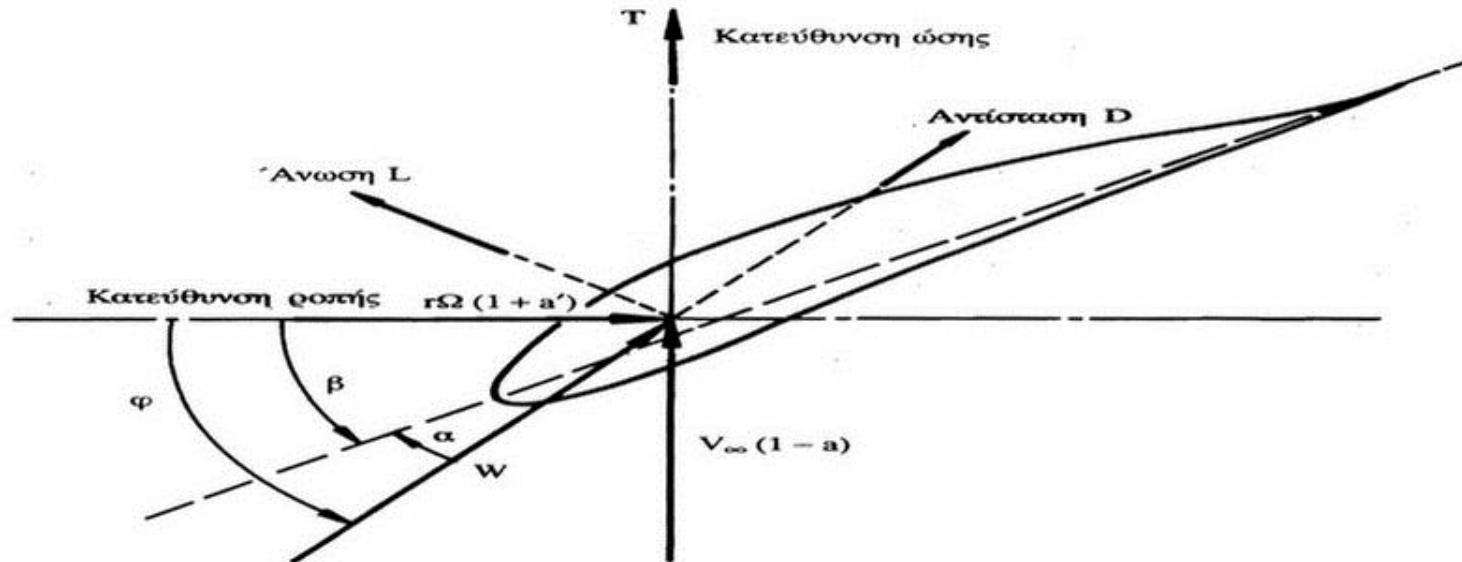
$$\delta L = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_l \delta r \quad (3.44)$$

and the drag force parallel to W is

$$\delta D = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_d \delta r \quad (3.45)$$



Σχήμα 4.7β: Ελαγώμενη ταχύτητα – Πραγματικό τρίγωνο ταχυτήτων.



Σχήμα 4.7γ: Δυνάμεις που αναπτύσσονται στην αεροτομή του Α/Κ.

η δε αεροτομή βρίσκεται σε γωνία πρόσπτωσης α ως προς την ταχύτητα W , Σχ. 4.7β. Η αλληλεπίδραση της ροής και της στοιχειώδους λωρίδας πτέρυγας (πτέρυγα με πλάτος dr) οδηγεί στην εμφάνιση των δυνάμεων άνωσης και αντίστασης όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.7γ. Οι εκφράσεις των δυνάμεων αυτών, σύμφωνα με τα γνωστά από την αεροδυναμική είναι:

$$\Delta L = C_l \frac{\rho}{2} W^2 C \Delta r \quad (4.23)$$

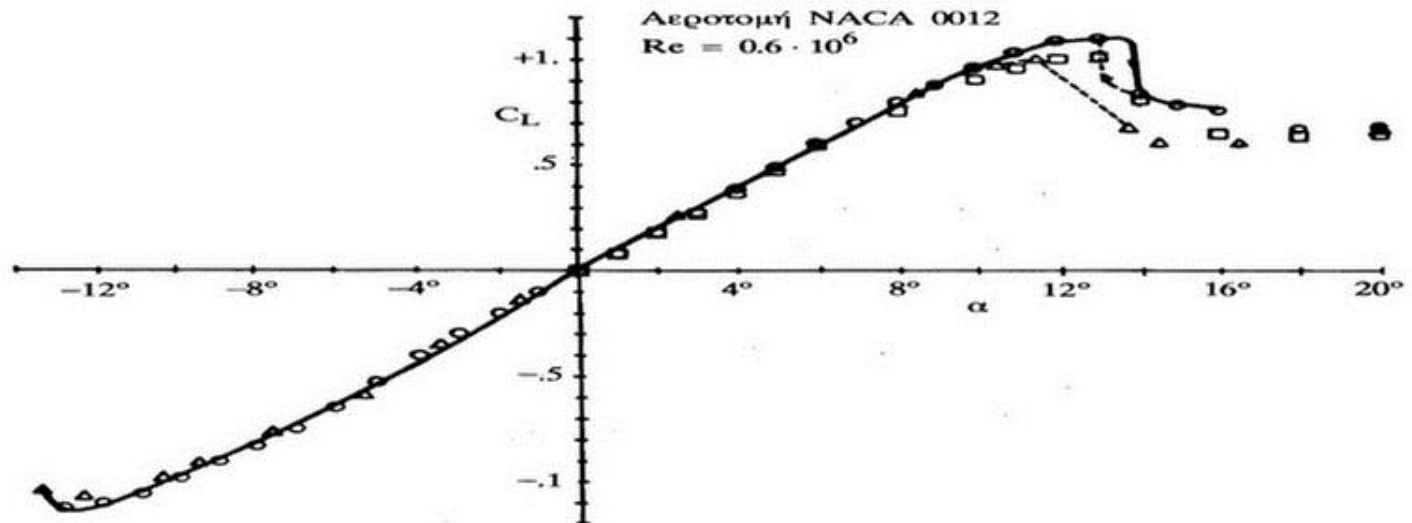
$$\Delta D = C_d \frac{\rho}{2} W^2 C \Delta r \quad (4.24)$$

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 4.8α και 4.8β για την αεροτομή NACA 4412 όπου διαπιστώνεται η γραμμικότητα της σχέσης συντελεστή άνωσης γωνίας πρόσπτωσης και οι χαμηλές τιμές συντελεστή αντίστασης γύρω από μία ευρεία περιοχή τιμών γωνιών πρόσπτωσης γύρω από τη γωνία πρόσπτωσης χωρίς κρούση.

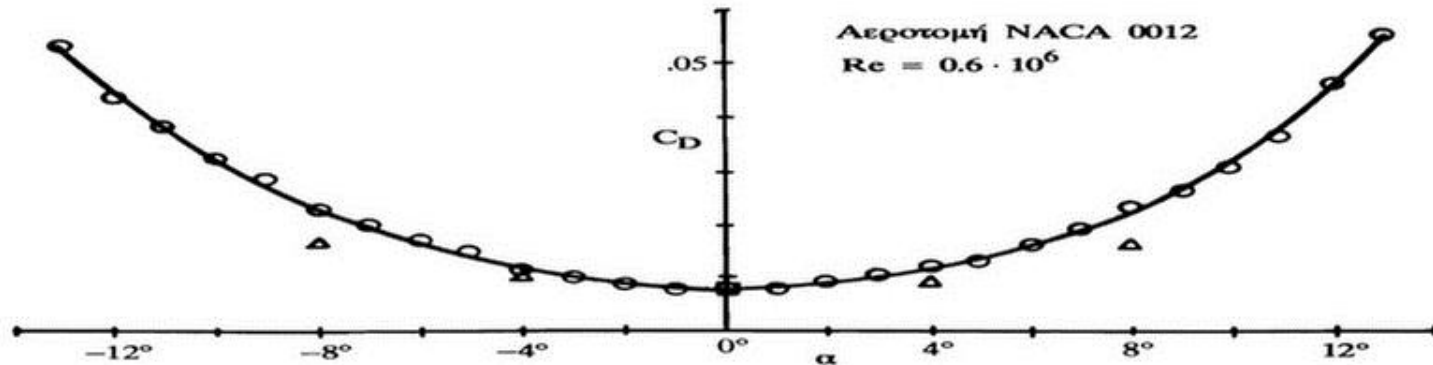
Οι δύο στοιχειώδεις δυνάμεις άνωσης και αντίστασης αναλύονται κατά την αξονική και την περιφερειακή κατεύθυνση (x και t) και δίνουν τις εκφράσεις:

$$\Delta F_x = \Delta L \cos \varphi + \Delta D \sin \varphi \quad (4.25)$$

$$\Delta F_t = \Delta L \sin \varphi - \Delta D \cos \varphi \quad (4.26)$$



Σχήμα 4.8α: Τυπική μεταβολή C_L με γωνία πρόσπτωσης. (Τα σύμβολα φανερώουν μετρήσεις για διάφορους Re).



Σχήμα 4.8β: Τυπική μεταβολή C_D με γωνία πρόσπτωσης.

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

Ορίζονται συντελεστές αξονικής και περιφερειακής δύναμης οι

$$C_x = C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi \quad (4.25)$$

$$C_t = C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi \quad (4.26)$$

οπότε οι σχέσεις (4.25) (4.26) για την αξονική και περιφερειακή δύναμη γράφονται

$$\Delta F_x = C_x \frac{\rho}{2} W^2 C \Delta r \quad (4.27)$$

$$\Delta F_t = C_t \frac{\rho}{2} W^2 C \Delta r \quad (4.28)$$

Από το τρίγωνο ταχυτήτων του Σχήματος 4.7β, προκύπτει ότι

$$W = U (1 - a) \sin \varphi$$

οπότε οι σχέσεις για τη στοιχειώδη αξονική και περιφερειακή δύναμη γράφονται

$$\Delta F_x = C_x \frac{\rho}{2} U^2 (1 - a)^2 \sin^2 \varphi C \Delta r \quad (4.29)$$

$$\Delta F_t = C_t \frac{\rho}{2} U^2 (1 - a)^2 \sin^2 \varphi C \Delta r \quad (4.30)$$

Αν B είναι το πλήθος των πτερυγίων του δρομέα, τότε στον στοιχειώδη δρομέα σωλήνα ακτίνας r και πάχους Δr λόγω αλληλεπίδρασης με το δρομέα αναπτύσσονται η αξονική δύναμη $B \Delta F_x$ και η περιφερειακή δύναμη $B \Delta F_t$.

Η περιφερειακή δύναμη $B \Delta F_t$ παράγει το έργο του ανεμοκινητήρα δημιουργώντας την στοιχειώδη ροπή

$$dM = B \Delta F_t r \quad (4.31)$$

και την στοιχειώδη ισχύ

$$N = B \Delta F_t \Omega r$$

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 (4.19) (4.29) και ροπή (4.20) (4.33) οδηγεί αντίστοιχα στις σχέσεις για τους συντελεστές αξονικής και περιφερειακής επαγωγής

$$\frac{a}{1-a} = \frac{B \cdot C \cdot C_1}{8\pi r \tan\varphi \sin\varphi} (1 + \varepsilon \tan\varphi) \quad (4.34)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{B \cdot C C_1}{8\pi r \cos\varphi} (1 - \varepsilon \operatorname{ctg}\varphi) \quad (4.35)$$

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_1}$$

Στις σχέσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε και η σχέση

$$\tan\varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} \quad (4.36)$$

η οποία προκύπτει από το τρίγωνο ταχυτήτων.

Οι προηγούμενες 3 σχέσεις μπορούν να αδιαστατοποιηθούν με την εισαγωγή της στερεότητας σ , που ορίζεται BC/R , (\bar{C} η μέση χορδή) της αδιάστατης ακτινικής θέσης χ , που ορίζεται $\chi = r/R$ και της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου λ , που ορίζεται

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{U} \quad \text{οπότε παίρνουν τη μορφή}$$

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma (C/\bar{C}) C_1}{8\chi \tan\varphi \sin\varphi} (1 + \varepsilon \tan\varphi) \quad (4.37)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma (C/\bar{C}) C_1}{8\chi \cos\varphi} (1 - \varepsilon \operatorname{ctg}\varphi) \quad (4.38)$$

$$\tan\varphi = \frac{1}{\lambda \cdot \chi} \cdot \frac{1-a}{1+a'} \quad (4.39)$$

Οι σχέσεις αυτές επαρκούν για να υπολογισθεί η αεροδυναμική απόδοση-συμπεριφορά δρομέα (γνωστών γεωμετρικών στοιχείων) σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας λ . Πράγματι οι 3 εξισώσεις έχουν σε κάθε ακτινική θέση χ αγνώστους τους συντελεστές αξονικής επαγωγής a , περιφερειακής επαγωγής a' και το συντελεστή άνωσης C_1 (ή γωνία πρόσπτωσης α). Συνεπώς με μια επαναληπτική διαδικασία αριθ-

μητικών δοκιμών είναι δυνατόν σε κάθε ακτινική θέση να επιλυθεί το σύστημα εξισώσεων και να προκύψει η αεροδυναμική κατάσταση του δρομέα. Μια τέτοια παναληπτική 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 το φ (εξίσωση(4.39))
- ❑ Υπολογίζουμε τη γωνία πρόσπτωσης α από την εξίσωση $\alpha = \varphi - \beta$ και κατα τους συντελεστές C_l και C_d
- ❑ Ενημερώνουμε τις τιμές των συντελεστών a και a' από τις εξισώσεις (4.37), (4.38) και επαναλαμβάνεται η επαναληπτική διαδικασία μέχρι σύγκλισης.
- ❑ Μετά τη σύγκλιση υπολογίζονται στη συγκεκριμένη ακτινική θέση οι στοιχειώδεις δυνάμεις και ο τοπικός συντελεστής ισχύος και
- ❑ Τα προηγούμενα βήματα επαναλαμβάνονται για όλες τις ακτινικές θέσεις από $\chi = 0$ ως $\chi = 1$.

Η δύναμη, η ροπή, ο βαθμός απόδοσης (συντελεστής ισχύος) και άλλα μετρήσιμα προκύπτουν τότε από την εφαρμογή των αντίστοιχων σχέσεων (4.19-4.21). Η συνολική δύναμη που ενεργεί στο δρομέα θα είναι:

$$T = \int_{r=0}^R \rho \, 2\pi r \, U^2 (1-a) \, 2a \, dr \quad (4.21)$$

Η συνολική ροπή που ενεργεί στο δρομέα θα είναι

$$M = \int_{r=0}^R \rho \, 2\pi r \, U (1-a) \, 2a' \, \Omega r \, dr \quad (4.22)$$

Η συνολική ισχύς του δρομέα είναι

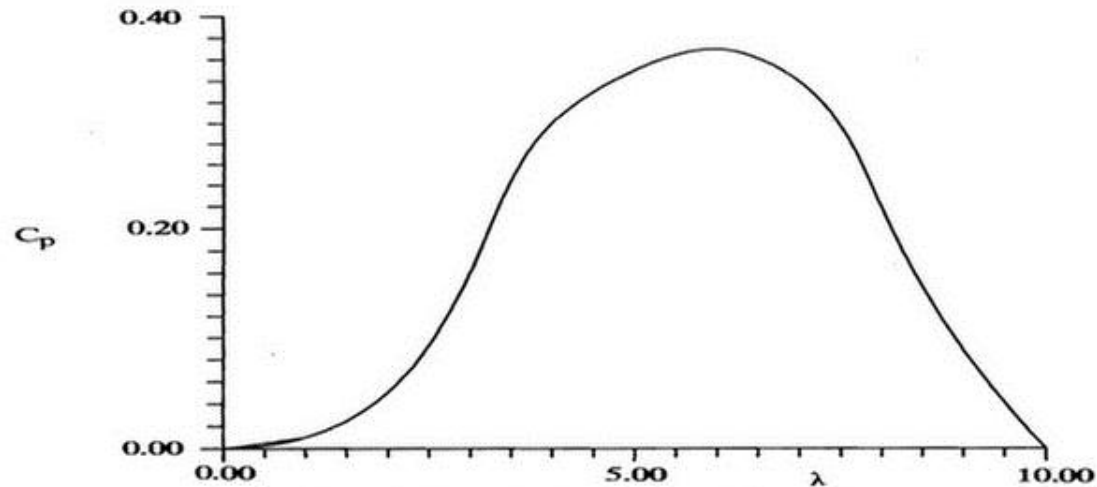
$$P = \int \rho \, 2\pi r \, \frac{U^3}{2} \, C_p \, dr \quad (4.23)$$

ενώ ο συντελεστής ισχύος του δρομέα προκύπτει από τη σχέση

$$\bar{C}_p = \frac{P}{\rho \, \pi R^2 \, \frac{U^3}{2}} \quad (4.24)$$

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

Είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα της ολοκλήρωσης εξαρτώνται μόνο από τον αριθμό των λωρίδων, την ταχύτητα ακροπτερυγίου λ , οπότε η επανάληψη της προηγούμενης διαδικασίας για άλλες τιμές ταχύτητας ακροπτερυγίου θα οδηγήσει στις καμπές λειτουργίας του δρομέα αντιπρόσωπος των οποίων είναι η σχέση συντελεστή ισχύος και ταχύτητας λ , με τυπική μορφή αυτή του Σχήματος 4.8γ.

Σχήμα 4.8γ: Διάγραμμα $C_p - \lambda$.

4.3 . Διορθώσεις της θεωρίας του δίσκου ενέργειας

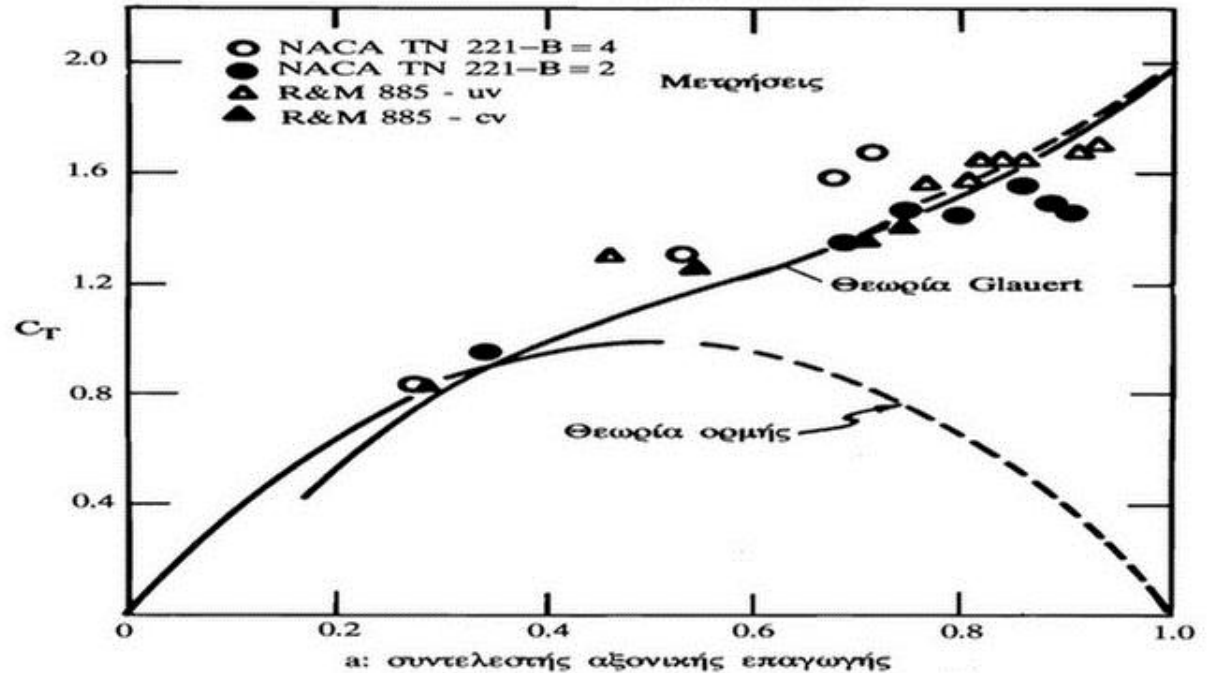
(α) Κατάσταση πέδησης

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 επεξεργάστηκε την περιοχή ισχύος της θεωρίας διορθώνοντας την σχέση για τον συντελεστή ώσης C_T για $a > 0,5$ σύμφωνα με το Σχήμα 4.9. Η προτεινόμενη από τον Glauert σχέση βασίστηκε σε πειράματα ελίγων σε αεροδυναμική σήραγγα και μπορεί να προσεγγιστεί αναλυτικά από την σχέση δευτέρου βαθμού

$$C_T = \begin{cases} 4a(1-a) & \text{για } a < 0,4 \\ 1 - 8a^2 - 0,65a + 0,84 & \text{για } 0,4 < a < 1 \end{cases} \quad (4.44)$$

(β) Διορθώσεις ακροπτερυγίων - Διόρθωση Prandtl

Η θεωρία του δίσκου ενέργειας, που τα συμπεράσματά της υπό μορφή σχέσεων παρουσιάστηκαν προηγουμένως, δεν λαμβάνει υπόψη της αεροδυναμικής φύσης απώλειες λόγω των εκρεόντων στροβίλων από τα tips των πτερυγίων της Α/Γ, που σημειωτέον είναι πεπερασμένους πλήθους και όχι απείρου όπως η θ. BETZ υποθέτει. Είναι λοιπόν αναγκαίο να εισαχθούν διορθώσεις στην ανωτέρω θεωρία ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα που προκύπτουν από βασικές παραδοχές της. Η θ. BETZ προϋποθέτει ομοιόμορφη ροή δια μέσου κάθε δακτύλιου του δίκτιου της Α/Γ.



Σχήμα 4.9: Διόρθωση συντελεστή ώσης κατά Glauert.

Οι δίνες όμως που εκρέουν από τα ακροπτερούγια, 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 Α/Γ. Συνέπεια αυτού του γεγονότος είναι η αύξηση και του αξονικού κοίτη ακροπτερούγιου. Επίσης προκαλεί μείωση της γωνίας πρόσπτωσης, με συνέπεια μείωση της περιφερειακής συνιστώσας της άνωσης, άρα και μείωση της ροπής επιδράσεως είναι πολύ έντονες στην περιοχή κοντά στο ακροπτερούγιο και μειώνονται στα εσωτερικά στοιχεία του πτερυγίου.

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

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

όπου

$$F_T = \frac{B}{z} \frac{r_T - r}{r_T \sin\phi_T}$$

Αν το πτερούγιο τελειώνει πριν φτάσει στην πλύμνη, τότε ορίζεται και ένας συντελεστής απωλειών που δίνεται από έκφραση ανάλογη με τον συντελεστή F_H στη θέση του

$$F_H = \frac{B}{z} \frac{r - r_H}{r_H \sin\phi_H}$$

Ο συνολικός συντελεστής απωλειών προκύπτει ως:

$$F = F_T \cdot F_H$$

Οι συντελεστές διάρρωσης Prandtl εισάγονται στις σχέσεις (4.34) - (4.36) και (4.50) πολλαπλασιάζοντας τους a και a' με F .

Η πράξη απέδειξε ότι η επιτυχέστερη διάρρωση προκύπτει με τη 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.

4.4. Καμπύλη ισχύος δρομέα

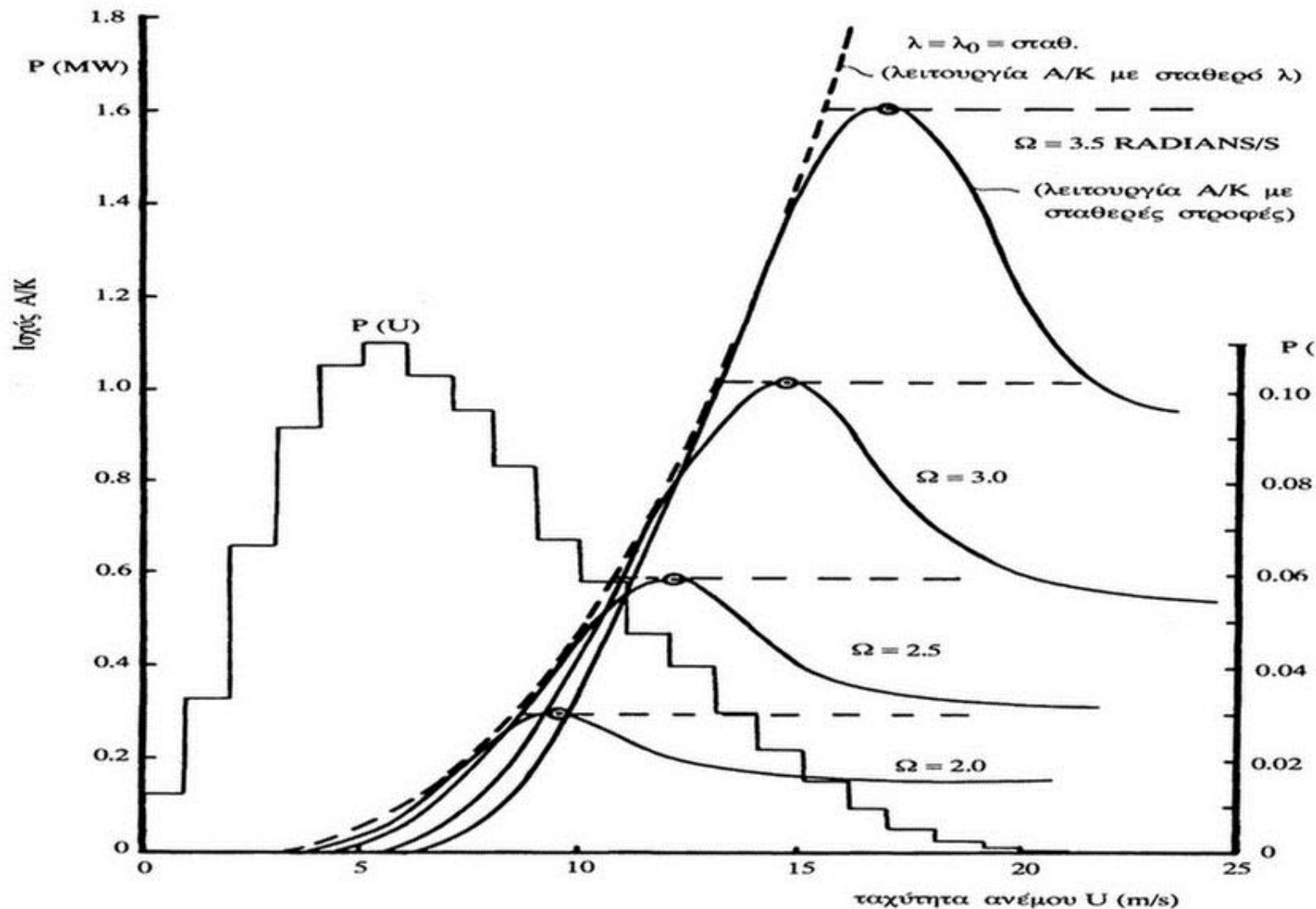
Από την καμπύλη συντελεστή ισχύος του δρομέα ως συνάρτηση της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ μπορεί να προκύψουν οι καμπύλες ισχύος του ανεμοκινητήρα για καθορισμένες στροφές του δρομέα ως συνάρτηση της ταχύτητας πνέοντος ανέμου. Συγκεκριμένα από την καμπύλη συντελεστή ισχύος και για ορισμένες στροφές δρομέα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

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

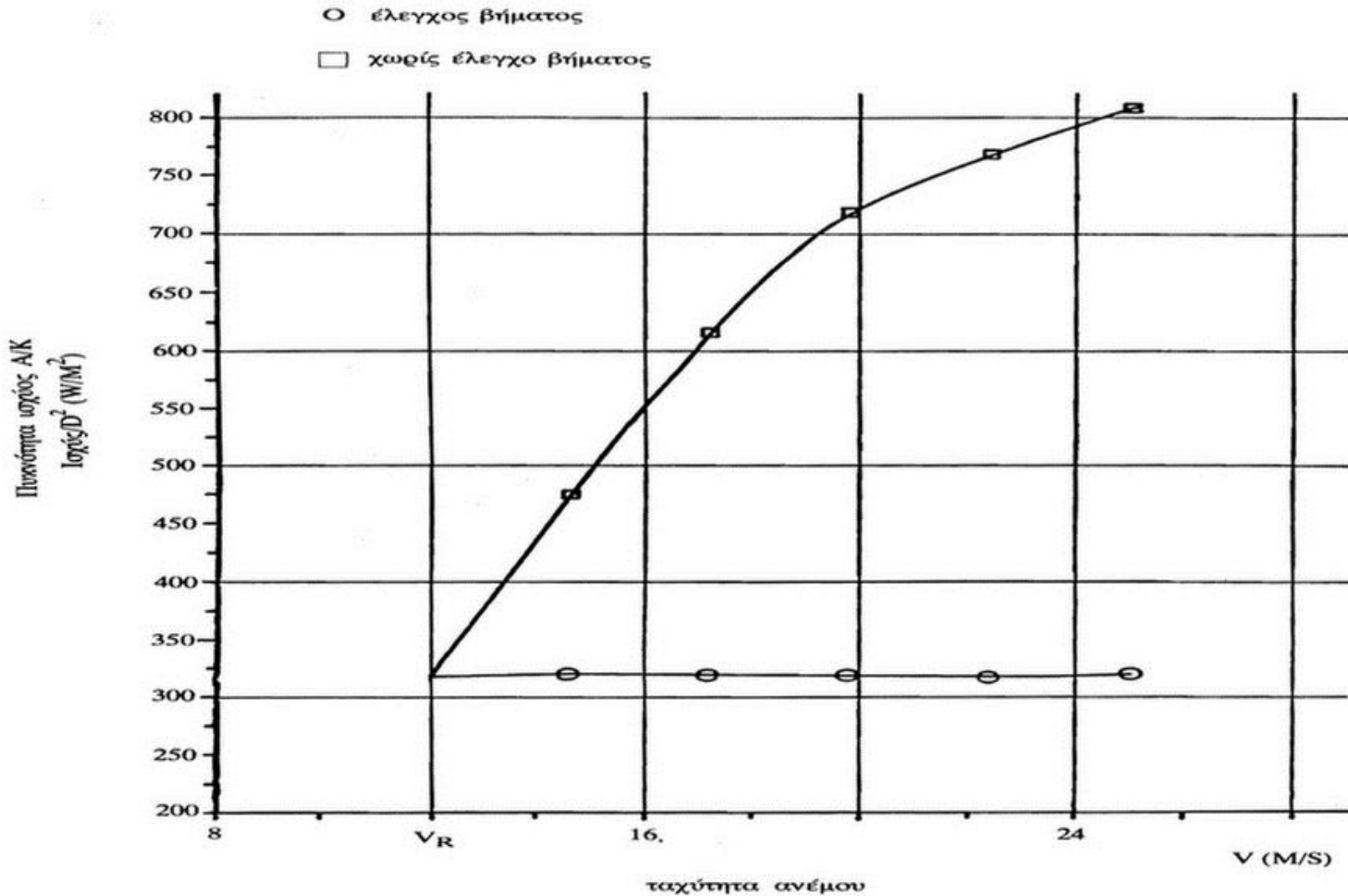
$$M = \frac{P}{\Omega}$$

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 4.10. 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. 4.11α και 4.11β.

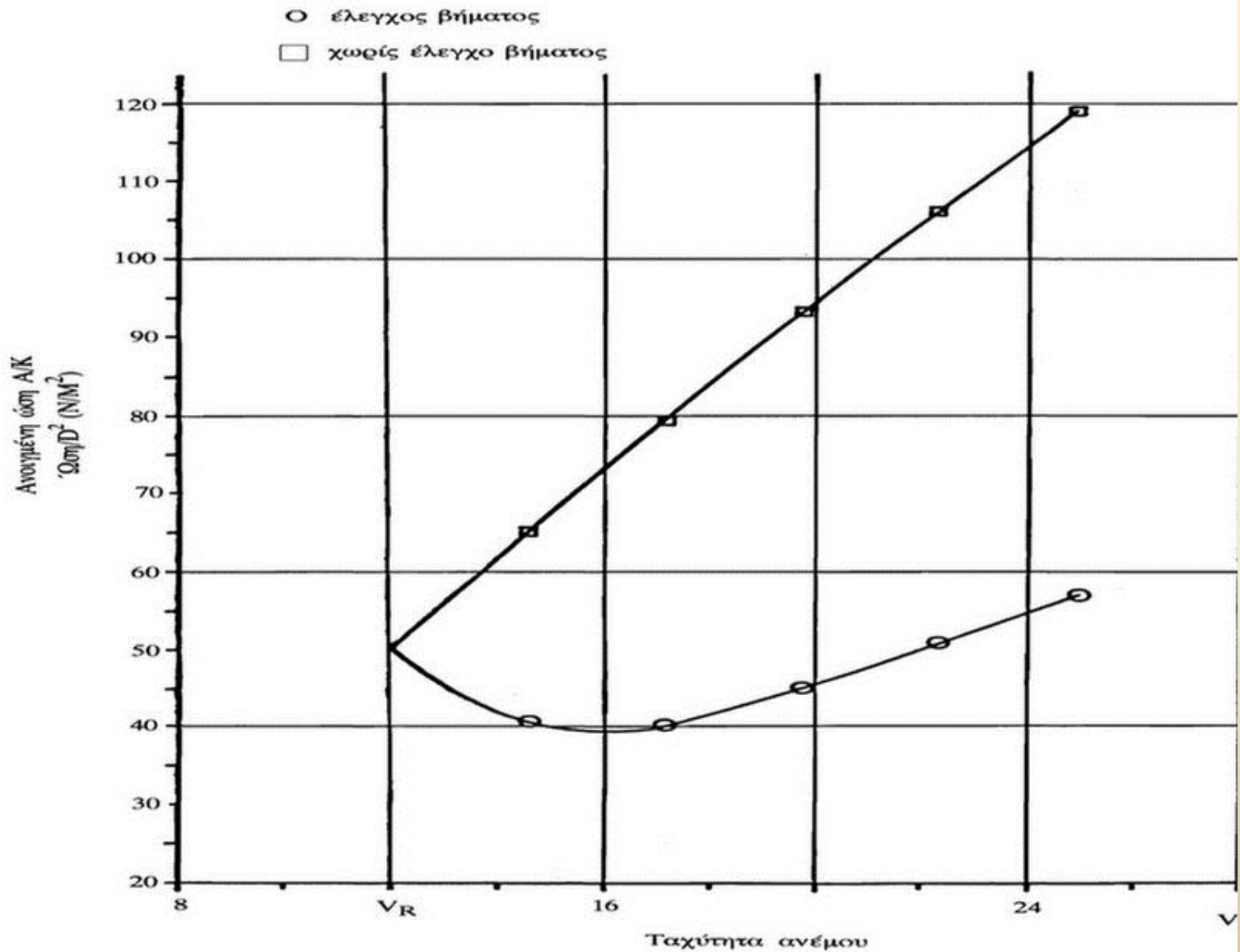
Όπως όμως είναι γνωστό, λόγω τριβών, η ανεμογεννήτρια αποδίδει στον άξονά της λιγότερη ενέργεια και ροπή. Η ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί από μία ελάχιστη ταχύτητα ανέμου και πάνω, την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας, V_{cut-in} , αποδίδει την ονομαστική ισχύ της P_R στην ονομαστική ταχύτητα V_R και για ταχύτητες ανέμου μέχρι την ταχύτητα V_F στην οποία σταματάει να λειτουργεί η ανεμογεννήτρια η ισχύς της διατηρείται σταθερή. Η πραγματική καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας πνέοντος ανέμου θα προκύψει από τη θεωρητική καμπύλη ισχύος αφού ληφθούν υπόψη τόσο οι ενεργειακές μηχανικές απώλειες όσο και οι χαρακτηριστικές ταχύτητες V_C , V_R , V_F . Τυπική καμπύλη ισχύος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12 ενώ με διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται η ισχύς του δρομέα χωρίς Αεροδυναμικό έλεγχο της μέγιστης ισχύος.



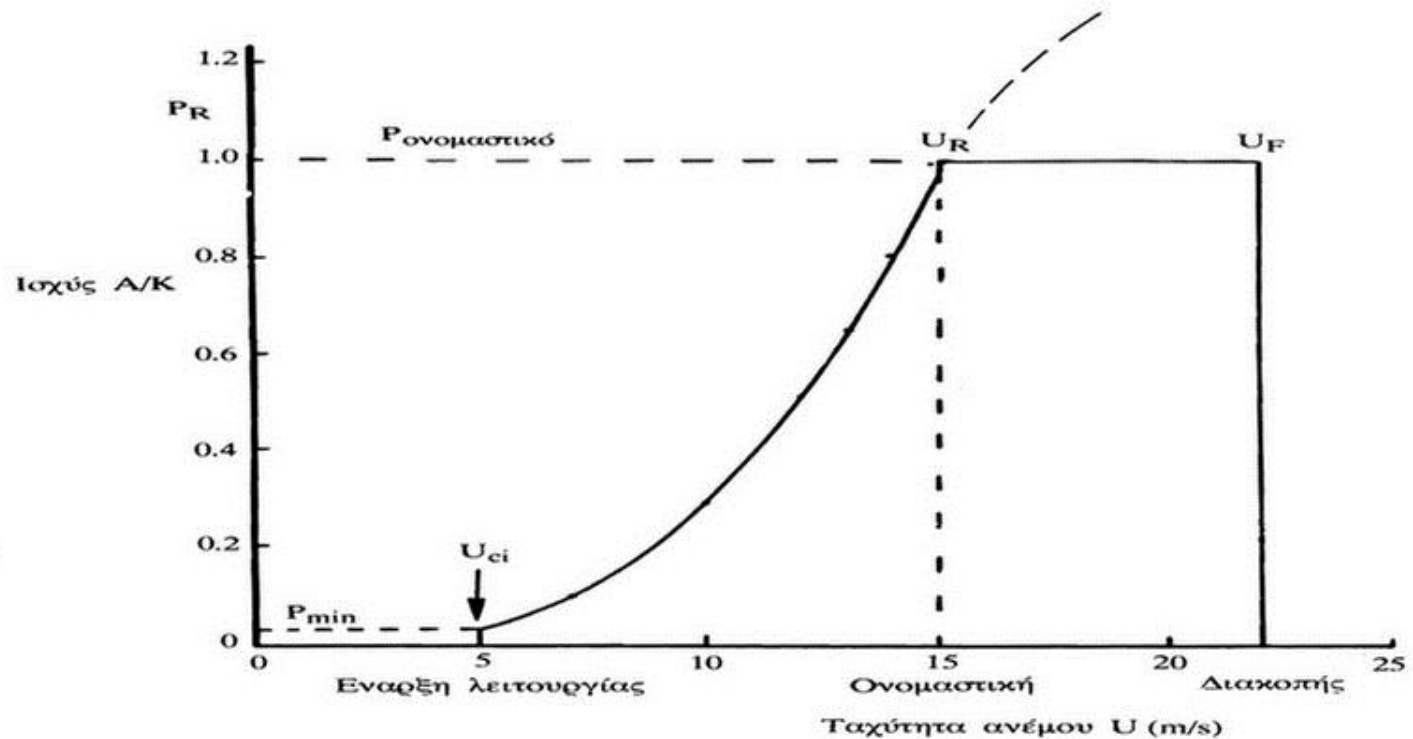
Σχήμα 4.10: Καμπύλες ισχύος δρομέα διαμέτρου 50m. Διακρίνονται οι δύο стратегικές λειτουργίες του δρομέα: (α) σταθερού λ , (β) σταθερού βήμα σταθερών στροφών.



Σχήμα 4.11α: Απόδοση δρομέα με και χωρίς ρύθμιση ακροπτερυγίου.



Σχήμα 4.11β: Ωστική δύναμη στο δρομέα.



Σχήμα 4.12: Καμπύλη ισχύος Α/Γ διαμέτρου δρομέα 50m.

4.5. Ετήσια ενεργειακή απόδοση δρομέα.

Για τον υπολογισμό της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης του δρομέα σε μια περιοχή είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου στην περιοχή, δηλαδή την καμπύλη κατανομής ταχυτήτων Weibull. Γνωρίζοντας την αναλυτική σχέση που εκφράζει την καμπύλη

$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] \quad (4.45)$$

όπου k και c παράμετροι της κατανομής, τότε μπορεί να υπολογισθεί η ετήσια ενεργειακή απόδοση του ανεμοκινητήρα υπολογίζοντας το ακόλουθο ολοκλήρωμα

$$E = 8760 \int_{u=0}^{\infty} P(u) f(u) du$$

όπου $f(u)$ είναι η πιθανότητα να πνέει ο άνεμος μεταξύ $u - 0,5 du$ και $u + 0,5 du$ αλλιώς $8760 f(u)$ είναι η χρονική διάρκεια πνοής του ανέμου ταχύτητας μεταξύ $u - 0,5 du$ και $u + 0,5 du$. Είναι φανερό ότι το ολοκλήρωμα

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(u) f(u) du$$

εκφράζει τη μέση ετήσια τιμή ισχύος της ανεμογεννήτριας που αλλιώς σημαίνει η ανεμογεννήτρια φαίνεται σε ετήσια βάση ως γεννήτρια συνεχούς παραγωγής ενέργειας με σταθερή ισχύ ίση με \bar{P} . Είναι φανερό ότι το παραπάνω ολοκλήρωμα υπολογίζεται αριθμητικά κατά περιοχή ταχυτήτων όπως

$$\bar{P} = \int_{V_{cut\ in}}^{V_R} P(u) f(u) du + P_R \int_{V_R}^{V_P} f(u) du \quad (4.1)$$

4.6. Βελτιστοποίηση σχεδίασης δρομέα

Ως βέλτιστος δρομέας μπορεί να ορισθεί ο δρομέας δοσμένης διαμέτρου που έχει ελάχιστο κόστος παραγόμενης αιολικής Kwh. Στη διαμόρφωση του κόστους η μηχανική επίδραση έχει η ετήσια παραγόμενη αιολική ενέργεια και το κόστος του δρομέα. Το κόστος του δρομέα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μπορούμε όμως να δεχτούμε ότι είναι ανάλογο των διαστάσεων των πτερυγών δηλαδή της στερεότητας του δρομέα. Οι εξισώσεις που εκφράζουν τις συνθήκες λειτουργίας του δρομέα έχουν εκτός των τριών αγνώστων a, a', C_p , επιπλέον αγνώστους την στερεότητα σ , τον τριγωνισμό λ , τη μεταβολή της χορδής του πτερυγίου (π.χ σταθερή χορδή δηλαδή ορθογωνικής μορφής κάτοψη ή τραπεζοειδούς μορφής κάτοψη πτέρυγας), τη 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 ανεξαρτητών παραμέτρων εισάγοντας κριτήρια βελτιστοποίησης που να οδηγήσουν την αριθμητική διαδικασία

Ο συντελεστής ισχύος του δρομέα δίνεται από τη 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

παγωγής. 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. Με την παρατήρηση αυτή και για άπειρο αριθμό πτερυγίων ισχύουν οι σχέσεις (από το 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

$$(1+a'^2)\lambda^2\chi^2 = a(1-a) \quad (4.47)$$

Με τη δεσμευτική αυτή σχέση και μετά από μαθηματική ανάλυση μεγιστοποίησης του ολοκληρώματος για τον συντελεστή ισχύος του δρομέα προκύπτει ότι για το βέλτιστο δίσκο ενέργειας ισχύει η σχέση

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1} \quad (4.48)$$

οπότε προκύπτει και η σχέση

$$a'\lambda^2\chi^2 = (1-a)(4a-1) \quad (4.49)$$

Συνοψίζοντας τη διαδικασία βελτιστοποίησης του δίσκου κατά Glauert οι τρεις λειτουργικές σχέσεις καθώς και οι σχέσεις (4.48) - (4.49) με αγνώστους τα a , a' , C_1 , β και C μπορούν να επιλυθούν με επαναληπτική διαδικασία και να οδηγήσουν στο βέλτιστο δρομέα. Στο βέλτιστο αυτόν δρομέα για «άπειρο πλήθος πτερυγίων» ο μέγιστος συντελεστής ισχύος προκύπτει για $a = 1/3$ οπότε η περιφερειακή ταχύτητα μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση

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

Τα προηγούμενα ισχύουν για ένα μεγάλο πλήθος 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 εκτέλεση πράξεων στην συνθήκη βελτίστου

$$a = \frac{1}{2 + \frac{1}{\cos\varphi}} \quad (\text{για } \varepsilon = 0) \quad (4.50)$$

Η συνθήκη αυτή αν συνδυασθεί με τις τρεις λειτουργικές σχέσεις (4.37) (4.38) (4.39) επιτρέπει τον υπολογισμό των μεγεθών a , a' , C_1 και β με ανεξάρτητες παραμέ-

τρούς την στερεότητα, τη μορφή κάτοψης της πτέρυγας και την ταχύτητα ακροπτερυγίου.

Συνήθως η κάτοψη της πτέρυγας είναι ορθογωνική ή τραπεζοειδής με λόγο χορδής ακροπτερυγίου προς χορδή πλύμνης ίσο με 0.5.

Με βάση τα προηγούμενα δεν είναι πλέον δύσκολη η σύγχρονη αριθμητική επίλυση των εξισώσεων βελτιστοποίησης του δρομέα με τη βοήθεια αλγορίθμου βέλτιστου σε επαναληπτική διαδικασία δοκιμών. Παράμετροι της βελτιστοποίησης είναι η στερεότητα σ και η ταχύτητα ακροπτερυγίου. Είναι φανερό ότι ο βέλτιστος δρομέας είναι εκείνος με τη μέγιστη ετήσια ενεργειακή απόδοση αφού βέβαια σταθμισθεί συμβολή της στερεότητας στη διαμορφωση του κόστους κατασκευής του δρομέα.

Στο παράρτημα παρουσιάζεται μια απλή σχετικά μεθοδολογία επίλυσης τόσο του προβλήματος όσο και του αντίστροφου προβλήματος υπολογισμού της αεροδυναμικής απόδοσης ή βελτιστοποίησης ανεμοκινητήρα.

4.7. Καμπύλες λειτουργίας δρομέα A/K

Η ενεργειακή απόδοση του δρομέα ανεμοκινητήρα εκφράζεται από την καμπύλη συντελεστή ισχύος C_p και 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 κατά τον άξονα του δρομέα.

Τυπική καμπύλη C_p (λ) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.13.

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).

Προκύπτει η σχέση

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

όπου P η ισχύς του δρομέα.

Αλλά

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

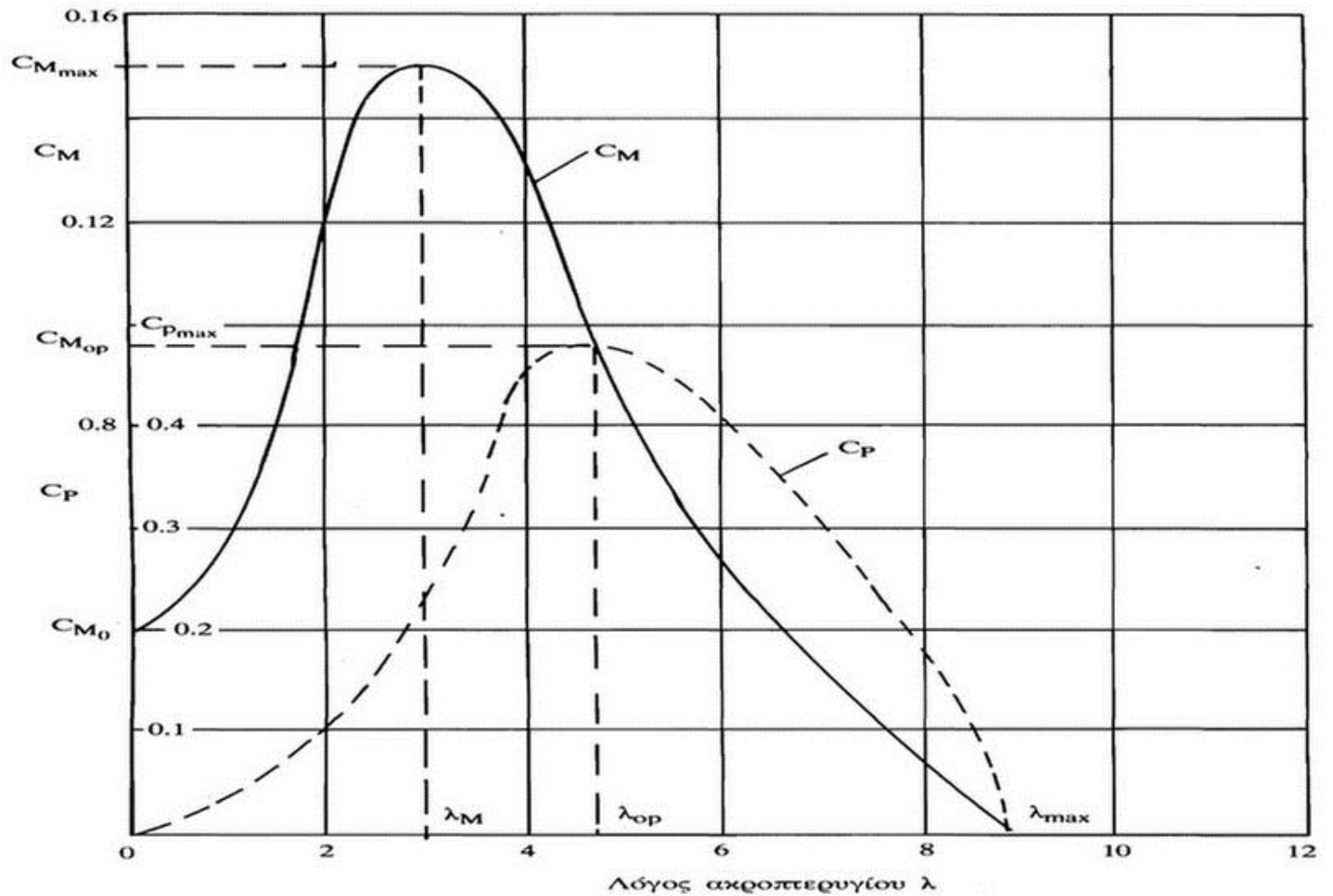
ορίζεται συντελεστής ροπής

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

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 4.13.



Σχήμα 4.13: Τυπικές καμπύλες C_M και C_P ενός ανεμοκινητήρα τριών περυγίων οριζοντίου άξονα.

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

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

Συνεπώς για τον υπολογισμό του σημείου λειτουργίας του ανεμοκινητήρα απαιτείται η γνώση των καμπύλων 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.

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 διαφορά V με παράμετρο τις στροφές, διότι για δοσμένη περιστροφή n (RPM), υπολογίζεται η ταχύτητα ακτινίου $\lambda = 2\pi n R/60 V$, από τη σχέση $C_p(\lambda)$, η τιμή του συντελεστή ισχύος και στην συνέχεια η ισχύς ή η ροπή του Α/Κ.

