

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΔΥΝΑΜΙΚΗ & ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ»

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ:
ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΥ ΧΡΥΣΟΥΛΑ
Α.Μ.: 3758

ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ:

Καθ. ΜΠΑΡΑΚΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
Καθ. Τμήματος Μηχανολογίας

ΚΩΣΤΟΥΛΑΣ ΑΧΙΛΛΕΑΣ
Εργαστηριακός Συνεργάτης



-ΠΑΤΡΑ 2004-

ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	2077
----------------------	------

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΓΝΩΡΙΜΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΤΟΥΣ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

1.1.	Ο άνεμος.....	5
1.2.	Αιολική ενέργεια.....	6
1.3.	Οι ανεμοκινητήρες.....	6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΤΜΗΜΑΤΑ & ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

2.1.	Περιγραφή.....	8
2.2.	Δρομέας.....	9
2.2.1.	Ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.....	9
2.3.	Ανεμογεννήτριες Οριζοντίου Άξονα (ΑΓΟΑ).....	10
2.3.1.	3-πτέρυγες ανεμογεννήτριες.....	10
2.3.2.	2-πτέρυγες ανεμογεννήτριες.....	11
2.3.3.	1-πτέρυγες ανεμογεννήτριες.....	12
2.4.	Ανεμογεννήτριες Καθέτου Άξονα (ΑΓΚΑ).....	13
2.5.	Άλλες σημαντικές συνιστώσες των ΑΓ.....	14
2.5.1.	Η άτρακτος.....	14
2.5.2.	Κύριος (ή χαμηλής ταχύτητας) άξονας.....	15
2.5.3.	Δισκόφρενο.....	15
2.5.4.	Μετάδοση κίνησης.....	15
2.5.5.	Ηλεκτρογεννήτρια.....	17
2.5.6.	Ανεμόμετρο και ανεμοδείκτης.....	18
2.5.7.	Ο πύργος.....	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΠΥΡΓΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

3.1.	Στατική καταπόνηση πύργου ΑΓ.....	19
3.2.	Υπολογισμός της διανομής διαμέτρου του πύργου.....	21
3.3.	Υπολογισμός διανομής επιτρεπόμενης ροπής αδράνειας και μάζας ανά μονάδα μήκους.....	23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

4.1.	Εισαγωγή.....	25
------	---------------	----

4.2.	Τα φορτία των Α/Γ και η προέλευσή τους.....	25
4.2.1.	Ταξινόμηση των φορτίων.....	25
4.2.2.	Αεροδυναμικά φορτία.....	26
4.2.3.	Σκίαση του πύργου.....	27
4.2.4.	Διάτμηση του ανέμου.....	28
4.2.5.	Μη ευθυγραμμισμένο σύστημα προσανατολισμού και κλίση του άξονα.....	29
4.2.6.	Συνδυασμένη αεροδυναμική φόρτιση.....	29
4.3.	Μηχανικά φορτία.....	30
4.3.1.	Βαρύτητα.....	30
4.3.2.	Κωνικότητα.....	30
4.3.3.	Γυροσκοπικά φορτία.....	31
4.3.4.	Μεταβατικά φορτία.....	32
4.4.	Τύρβη.....	32
4.4.1.	Συνθήκες μέγιστης φόρτισης.....	32
4.5.	Φορτία στις δομές υποστήριξης.....	33
4.6.	Δυναμική της ανεμογεννήτριας.....	34
4.6.1.	Εισαγωγή.....	34
4.6.2.	Μερικά στοιχεία για τις ταλαντώσεις.....	34
4.6.3.	Ευστάθεια.....	36
4.6.4.	Ιδιοσυχνότητες.....	37
4.6.5.	Ακαμπτες και εύκαμπτες δομές.....	40
4.6.6.	Απόσβεση ανεμογεννήτριας.....	41
4.7.	Εξαναγκασμένη απόκριση σε μη στοχαστικά φορτία.....	43
4.7.1.	Απλή απόκριση σε στατικά φορτία.....	43
4.7.2.	Απλή απόκριση σε κυκλικά φορτία.....	44
4.7.3.	Δυναμική φόρτιση.....	45
4.8.	Εξαναγκασμένη απόκριση σε στοχαστικά φορτία.....	46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΚΟΠΩΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

5.1.	Διατύπωση κανόνων αστοχίας.....	48
5.2.	Φάσματα φορτίων.....	50
5.3.	Ιδιότητες των υλικών.....	51
5.3.1.	Υλικά που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές των Α/Γ.....	51
5.3.2.	Φορτίο κόπωσης και φάσμα τάσης.....	52
5.3.3.	Δείγμα φάσματος τάσης.....	52
5.3.4.	Σχεδιασμός των συναρτήσεων της τάσης των φορτίων.....	61
5.3.5.	Βασική διαμόρφωση και φορτία.....	61
5.3.6.	Επίδραση της αλλαγής της διαμέτρου του ρότορα.....	63
5.3.7.	Χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων κόπωσης.....	64
5.4.	Χαρακτηριστικά της εισροής.....	65
5.5.	Βασικές υποθέσεις σχετικά με τη διαδικασία επίλυσης.....	66
5.6.	Άλλοι παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στην κόπωση των ανεμογεννητριών.....	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

6.1.	Εισαγωγή.....	69
6.2.	Δομικοί σχεδιαστικοί οδηγοί.....	69
6.3.	Διαδικασία σχεδιασμού κόπωσης.....	72
6.4.	Γραμμική μέθοδος φθοράς S-N.....	73
6.5.	Πρόβλημα δειγμάτων.....	75
6.6.	Η μέθοδος της μηχανικής θραύσης.....	78
6.7.	Αρχικό μέγεθος ρωγμών.....	79

ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΝΑΓΝΩΣΤΗ

Το σύγγραμμα που έχετε στα χέρια σας αποτελεί την πτυχιακή μου εργασία, αντιπροσωπεύει το σύνολο των γνώσεων που αποκόμισα από το Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πατρών κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και σφραγίζει μια περίοδο.

Η συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιεί ένα συνδυασμό θεωρίας και χειροπιαστών παραδειγμάτων και εκπονήθηκε βάσει των γνώσεων ενός φοιτητή του τμήματος Μηχανολογίας, δίχως αυτό να σημαίνει, πως η εργασία αυτή, δεν μπορεί να πληροφορήσει κάποιον που δεν έχει τις απαραίτητες γνώσεις, αλλά ενδιαφέρεται για τη Δυναμική και Στατική Καταπόνηση μιας Ανεμογεννήτριας.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου κ. Γεώργιο Μπαράκο και κ. Αχιλλέα Κωστούλα, των οποίων η συμβολή στην εργασία αυτή, όπως επίσης και οι γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, ήταν πολύτιμες. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Βασίλειο και Αγγελική, που όλα αυτά τα χρόνια με στηρίζουν σε κάθε μου προσπάθεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΓΝΩΡΙΜΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΤΟΥΣ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

1.1. Ο άνεμος

Οι άνεμοι της γης παράγονται κυρίως από την άνιση θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο. Ως γνωστόν οι θάλασσες παρουσιάζουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα, αφού, εκτός από την εξάτμιση, η θερμότητα μεταφέρεται προς τα κάτω μέσα στις υδάτινες μάζες. Έτσι κατά τη διάρκεια της μέρας ο αέρας πάνω από λίμνες, θάλασσες και ωκεανούς παραμένει σχετικά κρύος, σε σχέση πάντα με τον αέρα που βρίσκεται πάνω από την ξηρά και που θερμαίνεται περισσότερο. Από τη θέρμανση του αέρα της ξηράς έχουμε ελάττωση της πυκνότητας του με συνέπεια την ανύψωση του. Και ο βαρύτερος κρύος αέρας που βρίσκεται πάνω από το νερό κινείται για να πάρει τη θέση του. Με τον τρόπο αυτό παράγονται τα τοπικά **παραλιακά ρεύματα**. Κατά τη διάρκεια της νύχτας τα ρεύματα αυτά αντιστρέφονται, επειδή η θερμοκρασία της ξηράς ελαττώνεται γρηγορότερα από αυτή του νερού και έτσι ο ψυχρότερος, άρα και ο βαρύτερος αέρας της ξηράς κινείται προς τη θάλασσα όπου αναπληρώνει τον αέρα που ανυψώνεται από την επιφάνεια της θάλασσας.

Παρόμοια τοπικά ρεύματα συμβαίνουν στις βουνοπλαγιές κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν ο θερμός αέρας ανυψώνεται κατά μήκος των θερμών πλαγιών που θερμαίνονται από τον ήλιο. Κατά τη νύχτα ο σχετικά κρύος αέρας των πλαγιών κινείται κάτω προς τις πεδιάδες.

Κατά τον ίδιο τρόπο παράγονται οι **πλανητικοί άνεμοι**, λόγω της μεγαλύτερης θέρμανσης της επιφάνειας της γης κοντά στον Ισημερινό από ότι στους Πόλους. Αυτό έχει ως 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.

Υπάρχουν επίσης και οι εποχιακοί άνεμοι όπως οι Μουσώνες, καθώς και οι ετήσιοι ή όπως διαφορετικά αποκαλούνται μελέμια, τα οποία παρουσιάζονται κυρίως στην περιοχή του Αιγαίου. Είναι άνεμοι του καλοκαιριού, βόρειο-βορειοανατολικοί, κυρίως στην περιοχή του Αιγαίου, μέχρι και βορειοδυτικής κυρίως διεύθυνσεως. Αρχίζουν να πνέουν από τις αρχές Μαΐου και εξασθενούν μέσα Οκτωβρίου, με μεγαλύτερη ένταση και συχνότητα από τα μέσα Ιουλίου μέχρι τα μέσα Σεπτεμβρίου. Η ημερήσια διακύμανση τους παρουσιάζει ένα μέγιστο κατά τις απογευματινές ώρες, ενώ η ένταση τους κατά τη νύχτα ελαττώνεται.

1.2. Αιολική ενέργεια

Ο άνεμος έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας από τα πανάρχαια χρόνια. Χώρες χρωστούσαν τον πλούτο και την ναυτιλιακή ικανότητα τους στον άνεμο που κινούσε τα ιστιοφόρα πλοία τους. Στην ξηρά εξ άλλου χρησιμοποιήθηκε στους ανεμόμυλους άντλησης νερού ή άλεσης σιτηρών.

Η κινητική ενέργεια του ανέμου οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία και περίπου το 2% της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στον πλανήτη μας μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Η ισχύς των ανέμων σε όλη τη γη υπολογίζεται σε 3.610^9 MW. Ενδεικτικά οι ενεργειακές ανάγκες των Η.Π.Α. είναι μόλις το 10% της ενέργειας των ανέμων που πνέουν εκεί, γεγονός που αποδεικνύει πόσο πλούσια πηγή ενέργειας είναι ο άνεμος. Η ισχύς ρεύματος γενικά είναι ανάλογη της πυκνότητας του και του κύβου της ταχύτητάς του. Έτσι, για την ίδια ταχύτητα και διατομή ένα ρεύμα αέρα θα έχει περίπου 800 φορές μικρότερη ενέργεια από αντίστοιχη δέσμη νερού. Η αιολική ενέργεια συνεπώς είναι μια «αραιή» ή «ήπια» μορφή ενέργειας, δηλαδή είναι μικρή η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου που μπορεί να δεσμευτεί σε κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας που προσβάλλεται από τον άνεμο. Για παράδειγμα, άνεμος εντάσεως 5 μποφόρ, περίπου 9,5 m/s, έχει ισχύ 500 W ανά m^2 προσβαλλόμενης επιφάνειας, ενώ μια ανεμογεννήτρια (ΑΓ) μπορεί στην καλύτερη περίπτωση να δεσμεύσει το 48% αυτής της ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη κατασκευής μονάδων, μεγάλων διαστάσεων. Σ' αυτό το μειονέκτημα αντεπεξέρχεται με επιτυχία η σημερινή τεχνολογία με την κατασκευή ανεμογεννητριών μεγάλων διαστάσεων που ανταγωνίζονται οικονομικά τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Παράλληλα, η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα ότι δίνει απευθείας μηχανική ενέργεια, μια «αναβαθμισμένη», κατά την τεχνική ορολογία, μορφή ενέργειας που με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης και απλά μέσα μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας.

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

1.3. Οι ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες 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. Για παράδειγμα στις Η.Π.Α. κατασκευάστηκαν περίπου έξι εκατομμύρια ανεμόμυλοι ανάμεσα στα 1880 και στον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Μετά τον πόλεμο η χρήση τους αρχίζει να υποχωρεί και οι βασικοί λόγοι που οδήγησαν στο γεγονός αυτό είναι δύο. Ο πρώτος είναι η ανάπτυξη

άλλων μορφών ενέργειας που παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα και ταυτόχρονα είναι απαλλαγμένες από τον στατιστικό χαρακτήρα του ανέμου, δηλαδή παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία διαθεσιμότητας. Ο δεύτερος βρίσκεται στη δημιουργία εκτεταμένων ηλεκτρικών δικτύων, που φθάνουν ακόμα και στα πιο απομακρυσμένα και απομονωμένα μέρη. Με αυτά τα δεδομένα έπαψε κάθε ενδιαφέρον γύρω από ανεμόμυλους για περίπου τριάντα χρόνια, μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο.

Όμως την τελευταία δεκαετία το ενδιαφέρον σχετικά με την αιολική ενέργεια γνωρίζει νέα άνθιση. Έναυσμα έδωσε η πετρελαϊκή κρίση του 1973. Το κίνητρο ήταν καθαρά οικονομικό γιατί έπρεπε να βρεθούν και να αξιοποιηθούν νέες πηγές ενέργειας. Στη συνέχεια εμφανίστηκε και ένας νέος παράγοντας, που τη φορά αυτή ήταν οικολογικός. Η προστασία του φυσικού περιβάλλοντος άρχισε να απασχολεί έντονα τόσο τους επιστήμονες όσο και την κοινή γνώμη.

Έτσι, δημιουργήθηκε νέο ενδιαφέρον για ήπιες μορφές ενέργειας, οι οποίες έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό που τις κάνει ιδιαίτερα ελκυστικές, είναι ανανεώσιμες. Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι ανεμόμυλοι ξεπέρασαν το προηγούμενο στάδιο τους (που τους ήθελε σχεδόν αποκλειστικά σε αγροτικές εφαρμογές), και μπήκαν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

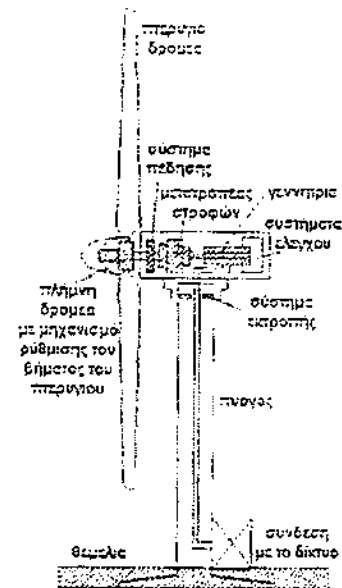
ΤΜΗΜΑΤΑ & ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

2.1. Περιγραφή

Η ακολουθία των γεγονότων κατά την παραγωγή και τη μετάδοση της αιολικής ισχύος από μια ανεμογεννήτρια μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

1. Καθώς ο αέρας αλληλεπιδρά με το δρομέα παράγεται μια ροπή στον άξονα του.
2. Η σχετικά χαμηλή περιστροφική συχνότητα του δρομέα αυξάνεται μέσω ενός μετατροπέα στροφών.
3. Ο άξονας εξόδου του μετατροπέα στροφών γυρίζει μια γεννήτρια.
4. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη γεννήτρια περνά μέσω του συστήματος ελέγχου της γεννήτριας και των ασφαλειο-διακοπών και ενισχύεται σε μια ενδιάμεση τάση από το μετασχηματιστή της γεννήτριας.
5. Το τοπικό καλωδιακό σύστημα της περιοχής διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια στο μετασχηματιστή της περιοχής μέσω του συστήματος ελέγχου και του συστήματος ασφαλειο-διακοπών.
6. Ο τοπικός μετασχηματιστής ενισχύει την τάση στην τιμή του δικτύου ηλεκτρικής ισχύος.
7. Το δίκτυο μεταβιβάζει την ηλεκτρική ενέργεια στην περιοχή της τελικής χρήσης της.
8. Οι υποσταθμοί μετασχηματιστών μειώνουν την τάση στις οικιακές ή βιομηχανικές τιμές.
9. Τα τοπικά δίκτυα χαμηλής τάσης διαβιβάζουν την ηλεκτρική ενέργεια στις κατοικίες, τα γραφεία και τα εργοστάσια.

Το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 2.1) παρουσιάζει τις κύριες συνιστώσες μιας μέσης ή μεγάλης κλίμακας ανεμογεννήτριας συνδεδεμένης σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος.



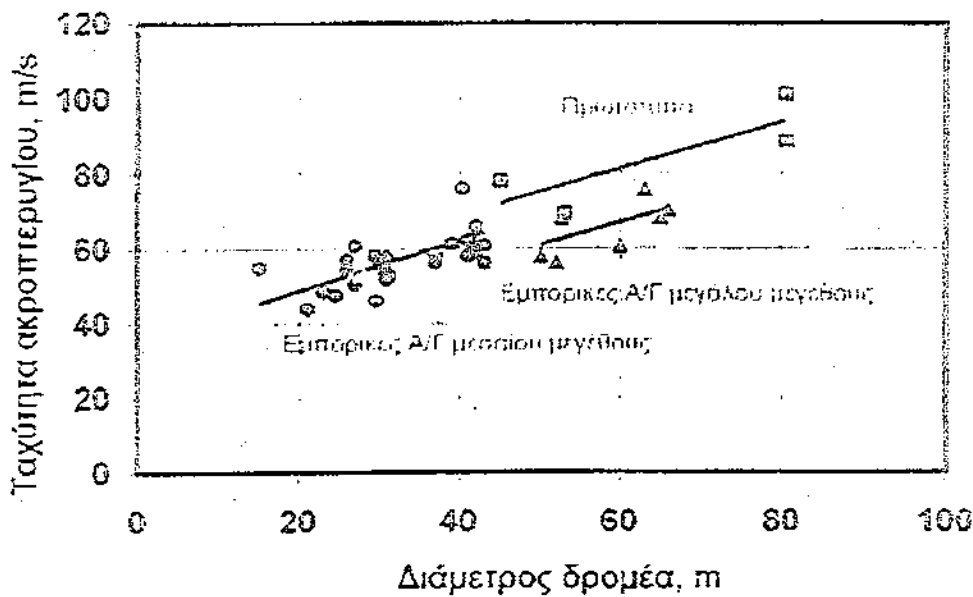
Σχήμα 2.1. Σχηματική παράσταση μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα

2.2. ΔΡΟΜΕΑΣ

2.2.1. Ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

Οι Α/Γ μπορούν να έχουν διαφορετικό αριθμό πτερυγίων δρομέα. Η βασική αρχή είναι ότι όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των πτερυγίων του δρομέα, τόσο αυτός περιστρέφεται πιο γρήγορα. Το μέτρο γι' αυτό είναι ο αποκαλούμενος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου λ , που ορίζεται ως το πηλίκο της ταχύτητας ακροπτερυγίου του δρομέα προς την ταχύτητα του ανέμου. Εάν $\lambda=1$ τότε η ταχύτητα του ακροπτερυγίου είναι όση η ταχύτητα του ανέμου. Οι σημερινές Α/Γ σχεδιάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που σημαίνει ότι οι δρομείς τους μεταδίδουν την κίνηση σε ηλεκτρικές γεννήτριες με φυσιολογικά υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Επομένως, οι δρομείς των Α/Γ πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής προκειμένου να μειωθούν οι μάζες των γρاناζιών μετάδοσης και των γεννητριών.

Συνεπώς, ο αριθμός των πτερυγίων του δρομέα πρέπει να είναι μικρός και, γενικά όχι μεγαλύτερος από τρία. Μόνο οι δρομείς με πολλαπλά πτερύγια, όπως οι γνωστοί Ανεμόμυλοι Δυτικού τύπου, χρησιμοποιούν 12 έως 20 πτερύγια, ή και ακόμα περισσότερα, αλλά χρησιμοποιούνται για την άμεση μετάδοση κίνησης σε εμβολοφόρες αντλίες νερού με την υψηλή μηχανική ροπή τους. Στους δρομείς με πολλά πτερύγια έχει επιτευχθεί λόγος ακροπτερυγίου μέχρι 1.5, όταν στους 3-πτέρυγους δρομείς αυτός έχει κανονικά τιμή της τάξεως του 6 έως 8, στους 2-πτέρυγους δρομείς από 10 έως 12 και στους 1-πτέρυγους δρομείς ακόμα πιο μεγάλες από αυτές τις τιμές. Όπως δείχνει το σχήμα 2.2, οι περισσότερες από τις σημερινές Α/Γ έχουν ταχύτητες ακροπτερυγίων μικρότερες από 65 m/s.



Σχήμα 2.2. Ταχύτητες ακροπτερυγίου ανεμογεννητριών

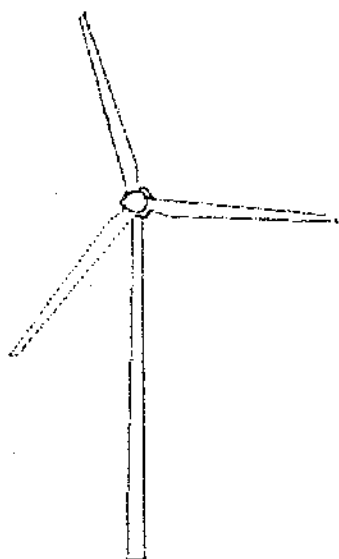
Στα παλαιά πρωτότυπα των μεγάλων ΑΓ, οι σχεδιαστές προσπάθησαν να αυξήσουν όσο το δυνατόν περισσότερο την ταχύτητα του ακροπτερυγίου, επειδή η ροπή στον άξονα μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, ένα πλεονέκτημα που σχετίζεται με τη μάζα εξοπλισμού που απαιτείται για να παραλάβει τα λειτουργικά φορτία. Αλλά για τις εμπορικές ΑΓ, οι υψηλές ταχύτητες ακροπτερυγίου έχουν το μειονέκτημα της υψηλής εκπομπής θορύβου από το δρομέα. Σε γενικές γραμμές, το επίπεδο εντάσεως του θορύβου του δρομέα αυξάνεται με την έκτη δύναμη της ταχύτητας του ακροπτερυγίου. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι σχεδιαστές των εμπορικών ΑΓ δεν έχουν υπερβεί τα 70 m/s μέχρι τώρα.

2.3. Ανεμογεννήτριες Οριζοντίου Άξονα (ΑΓΟΑ)

2.3.1. 3-πτέρυγες ανεμογεννήτριες

Οι σύγχρονες ΑΓ με 3-πτέρυγους δρομείς είναι οι πιο κοινές παγκοσμίως. Ο κύριος λόγος χρήσης τριών πτερυγίων είναι η σταθερή ροπή αδράνειας του δρομέα για όλες τις περιφερειακές γωνίες αζιμούθιου, σε σχέση με τις λειτουργικές κινήσεις γύρω από το διαμήκη άξονα του πύργου. Έτσι, μια ΑΓ οριζοντίου άξονα με έναν 3-πτέρυγο δρομέα δεν εμφανίζει φορτία που προκαλούνται από τη ροπή αδράνειας λόγω περιστροφής στη δομή της ΑΓ. Αυτό αποτελεί ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα, επειδή δεν χρειάζονται δαπανηρά πρόσθετα εξαρτήματα, όπως ενώσεις και αποσβεστήρες κίνησης στην πλήμνη.

Όλοι οι δρομείς με τρία ή περισσότερα πτερύγια εμφανίζουν αυτό το πλεονέκτημα, το οποίο δεν υφίσταται στους δρομείς με λιγότερα πτερύγια. Ταχύτητες ακροπτερυγίου μέχρι 70 m/s είναι σχετικά χαμηλές, και αυτό αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα όσον αφορά το θόρυβο. Αντίθετα προς τις 2-πτέρυγες ή τις 1-πτέρυγες Α/Γ, οι 3-πτέρυγες εμφανίζονται σύμφωνα με τη γνώμη πολλών ειδικών να είναι ομαλές ως προς την περιστροφή τους, γεγονός που συνιστά μια θετική πτυχή για τη δημόσια αποδοχή της αιολικής ενέργειας.



Σχήμα 2.3. Σχηματική παράσταση 3-πτέρυγης ανεμογεννήτριας

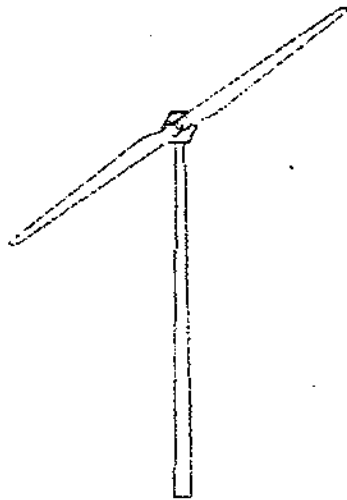
2.3.2. 2-πτέρυγες ανεμογεννήτριες

Ήδη αρκετές δεκαετίες πριν, οι 2-πτέρυγες ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα αποτελούσαν μια από τις εναλλακτικές σκέψεις όσον αφορά τους δρομείς. Διάφορες Α/Γ με μέγεθος διαμέτρου δρομέα από 10 έως 100 m σχεδιάστηκαν και τέθηκαν σε λειτουργία στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Μόνο λίγες από αυτές έφθασαν πραγματικά σε θέση να παράγονται σε σειρά, ειδικά οι μεγαλύτερες Α/Γ δεν ξέφυγαν ποτέ από την κατάσταση του πρωτότυπου. Ένα πτερύγιο λιγότερο στον δρομέα από τις κανονικές 3-πτέρυγες Α/Γ προσφέρει τη δυνατότητα μείωσης του κόστους του δρομέα, εντούτοις η δυναμική συμπεριφορά του 2-πτέρυγου δρομέα προκάλεσε πρόσθετες τεχνικές προσπάθειες, οι οποίες αύξησαν πάλι το συνολικό κόστος.

Αντίθετα προς τον 3-πτέρυγο δρομέα, οι 2-πτέρυγος εμφανίζει για τις κινήσεις εκτροπής της ατράκτου ροπή αδράνειας περιστροφής ως προς το διαμήκη άξονα του πύργου. Αυτό προκαλεί πρόσθετα φορτία, τα οποία μπορούν να μειωθούν μόνο με τη χρήση μιας ταλαντευόμενης πλήμνης. Αυτή η άρθρωση είναι κάθετη στον άξονα του δρομέα και στο διαμήκη άξονα των δυο πτερυγίων του δρομέα. Ο κύριος λόγος για τη χρήση ταλαντευόμενης

πλήμνης είναι η παραλαβή των δυσμενών μεγάλων διακυμάνσεων της ροπής αδράνειας του στρεφόμενου δρομέα.

Σήμερα, ο 2-πτέρυγος δρομέας εμφανίζεται μόνο σε μερικές μονάδες και τουλάχιστον προς το παρόν, δεν παρατηρείται καμία τάση για αύξηση του μεριδίου της αγοράς. Η ταλαντευόμενη πλήμνη είναι δαπανηρή και οι ταχύτητες ακροπτερυγίου πρέπει να είναι υψηλότερες από εκείνες των συγκρίσιμων 3-πτέρυγων δρομέων, πράγμα που αποτελεί ένα μειονέκτημα όσον αφορά το επίπεδο ισχύος θορύβου της ΑΓΓ.



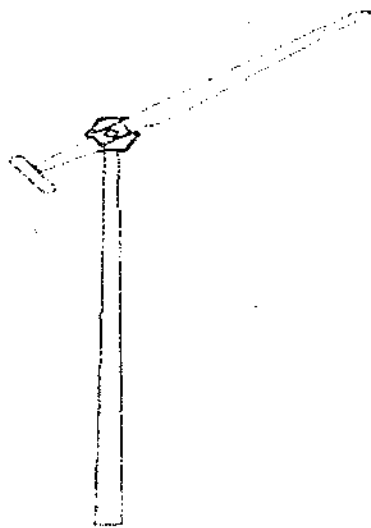
Σχήμα 2.4. Σχηματική παράσταση 2-πτέρυγης ανεμογεννήτριας

2.3.3. 1-πτέρυγες ανεμογεννήτριες

Το κίνητρο για μια 1-πτέρυγη ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα είναι η ελάττωση μέσω μιας υψηλής περιστροφικής ταχύτητας του αριθμού των πτερυγίων του δρομέα, της ροπής μετάδοσης κίνησης του δρομέα και από αυτό των μαζών των τμημάτων της μηχανής. Επιπλέον, το πτερύγιο του δρομέα μπορεί να στερεωθεί στην πλήμνη με μια απλή άρθρωση, η οποία επιτρέπει μετακινήσεις έξω από το επίπεδο του πτερυγίου, μειώνοντας έτσι τα δομικά φορτία στο πτερύγιο. Από την άλλη, ένας 1-πτέρυγος εμφανίζει κυρίως μια αεροδυναμική ανισορροπία, η οποία εισάγει πρόσθετες κινήσεις και προκαλεί φορτία, ενώ χρειάζεται περίπλοκες κατασκευές της πλήμνης (αρθρώσεις, διατάξεις αποσβεστήρων ταλαντώσεων, κ.λ.π.) για τη διατήρηση υπό έλεγχο των κινήσεων.

Το κύριο μειονέκτημα για την εμπορική χρήση τους είναι το σχετικά υψηλό αεροδυναμικό επίπεδο θορύβου του δρομέα, που προκαλείται από μία ταχύτητα ακροπτερυγίου περίπου 120 m/s. Αυτή η ταχύτητα ακροπτερυγίου είναι δυο φορές υψηλότερη σε σχέση με τους 3-πτέρυγους δρομείς που

σημαίνει ότι η 1-πτέρυγη ΑΓ είναι αρκετές φορές πιο θορυβώδης από μια 3-πτέρυγη. Τουλάχιστον στη Γερμανία, με την υψηλή πυκνότητα πληθυσμού, αυτές οι θορυβώδεις ΑΓ δεν έχουν καμία πιθανότητα εξάπλωσης. Πολλοί άνθρωποι επίσης εκφράζουν την άποψη ότι το περιστρεφόμενο μονό πτερύγιο δίνει μια ενοχλητική οπτική αίσθηση στο τοπίο. Έτσι, μερικές κοινότητες στη Γερμανία δεν επιτρέπουν την ανέγερση 1-πτέρυγων δρομέων.



Σχήμα 2.5. Σχηματική παράσταση 1-πτέρυγης ανεμογεννήτριας

2.4. Ανεμογεννήτριες Καθέτου Άξονα (ΑΓΚΑ)

Οι ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα είναι διαθέσιμες σε δύο είδη, δηλαδή αυτές που έχουν ως οδηγό δύναμη την αεροδυναμική άνωση, και αυτές που βασίζονται στην αεροδυναμική αντίσταση. Οι τελευταίες λειτουργούν όπως ένα κουτί που χρησιμοποιείται για να ωθήσει ένα κανό μέσα στο νερό. Εάν υποθεθεί ότι το κουτί που χρησιμοποιείται για να ωθήσει το κανό δεν ολισθαίνει, τότε η μέγιστη ταχύτητα θα ήταν σχεδόν η ίδια με αυτήν που σύρεται το κουτί. Το ίδιο ισχύει και για τον αέρα. Τα ανεμόμετρα τριών κυπέλλων που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ταχύτητας του αέρα είναι ΑΓ καθέτου άξονα βασισμένες στην αεροδυναμική αντίσταση (βλ. σχήμα 2.5).



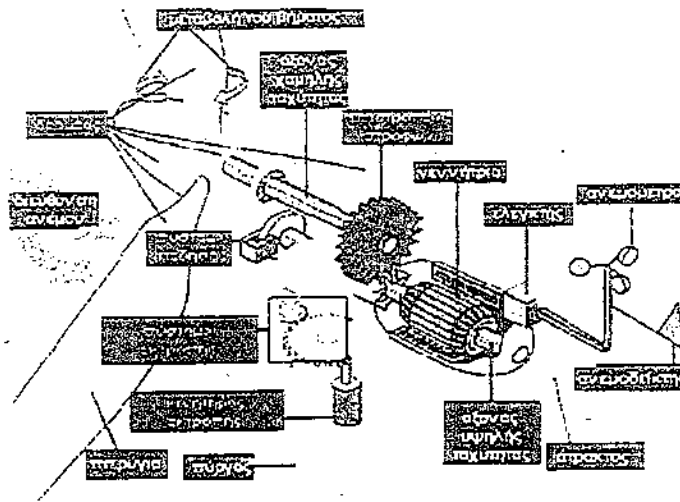
Σχήμα 2.5. Κυπελλοφόρο ανεμόμετρο (ΑΓΚΑ που βασίζεται στην αεροδυναμική αντίσταση)

Εάν η ταχύτητα των κυπέλλων είναι ακριβώς η ίδια με την ταχύτητα του αέρα, μπορεί να ειπωθεί ότι το όργανο λειτουργεί με έναν λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου $\lambda=1$. Οι άκρες των κυπέλλων δεν μπορούν ποτέ να κινηθούν πιο γρήγορα από τον άνεμο, έτσι ο λ είναι πάντα 1, ή μικρότερος. Ένας καλός τρόπος καθορισμού του κατά πόσο ένα σχέδιο μιας ΑΓΚΑ βασίζεται στην αεροδυναμική αντίσταση ή στην άνωση είναι εάν ο λ μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 1. Εάν ο λ είναι πάνω από 1 αυτό σημαίνει κάποιο ποσό άνωσης, ενώ λ μικρότερος από 1 σημαίνει κυρίως αεροδυναμική αντίσταση. Τα βασισμένα στην αεροδυναμική άνωση σχέδια μπορούν συνήθως να παράγουν στην έξοδο πολύ περισσότερη ισχύ, και με καλύτερη απόδοση.

2.5. ΑΛΛΕΣ ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΩΝ Α/Γ

2.5.1. Η άτρακτος

Η άτρακτος περιβάλλει τις διατάξεις μετάδοσης κίνησης και την ηλεκτρογεννήτρια, μαζί με το σύστημα προσανατολισμού και όλα τα συστήματα ελέγχου. Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται μια σχηματική όψη των μηχανισμών στην άτρακτο μιας μέσης ή μεγάλης κλίμακας Α/Γ, και στα ακόλουθα παρέχεται μια συνοπτική παρουσίαση του σημαντικότερου εξοπλισμού. Το προσωπικό συντήρησης μπορεί να εισέρχεται στην άτρακτο από τον πύργο της γεννήτριας.



Σχήμα 2.6. Σχηματική αναπαράσταση της ατράκτου μιας Α/Γ

2.5.2. Κύριος (ή χαμηλής ταχύτητας) άξονας

Η πλήμνη του δρομέα είναι συνδεδεμένη με τον άξονα χαμηλής ταχύτητας της Α/Γ. Μεταφέροντας την αρχική ροπή από το σύστημα του δρομέα στο γρανάζι μετάδοσης της κίνησης, ο κύριος άξονας στηρίζεται συνήθως στα έδρανα του άξονα. Εξαιτίας των υψηλών φορτίων ροπής, ο κύριος άξονας είναι ευπαθής σε αστοχία λόγω κόπωσης. Κατά συνέπεια, οι αποτελεσματικές, προς συντήρησης, μη καταστρεπτικές δοκιμές είναι ενδεδειγμένες γι' αυτό το εξάρτημα. Σε μια σύγχρονη Α/Γ 600 kW ο δρομέας περιστρέφεται σχετικά αργά, με περίπου 19 έως 30 περιστροφές ανά λεπτό (RPM).

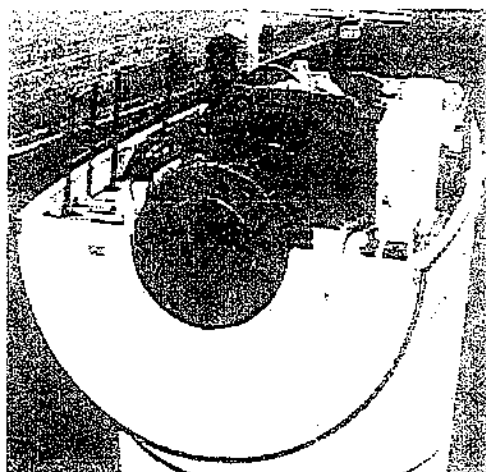
2.5.3. Δισκόφρενο

Αυτό μπορεί να τοποθετηθεί είτε στον κύριο άξονα πριν από το μετατροπέα στροφών, είτε στον άξονα υψηλής ταχύτητας, μετά από τον μετατροπέα στροφών. Στη δεύτερη περίπτωση απαιτείται ένα μικρότερο (και φθηνότερο) σύστημα πέδης προκειμένου να παρασχεθεί η απαραίτητη ροπή για την επιβράδυνση του δρομέα. Εντούτοις, αυτή η περίπτωση δεν παρέχει τον αμεσότερο έλεγχο του δρομέα και, σε περίπτωση αστοχίας του μετατροπέα στροφών, χάνεται η δυνατότητα ελέγχου της πέδησης του δρομέα.

2.5.4. Μετάδοση κίνησης

Η ηλεκτρική ισχύς εξόδου των Α/Γ πρέπει να είναι συμβατή με τη συχνότητα (50-60 Hz) και την τάση του τοπικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ισχύος. Η

συχνότητα του δρομέα είναι συνήθως περίπου 0.5 Hz και έτσι η αύξηση στη συχνότητα επιτυγχάνεται από έναν συνδυασμό ενός μετατροπέα στροφών (σχήμα 2.7) και μιας πολυπολικής γεννήτριας. Οι περισσότερες εμπορικές γεννήτριες έχουν 4 ή 6 ζευγάρια πόλων και έτσι απαιτείται μια αυξημένη σχέση μετάδοσης περίπου 25:1. Για μια μηχανή 600 ή 750 kW, η σχέση μετάδοσης είναι περίπου 1 προς 50.



Σχήμα 2.7. Φωτογραφική απεικόνιση ενός μετατροπέα στροφών έτοιμου για εγκατάσταση σε μια Α/Γ

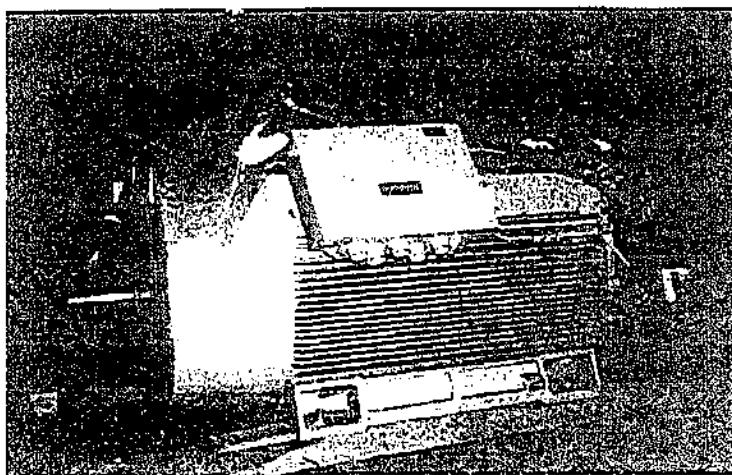
Η απλούστερη μέθοδος για να μεταδοθεί η κίνηση στη γεννήτρια είναι άμεσα μέσω του κυρίου άξονα από το δρομέα χωρίς μετατροπέα στροφών. Η απόδοση της ενεργειακής μετατροπής βελτιστοποιείται, λόγω της εξάλειψης των απωλειών ισχύος του μετατροπέα στροφών. Εντούτοις, απαιτούνται ειδικές γεννήτριες χαμηλής ταχύτητας, οι οποίες χρειάζονται μεγάλες διαμέτρους ρότορα και στάτορα με περίπου 50 πόλους προκειμένου να παρασχεθεί η απαραίτητη συχνότητα. Τα συστήματα αυτά προσφέρονται τελευταία σε εμπορική βάση από ένα μικρό αριθμό κατασκευαστών.

Οι μικρότερες σε μέγεθος γεννήτριες (50 έως 150 kW) χρησιμοποιούν μια ή δύο βαθμίδες παράλληλων αξόνων μετάδοσης (που χρησιμοποιούν ελικοειδή γρανάζια για την ελαχιστοποίηση των απωλειών θορύβου και ισχύος). Οι μεγαλύτερες εμπορικές γεννήτριες (150 ως 750 kW) συνηθέστερα χρησιμοποιούν επικυκλικά ή πλανητικά συστήματα μετάδοσης της κίνησης, που έχουν το πλεονέκτημα ότι ο άξονας εξόδου είναι σε ευθεία με τον κύριο άξονα (με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι απώλειες τάσεων και ισχύος στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης), με μια αντίστοιχη μείωση του μεγέθους.

Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι τα υδραυλικά συστήματα μετάδοσης πρέπει, σε γενικές γραμμές, να είναι σε θέση να προσφέρουν μια απλή μέθοδο μετάδοσης της ισχύος που προσαρμόζεται καλά με τα χαρακτηριστικά της ροπής του δρομέα. Εντούτοις, οι αποδόσεις τους είναι ακόμα χαμηλές, και κανένας κατασκευαστής δεν χρησιμοποιεί τα υδραυλικά συστήματα μετάδοσης αυτό το διάστημα.

2.5.5. Ηλεκτρογεννήτρια

Η ηλεκτρική γεννήτρια (σχήμα 2.8) μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του άξονα εισόδου σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι ηλεκτρικές γεννήτριες των ανεμογεννητριών είναι λίγο ασυνήθιστες, σε σχέση με άλλες μονάδες ηλεκτρογεννητριών που συνήθως συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο. Ένας λόγος είναι ότι, η ηλεκτρογεννήτρια πρέπει να λειτουργήσει με μια πηγή ισχύος (το δρομέα της ανεμογεννήτριας) που παρέχει πολύ κυμαινόμενη μηχανική ισχύ (ροπή). Πρέπει να είναι συμβατές στην είσοδο με τις διατάξεις του δρομέα και του μετατροπέα στροφών, και στην έξοδο με το σύστημα διανομής της επιχείρησης κοινής ωφέλειας (εάν συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο) ή τις τοπικές απαιτήσεις ισχύος (εάν η ΑΓ είναι μέρος ενός αυτόνομου συστήματος).



Σχήμα 2.8. Φωτογραφική όψη μιας ηλεκτρογεννήτριας έτοιμης για εγκατάσταση σε ΑΓ

Οι πολύ μικρές ΑΓ μπορούν να έχουν ηλεκτρικές γεννήτριες που παράγουν συνεχές ρεύμα, το οποίο μπορεί έπειτα να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία φορτίων χαμηλής τάσης (συνήθως στα 12 V), για να φορτίσει μια σειρά από μπαταρίες, ή μπορεί να διέρχεται μέσω ενός συστήματος εναλλαγής εναλλασσόμενου – συνεχούς ρεύματος για την παροχή ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλότερης τάσης σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο ή μια τοπική διανομή. Εάν μια γεννήτρια συνδεδεμένη στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι προσαρμοσμένη με μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, αυτή πρέπει να παράγει ισχύ σε φάση με το δίκτυο παροχής της εταιρίας κοινής ωφέλειας. Πολλές εμπορικές γεννήτριες συνδεδεμένες στο ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμοποιούν επαγωγικές γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος, το μαγνητικό ρεύμα των οποίων προέρχεται από το δίκτυο, εξασφαλίζοντας ότι η συχνότητα εξόδου της ηλεκτρικής γεννήτριας ταυτίζεται με αυτήν της εταιρίας κοινής ωφέλειας, ρυθμίζοντας έτσι την ταχύτητα του δρομέα εντός κάποιων ορίων.

Οι σύγχρονες ηλεκτρογεννήτριες παράγουν ηλεκτρισμό σε συγχρονισμό με τη συχνότητα του περιστρεφόμενου άξονα της γεννήτριας. Κατά συνέπεια, η ταχύτητα του δρομέα των συνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο γεννητριών πρέπει να ταιριάζει ακριβώς με τη συχνότητα που παρέχεται από τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Τόσο οι επαγωγικές γεννήτριες που διεγείρονται από πυκνωτή όσο και οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα, χωρίς να συνδέονται σε κάποιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

2.5.6. Ανεμόμετρο και ανεμοδείκτης

Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου. Το σύστημα του ηλεκτρονικού ελέγχου της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιεί τα ηλεκτρονικά σήματα από το ανεμόμετρο για να εκκινήσει τη μηχανή όταν η ταχύτητα του ανέμου φθάνει περίπου τα 5 m/s (10 κόμβοι). Οι υπολογιστές σταματούν την ανεμογεννήτρια αυτόματα, εάν η ταχύτητα του αέρα υπερβεί τα 25 m/s (50 κόμβοι) προκειμένου να προστατευθούν ο δρομέας και τα περιβάλλοντα μέρη του. Το σύστημα ηλεκτρονικού ελέγχου χρησιμοποιεί επίσης τα σήματα των ανεμοδεικτών για να στρέψει την ανεμογεννήτρια απέναντι στον άνεμο, χρησιμοποιώντας το μηχανισμό στρέψης.

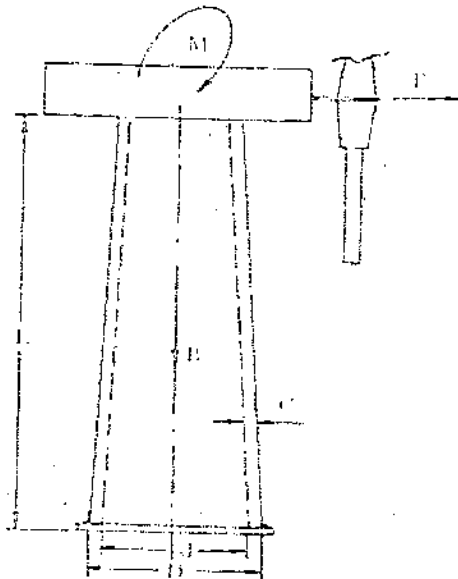
2.5.7. Ο πύργος

Ο πύργος μιας ανεμογεννήτριας υποστηρίζει το σύστημα της ατράκτου (που μπορεί να ζυγίζει πολλούς τόνους), και ανυψώνει το δρομέα σε ένα ύψος στο οποίο η ταχύτητα του ανέμου είναι σημαντικά μεγαλύτερη και λιγότερο διαταραγμένη απ' ό,τι στο επίπεδο του εδάφους, λόγω της επίδρασης της διάτμησης του ανέμου. Οι σύγχρονοι πύργοι μπορεί να έχουν πάνω από 50 μέτρα ύψος, και συνεπώς η δομή τους πρέπει να αντέχει στα σημαντικά φορτία που υφίστανται, τα οποία προέρχονται από τη βαρύτητα, την περιστροφή και την ώση του ανέμου. Επιπλέον, ο πύργος πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων για τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας, που μπορεί να είναι 20 έτη ή / και περισσότερο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

3.1. Στατική καταπόνηση πύργου Α/Κ

Όπως είναι γνωστό από την αντοχή των υλικών, ο πύργος της Α/Γ, που συνήθως είναι χαλύβδινος σωλήνας, καταπονείται τόσο στατικά όσο και δυναμικά. Η πιο επικίνδυνη διατομή στην οποία υπάρχουν οι περισσότερες πιθανότητες να εμφανισθεί αστοχία λόγω στατικής καταπόνησης είναι η βάση του πύργου. Η βάση του πύργου καταπονείται κυρίως θλιπτικά και καμπτικά.



Σχήμα 3.1. Τοπική μορφή πύργου

Στη διατομή αυτή (βλέπε σχήμα 3.1) η ορθή τάση που αναπτύσσεται ένεκα της θλίψης και της κάμψης είναι:

$$\sigma = \frac{T \times L + M}{W} + \frac{B}{A} \quad (3.1)$$

όπου,

T = η ώθηση της έλικας. Αυτή υποτίθεται ότι είναι οριζόντια αν και έχει μια μικρή κλίση της τάξης των 5^ο και υπολογίζεται από την αεροδυναμική της έλικας.

$W = \frac{\pi}{32} \left(\frac{D^4 - d^4}{D} \right)$: η ροπή αντίστασης της διατομής της βάσης

D = η εξωτερική διάμετρος της βάσης

d = η εσωτερική διάμετρος της βάσης

B = το συνολικό βάρος της ΑΓ, το οποίο αποτελείται από το βάρος του πύργου, της έλικας και του κουβουκλίου

$A = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4)$: το εμβαδόν της βάσης του πύργου

M = η ροπή στρέψης η οποία καταπονεί την έλικα και η οποία μεταβιβάζεται σαν ροπή κάμψης στον πύργο. Αυτή υπολογίζεται από την αεροδυναμική της έλικας

$C = \frac{D-d}{2}$: το πάχος του σωληνωτού πύργου, το οποίο για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών είναι σταθερό σε όλο το μήκος αυτού

$$\sigma_{eff} = \left[\frac{T \times L + M}{W} + \frac{B}{A} \right] \quad (3.2)$$

Η τάση αυτή όμως είναι γνωστό από την αντοχή των υλικών ότι πρέπει να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη τάση, δηλαδή:

$$\sigma_{eff} < \sigma_{επιτρ} \quad (3.3)$$

Η επιτρεπόμενη τάση $\sigma_{επιτρ}$ σύμφωνα με τις προδιαγραφές είναι μικρότερη από τα δύο παρακάτω μεγέθη:

$$R_{\delta} = \frac{R_{\delta,οριο}}{1,6}$$

$$R_m = \frac{R_{m,οριο}}{2,7}$$

όπου,

R_{δ} = ελάχιστο σημείο διαρροής

R_m = αντοχή σε εφελκυσμό του χαλύβδινου πύργου

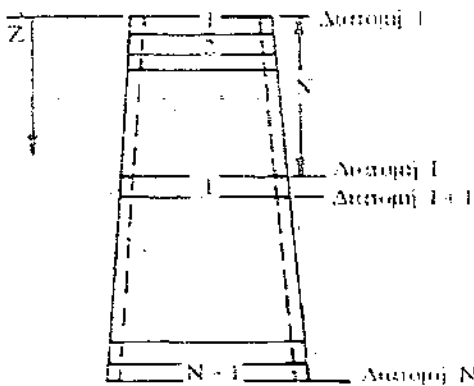
Δηλαδή,

$$\sigma_{επιτρ} = MIN(R_{\delta}, R_m) \quad (3.4)$$

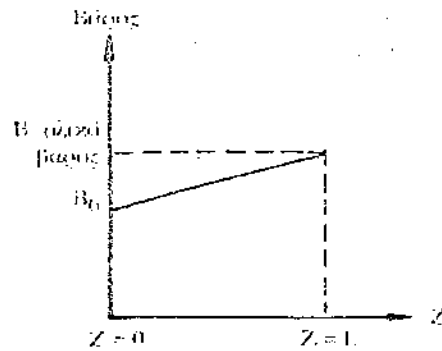
Ο παραπάνω υπολογισμός δεν λαμβάνει υπ' όψη την αύξηση της αντοχής του πύργου λόγω των γωνιακών ελασμάτων στήριξης, πράγμα που σημαίνει ότι η αντοχή του πύργου είναι ακόμα μεγαλύτερη.

3.2. Υπολογισμός της διανομής διαμέτρου του πύργου

Ο πύργος των περισσότερων ΑΓ δεν είναι σταθερής διατομής, αλλά μεταβλητής. Για τον υπολογισμό της εξωτερικής και εσωτερικής διαμέτρου του πύργου, που είναι αναγκαίες για τον υπολογισμό των μαζικών ροπών αδράνειας, επιφανειακών ροπών αδράνειας, κ.λ.π., ο πύργος χωρίζεται σε $N-1$ τμήματα (βλέπε σχήμα 3.2) οπότε δημιουργούνται N διατομές (σ' αυτές περιλαμβάνονται τόσο η διατομή της βάσης όσο και η διατομή της κορυφής).



Σχήμα 3.2. Διαχωρισμός πύργου σε τμήματα



Σχήμα 3.3. Διανομή βάρους πύργου

Σε μια διατομή του πύργου I , η οποία απέχει απόσταση Z από την κορυφή, η πραγματική τάση που εξασκείται επί αυτής σύμφωνα με τα προηγούμενα είναι η εξής:

$$\sigma_{\text{eff}} = 1,25 \left[\frac{T \times Z + M}{W_i} + \frac{B_i}{A_i} \right] \Rightarrow \quad (3.5)$$

$$\sigma_{\text{eff}} = 1,25 \left[\frac{T \times Z + M}{\frac{\pi}{32} \left(\frac{D_i^4 - d_i^4}{D_i} \right)} + \frac{B_i}{\frac{\pi}{4} (D_i^2 - d_i^2)} \right]$$

όπου,

T = η ώθηση της έλικας

Z = η απόσταση του άξονα περιστροφής της έλικας από τη διατομή I . Αυτή θεωρείται ίση με την απόσταση της διατομής I από την κορυφή του πύργου

M = η ροπή κάμψης του πύργου που μεταβιβάζεται από την έλικα

B_i = το συνολικό βάρος που εξασκείται στη διατομή I. Είναι φανερό ότι αυτό ισούται με το βάρος των στοιχείων που βρίσκονται πάνω από τη διατομή I

D_i = η εξωτερική διάμετρος της διατομής I

d_i = η εσωτερική διάμετρος της διατομής I

Δεχόμαστε ότι η πραγματική τάση σ_{eff} που καταπονεί τη διατομή I είναι ίση με την επιτρεπόμενη τάση διαιρούμενη δια του συντελεστού ασφαλείας. Δηλαδή

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_{επ}}{S} = Q \quad (3.6)$$

όπου

$\sigma_{επ}$ = η επιτρεπόμενη τάση.

S = ο συντελεστής ασφαλείας. Αυτός κυμαίνεται μεταξύ 1,5 και 3.

Επομένως από τις εξισώσεις (3.5) και (3.6) προκύπτει ότι

$$Q = 1.25 \left[\frac{T \times Z + M}{\frac{\pi}{32} \left(\frac{D_i^4 - d_i^4}{D_i} \right)} + \frac{B_i}{\frac{\pi}{4} (D_i^2 - d_i^2)} \right]$$

Δεχόμενοι χωρίς ουσιαστικό σφάλμα γραμμική μεταβολή του βάρους αφού ο πύργος είναι μικρού πάχους, της τάξεως των 5mm-10mm (βλέπε σχήμα 3.3), έχουμε:

$$B = B_o + \frac{B_{TOTAL} - B_o}{L} Z$$

όπου,

B_o = είναι το βάρος που καταπονεί την άνω διατομή (διατομή I) του πύργου. Το βάρος B_o αποτελείται προφανώς από το βάρος της έλικας και το βάρος του κουβουκλίου.

B_{TOTAL} = Είναι το συνολικό βάρος που καταπονεί τη βάση του πύργου (τη διατομή N) και αποτελείται όπως προαναφέρθηκε από το βάρος του πύργου, του άξονα μετάδοσης κίνησης, του κουβουκλίου, της έλικας, του μειωτήρα κ.λ.π.

L = Το ύψος του Α/Κ το οποίο λαμβάνεται ίσο με το ύψος του πύργου.

Z = Η απόσταση της διατομής I από την κορυφή του πύργου (διατομή 1)

Αντικαθιστώντας το βάρος B_i όπως προκύπτει από την εξίσωση στην εξίσωση (3.5) έπεται μετά και από σχετικές πράξεις ότι

$$Q = \frac{40D_i(T \times Z + M)}{\pi(D_i^4 - d_i^4)} + \frac{5[L \times B_o + (B_{TOTAL} - B_o)Z]}{\pi L(D_i^2 - d_i^2)} \quad (3.7)$$

Λαμβάνοντας ακόμη υπ' όψη ότι το πάχος του πύργου είναι σταθερό έχουμε ότι:

$$d_i + 2C = D_i \text{ προκύπτει } d_i = D_i - 2C \quad (3.8)$$

όπου,

C = Το πάχος του πύργου

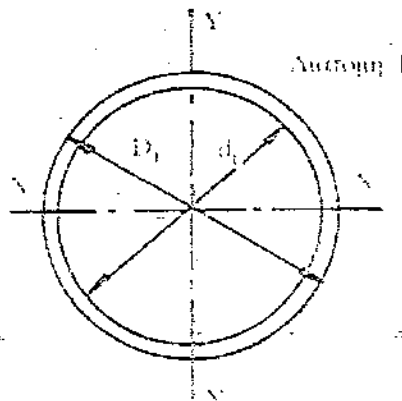
Απαλείφοντας την εσωτερική διάμετρο της διατομής d_i μεταξύ (3.7) και (3.8) προκύπτει ότι

$$Q = \frac{40D_i(T \times Z + M)}{\pi(D_i^4 - (D_i - 2C)^4)} + \frac{5[L \times B_o + (B_{TOTAL} - B_o)Z]}{\pi L(D_i^2 - (D_i - 2C)^2)}$$

Στην πιο πάνω εξίσωση μοναδικός άγνωστος είναι η εξωτερική διάμετρος D_i της διατομής I που απέχει απόσταση Z από την κορυφή του πύργου. Λύνοντας επαναληπτικά την εξίσωση αυτή για κάθε διατομή I υπολογίζεται η διανομή της εξωτερικής και άρα και της εσωτερικής διαμέτρου του πύργου.

3.3. Υπολογισμός διανομής επιφανειακής ροπής αδράνειας και μάζας ανά μονάδα μήκους.

Εδώ θα υπολογίσουμε την επιφανειακή ροπή αδράνειας της διατομής I κατά τους άξονες X και Y . Η διατομή αυτή όπως είναι προφανές (βλέπε σχήμα 3.4) είναι κυκλική, οπότε λόγω συμμετρίας:



Σχήμα 3.4. Οριζόντια τομή του πύργου

$$I_x = I_y$$

όπου,

I_i = η επιφανειακή ροπή αδράνειας της διατομής I κατά τον άξονα των X.

J_i = η επιφανειακή ροπή αδράνειας κατά τον άξονα των Y.

Όπως είναι γνωστό η επιφανειακή ροπή αδράνειας κυκλικού τμήματος είναι:

$$I_i = J_i = \frac{\pi}{64} (D_i^4 - (D_i - 2C)^4)$$

Η διατομή της μάζας ανά μονάδα μήκους είναι:

$$M_z = \rho A_i \quad \text{ή} \quad M_z = \rho \frac{\pi}{4} (D_i^2 - d_i^2) \quad (3.9)$$

όπου,

ρ = η πυκνότητα του υλικού του πύργου (χάλυβας)

A_i = το εμβαδόν της διατομής I

M_z = η μάζα ανά μονάδα μήκους

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε διατομή I (ο αριθμός των διατομών εκλέγεται από εμάς) οπότε και προκύπτει η διανομή της μάζας και των επιφανειακών ροπών αδράνειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

4.1. Εισαγωγή

Το καθεστώς φόρτισης στο οποίο υποβάλλονται οι Α/Γ κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους είναι εξαιρετικά σύνθετο. Ένα πλήθος φορτίων διαφόρων συχνοτήτων και μεγεθών ενδέχεται να προκαλέσει επικίνδυνες δυναμικές αντιδράσεις της δομής τους. Η αντίδραση της δομής των Α/Γ στα επιβληθέντα φορτία έχει επιπτώσεις ιδιαίτερα στο δρομέα, στο σύστημα μετάδοσης της ισχύος και στον πύργο. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητη η γνώση των φορτίων στις Α/Γ μαζί με τις αντιδράσεις των συνιστωσών τους, ήδη από το στάδιο τη σχεδίασης, ώστε να εξασφαλιστεί η ασφαλής και μακροπρόθεσμη λειτουργία τους.

Επιπλέον, λόγω των σύνθετων και μεταβαλλόμενων φορτίσεων, οι Α/Γ είναι επιρρεπείς σε αστοχία λόγω κόπωσης. Τα πτερύγια του δρομέα διατρέχουν ιδιαίτερο κίνδυνο, και πολλή έρευνα διεξάγεται στον τομέα αξιολόγησης της αντοχής σε αστοχία λόγω κόπωσης κατά τη λειτουργία τους. Έχει αποδειχθεί ότι και ορισμένες περιπτώσεις αστοχίας συστημάτων μετάδοσης της ισχύος οφείλονται στην κόπωση, οπότε γίνεται προσπάθεια ώστε να περιοριστούν τα αποτελέσματα των μεταβαλλόμενων φορτίων στα συστήματα αυτά.

4.2. Τα φορτία των ανεμογεννητριών και η προέλευσή τους

4.2.1. Ταξινόμηση των φορτίων

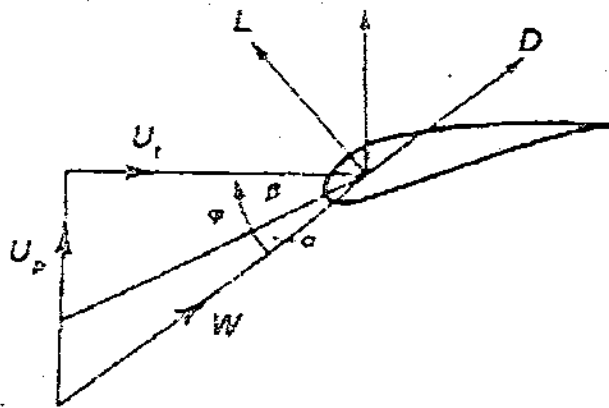
Τα φορτία τα οποία δέχεται μια Α/Γ κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής της μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- *Στατικά*: Τα φορτία είναι σταθερά ως προς το χρόνο και η παραμόρφωση της δομής είναι σταθερή και ανάλογη προς την ακαμψία της.
- *Κυκλικά*: Τα φορτία μεταβάλλονται αρκετά αργά έτσι ώστε η παραμόρφωση της δομής να είναι πάντα ανάλογη προς το φορτίο. Τα δυναμικά κυκλικά φορτία οδηγούν σε παραμόρφωση που σχετίζεται με τις δυνάμεις απόσβεσης της δομής, ειδικά όταν η συχνότητα του φορτίου πλησιάζει την ιδιοσυχνότητα της δομής.
- *Στοχαστικά*: Τα φορτία μεταβάλλονται κατά τρόπο απρόβλεπτο και τυχαίο, οφειλόμενο κυρίως στην τύρβη του αέρα. Αυτός ο τρόπος φόρτισης σχετίζεται άμεσα με τη κόπωση της δομής.

Οι μη στοχαστικές φορτίσεις που επιβάλλονται στη δομή της Α/Γ προέρχονται είτε από αεροδυναμικά είτε από μηχανικά αίτια, και εξετάζονται στη συνέχεια.

4.2.2. Αεροδυναμικά φορτία

Το μεγαλύτερο μέρος της μεταβολής της ορμής του αέρα πραγματοποιείται στην κατεύθυνση της ροής, αν και οι δυνάμεις στο επίπεδο του δρομέα, που είναι κάθετο στο επερχόμενο ρεύμα του αέρα, είναι εκείνες που παράγουν την ωφέλιμη ισχύ. Οπότε είναι απαραίτητη η σημαντική επιβράδυνση του ρεύματος του αέρα για να παραχθεί μια μετρίου μεγέθους μηχανική ισχύς, το οποίο σημαίνει ότι τα φορτία ώσης στο δρομέα είναι μεγάλα σε σύγκριση με τα ωφέλιμα φορτία στο ίδιο επίπεδο.



Σχήμα 4.1. Καθορισμός των διανυσμάτων

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ένα τμήμα αεροτομής μιας Α/Γ σε μια ακτινική θέση r , όπου U_t και U_p είναι οι από και προς το επίπεδο συνιστώσες της σχετικής ταχύτητας W , ϕ είναι η γωνία εισροής, β η γωνία βήματος και α η γωνία προσβολής. Η ώση T δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{dT}{dr} = 0.5 \rho W^2 c (c_L \cos \phi + c_D \sin \phi) \quad (4.1)$$

Για κανονικούς λόγους ταχύτητας ακροπτερυγίων ($\lambda > 4$), και υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις: $U_t \gg U_p$, $\cos \phi \approx 1$, $\sin \phi = U_p / U_t$, καθώς επίσης και: $c_L \gg c_D$ (σε κατάσταση μη απώλειας στήριξης), η σχέση 4.1 γίνεται:

$$\frac{dT}{dr} = 0.5 \rho U_t^2 c c_L \quad (4.2)$$

Για σταθερή περιστροφική ταχύτητα: $d\phi \approx dU_p / U_t$ και δεδομένου ότι το β είναι σταθερό: $\phi = \alpha + \beta \Rightarrow d\phi = d\alpha$. Επιπλέον, εάν: $dc_L / d\alpha = \alpha_0$,

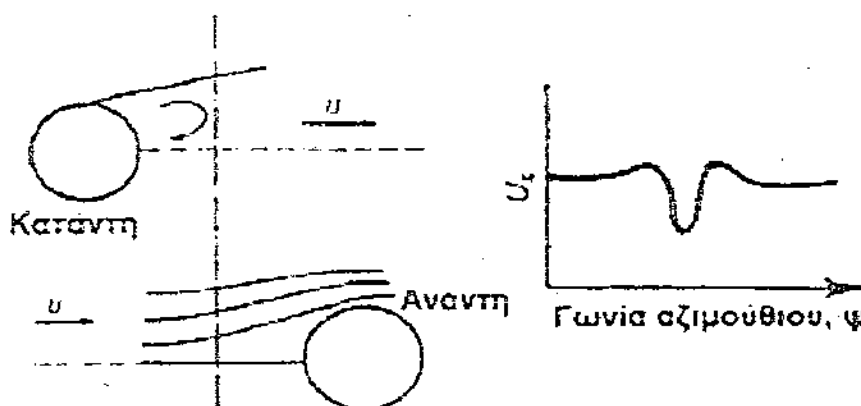
τότε: $dc_L = \alpha_0 d\phi = \alpha_0 (dU_p / U_t)$, και παραγωγίζοντας την εξίσωση (4.2) προκύπτει:

$$d\left(\frac{dT}{dr}\right) \cong 0.5\rho U_t c \alpha_0 dU_p \quad (4.3)$$

Αυτή η εξίσωση δείχνει ότι οι αλλαγές στην ώση επηρεάζονται έντονα από τις αξονικές αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου. Η παραβίαση της υπόθεσης περί υψηλής τιμής του λ τροποποιεί τη μορφή της εξίσωσης (4.3), αλλά, γενικά, οι συνθήκες της αξονικής ροής του ανέμου είναι οι σημαντικότερες. Αυτό μπορεί να είναι προφανές, εντούτοις το ίδιο αποτέλεσμα αναφέρεται και για τις δυνάμεις της ροπής στο επίπεδο του δρομέα. Στην ανώτερη σχέση, το κρίσιμο βήμα που δίνει βάρος στις αξονικές ταχύτητες είναι η υπόθεση ότι η γωνία εισροής ϕ (ως εκ τούτου και η γωνία προσβολής α) εξαρτάται άμεσα από την U_p . Κατά συνέπεια, αυτό που επηρεάζει πρωτίστως τα φορτία είναι η αλλαγή της γωνίας προσβολής και όχι η σχετική ταχύτητα.

4.2.3. Σκίαση του πύργου

Οι ΑΓΟΑ έχουν πάντα κάποια κατασκευή υποστήριξης με τη μορφή πύργου, η οποία, ανεξαρτήτως τύπου, παρέχει κάποια αντίσταση στη ροή του ανέμου μπροστά και πίσω από αυτή. Το σχήμα 4.2 παρουσιάζει το πεδίο ροής γύρω από έναν κυλινδρικό πύργο (προσεγγίζεται εύκολα με ένα πεδίο δυναμικής ροής), καθώς επίσης και τη χρονική μεταβολή της αξονικής ταχύτητας του ανέμου σε συνάρτηση με τη γωνία αζιμούθιου της ΑΓ, σε μια χαρακτηριστική ακτινική θέση. Εκτός της επίδρασης του πύργου, η ταχύτητα του ανέμου είναι σταθερή.



Σχήμα 4.2. Η επίδραση της σκίασης του πύργου

Εάν αναλυθεί σε σειρά Fourier, η χρονική σειρά παρουσιάζει ένα μεγάλο αριθμό αρμονικών, συμπεριλαμβανόμενης της θεμελιώδους συχνότητας του

δρομέα. Αυτό καθιστά τη σκίαση του πύργου επικίνδυνη, δεδομένου ότι θα διεγείρει οποιοδήποτε φυσικό αριθμό του συστήματος που βρίσκεται κοντά σε μια αρμονική του δρομέα. Η ανάντη σκίαση είναι λιγότερο έντονη από την κατάντη. Όταν ο δρομέας βρίσκεται κατάντη του πύργου, και εντός του απορρευμάτος του, η φόρτιση είναι πολύ σφοδρή, δεδομένου ότι μπορεί να εμφανιστεί μεγάλη πτώση της ταχύτητας πίσω από έναν πύργο υψηλής στερεότητας με περιορισμένη προεξοχή του δρομέα. Η σκίαση είναι ασήμαντη στις μικρές Α/Γ με καλά σχεδιασμένους χαλύβδινους δικτυωτούς πύργους.

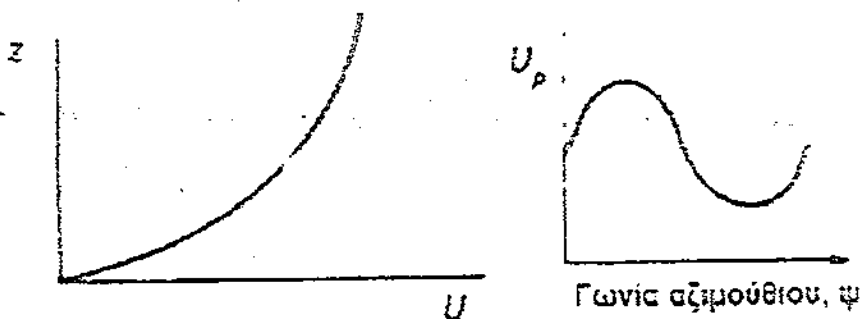
4.2.4. Διάτμηση του ανέμου

Η διάτμηση του ανέμου (η αύξηση της ταχύτητας του με το ύψος) μπορεί να επιδεινώσει τα αποτελέσματα των αλλαγών στην ταχύτητα του ανέμου που προκαλούνται από τις ριπές του ανέμου. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική κατανομή του οριακού στρώματος του ανέμου, η οποία συνήθως περιγράφεται αναλυτικά από τον εκθετικό νόμο:

$$\frac{U}{U_r} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

όπου το z είναι το ύψος επάνω από την επιφάνεια του εδάφους, το z_r είναι ένα ύψος αναφοράς και το α ο εκθετικός συντελεστής διάτμησης. Τόσο το α , όσο και το z_r αποτελούν σχετικά χαρακτηριστικά της θέσης. Αυτή η σχέση δείχνει ότι για έναν δρομέα ακτίνας 20m, η ταχύτητα του ανέμου στο ανώτερο και κατώτερο σημείο του δρομέα μπορεί να διαφέρει κατά 30%.

Καθώς περιστρέφεται ο δρομέας, αντιλαμβάνεται την κατανομή του ανέμου ως μεταβαλλόμενη συνάρτηση του χρόνου, ή του αζιμούθιου. Εάν η διάτμηση ήταν γραμμική εγκάρσιως του δίσκου του δρομέα, τότε η συνάρτηση θα ήταν ημιτονοειδής. Η παρουσία μιας πιο περίπλοκης κατανομής της διάτμησης τροποποιεί την ημιτονοειδή μορφή με την εισαγωγή μερικών αρμονικών. Η μεταβολή λόγω της διάτμησης είναι ομαλότερη από εκείνη λόγω της σκίασης του πύργου, αλλά εάν η επίδραση της διάτμησης συμπίπτει με σφοδρές ριπές ανέμου, τότε οι συνέπειες στο δρομέα μπορεί να είναι σοβαρές.

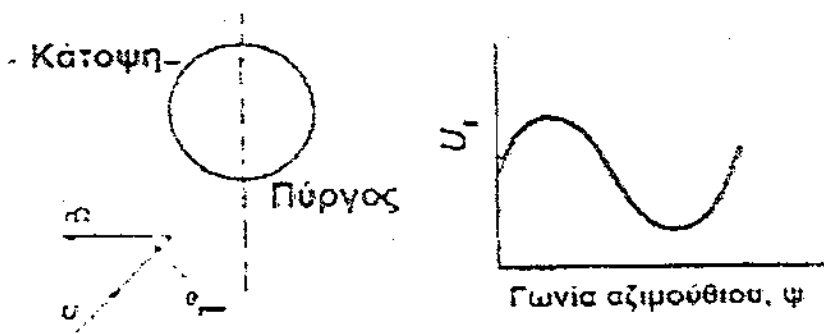


Σχήμα 4.3. Αποτελέσματα της διάτμησης του ανέμου

4.2.5. Μη ευθυγραμμισμένο σύστημα προσανατολισμού και κλίση του άξονα

Οι ΑΓΟΑ διαθέτουν ενεργό ή παθητικό σύστημα για τον προσανατολισμό τους με τον άνεμο, αλλά πολύ συχνά λειτουργούν μη ευθυγραμμισμένες, δεδομένου ότι η γωνία στροφής είναι δύσκολο να μετρηθεί και μεταβάλλεται εντός του δίσκου. Επίσης, οι κινήσεις προσανεμισμού είναι συνήθως αργές. Η μη ευθυγράμμιση με τον άνεμο έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη μιας συνιστώσας της αξονικής ταχύτητας του ανέμου η οποία δρα στο επίπεδο περιστροφής έτσι ώστε, καθώς το πτερύγιο περιστρέφεται, η συνιστώσα αυτή προσθαιρείται περιοδικά στην ταχύτητα που δρα στο επίπεδο περιστροφής, με αποτέλεσμα περιοδικές διακυμάνσεις των αεροδυναμικών φορτίων.

Η αναμενόμενη συμπεριφορά του συστήματος προσανατολισμού παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4. Τα προκύπτοντα φορτία είναι σχεδόν καθαρά ημιτονοειδή. Επιπλέον, οι ΑΓΟΑ έχουν συχνά μια κλίση στον άξονα, προκειμένου να αυξηθεί η απόσταση προσπέλασης του πύργου. Έτσι όμως παράγονται αεροδυναμικά φορτία παρόμοια με εκείνα λόγω του συστήματος προσανατολισμού, αλλά μετατοπισμένα σε φάση κατά 90° .



Σχήμα 4.4. Η επίδραση του μη ευθυγραμμισμένου συστήματος προσανατολισμού

4.2.6. Συνδυασμένη αεροδυναμική φόρτιση

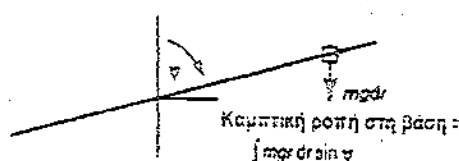
Κατά την πραγματική λειτουργία των Α/Γ, όλες οι πηγές των κυκλικών αεροδυναμικών φορτίσεων που εξετάστηκαν χωριστά στα προηγούμενα προκύπτουν ταυτόχρονα, ενώ τα αποτελέσματά τους είναι πιο περίπλοκα και δεν μπορούν να προβλεφθούν μέσω μιας απλής άθροισης. Επιπλέον, η ανωτέρω ανάλυση βασίστηκε στην υπόθεση της γραμμικής αεροδυναμικής, στην πράξη όμως οι Α/Γ λειτουργούν το μεγαλύτερο μέρος της ζωής τους με τα πτερύγια τους υπό μερική απώλεια στήριξης, η οποία προκαλεί μη γραμμικά αποτελέσματα.

Κατά συνέπεια, σύμφωνα με τα ανωτέρω, η μετάβαση ενός τμήματος πτερυγίου που μόλις έχει υποστεί απώλεια στήριξης μέσα από ένα ανοδικό ρεύμα αέρα θα μπορούσε να μειώσει τη γωνία προσβολής, ελαττώνοντας έτσι τη φόρτιση των πτερυγίων. Στην πραγματικότητα, η μείωση της γωνίας προσβολής θα προκαλέσει μια αύξηση στην ανωστική δύναμη, καθώς η ροή επανακολλάται, οπότε προκύπτει μια συμπεριφορά σε πλήρη αντίφαση με αυτή που προβλέπεται από τη γραμμική θεωρία. Η κατάσταση είναι ακόμα πιο περίπλοκη, καθώς ένα γεγονός όπως η παροδική απώλεια στήριξης και η επανακόλληση της ροής, μπορεί να είναι αεροδυναμικά ασταθής, και επομένως απαιτούνται πιο λεπτομερείς θεωρίες για την προσομοίωση του προβλήματος.

4.3. Μηχανικά φορτία

4.3.1. Βαρύτητα

Οι ΑΓ περιγράφονται συνήθως ως μεγάλης κλίμακας μηχανές δοκιμών κόπωσης. Αυτό οφείλεται στα πολύ υψηλά βαρυτικά φορτία που εμφανίζονται στις μεγάλες μηχανές, ειδικά στην περιοχή της πλήμνης και στις ελασματικές ενώσεις, τα οποία μπορεί να αποτελέσουν τα κύρια αίτια για την απαρχή της κόπωσης στα σημεία αυτά. Σε μια ΑΓ χωρίς κωνικότητα και χωρίς κλίση του άξονα, τα φορτία αυτά εμφανίζονται απλά καθότι, σε κάθε πλήρη περιστροφή του δρομέα, τα φορτία βαρύτητας εντός του επιπέδου περιστροφής υποβάλλονται σε μια πλήρη αντιστροφή. Για μια ΑΓ με κωνικότητα και κλίση του άξονα, τα φορτία βαρύτητας μπορούν να δρουν με διεύθυνση εκτός του επιπέδου περιστροφής, με συνέπεια την εμφάνιση κάμψης κατά μήκος του εκπετάσματος του πτερυγίου (περί τη χορδή του πτερυγίου), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.

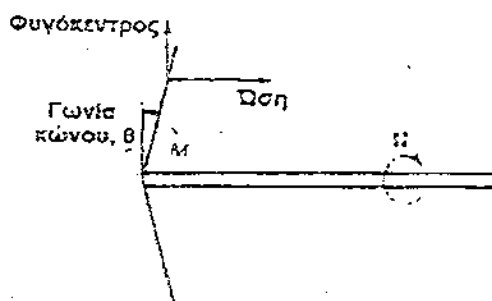


Σχήμα 4.5. Βαρυτικές επιδράσεις

4.3.2. Κωνικότητα

Οι ΑΓ ελεύθερου προσανατολισμού οι οποίες χρησιμοποιούν τις αεροδυναμικές δυνάμεις για την επίτευξη σταθερότητας περιστροφής, συνήθως διαθέτουν κωνικότητα η οποία αυξάνει τη στροφική ακαμψία, ως αποτέλεσμα ενός φαινομένου παρόμοιου με αυτού της διέδρης γωνίας στα αεροσκάφη με οπισθοκλινείς πτέρυγες. Εάν τα πτερύγια διαθέτουν κλίση ως προς το επίπεδο της περιστροφής κατά μια μικρή γωνία (γωνία κώνου), τότε αναπτύσσεται μια συνιστώσα της μεγάλης φυγοκεντρικής δύναμης αντίθετη

προς την ώση του ανέμου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Για μεγάλους και βαρείς δρομείς η γωνία κώνου είναι συνήθως $1-2^{\circ}$, ενώ για ελαφρύτερους δρομείς συνήθως είναι $5-6^{\circ}$.

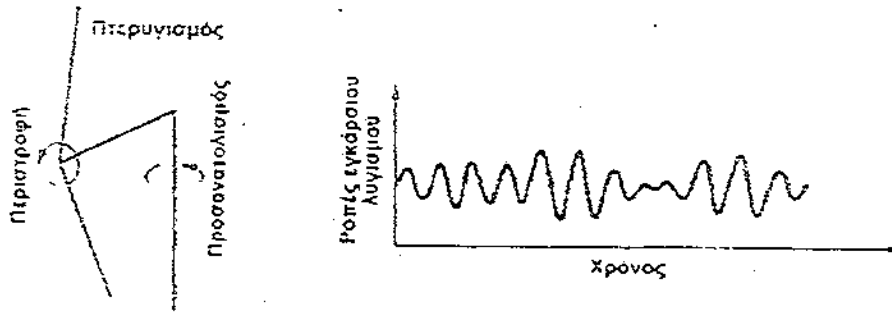


Σχήμα 4.6. Γωνία κώνου

Χρησιμοποιώντας τη γωνία κώνου, τα μόνιμα φορτία αεροδυναμικής ώσης μπορούν να αντισταθμιστούν από τη συνιστώσα του μόνιμου φυγοκεντρικού φορτίου. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται τα επίπεδα μέσης φόρτισης, όμως δημιουργούνται νέα προβλήματα. Η ακύρωση των μόνιμων αεροδυναμικών φορτίων μπορεί να επιτρέψει στην ταλαντωτική φόρτιση να προκαλέσει αναστροφή των τάσεων. Αυτό μπορεί να επιφέρει μεγαλύτερη ζημιά λόγω κόπωσης συγκριτικά με τη δράση των ίδιων ταλαντωτικών φορτίων γύρω από ένα μέσο επίπεδο, σε συνάρτηση με το υλικό που χρησιμοποιείται. Προβλήματα επίσης μπορούν να δημιουργήσουν οι συνθήκες υπερτάχυνσης. Τα προαναφερθέντα ανακουφιστικά φυγοκεντρικά φορτία, αυξάνονται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής, οπότε καταστάσεις υπερτάχυνσης μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλη αύξηση των φορτίων.

4.3.3. Γυροσκοπικά φορτία

Ο συνδυασμός της περιστροφικής κίνησης γύρω από δύο αμοιβαία κάθετους άξονες αυξάνει την πιθανότητα εμφάνιση γυροσκοπικών φορτίων. Το σχήμα 4.7 παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο τα φορτία αυτά μπορούν να γίνουν σημαντικά για μια ΑΓ. Η ταχύτητα περιστροφής είναι συνήθως αρκετά μικρή σε σύγκριση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και ως εκ τούτου τα γυροσκοπικώς παραγόμενα φορτία πτερυγισμού είναι ασήμαντα. Εντούτοις, οι ταχύτητες περιστροφής μπορούν στιγμιαία να είναι αρκετά μεγάλες στις ΑΓ ελεύθερου προσανατολισμού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλων φορτίων πτερύγωσης. Σε μερικές μικρές ΑΓ, αυτή η γυροσκοπική φόρτιση έχει επιφέρει την καταστροφή των πτερυγίων.



Σχήμα 4.7. Γυροσκοπικά φορτία

4.3.4. Μεταβατικά φορτία

Η εκκίνηση και η παύση λειτουργίας των ΑΓ επιφέρουν μεγάλες παροδικές φορτίσεις. Οι λεπτομέρειες των μεταβατικών φορτίων εξαρτώνται από την ΑΓ και το σύστημα ελέγχου της, ενώ το ίδιο ισχύει και για την κρισιμότητα αυτών των φορτίων.

4.4. Τύρβη

Όλα όσα έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα ταξινομούνται ως «μη στοχαστικά» φαινόμενα. Αυτό σημαίνει ότι, γνωρίζοντας το μέγεθος μιας ποσότητας σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, μπορεί εύκολα να προβλεφθεί το μέγεθος της σε οποιαδήποτε άλλη τυχαία χρονική στιγμή. Τα υπόλοιπα φορτία ονομάζονται «στοχαστικά» ή «τυχαία», ως αποτέλεσμα της τυρβώδους φύσης του ανέμου, ο οποίος διεγείρει την κατασκευή δυναμικά. Η επεξεργασία των τυρβωδών φορτίων είναι δύσκολη, αλλά πρέπει να παρατηρηθεί ότι μισής περίπου φόρτισης ή, για τις μεγάλες μηχανές, στο μεγαλύτερο μέρος αυτής.

4.4.1. Συνθήκες μέγιστης φόρτισης

Κανονικά, οι ΑΓ είναι σταματημένες κατά τη διάρκεια των ακραίων ανέμων. Μια μέση ταχύτητα ανέμου της τάξης των 25 m/s είναι γενικά αποδεκτή ως η μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα λειτουργίας. Το ερώτημα που προκύπτει στη συνέχεια αφορά στη φύση των φορτίων για υψηλές μέσες ταχύτητες ανέμου. Εάν η προσπίπτουσα ταχύτητα του ανέμου είναι γνωστή και σταθερή, τότε το πρόβλημα ανάγεται στον υπολογισμό της γωνίας προσβολής κατά μήκος των πτερυγίων και στην ερμηνεία της βάσει της άνωσης και οπισθέλκουσας που παράγει. Ο υπολογισμός αυτός, αν και τετριμμένος σε γενικές γραμμές και απλός, είναι δύσκολος στην πράξη, λόγω της ροής η οποία μπορεί να είναι εντόνως τρισδιάστατη σε σχέση με τις συντεταγμένες των αεροτομών, ενώ πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη το πεπερασμένο εκπέτασμα των πτερυγίων.

Στην πραγματικότητα, η ταχύτητα του αέρα δεν είναι ποτέ σταθερή, αλλά μεταβάλλεται σημαντικά λόγω της τυρβώδους φύσης του. Υπάρχουν δύο πιθανοί τρόποι εξέτασης αυτής της μεταβολής: ο ένας τρόπος αφορά την εφαρμογή μιας σταθερής ταχύτητας στη στατική δομή με έναν συντελεστή ριπής, ώστε να επιτραπεί η μετάβαση από τη μέση τιμή της ταχύτητας στη μέγιστη, ενώ ο άλλος τρόπος είναι η χρήση ενός μοντέλου για τον άνεμο που να περιλαμβάνει τη στοχαστική φύση του, προκειμένου να λάβει δεδομένα ένα δυναμικό μοντέλο του συστήματος. Η επιλογή της προσέγγισης εξαρτάται από τη φύση του συστήματος και την πολυπλοκότητα των υπολογισμών που υφίσταται η δυνατότητα να γίνουν.

Οι μικρές δύσκαμπτες δομές μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας την πρώτη προσέγγιση. Για οποιαδήποτε δομή που είναι δυναμικά ενεργή ή έχει διαστάσεις συγκρίσιμες με (ή μεγαλύτερες από) την κλίμακα μεγέθους της τύρβης (25-100m), πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια πιο περίπλοκη προσέγγιση. Ως αποτέλεσμα των φορτίων τύρβης σε μια Α/Γ, τα μέγιστα φορτία μπορεί να μην εμφανιστούν κατά τη διάρκεια των μέγιστων συνθηκών ταχύτητας του ανέμου, αλλά μπορεί να είναι το αποτέλεσμα ενός συνδυασμού συνθηκών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μηχανής. Γενικά, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τον προσδιορισμό των μέγιστων συνθηκών φόρτισης.

4.5. Φορτία στις δομές υποστήριξης

Αν και το κύριο στοιχείο συλλογής των φορτίων μιας Α/Γ είναι ο δρομέας, τα υπόλοιπα τμήματα της δομής, δηλαδή το σύστημα μετάδοσης της ισχύος, η άτρακτος και ο πύργος, υποβάλλονται επίσης σε περιοδικά μεταβαλλόμενα φορτία. Εντούτοις, η φύση αυτών των φορτίων είναι διαφορετική από αυτή που υφίστανται τα πτερύγια του δρομέα.

Τα στατικά τμήματα της δομής υποστήριξης, δηλ. όλα εκτός από το σύστημα μετάδοσης της ισχύος δεν μπορούν να διαφοροποιηθούν μεταξύ των μεμονωμένων πτερυγίων, οπότε δέχονται το ίδιο φορτίο όταν το πτερύγιο 1 είναι στη θέση «12 η ώρα», καθώς και όταν το πτερύγιο 2 ή 3 ή οποιοδήποτε άλλο βρίσκεται εκεί. Επομένως, τα γεγονότα που εμφανίζονται στα πτερύγια μια φορά ανά περιστροφή (1Ρ) εμφανίζονται στη δομή υποστήριξης μιας Α/Γ με Ν πτερύγια μετά από ΝΡ. Η χρήση ενός δρομέα με πολλά πτερύγια (τουλάχιστον τρία) χρησιμεύει στην εξισορρόπηση των μεταβολών που υφίστανται τα μεμονωμένα πτερύγια, όπως αυτές γίνονται αντιληπτές από μια σταθερή θέση αναφοράς. Για μια Α/Γ με δυο πτερύγια, τα αντίστοιχα φορτία μπορεί να είναι αυξημένα.

4.6. Δυναμική των ανεμογεννητριών

4.6.1. Εισαγωγή

Όλα τα μηχανολογικά συστήματα τα οποία συναντώνται, στην πράξη καταπονούνται δυναμικά. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη μια εκ των

προτέρων πρόβλεψη των φυσικών συχνοτήτων ή ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες καταστάσεις, όπως συνθήκες συντονισμού, οι οποίες είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε αστοχία όλο το σύστημα.

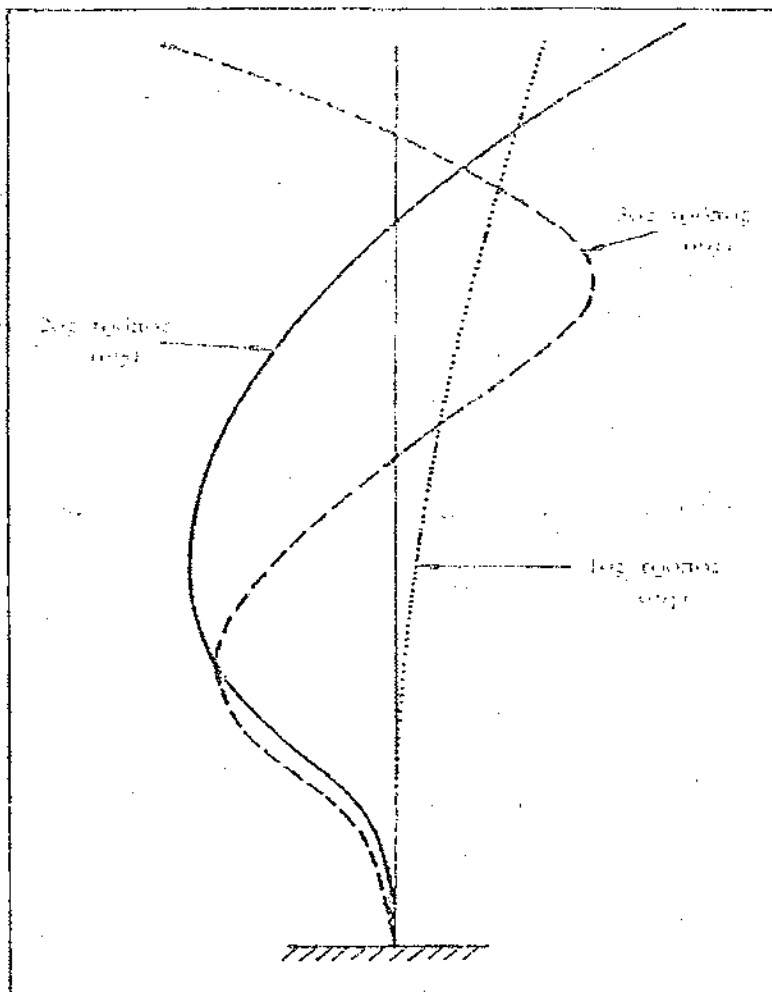
Σε πολλές περιπτώσεις η κύρια σχεδιαστική παράμετρος για ένα πύργο αποδεικνύεται ότι είναι η αποφυγή συνθηκών συντονισμού.

Συντονισμός στα προβλήματα με πύργους είναι δυνατόν να εμφανισθεί με αρκετούς τρόπους. Αν η έλικα έχει μια μικρή στατική αζυγοσταθμία τότε μια παλμική δύναμη με συχνότητα ίση με τη συχνότητα περιστροφής της έλικας θα ασκείται επί του πύργου. Αν πάλι οι φυσικές συχνότητες του πύργου είναι ίσες με τη συχνότητα περιστροφής της έλικας είναι δυνατόν να συμβούν μεγάλες απομακρύνσεις στον πύργο με ενδεχόμενο την πτώση του. Επίσης, μεταβαλλόμενα φορτία αέρα μπορούν να προκαλέσουν μεταβαλλόμενα φορτία στα περύγια της έλικας. Τα φορτία αυτά μπορούν να μεταφερθούν στον πύργο και να προκαλέσουν συνθήκες συντονισμού αν οι φυσικές συχνότητες του πύργου είναι ορισμένα πολλαπλάσια της συχνότητας περιστροφής του δρομέα.

Γενικά τα μηχανολογικά συστήματα πρέπει να κατασκευάζονται έτσι ώστε να αποφεύγεται επιμελώς μια οποιαδήποτε φυσική τους συχνότητα να είναι ίση ή ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας διεγέρσεως (συχνότητα περιστροφής της έλικας) σ' όλο το λειτουργικό εύρος της μηχανής.

4.6.2. Μερικά στοιχεία για τις ταλαντώσεις

Κάθε σύστημα που καταπονείται δυναμικά υπόκειται σε ταλαντώσεις. Επειδή η συνολική ταλάντωση των συστημάτων είναι πολύπλοκη, αυτή μπορεί να αναλυθεί σε απλούστερες κινήσεις που ονομάζονται τρόποι ταλάντωσης. Ένας τρόπος ταλάντωσης ορίζεται ως το σχήμα που παίρνει το μοντέλο με το οποίο αντικαταστήσαμε το σύστημα μας, όταν αυτό ταλαντούται με αυτόν και μόνο τον τρόπο (βλέπε σχήμα 4.8). Κάθε τρόπος ταλάντωσης προσεγγίζεται μαθηματικά με μια επαλληλία κατάλληλων συναρτήσεων σχήματος, τις οποίες παίρνουμε συνήθως έτοιμες από σχετικά εγχειρίδια και οι οποίες έχουν προκύψει από εκτεταμένη πειραματική μελέτη.



Σχήμα 4.8. Τρόποι ταλάντωσης πύργου

Όλοι οι τρόποι ταλάντωσης υπερτιθέμενοι μεταξύ τους δίνουν τη συνολική κίνηση του συστήματος, το σχήμα δηλαδή που παίρνει κάθε φορά το σύστημα. Καθένας από τους τρόπους αυτούς έχει ιδιότητες που μοιάζουν πάρα πολύ με τις ιδιότητες του αρμονικού ταλαντωτή και περιγράφεται κυρίως από τη συχνότητα ταλάντωσης του (ιδιοσυχνότητα) και από τη μορφή του.

Ο αριθμός των τρόπων με τους οποίους μπορεί να ταλαντούει ένα σύστημα είναι ακριβώς όσοι και οι βαθμοί ελευθερίας του, αφού κάθε τρόπος αναφέρεται σ' ένα συγκεκριμένο βαθμό ελευθερίας.

Στα πραγματικά συστήματα οι βαθμοί ελευθερίας που απαιτούνται για να περιγράψουν το σύστημα είναι άπειροι. Επειδή όμως μια ανάλυση με άπειρους βαθμούς ελευθερίας είναι αδύνατη, δεχόμαστε ότι το σύστημα μας περιγράφεται από N βαθμούς ελευθερίας, όπου N ένας σχετικά μικρός ακέραιος αριθμός ο οποίος εκλέγεται ανάλογα με την ακρίβεια της ανάλυσης που επιθυμούμε. Έτσι λοιπόν, στα πραγματικά συστήματα έχουμε N βαθμούς ελευθερίας, άρα και N τρόπους ταλάντωσης και N συχνότητες ταλάντωσης.

Συμβατικά δεχόμαστε ότι ο πρώτος ή θεμελιώδης τρόπος ταλάντωσης έχει μηδέν «δεσμούς» (θέσεις όπου το μοντέλο που αντικαθιστά το σύστημα μας τέμνει τον άξονα ισορροπίας με εξαίρεση τα άκρα), ο δεύτερος ένα δεσμό, ο τρίτος δύο δεσμούς κ.ο.κ. Όπως ξανά αναφέραμε, η υπέρθεση όλων των τρόπων ταλάντωσης μας δίνει το σχήμα που παίρνει το μοντέλο μας (βλέπε σχήμα 4.8).

Με τη σύμβαση αυτή υπάρχει μια κλιμάκωση των ιδιοσυχνοτήτων εις τρόπο ώστε $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \dots < \omega_N$. Η ω_1 λέγεται πρώτη ή θεμελιώδης κυκλική συχνότητα, η ω_2 δεύτερη κυκλική συχνότητα κ.ο.κ. Όλες μαζί αποτελούν το διάλυμα των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος.

Ο τρόπος και η σημασία της απόκρισης των ΑΓ στα φορτία που δέχονται ποικίλει αναλόγως της σχεδίασης τους. Οι μεγάλες ΑΓ πρώτης γενιάς ήταν πολύ άκαμπτες, ενώ η δυνατότητα κατασκευής εύκαμπτων δομών προσφέρει τη δυνατότητα μείωσης των μαζών και του κόστους των ΑΓ. Δεδομένου ότι η δυναμική απόκριση των ΑΓ μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς όφελος τους, η κατανόηση της είναι σημαντική στη βελτίωση της σχεδίασης τους. Η δυναμική συμπεριφορά των ΑΓ μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως εξής:

1. Ευστάθεια
2. Εξαναγκασμένη απόκριση σε μη στοχαστικά φορτία, και
3. Εξαναγκασμένη απόκριση σε στοχαστικά φορτία

Όλα τα τμήματα των ΑΓ (τα πτερύγια, ο δρομέας, η πλήμνη, το σύστημα ισχύος, το σύστημα ελέγχου, ο πύργος και τα θεμέλια) συμβάλλουν στη δυναμική συμπεριφορά τους, αλλά μερικά τμήματα μπορούν να αμεληθούν ή, τουλάχιστον, να θεωρηθούν αποσυνδεδεμένα από τα υπόλοιπα. Μόνο τα πτερύγια και ο δρομέας θα εξεταστούν στη συνέχεια, αλλά θα γίνεται και αναφορά στο περίπλοκο πλήρες σύστημα της ΑΓ. Όσον αφορά την ονοματολογία, στην ανάλυση θα χρησιμοποιηθούν οι άξονες εντός και εκτός του επιπέδου περιστροφής.

4.6.3. Ευστάθεια

Η έννοια της ευστάθειας είναι λιγότερο γνωστή από αυτήν της εξαναγκασμένης απόκρισης. Η αστάθεια είναι μια ταλάντωση που, αφού προκληθεί από έναν εξωτερικό παράγοντα, έχει την τάση να αυξάνεται με ρυθμό και συχνότητα που καθορίζονται από τις ιδιότητες του συστήματος (είναι ανεξάρτητη του εξωτερικού παράγοντα που την προκάλεσε). Διαφέρει κατά πολύ από το φαινόμενο του συντονισμού, το οποίο προκαλείται όταν μια εξωτερική πηγή διέγερσης εφαρμόζεται σε ένα σύστημα στη (ή κοντά στη) φυσική συχνότητα του, οπότε συχνά συγχέονται αυτά τα δύο φαινόμενα. Όσον αφορά στις αεροελαστικές αστάθειες, οι πιο γνωστές είναι ο πτερυγισμός και ο συντονισμός εδάφους.

Ο πτερυγισμός, γνωστός από την τεχνολογία των πτερύγων αεροσκαφών, προκύπτει λόγω της σύζευξης μεταξύ της ταλάντωσης των πτερύγων και της

στρέψης τους, κατά τέτοιο τρόπο ώστε η συνδυασμένη επίδραση των αεροδυναμικών και αδρανειακών δυνάμεων να ενδυναμώνει την κίνηση τους. Στα ελικόπτερα, ο συντονισμός εδάφους προκύπτει από τη σύζευξη μεταξύ της κίνησης των ακροπτερυγίων και της παρεκτροπής του πυλώνα, και μπορεί να εμφανιστεί ελλείψει οποιουδήποτε αεροδυναμικού φορτίου. Δεδομένου ότι τα πτερύγια εκτρέπονται πλαγίως, τα κέντρα βάρους τους μετατοπίζονται εντός του επιπέδου περιστροφής, οπότε είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένας συνδυασμός φυσικών συχνοτήτων και περιστροφικής ταχύτητας που καθώς περιστρέφεται ο δρομέας, ενισχύει την υφιστάμενη κίνηση του πυλώνα, καθιστώντας το σύστημα ασταθές.

Μερικά μικρά, υψηλής στρέψης πτερύγια Α/Γ υποφέρουν από ανεπιθύμητες ταλαντώσεις, γενικά όμως οι πτέρυγες των Α/Γ είναι τόσο δύσκαμπτες σε στρέψη ώστε να μην εμφανίζεται πτερυγισμός. Ο συντονισμός εδάφους μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα όταν η δομή υποστήριξης είναι εύκαμπτη και οι πρώτες διαμήκεις συχνότητες των πτερύγων μικρότερες από 1P (οι σύγχρονες Α/Γ έχουν θεμελιώδεις διαμήκεις συχνότητες της τάξης των 7P), όπου το P συμβολίζει τη φυσική συχνότητα περιστροφής της Α/Γ. Επομένως, η αεροελαστική αστάθεια δεν αποτελεί προς τα παρόν σχεδιαστικό πρόβλημα, αλλά μπορεί να αποτελέσει στο μέλλον, όσο οι Α/Γ γίνονται πιο εύκαμπτες.

Η ευστάθεια οποιουδήποτε συστήματος αποτελεί μια εσωτερική ιδιότητα του μόνο και είναι ανεξάρτητη από τον τύπο των δυνάμεων που ασκούνται σ' αυτό. Αυτή η διάκριση διαφαίνεται και στην εξίσωση της κίνησης, η οποία γενικά εκφράζεται ως:

$$[M]\ddot{u}(t) + [D]\dot{u}(t) + [K]u(t) = F(t) \quad (4.4)$$

όπου [M], [D] και [K] είναι οι μήτρες μάζας, απόσβεσης και ακαμψίας της δομής, $u(t)$ είναι το διάνυσμα απόκρισης, και $F(t)$ το διάνυσμα των εφαρμοζόμενων δυνάμεων. Ο δείκτης [] εκφράζει διαφόρτιση ως προς το χρόνο.

4.6.4. Ιδιοσυχνότητες

Η σχεδίαση μιας Α/Γ με αντοχή στα μη-στοχαστικά φορτία αποτελεί μια άσκηση αποφυγής του συντονισμού. Εάν ένα σύστημα διεγερθεί δυναμικά, ένα σημαντικό πρώτο βήμα της ανάλυσης είναι ο υπολογισμός των ιδιοσυχνοτήτων του. Οι Α/Γ είναι δυσκολότερο να εξεταστούν ως προς αυτές τις συχνότητες σε σχέση με δομές, δεδομένου ότι οι περισσότερες από αυτές παραμορφώνονται γύρω από μια χρονικά αμετάβλητη θέση. Σε μια Α/Γ, ο δρομέας κινείται στο χρόνο ως προς τη στάσιμη και εύκαμπτη δομή υποστήριξης. Κατά συνέπεια, ένα ερώτημα που προκύπτει είναι η επιλογή της θέσης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των ιδιομορφών και των ιδιοσυχνοτήτων.

Γενικά, αρκεί να τοποθετηθεί ένας στάσιμος δρομέας σε διάφορες αζιμουθιακές θέσεις και να υπολογιστούν οι μη αποσβεσόμενες ιδιοσυχνότητες, με τη χρήση ενός πακέτου λογισμικού πεπερασμένων

στοιχείων. Αυτό όμως μπορεί να είναι πολύ παραπλανητικό σε ορισμένες περιπτώσεις, δεδομένου ότι η ανάλυση των ιδιοσυχνοτήτων ολόκληρης της ΑΓ πρέπει να συμπεριλαμβάνει ένα ακριβές μοντέλο όλων των δομικών τμημάτων της, της αεροδυναμικής απόσβεσης, καθώς και των φυγόκεντρων δυνάμεων και των δυνάμεων Coriolis. Ένας τέτοιος υπολογισμός συσχετίζεται άμεσα με τους προαναφερθέντες υπολογισμούς ευστάθειας.

Οι ιδιομορφές και οι ιδιοσυχνότητες των ΑΓ προκύπτουν από τη λύση του προβλήματος των ιδιοτιμών που περιγράφεται από την ομογενή μορφή της εξίσωσης (4.4), με την απόσβεση να μην λαμβάνεται υπόψη και με την υπόθεση ότι οι αρμονικές λύσεις της απόκρισης έχουν την παρακάτω μορφή:

$$u(t) = \phi_n \cos(\omega_n t) \quad (4.5)$$

Αυτό οδηγεί στο κλασσικό πρόβλημα των ιδιοσυχνοτήτων:

$$-\omega_n^2 [M] \phi_n + [K] \phi_n = 0 \quad (4.6)$$

το οποίο παρέχει τις ιδιομορφές (τη μορφή της δομής σε ένα σημείο σε μια περίοδο ταλάντωσης όπου η παραμόρφωση είναι μέγιστη) ϕ_n και τις ιδιοσυχνότητες ω_n .

Επιπλέον, η ανάλυση του διανύσματος της απόκρισης $u(t)$ σε ιδιομορφές και κάθετες συντεταγμένες εκφράζεται από τη σχέση: $u(t) = [\phi]q(t)$, ή εναλλακτικά από τη σχέση:

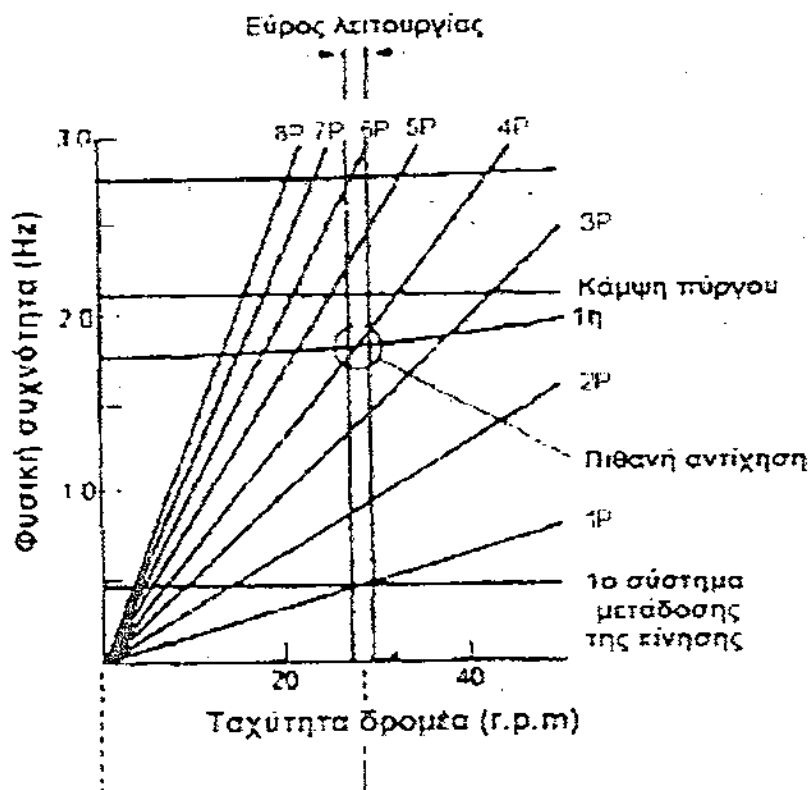
$$u(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t) \quad (4.7)$$

όπου συμπεριλαμβάνονται οι ιδιομορφές από 1 έως N . Στις ανωτέρω εξισώσεις, οι ιδιομορφές συντάσσονται ως τις N στήλες της μήτρας $[\phi]$ και οι κάθετες συντεταγμένες $q_n(t)$ ως τα N μέλη του διανύσματος κάθετων συντεταγμένων $q(t)$, και το γινόμενο των μήτρων γράφεται τελικά ως άθροισμα (εξ. 4.7).

Ο ρόλος της ταχύτητας περιστροφής των ΑΓ στους ανωτέρω υπολογισμούς είναι σημαντικός, και γίνεται προφανής κατά την εξέταση της εξίσωσης (4.4). Εκεί, η μήτρα ακαμψίας $[K]$ εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής μέσω των όρων που σχετίζονται με τα σταθερά φυγόκεντρικά και τα φυγόκεντρικά φορτία εξασθένισης. Κατά συνέπεια, οι τυπικές συχνότητες μπορεί να μεταβάλλονται σημαντικά με την ταχύτητα περιστροφής, και η ανάλυση συχνοτήτων πρέπει να εκτελεσθεί με πολλές διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής, προκειμένου να καθοριστεί ο τρόπος μεταβολής των ιδιοσυχνοτήτων με την ταχύτητα περιστροφής.

Έχοντας εκτελέσει έναν τέτοιο υπολογισμό, τα αποτελέσματα μπορούν να παρασταθούν σε ένα διάγραμμα Campbell, όπως αυτό του σχήματος 4.9, το οποίο έχει αρμονικές ακτίνες που παρουσιάζουν σε ποιες συχνότητες

εμφανίζεται η κύρια φόρτιση συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής. Αυτές οι ακτίνες ονομάζονται στο διάγραμμα ως 1P, 2P κ.λ.π. Επίσης, στο διάγραμμα εμφανίζονται οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος, μερικές από τις οποίες συναρτώνται με την ταχύτητα περιστροφής, ενώ άλλες είναι σταθερές. Με αυτόν τον τρόπο, το διάγραμμα Campbell παρέχει μια γενική εικόνα των δυναμικών ιδιοτήτων του δρομέα και της δομής υποστήριξης.



Σχήμα 4.9. Ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα Campbell

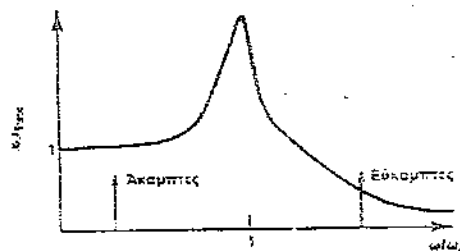
Ένα πιθανό πρόβλημα συντονισμού προκύπτει όταν συμπίπτουν μια αρμονική ακτίνα και μια καμπύλη ιδιοσυχνότητας στο διάγραμμα (ή όταν προσεγγίζουν κατά τουλάχιστον $\pm 10\%$ μεταξύ τους) στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής. Αυτό δεν σημαίνει αυτόματα την εμφάνιση συντονισμού, δεδομένου ότι δεν διεγείρονται όλες οι τυπικές συχνότητες από όλες τις επιβαλλόμενες αρμονικές. Παραδείγματος χάριν, ο πύργος ενός δρομέα με τρία περύγια φορτίζεται σε 3P, δεδομένου ότι δεν μπορεί να υπάρξει διάκριση του πύργου μεταξύ των μεμονωμένων περυγίων. Οπότε, η τομή της ιδιοσυχνότητας του πύργου και των ακτινών 1P ή 2P δεν επιφέρει ανησυχία.

4.6.5. Άκαμπτες και εύκαμπτες δομές

Η ευστάθεια και η εξαναγκασμένη ταλάντωση των Α/Γ αντιμετωπίζονται συνήθως με τη χρήση περίπλοκων προγραμμάτων υπολογισμού τα οποία βασίζονται στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Το πιο χρονοβόρο τμήμα των υπολογισμών δεν είναι τα πεπερασμένα στοιχεία αλλά η ανάλυση των αεροδυναμικών δυνάμεων, οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν για κάθε τμήμα dr των πτερυγίων, για κάθε γωνιακή θέση γ των πτερυγίων και για κάθε χρονική στιγμή t . Ως εκ τούτου, η διαδικασία των υπολογισμών για το πλήρες σύστημα είναι εξαιρετικά χρονοβόρα. Εκτός αυτού, είναι αρκετά πιο δύσκολο να υπολογιστεί η δυναμική απόκριση του συστήματος κατά την εφαρμογή αυτών των φορτίων στη δομή.

Κατά συνέπεια, συνήθως αγνοείται η δυναμική συμπεριφορά της Α/Γ και οι υπολογισμοί γίνονται με κατάλληλα ψευδο-στατικά φορτία, τα οποία μπορεί να είναι ικανοποιητικά στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν τομές στα διαγράμματα Campbell. Εντούτοις, αυτή η προσέγγιση είναι πολύ παραπλανητική εάν υπάρχει συντονισμός. Η εγγύτητα σε κατάσταση συντονισμού ενισχύει τα φορτία και μπορεί επίσης να αλλάξει την κυρίαρχη συχνότητα της απόκρισης. Όταν τα φορτία συμβάλλουν σε αστοχία κόπωσης, μπορεί να είναι σημαντική η αλλαγή της φόρτισης από 1 ή 2 κύκλους ανά περιστροφή σε υψηλότερη συχνότητα.

Η σωστή δυναμική σχεδίαση των Α/Γ έγκειται στην εξασφάλιση ότι οι συχνότητες συντονισμού δεν διεγείρονται σε επίπεδα που θα μπορούσαν να προκαλέσουν πρόβλημα. Κατά συνέπεια, οι συχνότητες αυτές τοποθετούνται είτε χαμηλότερα είτε υψηλότερα των επιβαλλόμενων, καθιστώντας τη δομή άκαμπτη ή εύκαμπτη (αυτοί οι όροι χρησιμοποιούνται συνήθως για τον πύργο). Στο σχήμα 4.10 όπου παρουσιάζεται η παραμόρφωση μιας δομής συναρτήσει της αδιάστατης συχνότητας της, φαίνεται ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται εύκαμπτες δομές, καθώς όταν το σύστημα φορτίζεται πάνω από την ιδιοσυχνότητά του η απόκρισή του εξασθενεί, ενώ κάτω από αυτή, η ελάχιστη τιμή είναι η στατική μετατόπιση.



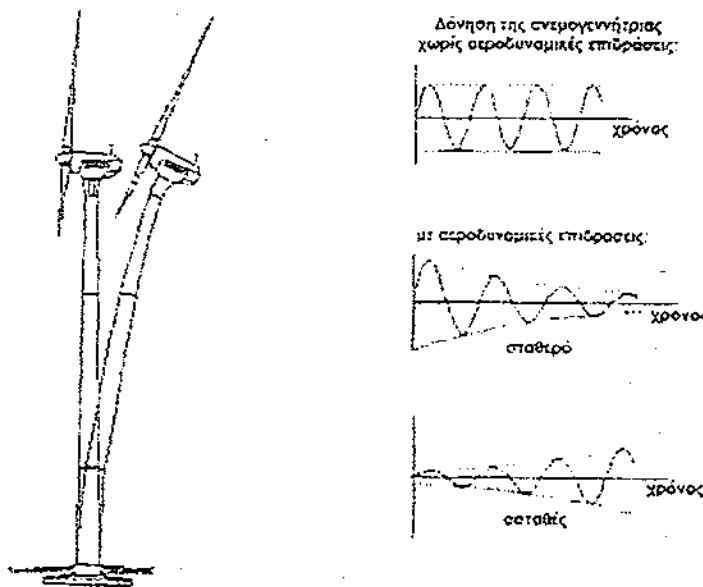
Σχήμα 4.10. Διάγραμμα της συνάρτησης μεταφοράς ενός συστήματος με ένα βαθμό ελευθερίας

Η επίδραση της επιλογής ενός πύργου του οποίου η συχνότητα είναι αρκετά κάτω από τη συχνότητα συνήθους φόρτισης, είναι η απεξάρτηση της δυναμικής συμπεριφοράς μεταξύ του πύργου και του δρομέα. Έτσι ο πύργος παρουσιάζει αρκετά μεγάλες μετατοπίσεις όταν φορτίζεται από την τύρβη,

αλλά παραμένει ανεπηρέαστος από την ημιτονοειδή φόρτιση του δρομέα. Εάν η συχνότητα συντονισμού τοποθετηθεί χαμηλότερα της συχνότητας του δρομέα στην κανονική ταχύτητα περιστροφής, συντονισμός προκύπτει μόνο όταν ο δρομέας φτάνει αυτή την ταχύτητα ή όταν σταματάει (μεταβατική απόκριση), ο οποίος συνήθως δεν δημιουργεί πρόβλημα.

4.6.6. Απόσβεση ανεμογεννήτριας

Τα χαρακτηριστικά απόσβεσης μιας κατασκευής είναι αυτά που υπαγορεύουν πόσο γρήγορα το σύστημα μπορεί να επανέλθει στην κατάσταση ισορροπίας όταν πάψουν να ενεργούν οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Οι Α/Γ είναι δομές χαμηλής απόσβεσης, δεδομένου ότι δεν υφίσταται σχεδόν καμία δομική (εσωτερική) απόσβεση. Η κύρια απόσβεση προκύπτει από τις αεροδυναμικές δυνάμεις που προκαλούνται από την παλμική κίνηση του δρομέα. Παρόμοιες με αυτές των στεγανωτικών και των τριβένων ρευστού φιλμ, αυτές οι δυνάμεις ρευστών είναι ικανές να προκαλέσουν την ιδιοδιέγερση του συστήματος (σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.11. Αποτελέσματα απόσβεσης σε Α/Γ

Σύμφωνα με την εξίσωση (4.3), η μεταβολή της ώσης ανά μονάδα μήκους είναι ανάλογη της μεταβολής στην αξονική ταχύτητα ανέμου. Έχει υποτεθεί ότι οι μεταβολές αυτές οφείλονται μόνο στις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου, όμως μεταβολές παράγονται και από τη δομική κίνηση των πτερυγίων, οπότε:

$$dU_p = dU_{pwind} + dU_{pblade} = u - x$$

όπου u , είναι η μεταβολή στην αξονική ταχύτητα του ανέμου, και x η δομική ταχύτητα (το πρόσημο είναι θετικό όταν είναι προς τη διεύθυνση του ανέμου). Η εξίσωση (4.3) μπορεί τώρα να ξαναγραφεί ως:

$$F = \Delta \left(\frac{dT}{dr} \right) = 0.5 \rho U_i c \alpha_o (u - x) \quad (4.8)$$

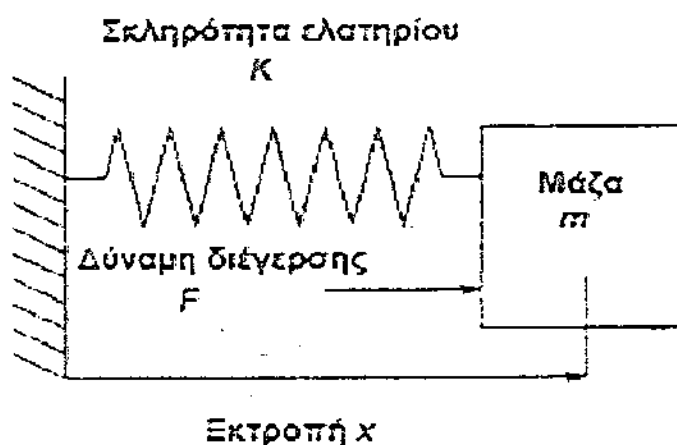
Το σχήμα 4.12 παρουσιάζει ένα απλό μοντέλο με ένα βαθμό ελευθερίας ενός στερεού πτερυγίου χωρίς απόσβεση, προσαρτημένου σε εύκαμπτο υποστήριγμα. Σε αυτήν την περίπτωση, η γενική μορφή των μήτρων της εξίσωσης κίνησης (4.4) ανάγεται στην ακόλουθη μονοδιάστατη μορφή:

$$mx + kx = F \quad \text{ή}$$

$$mx + 0.5 \rho U_i c \alpha_o x + kx = 0.5 \rho U_i c \alpha_o u \quad \text{ή} \quad x + 2\xi \omega_n x + \omega_n^2 x = 2\xi \omega_n u \quad (4.9)$$

όπου $\omega_n (= \sqrt{k/m})$ είναι η συχνότητα συντονισμού και $\xi = (\rho U_i c \alpha_o) / (4m\omega_n)$. Ο αριστερός όρος της εξίσωσης (4.9) περιλαμβάνει την πηγή της αεροδυναμικής απόσβεσης. Στην περίπτωση αυτή ο αεροδυναμικός όρος (ξ) είναι ανάλογος της απόσβεσης (c ή ζ) που απαντάται στη γενική εξίσωση της κίνησης συστημάτων με ένα βαθμό ελευθερίας και που συνήθως εκφράζεται ως:

$$mx + cx + kx = F \quad \text{ή} \quad x + 2\zeta \omega_n x + \omega_n^2 x = \frac{F}{m} \quad \text{όπου:} \quad \zeta = c / \sqrt{4km}.$$



Σχήμα 4.12. Ένα μοντέλο ταλάντωσης πτερυγίου με ένα βαθμό ελευθερίας

Ο όρος ξ επίσης εμφανίζεται στη δεξιά πλευρά της (4.9), που σημαίνει ότι ο μηχανισμός απόσβεσης των φορτίων είναι υπεύθυνος και για τη συλλογή

τους. Κατά συνέπεια, το ξ είναι μάλλον ένας δείκτης της αεροδυναμικής δραστηριότητας, και όχι απλά η απόσβεση. Στην «κρίσιμη απόσβεση», οι δυνάμεις απόσβεσης που απορροφούν τα φορτία και επενεργούν στη δομή, είναι οριακά ικανές να απορροφήσουν την ενέργεια που μεταδίδεται από τα επιβαλλόμενα φορτία πριν το ουδέτερο σημείο. Τότε:

$$c_r = \sqrt{4km}$$

ο οποίος καλείται συντελεστής «κρίσιμης απόσβεσης». Ο λόγος c/c_r ($=\zeta$ ή ξ) είναι γνωστός ως «λόγος απόσβεσης» και εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό επί τοις εκατό.

4.7. Εξαναγκασμένη απόκριση σε μη στοχαστικά φορτία

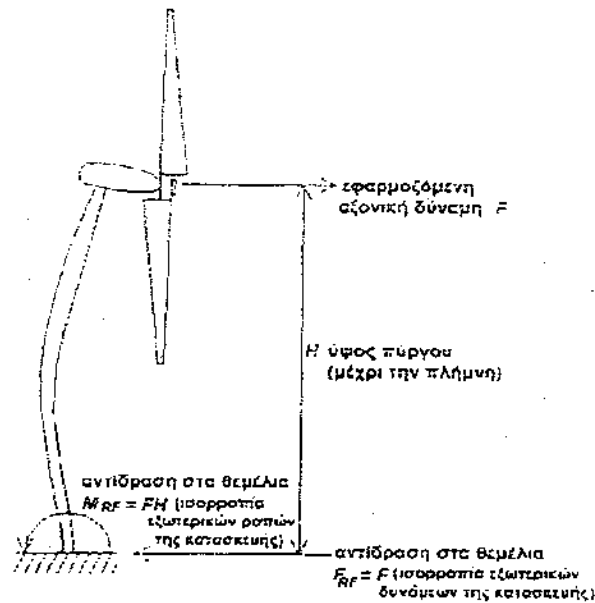
4.7.1. Απλή απόκριση σε στατικά φορτία

Το απλό μοντέλο στατικής απόκρισης μιας δομής στηρίζεται στις ακόλουθες υποθέσεις:

- α) η απόκριση της δομής είναι γραμμική,
- β) επιτρέπεται στη δομή να βρεθεί σε κατάσταση ισορροπίας (δηλ. σε ακινησία) μεταξύ των εφαρμοζόμενων φορτίων και των εσωτερικών αντιδράσεων της δομής.

Τότε, το μέγεθος της εκτροπής εξαρτάται μόνο από την ακαμψία της δομής και το μέγεθος του φορτίου. Αυτό περιγράφεται απλά ως: $F=Kx$, όπου F είναι η δύναμη αποκατάστασης, η οποία ενεργεί αντίθετα προς την κατεύθυνση της εκτροπής x , και k είναι ο συντελεστής ακαμψίας.

Στο σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η στατική απόκριση της δομής μιας ΑΓ σε ένα σταθερό αξονικό φορτίο, που ενδεχομένως οφείλεται στην ώση της μόνιμης ροής του ανέμου στο σύστημα ισχύος. Έχει επέλθει ισορροπία και οι εσωτερικές αντιδράσεις στη δομή, λόγω των ελαστικών επιδράσεων, είναι ίσες με τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις και ροπές. Στο σχήμα, επίσης, συμπεριλαμβάνονται και οι αντιδράσεις της θεμελίωσης.



Σχήμα 4.13. Η στατική απόκριση της δομής μιας A/T σε σταθερό αξονικό φορτίο

4.7.2. Απλή απόκριση σε κυκλικά φορτία

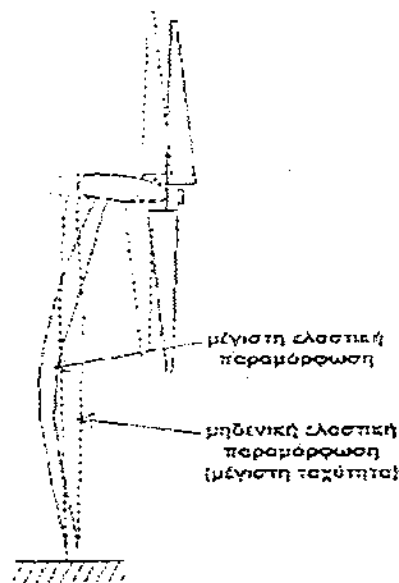
Προκειμένου να βρεθεί η δυναμική απόκριση μιας δομής που υποβάλλεται σε κυκλικά φορτία, συνηθίζεται η εφαρμογή απλοποιήσεων, όπως:

- η απόκριση του συστήματος είναι γραμμική και ψευδο-στατική,
- γραμμική τυπική απόκριση,
- μη γραμμική ψευδο-στατική απόκριση.

«Ψευδο-στατική» σημαίνει ότι η κίνηση της δομής υποδιαιρείται σε μικρά χρονικά διαστήματα, εντός των οποίων το σύστημα αντιμετωπίζεται σαν να είχε φθάσει σε κατάσταση ισορροπίας. Αυτή η υπόθεση είναι ανακριβής, δεδομένου ότι η ακαμψία του ρυθμού έντασης λαμβάνει χώρα στις υψηλές ταχύτητες, η εσωτερική απόσβεση των υλικών της δομής επιφέρει πρόσθετα φορτία που είναι ανάλογα προς το ποσοστό παραμόρφωσης, ενώ επιπρόσθετα φορτία προκύπτουν λόγω της τριβής του ανέμου.

Όταν μια δομή αντιμετωπίζεται ως γραμμική, οι ιδιοσυχνότητες της μπορούν να βρεθούν από την ανάλυση μορφών που περιγράφηκε παραπάνω. Στην πράξη, η εσωτερική απόσβεση μεταβάλλει την τυπική μορφή και τη συχνότητα της ταλάντωσης, αλλά οι συχνότητες που μετρώνται είναι πολύ κοντά σε εκείνες που προβλέπονται με βάση την υπόθεση της γραμμικής συμπεριφοράς. Το σχήμα 4.14 παρουσιάζει την τυπική μορφή ενός φυσικού κραδασμού, η οποία μοιάζει με τη στατική παραμόρφωση της δομής, δεδομένου ότι αυτές οι δύο είναι παρόμοιες στην πράξη. Εντούτοις, το σχήμα αντιπροσωπεύει ένα στιγμιότυπο της παραμόρφωσης της δομής, που

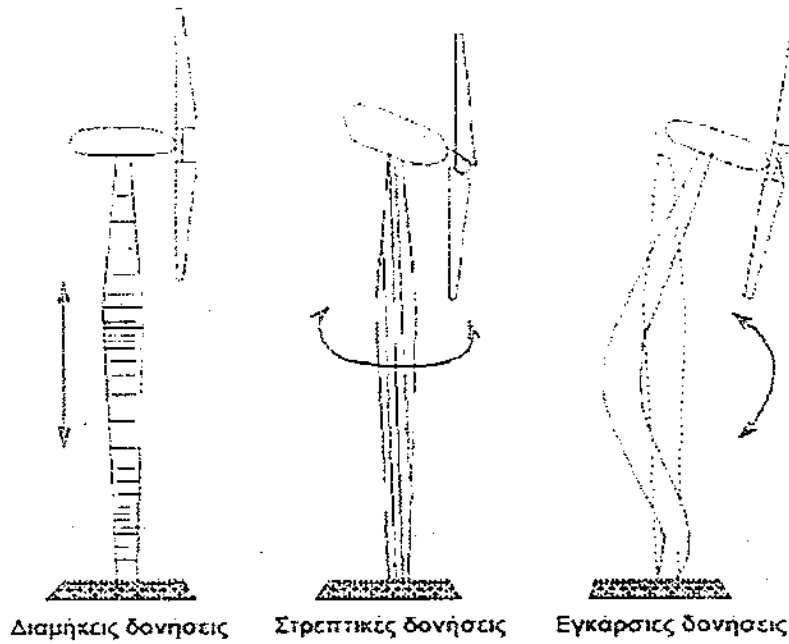
λαμβάνει χώρα σε ένα σημείο κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης όταν η παραμόρφωση γίνεται μέγιστη.



Σχήμα 4.14. Η τυπική μορφή ενός φυσικού κραδασμού

4.7.3. Δυναμική φόρτιση

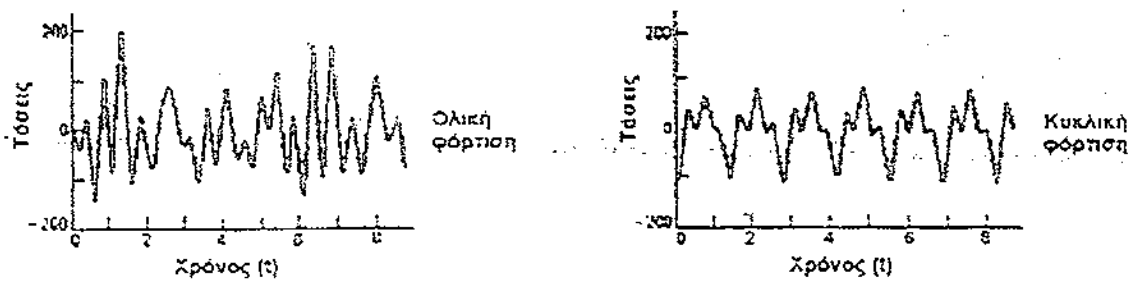
Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζονται οι τρεις πιθανές μορφές απόκρισης ενός πύργου Α/Γ στα εφαρμοζόμενα φορτία, συγκεκριμένα οι διαμήκεις, στρεπτικές και εγκάρσιες αποκρίσεις. Στην πράξη, η πραγματική απόκριση μπορεί να είναι ένας συνδυασμός αυτών των τριών μορφών. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, εάν η εφαρμογή του φορτίου μεταβάλλεται με μια συχνότητα η οποία πλησιάζει τη φυσική συχνότητα της δομής, τότε υπάρχει ένας μηχανισμός με τον οποίο προστίθεται συνεχώς ενέργεια στο σύστημα προκαλώντας μια προοδευτική αύξηση του εύρους της ταλάντωσης, η οποία συνεχίζεται έως ότου εμφανιστεί δομική αστοχία. Αυτό είναι γνωστό ως «δυναμική φόρτιση» της Α/Γ.



Σχήμα 4.15. Οι τρεις κατηγορίες ταλαντώσεων (αποσυνδεδεμένες)

4.8. Εξαναγκασμένη απόκριση σε στοχαστικά φορτία

Η δυναμική απόκριση μιας Α/Γ περιλαμβάνει ένα μη στοχαστικό / κυκλικό στοιχείο παράλληλα με ένα στοχαστικό / τυχαίο, ως αποτέλεσμα της τύρβης του ανέμου. Στο σχήμα 4.16, η χρονική ιστορία αριστερά παρουσιάζει ένα σύνολο ακατέργαστων καταγεγραμμένων δεδομένων, και δεξιά παρουσιάζονται τα ίδια δεδομένα μετά από τη λήψη μέσω τιμών ανά ζώνες ή την αζιμουθιακή διάταξη (τα ακατέργαστα δεδομένα του δείγματος τίθενται σε μια σειρά υποδιαστημάτων και καθορίζονται έπειτα οι μέσες τιμές για κάθε υποδιάστημα). Αυτή η διαδικασία αφαιρεί τις στοχαστικές ταλαντώσεις και τα δεδομένα που παραμένουν είναι μόνο τα μη στοχαστικά.



Σχήμα 4.16. Μετρήσεις εγκάρσιων τάσεων ληφθείσες σε χαρακτηριστική ΑΓΟΑ

Όπως είναι εμφανές, οι δυο πηγές είναι περίπου της ίδιας σημασίας, βάσει τουλάχιστον των τιμών κορυφής. Λόγω της μη γραμμικής φύσης της κόπωσης, ο διπλασιασμός του εύρους της φόρτισης έχει πολύ ισχυρή επίδραση στον ωφέλιμο χρόνο ζωής λόγω κόπωσης. Κατά συνέπεια, η πρόσπτωση φορτίων μεγάλου εύρους προερχόμενα από την τύρβη του αέρα, μπορούν να μειώσουν την αντοχή σε κόπωση της δομής. Επιπλέον, η τύρβη έχει επιπτώσεις σε πολλές άλλες σχεδιαστικές παραμέτρους (π.χ. πρόβλεψη μέγιστων φορτίων, δομική διέγερση, ποιότητα ελέγχου και ισχύος).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο ΚΟΠΩΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

5.1 Διατύπωση κανόνων αστοχίας

Το αναγνωρισμένο πρότυπο για την ανάλυση της κόπωσης των Α/Γ είναι ο νόμος γραμμικής αστοχίας των Palmgren-Miner (κανόνας του Miner), ο οποίος μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή:

$$D = \sum_{i=1}^M \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_M}{N_M} \quad (5.1)$$

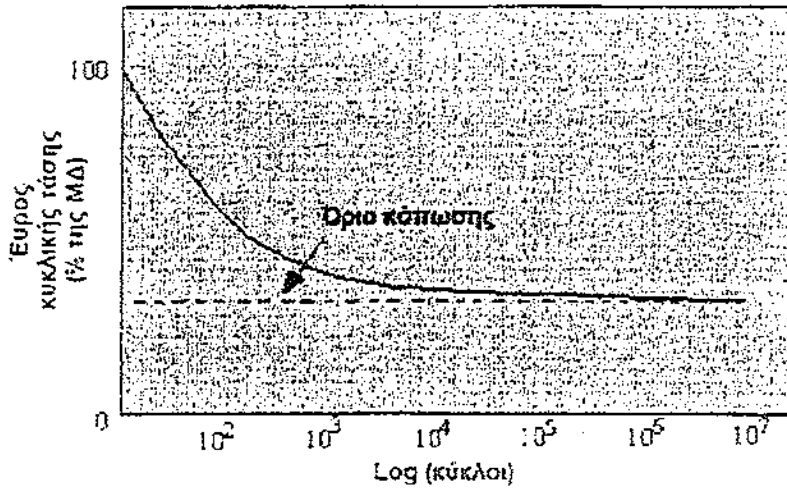
όπου D η συνολική φθορά που υφίσταται μια δομή που υποβάλλεται σε n_1 κύκλους τάσης μέτρου σ_1 , σε n_2 κύκλους τάσης μέτρου σ_2 , και με τον ίδιο τρόπο, για όλα τα επίπεδα τάσης έως το τελικό επίπεδο M . Το N_i είναι ο αριθμός των κύκλων που οδηγεί σε αστοχία σε μέτρο τάσης σ_i . Ο κανόνας του Miner υποθέτει ότι δομική αστοχία θα εμφανιστεί όταν το D γίνει ίσο με τη μονάδα.

Οι κύκλοι κόπωσης που δέχεται μια δομή συνήθως αναλύονται ή μετρώνται κατά τη διάρκεια μιας σταθερής χρονικής περιόδου. Κατά συνέπεια, το D στην εξίσωση (5.1) εκφράζεται συνήθως ως ο ρυθμός φθοράς που συνδέεται με τη χρονική περίοδο t . Εάν ο ρυθμός φθοράς είναι ίσος με το μέσο ρυθμό φθοράς κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής T της συνιστώσας ($\Delta D_t = \Delta D_T$), τότε ο ωφέλιμος χρόνος ζωής τη δομής T είναι το αντίστροφο κλάσμα του ΔD_t , δηλαδή:

$$T = \frac{1}{\Delta D_T} = \frac{1}{\Delta D_t} \quad (5.2)$$

υποθέτοντας ότι η αστοχία συμβαίνει όταν η φθορά ισούται με τη μονάδα, και ότι ο ρυθμός φθοράς που υπολογίζεται για τη χρονική περίοδο t είναι αντιπροσωπευτικός του μέσου ρυθμού φθοράς στον οποίο υπόκειται η δομή κατά τη διάρκεια του ωφέλιμου χρόνου ζωής της.

Ο αριθμός κύκλων N που επιφέρει την αστοχία είναι ένα μέτρο της αντοχής του υλικού σε κυκλική τάση. Αυτή η ιδιότητα του υλικού συνήθως περιγράφεται με την καμπύλη "S-N", που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1. Στην πράξη, η περιγραφή "S-N" των χαρακτηριστικών κόπωσης ενός υλικού συνιστάται σε μια οικογένεια καμπύλων οι οποίες εξαρτώνται από τη μέση τάση (σ_m), και το εύρος (σ_r) ή το πλάτος (σ_a) της κυκλικής τάσης. Η μεταβλητή R ($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) χρησιμοποιείται επίσης εκτενώς στην περιγραφή της καμπύλης "S-N".



Σχήμα 5.1. Μορφή μιας χαρακτηριστικής καμπύλης "S-N"

Εάν υποθεθεί ότι οι κύκλοι κόπωσης που επιβάλλονται στη δομή μπορούν να περιγραφούν από κάποια συνάρτηση των σ_m και σ_a , τότε η εξίσωση (5.1) μπορεί να γραφτεί σε ολοκληρωτική μορφή ως εξής:

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{n(\sigma_m, \sigma_a)}{N(\sigma_m, \sigma_a)} d\sigma_a d\sigma_m \quad (5.3)$$

Σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο, η αποτίμηση της φθοράς γίνεται βάσει του ρυθμού φθοράς ΔD_t . Ξαναγράφοντας την εξίσωση (5.3) ώστε να συμπεριλάβει τη χρονική περίοδο t είναι αντιπροσωπευτικός του μέσου ρυθμού φθοράς με το οποίο επιβαρύνεται η δομή κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής της T , αυτή γίνεται:

$$\frac{1}{T} = \Delta D_T = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{n(\sigma_m, \sigma_a, t)}{N(\sigma_m, \sigma_a)} d\sigma_a d\sigma_m \quad (5.4)$$

Για τις εφαρμογές Α/Γ, ο αριθμός των κύκλων n (*) θεωρείται ως ρητή συνάρτηση της βραχυπρόθεσμης μέσης ταχύτητας του ανέμου U , εκφραζόμενη συνήθως ως μέσος όρος δέκα λεπτών. Η ταχύτητα του ανέμου λαμβάνεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή γιατί τα περισσότερα φορτία, οι παράμετροι απόδοσης και οι αλγόριθμοι ελέγχου συσχετίζονται άμεσα με την βραχυπρόθεσμη μέση ταχύτητα του ανέμου. Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας p_u για την ταχύτητα εισροής του ανέμου U , και εφόσον η Α/Γ λειτουργεί μεταξύ ενός κάτω ορίου ταχύτητας U_{in} και ενός πάνω ορίου U_{out} , τότε:

$$\frac{1}{T} = \Delta D_T = \int_{u_{\min}}^{u_{\max}} p_u(u) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{n(\sigma_m, \sigma_a, U, t)}{N(\sigma_m, \sigma_a)} d\sigma_a d\sigma_m du \quad (5.5)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας p_u τυπικά λαμβάνεται ως η κατανομή της ετήσιας ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή των ΑΓ. Η ολοκληρωτική εξίσωση (5.5) περιγράφει τη φθορά που υφίσταται η ΑΓ κατά τη συνήθη λειτουργία της και συνήθως μετατρέπεται σε πεπερασμένο άθροισμα για λόγους αριθμητικής ανάλυσης. Για την εκτίμηση της ωφέλιμης ζωής της ΑΓ χρειάζονται τρεις κατηγορίες δεδομένων, συγκεκριμένα οι κύκλοι φόρτισης για κόπωση της ΑΓ (ως συνάρτηση των συνθηκών της ροής), η συμπεριφορά S-N των υλικών που εξετάζονται και η ετήσια κατανομή της ταχύτητας του ανέμου.

5.2. Φάσματα φορτίων

Όπως προκύπτει από τα ανωτέρω, το φάσμα των φορτίων κόπωσης $n(\sigma_m, \sigma_a, U)$ σε μια ΑΓ έχει σημαντική επιρροή στη λειτουργική της κατάσταση και περιγράφεται ως συνάρτηση των συνθηκών ροής στην εξίσωση (5.5). Αυτός ο χαρακτηρισμός είναι αρκετά απλοϊκός, καθότι η λειτουργία των ΑΓ επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, εκ των οποίων μόνο ένας είναι η ταχύτητα της ροής του ανέμου. Για λόγους ευκολίας, οι περισσότεροι αναλυτές διαχωρίζουν τις λειτουργικές καταστάσεις της ΑΓ σε σειρές (ανεξάρτητων) λειτουργικών καταστάσεων, οι οποίες περιγράφουν τα διαφορετικά φορτία κόπωσης στις ΑΓ. Τα φορτία επιβίωσης υπό αντίξοες συνθήκες ανέμου συνήθως δεν συμπεριλαμβάνονται στις αναλύσεις κόπωσης.

Ένας τυπικός διαχωρισμός των φορτίων κόπωσης σε μια ΑΓ θα μπορούσε να περιλαμβάνει:

1. Μια σειρά λειτουργικών καταστάσεων που περιγράφουν τα φορτία στην ΑΓ κατά τη διάρκεια της κανονικής της λειτουργίας. Αυτές οι καταστάσεις λαμβάνονται σαν συνάρτηση της ταχύτητας εισροής.
2. Μια σειρά λειτουργικών καταστάσεων έναρξης / διακοπής που περιγράφουν τα φορτία κατά τις φάσεις της κανονικής πέδησης, της αναγκαστικής πέδησης, κ.λ.π.
3. Μια σειρά λειτουργικών καταστάσεων «ρίψισης» που περιγράφουν τα φορτία στην ΑΓ όταν σταματάει, αλλά τα πτερύγια της και άλλα δομικά στοιχεία της πλήττονται από τη ροή του ανέμου.
4. Οποιοσδήποτε πρόσθετες λειτουργικές καταστάσεις που μπορούν να επιφέρουν σημαντικά φορτία κόπωσης στη δομή της ΑΓ και δεν συμπεριλαμβάνονται στις υπόλοιπες τρεις περιπτώσεις.

Μόλις καθοριστούν οι συνθήκες φόρτισης, πρέπει αυτές να χαρακτηριστούν μέσω πειραματικών ή / και αναλυτικών ερευνών. Επειδή όμως οι ΑΓ υπόκεινται σε μεταβλητές ροές ανέμου, αυτό είναι αρκετά δύσκολο. Ο αναλυτής θα πρέπει τυπικά να λάβει ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα των φορτίων που δέχεται η ΑΓ κατά τη διάρκεια της κάθε κατάστασης και να τα

επεξεργαστεί αναλόγως του ρυθμού εμφάνισής τους. Στην παραπάνω λίστα, η πρώτη και τρίτη σειρά λειτουργικών καταστάσεων συνδέονται με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής της ετήσιας ταχύτητας του ανέμου ρ_u , και η δεύτερη σειρά καταστάσεων από τον αριθμό των αναμενόμενων συμβάντων σε κάθε μια από τις περιπτώσεις της.

Σε κάθε περίπτωση, ο στόχος είναι να βρεθεί μια περιγραφή της συνάρτησης $h(\sigma_m, \sigma_a, U)$, η οποία μπορεί να έχει τη μορφή πίνακα ή αναλυτικής έκφρασης, ανάλογα με τον κανόνα φθοράς που έχει επιλεγεί για την πρόγνωση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής, όπως π.χ. ο γραμμικός κανόνας φθοράς της σχέσης (5.5). Η αντίστοιχη μορφή πίνακα ονομάζεται μήτρα μέτρησης των κύκλων λειτουργίας, στην οποία συλλέγονται οι κύκλοι κόπωσης βάσει της μέσης τιμής του πλάτους, του εύρους, της τιμής R , και I ή της ακολουθίας. Η κατανομή της μέτρησης των κύκλων παρουσιάζεται σε μια από τις ακόλουθες μορφές (αναγράφονται με αύξουσα σειρά της διαθέσιμης πληροφορίας):

1. Φάσμα εύρους.
2. Φάσμα πλάτους και μέσης τιμής.
3. Μήτρα Markov.

Το φάσμα εύρους είναι απλά μια στήλη με αριθμημένος κύκλους, οι οποίοι τοποθετούνται σε κατηγορίες βάσει του εύρους τους, δηλαδή μια μονοδιάστατη συνάρτηση. Το φάσμα πλάτους και μέσης τιμής είναι μια δισδιάστατη μήτρα των κύκλων οι οποίοι τοποθετούνται σε ένα δισδιάστατο πίνακα συνόλων βάσει του πλάτους και της μέσης τιμής τους, δηλαδή μια δισδιάστατη συνάρτηση. Η μήτρα Markov διατηρεί τις «κοιλιάδες» και τις «κορυφές» κάθε κύκλου, καθώς και πληροφορίες σχετικά με την ακολουθία τους. Οι τελευταίες αυτές πληροφορίες είναι μια πιθανολογική συνάρτηση που περιγράφει το ποια «κοιλιάδα» διαδέχεται ποια «κορυφή» και το αντίθετο.

Για τη γραμμική ανάλυση της φθοράς δεν απαιτείται η ακολουθία των κύκλων κόπωσης. Κατά συνέπεια, ο χαρακτηρισμός (1) ή (2) αφορά το χαρακτηρισμό της επιλογής του τρόπου ανάλυσης της ΑΓ. Επιπλέον, υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι για τη δημιουργία της συνάρτησης $h(\sigma_m, \sigma_a, U)$, συγκεκριμένα τα δεδομένα των χρονοσειρών, το πεδίο συχνότητας των δεδομένων φάσματος και οι αναλυτικές σχέσεις. Κάθε μια από αυτές τις μεθόδους προκύπτει από πειραματικές έρευνες ή I και αναλυτικές προσομοιώσεις.

5.3. Ιδιότητες των υλικών

5.3.1. Υλικά που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές των ανεμογεννητριών

Τα περισσότερα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ΑΓ είναι αντίστοιχα αυτών που χρησιμοποιούνται σε περιστρεφόμενες μηχανές και πύργους. Κατά συνέπεια, κάθε ΑΓ αποτελείται πρωτίστως από σχετικά

κοινά δομικά υλικά με εκτενείς εφαρμογές και άφθονα δεδομένα σχετικά με τη συμπεριφορά τους. Εντούτοις, τα πτερύγια είναι ελαφρές κατασκευές οι οποίες πρέπει να αντέξουν μεγάλο αριθμό κύκλων κόπωσης στη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής τους, αρκετά περισσότερους από τις πτέρυγες των αεροσκαφών, που αποτελούν τη δομή αναφοράς στις φορτίσεις κόπωσης. Επιπλέον, το κόστος των υλικών που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια των Α/Γ πρέπει να είναι χαμηλό, για την εξασφάλιση ενός εμπορικά βιώσιμου προϊόντος.

Τα πτερύγια των Α/Γ έχουν κατά καιρούς κατασκευαστεί από υλικά που κυμαίνονται από το ξύλο έως τα μέταλλα και τα σύνθετα υλικά. Το ξύλο (ένα σύνθετο υλικό φυσικής προέλευσης) έχει αποδειχθεί επιτυχής επιλογή. Ο σχετικά υψηλός λόγος αντοχής προς βάρος, σε συνδυασμό με την καλή ακαμψία και ελαστικότητα, έχει ως αποτέλεσμα πτερύγια καλής ποιότητας. Το ξύλο χρησιμοποιήθηκε εκτενώς στις πρώτες Α/Γ και παραμένει προσφιλές στους κατασκευαστές μικρών και μεσαίων Α/Γ. Εντούτοις, τα έμφυτα προβλήματα του ξύλου σχετικά με τη σταθερότητα των επιπέδων υγρασίας και την ποιότητα των ενώσεων έχουν αναγκάσει τους σχεδιαστές να εξετάσουν και άλλα υλικά.

Τα μέταλλα ήταν αρχικά ένα δημοφιλές υλικό λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής και της υψηλής αξιοπιστίας τους. Εντούτοις, τα περισσότερα πτερύγια από χάλυβα αποδείχτηκαν σχετικά βαριά, και αυτό έχει περιορίσει την εφαρμογή τους στις εμπορικές Α/Γ. Ελαφρύτερα μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, έχουν βρει μερικές εφαρμογές. Σήμερα, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται κατ'εξοχήν για την κατασκευή πτερυγίων, λόγω της υψηλής τους αντοχής και ακαμψίας, καθώς και της σχεδιαστικής προσαρμοστικότητας τους στα φορτία.

5.3.2. Φορτίο κόπωσης και φάσμα τάσης

Σε κατασκευή, καταπονούμενη από υψηλά και ποικίλα φορτία όπως η Α/Γ, η φθορά από κόπωση υπολογίζεται από τα μεγέθη και τις συχνότητες των κυκλικών τάσεων ή από το φάσμα της τάσης σε κρίσιμες περιοχές. Η μορφή της διαδρομής μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής συνήθως αγνοείται και μόνο το μέγεθος και ο αριθμός της ελάχιστης και μέγιστης τάσης σχεδιάζεται.

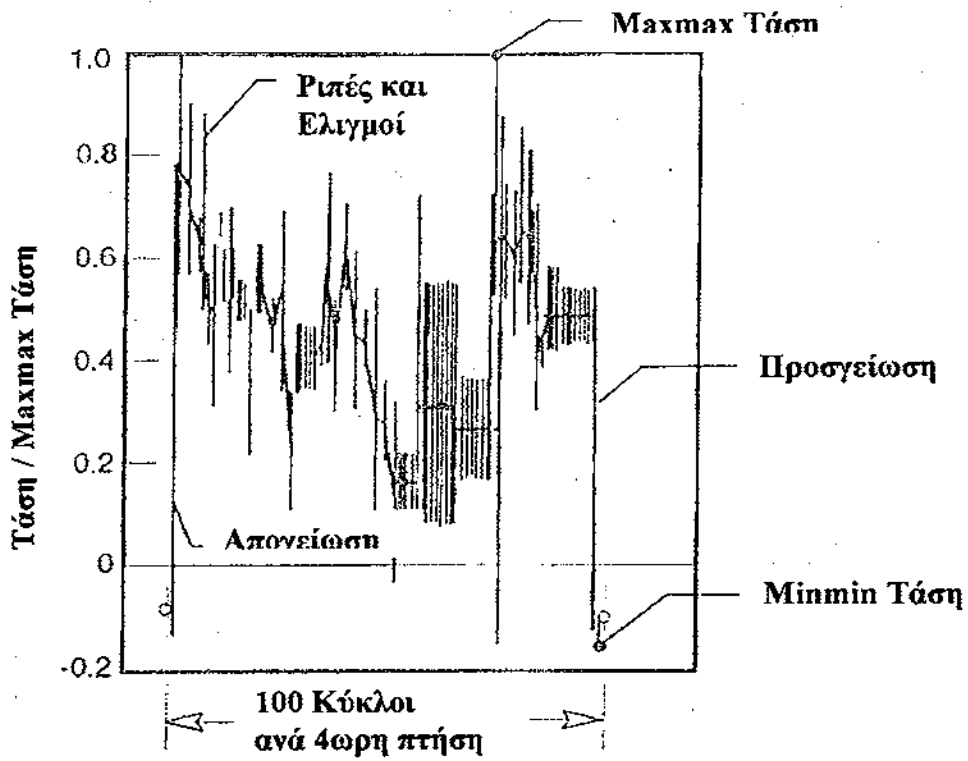
5.3.3. Δείγμα φάσματος τάσης

Το σχήμα 5.2 αποτελεί ένα παράδειγμα ενός ιδανικού φάσματος τάσης για ένα συμβατικό μη περιστρεφόμενης δομής αντικείμενο σε φορτίο κόπωσης. Σ' αυτή την περίπτωση η δομή είναι ένα φτερό ενός βομβαρδιστικού αεροσκάφους, το B-52G-H, το οποίο υφίσταται ένα τεστ κόπωσης εδάφους, πλήρους κλίμακας το 1960. Το φάσμα παρουσιάζει ένα τυπικό ιστορικό τάσης σε μια περιοχή της δομής, με φορτία που ασκούνται για να εξομοιώσουν μια 4ωρη πτήση. Μπορούμε να θεωρήσουμε αυτό το διάγραμμα ως την εξιδανίκευση της εξόδου της τάνυσης του ιμάντα που προσαρμόζεται στο

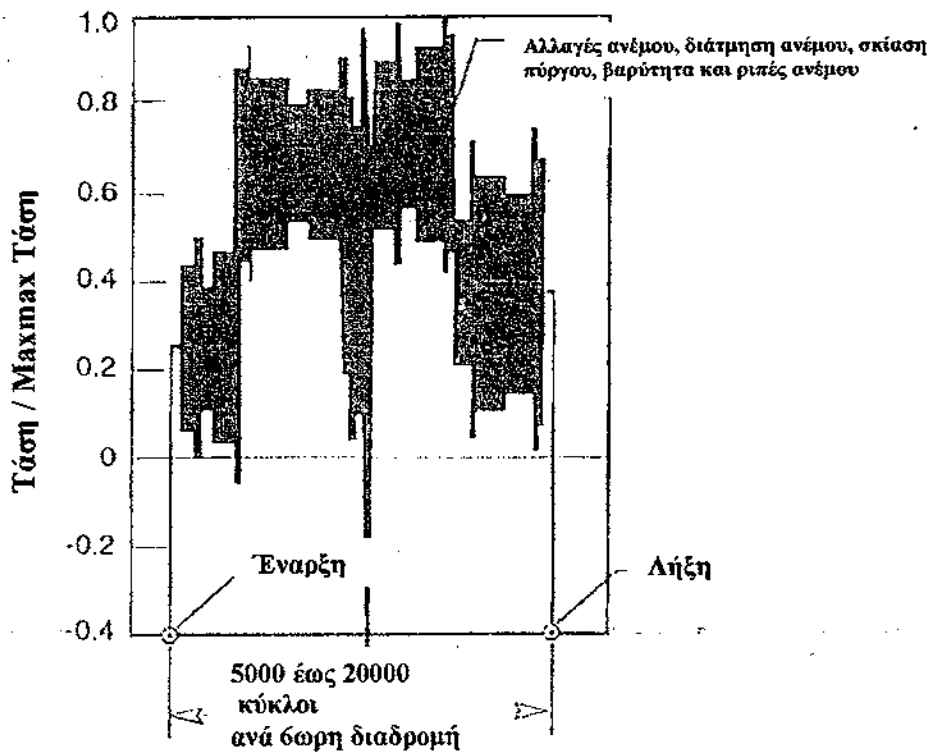
φτερό σ' εκείνο το σημείο. Για να προσδιορίσουμε πρότυπα τάσης ή φορτίου, είναι σωστό να βαθμονομήσουμε τα δεδομένα, σ' αυτή την περίπτωση, διαχωρίζοντας όλες τις τιμές από το μέγιστο όλων των μέγιστων τάσεων ή φορτίων των κύκλων στο φάσμα. Η ελάχιστη τιμή είναι προφανώς προσδιορισμένη.

Κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης της 4ωρης πτήσης, το δείγμα του φτερού του αεροπλάνου υποβλήθηκε σε περίπου 100 μετρήσιμους και συγκεκριμένους κύκλους φορτίου κόπωσης, που είναι ένας μέσος όρος μόνο 0.4 crm. Έτσι, συγκεκριμένοι κύκλοι φορτίων χωρίζονται σε περιόδους στοιχειώδους σταθερής τάσης. Μια μερική αναστροφή των φορτίων βαρύτητας πραγματοποιείται μόνο μια φορά ανά πτήση, με παροδικές τάσεις, να προκαλούν τον αποκαλούμενο κύκλο «έδαφος -αέρας-έδαφος» (ground-air-ground (GAG)). Το πλάτος του GAG ισούται με το $\frac{1}{2}$ της διαφοράς μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης. Πλάτη ενδιάμεσων κύκλων φορτίων είναι γενικά μικρά κλάσματα του πλάτους του GAG.

Το σχήμα 5.3 παριστάνει ένα ιστορικό τάσης, που είναι κοινό προς τους ανεμοστρόβιλους, με τα δεδομένα ξανά βαθμονομημένα από την μέγιστη τάση του φάσματος. Το διάγραμμα παρουσιάζει δεδομένα για μια 6ωρη πτήση, κατά την οποία η ταχύτητα του ανέμου ήταν αρχικά χαμηλή, έγινε μεγάλη και σφοδρή στα μισά της πτήσης και μετά μειώθηκε προς το κλείσιμο. Σε αντίθεση με το σχήμα 5.2, θα ήταν τυπικά, περίπου 5000 έως 20000 μετρήσιμοι κύκλοι κόπωσης από τάση κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, αριθμός που ποικίλλει ανάλογα με τη διάμετρο του ρότορα για δοθείσα ταχύτητα ενός πτερυγίου έλικας. Αυτές οι εκτιμήσεις για τις απαιτήσεις στη διάρκεια ζωής ενός ανεμοστρόβιλου βασίζονται σε ποσοστά περιστροφής (κύκλων) από 15 έως 60 crm, αρκετά μεγαλύτερα από αυτά του δείγματος του φτερού του βομβαρδιστικού αεροσκάφους.



Σχήμα 5.2. Δείγμα ενός ιδανικού φάσματος τάσης που χρησιμοποιείται για πλήρης κλίμακας εξέτασης κόπωσης ενός τυλικού αεροσκάφους bomber.



Σχήμα 5.3. Δείγμα ιδανικού φάσματος τάσης ενός πτερυγίου A/T

Τα εξαρτήματα των ανεμοστρόβιλων υποβάλλονται επίσης στο αντίστοιχο ενός GAG κύκλου, σ' αυτή την περίπτωση τον «start-run-stop» κύκλο που δείχνεται στο σχήμα 5.3. Επιπρόσθετα, υπάρχουν άλλοι τύποι κύκλων κόπωσης, που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν από τον σχεδιαστή. Ένας από αυτούς λαμβάνει χώρα το λιγότερο μια φορά ανά περιστροφή ρότορα και προκαλείται από την βαρύτητα, τη διάτμηση του ανέμου, τη σταθερή παραμόρφωση της εσωτερικής ροής και από τον μικρής κλίμακας στροβιλισμό.

Συγκεκριμένοι κύκλοι κόπωσης σε κύρια εξαρτήματα μπορούν να συμβούν πολύ πιο συχνά από μια φορά ανά περιστροφή ρότορα, κάτω από δύο γενικές συνθήκες:

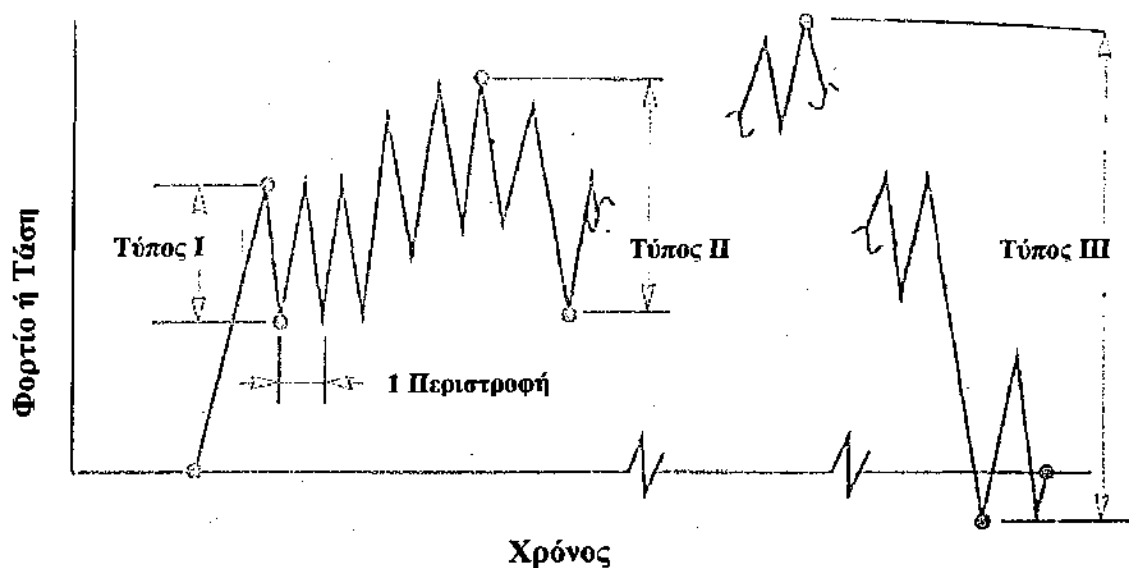
1. Όταν το αρχικό φορτίο στο εξάρτημα σχετίζεται με το πέρασμα του πτερυγίου της έλικας, στην οποία περίπτωση ο αριθμός των κύκλων κόπωσης ανά περιστροφή ισούται με των αριθμό των πτερυγίων, και
2. Όταν παρατηρείται συντονισμός, στην οποία περίπτωση υπάρχουν ω / Ω κύκλοι κόπωσης ανά περιστροφή.

Εδώ το ω είναι η φυσική συχνότητα του εξαρτήματος και Ω είναι η ταχύτητα του ρότορα και το πηλίκο τους είναι τυπικά ίσο με 3 ή μεγαλύτερο.

Ένας άλλος τύπος κύκλου κόπωσης συμβαίνει κατά τη διάρκεια πολλών περιστροφών του ρότορα. Αυτός ο τύπος προκαλείται από μεγάλης κλίμακας στροβιλισμό, όπως μια θύελλα που περιβάλλει ολόκληρο το ρότορα, και μακροπρόθεσμες αλλαγές στη σταθερή ταχύτητα του ανέμου στην πλευρά του ανεμοστρόβιλου.

Εξαιτίας της πολύπλοκης φύσης του ιστορικού ενός φορτίου ή μιας τάσης, απαιτείται μια συστηματική διαδικασία για την αναγνώριση και τη μέτρηση του κάθε ξεχωριστού κύκλου κόπωσης σε ένα φάσμα. Μια υπολογιστική μέθοδος χρησιμοποιείται για την συμβατότητα με το αναλυτικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για να προβλέψουμε τη διάρκεια ζωής από κόπωση. Από την εκτίμηση της διάρκειας ζωής από κόπωση, ο υπολογισμός των κύκλων δεν μπορεί να διαχωριστεί από το μοντέλο της ζωής από κόπωση.

Ένα απλό μοντέλο υπολογισμού των κύκλων που θα περιγραφεί εδώ, έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στο σχεδιασμό του NASA/DOE Mod -1, Mod-2 και Mod-5B, πειραματικών HAWTs και στην ανάλυση του πεδίου των πειραματικών δεδομένων από αυτούς και άλλους στρόβιλους. Όπως δείχνεται στο σχήμα 5.4, ένα ιστορικό του φορτίου ή της τάσης, υποτίθεται ότι αποτελείται από τρεις τύπους κύκλων:



Σχήμα 5.4. Ιδανικοί τύποι κύκλων κόπωσης

- Τύπος I:** Από το ελάχιστο έως το μέγιστο κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής του ρότορα.
- Τύπος II:** Από το ελάχιστο έως το μέγιστο κατά τη διάρκεια μιας αλλαγής της ταχύτητας του ανέμου μεγάλης κλίμακας.
- Τύπος III:** Από το ελάχιστο έως το μέγιστο κατά τη διάρκεια μιας πτήσης από την έναρξη έως τη λήξη.

Με αυτό το μοντέλο υπολογισμού, ο αριθμός των κύκλων κόπωσης κατά τη διάρκεια μιας δοθείσας περιόδου ισούται με τη διάρκεια της διαδρομής που διαχωρίζεται από το μέσο όρο ταχύτητας του ρότορα (Τύπος I) συν τον αριθμό των αλλαγών στην ταχύτητα του ανέμου (Τύπος II) συν ένα κύκλο Τύπου III.

Η αναγνώριση του Τύπου II των κύκλων απαιτεί κάποια κριτική στον τομέα του αναλυτή. Άλλα μοντέλα έχουν βελτιωθεί, έτσι ώστε να περιέχουν αυτόματα τις επιδράσεις του παροδικού ανέμου και τις συνθήκες ελέγχου. Μια πολύ χρήσιμη βελτίωση είναι το μοντέλο βροχόπτωσης, το οποίο συμπεριλαμβάνεται στο λογισμικό των συστημάτων δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην απεικόνιση φορτίων και τάσεων, επειδή μπορεί να εφαρμοστεί αξιόπιστα σε ένα γενικό φάσμα. Το μοντέλο βροχόπτωσης είναι ο πιο κοινός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των κύκλων κόπωσης, κατά τη διάρκεια της ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων από τις ΑΓ.

Μετά από την αναγνώριση καθενός από τους κύκλους στο φάσμα και αφού έχουν πινακοποιηθεί οι παράμετροι του καθενός, απαιτείται μια στατιστική ανάλυση για να μετατραπεί το ιστορικό των δεδομένων σε πληροφορίες σχεδιασμού κόπωσης. Ως παράδειγμα, ο πίνακας 5.1 περιέχει μια λίστα

Πίνακας 5.1. Δείγμα φάσματος φορτίου κόπωσης κατά χρονική σειρά

Αριθμός Στρώματος	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Κύκλοι ανά Στρώμα	Φορτίο / Maxmax Φορτίο				R _i
			Max	Min	Cyclic	Average	
Start	5.4	0	-0.400	-0.400	0.000	-0.400	1.00
1	"	908	0.433	0.061	0.186	0.247	0.14
2	"	333	0.496	-0.002	0.249	0.247	-0.00
3	"	605	0.383	0.111	0.136	0.247	0.29
4	"	1.059	0.463	0.030	0.217	0.247	0.06
5	"	91	0.525	-0.030	0.278	0.248	-0.06
6	"	30	0.550	-0.055	0.303	0.248	-0.10
7	9.4	613	0.880	0.446	0.217	0.663	0.51
8	"	56	0.923	0.405	0.259	0.664	0.44
9	"	1.951	0.855	0.473	0.191	0.664	0.55
10	"	1.115	0.787	0.540	0.124	0.664	-0.69
11	"	1.673	0.828	0.498	0.165	0.663	0.60
12	"	167	0.903	0.423	0.240	0.663	0.47
13	15.6	237	0.645	0.192	0.227	0.419	0.30
14	"	415	0.798	0.038	0.380	0.418	0.05
15	"	356	0.740	0.098	0.321	0.419	0.13
16	"	36	0.918	-0.080	0.499	0.419	-0.09
17	"	12	0.968	-0.130	0.549	0.419	-0.13
18	"	130	0.863	-0.025	0.444	0.419	-0.03
19	18.3	3	0.838	-0.471	0.655	0.184	-0.56
20	"	37	0.710	-0.343	0.527	0.184	-0.48
21	"	67	0.447	-0.080	0.264	0.184	-0.18
22	"	118	0.632	-0.265	0.449	0.184	-0.42
23	"	101	0.561	-0.195	0.378	0.183	-0.35
24	"	10	0.778	-0.411	0.595	0.184	-0.53
25	13.0	1.305	0.890	0.520	0.185	0.705	0.58
26	"	130	0.976	0.433	0.272	0.705	0.44
27	"	870	0.841	0.568	0.137	0.705	0.68
28	"	1.522	0.918	0.491	0.214	0.705	0.54
29	"	44	1.000	0.410	0.295	0.705	0.41
30	"	478	0.950	0.460	0.245	0.705	0.48
31	7.2	927	0.527	0.206	0.161	0.367	0.39
32	"	139	0.702	0.031	0.336	0.367	0.04
33	"	1.622	0.626	0.108	0.259	0.367	0.17
34	"	1.390	0.588	0.145	0.222	0.367	0.25
35	"	46	0.732	0.002	0.365	0.367	0.10
36	"	510	0.666	0.068	0.299	0.367	0.10
Stop	5.4	0	-0.400	-0.400	0.000	-0.400	1.00
Φάσμα:	9.6	19,105	0.724	0.299	0.212	0.511	0.37

ακολουθίας φορτίων υπολογισμένη για το πτερύγιο μιας ΑΓ. Αυτό είναι ένα από τα πολλά φάσματα φορτίου που βελτιώθηκε κατά το νοητικό σχεδιασμό του 2.5-MW Mod-2 HAWT. Η περίοδος διαδρομής χωρίζεται πρώτα σε στρώματα ποικίλων διαρκειών, κατά τη διάρκεια που η ταχύτητα του ανέμου, το μέγιστο φορτίο και το ελάχιστο φορτίο είναι αντίστοιχα σταθερά. Τρεις

άλλες παράμετροι που εμφανίζονται συχνά σε μοντέλα διαδικασίας κόπωσης προσδιορίζονται ως εξής:

$$L_{avg} = 0.5(L_{max} + L_{min})$$

$$L_{cyc} = 0.5(L_{max} - L_{min})$$

$$R_f = L_{min} / L_{max}$$

όπου,

L_{max} , L_{min} = τα μέγιστα και ελάχιστα φορτία σε ένα κύκλο κόπωσης (N ή Nm)

L_{cyc} = κυκλικό ή μισής κλίμακας φορτίο. Επίσης μέγεθος φορτίου (N ή Nm)

L_{avg} = μέσο φορτίο (N ή Nm)

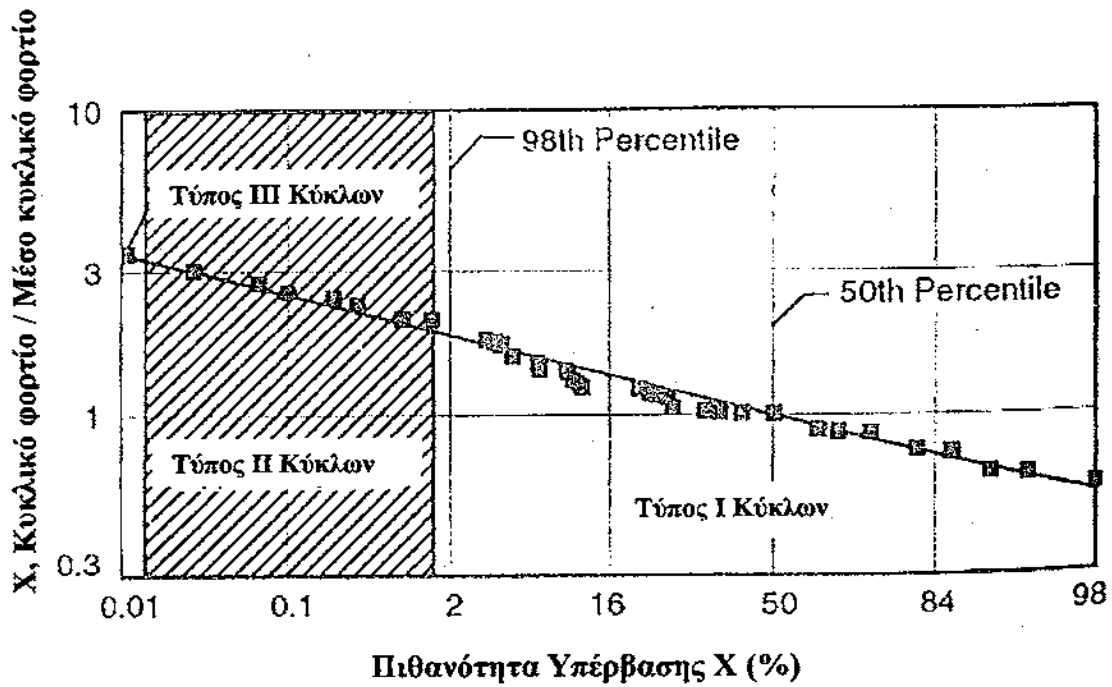
R_f = παράμετρος σχήματος του κύκλου κόπωσης. Επίσης καλείται και ποσοστό R.

Εξαρτώμενη από τη μηχανική φθορά που υιοθετούμε στο μοντέλο, η διάρκεια ζωής μπορεί να εκφραστεί ως μια λειτουργία της μέγιστης τάσης, της κυκλικής τάσης, ή ως ένας συνδυασμός αυτών των δύο. Στους υπολογισμούς μας θα επιλέξουμε την κυκλική τάση ως το κλειδί-παράμετρος της φθοράς από κόπωση. Τα στρώματα στο φάσμα είναι επαναπροσδιορισμένα σύμφωνα με το μέγεθος των κυκλικών φορτίων και το μέγεθος του Τύπου III των κύκλων για τη διαδρομή τοποθετείται στην κορυφή. Τα ποσοστά των κυκλικών φορτίων ομαλοποιούνται αντίστοιχα στο απόλυτο ποσοστό κυκλικού φορτίου στο φάσμα. Τα αποτελέσματα βρίσκονται στην πρώτη στήλη του πίνακα 5.2.

Στη συνέχεια, ο αριθμός των στρωμάτων προστίθενται διαδοχικά για να επιτύχουν τον αριθμό των κύκλων με φορτία ίσα ή μεγαλύτερα από ένα δοθέν ποσοστό φορτίου. Διαχωρίζοντας το μέσο όρο των κύκλων από το ολικό πλήθος (19106 κύκλοι), παράγονται οι πιθανότητες της υπέρβασης στην τέταρτη στήλη του πίνακα 5.2. Οι τύποι κύκλων σημειώνονται στην πέμπτη στήλη, με τους Τύπους I και II να διαχωρίζονται αυθαίρετα σε ένα δύο τοις εκατό πιθανότητα υπέρβασης. Αυτά τα δεδομένα σχεδιάζονται στο σχήμα 5.5 του οποίου η κλίμακα της τεταγμένης είναι λογαριθμική. Η τετμημένη ή κλίμακα της υπέρβασης είναι γραμμική σε σταθερές αποκλίσεις από την απόλυτη για μια κανονική κατανομή φορτίου κατά Gauss. Η ευθεία γραμμή που αντιστοιχεί στα δεδομένα στο σχήμα 5.5 αντιπροσωπεύει μια κανονική λογαριθμική κατανομή φορτίου, που υποδεικνύει ότι υπάρχει μια τυχαία κατανομή φορτίου του λογαρίθμου των επιλεγμένων. Η κορυφή αυτής της γραμμής διαχωρίζεται από την σταθερή λογαριθμική απόκλιση της, που υπολογίζεται ως εξής:

$$\log \sigma(X) = \log_{10} \left[\frac{X(16th \text{ Percentile})}{X(50th \text{ Percentile})} \right] = \log_{10} \left(\frac{1.36}{1.00} \right) = 0.135$$

όπου,
 $\log \sigma()$ = σταθερή απόκλιση του λογαρίθμου του ().



Σχήμα 5.5. Τυπική λογαριθμική-κανονική πιθανότητα εξάπλωσης των δεδομένων για κυκλικά φορτία μιας Α/Γ

Πίνακας 5.2. Δείγμα φάσματος φορτίου κόπωσης σύμφωνα με το κυκλικό φορτίο

Κυκλικό Φορτίο/ Μέσο Κ.Φορτίο	Κύκλοι ανά Στρώμα	Επισωρευτικοί Κύκλοι	Πιθανότητα Υπέρβασης	Τύπος Κύκλου
3.46	1	1	0.0001	III
3.08	3	4	0.0002	II
2.80	10	14	0.0007	II
2.58	12	26	0.0014	II
2.48	37	63	0.0033	II
2.35	36	99	0.0052	II
2.11	118	217	0.0113	II
2.09	130	347	0.0182	II
1.79	415	762	0.0399	I
1.78	101	863	0.0452	I
1.72	36	909	0.0476	I
1.58	139	1.048	0.0549	I
1.51	356	1.404	0.0735	I
1.42	30	1.434	0.0751	I
1.41	510	1.944	0.1018	I
1.39	44	1.988	0.1041	I
1.31	91	2.079	0.1088	I
1.28	130	2.209	0.1157	I
1.24	67	2.276	0.1192	I
1.22	1.622	3.898	0.2041	I
1.22	55	3.953	0.2070	I
1.17	333	4.286	0.2244	I
1.15	478	4.764	0.2494	I
1.13	167	4.931	0.2582	I
1.07	237	5.168	0.2706	I
1.04	1.390	6.558	0.3434	I
1.02	613	7.171	0.3755	I
1.02	1.059	8.230	0.4309	I
1.00	1.522	9.752	0.5105	I
0.90	1.951	11.703	0.6126	I
0.88	908	12.611	0.6601	I
0.87	1.305	13.916	0.7284	I
0.78	1.673	15.589	0.8160	I
0.76	927	16.516	0.8645	I
0.64	870	17.386	0.9100	I
0.64	605	17.991	0.9416	I
0.58	1.115	19.106	1.0000	I

5.3.4. Σχεδιασμός των συναρτήσεων της τάσης των φορτίων

Ο σχεδιασμός των συναρτήσεων των τάσεων είναι πειστικά εργαλεία για την έκθεση των αντίστοιχων επιδράσεων της διαμόρφωσης και των λειτουργικών αλλαγών και η γενική διαδικασία για την προετοιμασία τους είναι η ακόλουθη:

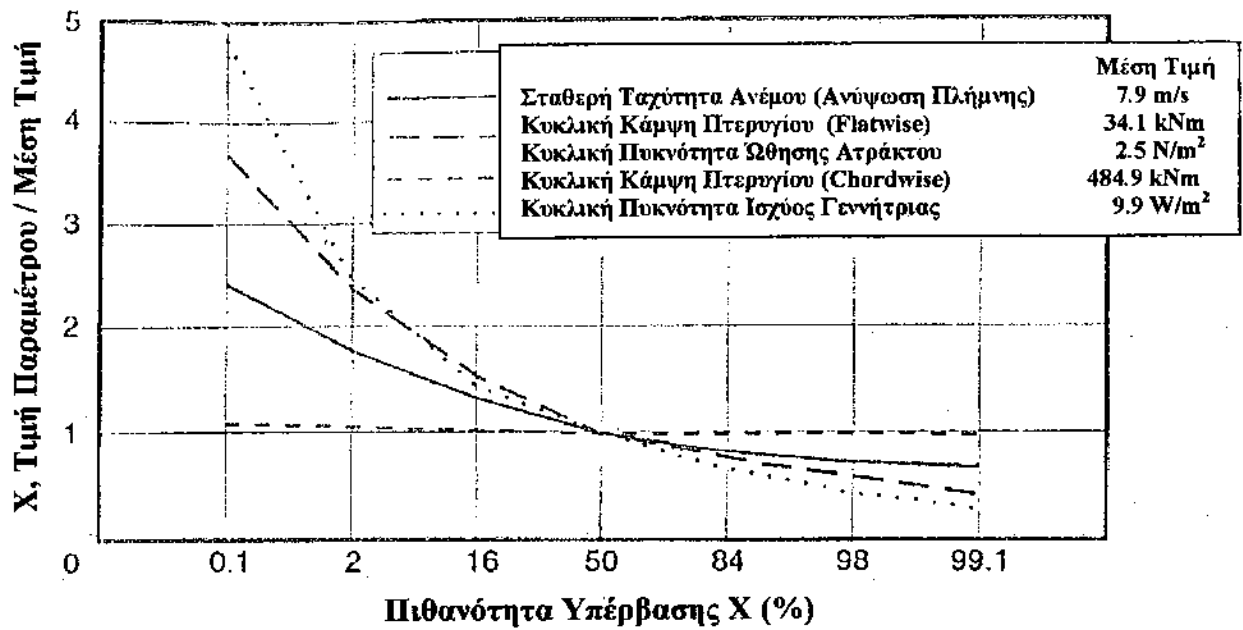
- Προσδιορισμός μιας βασικής γραμμής διαμόρφωσης και υπολογισμός μιας βασικής γραμμής για τα φορτία κόπωσης.
- Διακύμανση μιας παραμέτρου ως ανεξάρτητη ενώ κρατούμε σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους στις βασικές τους τιμές ή διαβαθμίζοντας τις συναρτήσει της ανεξάρτητης.
- Υπολογισμός των φορτίων για τις αλλαγμένες διαμορφώσεις και ομαλοποίηση καθενός από αυτά από τη βασική γραμμή φορτίων.
- Σχεδιασμός των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα φορτίου συναρτήσει της ανεξάρτητης παραμέτρου για επιθυμητές πιθανότητες υπέρβασης.

5.3.5. Βασική διαμόρφωση και φορτία

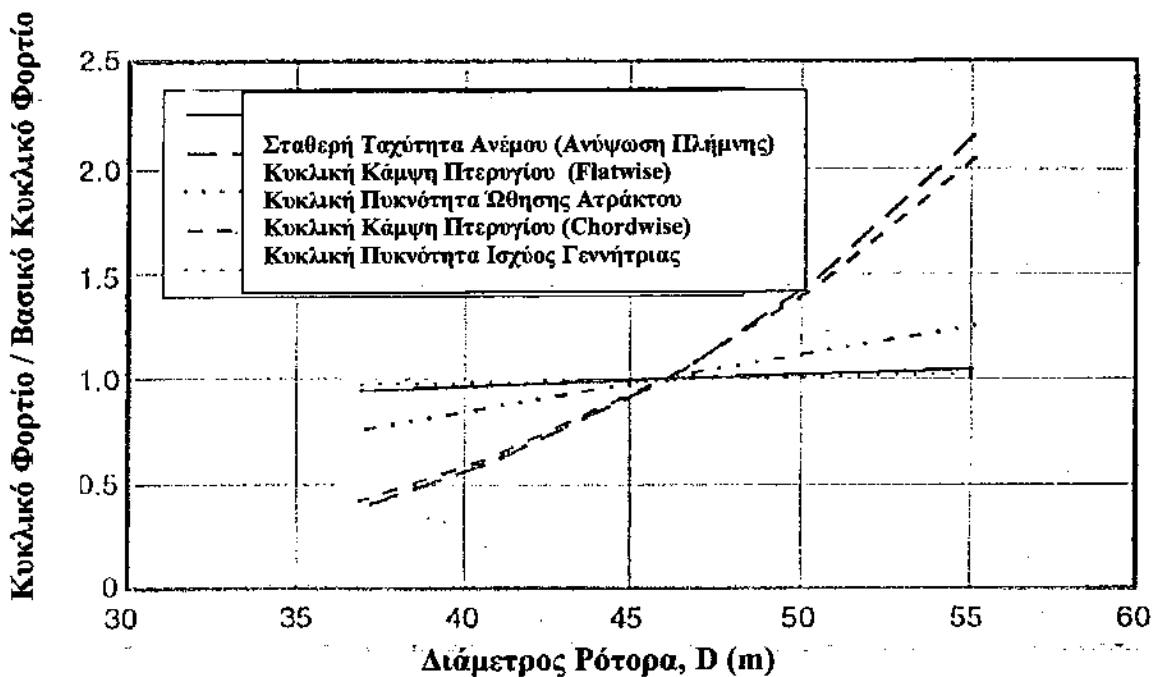
Μια βασική διαμόρφωση που αντιπροσωπεύει τη μέση κλίμακα των δεδομένων του ρότορα, του πύργου και της τοποθεσίας στους πίνακες 5.1 και 5.2 μπορεί να προσδιοριστεί στα πλαίσια των ακόλουθων παραμέτρων και συντελεστών:

$D=46.0\text{m}$	$U_0=7.9\text{m/s}$
$P_R=410\text{kW}$	$U_2=14.3\text{m/s}$
$\delta_3=0\text{ deg}$	$M_z=456\text{kNm}$
$c_1=0.80\text{m}$	$\theta=5\text{ deg}$
$Z=660\text{m}$	$s=6.6\%$
$H=38.0\text{m}$	$\alpha_0=0.40$
$N=30.0\text{rpm}$	$\alpha=0.232$
$\Omega_c=152\text{crpm}$	Τύπος πύργου= κελυφοειδής upwind του ρότορα

Το σχήμα 5.6 παρουσιάζει την πιθανότητα της κατανομής του ανέμου και των φορτίων κόπωσης όπως υπολογίζονται στη βασική περίπτωση. Παρατηρούμε ότι η μικρή πιθανότητα, όπου τα υψηλών ποσοστών κυκλικά φορτία είναι τα πιο καταστρεπτικά στην κόπωση, μπορούν να είναι 2.5 έως 5 φορές τα ενδιάμεσα κυκλικά φορτία στη βασική μας Α/Γ. Επειδή οι στιγμές chordwise στα μεγαλύτερα ΗΑWΤs κυριαρχούνται από τη δύναμη της βαρύτητας, τυπικά έχουν μια μικρής κλίμακας διαμόρφωση για τα απόλυτα επίπεδα τους.



Σχήμα 5.6. Πιθανότητα εξάπλωσης φορτίων κόπωσης και ανέμου υπολογισμένα για το βασικό δείγμα HAWT. (Διάμετρος = 46 m, υπολογισμένη ισχύς = 410 kW)



Σχήμα 5.7. Τυπικός σχεδιασμός διαγράμματος που δείχνει τις σχετικές μεταβολές στα φορτία κόπωσης καθώς το μέγεθος ενός HAWT μεταβάλλεται.

5.3.6. Επίδραση της αλλαγής της διαμέτρου του ρότορα

Για να παρουσιαστεί το σχήμα της A/G καθώς ποικίλει το σχήμα του, θα πρέπει να εκφραστούν διάφορες παράμετροι στα πλαίσια της διαμέτρου του ρότορα ή ως εξής:

$$\begin{aligned} c_1 &= 0.0174D \text{ m} \\ H &= 0.826D \text{ m} \\ N &= 1380/D \text{ m} \\ N/\omega_c &= 0.20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_0 &= 7.9(D/46.0)^{0.232} \text{ m/s} \\ U_2 &= 1.81U_0 \text{ m/s} \\ P_R &= 0.194D^2 \text{ kW} \\ M_0 &= 456(D/46.0)^3 (c_1/0.80) \text{ kNm} \end{aligned}$$

Υπολογίζοντας ξανά τα φορτία, καθώς η διάμετρος μεταβάλλεται $\pm 20\%$ από τη βασική που είναι 46 m, ομαλοποιώντας τα αποτελέσματα από τα βασικά φορτία για να επιτευχθούν τα ποσοστά των φορτίων και κάνοντας διάγραμμα των αποτελεσμάτων, δημιουργείται το διάγραμμα του σχήματος 5.7. Αυτά τα ποσοστά φορτίων εφαρμόζονται σε όλες τις πιθανότητες υπέρβασης. Τα κυκλικά φορτία του πτερυγίου της έλικας μεταβάλλονται τα περισσότερα από τις αλλαγές της κλίμακας, καθώς η πυκνότητα της κυκλικής ισχύος της γεννήτριας αλλάζει πολύ λιγότερο.

Οι τάσεις των φορτίων στο σχήμα 5.7 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστούν οι τάσεις της τάσης όταν το μέγεθος της A/G μεταβάλλεται αλλά η γεωμετρία του παραμένει η ίδια. Στα εξαρτήματα της A/G, όπως τα πτερύγια της έλικας και τους πύργους, η εφελκυστική τάση είναι αυτή που «οδηγεί» το σχεδιασμό και ο συντελεστής διατομής είναι η παράμετρος της δύναμης. Επειδή οι συντελεστές διατομής, διατομών όμοιων γεωμετρικά είναι ανάλογοι του κύβου των αντίστοιχων διαστάσεων τους, συνεπάγεται ότι:

$$\frac{\text{εφελκυστική τάση}}{\text{βασική εφ. τάση}} = \left(\frac{\text{χρόνος εφελκυσμού}}{\text{βασικός χρόνος εφελκυσμού}} \right) \frac{D_0^3}{D^3} \quad (5.6\alpha)$$

όπου D_0 είναι η βασική διάμετρος. Οι χρόνοι εφελκυσμού στον πύργο είναι ανάλογοι της πυκνότητας εκτόξευσης επί τον κύβο της διαμέτρου, έτσι:

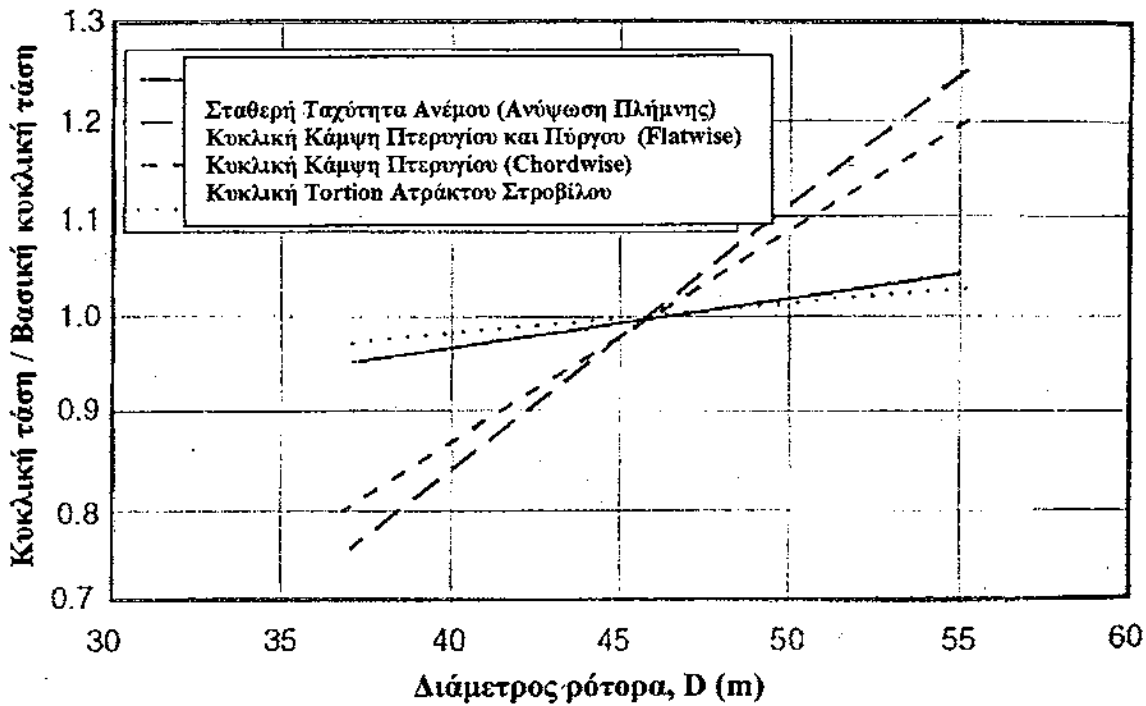
$$\frac{\text{εφ. τάση πύργου}}{\text{βασική εφ. τάση πύργου}} = \frac{\text{πυκνότητα ώθησης ατράκτου}}{\text{βασική πυκνότητα ώθησης ατράκτου}} \quad (5.6\beta)$$

Η ροπή στην άτρακτο της A/G είναι ανάλογη της πυκνότητας της ισχύος επί τον κύβο της διαμέτρου και έτσι είναι συντελεστής ροπής. Έτσι:

$$\frac{\text{διατμητική τάση ατράκτου}}{\text{βασική διατ. τάση ατράκτου}} = \frac{\text{πυκνότητα ισχύος γεννήτριας}}{\text{βασική πυκν. ισχύος γεννήτριας}} \quad (5.6\gamma)$$

Συνδυάζοντας τα δεδομένα στο σχήμα 5.7 με τις εξισώσεις (5.6) δημιουργούμε το διάγραμμα της τάσης της τάσης στο σχήμα 5.8. Εδώ βλέπουμε ότι οι κυκλικές εφελκυστικές τάσεις στο πτερύγιο της έλικας και στον πύργο σε γεωμετρικά όμοια HAWTs αυξάνονται γραμμικά με το

συντελεστή κλίμακας σε μια πρώτη προσέγγιση. Αυτό είναι όμοιο με μια γνωστή ιδιότητα κλίμακας σε δέσμες προβόλων που φορτίζονται από το δικό τους βάρος. Με άλλα λόγια, μια βασική ΑΓ μπορεί να μειώσει την κλίμακα της δίχως να αυξήσει τις τάσεις κόπωσης στα πτερύγια και τον πύργο, αλλά όχι να την αυξήσει.



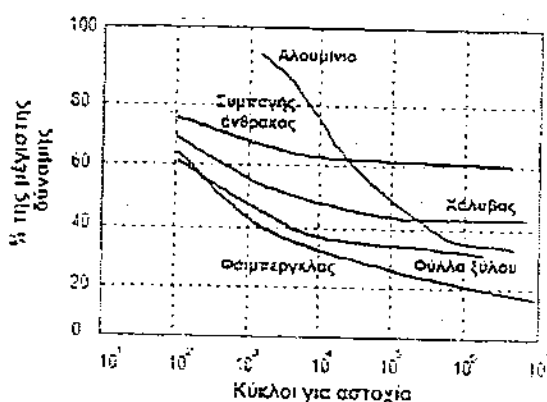
Σχήμα 5.8. Καμπύλη τάσης της τάσης κόπωσης παραγόμενη από την καμπύλη της τάσης του φορτίου. Σε γεωμετρικά όμοιες ανεμογεννήτριες οι τάσεις κόπωσης μεταβάλλονται γραμμικά με τη διάμετρο του ρότορα, καθώς οι κυκλικές τάσεις της ατράκτου παραμένουν σχετικά σταθερές

5.3.7. Χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων κόπωσης

Η υποβολή δοκιμών σε κύκλους κόπωσης και ο υπολογισμός του αριθμού των κύκλων φόρτισης έως ότου επέλθει η αστοχία είναι η βασική μέθοδος καθορισμού των χαρακτηριστικών κόπωσης των υλικών. Στις δοκιμές κόπωσης σταθερού εύρους, με τυπικά δεδομένα της μορφής S-N, απεικονίζεται ο αριθμός των κύκλων N που απαιτούνται για να αστοχήσει το δοκίμιο στο επίπεδο της τάσης (ή έντασης) S . Σε αυτήν την περίπτωση, οι πειραματικές διαδικασίες αποφέρουν οι ίδιες τους κύκλους αστοχίας ως συνάρτηση του πλάτους των κύκλων, κρατώντας το μέσο όρο ή το λόγο R

σταθερό. Από αυτή τη διαδικασία παράγεται μια οικογένεια καμπυλών, οι οποίες περιγράφουν τη συμπεριφορά κόπωσης του υλικού

Οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται σε αυτές τις καμπύλες χαρακτηρίζονται με τη χρήση διαφόρων τυποποιημένων τεχνικών. Πρώτη απ' όλες είναι η καθαυτή παρουσίαση της οικογένειας των καμπυλών S-N (σχήμα 5.9). Αυτή η απλή παρουσίαση μπορεί να είναι λίγο παραπλανητική, δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται διάφορες μορφές του S και του N. Ειδικότερα, το μέτρο του S μπορεί να επιλεγεί ώστε να αναπαριστά το εύρος του κύκλου, το πλάτος του, το μέγιστο του κύκλου (εφελκυσμός) ή το ελάχιστο του (θλίψη). Επιπλέον, αυτές οι τιμές μπορεί να ομαλοποιούνται με τη χρήση της μέγιστης δύναμης εφελκυσμού ή θλίψης.



Σχήμα 5.9. Το σχήμα αυτό δίδει μια οικογένεια καμπυλών S-N.

Ο αριθμός n των κύκλων είναι συνήθως ο αριθμός των πλήρων κύκλων που οδηγούν σε αστοχία, αλλά μπορεί επίσης να είναι ο αριθμός των διασταυρώσεων (καμία διασταύρωση) ή ο αριθμός αντιστροφών (δύο για κάθε πλήρη κύκλο). Κατά συνέπεια, κάποιος πρέπει να είναι προσεκτικός με τα δεδομένα S-N, ιδιαίτερα όσον αφορά τους ορισμούς των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν τα δεδομένα. Εκτός από την ανωτέρω παρουσίαση της οικογένειας των καμπυλών, διάφορες άλλες γραφικές και μαθηματικές περιγραφές των δεδομένων έχουν αποδειχθεί χρήσιμες. Μια πολύ δημοφιλής γραφική τεχνική είναι το διάγραμμα Goodman σταθερής ζωής, και οι λογαριθμο-γραμμικές τεχνικές προσαρμογής καμπυλών.

5.4. Χαρακτηριστικά της εισροής

Ο προσδιορισμός της φθοράς σε μια ΑΓ στηρίζεται στην ανάπτυξη ενός φάσματος φορτίων αυτής. Όπως φαίνεται στην εξίσωση (5.6), η χαρακτηριστική διατύπωση του κανόνα φθοράς χρησιμοποιεί τη συνάρτηση

πυκνότητας της πιθανότητας της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου ως πρωτεύουσα παράμετρο στην περιγραφή του φάσματος των φορτίων. Η κατανομή Weibull έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική στην απεικόνιση της ετήσιας κατανομής ταχύτητας του ανέμου επάνω από περίπου 3 m/s, σε μεγάλο αριθμό περιοχών παγκοσμίως.

Αυτή η διπαραμετρική κατανομή λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$p_u = \frac{\alpha}{\beta} \left[\frac{U}{\beta} \right]^{\alpha-1} \exp \left\{ - \left[\frac{U}{\beta} \right]^\alpha \right\} \quad \text{για } U > 0 \quad (5.7)$$

όπου p_u είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, α και β οι συντελεστές μορφής κι πλάτους αντίστοιχα ($\alpha > 0$, $\beta > 0$). Η κατανομή Rayleigh είναι μια ειδική περίπτωση της κατανομής Weibull, όπου $\alpha = 2$. Επιπλέον, η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου \bar{U} , δίνεται συναρτήσει των παραμέτρων της Weibull από τη σχέση:

$$\bar{U} = \beta \Gamma \left[1 + \frac{1}{\alpha} \right] \quad (5.8)$$

όπου $\Gamma \left[1 + \frac{1}{\alpha} \right]$ είναι η γνωστή συνάρτηση Γάμα.

5.5. Βασικές υποθέσεις σχετικά με τη διαδικασία επίλυσης

Η επίλυση της εξίσωσης (5.6), για το ρυθμό φθοράς σε κάποιο τμήμα της Α/Γ, μπορεί να λάβει αρκετές μορφές, αναλόγως των υποθέσεων που έχουν γίνει αναφορικά με τα χαρακτηριστικά. Αν και οι περισσότερες λύσεις της εξίσωσης (5.6) είναι αριθμητικής μορφής, υπάρχει και λύση κλειστής μορφής. Όπως με όλες τις λύσεις, και ειδικότερα με τις λύσεις κλειστής μορφής, οι υποθέσεις προ της επίλυσης είναι πολύ σημαντικές, και συνοψίζονται στα ακόλουθα.

Οι κυκλικές τάσεις υποτίθεται ότι έχουν τη μορφή γενικευμένης κατανομής Weibull, ανάλογης της σχέσης (5.7), και η τυπική απόκλιση τους υποτίθεται ότι εξαρτάται άμεσα από τη μέση ταχύτητα του ανέμου. Κατόπιν, η εξάρτηση λαμβάνει τη μορφή μιας εκθετικής σχέσης, όπως:

$$\sigma = K \sigma_{char} \left(\frac{U}{U_{char}} \right)^p \quad (5.9)$$

όπου K είναι ο συντελεστής συγκέντρωσης των τάσεων, που συσχετίζει τις συνολικές τάσεις με τις τοπικές, και σ_{char} η σταθερή απόκλιση της κατανομής των κύκλων μέτρησης για την ταχύτητα του ανέμου U_{char} . Υποθέτουμε ότι όλοι οι κύκλοι τάσης έχουν την ίδια μέση τιμή σ_m . Ο ρυθμός εμφάνισης αυτών των κύκλων υποτίθεται ότι ακολουθεί μια εκθετική σχέση της μορφής:

$$F = f_0 + f_1 \left(\frac{U}{U_{char}} \right) + f_2 \left(\frac{U}{U_{char}} \right) \quad (5.10)$$

Όσον αφορά στη συμπεριφορά των υλικών, η καμπύλη S-N απεικονίζεται ως ευθεία σε μια λογαριθμική κλίμακα της μορφής:

$$\sigma = CN^{-1/m} \quad \text{ή} \quad \log(\sigma) = \log(C) - \frac{1}{m} \log(N) \quad (5.11)$$

Μια γενικότερη μορφή της παραπάνω εξίσωσης που χρησιμοποιείται συνήθως στην ανάλυση κόπωσης είναι η ακόλουθη:

$$N(\sigma_a, \sigma_m) = C \left(\frac{\sigma_a}{1 + K \frac{|\sigma_m|}{\sigma_u}} \right)^b \quad (5.12)$$

όπου η διόρθωση Goodman, βασισμένη στη μέγιστη τάση σ_u , χρησιμοποιείται για να περιλάβει την επίδραση της σταθερής μέσης τάσης σ_m .

Πρέπει να σημειωθεί ότι, ο κανόνας του Miner υποθέτει ότι η αστοχία εμφανίζεται όταν η φθορά γίνει ίση με τη μονάδα, δηλαδή όταν ο ρυθμός φθοράς ΔD_i για έναν αντιπροσωπευτικό χρόνο t στη σχέση (5.6) πολλαπλασιασμένος με την αναμενόμενη διάρκεια ζωής T γίνει ίσος με τη μονάδα. Εντούτοις, ανάλογα με το υλικό και το φάσμα φόρτισης, η αστοχία μπορεί να εμφανιστεί σε τιμές του D που ποικίλλουν ευρέως. Τέλος, υποτίθεται ότι η A/G είναι διαθέσιμη για ένα ετήσιο τμήμα A της λειτουργικής διάρκειας ζωής της, και ότι λειτουργεί σε όλες τις ταχύτητες ανέμου μεταξύ του 0 και της ταχύτητας διακοπής λειτουργίας U_{out} .

5.6. Άλλοι παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στην κόπωση των ανεμογεννητριών

Είναι σημαντικό για τη σχεδίαση των πτερυγίων να μην επιδεινώνουν την επίδραση των κυκλικών δυνάμεων. Ορισμένα σχήματα πτερυγίων πρέπει να αποφεύγονται προκειμένου να μειωθεί η προοπτική της πρόωρης αστοχίας λόγω κόπωσης. Οι απότομες αλλαγές στο σχήμα των πτερυγίων (όπως στην περιοχή της σύνδεσης βάσης / πλήμνης) μπορεί να δράσουν ως περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, αναγκάζοντας την τάση διαρροής του υλικού να ξεπεραστεί τοπικά, με αποτέλεσμα την απαρχή ρωγμών. Η καταστροφή αρκετών αεροσκαφών τύπου Comet στη δεκαετία του '60 οφειλόταν σε τέτοιο σχεδιαστικό λάθος, συγκεκριμένα στην πολύ μικρή ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες των παραθύρων στην άτρακτο του σκάφους.

Η σχεδίαση των ενώσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική στην κατασκευή των πτερυγίων. Παραδείγματος χάριν, διαπιστώθηκε ότι οι ενώσεις στα άκρα με

επικολλήσεις στα ξύλινα πολυστρωματικά πτερύγια ήταν ιδιαίτερα ευαίσθητες σε αστοχία κόπωσης. Μια απλή τροποποίηση, με αντικατάσταση των αρμών με μόρσο (μπόλια) (αγκιστρωτές ενώσεις) στις ενώσεις με επικολλήσεις μείωσε σημαντικά τα ποσοστά αστοχίας. Από την άλλη, ακόμη και για ένα υλικό ανθεκτικό σε κόπωση, οι περιβαλλοντικές επιδράσεις μπορούν να μειώσουν γρήγορα την αντοχή του.

Αυτό μπορεί να εμφανιστεί με δύο κυρίως τρόπους:

- Μπορεί να τροποποιηθεί η τοπογραφία της επιφάνειας των πτερυγίων. Ως εκ τούτου, τα μικρά διαβρωτικά κοιλώματα από την πρόσκρουση άμμου ή /και βροχής μπορεί να δράσουν ως συγκεντρωτές τάσεων κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης, προκαλώντας την έναρξη τοπικών ρωγμών. Η διαβρωτική επίθεση κατά μήκος των ορίων των κρυστάλλων στα μέταλλα ενεργεί κατά τρόπο παρόμοιο, δημιουργώντας θύλακες έναρξης ρωγμών που οδηγούν σε αστοχία μεταξύ των ορίων των κόκκων. Για μεγάλα πτερύγια από πλαστικό ενισχυμένο με γυαλί (GRP) και ξύλινα πολυστρωματικά πτερύγια, η διάβρωση μπορεί να εμφανιστεί κοντά στα ακροπτερύγια, όπου οι ταχύτητες περιστροφής φθάνουν τα 100 m/s.
- Οι ιδιότητες των πρώτων υλών μπορεί να αλλάξουν, μειώνοντας κατά συνέπεια την αντοχή σε κόπωση καθ' όλο το πάχος των πτερυγίων ή μέσα στα επιφανειακά στρώματα. Ένα παράδειγμα αυτού είναι η είσοδος υγρασίας στα ξύλινα πολυστρωματικά πτερύγια, είτε σε μη προστατευμένες περιοχές τους, είτε κατά μήκος του χείλους εκφυγής τους όπου μπορεί να παρατηρηθεί αποκόλληση του υλικού.

Για τους λόγους αυτούς πρέπει να εφαρμόζονται προστατευτικά επιστρώματα κατά την κατασκευή των πτερυγίων και να ελέγχονται τακτικά κατά τη διάρκεια της συντήρησης. Για προστασία από αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες, η επιφάνεια των ξύλινων πτερυγίων συνήθως καλύπτεται από ένα εποξικό προστατευτικό φιλμ. Παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται στα πτερύγια των ελικοπτέρων. Το χείλος προσβολής των πτερυγίων πρέπει πάντα να προστατεύεται και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

6.1. Εισαγωγή

Η δομή των ανεμογεννητριών παρουσιάζει πολλά δύσκολα προβλήματα κατά το σχεδιασμό της κόπωσης επειδή:

1. είναι λεπτές και ελαστικές
2. υπόκεινται σε κραδασμούς και δονήσεις
3. εφαρμόζονται πάνω τους φορτία που δεν προσδιορίζονται εύκολα
4. εκτίθενται σε παντός καιρού συνθήκες
5. ανταγωνίζονται συνεχώς με άλλες μορφές ενέργειας εξαιτίας του κόστους του κύκλου ζωής τους

Έχει επιτευχθεί βελτίωση στις ανεμογεννήτριες, εξαιτίας του ότι έχει σημειωθεί πρόοδος στην κατανόηση των φορτίων κόπωσης, στο σχεδιασμό αεροδυναμικών αποκρίσεων των ασταθών ανέμων και στο σχεδιασμό καινοτόμων δομικών στοιχείων για να μειωθούν αυτές οι αποκρίσεις. Σ' αυτό το κεφάλαιο περιγράφουμε τα είδη των φορτίων κόπωσης στις ανεμογεννήτριες, στατιστικές αναλύσεις των φορτίων αυτών, εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό των φορτίων κατά τη διάρκεια του αρχικού σχεδιασμού και σχεδιαστικές προσεγγίσεις της κόπωσης.

Η σειρά που ακολουθείται για να επιτευχθεί η ανάλυση της κόπωσης έχει ως εξής:

1. Ορισμός της διαμόρφωσης του συστήματος
2. Καθορισμός του εξωτερικού περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένων των φορτίων των ανέμων και των συνθηκών που επικρατούν
3. Προσδιορισμός των δυναμικών φορτίων του συστήματος, ο μέσος όρος τους και τα κυκλικά φορτία
4. Υπολογισμός των τοπικών μέσων όρων και κυκλικών τάσεων σε κρίσιμες περιοχές
5. Υπολογισμός τοπικής ζωής από κόπωση χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα υλικών και μια θεωρία περί φθοράς

6.2. Δομικοί σχεδιαστικοί οδηγοί

Είναι μια κοινή μηχανική πρακτική να διαχωρίζονται δομικές σχεδιαστικές απαιτήσεις σε τρεις γενικούς τομείς, όπως ακολουθεί:

-Όριο αντοχής, για να αντισταθεί η συσκευή στα υψηλότερα φορτία, που αναμένονται κατά τη διάρκεια της δομικής της ζωής.

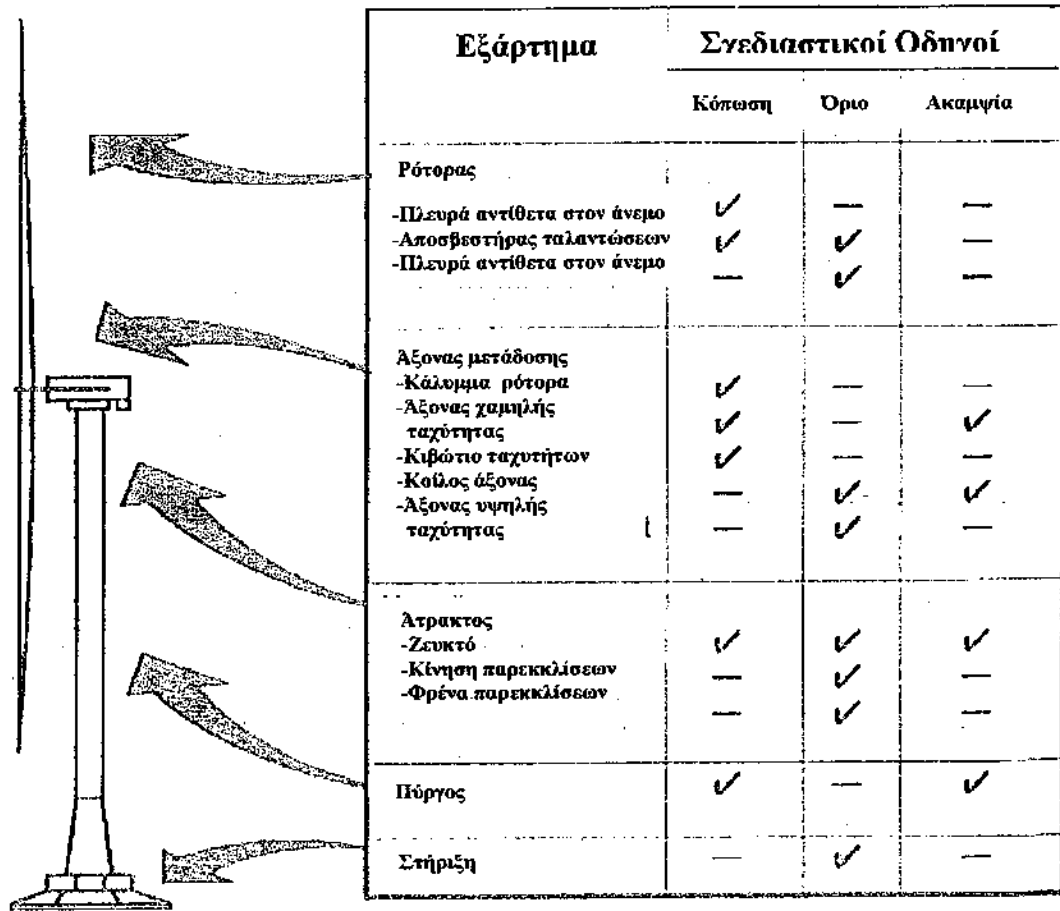
-Διάρκεια κόπωσης, για να αντισταθεί η συσκευή στα μικρότερα φορτία για μια καθορισμένη διάρκεια ζωής, με ή χωρίς επισκευές.

-Ακαμψία, για να ρυθμίσει τις εκτροπές και τις συχνότητες ταλαντώσεων εντός συγκεκριμένης κλίμακας για να αποφευχθούν οι κραδασμοί.

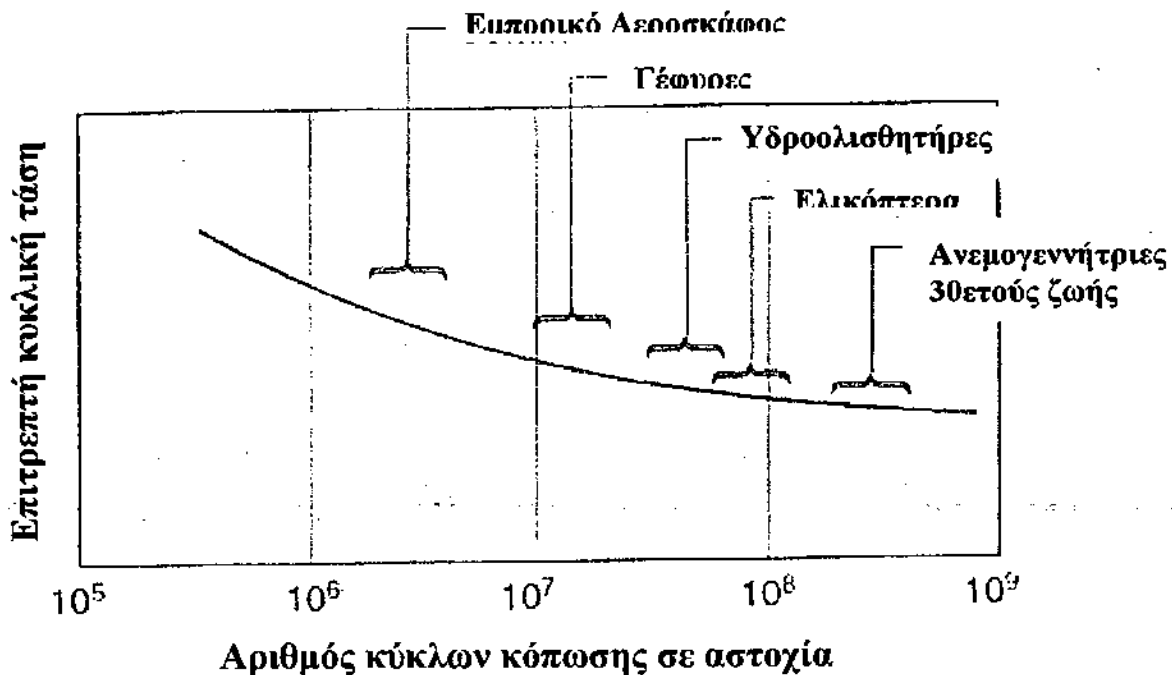
Όλες οι δομικές και μηχανολογικές συνιστώσες υπόκεινται σ' αυτούς τους τρεις τομείς, τουλάχιστον σε κάποιο βαθμό. Ο τομέας που αφορά στην τελική συλλογή των υλικών, της διαστασιολόγησης, της βιομηχανικής εξέλιξης και της επιθεωρητικής διαδικασίας αναφέρεται ως ο *σχεδιαστικός οδηγός* του εξαρτήματος. Οι απαιτήσεις αυτού του σχεδιασμού συνήθως ακολουθείται πιστά από τη σπουδαιότητα ενός δεύτερου τύπου απαίτησης, στην οποία περίπτωση ο σχεδιασμός μπορεί να αναφέρεται ως *ισορροπημένος*.

Το σχήμα 6.1 παριστάνει ένα τυπικό πρότυπο οδηγών σχεδιασμού για ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα. Γενικά, η κόπωση είναι ένας οδηγός σχεδιασμού για το μισό, το λιγότερο, της αρχικής δομής ενός HAWT. Αυτό, ακόμα αφήνει μεγάλες περιοχές της ανεμογεννήτριας που είναι σχεδιασμένες για οριακά φορτία και για ανάγκη ακαμψίας για κατάλληλη τοποθέτηση, φυσιολογικών συχνοτήτων.

Ο λόγος για τον οποίο οι απαιτήσεις για την κόπωση που συχνά οδηγούν το , της πλειοψηφίας της αρχικής δομής μιας ανεμογεννήτριας είναι ότι οι ανεμογεννήτριες πρέπει να επιτυγχάνουν μεγάλη διάρκεια ζωής προκειμένου να είναι οικονομικοί. Η διάρκεια ζωής από κόπωση



Σχήμα 6.1. Το σχήμα αυτό δίνει τα βασικά δομικά και μηχανικά εξαρτήματα σε ένα HAWT.



Σχήμα 6.2. Σχηματική καμπύλη S-N που υποδεικνύει την ασθηρότητα στις απαιτήσεις της κόπωσης που αφορά στις A/G συγκρινόμενη με αυτή άλλων δομικών συστημάτων.

εκφράζεται συνήθως από την περίοδο των κύκλων σε αστοχία, που είναι ο αριθμός των επαναλήψεων των σημαντικών φορτίων που μπορούν να υφίστανται πριν αρχίσουν να εμφανίζονται οι ρωγμές και αυξηθούν σε ένα επιτρεπτό μήκος.

Όπως δείχνεται στο σχήμα 6.2 από μια καμπύλη επιτρεπτής κυκλικής τάσης συναρτήσει του αριθμού των κύκλων αστοχίας στην κυκλική τάση (γνωστό ως καμπύλη S-N), η διάρκεια ζωής από κόπωση είναι πολύ ευαίσθητη στο μέγεθος της ποικιλίας των τάσεων. Δίνουμε έμφαση σ' αυτό, θέτοντας τη διάρκεια ζωής σε λογαριθμική κλίμακα. Ο σχεδιασμός της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών περιέχει περισσότερα κυκλικά φορτία απ' ότι έχουν τα αεροπλάνα, οι γέφυρες και τα ελικόπτερα, γι' αυτό οι κυκλικές τάσεις σε μια ανεμογεννήτρια θα πρέπει να είναι μικρότερες απ' τις επιτρεπόμενες των προηγούμενων μηχανημάτων.

Τα πτερύγια, η πλήμνη και η άτρακτος του στροβίλου HAWT υπόκεινται σε πλήρεις αναστροφές ενός μεγάλου νεκρού φορτίου σε κάθε περιστροφή του ρότορα. Αυτοί οι μεγάλοι κύκλοι φορτίου βαρύτητας είναι σπάνιοι ακόμη και αν αντέχουν από άλλα συναρμολογούμενα μέρη. Συνήθως συναντώνται σε ένα κομμάτι, όπως στον άξονα τροχού ενός οχήματος. Μπορούμε σύντομα να υπολογίσουμε τον αριθμό των κύκλων βαρύτητας που πρέπει ο ρότορας ενός HAWT να αντέξει στη διάρκεια ζωής του, υποθέτοντας μια ταχύτητα 90 m/s και έναν on-line χρόνο 7000 ωρών / χρόνο. Σ' αυτή τη βάση ένας ρότορας διαμέτρου 30 m θα αντέξει πάνω από 700000000 αναστροφές του νεκρού του βάρους σε μια διάρκεια ζωής 30 χρόνων. Ο αριθμός αυτός ποικίλει ανάλογα με τη διάμετρο του ρότορα για σταθερή ταχύτητα.

Τα όρια αντοχής είναι συνήθως κρίσιμα, όταν μια ανεμογεννήτρια λειτουργεί για έναν καθορισμένο μέγιστο άνεμο. Αυτό δεν είναι μια συνθήκη λειτουργίας, έτσι ο σχεδιασμός του ορίου αντοχής μιας ανεμογεννήτριας είναι κανονικά ένα συμβατικό πρόβλημα φορτίων ανέμου σε μια στατική κατασκευή. Επιπλέον, συμβατικά στοιχειώδη μοντέλα με φυγοκεντρική ακαμψία είναι κατάλληλα για τον προσδιορισμό της ακαμψίας, έτσι ώστε οι φυσικές συχνότητες δόνησης να «πέσουν» σε επιτρεπτά όρια.

6.3. Διαδικασίες σχεδιασμού κόπωσης

Όταν έχει προσδιοριστεί το φάσμα των φορτίων κόπωσης για κρίσιμες περιοχές σε μια ανεμογεννήτρια, το πρόβλημα του σχεδιασμού των εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας να αντισταθεί σ' αυτά τα φορτία για τη διάρκεια ζωής του σχεδιασμού γίνεται αυτό για το οποίο είναι διαθέσιμες οι αποδεκτές και ελεγμένες διαδικασίες. Οι καθιερωμένες διαδικασίες ανάλυσης της τάσης χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν το φάσμα των φορτίων σε φάσμα τάσης και οι επιτρεπτές τάσεις κόπωσης βασίζονται σε καθιερωμένες εργαστηριακές δοκιμές των υλικών της κατασκευής.

Υπάρχουν λίγα που είναι μοναδικά για τη θεωρία της κόπωσης και τη διαδικασία του σχεδιασμού της κόπωσης που εφαρμόζονται στις

ανεμογεννήτριες, καθώς το φάσμα των φορτίων έχει καθοριστεί. Το σχήμα 6.2 δίδει μια από τις μερικές διαφορές μεταξύ του σχεδιασμού κόπωσης της ανεμογεννήτριας και αυτή άλλων κατασκευών, που είναι το μικρότερο μέγεθος των επιτρεπτών τάσεων στα κρίσιμα εξαρτήματα των ανεμογεννητριών εξαιτίας των μεγαλύτερων απαιτήσεων διάρκειας ζωής. Έτσι, η ακεραιότητα της κατασκευής των ανεμογεννητριών απαιτεί πολύ συντηρητικές διαδικασίες σχεδιασμού κόπωσης.

Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία στη διαδικασία σχεδιασμού της κόπωσης είναι ο προσδιορισμός των επιτρεπτών τάσεων κόπωσης. Αυτή είναι μια τεχνική ειδικότητα από μόνη της στην οποία οι τεχνικοί μετατρέπουν τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών κόπωσης σε υλικά και τύπους σύνδεσης για να μετρήσουν για διαδικασίες, περιβαλλοντικές επιδράσεις, και τη διάρκεια παραμονής που σχεδιάζεται για τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Έτσι, ο καθορισμός των επιτρεπτών τάσεων κόπωσης για διάφορα υλικά σε μια κατασκευή είναι ένα αθέατο κομμάτι της βιομηχανίας και της λειτουργίας αυτής της κατασκευής.

Η επαλήθευση της ολικής διαδικασίας σχεδιασμού της κόπωσης, από εμπειρία με τις πρωτότυπες κατασκευές είναι απαραίτητη για την πεποίθηση της ακεραιότητας μιας μακροπρόθεσμης κατασκευής. Ως αποτέλεσμα διαφορετικές διαδικασίες σχεδιασμού της κόπωσης και διαφορετικές επιτρεπτές τάσεις κόπωσης θα χρησιμοποιηθούν από διαφορετικούς βιομηχάνους, γιατί ο καθένας θα έχει το δικό του πεδίο εμπειρίας και θα έχει μετατρέψει αντίστοιχα τις δικές του διαδικασίες σχεδιασμού.

6.4. Γραμμική μέθοδος φθοράς S-N

Η φθορά από κόπωση είναι μια φυσική διαδικασία και μια μαθηματική αντιπροσώπευση αυτής της διαδικασίας. Γενικά η φθορά από κόπωση και η διάρκεια ζωής από κόπωση είναι αντιστρόφως ανάλογα ποσά. Ένα από τα πιο απλά μοντέλα της συσσωρευσης της φθοράς από κόπωση κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενων κύκλων κόπωσης είναι η *υπόθεση της γραμμικής φθοράς* που προτάθηκε από τον Palmgren και τον Miner. Σύμφωνα με αυτή την υπόθεση, εάν ο κύκλος τάσης παραμείνει σταθερός κατά τη διάρκεια ζωής που ισούται με N , τότε το κλάσμα αυτής της διάρκειας ζωής υποθέτουμε ότι είναι σταθερό σε κάθε κύκλο και ίσο με $1/N$. Αυτό το κλάσμα προσδιορίζεται επίσης και ως η φθορά ανά κύκλο και ακολουθεί ότι η ολική φθορά στην αστοχία είναι ίση με τη μονάδα. Επιπλέον, αν οι κύκλοι της τάσης αλλάξουν κατά τη διάρκεια της ζωής, τα κλάσματα φθοράς ανά κύκλο έχουν προστεθεί γραμμικά και η αστοχία από κόπωση ακόμα μπορεί να συμβεί όταν η συσσωρευμένη φθορά φθάνει τη μονάδα. Αν ένα φάσμα τάσεων υποδιαιρεθεί σε σύνολα κύκλων ή στρώματα, τότε θα έχουμε:

$$m \sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N_i} = 1.0 \quad \text{στην αστοχία από κόπωση}$$

$$m = \frac{N_i}{\sum_1^I n_i} \quad (6.1)$$

όπου

i = ο δείκτης των στρωμάτων στο φάσμα

I = ο αριθμός των στρωμάτων σε ένα φάσμα

m = ο αριθμός των επαναλήψεων του φάσματος που απαιτούνται για να προκαλέσουν αστοχία από κόπωση.

n_i = ο αριθμός των κύκλων που βρίσκονται σε επίπεδο τάσης S_i

N_i = η διάρκεια ζωής από κόπωση σε ένα σταθερό επίπεδο τάσης S_i

S_i = η παράμετρος της τάσης στον κύκλο πάνω από την οποία η φθορά από κόπωση είναι αρχικά εξαρτώμενη.

N_f = η διάρκεια ζωής από κόπωση κάτω από τη φόρτιση στο φάσμα

Η εξάρτηση του N στους επαναλαμβανόμενους κύκλους σε ένα σταθερό επίπεδο S που δίδεται από την καμπύλη $S-N$ στο σχήμα 6.2, εκφράζεται από μια εξίσωση του νόμου ισχύος ως εξής:

$$S = S_1 N^{\alpha} \quad (6.2\alpha, \beta)$$

$$S \geq S_e$$

όπου,

S_1 = εμπειρικός συντελεστής τάσης (kN/m^2)

α = εμπειρικός εκθέτης

S_e = όριο αντοχής, κάτω από το οποίο δεν δημιουργείται φθορά από κόπωση (kN/m^2)

Στις λογαριθμικές συντεταγμένες η εξίσωση (6.2) σχεδιάζεται ως ευθεία γραμμή με το S_1 να τέμνει στο N ίσο με έναν κύκλο και μια κορυφή του α , κάτω από μια τάση S_e . Χαρακτηριστικά, το α είναι λιγότερο από $-1/8$. Από την επίλυση της εξίσωσης (6.2α) για N με $S=S_e$, λαμβάνουμε τη διάρκεια ζωής από κόπωση στο αποκαλούμενο "γόνατο" της $S-N$ καμπύλης. Δεξιά αυτού του σημείου η καμπύλη γίνεται μια οριζόντια γραμμή.

Το επόμενο βήμα στον καθορισμό μιας επιτρεπόμενης τάσης για το φάσμα είναι να εκφράσει το στρώμα τάσεων ως κλάσμα της μεγαλύτερης τάσης στο φάσμα, $S_{\max\max}$. Αυτό παράγει ένα σύνολο από ομαλοποιημένες τάσεις ανάλογες με τα ομαλοποιημένα φορτία στον πίνακα 5.1.

Κατ' αυτό τον τρόπο η $S_{\max\max}$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράγοντας κλίμακας για να αυξήσει αναλογικά ή να μειώσει όλα τα επίπεδα τάσης στο φάσμα έως ότου επιτυγχάνεται η απαραίτητη διάρκεια ζωής κόπωσης. Έτσι:

$$S_i = s_i S_{\max\max} \quad (6.3)$$

όπου

s_i = ποσοστό τάσης για το i στρώμα
 $S_{\max\max}$ = η μέγιστη τάση στο φάσμα (kN/m^2)

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (6.1), (6.2) και (6.3) παράγεται η ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό των επιτρεπόμενων τάσεων με τη S-N γραμμική μέθοδο φθοράς:

$$S_{\max\max} = S_1 \left(N_f \frac{\sum_1^l n_i s_i^{-1/\alpha}}{\sum_1^l n_i} \right)^\alpha \quad (6.4)$$

Αυτή η τιμή της $S_{\max\max}$ γίνεται η επιτρεπόμενη τάση κόπωσης για τον όρο φόρτισης που αντιπροσωπεύεται από το $L_{\max\max}$ στον πίνακα 5-1. Η δομικός-δυναμική ανάλυση των φορτίων έχει μετατραπεί σε ένα στατικό δομικό πρόβλημα σχεδίου μ' αυτό τον τρόπο.

6.5. Πρόβλημα δειγμάτων

Για να επεξηγηθεί η S-N γραμμική μέθοδος φθοράς για τον υπολογισμό της επίδρασης του φάσματος φόρτισης στη δύναμη κόπωσης, θεωρήστε το ακόλουθο πρόβλημα: Ένα πτερύγιο ενός HAWT πρόκειται να κατασκευαστεί από το τοποθετημένο σε στρώματα Douglas fir/epoxy υλικό, του οποίου η δύναμη κόπωσης είναι γνωστό ότι εξαρτάται έντονα από τις μέγιστες τάσεις στους εφαρμοσμένους κύκλους κόπωσης. Το φάσμα σχεδίου για το πτερύγιο αποτελείται από τα στρώματα και τους αριθμούς κύκλων στον πίνακα 5-1, και οι αναλογίες τάσης σε κάθε στρώμα είναι οι ίδιες με τις αναλογίες φορτίων που απαριθμούνται σε αυτόν τον πίνακα. Κάθε φάσμα αντιπροσωπεύει εννέα ώρες της λειτουργίας, και το πτερύγιο πρόκειται να σχεδιαστεί για μια διάρκεια ζωής 30-έτους που τρέχει συνεχώς.

Τα στοιχεία εργαστηριακής κόπωσης για το τοποθετημένο σε στρώματα ξύλινο υλικό παρουσιάζονται στο σχήμα 6.3. Ο βαθμός καπλαμάδων υποτίθεται ότι ήταν A +, οι ενώσεις καπλαμάς με καπλαμά είναι συγκολλημένες, και οι μεγάλες ιδιότητες όγκου πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, για να υπολογίσουν την επίδραση μεγέθους σε αυτό το υλικό. Η χαμηλότερη S-N καμπύλη στο σχήμα 6.3α είναι η κατάλληλη για τις υλικές απαιτήσεις σε αυτό το πρόβλημα, και ο εμπειρικός εκθέτης του α είναι ίσος με -0.0676 . Ο εμπειρικός συντελεστής S_1 πρέπει να καθοριστεί χρησιμοποιώντας το διάγραμμα Goodman στο σχήμα 6.3β, δεδομένου ότι οι καμπύλες S-N που παρουσιάζονται είναι για ένα ποσοστό R της τάξης του 0.1 ενώ το μέσο ποσοστό R στον πίνακα 5.1 είναι 0.37. Η γραμμή σύμφωνα με την οποία οι συνδυασμοί της κυκλικής τάσης και του μέσου όρου τάσεων παράγει μια σταθερή ρ -αναλογία 0.37 παρουσιάζεται στον αριθμό. Η κλίση της υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{S_{cyc}}{S_{avg}} = \frac{(1 - 0.37)/2}{(1 + 0.37)/2} = 0.46 \quad (6.5\alpha)$$

Οι παράμετροι των κυκλικών τάσεων στην τομή της γραμμής του ποσοστού R και η γραμμή της δύναμης κόπωσης για 10^7 κύκλους μέχρι την αστοχία για το συγκεκριμένο υλικό, είναι:

$$\begin{aligned} S_{cyc} &= 1,650 \text{ psi (11,380 kN/m}^2\text{)} \\ S_{avg} &= 3,600 \text{ psi (24,820 kN/m}^2\text{)} \\ S_{max} &= 5,250 \text{ psi (36,200 kN/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

Η καμπύλη S-N για τη μέση δύναμη κόπωσης των εργαστηριακών δειγμάτων με ένα ποσοστό R να είναι 0.37, θα έχουμε:

$$S_{max} = 5,250 \left(\frac{N}{10^7} \right)^{-0.0676} = 15,610 N^{-0.0676} \quad (6.5\beta)$$

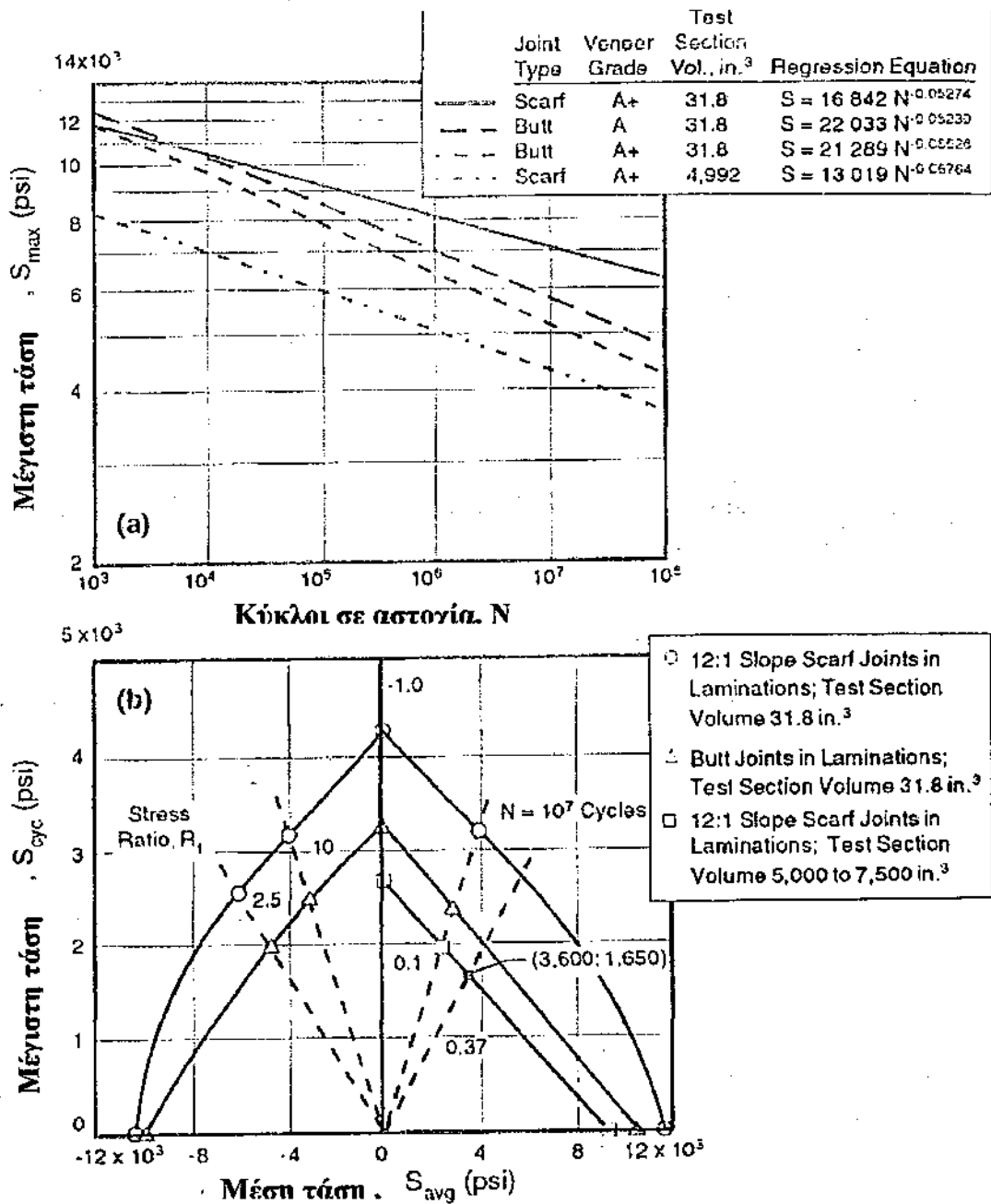
απ' όπου λαμβάνουμε $S_1 = 15,610 \text{ psi (107,600 kN/m}^2\text{)}$

Για τον απαιτούμενο 30ετή σχεδιασμό ζωής:

$$N_f = 30 \text{ yr} \times 8,670 \frac{\text{hr}}{\text{yr}} \times \frac{19,105 \text{ cyc}}{9.0 \text{ hr}} = 5.6 \times 10^8 \text{ cyc}$$

Από τον πίνακα 5.1,

$$\sum_1^{36} n_i s_i^{-1/(-0.0676)} = 1,618 \text{ cycles} \quad \sum_1^{36} n_i = 19,105 \text{ cycles} \quad (6.5\gamma)$$



Σχήμα 6.3. (α) Επιδράσεις τύπου joint, βαθμός επίστρωσης και τύπος μεγέθους σε κόπωση ($R_f = 0.1$) παράλληλη στην υφή. (β) Διάγραμμα Goodman της αλληλεπίδρασης των κυκλικών και μέσων τάσεων για 10^7 κύκλους ζωής.

Αντικαθιστώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν στις εξισώσεις (6.5) μέσα στην (6.4), θα έχουμε:

$$S_{\max \max} = 4,230 \text{ psi } (32,590 \text{ kN/m}^2)$$

Πάλι, αυτή η τάση αντιπροσωπεύει τη μέση δύναμη κόπωσης των εργαστηριακών δειγμάτων και δεν πρέπει γι' αυτό να χρησιμοποιηθεί άμεσα για μια επιτρεπτή τάση κόπωσης. Πρέπει πρώτα να πολλαπλασιαστεί με έναν ή περισσότερους αποκαλούμενους knock - down παράγοντες (κάθε ένας λιγότερο από 1.0) για να αποτελέσει (α) τη διασπορά στα στοιχεία εργαστηριακής δοκιμής και (β) διάφορους όρους που μπορούν να μειώσουν τη δύναμη κόπωσης στις πραγματικού μεγέθους δομές κάτω από αυτήν των εργαστηριακών δοκιμών.

6.6. Η μέθοδος της μηχανικής θραύσης

Ένα μοντέλο μηχανικής θραύσης της διαδικασίας της φθοράς από κόπωση είναι πιο σύνθετο από το S-N γραμμικό πρότυπο φθοράς, αλλά δεν θεωρείται από πολλούς ειδικούς κόπωσης το αντιπροσωπευτικότερο πρότυπο της φυσικής διαδικασίας που οδηγεί στην αστοχία από κόπωση. Η ανάλυση της μηχανικής φθοράς είναι ένα πρότυπο, επικυρωμένο εργαλείο του δομικού μηχανικού, και η εφαρμογή της στις ανεμογεννήτριες είναι απλή. Όπως με οποιαδήποτε μεθοδολογία σχεδίου κόπωσης, η εμπειρία και η επαλήθευση με τη δοκιμή πεδίων είναι κρίσιμότερες για την επιτυχία από το επίπεδο πολυπλοκότητας.

Μια θεμελιώδης έννοια της μεθόδου της μηχανικής θραύσης είναι ότι όλες οι δομές περιέχουν τις μικρές ρωγμές όταν τοποθετούνται αρχικά σε λειτουργία. Τα μεγέθη αυτών των προϋπαρχουσών ή αρχικών ρωγμών συσχετίζονται με τις μεθόδους επιθεώρησης χρησιμοποιούμενες και τα διευκρινισμένα κριτήρια αποδοχής. Οι ρωγμές στις κρίσιμες περιοχές μετατρέπονται σε ρωγμές όταν εφαρμόζονται τα φορτία κόπωσης, και αυτές οι ρωγμές συνεχίζουν να αυξάνονται στο μήκος ή να διαδίδονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της δομής. Το μήκος ρωγμών είναι το μέτρο της φθοράς από κόπωση, και το ποσοστό διάδοσης ρωγμών (που εκφράζεται στις μονάδες μήκους ανά κύκλο) είναι μια ιδιαίτερα μη γραμμική λειτουργία του μήκους ρωγμών και της παρερχόμενης περιόδου. Στην έναρξη της λειτουργίας, τα μήκη ρωγμών και τα ποσοστά διάδοσης ρωγμών είναι πολύ χαμηλά. Δεδομένου ότι η ρωγμή αυξάνεται, το ποσοστό διάδοσης επιταχύνει. Τελικά ένα μήκος ρωγμών επιτυγχάνεται που είναι ασταθές, το ποσοστό διάδοσης γίνεται άπειρο, και το σπάσιμο εμφανίζεται.

Η εφαρμογή της μεθόδου της μηχανικής θραύσης στην ανάλυση της κόπωσης των δομών των ανεμογεννητριών μπορεί να διαιρεθεί σε ακόλουθα βήματα:

1. Καθορίστε ένα φάσμα φορτίων για κάθε σημαντικό συστατικό, μέσα στα όρια των εσωτερικών δυνάμεων και των χρόνων και της πιθανότητας υπέρβασης τους.
2. Υπολογίστε τα μεγέθη τμημάτων και υπολογίστε ένα φάσμα τάσης για τα επιλεγμένα σημεία γύρω από κάθε κρίσιμο τμήμα του συστατικού, όπως οι συγκολλήσεις και οι κοινές φλάντζες.

3. Ομαλοποιήστε τις τάσεις σε κάθε φάσμα από τη μεγαλύτερη τάση του, S_{maxmax} , το οποίο χρησιμεύει ως ένας παράγοντας κλίμακας που καθορίζεται.
4. Διευκρινίστε ένα αρχικό μέγεθος ρωγμών σχεδίου για το επιλεγμένο υλικό, την ικανότητα μεθόδου επεξεργασίας και επιθεώρησης και ένα μέγεθος ρωγμών αποτυχίας σχεδίου.
5. Παράγετε και ελέγξτε ένα πρότυπο διάδοσης ρωγμών για το επιλεγμένο υλικό, που εκφράζεται από την άποψη ενός επαυξητικού ποσοστού αύξησης εναντίον των παραμέτρων τάσης μακριά από τη ρωγμή και το στιγμιαίο μήκος ή το βάθος ρωγμών.
6. Εκτιμήστε την S_{maxmax} και υπολογίστε το μέγεθος της ρωγμής συναρτήσει του χρόνου από προηγούμενη ολοκλήρωση του προτύπου διάδοσης πέρα από τη διάρκεια ζωής σχεδίου, σε κάθε επιλεγμένο σημείο μέχρι το μέγεθος ρωγμών στο τέλος του σχεδίου η διάρκεια ζωής είναι ίση με το μέγεθος ρωγμών αστοχίας σχεδίου περίπου κάθε κρίσιμο τμήμα στο συστατικό.
7. Διευκρινίστε ένα σύνολο επιτρεπόμενων τάσεων κόπωσης ίσων με τις ρυθμισμένες τιμές S_{maxmax} από το βήμα 6 και ένα σχετικό σύνολο φορτίων σχεδίου κόπωσης ίσο με το μέγιστο σύνολο φορτίων στο φάσμα που καθορίζεται στο βήμα 3.

Τα βήματα 1, 2, και 3 συζητήθηκαν νωρίτερα και οδηγούν στα στοιχεία φάσματος όπως αυτό στον πίνακα 5.1. Τα υπόλοιπα βήματα θα συζητηθούν εδώ, βασισμένοι στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για το δομικό σχέδιο του 2.5-MW Mod-2 και του 3.2-MW Mod- 5B HAWTs. Τα σημαντικότερα συστατικά σε αυτές τις δύο μηχανές, συμπεριλαμβανομένων των δερμάτων και των ορθοστατών των στροφένων τους 91.4m και 97.5m αντίστοιχα, κατασκευάστηκε από ενωμένα χαλύβδινα πιάτα, σφυρηλατημένα κομμάτια, ή κυλημένα τμήματα. Η μέθοδος μηχανικής θραύσης χρησιμοποιήθηκε και στις δύο προσπάθειες σχεδίου, εν μέρει λόγω της εκτενούς εμπειρίας στην επιχείρηση Boeing και τις θυγατρικές του με την εφαρμογή και την επαλήθευσή του.

6.7. Αρχικό μέγεθος ρωγμών σχεδίου

Τα αρχικά μεγέθη ρωγμών που διευκρινίζονται για το σχέδιο κόπωσης είναι βασισμένα στα κριτήρια αποδοχής μεγέθους ρωγμών που διευκρινίζονται για την κατασκευή του εν λόγω συστατικού. Η τελευταία προδιαγραφή περιλαμβάνει όχι μόνο τις τεχνικές εκτιμήσεις (όπως τις υλικές ιδιότητες) αλλά και τις απαιτήσεις δαπανών και προγράμματος. Κατά συνέπεια, οι αποφάσεις επιπέδων συστημάτων απαιτούνται προκειμένου να τεθούν τα κριτήρια αποδοχής μεγέθους ρωγμών. Αφού αυτό έχει ολοκληρωθεί, οι ρωγμές σχεδίου καθορίζονται που είναι (1) τοποθετημένες στις κρισιμότερες περιοχές κόπωσης και στον υψηλότερης τάσης προσανατολισμό τους, και (2) σημαντικά μεγαλύτερες από τα κριτήρια αποδοχής. Και οι δύο διαδικασίες παρέχουν το συντηρητισμό στο σχέδιο.

Ο πίνακας 6.1 επεξηγεί τη σχέση μεταξύ των μεγεθών των αποδεκτών ρωγμών και των ρωγμών σχεδίου που χρησιμοποιούνται για το Mod-5B

HAWT. Εδώ και στις εξισώσεις και τους υπολογισμούς που ακολουθούν, οι συνήθειες U.S. μονάδες θα χρησιμοποιηθούν για συμβατότητα με τη λογοτεχνία της τεχνολογίας της μηχανικής φθοράς.

Πίνακας 6.1. Έλεγχος και σχεδιασμός του μεγέθους των ρωγμών για χάλυβα ASTM A-6 στο Mod-5B HAWT. Ατέλεια αεροπλάνων κάθετη στην επιφάνεια και όλες οι διαστάσεις σε in

Μέθοδος ελέγχου	Ικανότητα ανίχνευσης	Κριτήρια αποδοχής
Visual	0.005 wide x 0.060 long	Linear indications: 0.060 long
Dye-Penetrant	0.005 wide x 0.030 long	Rounded indications: 0.125 long
Radiological	2% of thickness deep x 0.040 long	
Ultrasonic	0.030 deep x 0.090 long	

Υλικό	Σχεδιασμός αρχικού μεγέθους ρωγμής	
	Επιφανειακές ρωγμές	Εσωτερικές ρωγμές
Base Metal	0.022 deep x 0.110 long	0.044 deep x 0.110 long
"B" Weld	0.050 deep x 0.250 long	0.100 deep x 0.250 long

Στη μέθοδο της μηχανικής φθοράς, η παράμετρος τάσης που κυβερνά το ποσοστό στο οποίο οι ρωγμές κόπωσης αυξάνονται είναι ο παράγοντας έντασης τάσης, καθορισμένος ως εξής για την τάση φόρτισης:

$$K = S\sqrt{Q\pi a} \quad (6.6)$$

όπου,

K= ο παράγοντας έντασης τάσης (psi-in^{0.5})
 S= κανονική τάση ευκαμψίας για τη θραύση (psi)
 Q= συντελεστής σχήματος θραύσης
 a= ακτίνα θραύσης για μια κυκλική θραύση ή το μήκος του μικρού άξονα μιας ελλειπτικής θραύσης (in).

Ένας κύκλος τάσης που είναι εντελώς σε συμπίεση ($S_{max} < 0$) δεν υποτίθεται ότι συνήθως προκαλεί ούτε την αύξηση ρωγμών ούτε καθυστέρηση. Οι τιμές του παράγοντα μορφής ρωγμών στην εξίσωση 6.6 για μερικές κοινές διαμορφώσεις ρωγμών είναι οι ακόλουθες:

- διαμέσω ρωγμής σε ένα απείρως πλατύ πιάτο $Q = 1.00$
- εσωτερική κυκλική ρωγμή $Q = 4/\pi^2 = 0.405$
- επιφανειακή ημικυκλική ρωγμή $Q = 4.8/\pi^2 = 0.486$
- εσωτερική ελλειπτική ρωγμή $Q = 1/\phi^2$
- επιφανειακή ελλειπτική ρωγμή $Q = 1.2/\phi^2$

$$\phi = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - [1 - (a/c)^2] \sin^2 \theta} d\theta \quad (6.7a)$$

όπου,

c = το μήκος του μικρού άξονα της ρωγμής (in)

Αξιολογώντας το ϕ για μια σειρά των αναλογιών a/c από 0 έως 1,0 μπορούμε να παραγάγουμε την ακόλουθη κατάλληλη εμπειρική εξίσωση για μια ρωγμή επιφάνειας:

$$Q \approx 1.200 - 0.714(a/c) \quad 0 \leq a/c \leq 1.0$$

Τα πρότυπα διάδοσης ρωγμών κόπωσης που έχουν αναπτυχθεί είναι βασισμένα είτε στη μέγιστη ένταση τάσης σε ένα δεδομένο στρώμα στο φάσμα, K_{max} , ή σε σειρά έντασης τάσης, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$, ή και στα δύο. Τα ακόλουθα τρία πρότυπα αύξησης ρωγμών, με βάση τη K_{max} και την αναλογία R_f από την ελάχιστη στη μέγιστη τάση, εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των δομικών μεθόδων σχεδίου για Mod-2 HAWT:

(α) Ένα πρότυπο καθυστέρησης, που υπολογίζει για οποιαδήποτε ευεργετικά αποτελέσματα των εξορμήσεων φορτίων κατά τη διάρκεια και μεταξύ των φασμάτων φορτίων. Οι εξορμήσεις είναι γνωστές για να προκαλούν τα τοπικά πλαστικά "ίχνη" που κλείνουν τις άκρες ρωγμών και την αργή αύξηση ρωγμών. Αυτό το πρότυπο, το οποίο θεωρεί όλους τους κύκλους καταστρεπτικούς, έχει τη γενική μαθηματική μορφή:

$$d\alpha/dn \propto (1 - R_f)^k K_{max}^l \left(\frac{S_{max}}{R_{OL} S_{maxmax}} \right)^m \quad S_{max} \geq 0; R_{OL} \geq 1.0 \quad (6.8a)$$

όπου,

$d\alpha/dn$ = ποσοστό αύξησης ρωγμής (in/cyc)

k, l, m = εμπειρικοί εκθέτες

R_{OL} = ποσοστό υπερφόρτισης. Ποσοστό της μέγιστης τάσης μέσα στο φάσμα στην S_{maxmax}

(β) Ένα πρότυπο κατώτατων ορίων, το οποίο περιέχει ένα ελάχιστο μέγεθος της έντασης της τάσης κάτω από το οποίο δεν υπάρχει καμία αύξηση ρωγμών (ισοδύναμη με το όριο αντοχής, S_e , σε μια S-N καμπύλη):

$$d\alpha/dn = 0 \quad \text{if} \quad K_{max} \leq K_{TH} \quad (6.9a)$$

$$d\alpha/dn \propto (1 - R_f)^k K_{max}^l \quad \text{if} \quad K_{max} > K_{TH}$$

όπου,

K_{TH} = ένταση αρχικής τάσης (psi-in^{0.5})

Όταν συσχετίζοντας πρότυπες προβλέψεις με τα αποτελέσματα των δοκιμών διάδοσης ρωγμών εργαστηριακής κόπωσης των προ-ραγισμένων δειγμάτων κάτω από τη φόρτωση φάσματος, το πρότυπο καθυστέρησης βρέθηκε να υποτιμά τις ζωές των χαμηλότερων δειγμάτων πίεσης ενώ το πρότυπο κατώτατων ορίων υποτίμησε τις ζωές των δειγμάτων υψηλής-πίεσης. Οι εξισώσεις για ένα συνδυασμένο πρότυπο που διορθώνει καλύτερα αυτές τις ανεπάρκειες είναι οι ακόλουθες:

$$d\alpha / dn = 0 \quad \text{if } K_{\max} \leq K_{TH} \quad (6.10\alpha)$$

$$d\alpha / dn = 3 \times 10^{-10} (1 - R_f)^{2.4} (K_{\max} / 1000)^3 (S_{\max} / S_{\max \max})^2 (1 / R_{OL}^2)$$

$$\text{if } K_{TH} < K_{\max} < K_C \quad (6.10\beta)$$

$$d\alpha / dn = \infty \quad \text{if } K_{\max} = K_C \quad (6.10\gamma)$$

$$R_f \geq 0 \quad R_{OL} \geq 1.0$$

$$K_{TH} = 5.00 + 52.0 \exp[-11.0(1 - R_f)] \text{ psi-in}^{0.5} \quad (6.10\epsilon)$$

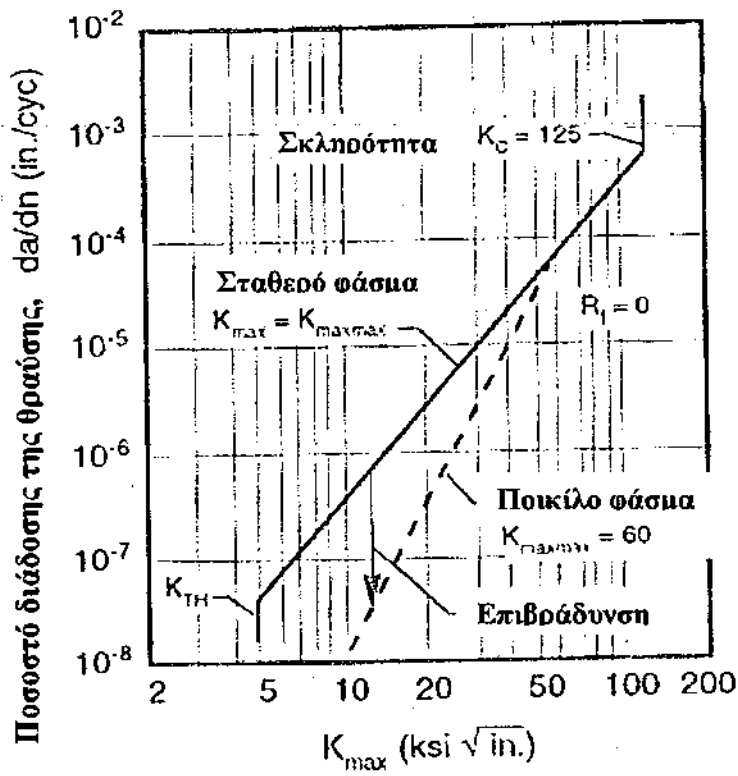
$$K_C = 125000 \text{ psi-in}^{0.5} \quad (6.10\sigma\tau)$$

όπου,

K_C = η ιδιότητα σπασίματος της σκληρότητας του υλικού σε εφελκυσμό (psi-in^{0.5}).

Το σπάσιμο εμφανίζεται επάνω σε μια ενιαία εφαρμογή μιας έντασης τάσης ίσης με την ανθεκτικότητα σπασίματος, μια υλική ιδιότητα που μπορεί να καθοριστεί από τις τυποποιημένες διαδικασίες δοκιμής όπως στο ASTM E-399. Το σχήμα 6.4 είναι μια γραφική παράσταση των εξισώσεων (6.10). Η αρχική γραμμή καθορίζει τα ποσοστά διάδοσης ρωγμών για τους κύκλους με $R_f = 0$ σταθερού εύρους, στις μέγιστες εντάσεις τάσης μεταξύ ενός κατώτατου ορίου 5000 psi-in^{0.5} και της ανθεκτικότητας σπασίματος 125000 psi-in^{0.5}, η ιδιότητα που καθορίζεται τελευταία από τη δοκιμή. Η δευτεροβάθμια γραμμή επεξηγεί την επίδραση των περιστασιακών υπερφορτώσεων (π.χ. εξορμήσεις φορτίων) σε μια ένταση πίεσης 60000 psi-in^{0.5}.

$$K_{TH} < K_{max} < K_C: da/dn = 3 \times 10^{-10} (1-R_I)^{2.4} (K_{max})^3 (K_{max}/K_{maxmax})^2$$



Σχήμα 6.4. Μοντέλο δείγματος ποσοστού διάδοσης της θραύσης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Wind Energy (Energie Eolienne)
Συγγραφέας: D. Le Gourieres
Εκδοτικός οίκος: Eyrolles 1980
2. Wind Energy Conversion Systems
Συγγραφέας: L. Freris
Εκδοτικός οίκος: Prentice Hall 1980
3. Wind Machines
Συγγραφέας: Frank R. Eldridge
Εκδοτικός οίκος: Van Norstrand Reinhold Co
4. Delphi Workshop on Wind Energy Applications
Συγγραφέας: G. Bergeles & J. Chadjivasiliadis
Έκδοση: 1985
5. Αιολική Ενέργεια και Βιομηχανική Αεροδυναμική
Συγγραφέας: Γ. Μπεργελές & Ν. Αθανασιάδης
Έκδοση: Οκτ. 1980
6. Wind Turbine Technology
Συγγραφέας: David A. Spera
Έκδοση: 1994
7. Ανεμοκινητήρες
Συγγραφέας: Γ. Μπεργελές
Εκδόσεις: Συμείων
8. Prediction Model for Fatigue Crack Growth in Windmill Structures
Συγγραφέας: R.W. Finger
9. Εταιρία Middeldrunden
Ηλεκτρονική διεύθυνση: www.middelgrunden.dk
10. Εταιρία Wind Mills
Ηλεκτρονική διεύθυνση: www.copenhagenvideos.dk

