

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή Ραυτογιάννη Ιωάννη, Αναπληρωτή καθηγητή του τομέα των Μεταλλικών Κατασκευών του Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου, για την πολύτιμη επιστημονική και ερευνητική καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ανεκτίμητη ηθική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των ακαδημαϊκών μου σπουδών.

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και διερεύνηση της συμπεριφοράς ενός πύργου ανεμογεννήτριας από χάλυβα S355 και από σύνθετα υλικά δυο ειδών (Glass/Epoxy και Graphite/Epoxy), ύψους 40m, με χρήση του λογισμικού SAP2000. Εφαρμόζοντας στατική και ιδιομορφική ανάλυση, μετά από τη διακριτοποίηση του φορέα, πραγματοποιείται έλεγχος της αστοχίας των μελών και της συμπεριφοράς τους έναντι φαινομένων κόπωσης, υπό την επίδραση των δυσμενέστερων συνδυασμών φόρτισης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά και γραφικά για τους δυσμενέστερους συνδυασμούς φόρτισης, όπου και ερμηνεύονται στο τελευταίο κεφάλαιο.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγική αναφορά στην αιολική ενέργεια γενικότερα, στα δομικά στοιχεία που απαρτίζουν τις ανεμογεννήτριες καθώς και στα είδη ανεμογεννητριών που υπάρχουν.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα κύρια χαρακτηριστικά του ανέμου, που αποτελεί την κυρίαρχη φόρτιση στους πύργους των ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποια βασικά στοιχεία για την αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η γεωμετρία του φορέα και τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και θα εισαχθούν σαν δεδομένα στο λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφονται και υπολογίζονται αναλυτικά τα φορτία που ασκούνται στον υπό εξέταση πύργο, καθώς και εκείνα που μεταφέρονται από την τουρμπίνα στην κορυφή του πύργου. Έπειτα, παρουσιάζονται οι συνδυασμοί φόρτισης που θα ληφθούν υπόψη για την επίλυση του φορέα.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατικής και ιδιομορφικής ανάλυσης για τους πιο δυσμενείς συνδυασμούς φορτίσεων και ακολουθούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επίλυση του φορέα.

Abstract

The main purpose of the present thesis is the modeling and study of the structural behavior of three wind towers (one made of steel S355 and the other two made of FRP materials - Glass/Epoxy and Graphite/Epoxy) with the aid of SAP 2000 FE Analysis Software. Using the static and modal analysis, a stability check of the members used and a check for fatigue resistance will take place, at limit state conditions. The results are presented both in an analytical and a graphical scope of view and clarified in detail at the last chapter of the thesis.

In Chapter 1, an introduction of wind energy in general, the main parts of a wind turbine and the several kinds of wind turbines are presented.

In Chapter 2, the main wind characteristics are described, as the wind loading is the dominant loading in wind turbine towers. Subsequently, the main principles that concern the operation of the wind turbines are highlighted.

In Chapter 3, the geometry of the structure and its characteristics are described, as well as the material properties that are used as a database in the software.

In Chapter 4, the loads applied directly to the tower, as well as those which are transferred from the turbine at the top of the tower are analyzed and calculated. Moreover, the combinations of the loads are noted.

Finally, in Chapter 5, the results of the static and modal analysis are presented. At the last step, the main conclusions are taking place, taking into account the most unfavorable combinations.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	ii
Περίληψη	iii
Abstract	iv
Κεφάλαιο 1	1
Αιολική Ενέργεια	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.2 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	1
1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	6
1.4 ΚΟΣΤΟΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	8
1.5 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	11
1.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	25
Ο άνεμος.....	25
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	25
2.2 ΤΟ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ.....	25
2.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΥΨΟΣ	26
2.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ	28
2.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ.....	29
2.6 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΝΕΜΟΥ	31
2.7 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	37
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών.....	37

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	37
3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ.....	37
3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ.....	40
3.3.1 ΕΠΙΠΕΔΗ ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	41
3.3.2 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ ΤΑΣΕΩΝ.....	44
3.3.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	46
3.3.4 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΩΝ ΑΚΑΜΨΙΑΣ	48
3.3.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΩΝ ΕΥΚΑΜΨΙΑΣ.....	51
3.3.6 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΥΛΙΚΟΥ	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	57
Φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων	57
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	57
4.2 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	57
4.3 ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΑΣΚΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΠΥΡΓΟ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	62
4.4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	93
Συμπεράσματα.....	93
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	93
5.2 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	95
5.3 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	103
5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	107
Βιβλιογραφία	110

Κεφάλαιο 1

Αιολική Ενέργεια

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά για την αιολική ενέργεια κάνοντας μια περιληπτική αναφορά στο βάθος του χρόνου. Αρχικά, γίνεται αναφορά στον τρόπο αξιοποίησης της αλλά και στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση της. Στη συνέχεια, αναλύονται τα επιμέρους μέρη μιας ανεμογεννήτριας, καθώς και τα είδη ανεμογεννητριών που υπάρχουν.

1.2 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η αιολική ενέργεια, όπως και η ηλιακή, αποτελεί μία από τις πλέον σημαντικές μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, και είναι μία από τις πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος. Η δύναμη που αναγκάζει τον αέρα να κινηθεί δημιουργείται όταν μεταξύ δύο περιοχών παρουσιάζεται διαφορά της ατμοσφαιρικής πίεσης. Ο μηχανισμός αυτός συνδυαζόμενος με την περιστροφική κίνηση της γης οδηγεί στη δημιουργία περίπλοκων συστημάτων ανέμων. Η ενέργεια που απαιτείται για την κίνηση του αέρα μέσα στην ατμόσφαιρα προέρχεται από τον ήλιο, και έτσι μπορούμε να πούμε ότι ο άνεμος αντλεί την ενέργεια του από την ηλιακή ενέργεια. Υπολογίζεται ότι ένα ελάχιστο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που διαδίδεται μέσα από την ατμόσφαιρα της γης καταναλίσκεται με τη μορφή κινητικής ενέργειας του αέρα. Η ισχύς αυτή είναι κατά μέσον όρο της τάξης των 1200 TW.

Η αιολική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί από τα πανάρχαια χρόνια μέχρι σήμερα για διάφορους σκοπούς, όπως λόγω χάρη για την κίνηση ιστιοφόρων πλοίων, την άλεση σιτηρών και την άντληση υδάτων. Μια σχετικά πρόσφατη αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας αποτελεί η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας, που προκαλεί η κίνηση ενός ανεμοκινητήρα λόγω της ροής του ανέμου, σε ηλεκτρική ενέργεια. Από τις πρώτες ανεμομηχανές των μερικών kW η τεχνολογία έχει προχωρήσει στην κατασκευή ανεμοκινητήρων μερικών MW και αναμένεται στα επόμενα χρόνια η ισχύς να αυξηθεί περαιτέρω.

Η αιολική ενέργεια είναι μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η εκμετάλλευση του υψηλού της δυναμικού σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών που ενσωματώνονται στις σύγχρονες αποδοτικές ανεμογεννήτριες, έχει τεράστια σημασία για τη βιώσιμη ανάπτυξη μιας χώρας, την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Βασικός παράγοντας για την καλύτερη αξιοποίηση της αποτελεί η χαρτογράφηση του αιολικού δυναμικού μιας χώρας, με την ανάπτυξη αιολικών μοντέλων και την οργάνωση των ανεμολογικών δεδομένων.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 η παγκόσμια παραγόμενη ισχύς από αιολικά συστήματα ήταν 15 MW. Το 1992, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την προώθηση των προγραμμάτων αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, η ισχύς αυτή, παραγόμενη από περισσότερες από 25.000 ανεμογεννήτριες, έφτασε τα 2.652 MW. Η χώρα με το μεγαλύτερο ποσοστό εγκατεστημένης αιολικής ισχύος είναι οι Η.Π.Α. (1723 MW το 1992), και ειδικότερα η πολιτεία της Καλιφόρνια (**Σχήμα 1.1**). Εκεί, στην περιοχή Άλταμοντ Πας, βρίσκεται το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο του κόσμου με 7.500 ανεμογεννήτριες, ενώ σε ολόκληρη την πολιτεία λειτουργούν περισσότερες από 16.000 ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 1.500 MW, που αντιπροσωπεύουν το 1% της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής της ενέργειας. Αιολικά πάρκα υπάρχουν, επίσης, και στη Χαβάη, ενώ από το 1992 άρχισε ο σχεδιασμός για την κατασκευή αιολικών πάρκων και σε άλλες πολιτείες.



Σχήμα 1.1 Το αιολικό πάρκο της Καλιφόρνια

Δεύτερη χώρα στον τομέα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας έρχεται η Δανία, η οποία έχει αναπτύξει και την πιο αξιόπιστη τεχνολογία στον τομέα κατασκευής ανεμογεννητριών, κατέχοντας μεγάλο ποσοστό στην αντίστοιχη παγκόσμια αγορά. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στη Δανία φτάνει τα 360 MW, που αντιπροσωπεύουν το

2% των ενεργειακών της αναγκών. Ακολουθούν η Ολλανδία, η Γερμανία, η Μ. Βρετανία, η Ισπανία, η Ιταλία, η Γαλλία, το Βέλγιο -η συνολική αιολική ισχύς στις χώρες της Ε.Ε. το 1992 ήταν 862 MW- και η Ινδία, ενώ ανάλογα προγράμματα αναπτύσσονται στη Ρωσία και την Κίνα. Ακόμη, στις αρχές της δεκαετίας του 1990 άρχισαν να λειτουργούν στη Δανία και την Ολλανδία τα πρώτα αιολικά πάρκα μέσα στη θάλασσα, σε αβαθείς περιοχές κοντά στις ακτές. Οι εγκαταστάσεις αυτές, που προς το παρόν περιλαμβάνουν μικρό αριθμό ανεμογεννητριών και ηλεκτροδοτούν μικρές κοντινές περιοχές, επιφέρουν, λόγω της απομακρυσμένης θέσης τους πολύ λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον από ό,τι οι αντίστοιχες εγκαταστάσεις της στεριάς. Παράλληλα, χάρη στην απουσία φυσικών εμποδίων παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένη απόδοση. Στο παρακάτω **Σχήμα 1.2** απεικονίζεται ένα θαλάσσιο πάρκο στη Δανία.



Σχήμα 1.2 Θαλάσσιο αιολικό πάρκο στη Δανία

Όσον αφορά τη χώρα μας, διαθέτει αξιόλογο αιολικό δυναμικό ιδιαίτερα στο Αιγαίο. Οι έρευνες και οι προσπάθειες για αξιοποίηση του δυναμικού αυτού άρχισαν κατά το τέλος της δεκαετίας του 1970. Πρώτα μετρήθηκε το αιολικό δυναμικό των πιο ευνοϊκών περιοχών και συντάχθηκε η μελέτη ΑΙΟΛΟΣ με τη συνεργασία της Διεύθυνσης Εναλλακτικών Μορφών Ενέργειας, της ΔΕΗ και πανεπιστημίων της χώρας. Από το 1982 έως το 1994 εγκαταστάθηκαν ανεμογεννήτριες στην Άνδρο, τα Ψαρά, τη Σάμο, τη Χίο, την Κρήτη, την Εύβοια, τη Σαμοθράκη, την Ικαρία, την Κάρπαθο, τη Λήμνο, την Κύθνο και τη Σκύρο, οι οποίες παράγουν συνολικά ισχύ 27 MW. Το πρώτο αιολικό πάρκο κατασκευάστηκε στην Κύθνο και άρχισε να λειτουργεί το 1982 περιλαμβάνοντας 5 ανεμογεννήτριες, συνολικής ισχύος αρχικά 20 KW και αργότερα 33

KW. Μέχρι το 1994 είχαν εγκατασταθεί συνολικά 13 αιολικά πάρκα σε νησιά του Αιγαίου.

Το αιολικό πάρκο της Εύβοιας, όπως φαίνεται στο παρακάτω **Σχήμα 1.3**, που τέθηκε σε λειτουργία το 1993 με 17 ανεμογεννήτριες, και το δίδυμό του στη Σητεία Κρήτης είναι τα δύο μεγαλύτερα αιολικά πάρκα της Μεσογείου. Από το 1995 δικαίωμα κατασκευής και λειτουργίας αιολικών μονάδων έχουν και ιδιώτες, οργανισμοί τοπικής αυτοδιοίκησης κ.ά. είτε για ιδιωτική χρήση είτε για εκμετάλλευση.



Σχήμα 1.3 Αιολικό πάρκο στην Εύβοια

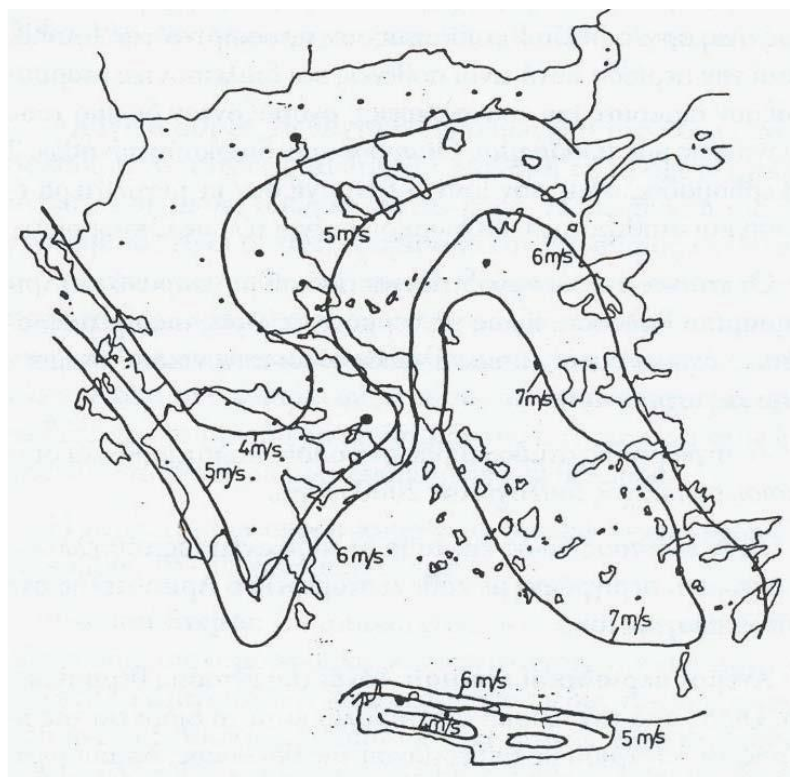
Ενδιαφέρον, για την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού τους, έχουν οι περιοχές με ικανοποιητικές μέσες ταχύτητες ανέμου. Ένα πάρκο ανεμογεννητριών, το οποίο σε ταχύτητα 8m/sec αποδίδει 1600KW, στη μισή ταχύτητα αποδίδει μόνο 200 KW. Σημαντικό ρόλο παίζει ο τύπος εγκατάστασης των ανεμογεννητριών. Η ύπαρξη ανωμαλιών του εδάφους ή εμποδίων μπορεί να δημιουργήσει στροβιλισμούς και να μειώσει την αποδοτικότητα. Πριν επιλεγεί η περιοχή γίνεται μελέτη στατιστικών μετεωρολογικών δεδομένων για τις κατευθύνσεις των ανέμων για ένα χρόνο.

Στα νησιά του Αιγαίου, στην Κρήτη και στην Ανατολική Στερεά Ελλάδα οι μέσες ταχύτητες ανέμου είναι 6 - 7 m/sec, με αποτέλεσμα το κόστος της παραγόμενης ενέργειας να είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικό, γι' αυτό παρατηρείται πληθώρα έργων εκμετάλλευσης στις περιοχές αυτές.

Παρακάτω παρατίθεται ένας ενδεικτικός πίνακας (**Πίνακας 1.1**) για τον χαρακτηρισμό του ανέμου ανάλογα με την ταχύτητα του, σύμφωνα με την κλίμακα Beaufort και στη συνέχεια ακολουθεί ο χάρτης αιολικού δυναμικού της χώρας μας (**Σχάμα 1.4**).

B	Χαρακτηρισμός	Ταχύτητα ανέμου		
		m/sec	km/h	κόμβοι
0	Άπνοια	0-0,2	<1	<1
1	Σχεδόν άπνοια	0,3-1,5	1-5	<1
2	Πολύ ασθενής	1,6-3,3	6-11	4-6
3	Ασθενής	3,4-5,4	12-19	7-10
4	Σχεδόν μέτριος	5,5-7,9	20-28	11-16
5	Μέτριος	8,0-10,7	29-38	17-21
6	Ισχυρός	10,8-13,8	39-49	22-27
7	Πολύ ισχυρός	13,9-17,1	50-61	28-33
8	Θυελλώδης	17,2-20,7	62-74	34-40
9	Πολύ θυελλώδης	20,8-24,4	75-88	41-47
10	Θύελλα	24,5-28,4	89-102	48-55
11	Ισχυρή θύελλα	28,5-32,6	103-117	56-63
12	Τυφώνας	$\geq 32,7$	≥ 118	≥ 64

Πίνακας 1.1



Σχάμα 1.4 Χάρτης του αιολικού δυναμικού της χώρας

1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από τα επόμενα βασικά πλεονεκτήματα:

- Ο άνεμος παρέχεται δωρεάν και αποτελεί μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας.
- Αποτελεί μια φιλική προς τα περιβάλλον ενεργειακή επιλογή, καθώς δεν καίγονται ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρισμού, δεν επιβαρύνεται δηλαδή το περιβάλλον με επικίνδυνους αέριους ρύπους, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου, καρκινογόνα μικροσωματίδια, όπως γίνεται με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Βοηθά στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, μειώνοντας απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Το αρχικό κόστος κατασκευής και το χαμηλό λειτουργικό κόστος αποτελεί βασικό κίνητρο για την αξιοποίηση της και την καθιστά ιδιαίτερα ανταγωνιστική.
- Απομακρυσμένες περιοχές, όπως ορεινά χωριά που δεν είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιήσουν ανεμογεννήτριες και να παράγουν το δικό τους ηλεκτρικό ρεύμα.
- Η ίδρυση και λειτουργία αιολικών πάρκων δημιουργεί ισχυρούς πόλους τοπικής ανάπτυξης και περιβαλλοντικής αναβάθμισης, αφού δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας σε τοπικό επίπεδο.
- Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι πολύ ήσυχες. Συγκεκριμένα, το επίπεδο της έντασης του ήχου σε απόσταση 40 μέτρων από μια ανεμογεννήτρια είναι της τάξης των 50-60dB, το οποίο σημειώνεται ότι είναι αντίστοιχο με την ένταση μιας συζήτησης. Δεδομένης μάλιστα της απαιτούμενης απόστασης των ανεμογεννητριών από τους γειτονικούς οικισμούς, το επίπεδο αυτό γίνεται ακόμα χαμηλότερο, της τάξης των 30dB.
- Τέλος, αναφέρεται ότι οι ανεμογεννήτριες καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο από τον μέσο σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας, αφήνοντας περιθώρια για την αξιοποίηση του γύρω χώρου για πολλούς σκοπούς, όπως είναι η γεωργία.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε βέβαια να αναφερθούμε και σε κάποια χαρακτηριστικά μειονεκτήματα:

- Η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια έχει πολλές διακυμάνσεις ανά την ώρα λόγω της συνεχούς διαφοροποίησης της ταχύτητας του ανέμου.
- Η αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες με τη μορφή μπαταριών, υδρογόνου ή άλλων μορφών εξακολουθεί να χρειάζεται έρευνα και ανάπτυξη για να καταστούν εμπορικά βιώσιμες.
- Η ηχορύπανση από τις εμπορικές ανεμογεννήτριες, λόγω των περιστρεφόμενων μηχανικών τμημάτων αποτελεί συχνά πηγή παραπόνων για τους κατοίκους των γύρω περιοχών εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας.
- Από περιβαλλοντικής σκοπιάς, οι μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι επικίνδυνες για τις μεταναστευτικές διαδρομές των πουλιών.

1.4 ΚΟΣΤΟΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Το κόστος των αιολικών συστημάτων για παραγωγή ενέργειας, έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία 15 χρόνια και η τάση αυτή συνεχίζεται.

Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει υψηλής ποιότητας ηλεκτρικό ρεύμα στη συχνότητα του δικτύου και να δουλεύει χωρίς επιτήρηση και με μικρές απαιτήσεις συντήρησης για περισσότερα από 20 χρόνια. Οι κύριοι παράμετροι που επηρεάζουν την οικονομικότητα των επενδύσεων σε αιολική ενέργεια είναι:

- Αρχικό κόστος επένδυσης (περιλαμβάνει κόστος εξοπλισμού, μεταφορά, θεμελίωση, ανέγερση, έργα πολιτικού μηχανικού, σύνδεση με το δίκτυο κλπ)
- Παραγόμενη ενέργεια / μέση ταχύτητα ανέμου
- Κόστος Συντήρησης & Λειτουργίας
- Διάρκεια ζωής
- Επιτόκιο προεξόφλησης.

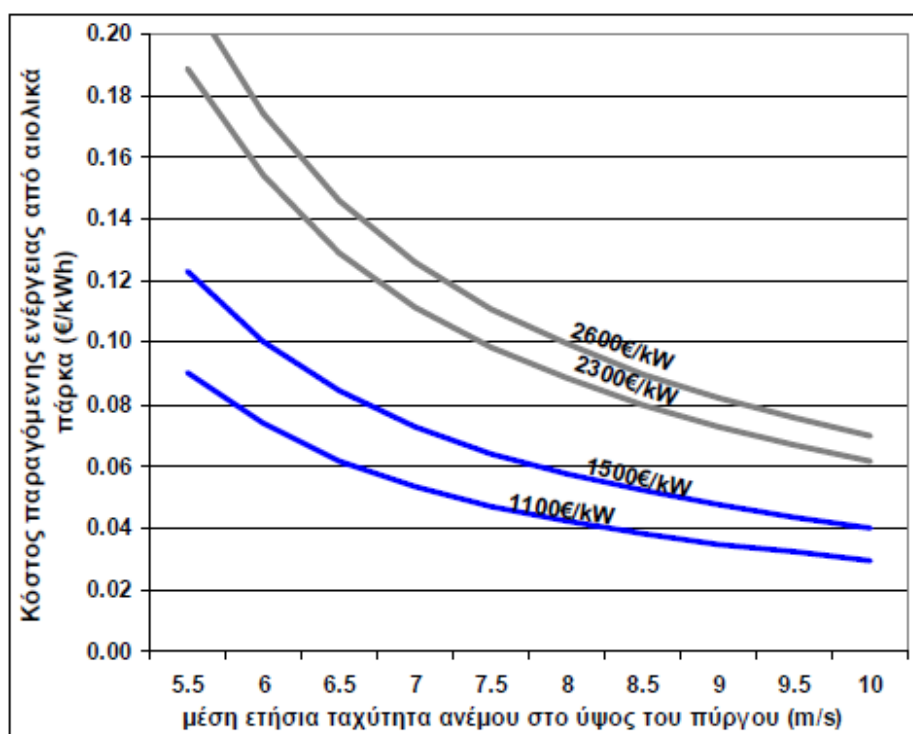
Σε ένα τυπικό αιολικό πάρκο ο καταμερισμός του κόστους έχει περίπου ως εξής: (στοιχεία από αιολικά πάρκα στην Δανία και τη Γερμανία) (Πίνακας 1.2)

	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ (%)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ ΕΞΟΔΩΝ (%)
Ανεμογεννήτρια	74-82	-
Θεμελίωση	1-6	20-25
Ηλεκτρικός εξοπλισμός (μετασχηματιστές)	1-9	10-15
Καλωδιώσεις – Ηλεκτρική διασύνδεση	2-9	35-45
Σχεδιασμός	1-3	5-10
Γη	1-3	5-10
Κόστος δανεισμού	1-5	5-10
Έργα υποδομής - Δρόμοι	1-5	5-10

Πίνακας 1.2 Καταμερισμός κόστους για μια τυπική εγκατεστημένη Α/Γ (1,5-3MW)

Το μέσο κόστος ανά εγκατεστημένο kW, από τα χαμηλότερα επίπεδα των 1000-1200 €/kW που είχε διαμορφωθεί πριν από μια πενταετία έχει σταδιακά αυξηθεί στο επίπεδο των 1100-1500 €/kW. Αντίθετα, το κόστος για εγκαταστάσεις στη θάλασσα διαμορφώνεται στο επίπεδο των 2300-2600 €/kW.

Παράλληλα, με το κόστος της ανεμογεννήτριας που παίζει κυρίαρχο ρόλο, ένα σημαντικό μέρος του κόστους εξαρτάται από τη θέση της εγκατάστασης. Οπότε, το συνολικό κόστος επένδυσης μπορεί να αυξάνεται κατά 15-40% σε περιοχές δύσβατες, απομακρυσμένες από υπάρχουσα υποδομή ή σε εγκαταστάσεις στη θάλασσα. Παρακάτω παρατίθεται ένας ενδεικτικός πίνακας για το κόστος παραγόμενης kW/h από την αιολική ενέργεια (Σχήμα 1.5).

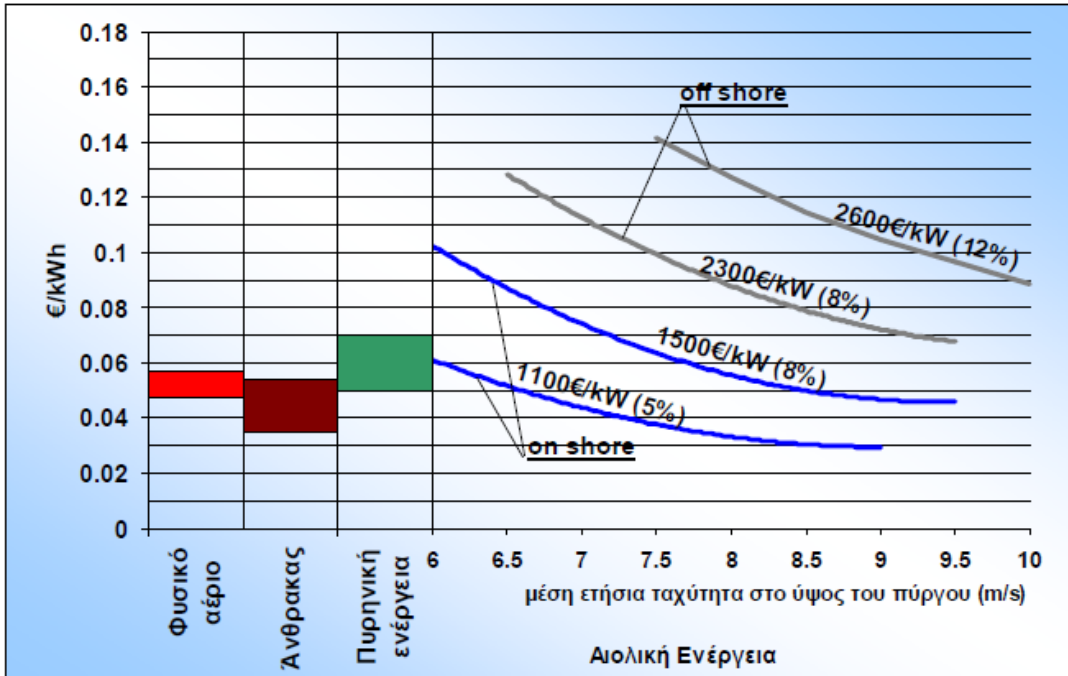


Σχήμα 1.5 Κόστος παραγόμενης kW/h από αιολική ενέργεια συναρτήσει της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου και του κόστους εγκατάστασης (επιτόκιο αναγωγής 8%)

Γενικότερα, τρεις τάσεις διαφαίνονται σήμερα στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας:

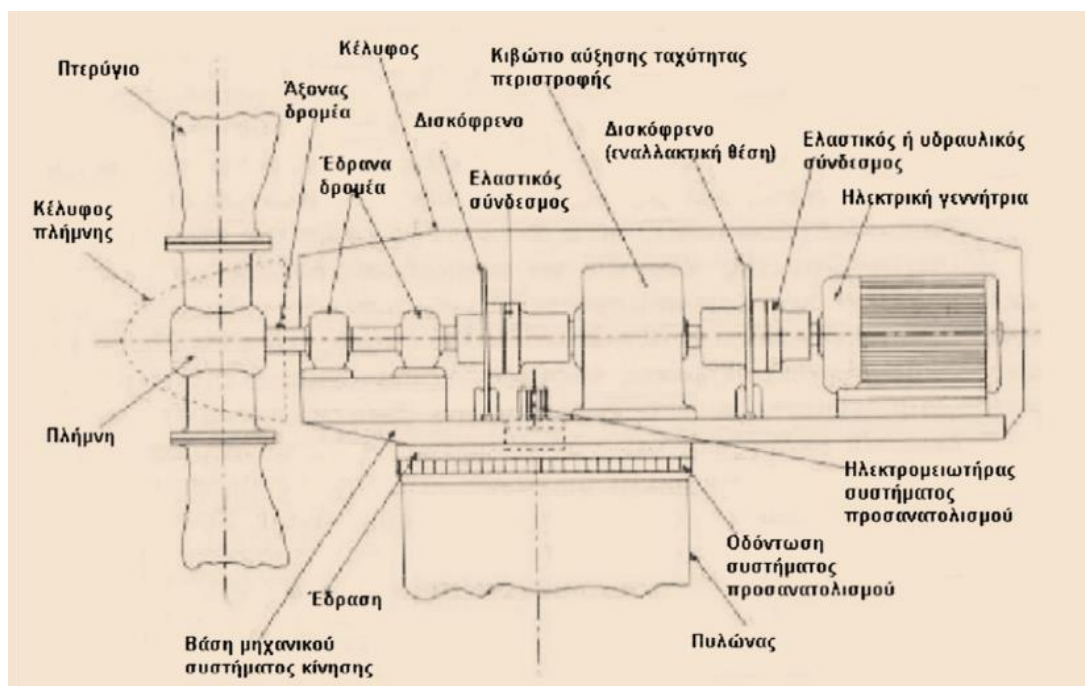
- Το ύψος των ανεμογεννητριών συνεχώς μεγαλώνει, άρα το μέσο μέγεθος ανεμογεννήτριας που πωλείται στην αγορά συνεχώς μεγαλώνει.
- Η απόδοση των ανεμογεννητριών συνεχώς βελτιώνεται καθώς βελτιστοποιείται ο σχεδιασμός τους.
- Γενικά το κόστος επένδυσης ανά εγκατεστημένο kW μειώνεται.

Αν καταφύγουμε σε μια σύγκριση του κόστους της αιολικής ενέργειας με το κόστος συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι με την αιολική ενέργεια αποφεύγουμε τόσο το κόστος καυσίμου, όσο και ένα σημαντικό μέρος του κόστους συντήρησης και λειτουργίας. Από την άλλη μεριά, μέρος του αρχικού κόστους επένδυσης που αποφεύγεται εξαρτάται από το αιολικό δυναμικό και το βαθμό διεύθυνσης της αιολικής ενέργειας. Στο **Σχήμα 1.6** διακρίνουμε μια σύγκριση κόστους της αιολικής ενέργειας σε σχέση με άλλες συμβατικές πηγές.



Σχήμα 1.6 Κόστος παραγόμενης kWh από αιολική ενέργεια και συμβατικές πηγές

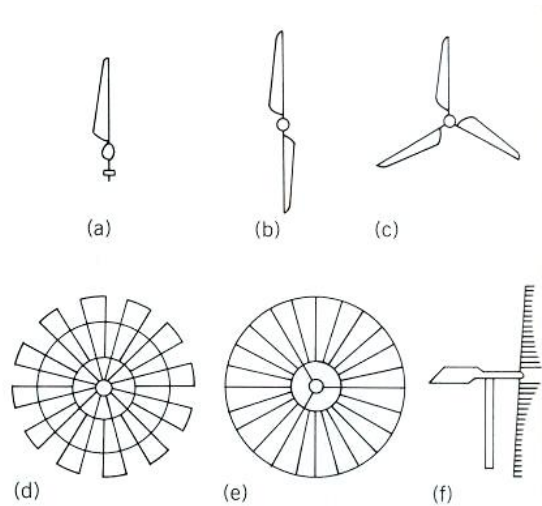
1.5 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ



Σχήμα 1.7 Λεπτομερή στοιχεία ανεμογεννήτριας

Ανεμομετρητής (Anemometer): Μετρά την ταχύτητα του ανέμου και μεταβιβάζει τα ανεμολογικά δεδομένα σε έναν ελεγκτή.

Πτερύγια (Blades): Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν δύο ή τρεις έλικες. Ο άνεμος πάνω στα πτερύγια δημιουργεί άνωση που έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ροπής γύρω από τον άξονα περιστροφής, η οποία αναγκάζει τα πτερύγια να περιστρέφονται. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των πτερυγίων από δύο σε τρία, επιτυγχάνεται μια αύξηση της απόδοσης κατά 3%. Οι έλικες σε μεγάλες ανεμογεννήτριες περιστρέφονται κατά μήκος του άξονά τους και δέχονται τον άνεμο υπό διαφορετικές γωνίες, οι οποίες αυξάνονται προς τη βάση τους. Οι πολύ μεγάλες γωνίες δεν έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Προκειμένου να υπάρχει ενιαία γωνία πρόσπτωσης και να αποφευχθούν οι μεγάλες γωνίες, η έλικα έχει μορφή περιστροφική.



Σχήμα 1.8 Συστήματα δρομέα: α)μονόπτερος, β)διπτέρυγος, γ)τριπτέρυγος, δ)αμερικανικός πολυπτέρυγος, ε)πολυπτέρυγος τύπου ποδηλάτου και ς)τύπου ιστίου

Τα πτερύγια είναι ίσως τα πιο κρίσιμα δομικά συστατικά στον σχεδιασμό μιας μοντέρνας ανεμογεννήτριας. Το πτερύγιο είναι ουσιαστικά μία δοκός (με στατικό προσομοίωμα προβόλου) που στηρίζεται στον περιστρεφόμενο άξονα του δρομέα. Το αεροδυναμικό σχήμα του πτερυγίου επιτυγχάνεται με την βοήθεια ξεχωριστών συνθετικών στρωμάτων, κολλημένων μεταξύ τους. Για να μειώνονται οι ροπές κάμψης στο τμήμα του πτερυγίου που είναι μακριά από τον κεντρικό άξονα, το σχήμα που επιλέγεται είναι κωνικό. Ο κωνικός σχεδιασμός περιλαμβάνει όχι μόνο την διατομή αλλά και το πάχος του κελύφους. Αυτό εξασφαλίζει ότι τα διάφορα κατά μήκος τμήματα του πτερυγίου θα υφίστανται συγκρίσιμες μέγιστες τάσεις και παραμορφώσεις.

Η πλατιά πλευρά τοποθετείται κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου και γενικότερα είναι απαραίτητο για την βέλτιστη απόδοση, να τοποθετηθεί το πτερύγιο έτσι ώστε οι πλευρές με το μεγαλύτερο πλάτος να είναι παράλληλες με το επίπεδο περιστροφής του δρομέα.

Φρένο (Brake): Η ανεμογεννήτρια διαθέτει μηχανισμό φρένου, το οποίο περιορίζει τη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε περιπτώσεις ισχυρών ανέμων. Επίσης, σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών ανέμων το φρένο ακινητοποιεί το δρομέα για την ασφάλεια της ανεμογεννήτριας. Τέλος, σε περίπτωση συντήρησης της ανεμογεννήτριας απαιτείται η πλήρης ακινητοποίησή της για την ασφάλεια των εργασιών.

Ελεγκτής (Controller): ο ελεγκτής ξεκινά τη μηχανή σε ταχύτητες ανέμου περίπου 8-16 μίλια την ώρα και κλείνει τη μηχανή περίπου στα 65 μίλια την ώρα. Οι ανεμογεννήτριες δε μπορούν να δουλεύουν σε ταχύτητες ανέμου πάνω από τα 65 μίλια την ώρα γιατί οι γεννήτριες τους μπορούν να υπερθερμανθούν ή/και τα πτερύγιά τους να σπάσουν.

Κιβώτιο Ταχυτήτων (Gear box): Τα γρανάζια συνδέουν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνουν τις ταχύτητες περιστροφής από περίπου 30 έως 60 περιστροφές το λεπτό (rpm = περιστροφή ανά λεπτό) σε 1000 έως 1800 περιστροφές το λεπτό, που είναι η ταχύτητα περιστροφής που οι περισσότερες ανεμογεννήτριες απαιτούν ώστε να παράγουν ηλεκτρισμό. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ακριβό (και βαρύ) εξάρτημα της ανεμογεννήτριας και οι μηχανικοί ερευνούν προς την κατεύθυνση ανεμογεννητριών «άμεσης ώθησης» (“direct-drive”) οι οποίες λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δεν χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων.

Γεννήτρια (Generator): Συνήθως παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα 60 κύκλων. Είναι σύγχρονη ή επαγωγική με τέσσερις ή έξι πόλους, συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου, μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας.

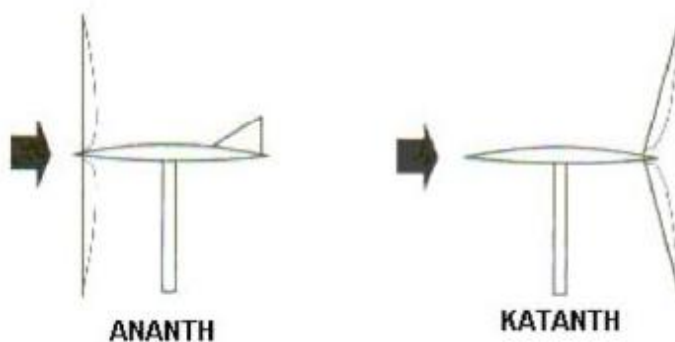
Άξονας υψηλής ταχύτητας (High-speed shaft): Ο άξονας αυτός περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα αφού συνδέεται με τον άξονα χαμηλής ταχύτητας μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων. Η ταχύτητα περιστροφής του μπορεί να περιορισθεί μέσω του φρένου με το οποίο είναι συνδεδεμένος. Μέσω του άξονα αυτού μεταδίδεται η κίνηση στη γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Άξονας χαμηλής ταχύτητας (Low-speed shaft): Ο άξονας αυτός ξεκινάει από το σφαιρικό εξάρτημα (Hub) πάνω στο οποίο στηρίζονται τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας και περιστρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο δρομέας. Ο άξονας αυτός μεταδίδει τη περιστροφή στον άξονα υψηλής ταχύτητας μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων.

Άτρακτος (Nacelle) : Η άτρακτος βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και περιέχει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και το φρένο. Ένα κάλυμμα προστατεύει τα μέρη εντός του κελύφους.

Στροφή Πτερυγίων (Pitch): Τα πτερύγια έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονά τους, ώστε να αυξάνουν τα αεροδυναμικά φορτία πάνω στην πτερύγωση στις μεγάλες ταχύτητες του ανέμου και να τα μειώνουν στις μικρές ταχύτητες.

Ηλεκτρικός Κινητήρας / Δρομέας (Rotor): Τα πτερύγια και το κεντρικό σημείο ονομάζονται δρομέας. Ο πυλώνας κατασκευάζεται πάντα ελαφρώς ψηλότερος από τη διάμετρο του δρομέα. Σε σχέση με τη θέση του δρομέα ως προς τον πυλώνα στήριξης και τη διεύθυνση του ανέμου, οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου μπορούν να έχουν το δρομέα μπροστά από τον πύργο (ανάντη) ή πίσω (κατάντη), όπως φαίνεται στο παρακάτω **Σχήμα 1.9**.

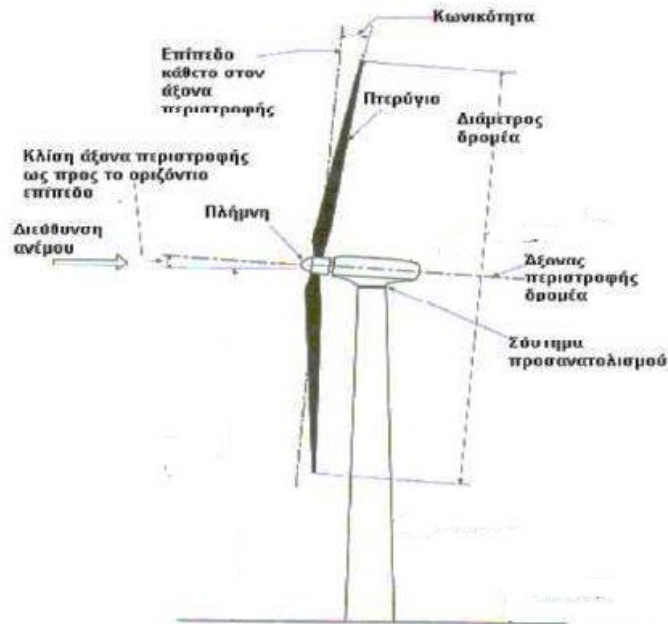


Σχήμα 1.9 Πιθανές θέσεις δρομέα

Οδηγός για την Αποφυγή Εκτροπής (Yaw drive): Το σύστημα περιστροφής στηρίζεται στο πύργο και αποτελείται από έναν κατακόρυφο άξονα και μερικά γρανάζια που συνδέονται με το θάλαμο. Μέσω αυτού του συστήματος είναι δυνατή η περιστροφή του συστήματος δρομέα-θαλάμου ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός προσανατολισμός σε σχέση με τον άνεμο. Το σύστημα αυτό εξασφαλίζει ότι ο άξονας του δρομέα θα είναι πάντα στραμμένος προς τον άνεμο καθώς αυτός αλλάζει κατεύθυνση. Ανάλογα με τη

διεύθυνση του ανέμου ο δείκτης κατεύθυνσης στέλνει τις αντίστοιχες πληροφορίες στο σύστημα περιστροφής και αυτό στρέφει το δρομέα προς την διεύθυνση του ανέμου. Ελαχιστοποιώντας τη γωνία εκτροπής, μεγιστοποιείται η παραγόμενη ενέργεια της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, δεδομένου ότι η κατεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται συνεχώς ο δρομέας δεν μπορεί να ακολουθεί αυστηρά τη κατεύθυνσή του και έτσι θα υπάρχει πάντα μια μικρή γωνία εκτροπής. Συγκεκριμένα σε χαμηλές έως μεσαίες ταχύτητες ανέμου μεγάλες γωνίες εκτροπής μπορούν να προκαλέσουν σημαντική μείωση της παραγόμενης ενέργειας της ανεμογεννήτριας καθώς η μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου της τάξης των $\pm 30^\circ$ είναι αρκετά συχνή σε αυτές τις ταχύτητες. Σε υψηλές ταχύτητες ανέμου η μεταβλητότητα της διεύθυνσης του ανέμου είναι αρκετά μικρή.

Μηχανισμός περιστροφής της ανεμογεννήτριας: Ο μηχανισμός περιστροφής της ανεμογεννήτριας είναι η αιτία που στρέφεται ο δρομέας της ανεμογεννήτριας απέναντι στον αέρα. Η ανεμογεννήτρια θεωρείται ότι έχει σφάλμα περιστροφής (pitch fault), αν ο δρομέας δεν είναι κάθετος στη διεύθυνση του ανέμου. Το σφάλμα περιστροφής έχει ως συνέπεια η ανεμογεννήτρια να μπορεί να εκμεταλλευτεί μικρότερο μέρος της ενέργειας του ανέμου. Αν όμως αυτό ήταν το μόνο πρόβλημα, τότε ο έλεγχος περιστροφής (pitch control) θα ήταν ένας εξαιρετικός τρόπος ελέγχου της ισχύος εισόδου στο δρομέα της ανεμογεννήτριας. Όμως το μέρος του δρομέα που βρίσκεται πιο κοντά στη διεύθυνση της ταχύτητας του ανέμου θα δέχεται μεγαλύτερη δύναμη απ' ότι το υπόλοιπο μέρος του δρομέα. Στο παρακάτω **Σχήμα 1.10** φαίνονται οι βασικοί άξονες και οι κινήσεις των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 1.10 Λεπτομερή χαρακτηριστικά λειτουργίας της ανεμογεννήτριας

Έτσι λοιπόν αφενός αυτό συνεπάγεται ότι ο δρομέας θα έχει την τάση να στρέφεται απέναντι στον αέρα αυτόματα και αφετέρου, σημαίνει ότι τα πτερύγια θα γέρνουν μπρος και πίσω σε μια ταλαντευτική κίνηση σε κάθε περιστροφή του ρότορα. Συνεπώς οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με σφάλμα περιστροφής δέχονται μεγαλύτερα φορτία κόπωσης απ' ό,τι ανεμογεννήτριες που είναι στραμμένες σε μια διεύθυνση κάθετη στον αέρα.

Κινητήρας του Οδηγού για την Αποφυγή Εκτροπής (Yaw motor): Δίνει ενέργεια στον οδηγό εκτροπής.

Πυλώνας / Πύργος (Tower): Οι πύργοι είναι κατασκευασμένοι από χαλύβδινο κέλυφος ή χωροδικτύωμα. Επειδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος, οι υψηλοί πύργοι περιέχουν γεννήτριες που συλλέγουν περισσότερη ενέργεια και παράγουν περισσότερο ηλεκτρισμό.

- Χαλύβδινοι σωληνοειδείς πυλώνες: Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν τέτοιου είδους πυλώνες, είναι κωνικοί, η διάμετρός τους δηλαδή αυξάνει προς τη βάση, προκειμένου να είναι ευσταθείς και να μειωθεί το χρησιμοποιούμενο υλικό. Τα ελάσματα φύλλων χάλυβα που χρησιμοποιούνται ποικίλουν σε πάχος 12 με 75 χιλιοστά. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος, τόσο λεπτότερο είναι το υλικό που απαιτείται για τον πυλώνα. Ο τύπος S355 χάλυβα είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυλώνα, εξαιτίας της υψηλής αντοχής του. Συνήθως, αποτελείται από 3 ή 4 τμήματα τα οποία

συναρμολογούνται με προεντεταμένους κοχλίες υψηλής αντοχής μέσω μετωπικών πλακών σύνδεσης, γνωστές και ως φλάντζες. Το μήκος ενός τμήματος μπορεί να ποικίλει από 20 έως 30 μέτρα.

- *Δικτυωτοί πύργοι:* Οι πυλώνες αυτοί κατασκευάζονται με χαλύβδινα δικτυώματα. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι το μειωμένο κόστος, αφού απαιτεί το μισό υλικό απ' ό,τι ο προηγούμενος. Το βασικό μειονέκτημά τους είναι η εμφάνισή τους. Οι πυλώνες αυτοί έχουν εκλείψει κυρίως για αισθητικούς λόγους.
- *Σύνθετος πυλώνας από ινοπλισμένα πολυμερή υλικά:* Νέες κατασκευαστικές λύσεις προσφέρει και η τεχνολογία των σύνθετων ινοπλισμένων πολυμερών υλικών, καθώς παρατείνει τη διάρκεια ζωής, μειώνει το κόστος συντήρησης της ανεμογενήτριας, αυξάνει τα δυναμικά χαρακτηριστικά απόσβεσης και την αντοχή σε κόπωση. Επίσης, προσφέρει μια εναλλακτική λύση στις περιπτώσεις όπου η μεταφορά και η εγκατάσταση είναι δύσκολη. Σημαντική είναι επίσης η συμπεριφορά του υλικού σε υγρές συνθήκες, όπως στην περίπτωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών.

Θεμελίωση: Το θεμέλιο μιας ανεμογενήτριας κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Προτιμάται η κατασκευή άκαμπτων θεμελίων με τετραγωνικό ή δακτυλιοειδές σχήμα. Για τη διαστασιολόγηση του θεμελίου συνήθως είναι κρίσιμοι οι έλεγχοι σε ευστάθεια. Για μεγάλες ανεμογενήτριες έχει αποδειχθεί ότι το δακτυλιοειδές σχήμα είναι οικονομικότερο. Ένα σοβαρό θέμα είναι ο τρόπος σύνδεσης του θεμελίου με τον πύργο. Σήμερα εφαρμόζονται δύο μέθοδοι:

- Με αγκύρια υψηλής αντοχής (συνήθως 8.8) και ειδικά σώματα αγκύρωσης, τα οποία έχουν τοποθετηθεί με ειδικούς κλωβούς στερέωσης στο σώμα του θεμελίου πριν από τη χύτευσή του. Οι κοχλίες αγκύρωσης στις ανεμογενήτριες προεντείνονται μερικά προκειμένου να βελτιωθεί η αντοχή τους σε κόπωση. Προκειμένου να είναι δυνατή η προένταση, τα αγκύρια περιβάλλονται εντός του θεμελίου με ειδικές επικαλύψεις που επιτρέπουν την ολίσθησή τους. (**Σχήμα 1.11**)
- Με την τοποθέτηση, εντός του σώματος του θεμελίου, κυλινδρικού σώματος αγκύρωσης, μήκους όσο περίπου το ύψος του θεμελίου και την ενσωμάτωσή του με το θεμέλιο. Η σύνδεση του πύργου με το θεμέλιο πραγματοποιείται μέσω φλάντζωτης σύνδεσης τύπου L με πλήρως προεντεταμένους κοχλίες υψηλής αντοχής (συνήθως 10.9). (**Σχήμα 1.12**)



Σχήμα 1.11 Μορφή θεμελίωσης με αγκύρια υψηλής αντοχής

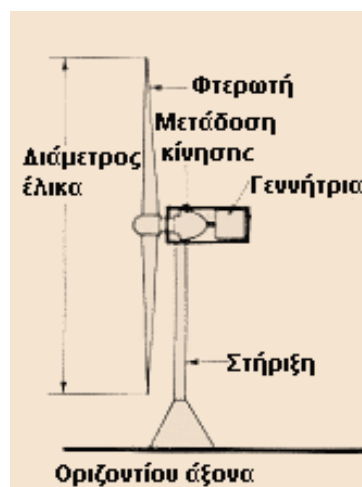


Σχήμα 1.12 Μορφή θεμελίωσης με τοποθέτηση, εντός του σώματος του θεμελίου, κυλινδρικού σώματος αγκύρωσης. Εικόνα πριν τη σκυροδέτηση.

1.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Ανάλογα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους οι ανεμογεννήτριες μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα



Σχήμα 1.13 Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (**Σχήμα 1.13**), ο άξονας περιστροφής των πτερυγίων είναι παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους. Η πιο κατάλληλη ταχύτητα ανέμου, στην οποία αρχίζουν τυπικά να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια είναι από 3 έως 5 μέτρα το δευτερόλεπτο (m/s), επιτυγχάνουν τη μέγιστη ισχύ στα 15 m/s ενώ έχουν ταχύτητα αποκοπής περίπου στα 25 m/s.

Τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα είναι ο πύργος στηρίξεως, η πτερωτή, ο άξονας περιστροφής, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, η ηλεκτρική γεννήτρια καθώς και το σύστημα προσανατολισμού της μηχανής. Η πτερωτή της ανεμογεννήτριας αποτελείται από πτερύγια, τα οποία είναι κατασκευασμένα συνήθως από ελαφρά κράματα μετάλλων, ενισχυμένο πολυεστέρα, αλλά και από ξύλο σε συνδυασμό με ειδικές ρητίνες. Τα πτερύγια κατασκευάζονται δύσκαμπτα έτσι ώστε να τα εμποδίζει από το να ωθούνται πάνω στον πύργο σε περίπτωση ισχυρών ανέμων. Η πτερωτή τοποθετείται είτε στα ανάντη είτε στα κατόντη του πύργου στηρίξεως και τα πτερύγια καλύπτουν ένα μικρό ποσοστό (2% έως 10%) του εμβαδού της περιφέρειας που διαγράφουν. Όταν ο δρομέας λειτουργεί στα κατόντη του πύργου στηρίξεως έχουμε μεν αυξημένο επίπεδο αεροδυναμικού θορύβου, αλλά και αυτόματο προσανατολισμό της πτερωτής στη

διεύθυνση του ανέμου. Στην ανάντη λειτουργία της πτερωτής εκλείπουν τα παραπάνω φαινόμενα, με αποτέλεσμα η διάταξη αυτή να προτιμάται περισσότερο.



Σχήμα 1.14 Προσήμεμη διάταξη



Σχήμα 1.15 Υπήμενη διάταξη

Η επιλογή του πλήθους των πτερυγίων σχετίζεται με την αεροδυναμική φόρτιση των πτερυγίων, με το βαθμό απόδοσής τους, με το κόστος κατασκευής της ανεμογεννήτριας καθώς και με θέματα αντοχής και συντονισμού λόγω ταλαντώσεων. Επιπλέον, θέματα που συνεκτιμώνται είναι η κυκλική μεταβολή της ροπής της μηχανής λόγω της καθ' ύψος μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και τα θέματα ζυγοστάθμισης των πτερυγίων. Για τον περιορισμό της κυκλικής μεταβολής του φορτίου των πτερυγίων δίνεται μια μικρή κλίση (έως και 10°) του άξονα περιστροφής ως προς το οριζόντιο. Τέλος, για λόγους περιορισμού των καμπτικών τάσεων πάνω στα πτερύγια, επιβάλλεται συνήθως μια μικρή κωνικότητα αυτών που δεν ξεπερνά τις 10° .

Για λόγους ασφάλειας της ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια είναι συνήθως εφοδιασμένα με συστήματα αεροδυναμικής πέδησης (αερόφρενα), τα οποία διακόπτουν τη λειτουργία της μηχανής σε έκτακτες περιπτώσεις.

Για τη βελτίωση της συνολικής συμπεριφοράς μιας πτερωτής ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιούνται πτερωτές μεταβλητού βήματος σε αντιδιαστολή με τις απλούστερες περιπτώσεις πτερωτών σταθερού βήματος. Η μεταβολή του βήματος μιας πτερωτής συνίσταται στην περιστροφή του πτερυγίου γύρω από το διαμήκη άξονά του, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της γωνίας προσβολής του από τον άνεμο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η διατήρηση σταθερής ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας, η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης των πτερυγίων, ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος και ο περιορισμός των δυνάμεων που καταπονούν τα πτερύγια.

Η πλήμνη αποτελεί το δεύτερο συστατικό της περωτής (δρομέα) και περιλαμβάνει εκείνο το μέρος της ανεμογεννήτριας πάνω στο οποίο προσαρμόζονται τα πτερύγια. Η τελική της μορφή εξαρτάται τόσο από το είδος της περωτής όσο και από τους επιθυμητούς βαθμούς ελευθερίας στη θέση σύνδεσης πτερυγίων και άξονα. Ο άξονας της ανεμογεννήτριας κατασκευάζεται από ειδικό ενισχυμένο χάλυβα, ώστε να δύναται να μεταφέρει ισχυρές μη μόνιμες στρεπτικές και καμπτικές ροπές, ενώ η έδρασή του γίνεται συνήθως σε δύο ένσφαιρα έδρανα ικανά να παραλαμβάνουν τόσο το βάρος του άξονα όσο και τα εξασκούμενα φορτία.

Η δυνατότητα περιστροφής του άξονα σε διεύθυνση παράλληλη προς αυτή του ανέμου εξασφαλίζεται με τη χρήση καθοδηγητικών πτερυγίων και ειδικών αυτοματισμών. Η πλέον σύγχρονη μέθοδος προσανατολισμού στηρίζεται στη χρήση ειδικού αισθητηρίου και σερβομηχανισμού, που περιστρέφει την άτρακτο της μμμηχανής με τη βοήθεια οδοντωτής περιστροφής. Ένα από τα σπουδαιότερα μέρη της ανεμογεννήτριας είναι το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, που περιλαμβάνει διβάθμιο ή τριβάθμιο κιβώτιο μετασχηματισμού της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής της περωτής (συνήθως 20 έως 110 rpm) σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής (άνω των 1000 rpm), στις οποίες λειτουργούν συνήθως οι ηλεκτρικές γεννήτριες. Ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός διβάθμιου συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 96%, ενώ για λόγους ασφαλείας η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας. Το σύστημα κίνησης περιλαμβάνει επίσης, υδραυλικό ή μηχανικό φρένο και ελαστικούς συνδέσμους απορρόφησης στρεπτικών ταλαντώσεων. Το μηχανικό φρένο της ανεμογεννήτριας τοποθετείται είτε στον άξονα υψηλής ταχύτητας περιστροφής, οπότε απαιτείται μικρή σχετικά δύναμη πέδησης, αλλά δεν προστατεύεται η περωτή από απώλεια φορτίου ή θραύση του συστήματος μετάδοσης κίνησης, είτε στον άξονα χαμηλής ταχύτητας περιστροφής.

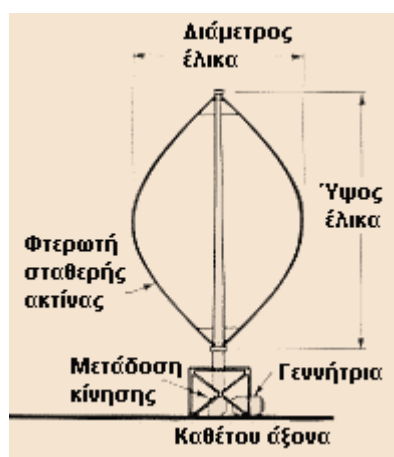
Ο πύργος στηρίξεως της ανεμογεννήτριας είναι ένα σημαντικό στοιχείο στη δομή της ανεμογεννήτριας, όχι μόνο για δομικούς λόγους, αφού μεταφέρει τα φορτία στα θεμέλια, αλλά και για οικονομικούς λόγους: όσο υψηλότερος είναι ο πύργος, τόσο μεγαλύτερο το ποσό της ενέργειας που παράγεται. Ο πύργος μπορεί να κατασκευαστεί από διάφορα υλικά και με διαφορετικούς σχεδιασμούς. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ο χάλυβας και το οπλισμένο σκυρόδεμα, τις περισσότερες φορές προεντεταμένο, καθώς και συνδυασμός αυτών των δύο. Συνθετικά υλικά κατασκευής όπως το fiber glass βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο. Όσον αφορά τον σχεδιασμό έχουν ακολουθηθεί διαφορετικές έννοιες κατά καιρούς όπως μονοπολική διάταξη σωλήνα (tubular tower), δικτυωτός πύργος (lattice tower), με τριποδική διάταξη σωλήνων (three-legged tower) και μονοπολική διάταξη με αντιστήριξη καλωδίων (guy-wired pole tower).



Σχήμα 1.16 Διαφορετικοί σχεδιασμοί πύργων ανεμογεννήτριας

Ολοκληρώνοντας τη σύντομη περιγραφή των βασικών τμημάτων μιας ανεμογεννήτριας πρέπει να αναφέρουμε και την ύπαρξη των ηλεκτρικών γεννητριών, που χρησιμοποιούνται για μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, καθώς και των συστημάτων αυτοματισμού. Εν συντομία αναφέρουμε ότι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος και σπανιότερα ηλεκτρικές γεννήτριες συνεχούς ρεύματος.

- Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα



Σχήμα 1.17 Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (Σχήμα 1.17) μπορούν να εκμεταλλευτούν τον άνεμο, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του ανέμου και δεν υπάρχει η ανάγκη ρύθμισης του δρομέα με αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες αυτές περιστρέφονται γύρω από έναν κάθετο άξονα προς την κατεύθυνση του ανέμου. Το παραγόμενο μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω του κατακόρυφου άξονα στο έδαφος όπου εγκαθίσταται η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν πρόβλημα κατά την εκκίνηση, για την οποία απαιτείται εξωτερική βοήθεια. Ένα άλλο πρόβλημα σχετίζεται με τις δυσκολίες κατασκευής, μεταφοράς και εγκατάστασης των μακρόστενων πτερυγίων. Ωστόσο, αποτελούν μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική στον τομέα των κτιρίων, αφού μπορούν να εγκατασταθούν κοντά στο έδαφος.



Σχήμα 1.17 Τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius απαιτούν χαμηλή ροπή εκκίνησης με αποτέλεσμα να μπορούν να εκμεταλλευτούν για την κίνηση τους και μικρές ταχύτητες ανέμου. Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus απαιτούν μεγάλη ροπή εκκίνησης, αποτέλεσμα αυτού είναι για την εκκίνηση τους με χαμηλή ταχύτητα ανέμου να απαιτείται υποβοήθηση. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά οδήγησαν στη δημιουργία του μεικτού τύπου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

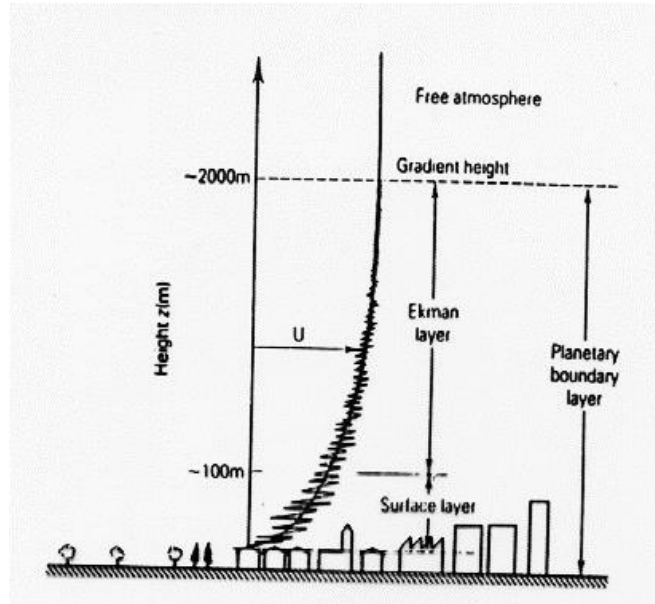
Ο άνεμος

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και κάποια βασικά στοιχεία για την αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών.

2.2 ΤΟ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Καθώς η ατμόσφαιρα βρίσκεται σε σχετική κίνηση με τη Γη, στο κατώτατο τμήμα της λόγω του ιξώδους του αέρα δημιουργείται ένα στρώμα αέρα, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, μέσα στο οποίο η σχετική ταχύτητα μεταβάλλεται από μηδέν πάνω στην επιφάνεια της Γης, μέχρι μεγαλύτερες τιμές. Τα χαρακτηριστικά του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, καθορίζονται κυρίως από την μορφή της επιφάνειας της Γης (τραχύτητα εδάφους), αλλά και από τον άνεμο και την κατάσταση της ατμόσφαιρας. Για ομαλό έδαφος και αδύναμο άνεμο το πάχος του οριακού στρώματος μπορεί να είναι της τάξης των 200 μέτρων, ενώ για ανώμαλη επιφάνεια (μεγάλη τραχύτητα) και έντονο άνεμο είναι δυνατό να φθάσει μέχρι 2000 μέτρα. Αυτό πρέπει να το έχουμε υπ' όψη μας όταν δίνεται η μέση ταχύτητα του ανέμου σε μια περιοχή ή αν έχουμε διαθέσιμες μετρήσεις του ανέμου. Αυτά τα δεδομένα, πρέπει να συνοδεύονται από το ύψος στο οποίο αναφέρονται, ώστε να μπορούμε να τα ανάγουμε στο ύψος που μας ενδιαφέρει.



Σχήμα 2.1 Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

2.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΥΨΟΣ

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται συνεχώς εξαιτίας των χαρακτηριστικών του εδάφους, της θερμότητας και των καιρικών συνθηκών. Επίσης κοντά στα έδαφος οι ταχύτητες του ανέμου είναι μικρές εξαιτίας της επιφανειακής τριβής ενώ σε μεγαλύτερα υψόμετρα πνέουν ισχυρότεροι άνεμοι. Όλες αυτές οι επιδράσεις μεταβάλλουν συνεχώς τα φορτία που ασκούνται στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας καθώς αυτά περιστρέφονται που σημαίνει ότι η αεροδυναμική και η δομοστατική τους σχεδίαση θα πρέπει να αντιμετωπίσει συνθήκες που σπάνια είναι οι βέλτιστες δυνατές.

Οι εκφράσεις που χρησιμοποιούμε σήμερα για να υπολογίσουμε την διανομή της ταχύτητας μέσα στο επιφανειακό στρώμα είναι:

$$U(z) = \frac{U_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ} \quad (2.1)$$

$$U(z) = U(z_0) \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha \quad \text{ΕΚΘΕΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ} \quad (2.2)$$

όπου,

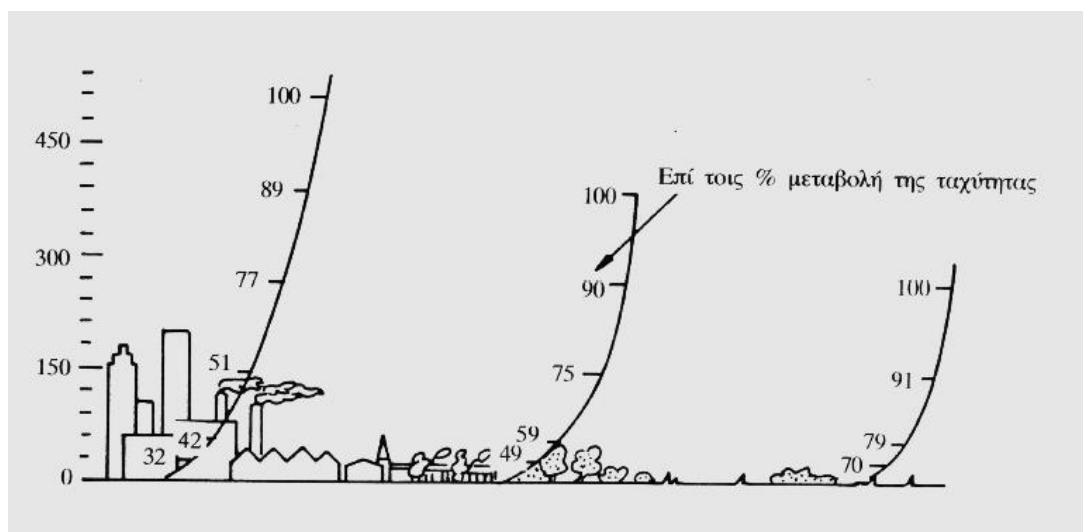
$U(z)$: η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z

U_* : η ταχύτητα τριβής που εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα και την επιφανειακή τάση Reynolds

α : ο εκθέτης του εκθετικού νόμου που παίρνει τιμές από 0.1 έως 0.4

k : η σταθερά von Karman ($k = 0.4$) και

z_0 : η παράμετρος τραχύτητας ή μήκος τραχύτητας.



Σχήμα 2.2 Μεταβολή της ταχύτητας με το υψόμετρο

Η τραχύτητα του εδάφους εκφράζει το είδος του εδάφους και ιδιαίτερα την μορφολογία του. Τα μεγέθη που εκφράζουν την τραχύτητα του εδάφους είναι το μήκος τραχύτητας και η κλάση τραχύτητας. Από τη μια πλευρά, το μήκος τραχύτητας μπορεί να μεταβάλλεται με τις εποχές και τις καιρικές συνθήκες, αφού επηρεάζεται από την πυκνότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών, ενώ η κλάση τραχύτητας καθορίζεται από την ύπαρξη εμποδίων, όπως φαίνεται στον παρακάτω **Πίνακα 2.1**.

ΚΛΑΣΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ 1	Ανοικτές περιοχές χωρίς εμπόδια. Το έδαφος είναι επίπεδο ή με πολύ ελαφριές κλίσεις. Μπορεί να υπάρχουν μεμονωμένες αγροικίες και χαμηλοί θάμνοι.
ΚΛΑΣΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ 2	Καλλιεργημένη περιοχή με ορισμένα εμπόδια σε απόσταση μεγαλύτερη του 1χλμ. μεταξύ τους και μερικές οικίες. Το έδαφος είναι επίπεδο και κυματώδες.
ΚΛΑΣΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ 3	Συνδυασμός δάσους και καλλιεργημένης περιοχής με πολλά εμπόδια στα περίχωρα της πόλης. Τα εμπόδια είναι κοντά μεταξύ τους σε αποστάσεις μικρότερες από μερικές εκατοντάδες μέτρα.

Πίνακας 2.1 Κλάσεις τραχύτητας

2.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ

Σε μια σύνθετη τοπογραφία, η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά μεταξύ κοντινών περιοχών. Για το λόγο αυτό χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή της θέσης μιας ανεμογεννήτριας ή ενός αιολικού πάρκου, αφού απαιτείται πολλαπλή εξέταση των απαραίτητων παραγόντων.

Πιο συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό των επιδράσεων της ανώμαλης τοπογραφίας στην ταχύτητα του ανέμου απαραίτητη είναι η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου υπάρχουν απότομες κλίσεις δεν υπάρχει κάποιο αξιόπιστο μοντέλο. Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί εμπειρικοί κανόνες που μπορούν να δώσουν ποιοτικές και ποσοτικές εκτιμήσεις.

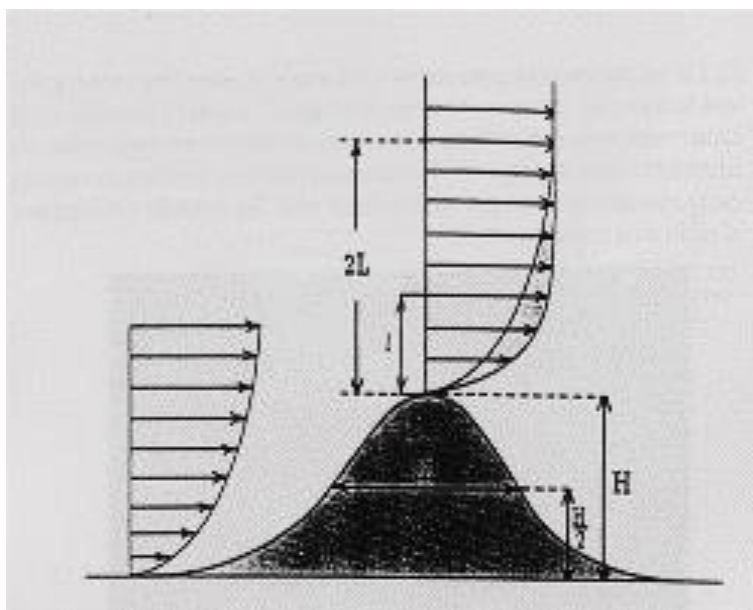
Οι καλύτερες θέσεις για παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι στην κορυφή ομαλών λόφων, μακριά από άλλους λόφους. Εξετάζοντας μια λοφοσειρά, ο άνεμος που τη συναντάει, επιταχύνεται στην κορυφή και επιβραδύνεται στους πρόποδες. Έστω H το ύψος του λόφου και $2L$ το πλάτος του λόφου σε ύψος $H/2$. Υπάρχει ένα ύψος l πάνω από την κορυφή, όπου η σχετική επιτάχυνση, ΔS γίνεται μέγιστη:

$$l = 0.3z_0 \left(\frac{L}{z_0}\right)^{0.67} \quad (2.3)$$

$$\Delta S_1 = 2\frac{l}{L} \quad (2.4)$$

όπου,

l : το ύψος πάνω από την κορυφή του λόφου.



Σχήμα 2.3 Επιτάχυνση ανέμου σε λοφοσειρά

Το προφίλ της ταχύτητας αποτελείται από τρία μέρη: Ανάμεσα στο επίπεδο της γης και το ύψος l το προφίλ είναι λογαριθμικό, ανάμεσα στο ύψος l και $2L$ ένα διαφοροποιημένο λογαριθμικό προφίλ, ενώ από το ύψος $2L$ και πάνω το προφίλ του ανέμου παραμένει αμετάβλητο, $\Delta S=0$ (ίδιο με το προφίλ πριν από τον λόφο).

$$\Delta S = \begin{cases} 2\frac{h}{L} & 0 \leq h \leq l \\ 2\frac{h}{L} \frac{\ln(H/2L)}{\ln(l/2L)} & l \leq h \leq 2L \\ 0 & h \geq 2L \end{cases} \quad (2.5)$$

2.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Η ταχύτητα του ανέμου σε μια ορισμένη θέση στο χώρο δεν παραμένει σταθερή στο χρόνο, αλλά μεταβάλλεται κατά μέγεθος και διεύθυνση. Σημαντικά μεγέθη, αναφορικά με τα ανεμολογικά δεδομένα είναι η μέση ταχύτητα ανέμου, η τυπική απόκλιση και ο βαθμός της τύρβης. Η μέση ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται δεδομένης μιας σειράς μετρήσεων από την σχέση:

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n \quad (2.6)$$

όπου:

\bar{V} : η μέση ταχύτητα του ανέμου

v_n : η ταχύτητα του ανέμου στο n σημείο των μετρήσεων και

$n = 1, 2, 3 \dots N$ ο αριθμός των μετρήσεων.

Η τυπική απόκλιση σ δείχνει πόσο οι μετρήσεις αποκλίνουν από τη μέση τιμή του ανέμου:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (v_n - \bar{V})^2} \quad (2.7)$$

Με τον όρο τύρβη ονομάζουμε τη διαταραχή της ταχύτητας του ανέμου - διαφορές στιγμιαίας ταχύτητας από τη μέση τιμή ταχύτητας, και έχει ιδιαίτερη σημασία για την απόδοση των αιολικών μηχανών, αλλά και τον υπολογισμό της αντοχής λόγω των εναλλασσόμενων φορτίων που αναπτύσσονται και που οδηγούν στην κόπωση των υλικών της μηχανής.

Ο βαθμός της τύρβης S -αδιάστατη τιμή της έντασης της τύρβης ορίζεται ως η τυπική απόκλιση της πρώτης μέτρησης από τη μέση τιμή των 10 λεπτών:

$$S = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (2.8)$$

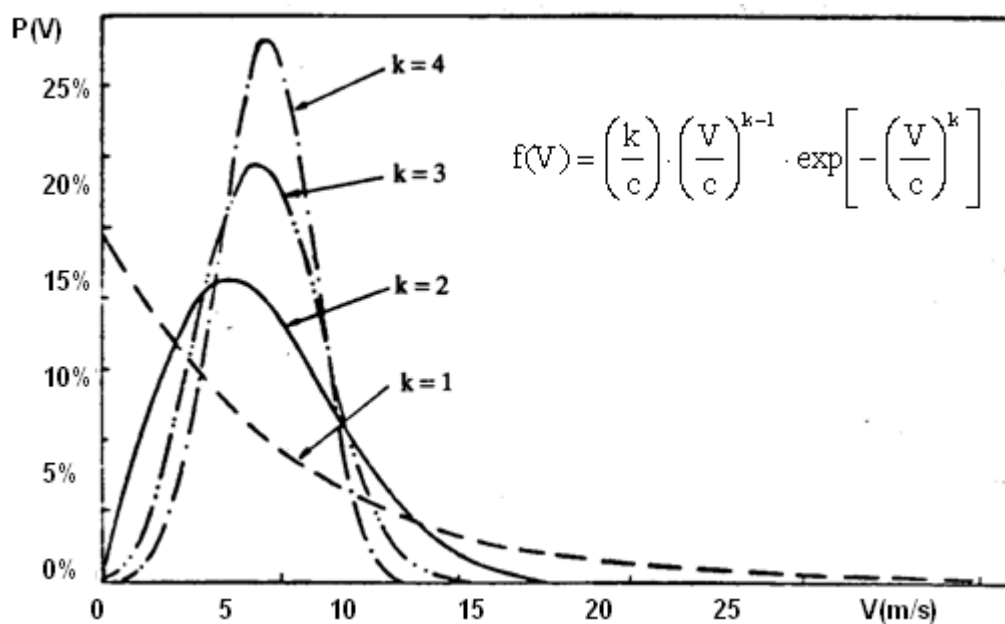
Η διάρκεια πνοής του ανέμου σε μια περιοχή είναι απαραίτητο στοιχείο για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας μιας μηχανής. Η καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου εκφράζει το ποσοστό του χρόνου για τις οποίες πνέει άνεμος ταχύτητας μεγαλύτερης μιας συγκεκριμένης τιμής. Η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας ταχύτητας $P(V)$ αποτελεί μια άλλη καμπύλη ισοδύναμη με την καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου και εκφράζει την πυκνότητα πιθανότητας ο άνεμος να έχει ταχύτητα μεταξύ δύο τιμών. Οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν την ίδια πληροφορία με διαφορετικό τρόπο. Η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας μπορεί να προκύψει με παραγωγή της καμπύλης διάρκειας πνοής του ανέμου. Το εμβαδόν της επιφάνειας που ορίζεται κάτω από τις καμπύλες διάρκειας πνοής ανέμου και πυκνότητας πιθανότητας είναι ίσο με τη μονάδα.

2.6 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΝΕΜΟΥ

Η εμπειρία από μετρήσεις αιολικού δυναμικού έχει δείξει ότι η πυκνότητα πιθανότητας κατανομής ταχύτητας μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά με πολύ καλή προσέγγιση από την κατανομή Weibull (Σχήμα 2.4). Η κατανομή Weibull είναι μια διπαραμετρική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας με παραμέτρους c και k και ορίζεται ως:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (2.9)$$

Η παράμετρος k καθορίζει το ύψος της κατανομής Weibull, ενώ η παράμετρος c επηρεάζει την κατανομή κατά τον οριζόντιο άξονα.



Σχήμα 2.4 Κατανομή Weibull

2.7 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Χαρακτηριστική είναι η διαφορά που παρουσιάζεται στην αρχή λειτουργίας των παραδοσιακών ανεμόμυλων, με τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι κινούνται είτε με τη βοήθεια της αντίστασης των πτερυγίων τους στον άνεμο, είτε με εκμετάλλευση της άνωσης που ασκείται πάνω τους. Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες η κίνηση οφείλεται στην άνωση, η οποία αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί να γίνει υπερδεκαπλάσια της αντίστασης. Στις μέρες μας ο πιο γνωστός τύπος ανεμοκινητήρα, που έχει εφαρμοσθεί ευρύτατα στην πράξη είναι δρομέας οριζοντίου άξονα. Ο βαθμός απόδοσης C_P χαρακτηρίζει τους ανεμοκινητήρες και ονομάζεται και συντελεστής ισχύος. Ορίζεται ως:

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V^3 A} \quad (2.10)$$

όπου,

P : η ισχύς που αποδίδεται από την ανεμογεννήτρια

ρ : η πυκνότητα του ανέμου και στον παρονομαστή είναι η ισχύς που έχει ο άνεμος ταχύτητας V και περνάει από επιφάνεια A .

Διακρίνουμε, λοιπόν ότι η ισχύς του ανέμου ανά τετραγωνικό μέτρο μετωπικής επιφάνειας της ανεμογεννήτριας είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου.

Η παραγωγή ισχύος ελαττώνεται όταν:

- τα πτερύγια είναι πολύ πυκνά ή περιστρέφονται πολύ γρήγορα, οπότε ένα πτερύγιο συναντά τον στροβιλισμό που δημιούργησε το προηγούμενο
- τα πτερύγια είναι πολύ αραιά ή περιστρέφονται πολύ αργά, οπότε μεγάλο ποσοστό του ανέμου διέρχεται από τη διατομή της έλικας δίχως να εναποθέσει ισχύ.

Ο συντελεστής ισχύος C_P εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής και είναι συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου λ :

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (2.11)$$

όπου,

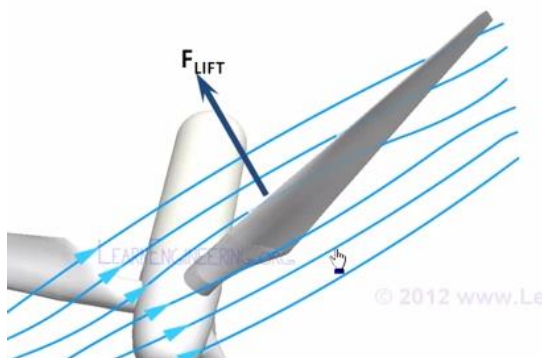
ω : η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και

R : η ακτίνα του.

Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω του πτερυγίου, έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια με τη μορφή περιστροφής του άξονα του πτερυγίου και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνουμε την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Πιο συγκεκριμένα, όταν η ενέργεια του ανέμου διέρχεται μέσα από τις κατάλληλα σχεδιασμένες λεπίδες, δημιουργείται μια δύναμη άνωσης, της οποίας η εφαπτομενική συνιστώσα δημιουργεί την περιστροφή των λεπίδων. Με τη βοήθεια του μηχανολογικού εξοπλισμού (κιβώτιο ταχυτήτων, γεννήτρια), η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Ωστόσο, η διεύθυνση του ανέμου αλλάζει συνεχώς. Για το λόγο αυτό, απαιτείται ένα σύστημα προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας, το οποίο θα εξασφαλίζει τη μέγιστη δέσμευση του ανέμου.

Όταν στο πεδίο ροής του ανέμου παρεμβληθεί μία επιφάνεια, η μάζα του αέρα που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια αυτή ασκεί πάνω της μία δύναμη. Θεωρούμε ότι η ροή του ανέμου ταχύτητας v είναι συνεχής και σταθερή και ότι η διεύθυνσή του σχηματίζει μία γωνία α με την επιφάνεια.

Η δύναμη F μπορεί να αναλυθεί σε δύο ορθογώνιες συνιστώσες F_D και F_L , από τις οποίες η πρώτη έχει την ίδια φορά και διεύθυνση με το διάνυσμα του ανέμου, ενώ η δεύτερη είναι κάθετη προς την πρώτη. Οι δυνάμεις αυτές ονομάζονται αντίστοιχα ιξώδης αντίσταση και δυναμική άνωση. Η F_L πηγάζει από τη διαφορά πίεσης ανάμεσα στο πάνω και στο κάτω μέρος του πτερυγίου (Σχήμα 2.5) και η F_D εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού καθώς επίσης και από το μέγεθος, το σχήμα και την ταχύτητα του πτερυγίου.



Σχήμα 2.5 Η δύναμη άνωσης

Αν A είναι το εμβαδόν της επιφάνειας, τότε τα μέτρα των δυνάμεων υπολογίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

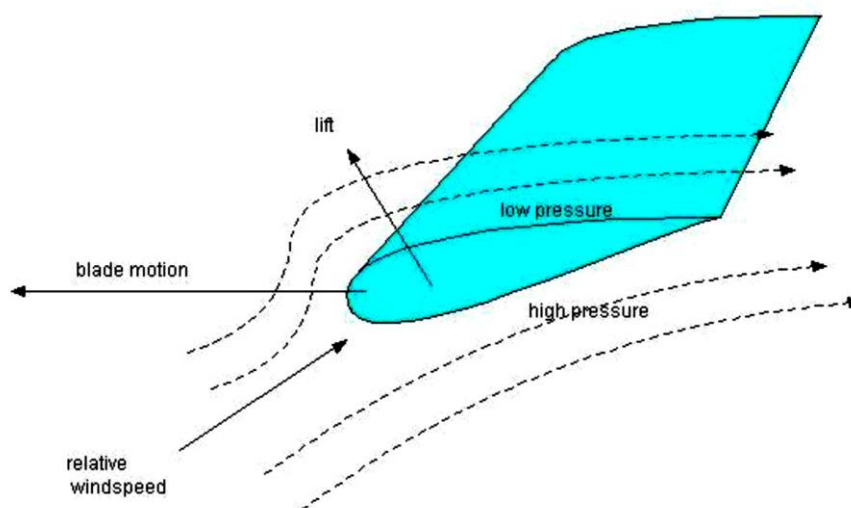
$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D \alpha V^2 \quad (2.12)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L \alpha V^2 \quad (2.13)$$

όπου,

C_D, C_L : αδιάστατοι συντελεστές επιβράδυνσης, οι οποίοι εξαρτώνται από τη γωνία α , παίρνουν συνήθως τιμές μεταξύ 0 και 1, και περιγράφουν το πόσο μια διάταξη αποκλίνει από την ιδανική συμπεριφορά.

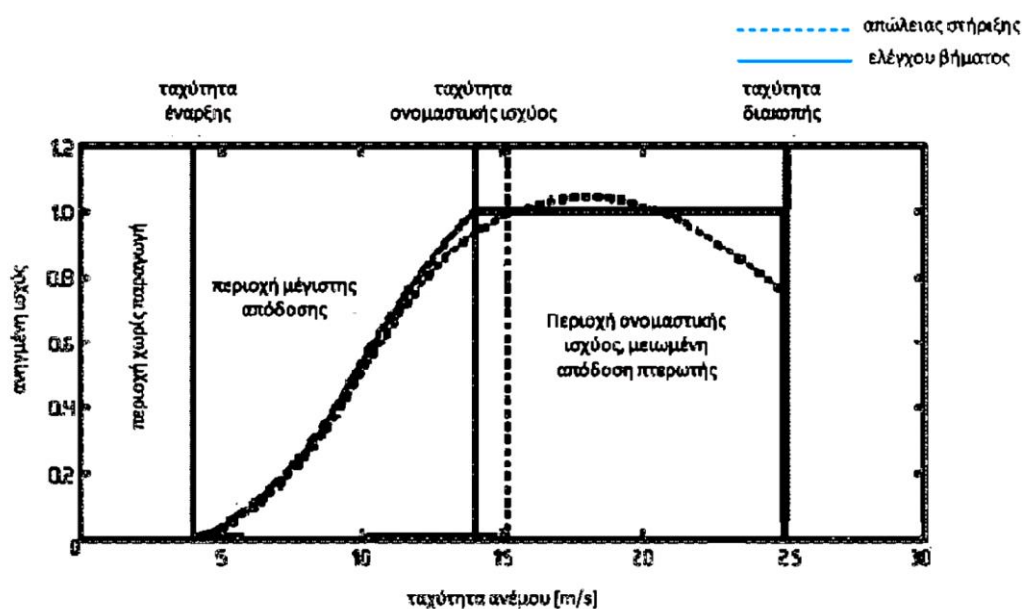
Εξαιτίας της μη-συμμετρικής μορφής του πτερυγίου, το πάνω μέρος του πτερυγίου έχει μεγαλύτερη περίμετρο από αυτή που έχει το κάτω μέρος. Δεδομένου ότι η ροή πάνω από το πτερύγιο πρέπει να καλύψει μεγαλύτερη απόσταση, είναι αναγκασμένη να κινηθεί πιο γρήγορα. Αυτό συμβαίνει διότι η ροή του αέρα θα πρέπει μέσα στο ίδιο χρονικό διάστημα να "καλύψει" και το πάνω και το κάτω μέρος του πτερυγίου (αρχή διατήρησης της μάζας). Καθώς η ροή του αέρα επιταχύνεται πάνω από το πτερύγιο, η πίεση πέφτει ανάλογα στο πάνω μέρος του πτερυγίου (από τη θεωρία Bernoulli $\frac{1}{2} \rho V^2 + P = constant$ προκύπτει ότι όταν τα σωματίδια του αέρα περνούν από μια περιοχή χαμηλότερης πίεσης τότε αυτά επιταχύνουν και αντίστροφα). Έτσι υπάρχει μια περιοχή χαμηλότερης πίεσης πάνω από το πτερύγιο σε σύγκριση με τη πίεση που υπάρχει κάτω από αυτό. Αυτή η διαφορά πίεσης είναι που δημιουργεί την αεροδυναμική δύναμη.



Σχήμα 2.6 Ροή του ανέμου στο πάνω και στο κάτω μέρος του πτερυγίου

Σημαντικό ρόλο στη λειτουργία των ανεμογεννητριών παίζει επίσης η ροπή που αναπτύσσεται λόγω των δυνάμεων που εξασκεί ο άνεμος στην έλικα. Η ροπή καθορίζει το πόσο εύκολα μπορεί να ξεκινήσει η περιστροφή της έλικας όταν αυτή βρεθεί στο πεδίο ροής του ανέμου. Μεγάλη ροπή συνεπάγεται εκκίνηση της περιστροφής σε μικρές ταχύτητες του ανέμου, ενώ έλικες με μικρή ροπή απαιτούν υψηλές ταχύτητες εκκίνησης.

Στην πράξη οι ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν σε μια περιοχή ταχυτήτων ανέμου. Η χαμηλότερη ταχύτητα, η ταχύτητα έναρξης (cut-in speed) είναι περίπου 4-5 m/s, καθώς για χαμηλότερες ταχύτητες η παραγόμενη ενέργεια είναι πολύ μικρή (μικρότερη από τις απώλειες του συστήματος). Η ταχύτητα αποκοπής (cut-out speed) καθορίζεται από την ικανότητα της συσκευής να αντέχει την υψηλή ταχύτητα του ανέμου. Η ονομαστική ταχύτητα (rated speed) είναι η ταχύτητα του ανέμου στην οποία η συσκευή επιτυγχάνει τη μέγιστη ονομαστική ισχύ. Πάνω από αυτή την ταχύτητα υπάρχουν μηχανισμοί για να διατηρείται η παραγόμενη ενέργεια σταθερή για αυξανόμενη ταχύτητα ανέμου.



Σχήμα 2.7 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας

Ταχύτητες ανέμου κάτω από 5 m/s δεν είναι ικανές να παράγουν αρκετή ενέργεια έτσι ώστε να είναι αποδοτική η ανεμογεννήτρια. Από την άλλη μεριά ισχυρές ριπές ανέμου μπορεί βραχυπρόθεσμα να παράγουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας αλλά δεν είναι οικονομικά βιώσιμο να σχεδιάζονται ανεμογεννήτριες οι οποίες θα μπορούν να αξιοποιήσουν τις σπάνιες υψηλές τιμές προσφερόμενης ενέργειας αλλά λόγω της υψηλής αντοχής τους θα υπολειτουργούν όλο το υπόλοιπο χρονικά διάστημα. Έτσι η ιδανική

τοποθεσία είναι ένα μέρος με σταθερές ταχύτητες ανέμων και μια ανεμογεννήτρια που θα είναι σε θέση να αξιοποιήσει στο έπακρο τους "ελαφρύτερους" ανέμους, ενώ θα αντέχουν σε περιπτώσεις ισχυρών ριπών αέρα.

Αναλυτικότερα:

- Για μικρές ταχύτητες ανέμου όπου η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι μικρότερη από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας η γωνία προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο είναι η βέλτιστη δυνατή (ο λόγος δύναμη ανύψωσης προς δύναμη αντίστασης παίρνει τη μέγιστη τιμή του) ώστε να παράγεται η μέγιστη ανυψωτική δύναμη και άρα τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας να περιστρέφονται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα παράγοντας έτσι τη μέγιστη δυνατή ενέργεια.
- Για μεγάλες ταχύτητες ανέμου όπου η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας η γωνία προσβολής των πτερυγίων είναι μικρότερη από τη βέλτιστη δυνατή παράγοντας έτσι μικρότερη ανυψωτική δύναμη από τη μέγιστη δυνατή. Αυτός ο περιορισμός προστατεύει το δρομέα και τα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας από τις ισχυρές καταπονήσεις που επιβάλλονται όταν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι αρκετά μεγάλη. Σε αυτή τη περίπτωση η παραγόμενη ενέργεια είναι η μέγιστη δυνατή που μπορεί να παράγει η ανεμογεννήτρια.
- Για υπερβολικές ταχύτητες ανέμου όπου ακόμα και για μικρές γωνίες προσβολής των πτερυγίων οι ανυψωτικές δυνάμεις που παράγονται είναι αρκετά μεγάλες και ικανές να περιστρέφουν το δρομέα πολύ γρήγορα, η λειτουργία της ανεμογεννήτριας διακόπτεται και ο δρομέας σταματά να περιστρέφεται έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

Με τον τρόπο αυτό, είναι σημαντικό να συνδυάζεται η συχνότητα περιστροφής της έλικας με το εύρος των ταχυτήτων του ανέμου ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοση.

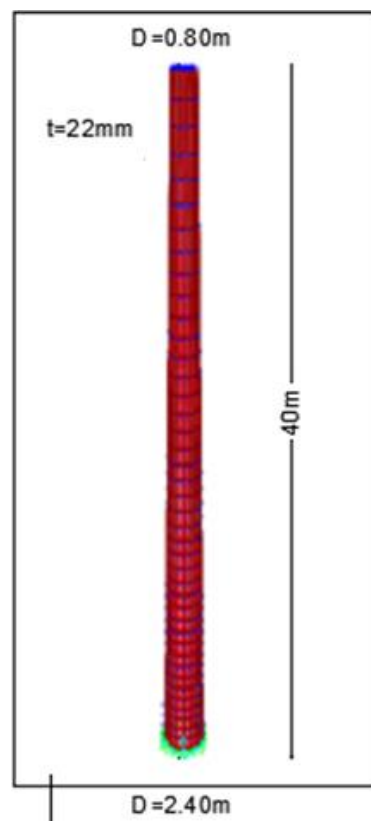
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών

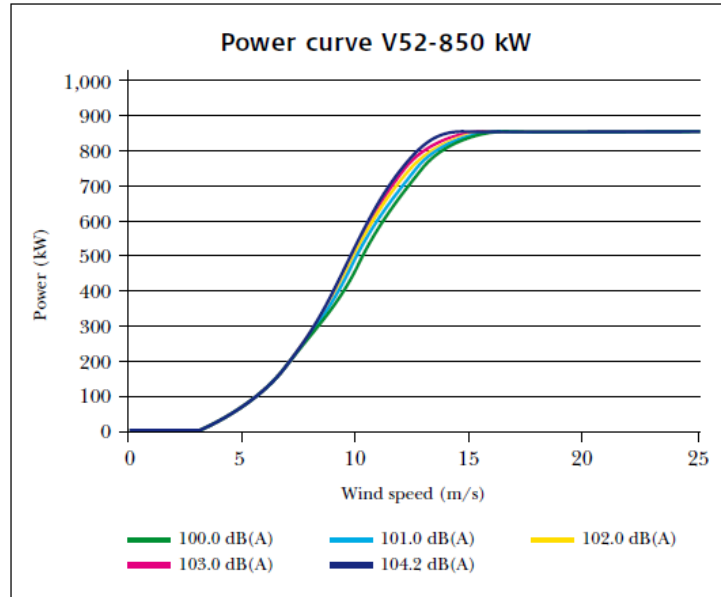
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πύργου της ανεμογεννήτριας, καθώς και οι ιδιότητες των δυο διαφορετικών υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. Στην περίπτωση των πύργων από σύνθετα υλικά γίνεται αναλυτικός υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας και διάτμησης στους άξονες x-y των επιπέδων φόρτισης.

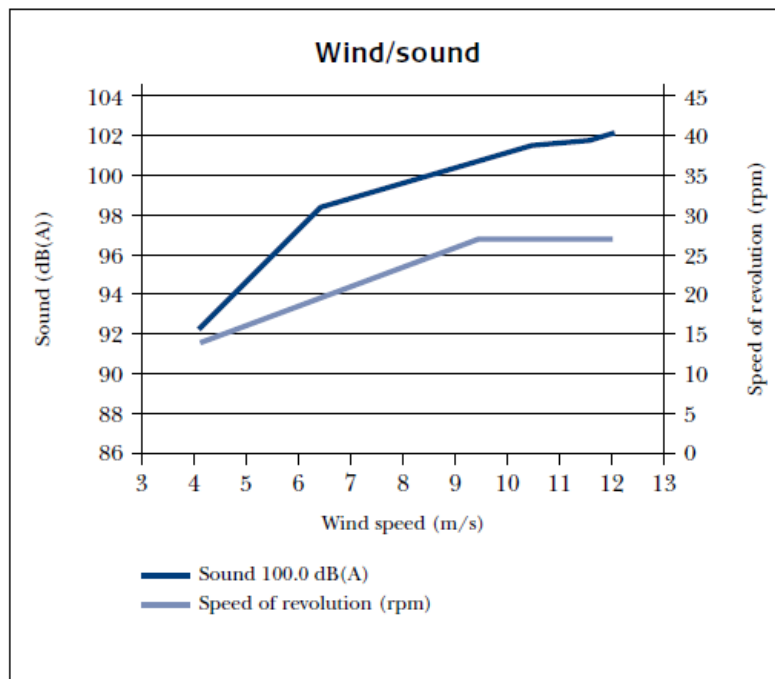
3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ



Σχήμα 3.1 Πύργος ανεμογεννήτριας



Σχήμα 3.2 Καμπύλες ισχύος σε διάφορα επίπεδα ήχου



Σχήμα 3.3 Επίπεδα ήχου ανάλογα με τις ταχύτητες ανέμου

Ο πύργος ανεμογεννήτριας που εξετάζεται στην παρούσα εργασία έχει κυλινδρική μορφή. Το συνολικό του ύψος είναι 40 μέτρα, με εξωτερική διάμετρο στη βάση 2.4 μέτρα και στην κορυφή 0.8 μέτρα. Το πάχος του πύργου επιλέχθηκε 22 χιλιοστά. Η κατασκευή αυτή καλείται να στηρίξει μια τουρμπίνα ισχύος 850 kW. Τα τεχνικά της χαρακτηριστικά εκλέχτηκαν σύμφωνα με το μοντέλο V52-850kW με την επωνυμία της εταιρίας Vestas, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 3.1**. Θεωρούμε ότι η ανεμογεννήτρια πρόκειται να κατασκευαστεί σε περιοχή που απέχει λιγότερο από 10km μακριά από την ακτή.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
<i>Ονομαστική ισχύς (kW)</i>	850
<i>Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (m/s)</i>	16
<i>Ταχύτητα ανέμου έναρξης περιστροφής (m/s)</i>	4
<i>Ταχύτητα ανέμου λήξης περιστροφής (m/s)</i>	25
<i>Ταχύτητα δρομέα (rpm)</i>	16
<i>Διάμετρος δρομέα (m)</i>	52
<i>Επιφάνεια σάρωσης δρομέα (m²)</i>	2.124
<i>Αριθμός λεπίδων</i>	3
<i>Μήκος λεπίδων (m)</i>	25
<i>Μέγιστη χορδή λεπίδων (m)</i>	2.3
<i>Ύψος πλήμνης (m)</i>	40
<i>Μέγιστο πλάτος κεντρικού άξονα (m)</i>	2.24
<i>Μέγιστο μήκος κεντρικού άξονα (m)</i>	2.7

Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία επιλέχτηκε ο σχεδιασμός τριών ειδών πύργων ανεμογεννήτριας, με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά αλλά από διαφορετικά υλικά. Ο πρώτος πύργος κατασκευάζεται από χάλυβα S355, ενώ οι άλλοι δυο από σύνθετα υλικά δυο ειδών (Glass/Epoxy και Graphite/Epoxy). Για την προσομοίωση του μοντέλου γίνεται η θεώρηση ότι τα διακριτοποιημένα στοιχεία είναι στοιχεία κελύφους.

3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Στην περίπτωση του πύργου από χάλυβα, επιλέχτηκε κατασκευαστικός χάλυβας υψηλής αντοχής S355 με τις εξής μηχανικές ιδιότητες:

$$f_y = 355\text{MPa}, f_u = 510\text{MPa}, E = 210\text{GPa}, \nu = 0.3, \rho = 7850\text{ kg/m}^3 .$$

Στην περίπτωση των πύργων από σύνθετα υλικά έχουμε δύο υποπεριπτώσεις:

- 1η υποπερίπτωση: Πύργος από σύνθετα υλικά τύπου *Scotchply 1002*

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	FRP (Glass/Epoxy)
ν_f	0.66
Πυκνότητα (g / cm^3)	1.8
E_1 (GPa)	38.6
E_2 (GPa)	8.27
ν_{12}	0.26
G_{12}	4.14

Πίνακας 3.2

Η πρώτη περίπτωση του πύργου από σύνθετα υλικά θα αποτελείται από 10 στρώσεις πάχους 2mm η καθεμία, με κώδικα αλληλουχίας διαστρωμάτωσης $[(+30/-30)_5]_T$. Ο δείκτης 1 στον παραπάνω πίνακα δηλώνει την παράλληλη διεύθυνση προς τις ίνες (κύρια διεύθυνση), ενώ ο δείκτης 2 την εγκάρσια ως προς τις ίνες διεύθυνση.

3.3.1 ΕΠΙΠΕΔΗ ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Για ένα ορθότροπο υλικό σε επίπεδη εντατική κατάσταση το αντίστροφο του νόμου ελαστικότητας συναρτήσει των μηχανικών σταθερών,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

απλοποιείται ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & \nu_{21}/E_2 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

αφού, $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$.

Οι ανεξάρτητες σταθερές είναι πλέον τέσσερις, δηλαδή $E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}$ και ισχύει:

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (3.3)$$

Αντιστρέφοντας την σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, έχουμε για τη γενική περίπτωση ορθότροπου υλικού:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \frac{1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \begin{bmatrix} E_1 & \nu_{21}E_1 & 0 \\ \nu_{12}E_2 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu_{12}\nu_{21})G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

και ορίζοντας τους όρους ακαμψίας Q_{ij} ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & Q_{22} &= \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & (3.5) \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = Q_{21} & Q_{66} &= G_{12} \end{aligned}$$

έχουμε τη **Σχέση 3.4** υπό την ακόλουθη συμβολική μορφή:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Στο κύριο σύστημα 1-2, οι όροι $Q_{16} = Q_{26} = Q_{61} = Q_{62}$ είναι μηδενικοί.

Για το σύνθετο υλικό Glass/Epoxy του πύργου έχουμε:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{38.6}{1-0.26*0.04} = 39.01 & Q_{22} &= \frac{8.27}{1-0.26*0.04} = 8.36 \\ Q_{12} &= \frac{0.04*38.6}{1-0.26*0.04} = 1.56 & Q_{66} &= 4.14 \end{aligned}$$

Χρησιμοποιώντας τους όρους ευκαμψίας S_{ij} , η **Σχέση 3.2** γράφεται:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

όπου:

$$S_{11} = 1/E_1, S_{22} = 1/E_2 \quad (3.8)$$

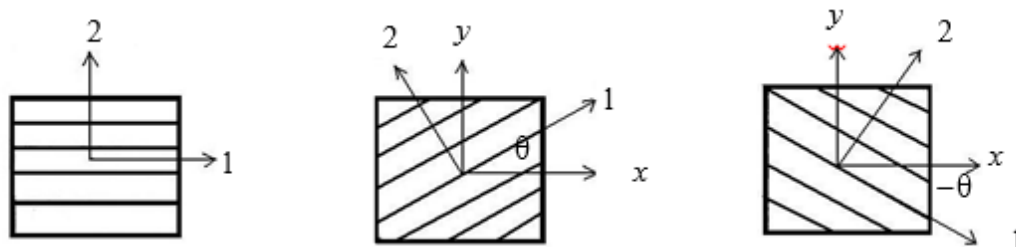
$$S_{12} = S_{21} = -\nu_{12}/E_1 = -\nu_{21}/E_2, S_{66} = 1/G_{12}$$

Οπότε,

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.02591 & -0.00674 & 0 \\ -0.00674 & 0.12092 & 0 \\ 0 & 0 & 0.24155 \end{bmatrix}$$

Εξαιρέσει ορισμένων περιπτώσεων όπου απαιτείται η χρήση τρισδιάστατης θεώρησης (3D), τα σύνθετα υλικά αντιμετωπίζονται συνήθως σαν δισδιάστατα (2D) ελαστικά υλικά. Ειδικότερα στα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά με προσανατολισμένες ίνες, κάθε στρώση χαρακτηρίζεται από την κύρια διεύθυνση (1) που είναι παράλληλη στις ίνες, από την εγκάρσια διεύθυνση (2) που είναι κάθετη στις ίνες, και την εκτός 1-2 διεύθυνση (3).

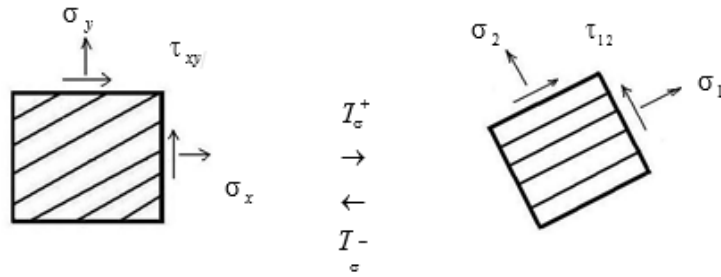
Γνωρίζοντας τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων στο σύστημα υλικού 1-2 το οποίο αντιστοιχεί στη διεύθυνση των ινών και την κάθετο της, θέλουμε να προσδιορίσουμε την ανάλογη σχέση σε ένα άλλο σύστημα x - y στραμμένο υπό γωνία θ ως προς το σύστημα 1-2. Το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός των σχέσεων μετασχηματισμού για τις τάσεις και τις παραμορφώσεις από το σύστημα 1-2 στο σύστημα x - y . Η θετική φορά για την γωνία θ καθορίζεται στο ακόλουθο **Σχήμα 3.2**:



Σχήμα 3.4 Σύστημα υλικού 1-2 και τυχόν σύστημα x - y . Γωνία μετασχηματισμού θ

Στα σύνθετα υλικά (ορθότροπα ή ανισότροπα) οι ιδιότητες επηρεάζονται από τον προσανατολισμό των ινών. Ο μετασχηματισμός είναι αναγκαίος για τον προσδιορισμό των σχέσεων τάσεων και παραμορφώσεων στο σύστημα του υλικού καθώς και για τον προσδιορισμό των όρων ακαμψίας και ευκαμψίας και των ισοδύναμων μέτρων ελαστικότητας.

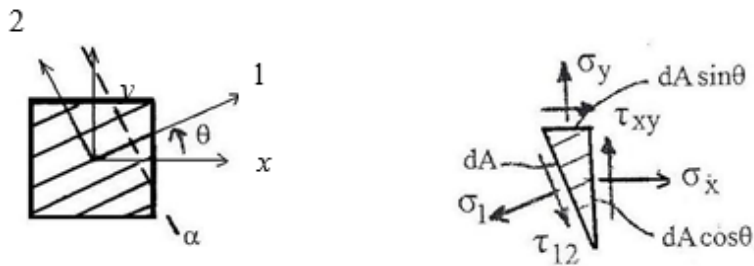
3.3.2 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ ΤΑΣΕΩΝ



Σχήμα 3.5 Μετασχηματισμός τάσεων

Για να προσδιορίσουμε τα μητρώα μετασχηματισμού $[T_{\sigma}^+]$ και $[T_{\sigma}^-]$ ακολουθείται η εξής διαδικασία:

Κάνουμε μια τομή α -α κάθετα στη διεύθυνση των ινών και θεωρούμε την ισορροπία του τριγωνικού στοιχείου. Θέτουμε χάριν απλούστευσης $c = \cos(\theta)$ και $s = \sin(\theta)$



Σχήμα 3.6 Τομή α -α και ισορροπία δράσεων

Ισορροπία κατά τον άξονα x ($\Sigma F_x = 0$) δίνει:

$$c\sigma_x + s\tau_{xy} = c\sigma_1 - s\tau_{12} \quad (3.9)$$

Ισορροπία κατά τον άξονα y ($\Sigma F_y = 0$) δίνει:

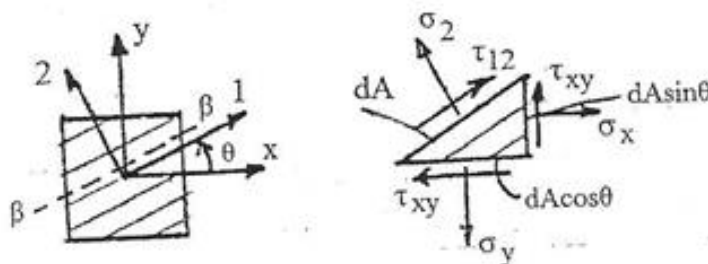
$$s\sigma_y + c\tau_{xy} = s\sigma_1 - c\tau_{12} \quad (3.10)$$

Λύνοντας τις παραπάνω δύο εξισώσεις ως προς τις τάσεις σ_1 και τ_{12} προκύπτει:

$$\sigma_1 = c^2\sigma_x + s^2\sigma_y + 2cs\tau_{xy} \quad (3.11)$$

$$\tau_{12} = -cs\sigma_x + cs\sigma_y + (c^2 - s^2)\tau_{xy} \quad (3.12)$$

Κάνουμε μία τομή β-β παράλληλα στη διεύθυνση των ινών και θεωρούμε την ισορροπία του τριγωνικού στοιχείου.



Σχήμα 3.7 Τομή β-β και ισορροπία δράσεων

Ισορροπία κατά τον άξονα x ($\Sigma F_x = 0$) δίνει:

$$s\sigma_x - c\tau_{xy} = s\sigma_2 + c\tau_{12} \quad (3.13)$$

Ισορροπία κατά τον άξονα y ($\Sigma F_y = 0$) δίνει:

$$c\sigma_y - s\tau_{xy} = c\sigma_2 + s\tau_{12} \quad (3.14)$$

Λύνοντας τις παραπάνω δύο εξισώσεις ως προς τις τάσεις σ_2 και τ_{12} προκύπτει η ήδη γνωστή έκφραση για την τ_{12} και

$$\sigma_2 = s^2\sigma_x + c^2\sigma_y - 2cs\tau_{xy} \quad (3.15)$$

Οι εξισώσεις (3.11), (3.12) και (3.14) μπορούν να γραφτούν ως ακολούθως:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T_\sigma^+] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

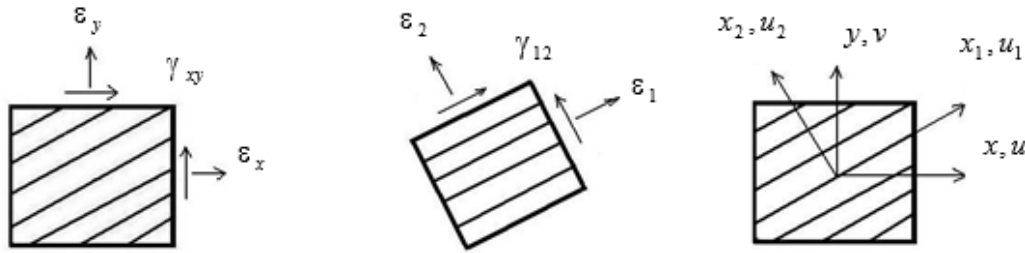
Όπου $[T_\sigma^+]$ είναι το μητρώο μετασχηματισμού των τάσεων $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ από το στραμμένο σύστημα x-y στο σύστημα υλικού 1-2. Έτσι προσδιορίζονται οι τάσεις σ_1, σ_2 και τ_{12} (η γωνία στροφής θ είναι θετικά ορισμένη).

Το μητρώο αντίστροφου μετασχηματισμού $[T_\sigma^-]$ προσδιορίζεται είτε με αντιστροφή του μητρώου $[T_\sigma^+]$, είτε θέτοντας αρνητική τη γωνία στροφής θ .

Χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό, οι τάσεις $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ υπολογίζονται από τις τάσεις $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$. Έτσι:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ cs & -cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T_\sigma^-] \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.17)$$

3.3.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ



Σχήμα 3.8 Μετασχηματισμός παραμορφώσεων

Οι παραμορφώσεις ορίζονται βάσει των μετατοπίσεων ως ακολούθως:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \quad \text{και} \quad \gamma_{12} = \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.19)$$

Για τα συστήματα συντεταγμένων ισχύει:

$$x_1 = x \cos \theta + y \sin \theta = cx + sy \quad (3.20)$$

$$x_2 = -x \sin \theta + y \cos \theta = -sx + cy \quad \text{και αντιστρόφως:} \quad (3.21)$$

$$x = cx_1 - sx_2 \quad (3.22)$$

$$y = sx_1 + cx_2 \quad (3.23)$$

Ομοίως και για τις μετατοπίσεις ισχύει:

$$u_1 = cu + sv \quad (3.24)$$

$$u_2 = -su + cv \quad (3.25)$$

και αντιστρόφως:

$$u = cu_1 - su_2 \quad (3.26)$$

$$v = su_1 + cu_2 \quad (3.27)$$

Συνεπώς, για την παραμόρφωση ε_1 είναι:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = \frac{\partial u_1}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{\partial (cu+sv)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_1} + \frac{\partial (cu+sv)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{\partial u}{\partial x} c^2 + \frac{\partial v}{\partial x} sc + \frac{\partial v}{\partial y} s^2 = \varepsilon_x c^2 + cs\gamma_{xy} + \gamma_{xy} + s^2 \varepsilon_y \quad (3.28)$$

Καθ' όμοιο τρόπο προσδιορίζονται οι εκφράσεις των παραμορφώσεων ε_2 και γ_{12} .

Άρα συνολικά έχουμε:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & cs \\ s^2 & c^2 & -cs \\ -2cs & 2cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T_\varepsilon^+] \{\varepsilon\} \quad (3.29)$$

Ο μετασχηματισμός αυτός των παραμορφώσεων είναι επίσης ένας καθαρά γεωμετρικός μετασχηματισμός και το μητρώο $[T_\varepsilon^-]$ του αντίστροφου μετασχηματισμού υπολογίζεται θέτοντας αρνητική γωνία στο $[T_\varepsilon^+]$ δηλαδή:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -cs \\ s^2 & c^2 & cs \\ 2cs & -2cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [T_\varepsilon^-] \{\varepsilon\} \quad (3.30)$$

Η διαφορά μεταξύ των μητρώων μετασχηματισμού $[T_\sigma]$ και $[T_\varepsilon]$ έγκειται στον ορισμό της διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma_{12}=2\varepsilon_{12}$. Γενικά ισχύει:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_{12} \end{Bmatrix} = [T_\sigma^+] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.31)$$

Εισάγοντας το συντελεστή $1/2$, ο οποίος πολλαπλασιάζει τις παραμορφώσεις γ , στους όρους του μητρώου μετασχηματισμού των τάσεων $[T_\sigma^+]$ παίρνουμε το μητρώο μετασχηματισμού των παραμορφώσεων $[T_\varepsilon^+]$.

3.3.4 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΩΝ ΑΚΑΜΨΙΑΣ

Στο σύστημα υλικού 1-2, η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων είναι:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.32)$$

Έστω ένα σύστημα x-y στραμμένο κατά γωνία θ σε σχέση με το σύστημα υλικού. Για να προσδιοριστεί η σχέση που συνδέει τις τάσεις $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ με τις παραμορφώσεις $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ στο στραμμένο σύστημα x-y, πρέπει να εκφράσουμε τους όρους ακαμψίας Q_{ij} στο σύστημα x-y.

Ακολουθείται η εξής διαδικασία:

1^ο βήμα:

Εκφράζουμε τις παραμορφώσεις $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$ ως προς τις παραμορφώσεις $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ στο σύστημα x-y μέσω του θετικού μετασχηματισμού παραμορφώσεων T_ε^+

$$\varepsilon_1 = c^2 \varepsilon_x + s^2 \varepsilon_y + cs \gamma_{xy} \quad (3.33)$$

$$\varepsilon_2 = s^2 \varepsilon_x + c^2 \varepsilon_y - cs \gamma_{xy} \quad (3.34)$$

$$\gamma_{12} = -2cs \varepsilon_x + 2cs \varepsilon_y + (c^2 - s^2) \gamma_{xy} \quad (3.35)$$

2^ο βήμα:

Εκφράζουμε τις $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ ως προς τις $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$

$$\sigma_1 = (c^2 Q_{11} + s^2 Q_{12}) \varepsilon_x + (s^2 Q_{11} + c^2 Q_{12}) \varepsilon_y + (Q_{11} - Q_{12}) cs \gamma_{xy} \quad (3.36)$$

$$\sigma_2 = (c^2 Q_{12} + s^2 Q_{22}) \varepsilon_x + (s^2 Q_{12} + c^2 Q_{22}) \varepsilon_y + (Q_{12} - Q_{22}) cs \gamma_{xy} \quad (3.37)$$

$$\tau_{12} = -2cs Q_{66} \varepsilon_x + 2cs Q_{66} \varepsilon_y + (c^2 - s^2) Q_{66} \gamma_{xy} \quad (3.38)$$

3^ο βήμα:

Εκφράζουμε τα $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ ως προς τις $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$

$$\sigma_x = c^2 \sigma_1 + s^2 \sigma_2 - 2cs \tau_{12} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} &= c^2 [(c^2 Q_{11} + s^2 Q_{12}) \varepsilon_x + (s^2 Q_{11} + c^2 Q_{12}) \varepsilon_y + cs(Q_{11} - Q_{12}) \gamma_{xy}] + \\ &+ s^2 [(c^2 Q_{12} + s^2 Q_{22}) \varepsilon_x + (s^2 Q_{12} + c^2 Q_{22}) \varepsilon_y + cs(Q_{12} - Q_{22}) \gamma_{xy}] - \\ &- 2cs [-2cs Q_{66} \varepsilon_x + 2cs Q_{66} \varepsilon_y + (c^2 - s^2) Q_{66} \gamma_{xy}] \end{aligned}$$

και ανακατατάσσοντας έχουμε:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= [c^4 Q_{11} + s^4 Q_{22} + 2c^2 s^2 Q_{12} + 4c^2 s^2 Q_{66}] \varepsilon_x + \\ &+ [c^2 s^2 Q_{11} + c^2 s^2 Q_{22} + (c^4 - s^4) Q_{12} - 4c^2 s^2 Q_{66}] \varepsilon_y + \\ &+ [c^3 s Q_{11} - c s^3 Q_{22} + (c s^3 - c^3 s) Q_{12} + 2(c s^3 - c^3 s) Q_{66}] \gamma_{xy} = \\ &= \bar{Q}_{11} \varepsilon_x + \bar{Q}_{12} \varepsilon_y + \bar{Q}_{16} \gamma_{xy} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Ομοίως,

$$\sigma_y = \bar{Q}_{12} \varepsilon_x + \bar{Q}_{22} \varepsilon_y + \bar{Q}_{26} \gamma_{xy} \quad (3.41)$$

$$\tau_{xy} = \bar{Q}_{16} \varepsilon_x + \bar{Q}_{26} \varepsilon_y + \bar{Q}_{66} \gamma_{xy} \quad (3.42)$$

Οι μετασχηματισμένοι όροι ακαμψίας \bar{Q}_{ij} υπολογίζονται συναρτήσει των Q_{ij} ως ακολούθως:

$$\begin{pmatrix} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2 s^2 & 4c^2 s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2 s^2 & 4c^2 s^2 \\ c^2 s^2 & c^2 s^2 & c^4 + s^4 & -4c^2 s^2 \\ c^2 s^2 & c^2 s^2 & -2c^2 s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ c^3 s & -c s^3 & c s^3 - c^3 s & 2(c s^3 - c^3 s) \\ c s^3 & -c^3 s & c^3 s - c s^3 & 2(c^3 s - c s^3) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

Η σχέση μετασχηματισμού των όρων ακαμψίας γράφεται υπό τη συμβολική μορφή:

$$\bar{Q}_{ij} = [T_Q] Q_{ij}, \text{ όπου το } [T_Q] \text{ είναι ένα μητρώο } 6 \times 4.$$

Παρατηρήσεις

Ο ανωτέρω μετασχηματισμός ισχύει μόνο για στροφή από τους άξονες υλικού 1-2 προς ένα τυχαίο σύστημα x-y.

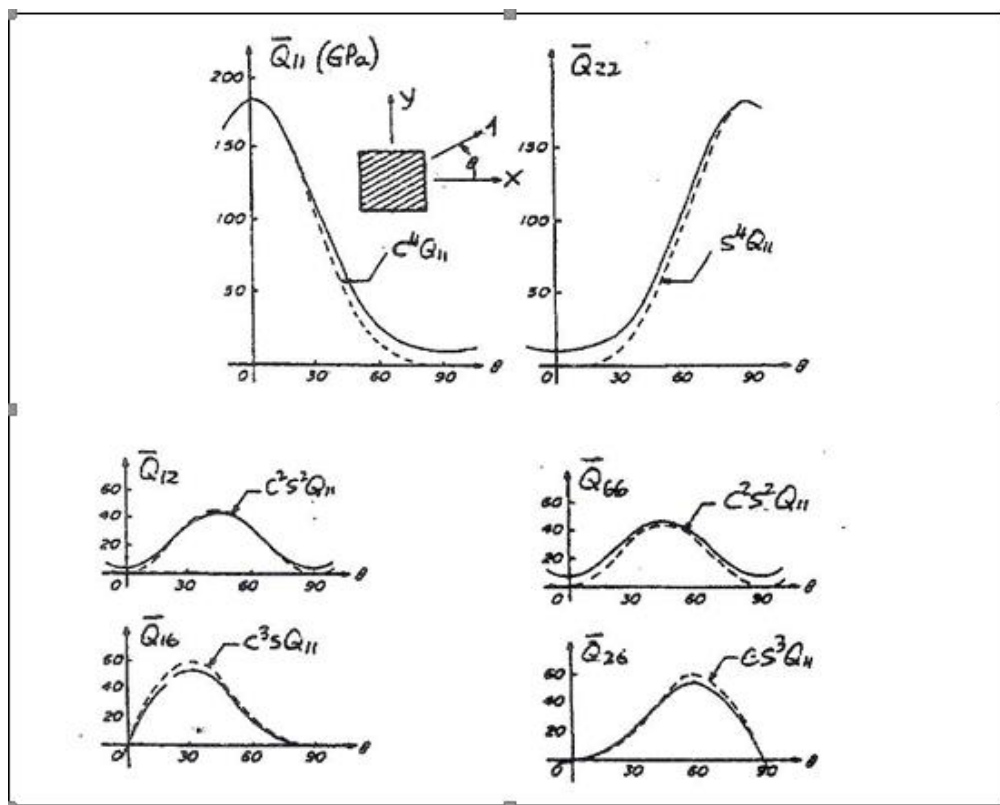
Ο μετασχηματισμός ισχύει για την προσήμανση του **Σχήματος 3.6** (γωνία θ θετική).

Αν η γωνία θ είναι αρνητική απαιτείται αλλαγή πρόσημων στη **Σχέση 3.43**.

Θετικό ή αρνητικό πρόσημο στη γωνία θ επηρεάζει μόνο το πρόσημο των \bar{Q}_{16} , \bar{Q}_{26} .

Τελικά, η **Σχέση 3.32** στο σύστημα 1-2 μετασχηματίζεται στην ακόλουθη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων στο σύστημα x-y.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.44)$$



Σχήμα 3.9 Μεταβολή των σχηματισμένων όρων ακαμψίας συναρτήσει της γωνίας θ

Παρατηρήσεις

1. Στην αντισυμμετρία έχουμε:

$$\bar{Q}_{22}(\theta) = \bar{Q}_{11}(\theta + 90) \quad (3.45)$$

$$\bar{Q}_{26}(\theta) = \bar{Q}_{16}(90 - \theta) \quad (3.46)$$

Στην συμμετρία έχουμε:

$$\bar{Q}_{12}, \bar{Q}_{66} \text{ ως προς } 45^\circ \quad (3.47)$$

2. Σημείο καμπής:

$$\bar{Q}_{12} \rightarrow \max \bar{Q}_{16} \cdot \frac{\partial \bar{Q}_{11}}{\partial \theta} = -4 \bar{Q}_{16} \quad (3.48)$$

$$\bar{Q}_{22} \rightarrow \max \bar{Q}_{26} \cdot \frac{\partial \bar{Q}_{22}}{\partial \theta} = 4 \bar{Q}_{26} \quad (3.49)$$

3. Προσέγγιση ενός όρου: (Q_{11})

$$\bar{Q}_{11} = c^4 Q_{11} \quad (3.50)$$

$$\bar{Q}_{22} = s^4 Q_{11} \quad (3.51)$$

$$\bar{Q}_{12} = c^2 s^2 Q_{11} \quad (3.52)$$

$$\bar{Q}_{66} = c^2 s^2 Q_{11} \quad (3.53)$$

$$\bar{Q}_{16} = c^3 s Q_{11} \quad (3.54)$$

$$\bar{Q}_{26} = c s^3 Q_{11} \quad (3.55)$$

3.3.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΩΝ ΕΥΚΑΜΨΙΑΣ

Για τους άξονες υλικού 1-2, η σχέση είναι:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.56)$$

1^ο βήμα:

Εκφράζουμε τις τάσεις $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ ως προς τις $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ με θετικό T_σ

$$\sigma_1 = c^2\sigma_x + s^2\sigma_y + cs\tau_{xy} \quad (3.57)$$

$$\sigma_2 = s^2\sigma_x + c^2\sigma_y - 2cs\tau_{xy} \quad (3.58)$$

$$\tau_{12} = -cs\sigma_x + cs\sigma_y + (c^2 - s^2)\tau_{xy} \quad (3.59)$$

2^ο βήμα:

Εκφράζουμε τις $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$ ως προς τις $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$

$$\varepsilon_1 = S_{11}(c^2\sigma_x + s^2\sigma_y + 2cs\tau_{xy}) + S_{12}(s^2\sigma_x + c^2\sigma_y - 2cs\tau_{xy}) \quad (3.60)$$

$$\varepsilon_2 = S_{12}(c^2\sigma_x + s^2\sigma_y + 2cs\tau_{xy}) + S_{22}(s^2\sigma_x + c^2\sigma_y - 2cs\tau_{xy}) \quad (3.61)$$

$$\gamma_{12} = S_{66}(-cs\sigma_x + cs\sigma_y + (c^2 - s^2)\tau_{xy}) \quad (3.62)$$

και αναδιατάσσοντας έχουμε:

$$\varepsilon_1 = (c^2S_{11} + s^2S_{12})\sigma_x + (s^2S_{11} + c^2S_{12})\sigma_y + 2cs(S_{11} - S_{12})\tau_{xy} \quad (3.63)$$

$$\varepsilon_2 = (c^2S_{12} + s^2S_{22})\sigma_x + (s^2S_{12} + c^2S_{22})\sigma_y + 2cs(S_{12} - S_{22})\tau_{xy} \quad (3.64)$$

$$\gamma_{12} = -csS_{66}\sigma_x + csS_{66}\sigma_y + (c^2 - s^2)S_{66}\tau_{xy} \quad (3.65)$$

3^ο βήμα:

Εκφράζουμε τις $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ ως προς τις $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ ως προς τις T_ε με αρνητικό

$$\text{Για την } \varepsilon_x \text{ είναι: } \varepsilon_x = c^2\varepsilon_1 + s^2\varepsilon_2 - cs\gamma_{12} \quad (3.66)$$

Αναπτύσσοντας και αναδιατάσσοντας τους όρους προκύπτει η ακόλουθη σχέση μετασχηματισμού για τους όρους ευκαμψίας:

$$\begin{Bmatrix} \bar{S}_{11} \\ \bar{S}_{22} \\ \bar{S}_{12} \\ \bar{S}_{66} \\ \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{26} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4 + s^4 & -c^2s^2 \\ 4c^2s^2 & 4c^2s^2 & -8c^2s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ 2c^3s & -2cs^3 & 2(cs^3 - c^3s) & cs^3 - c^3s \\ 2cs^3 & -2c^3s & 2(c^3s - cs^3) & c^3s - cs^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{12} \\ S_{66} \end{Bmatrix} \quad (3.67)$$

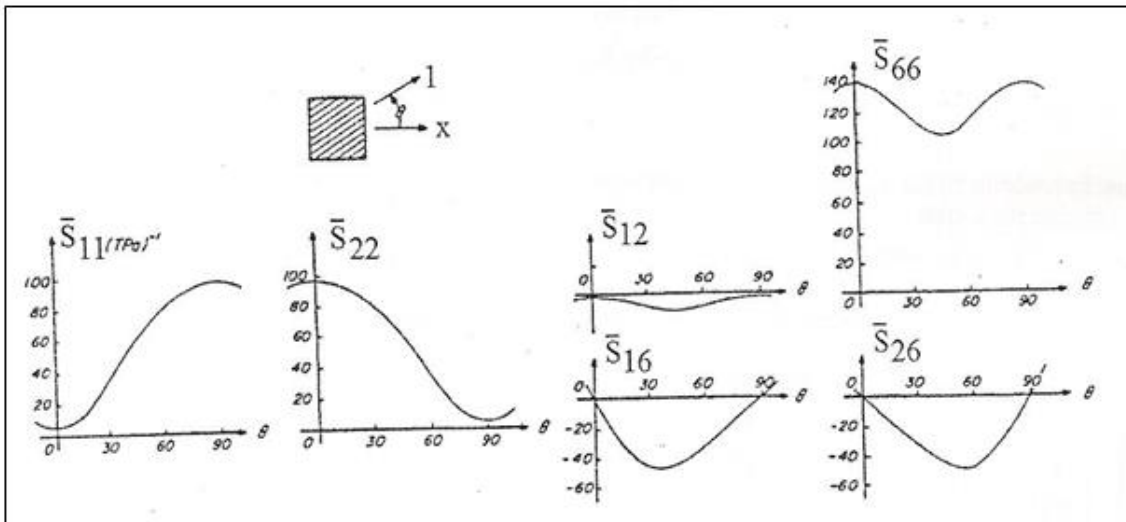
ή υπό συμβολική μορφή $\bar{S}_{ij} = [T_s]S_{ij}$ όπου T_s είναι ένα μητρώο 6x4

Για $\theta=30^\circ$ (για τη διαστρωμάτωση με κώδικα αλληλουχίας $[(+30/-30)_5]_T$)

$$\begin{Bmatrix} \bar{S}_{11} \\ \bar{S}_{22} \\ \bar{S}_{12} \\ \bar{S}_{66} \\ \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{26} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4+s^4 & -c^2s^2 \\ 4c^2s^2 & 4c^2s^2 & -8c^2s^2 & (c^2-s^2)^2 \\ 2c^3s & -2cs^3 & 2(cs^3-c^3s) & cs^3-c^3s \\ 2cs^3 & -2c^3s & 2(c^3s-cs^3) & c^3s-cs^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{12} \\ S_{66} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.0649 \\ 0.1124 \\ -0.022 \\ 0.1604 \\ -0.0588 \\ -0.0236 \end{Bmatrix}$$

Οι διαφορές μεταξύ των μητρώων μετασχηματισμού $[T_s]$ και $[T_Q]$ οφείλονται στον ορισμό της διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$. Τελικά, η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων με όρους ευκαμψίας γίνεται στο στραμμένο σύστημα x-y:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.68)$$



Σχήμα 3.10 Μεταβολή των μετασχηματισμένων όρων ευκαμψίας συναρτήσει της γωνίας θ

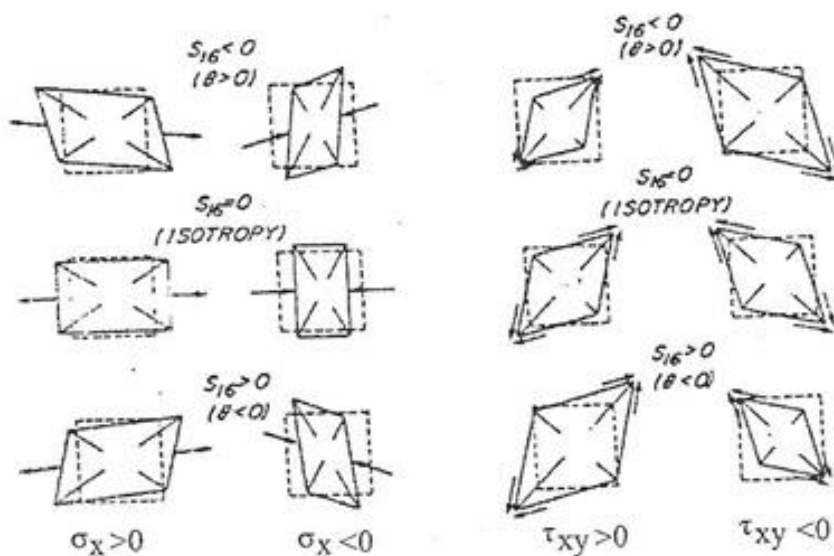
3.3.6 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Για να έχουμε μια εικόνα της μηχανικής συμπεριφοράς ενός υλικού, οι ίνες του οποίου σχηματίζουν γωνία θ με το σύστημα x - y , είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε τα μέτρα ελαστικότητας, τους λόγους Poisson και το μέτρο διάτμησης που αντιστοιχούν στο στραμμένο σύστημα x - y ονομάζονται μηχανικές σταθερές του υλικού και ορίζονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \overline{S}_{11} & \overline{S}_{12} & \overline{S}_{16} \\ \overline{S}_{12} & \overline{S}_{22} & \overline{S}_{26} \\ \overline{S}_{16} & \overline{S}_{26} & \overline{S}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{yx}/E_y & \nu_{sx}/G_{xy} \\ -\nu_{xy}/E_x & 1/E_y & \nu_{sy}/G_{xy} \\ \nu_{xs}/E_x & \nu_{ys}/E_y & 1/G_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

Εμφανίζονται οι όροι ν_{xs} και ν_{ys} που εμπλέκουν κύριες και διατμητικές παραμορφώσεις. Οι όροι αυτοί δεν υπάρχουν στα ισότροπα υλικά. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι το παραπάνω μητρώο είναι συμμετρικό, αλλά οι λόγοι του Poisson είναι διαφορετικοί.

Επιπλέον, η επιρροή του όρου ευκαμψίας \overline{S}_{16} στη συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε ένα στραμμένο σύστημα x - y φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.11 Επιρροή του όρου ακαμψίας \overline{S}_{16} στην παραμορφωσιακή συμπεριφορά των σύνθετων υλικών

Η πολύπλοκη συμπεριφορά λόγω σύζευξης κύριων και διατμητικών παραμορφώσεων είναι μοναδική στα σύνθετα υλικά (ορθότροπα-ανισότροπα) και δεν απαντάται στα συνήθη υλικά (ισότροπα). Ο σχεδιασμός κατασκευών από σύνθετα υλικά έχει πολύ περισσότερες δυνατότητες λόγω της συμπεριφοράς αυτής.

Για κώδικα αλληλουχίας $[(+30/-30)_5]_T$ υπολογίζω τις μηχανικές σταθερές ως εξής:

$$E_x = \frac{1}{S_{11}} = 15.41 \text{ GPa}$$

$$E_y = \frac{1}{S_{22}} = 8.90 \text{ GPa}$$

$$G_{xy} = \frac{1}{S_{66}} = -6.23 \text{ GPa}$$

$$\nu_{xy} = -\frac{\overline{S_{21}}}{\overline{S_{11}}} = 0.34$$

$$\nu_{yx} = -\frac{\overline{S_{12}}}{\overline{S_{22}}} = 0.20$$

Μορφώνουμε λοιπόν τη διαστρωμάτωση θέτοντας πολλές στρώσεις μαζί σε συνεργασία, προκειμένου να σχηματίσουμε το κέλυφος της ανεμογεννήτριας.

- 2η υποπερίπτωση: Πύργος από σύνθετα υλικά τύπου T300/5208

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	FRP (Graphite/Epoxy)
v_f	0.70
Πυκνότητα (g / cm^3)	1.6
E_1 (GPa)	181
E_2 (GPa)	10.3
v_{12}	0.28
G_{12}	7.17

Πίνακας 3.3

Η δεύτερη περίπτωση του πύργου από σύνθετα υλικά θα αποτελείται από 10 στρώσεις πάχους 2mm η καθεμία, με κώδικα αλληλουχίας διαστρωμάτωσης $[(+30/-30)_5]_T$. Συνοπτικά υπολογίζονται τα απαραίτητα μεγέθη.

Για το σύνθετο υλικό Graphite/Epoxy του πύργου έχουμε:

$$Q_{11} = \frac{181}{1-0.28*0.02} = 182.02 \quad Q_{22} = \frac{10.3}{1-0.28*0.02} = 10.36$$

$$Q_{12} = \frac{0.02*181}{1-0.28*0.02} = 3.64 \quad Q_{66} = 7.17$$

Χρησιμοποιώντας τους όρους ευκαμψίας S_{ij} , έχουμε πάλι την **Σχέση 3.56** :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

όπου:

$$S_{11} = 1/E_1, S_{22} = 1/E_2$$

$$S_{12} = S_{21} = -v_{12}/E_1 = -v_{21}/E_2, S_{66} = 1/G_{12}$$

Οπότε,

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00552 & -0.00155 & 0 \\ -0.00155 & 0.09709 & 0 \\ 0 & 0 & 0.13947 \end{bmatrix}$$

Για $\theta=30^\circ$ (για τη διαστρωμάτωση με κώδικα αλληλουχίας $[(+30/-30)_5]_T$)

$$\begin{Bmatrix} \overline{S_{11}} \\ \overline{S_{22}} \\ \overline{S_{12}} \\ \overline{S_{66}} \\ \overline{S_{16}} \\ \overline{S_{26}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4+s^4 & -c^2s^2 \\ 4c^2s^2 & 4c^2s^2 & -8c^2s^2 & (c^2-s^2)^2 \\ 2c^3s & -2cs^3 & 2(cs^3-c^3s) & cs^3-c^3s \\ 2cs^3 & -2c^3s & 2(c^3s-cs^3) & c^3s-cs^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{12} \\ S_{66} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.0347 \\ 0.0805 \\ -0.0079 \\ 0.1095 \\ -0.047 \\ -0.0324 \end{Bmatrix}$$

Για κώδικα αλληλουχίας $[(+30/-30)_5]_T$ υπολογίζω τις μηχανικές σταθερές ως εξής:

$$E_x = \frac{1}{\overline{S_{11}}} = 28.82 \text{ GPa}$$

$$E_y = \frac{1}{\overline{S_{22}}} = 12.42 \text{ GPa}$$

$$G_{xy} = \frac{1}{\overline{S_{66}}} = 9.13 \text{ GPa}$$

$$v_{xy} = -\frac{\overline{S_{21}}}{\overline{S_{11}}} = 0.23$$

$$v_{yx} = -\frac{\overline{S_{12}}}{\overline{S_{22}}} = 0.10$$

Μορφώνουμε λοιπόν τη διαστρωμάτωση θέτοντας πολλές στρώσεις μαζί σε συνεργασία, προκειμένου να σχηματίσουμε το κέλυφος της ανεμογεννήτριας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ο αναλυτικός υπολογισμός των φορτίων που ασκούνται στον πύργο της ανεμογεννήτριας και παρουσιάζονται οι συνδυασμοί φορτίσεων που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση.

4.2 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Τα φορτία ανέμου αποτελούν τη σημαντικότερη περιβαλλοντική επίδραση για το σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας και ειδικότερα του βασικού μηχανολογικού εξοπλισμού της. Όμως, όπως προαναφέρθηκε ο άνεμος και οι περιβαλλοντικές συνθήκες γενικότερα ποικίλουν ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Επομένως για την καλύτερη εξυπηρέτηση της μαζικής παραγωγής των βασικών μηχανολογικών μερών δρομέα-ατράκτου (RNA) προέκυψε η ανάγκη κατηγοριοποίησης σε κλάσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών ώστε να έχουν εφαρμογή σε διάφορες τοποθεσίες με παραπλήσιες περιβαλλοντικές συνθήκες (κλάσεις).

Σύμφωνα με τον IEC 61400-1 για ανεμογεννήτριες στην ξηρά ορίζονται οι παρακάτω κλάσεις ανεμογεννητριών σύμφωνα με την ταχύτητα ανέμου και το επίπεδο τύρβης του:

Wind turbine class		I	II	III	S
V_{ref}	(m/s)	50	42,5	37,5	Values specified by the designer
A	I_{ref} (-)		0,16		
B	I_{ref} (-)		0,14		
C	I_{ref} (-)		0,12		

Πίνακας 4.1 Κλάσεις ανεμογεννητριών

Όπου, V_{ref} η μέση ταχύτητα αναφοράς δεκαλέπτου στο ύψος περιστροφής πτερυγίων

I_{ref} η αναμενόμενη τιμή της έντασης τυρβώδους ροής.

Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία ανήκει στην κλάση IEC IA.

Άρα, έχουμε: $V_{ref} = 50 \text{ m/s}$ και $V_{ave} = 0.2 \times 50 = 10 \text{ m/s}$

Η ροή του ανέμου εξαρτάται από την ταχύτητα στροφής του δρομέα, τη μέση ταχύτητα ανέμου στο επίπεδο του δρομέα, τη στροβιλώδη ροή, την πυκνότητα του αέρα και από τα αεροδυναμικά σχήματα των επιμέρους εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας και την αλληλεπίδρασή τους.

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο. Ποικίλει επίσης καθ' ύψος πάνω από την επιφάνεια του εδάφους ή πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Για αυτούς τους λόγους πρέπει να ορίζεται η μέση διάρκεια καταγραφής της ταχύτητας του ανέμου και το αντίστοιχο ύψος στο οποίο αναφέρεται. Ένα συνηθισμένο ύψος αναφοράς για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου είναι τα δέκα μέτρα ($H=10\text{m}$) πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ οι πιο συνηθισμένες διάρκειες καταγραφής της ταχύτητας του ανέμου είναι ένα λεπτό ($T=1\text{min}$), δέκα λεπτά ($T=10\text{min}$) και μία ώρα ($T=1\text{hr}$).

Για την αναπαράσταση του ανέμου, πρέπει να γίνει μια διάκριση μεταξύ "συνθησιμένων" (normal wind conditions) και "ακραίων" (extreme wind conditions) συνθηκών ανέμου. Στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας θεωρούμε περίοδο επαναφοράς τον 1 χρόνο, ενώ στις ακραίες συνθήκες λειτουργίας τα 50 χρόνια. Οι "συνθησιμένες" συνθήκες ανέμου αφορούν γενικά επαναλαμβανόμενες συνθήκες φόρτισης της κατασκευής ενώ οι "ακραίες" συνθήκες ανέμου αναπαριστούν σπάνιες εξωτερικές συνθήκες φόρτισης που καθορίζουν τον σχεδιασμό των ανεμογεννητριών. Οι "συνθησιμένες" συνθήκες ανέμου χρησιμοποιούνται σαν βάση για τον καθορισμό των φορτίων κόπωσης της κατασκευής αλλά και των μέγιστων φορτίων σε συνθήκες λειτουργίας της κατασκευής. Οι "ακραίες" συνθήκες ανέμου επιβάλλουν ακραία φορτία στα μέλη της κατασκευής, στο φορέα και στη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας.

Στη περίπτωση των “συνηθισμένων” συνθηκών ανέμου ο άνεμος αναπαρίσταται από μια μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου (u_{10}) και την αντίστοιχη τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου (σ_u). Σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο, δηλαδή σε μια περίοδο διάρκειας δέκα λεπτών ($T=10\text{min}$), θεωρούμε ότι επικρατούν σταθερές συνθήκες ανέμου με μια σταθερή μέση ταχύτητα ανέμου (u_{10}) και μια σταθερή τυπική απόκλιση ταχύτητας ανέμου (σ_u). Η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου (u_{10}) είναι ένα μέτρο της εντάσεως του ανέμου, ενώ η τυπική απόκλιση (σ_u) είναι ένα μέτρο της μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου γύρω από τη μέση ταχύτητα.

Στη περίπτωση σταθερών συνθηκών ανέμου διάρκειας δέκα λεπτών, σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται ότι ακολουθεί μια πιθανοτική κατανομή της οποίας η μέση τιμή είναι u_{10} και η τυπική απόκλιση είναι σ_u . Ο λόγος της συνεχής μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου γύρω από τη μέση ταχύτητα είναι το φαινόμενο του στροβιλισμού (turbulence). Η ένταση του στροβιλισμού ορίζεται σαν ο λόγος της τυπικής απόκλισης (σ_u) της ταχύτητας του ανέμου προς τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου (u_{10}) κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου (σ_u/u_{10}).

Σύμφωνα με τον κανονισμό IEC61400-1, οι ταχύτητες του ανέμου διαφοροποιούνται ανάλογα με τις συνθήκες ανέμου. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά οι βασικοί τύποι που θα χρησιμοποιηθούν.

- **Κανονικές συνθήκες ανέμου**

- ✚ *Προφίλ κανονικής ροής ανέμου (Normal Wind Profile – NWP)*

Το προφίλ της μέσης ταχύτητας ανέμου καθ’ ύψος, πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, για κλάσεις ανεμογεννητριών I – II – III, δίνεται από τη σχέση:

$$V(z) = V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \quad (4.1)$$

όπου, $\alpha = 0,20$ και $V_{hub} = 16 \text{ m/sec}$

✚ *Κανονικό μοντέλο τυρβώδους ροής (Normal Turbulence Model – NTM)*

Το κανονικό μοντέλο τυρβώδους ροής προκύπτει από την σύνθεση ενός προφίλ κανονικής ροής ανέμου και ενός μοντέλου τυρβώδους ροής του Mann:

$$[NTM] = [NWP] + [TM_{Mann}(\sigma_1)] \quad (4.2)$$

με τυπική απόκλιση της τύρβης του ανέμου σ_1 που δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75V_{hub} + b) \quad (4.3)$$

όπου $b = 5.6 \text{ m/sec}$.

• **Ακραίες συνθήκες ανέμου**

Οι ακραίες συνθήκες ανέμου αναφέρονται στις μέγιστες ταχύτητες ανέμου που προκύπτουν κατά τη διάρκεια ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως είναι οι καταιγίδες ή φαινόμενα απότομων εναλλαγών της ταχύτητας και της διεύθυνσης το ανέμου.

✚ *Μοντέλο ακραίας ταχύτητας ανέμου (Extreme Wind Model – EWM)*

Το μοντέλο EWM μπορεί να είναι είτε σταθερό είτε μοντέλο τυρβώδους ροής και καθορίζεται από την ταχύτητα αναφοράς (V_{ref}) του ανέμου και την τυπική απόκλιση (σ_1) της τύρβης του, σύμφωνα με τα παρακάτω:

Σταθερό μοντέλο ακραίας ταχύτητας ανέμου EWM-steady:

$$V_{e50(z)} = 1.4V_{ref} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.11} \quad (4.4)$$

$$V_{e1(z)} = 0.8V_{e50(z)} \quad (4.5)$$

Όπου,

$V_{e50(z)}$ ακραία ταχύτητα ανέμου με περίοδο επαναφοράς 50 έτη

$V_{e1(z)}$ ακραία ταχύτητα ανέμου με περίοδο επαναφοράς 1 έτος

z ύψος πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

Θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη απόκλιση της διεύθυνσης του ανέμου $\pm 15^\circ$ από την κύρια διεύθυνση του.

✚ *Τυρβώδες μοντέλο ακραίας ταχύτητας ανέμου EWM-turbulent*

Το μοντέλο [EWM – turbulent] προκύπτει από τη σύνθεση ενός μοντέλου τυρβώδους ροής του Mann [$TM_{Mann}(\sigma_1)$] και προφίλ μέσης ταχύτητας ανέμου δεκαλέπτου με περίοδο επαναφοράς 50 έτη ή 1 έτος, εκθετικής μορφής σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$V_{50(z)} = V_{ref} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.11} \quad (4.6)$$

$$V_{1(z)} = 0.8V_{50(z)} \quad (4.7)$$

$$\sigma_1 = 0,11V_{hub} \quad (4.8)$$

✚ *Μοντέλο ακραίας ριπής ανέμου (Extreme Operating Gust – EOG)*

Για ανεμογεννήτριες που κατατάσσονται σε κλάσεις I, II ή III, το μέγεθος της ριπής στο ύψος του δρομέα προκύπτει από την επόμενη σχέση:

$$V_{gust} = \text{Min} \left\{ 1.35(V_{e1} - V_{hub}), 3.3 \left(\frac{\sigma_1}{1+0.1\left(\frac{D}{A_1}\right)} \right) \right\} \quad (4.9)$$

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75V_{hub} + b) \quad (4.10)$$

όπου,

$$A_1 = \begin{cases} 0,7z & z \leq 60m \\ 42 & z \geq 60m \end{cases}$$

D η διάμετρος του δρομέα.

Το τελικό προφίλ ταχύτητας ανέμου για ακραία ριπή ανέμου (EOG) είναι $V(z)$ σύμφωνα με το κανονικό προφίλ ανέμου NWP.

✚ *Μοντέλο ακραίας τυρβώδους ροής ανέμου (Extreme Turbulence Model – ETM):*

Το μοντέλο ακραίας τυρβώδους ροής προκύπτει από την σύνθεση ενός προφίλ κανονικής ροής ανέμου και ενός μοντέλου τυρβώδους ροής του Mann.

$$[ETM] = [NWP] + [TM_{Mann}(\sigma_1)] \quad (4.11)$$

όπου σ_1 η τιμή της τυπικής απόκλισης η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_1 = cI_{ref} \left[0.072 \left(\frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \left(\frac{V_{hub}}{c} - 4 \right) + 10 \right] \quad (4.12)$$

όπου, $c = 2 \text{ m/sec}$

4.3 ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΑΣΚΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΠΥΡΓΟ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Σύμφωνα με τον κανονισμό Germanischer Lloyd: Rules and Regulations, Part 1-Wind Energy (1993), αντλούνται τα βασικά στοιχεία για τον υπολογισμό των φορτίων που ασκούνται στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα:

1) Μόνιμα φορτία

Αφορά τα φορτία των οποίων το μέγεθος, η διεύθυνση και το σημείο εφαρμογής παραμένουν σταθερά κατά την διάρκεια ζωής της κατασκευής. Τα μόνιμα φορτία περιλαμβάνουν το ίδιο βάρος του υλικού του πυλώνα της ανεμογεννήτριας, το οποίο υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα και τα ίδια βάρη του δρομέα και της νασέλας, τα οποία θα ασκηθούν σαν ένα επικόμβιο συγκεντρωμένο αξονικό φορτίο στο πάνω μέρος του πυλώνα.

ΟΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	
ΤΜΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	ΜΑΖΑ (kg)
ΔΡΟΜΕΑΣ	10.000
ΝΑΣΕΛΛΑ	22.000
ΣΥΝΟΛΟ	32.000

Πίνακας 4.2 Ολική μάζα των μερών της ανεμογεννήτριας

Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η εκκεντρότητα της μάζας του δρομέα, η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$e_r = 0.005R = 0,005 * \frac{52}{2} = 0.13m, \quad (4.13)$$

όπου R: η ακτίνα του δρομέα

Λόγω της εκκεντρότητας αυτής, αναπτύσσεται μια ροπή, η οποία ισούται με:

$$M_y = 10.000(kg) * 10(m/sec^2) * 1.3(m) = 130kNm. \quad (4.14)$$

2) Φορτία λόγω ανέμου

Για κατασκευές ύψους μέχρι 200m, ο υπολογισμός των δράσεων του ανέμου γίνεται σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1991-1-4.

Η u_{10} αποτελεί την κύρια μεταβλητή με την οποία περιγράφουμε τη μεταβολή του ανέμου με το χρόνο, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα. Έχει ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 0.02, γεγονός που ισοδυναμεί με μια μέση περίοδο επαναφοράς 50 ετών, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση του ανέμου, σε ύψος 10μέτρων πάνω από επίπεδη ανοικτή περιοχή εδάφους και λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του υψόμετρου (εάν απαιτείται). Η πίεση του ανέμου που δρα κάθετα στις εξωτερικές επιφάνειες μιας κατασκευής προσδιορίζεται από την γενική εξίσωση:

$$w = q_p(z_e) \times c_{pe} \quad (4.15)$$

όπου,

$q_p(z_e)$: είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής στο ύψος αναφοράς z_e

z_e : είναι το ύψος αναφοράς της εξωτερικής πίεσης (w_e)

c_{pe} : είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης (w_e)

Πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$

Η πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$ σε ύψος z , η οποία περιλαμβάνει μέση και μικρής διάρκειας διακυμάνσεις ταχύτητας, προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) = c_e(z) \times q_b \quad (4.16)$$

όπου

$I_v(z)$ η ένταση του στροβιλισμού σε ύψος z .

ρ η πυκνότητα του αέρα, που εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και τη βαρομετρική πίεση που αναμένονται σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια ανεμοθύελλας ($\rho = 1,25 \text{ Kg/m}^3$).

v_m η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z πάνω από το έδαφος. Εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους, την τοπογραφία και από την βασική ταχύτητα του ανέμου, v_b και προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_o(z) \times v_b \quad (4.17)$$

όπου,

$c_o(z)$ ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης. Για επίπεδο έδαφος λαμβάνεται ίσος με 1.00.

$c_r(z)$ ο συντελεστής τραχύτητας που λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα της μέσης ταχύτητας του ανέμου στη θέση της κατασκευής λόγω:

α) του ύψους πάνω από το έδαφος,

β) της τραχύτητας του εδάφους της προσήνεμης περιοχής στη θεωρούμενη διεύθυνση του ανέμου.

Υπολογίζεται με βάση τις σχέσεις:

$$c_r(z) = k_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad \text{για } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (4.18)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}), \quad \text{για } z < z_{min} \quad (4.19)$$

όπου

z_0 το είναι το μήκος τραχύτητας, που δίνεται από τον **Πίνακα 4.3**.

k_r είναι ο συντελεστής εδάφους. Εξαρτάται από το μήκος τραχύτητας z_0 και δίνεται από τη σχέση:

$$k_r = 0.19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} \quad (4.20)$$

όπου,

$z_{o,II}$ ίσο με 0,05 m (κατηγορία εδάφους II, **Πίνακας 4.3**)

z_{min} το ελάχιστο ύψος (ορίζεται στον **Πίνακα 4.3**)

z_{max} λαμβάνεται ίσο με 200m.

z_o, z_{min} εξαρτώνται από την κατηγορία του εδάφους (**Πίνακας 4.3**)

Κατηγορία εδάφους	$z_o(m)$	$z_{min}(m)$
Ο Θάλασσα ή παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα	0.003	1
I Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια	0.01	1
II Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων	0.05	2
III Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτίρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)	0.30	5
IV Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15m.	1.00	10

Πίνακας 4.3 Κατηγορίες εδάφους και αντίστοιχες παράμετροι

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει όταν το έδαφος στη διεύθυνση του ανέμου έχει ομοιόμορφη τραχύτητα σε αρκετά μεγάλο μήκος ώστε να μπορεί να θεωρείται σταθερή η κατηγορία εδάφους.

Δεχόμαστε κατηγορία εδάφους II.

Ένταση στροβιλισμού ανέμου $I_v(z)$

Η ένταση στροβιλισμού του ανέμου $I_v(z)$ σε ύψος z ορίζεται ως η τυπική απόκλιση του στροβιλισμού διαιρούμενη με τη μέση ταχύτητα του ανέμου.

Οι προτεινόμενοι κανόνες για τον προσδιορισμό του $I_v(z)$ δίνονται από την εξίσωση:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{για } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (4.21)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{για } z < z_{min} \quad (4.22)$$

Όπου k_I ο συντελεστής στροβιλισμού, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 1.00.

$c_0(z)$ ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης του εδάφους, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 1.00.

z_0 το μήκος τραχύτητας.

$c_e(z)$ ο συντελεστής έκθεσης.

$$\text{Όπου, } c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b}, \quad (4.23)$$

$$q_b \quad \text{η βασική πίεση και } q_b = \frac{1}{2} \times \rho \times v_b^2 \quad (4.24)$$

v_b η βασική ταχύτητα ανέμου, που ορίζεται ως συνάρτηση της διεύθυνσης του ανέμου και της εποχής του έτους, στα 10m πάνω από έδαφος κατηγορίας II και δίνεται από την σχέση:

$$v_b = c_{dir} \times c_{season} \times v_{b,0} \quad (4.25)$$

όπου

c_{dir} ο συντελεστής διεύθυνσης (με προτεινόμενη τιμή 1.00).

c_{season} ο εποχικός συντελεστής (με προτεινόμενη τιμή 1.00).

$v_{b,o}$ η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου

Η $v_{b,o}$ είναι η χαρακτηριστική 10 λεπτών μέση ταχύτητα του ανέμου, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση του ανέμου και από την εποχή του έτους, στα 10m πάνω από το έδαφος, σε ανοικτή περιοχή με χαμηλή βλάστηση, όπως το γρασίδι και με μεμονωμένα εμπόδια σε απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων. Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα, η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου, $v_{b,o}$ ορίζεται σε 27m/s για τα νησιά και παράλια μέχρι 10km από την ακτή και σε 33m/s για την υπόλοιπη χώρα.

Θεωρούμε ότι η ανεμογεννήτρια που μελετάται, πρόκειται να κατασκευαστεί σε απόσταση μικρότερη των 10km από την ακτή και επομένως δεχόμαστε την τιμή 27m/s για την $v_{b,o}$.

Ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης, c_{pe} , εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds, Re , ο οποίος ορίζεται από την εξίσωση:

$$Re = \frac{b \times v(z_e)}{\nu}, \quad (4.26)$$

Όπου: b είναι η διάμετρος του κυλίνδρου

ν είναι ο κινηματικό ιξώδες του αέρα ($\nu = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

$v(z_e)$ είναι η ταχύτητα αιχμής του ανέμου σε ύψος z_e

Ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης, c_{pe} , κυκλικού κυλίνδρου προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$c_{pe} = c_{p,0} \times \psi_{\lambda\alpha} \quad (4.27)$$

Όπου, $c_{p,0}$ είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης χωρίς ροή ελευθέρων άκρων

$\psi_{\lambda\alpha}$ είναι ο συντελεστής επίδρασης άκρων.

Ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης $c_{p,0}$ δίνεται στο **Πίνακα 4.4**, για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds, ως συνάρτηση της γωνίας α .

Ο συντελεστής επίδρασης άκρων $\psi_{\lambda\alpha}$ δίνεται από την εξίσωση:

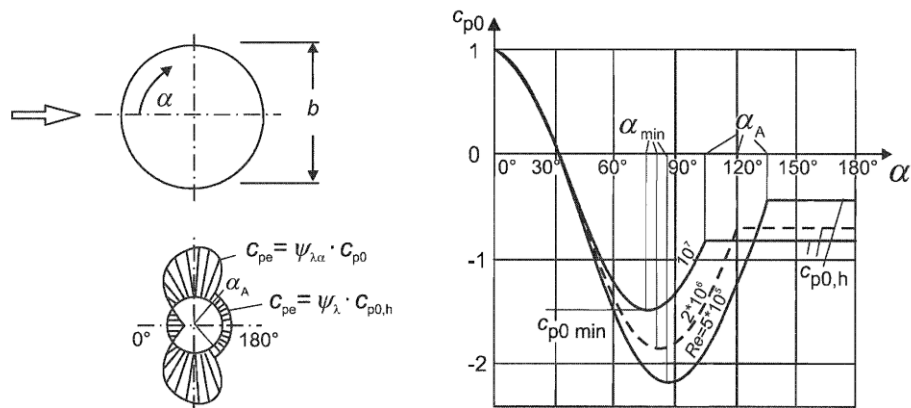
$$\psi_{\lambda\alpha} = 1 \quad 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\min} \quad (4.28)$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = \psi_\lambda + (1 - \psi_\lambda) \cos\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}}\right)\right) \quad \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_A \quad (4.29)$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = \psi_\lambda \quad \alpha_A \leq \alpha \leq 180^\circ \quad (4.30)$$

α_A είναι η θέση διαχωρισμού ροής

ψ_λ είναι ο συντελεστής επίδρασης άκρων



Σχήμα 4.1 Κατανομή πιέσεων για κυκλικούς κυλίνδρους για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds και χωρίς επίδραση άκρων.

Re	α_{\min}	$c_{p0, \min}$	α_A	$c_{p0, h}$
$5 \cdot 10^5$	85	-2,2	135	-0,4
$2 \cdot 10^6$	80	-1,9	120	-0,7
10^7	75	-1,5	105	-0,8

Πίνακας 4.4

Όπου:

α_{min} είναι η θέση της ελάχιστης πίεσης σε $[\circ]$

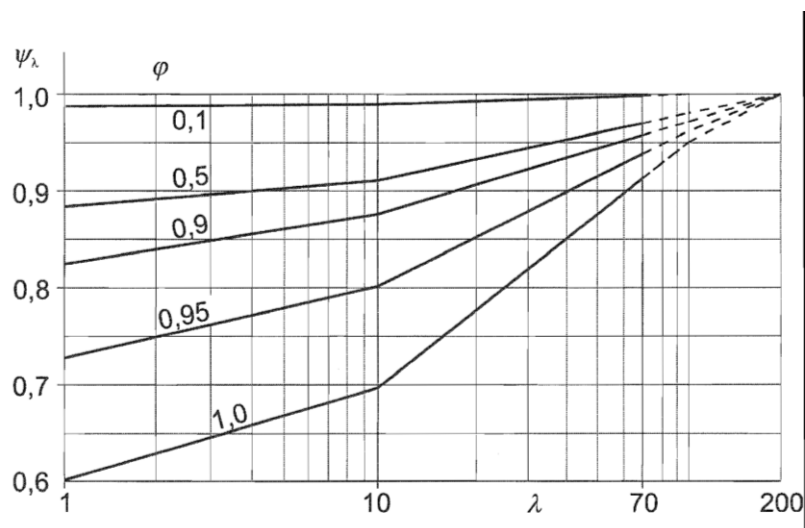
$c_{p,0,min}$ είναι η τιμή του ελάχιστου συντελεστή πίεσης

α_A είναι η θέση του διαχωρισμού ροής σε $[\circ]$

$c_{p,0,h}$ είναι ο συντελεστής της βασικής πίεσης

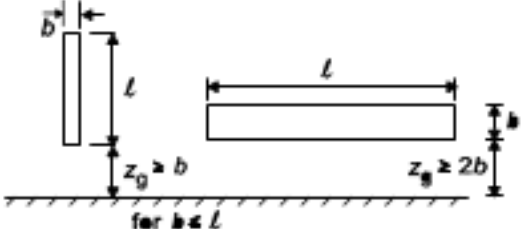
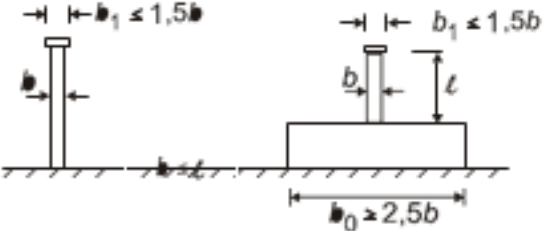
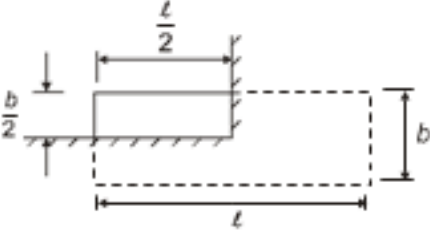
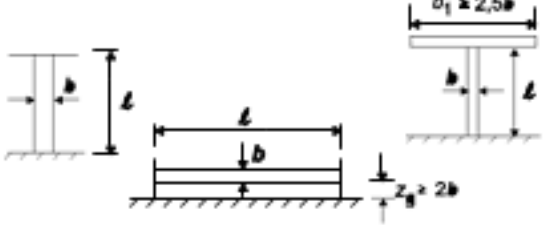
Όπου απαιτείται ο συντελεστής επίδρασης των άκρων ψ_λ θα πρέπει να υπολογίζεται ως συνάρτηση της λυγηρότητας λ .

Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει υπόψη τη μειωμένη αντίσταση της κατασκευής λόγω της ροής του ανέμου γύρω από τα άκρα (επίδραση άκρων). Το σχήμα και ο πίνακας βασίζονται σε μετρήσεις σε υποστρωβιλώδη ροή.



Σχήμα 4.2 Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή επίδρασης άκρων ψ_λ ως συνάρτηση του συντελεστή πληρότητας φ και λυγηρότητας λ .

Η ενεργός λυγηρότητα ορίζεται στον Πίνακα 4.5 ανάλογα με τις διαστάσεις της κατασκευής και τη θέση της.

No.	Θέση της κατασκευής, άνεμος κάθετα στο επίπεδο της σελίδας	Ενεργός λυγηρότητα λ
1		<p>Για πολυγωνικές, ορθογωνικές και διατομές με αιχμηρές γωνίες: για $l \geq 50 \text{ m}$, $l=1,4 l/b$ ή $l=70$, όποιο είναι μικρότερο</p>
2		<p>Για κυκλικούς κυλίνδρους: για $l \geq 50$, $l=2l/b$ ή $l=70$, όποιο είναι μικρότερο για $l < 15 \text{ m}$, $l=l/b$ ή $l=70$, όποιο είναι μικρότερο</p>
3		<p>Για ενδιάμεσες τιμές του l, θα χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή</p>
4		<p>για $l \geq 50 \text{ m}$, $l=0,7 l/b$ ή $l=70$, όποιο είναι μεγαλύτερο για $l < 15 \text{ m}$, $l=l/b$ ή $l=70$, όποιο είναι μεγαλύτερο Για ενδιάμεσες τιμές του l, θα χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή</p>

Πίνακας 4.5 Προτεινόμενες τιμές του λ για κυλίνδρους, πολυγωνικές διατομές, ορθογωνικές διατομές, πινακίδες σήμανσης, διατομές με αιχμηρές ακμές και δικτυωτές κατασκευές

3) Φορτία κανονικής λειτουργίας

Τα φορτία λειτουργίας απορρέουν από τη λειτουργία και τον έλεγχο της ανεμογεννήτριας. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το μηχανολογικό φρενάρισμα και τα παροδικά φαινόμενα εξαιτίας της έναρξης και του σταματήματος της κίνησης του δρομέα, η σύνδεση και αποσύνδεση της γεννήτριας και οι κινήσεις εκτροπής.

- Μέση πίεση ανέμου P_n

Η μέση πίεση ανέμου εφαρμόζεται καθ' ύψος του πύργου, εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του ανέμου και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_n = \frac{1}{2} \times \rho_{air} \times v_r^2 = 0,902 \text{ kN/m} \quad (4.31)$$

Όπου:

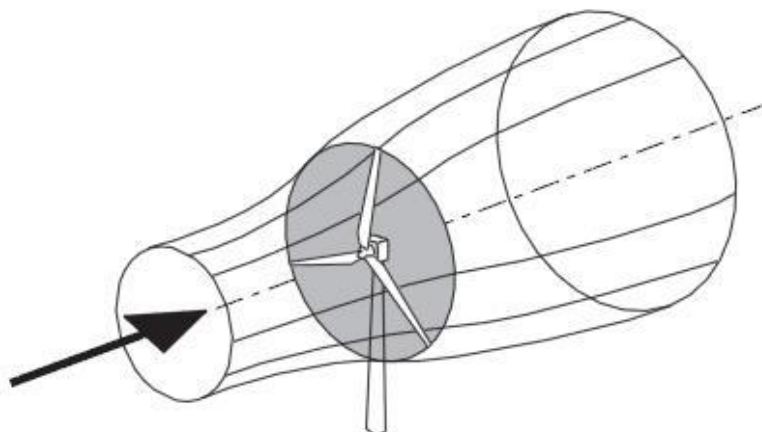
$\rho_{air} = 1.25 \text{ kg/m}^3$ η πυκνότητα του αέρα,

v_r : η σχετική ταχύτητα του ανέμου για συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

- Δύναμη της ώσης στην κορυφή του πύργου, F_x

Η δύναμη της ώσης είναι η αξονική δύναμη η οποία εφαρμόζεται στο δρομέα μιας ανεμογεννήτριας και ο υπολογισμός της είναι βασισμένος στη θεωρία των πτερυγώσεων. Αν ο άνεμος απλοποιείται όπως σε ένα ροϊκό σωλήνα και λαμβάνοντας υπόψη την περιοχή με ίσες αποστάσεις ανάντη και κατάντη του δρομέα στο επίπεδο του δίσκου, η δύναμη της ώσης επί του δρομέα θα είναι:

$$T = F_x = \frac{1}{2} \times C_T \times \rho_{air} \times A_r \times v_r^2 \quad (4.32)$$



Σχήμα 4.3 Δύναμη F_x

Όπου:

A_r : η επιφάνεια του νοητού δίσκου

C_T : οι διάφορες τιμές του συντελεστή ώσης, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω

(Πίνακας 4.6)

TAXYTHTA ANEMOY (m/sec)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C_T	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.79	0.75	0.68	0.60	0.42	0.32
TAXYTHTA ANEMOY (m/sec)	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
C_T	0.26	0.21	0.17	0.15	0.13	0.11	0,09	0,08	0.07	0.06	0.06

Πίνακας 4.6 Τιμές του συντελεστή ώσης

Λόγω της στιγμιαίας μεταβολής της κατάστασης του ανέμου ως προς το μέγεθος και την διεύθυνση, η δύναμη της ώσης που επηρεάζει άμεσα την ανεμογεννήτρια μεταβάλλεται συνεχώς. Μεταβάλλεται συνεπώς και η ροπή κάμψης στη βάση στήριξης της δομής. Η δύναμη της ώσης που ενεργεί πάνω στον δρομέα μεταφέρεται στη νασέλα που υποστηρίζεται από ένα περιστρεφόμενο έδρανο. Η δύναμη αυτή πάνω στο περιστρεφόμενο έδρανο ισορροπείται εξαιτίας της αντιδραστικής δύναμης του πυλώνα (δύναμη ανατροπής). Η δύναμη της ώσης που ενεργεί στο δρομέα είναι παράλληλη προς την επιφάνεια του περιστρεφόμενου εδράνου στήριξης της ανεμογεννήτριας. Λόγω της αλλαγής της διεύθυνσης του ανέμου η ανεμογεννήτρια περιστρέφεται έτσι ώστε να έχει την αντίθετη διεύθυνση με τον άνεμο.

Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζονται οι απαραίτητες δυνάμεις αναλυτικά.

- Ροπή M_y λόγω της λοξής ροής του ανέμου

Η εκκεντρότητα του φορτίου που οφείλεται στο στροβιλισμό λόγω της λοξής ροής του ανέμου, κατά τη διάρκεια της φάσης λειτουργίας, δίνεται από τη σχέση:

$$e_w = \frac{wR^2}{2v_r^2} \quad (4.33)$$

Αυτή η εκκεντρότητα του φορτίου που εφαρμόζεται, προκαλεί μια πρόσθετη ροπή M_y .

- Ροπή αντίστασης M_x

Ακόμη κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, ο δρομέας περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του και προκαλεί τη ροπή αντίστασης. Αυτή η ροπή είναι ανάλογη της ισχύος και αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και δίνεται από τη σχέση:

$$M_x = \frac{1}{2} \rho_{air} (\pi R^2) v_r^3 = \frac{PR}{v_r} \quad (4.34)$$

Όταν η ανεμογεννήτρια είναι σε λειτουργία, εάν χρειαστεί να σταματήσουν τα πτερύγια, ένα υδραυλικό σύστημα φρένων τίθεται σε λειτουργία. Η αναχαίτιση αυτής της λειτουργίας προκαλεί μια ροπή ανατροπής στην κορυφή του πύργου. Η τιμή αυτή είναι διπλάσια αυτής που υπολογίζεται στη σχέση (4.34).

4) Φορτία ακραίας λειτουργίας

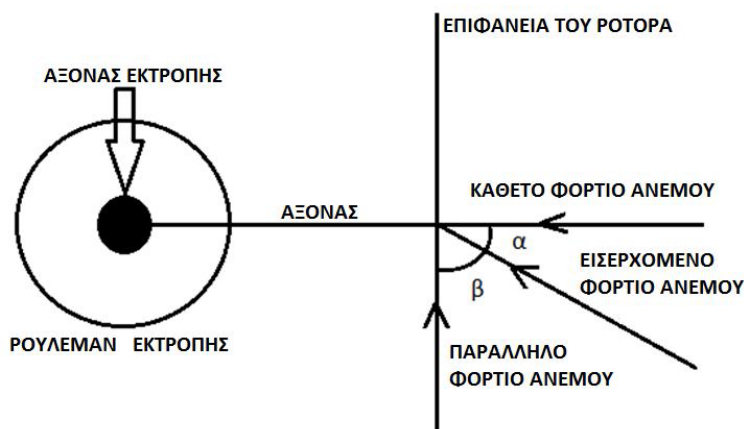
Τα φορτία υπολογίζονται όπως και στην προηγούμενη φάση λειτουργίας.

Επομένως, η μέση πίεση έχει την τιμή $1,474 \text{ kN/m}$ και η οριζόντια δύναμη που ασκείται στην κορυφή του πύργου υπολογίζεται όπως παραπάνω:

$$T = F_x = \frac{1}{2} \times C_T \times \rho_{air} \times A_r \times v_r^2 \quad (4.35)$$

Όταν η διεύθυνση του ανέμου δεν είναι ευθυγραμμισμένη με τον άξονα του δρομέα, ένα μέρος του αεροδυναμικού φορτίου που προσκρούει στην επιφάνεια του δρομέα αναγκάζει την ανεμογεννήτρια να περιστραφεί ώστε να υπάρχει μικρότερη γωνία μεταξύ του εισερχόμενου αέρα και τον άξονα του δρομέα. Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες αυτό επιτυγχάνεται μετρώντας τη διεύθυνση με ένα διευθυνσιόμετρο και προσανεμίζοντας ολόκληρη τη νασέλα με τη βοήθεια κινητήρων και οδοντωτών τροχών.

Κατά πόσο θα περιστραφεί η ανεμογεννήτρια εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Αρχικά, από την κατάσταση του ανέμου και τη γωνία μεταξύ του εισερχόμενου αέρα και τον άξονα του δρομέα. Επιπλέον, η απόσταση του δρομέα από τον άξονα περιστροφής είναι και αυτή μία σημαντική παράμετρος γιατί καθορίζει τη ροπή εκτροπής.



Σχήμα 4.4 Όταν δεν είναι ευθυγραμμισμένο το εισερχόμενο φορτίο του ανέμου με τον άξονα του δρομέα

Η δύναμη που οφείλεται στην πλάγια ροή του ανέμου ή σε κλίσεις αυτού χαρακτηρίζεται ως πλευρική επίδραση του ανέμου και το μέτρο της μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$F_y = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} F_x A \quad (4.36)$$

Η δύναμη αυτή έχει ως αποτέλεσμα την επιβολή καμπτικών ροπών M_z στον άξονα του δρομέα και ροπών επιβράδυνσης στο κατευθυντήριο σύστημα της ατράκτου.

Ομοίως με την προηγούμενη φάση, η ροπή που προκαλείται κατά τη διάρκεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται με χρήση της σχέσης (4.34).

5) Ετήσιος άνεμος (10 minutes)

Ετήσιος άνεμος 10 λεπτών, είναι ο μέσος όρος δέκα λεπτών, με πιθανότητα υπέρβασης μια φορά το χρόνο. Η ταχύτητα ετήσιου ανέμου (10λεπτών) ορίζεται ως το 80% της αντίστοιχης ταχύτητας του 50-ετούς ανέμου. Υπό κανονικές συνθήκες, τα δεδομένα για τον άνεμο συγκεντρώνονται σε ένα ύψος αναφοράς h^* (10 μέτρα). Ο προσδιορισμός της πίεσης του ανέμου σε ύψος πλήμνης h , προϋποθέτει την προσαρμογή της ταχύτητας του 10-λέπτου μέσου ανέμου με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$v(h) = v\left(\frac{h}{h^*}\right)^a \quad (4.37)$$

Όπου:

v η ταχύτητα του ανέμου

h^* το ύψος αναφοράς

$\alpha = 0.20$ για άνεμο και 0.11 για ριπή ανέμου, σύμφωνα με τον IEC61400-1.

Εάν η ταχύτητα ετήσιου ανέμου στο ύψος της πλήμνης είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, η στατική πίεση P_s πρέπει να ληφθεί υπόψη. Η στατική πίεση δίνεται ως εξής:

$$P_s = \frac{v^2}{1600} \quad (4.38)$$

Συνεπώς, η οριζόντια δύναμη F_x που ασκείται στην κορυφή του πύργου, υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (4.35), όπου λαμβάνεται υπόψη η επιφάνεια σάρωσης του δρομέα.

Το φαινόμενο της ριπής ανέμου πρέπει να ληφθεί υπόψη, καθώς παρουσιάζονται πιθανές αποκλίσεις έως $\pm 15^\circ$ από την κατεύθυνση του ανέμου. Κάτι τέτοιο δημιουργεί μια δύναμη, η οποία ασκείται στον δρομέα κατά τη διεύθυνση Y , η οποία επίσης δημιουργεί ροπές κάμψης στον άξονα του δρομέα και επιβραδυντικές ροπές M_z στο περιστρεφόμενο τμήμα της ατράκτου.

6) Ετήσια ριπή ανέμου (5 seconds)

Ετήσια ριπή ανέμου 5 δευτερολέπτων ονομάζεται η μέγιστη ανά 5 δευτερόλεπτα μέση ταχύτητα του ανέμου, με πιθανότητα υπέρβασης μια φορά το χρόνο. Η ταχύτητα της ετήσιας ριπής ανέμου ορίζεται ως το 80% της αντίστοιχης ταχύτητας 50-ετούς ριπής ανέμου. Παρόμοια με τη συνθήκη για τον ετήσιο άνεμο (10 minutes), η ταχύτητα ριπής ανέμου πρέπει να προσαρμοστεί στο ύψος της πλήμνης με βάση την εξίσωση (4.37). Η πίεση του ανέμου και η οριζόντια δύναμη F_x που ασκείται στην κορυφή του πύργου υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο, όπως και για τον ετήσιο άνεμο (10 λεπτών).

Για την πλευρική φόρτιση F_y , που προκαλείται από τη ροή πλάγιων ή κεκλιμένων ανέμων θεωρούμε πως έχει το ίδιο μέγεθος με την οριζόντια δύναμη και έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ροπών κάμψης στον άξονα του δρομέα και επιβραδυντικών ροπών M_z στο περιστρεφόμενο τμήμα της ατράκτου.

7) Άνεμος 50-ετίας (10 minutes)

Ο άνεμος 50-ετίας είναι ο ανά 10 λεπτά μέσος όρος ανέμου με πιθανότητα υπέρβασης μια φορά τα 50 χρόνια. Παρόμοια με τη συνθήκη του ετήσιου ανέμου (10 λεπτών), η ταχύτητα του 50-ετούς ανέμου πρέπει να προσαρμοστεί στο ύψος της πλήμνης, με βάση τη σχέση (4.37). Τα φορτία σε αυτή την περίπτωση υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως και για τον ετήσιο άνεμο 10 λεπτών.

8) Ριπή ανέμου 50-ετίας (5 seconds)

Η ριπή ανέμου 50-ετίας είναι η μέγιστη ανά 5 δευτερόλεπτα μέση ταχύτητα του ανέμου, με πιθανότητα υπέρβασης μια φορά τα 50 χρόνια. Παρόμοια με τη συνθήκη για την ετήσια ριπή ανέμου (5 δευτερολέπτων), η ταχύτητα 50-ετούς ριπής ανέμου (5 δευτερολέπτων) πρέπει να προσαρμοστεί στο ύψος της πλήμνης χρησιμοποιώντας τη σχέση 4.37. Τα φορτία σε αυτή την περίπτωση προσδιορίζονται με βάση την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε και για την ετήσια ριπή ανέμου (5 δευτερολέπτων).

9) Επιρροή περιβάλλοντος – Βραχοκύκλωμα

Σε αυτή τη φόρτιση συμπεριλαμβάνονται όλα τα απρόσμενα γεγονότα τα οποία μπορούν να συμβούν και να προκαλέσουν πολύ γρήγορη διακοπή της ανεμογεννήτριας. Η απότομη αυτή διακοπή όταν συμβεί, θα προκαλέσει μια μεγάλη στρεπτική ροπή, η οποία, για σύγχρονες γεννήτριες προσεγγίζεται αν οκταπλασιάσουμε τη ροπή που αναπτύσσεται κατά την παραγωγή ενέργειας από την ανεμογεννήτρια.

10) Φορτίο σεισμού

Οι εισαγόμενες στην κατασκευή δυνάμεις, λόγω αδράνειας μαζών, προκύπτουν ως συνέπεια των σεισμικών δράσεων. Επιβάλλονται στα στοιχεία της κατασκευής οριζόντιες επιταχύνσεις, οι οποίες υπολογίζονται από την εξίσωση 2.1 του Ε.Α.Κ.2000, ανάλογα με τις τιμές των ιδιοπεριόδων των κυρίων ιδιομορφών του φορέα στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις.

✚ Αδρανειακές δυνάμεις

Λόγω του σεισμού αναπτύσσονται αδρανειακές δυνάμεις στο εσωτερικό μιας κατασκευής, οι οποίες τείνουν να διατηρήσουν την αρχικώς ηρεμούσα κατάσταση της κατασκευής έναντι της αιφνιδίως επιβαλλόμενης μετατόπισης του εδάφους. Η μετατόπιση του εδάφους είναι εναλλασσόμενης φοράς και επιβάλλει μία επιταχυνόμενη κίνηση στην κατασκευή. Οι αδρανειακές δυνάμεις υπακούν στο νόμο του Νεύτωνα και δίνονται από τη σχέση:

$$F = m \times a \quad (4.39)$$

όπου

F η δύναμη, η οποία η αδρανειακή δύναμη που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της κατασκευής και αναφέρεται στον ΕΑΚ ως “απόκριση” της κατασκευής.

m η μάζα, η οποία είναι η μάζα της κατασκευής ή η μάζα των επιμέρους στοιχείων της (δοκοί, στύλοι, κλπ). Η μάζα της κατασκευής ή στοιχείου αυτής υπακούει στο νόμο

$$B = m \times g \rightarrow m = \frac{B}{g} \quad (4.40)$$

όπου

B θεωρούμε ένα συνδυασμό κατακόρυφων φορτίων, ο οποίος συνήθως είναι

$$B = [\text{μόνιμα φορτία} + 0.3 (\text{φορτία σεισμού})] \text{ (kN/m)}$$

g η επιτάχυνση της βαρύτητας συνήθως ίση με $g = 10 \text{ m/s}^2$

a η επιτάχυνση, η οποία είναι η επιτάχυνση που επιβάλλεται από το έδαφος στην κατασκευή, λόγω της μετακίνησης του εδάφους. Στον ΕΑΚ (Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός) η σεισμική επιτάχυνση του εδάφους δίνεται, ανηγμένη στην επιτάχυνση της βαρύτητας.

✚ Φάσματα σχεδιασμού

Τα φάσματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες α) των ολικών επιταχύνσεων, δηλαδή του απόλυτου αθροίσματος της επιτάχυνσης του εδάφους και της επιτάχυνσης της κατασκευής, β) των σχετικών ταχυτήτων και γ) των σχετικών μετακινήσεων. Περιλαμβάνουν δύο μέρη: το σχήμα του φάσματος και την ένταση των σεισμικών διεγέρσεων, η οποία εκτός από τη ζώνη της σεισμικής επικινδυνότητας, επηρεάζεται και από τις ελαστοπλαστικές και αποσβεστικές ικανότητες της ίδιας της κατασκευής.

✚ Οριζόντιες συνιστώσες

Το φάσμα σχεδιασμού των οριζόντιων συνιστωσών του σεισμού απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.8**, στο οποίο οι τιμές των οριζόντιων επιταχύνσεων του εδάφους είναι οι τιμές σχεδιασμού (έχουν διαιρεθεί με το q) και όχι ελαστικές. Οι επιταχύνσεις σχεδιασμού συμβολίζονται ως $R_d(T)$.

Στον ΕΑΚ δίνονται αναλυτικοί τύποι υπολογισμού της επιτάχυνσης σχεδιασμού

$$0 \leq T \leq T_1 \quad R_d(T) = A \cdot \gamma_1 \cdot \left[1 + \frac{T}{T_1} \cdot \left(\eta \cdot \frac{\theta}{q} \cdot \beta_0 - 1 \right) \right] \quad (4.41)$$

$$T_1 \leq T \leq T_2 \quad R_d(T) = A \cdot \gamma_1 \cdot \eta \cdot \frac{\theta}{q} \cdot \beta_0 \quad (4.42)$$

$$T_2 < T \quad R_d(T) = A \cdot \gamma_1 \cdot \frac{\theta}{q} \cdot \eta \cdot \beta_0 \cdot (T_2/T)^{2/3} \quad (4.43)$$

όπου

A είναι η μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση του εδάφους.

$A = \alpha \cdot g$, όπου α είναι η εδαφική επιτάχυνση ανηγμένη στην επιτάχυνση της βαρύτητας. Τιμές για το α δίνονται στον **Πίνακα 4.10** και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

γ_1 είναι ο συντελεστής σπουδαιότητας του δομήματος, που δίνεται στον **Πίνακα 4.11**.

q συντελεστής συμπεριφοράς ή πλαστιμότητας.

θ ο συντελεστής επιρροής θεμελίωσης και εξαρτάται γενικά από το βάθος και τη δυσκαμψία της θεμελίωσης. Σε εδάφη κατηγορίας A και B ο συντελεστής θ λαμβάνει την τιμή 1.0, ενώ σε εδάφη κατηγορίας Γ και Δ επιτρέπεται να λαμβάνει τις τιμές που δίνονται παρακάτω, όταν ισχύει τουλάχιστον μια από τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν σε αυτόν κι εφόσον η προκύπτουσα φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού δεν είναι μικρότερη από εκείνη που θα προέκυπτε για έδαφος κατηγορίας B.

T_1 και T_2 είναι οι χαρακτηριστικές περίοδοι του φάσματος σχεδιασμού, οι οποίες ορίζονται στον **Πίνακα 4.7** ανάλογα με τη σεισμική επικινδυνότητα του εδάφους θεμελίωσης.

Κατασκευή με $T \leq T_1$ θεωρείται πλέον δύσκαμπτη, καθώς $T \sim \frac{1}{K}$.

Κατασκευή με $T > T_2$ θεωρείται πλέον εύκαμπτη.

β_0 ο συντελεστής φασματικής επιτάχυνσης που λαμβάνεται ίσος με 2.5.

A, B, Γ, Δ κατηγορία εδάφους.

$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\zeta}} \geq 0.70$ διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης όπου ζ η κρίσιμη απόσβεση.

Σε κάθε περίπτωση απαιτείται $\frac{R_d(T)}{A \cdot \gamma_1} \geq 0.25$.

Στην περίπτωση μας η κατηγορία εδάφους είναι B και μέσω των τιμών που παίρνουμε από τον **Πίνακα 4.9** υπολογίζουμε την μέγιστη επιτάχυνση σχεδιασμού που ενδέχεται να αναπτύξει η κατασκευή μας όταν πληγεί από τον σεισμό σχεδιασμού.

Η κατηγορία εδάφους B αντιστοιχεί σε χαρακτηριστικά εδάφους που αναλύονται στον **Πίνακα 4.9**. Οι καμπύλες A, B, Γ και Δ του φάσματος χρησιμοποιούνται ανάλογα με την κατηγορία εδάφους στην οποία θα ανεγερθεί η κατασκευή.

Οι περιοχές της Ελλάδας είναι χωρισμένες σε ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας I, II, III, όπως φαίνεται στο χάρτη του **Σχήματος 4.5**.

Στον αντισεισμικό σχεδιασμό παίζουν σημαντικό ρόλο στην ασφαλή θεμελίωση και συμπεριφορά της κατασκευής έναντι σεισμού, τα χαρακτηριστικά του εδάφους θεμελίωσης. Η περιοχή που βρίσκεται η ανεμογεννήτρια ανήκει στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας I, όπου $\alpha = 0.16$, $A = 1.57 m/sec^2$ (εφόσον $g = 9.81 m/sec^2$). Επιπλέον, το έδαφος είναι κατηγορίας B και επομένως οι χαρακτηριστικές ιδιοπερίοδοι είναι ίσες με $T_1 = 0.15sec$ και $T_2 = 0.60sec$.

Η κατασκευή ανήκει σε κατηγορία σπουδαιότητας Σ_2 με συντελεστή σπουδαιότητας $\gamma_1 = 1.00$ (**Πίνακας 4.11**).

Όπως προαναφέρθηκε όταν η κατασκευή θεμελιώνεται σε κατηγορία A ή B ο συντελεστής θ παίρνει την τιμή $\theta = 1.00$ (**Πίνακας 4.12**).

Επιλέγεται συντελεστής συμπεριφοράς $q = 1.00$ για την κατασκευή για επιθυμητή ελαστική συμπεριφορά ως ένα μέτρο προστασίας έναντι κόπωσης. (**Πίνακας 4.13**).

Από τον **Πίνακα 4.14** για μεταλλική κατασκευή με συγκολλήσεις παίρνουμε τιμή για το ζ ίση με $\zeta\% = 2\%$ ενώ με κοχλιώσεις παίρνουμε τιμή για το ζ ίση με $\zeta\% = 4\%$. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, λαμβάνεται μία ενδιάμεση προσεγγιστική τιμή ίση με $\zeta\% = 3\%$.

Από την επίλυση με ιδιομορφική ανάλυση, προκύπτουν οι κύριες ιδιοπερίοδοι

$$T_x = 0.578\text{sec} \text{ και } T_y = 0.06\text{sec}.$$

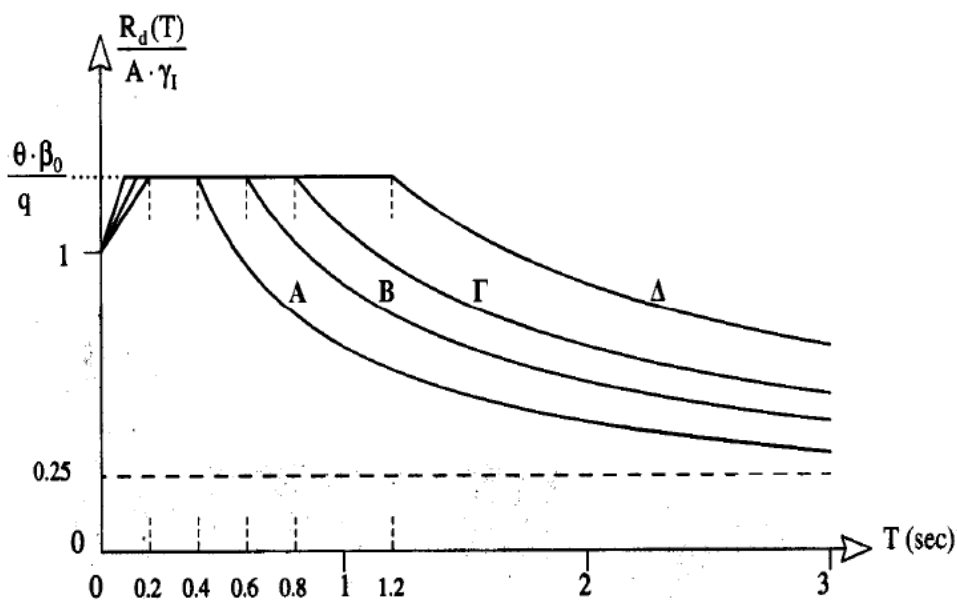
$$T_1 = 0.15\text{sec} \text{ και } T_2 = 0.60\text{sec}.$$

$$\text{Άρα, } T_1 \leq T_x, T_y \leq T_2 \rightarrow R_d(T) = A \cdot \gamma_1 \cdot \frac{\theta}{q} \cdot \beta_0$$

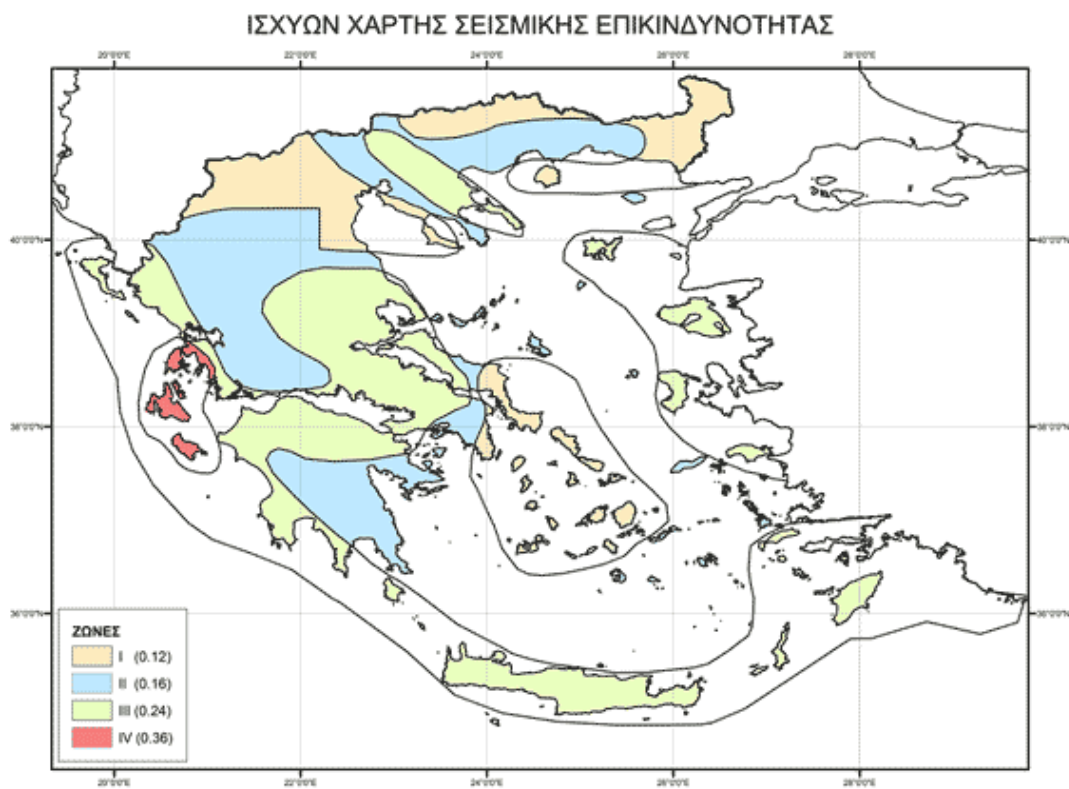
$$\rightarrow R_d(T) = 1.57 \cdot 1.00 \cdot \frac{1}{1} \cdot 2.50 \rightarrow R_d(T) = 3.93 \text{ m/sec}^2.$$

Κατηγορία εδάφους	A	B	Γ	Δ
T_1	0.10	0.15	0.20	0.20
T_2	0.40	0.60	0.80	1.20

Πίνακας 4.7 Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων



Πίνακας 4.8 Φάσμα επιταχύνσεων σχεδιασμού



Σχήμα 4.5 Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας

Κατηγορία	Περιγραφή
A	<p>Βραχώδεις ή ημιβραχώδεις σχηματισμοί εκτεινόμενοι σε αρκετή έκταση και βάθος, με την προϋπόθεση ότι δεν παρουσιάζουν έντονη αποσάθρωση.</p> <p>Στρώσεις πυκνού κοκκώδους υλικού με μικρό ποσοστό ιλυοαργυλικών προσμίξεων, πάχους μικρότερου των 70m.</p> <p>Στρώσεις πολύ σκληρής προσυμπιεσμένης αργίλου πάχους έως 70m.</p>
B	<p>Εντόνως αποσαθρωμένα βραχώδη ή εδάφη που από μηχανικής άποψης μπορούν να εξομοιωθούν με κοκκώδη.</p> <p>Στρώσεις κοκκώδους υλικού μέσης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 5m ή μεγάλης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 70m.</p> <p>Στρώσεις σκληρής προσυμπιεσμένης αργίλου πάχους μεγαλύτερου των 70m.</p>
Γ	Στρώσεις κοκκώδους υλικού μικρής σχετικής πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 5m ή μέσης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 70m.
Δ	Έδαφος με μαλακές αργίλους υψηλού δείκτη πλαστιμότητας ($\beta_0 > 50$) συνολικού πάχους μεγαλύτερου των 10m.
X	<p>Χαλαρά λεπτόκοκκα αμμοϊλύωδη εδάφη υπό τον υδάτινο ορίζοντα, που ενδέχεται να ρευστοποιηθούν (εκτός αν ειδική μελέτη αποκλείσει τέτοιο κίνδυνο, ή γίνει βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων).</p> <p>Εδάφη που βρίσκονται δίπλα σε εμφανή τεκτονικά ρήγματα.</p> <p>Απότομες κλιτείες καλυπτόμενες με προϊόντα χαλαρών πλευρικών κορημάτων.</p> <p>Χαλαρά κοκκώδη ή μαλακά ιλυοαργυλικά εδάφη, εφόσον έχει αποδειχθεί ότι είναι επικίνδυνα από άποψη δυναμικής συμπεκνώσεως ή απώλειας αντοχής.</p> <p>Πρόσφατες χαλαρές επιχωματώσεις (μάζα). Οργανικά εδάφη.</p> <p>Εδάφη κατηγορίας Γ με επικινδύνως μεγάλη κλίση.</p>

Πίνακας 4.9 Κατηγορίες εδάφους

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	I	II	III
α	0.16	0.24	0.36

Πίνακας 4.10 Τιμές του συντελεστή α ανάλογα με τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας

Κατηγορία σπουδαιότητας	γ_1	
Σ_1	Κτίρια μικρής σπουδαιότητας ως προς την ασφάλεια του κοινού, π.χ. αγροτικά οικήματα (υπόστεγα, στάβλοι, κ.λπ.).	0.85
Σ_2	Συνήθη κτίρια κατοικιών και γραφείων, βιομηχανικά κτίρια, ξενοδοχεία, κ.λπ.	1.00
Σ_3	Εκπαιδευτικά κτίρια, κτίρια δημόσιων συναθροίσεων, αίθουσες αεροδρομίων και γενικώς κτίρια στα οποία ευρίσκονται πολλοί άνθρωποι κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Κτίρια τα οποία στεγάζουν εγκαταστάσεις πολύ μεγάλης οικονομικής αξίας (π.χ. κτίρια που στεγάζουν υπολογιστικά κέντρα, ειδικές βιομηχανίες, κ.λπ.).	1.15
Σ_4	Κτίρια των οποίων η λειτουργία, τόσο κατά την διάρκεια του σεισμού, όσο και μετά τους σεισμούς, είναι ζωτικής σημασίας, όπως κτίρια τηλεπικοινωνίας, παραγωγής ενέργειας, νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, κτίρια δημόσιων επιτελικών υπηρεσιών. Κτίρια που στεγάζουν έργα μοναδικής καλλιτεχνικής αξίας (μουσεία, κ.λπ.).	1.30

Πίνακας 4.11 Συντελεστές σπουδαιότητας κτιρίων

Προϋποθέσεις	θ	
1α	Το κτίριο διαθέτει ένα υπόγειο.	0.90
1β	Η θεμελίωση του κτιρίου είναι γενική κοιτόστρωση.	
1γ	Η θεμελίωση του κτιρίου είναι με πασσάλους που φέρουν δοκούς συνδέσεως στην κεφαλή.	
2α	Το κτίριο διαθέτει τουλάχιστον δύο υπόγεια.	0.80
2β	Το κτίριο διαθέτει ένα τουλάχιστον υπόγειο και η θεμελίωση είναι γενική κοιτόστρωση.	
2γ	Η θεμελίωση του κτιρίου είναι με πασσάλους που συνδέονται με ενιαίο κεφαλόδεσμο (όχι αναγκαστικά ενιαίου πάχους).	

Πίνακας 4.12 Συντελεστής θεμελίωσης θ

Χάλυβας		
Δομικό σύστημα		q
<i>A</i>	Πλαίσια.	4.00
<i>B</i>	Δικτυωτοί σύνδεσμοι χωρίς εκκεντρότητα.	4.00
<i>B. 1</i>	Δικτυωτοί σύνδεσμοι.	3.00
<i>B. 2</i>	Σύνδεσμοι τύπου V ή Λ.	1.50
<i>B. 3</i>	Σύνδεσμοι τύπου K (όπου επιτρέπονται).	1.00
<i>Γ</i>	Δικτυωτοί σύνδεσμοι με εκκεντρότητα.	4.00

Πίνακας 4.13 Μέγιστες Τιμές Συντελεστών Σεισμικής Συμπεριφοράς q

Είδος κατασκευής	ζ %
Μεταλλική: με συγκολλήσεις	2
με κοχλιώσεις	4
Σκυρόδεμα: άοπλο	3
οπλισμένο	5
προεντεταμένο	4
Τοιχοποιία: οπλισμένη	6
διαζωματική	5
Ξύλινη: κολλητή	4
κοχλιωτή	4
ηλωτή	5

Πίνακας 4.14 Τιμές ποσοστού απόσβεσης ζ

11) Φορτία κόπωσης

Πέρα από τις μέγιστες πιθανές καταστάσεις καταπόνησης στη διάρκεια λειτουργίας της, μια ανεμογεννήτρια υπόκειται συστηματικά σε κόπωση ως αποτέλεσμα της μεταβλητότητας των ανεμολογικών δεδομένων και κυρίως της τύρβης. Τα φορτία κόπωσης μπορούν να θεωρηθούν σαν απώλεια αντοχής του υλικού όταν υπόκειται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η διαδικασία αυτή συχνά ξεκινάει από την επιφάνεια του υλικού όπου υπάρχουν μικρές ατέλειες και καθώς το μέγεθος των ρωγμών μεγαλώνει, οι συγκεντρώσεις των τάσεων αυξάνουν ανάλογα.

Ως κοπωτικές καταστάσεις λειτουργίας χαρακτηρίζονται η παραγωγή ενέργειας σε όλο το φάσμα των ταχυτήτων ανέμου (συνήθως μεταξύ 4 και 25 m/s), καθώς και οι περιπτώσεις κανονικής εκκίνησης και πέδησης. Η βασική πληροφορία που απαιτείται για τον προσδιορισμό της κόπωσης, δηλαδή της διάρκειας ζωής της μηχανής ή καθενός επιμέρους στοιχείου της, είναι το φάσμα φόρτισης.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η κόπωση εμφανίζεται ακόμα και όταν τα επιβαλλόμενα φορτία είναι πολύ μικρότερα από το ελαστικό όριο του υλικού. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι όχι μόνο οι ακραίες τιμές των φορτίων είναι σημαντικές αλλά και η μικρού πλάτους χρονοιστορία της φόρτισης.

Προκειμένου να εξετάσουμε την ικανότητα των υλικών έναντι κόπωσης, αρκεί να γνωρίζουμε την καμπύλη σ - N των κύκλων της φόρτισης καθ'όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Με τον τρόπο αυτό, αρκεί να ισχύει η γνωστή συνθήκη του κριτηρίου Palmgren-Miner:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N} \leq 1$$

όπου,

k : ο αριθμός των διαφορετικών ευρών τάσης $\Delta\sigma_i$ κατά τη διάρκεια της απαιτούμενης ζωής σχεδιασμού,

n_i : ο αριθμός των κύκλων επανάληψης που αντιστοιχεί σε κάθε εύρος τάσης

N_i : ο αριθμός των κύκλων επανάληψης που προκύπτει από τα διαγράμματα σ - N του Ευρωκώδικα για κάθε εύρος τάσης.

4.4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

Οι συνδυασμοί φόρτισης θα πρέπει να προσδιορίζονται ως συνδυασμός όλων των καταστάσεων λειτουργίας στις οποίες βρίσκεται μία ανεμογεννήτρια όπως είναι οι καταστάσεις κανονικής λειτουργίας και παραγωγής ενέργειας (power production), παραγωγής ενέργειας με ταυτόχρονη εμφάνιση σφάλματος (power production plus occurrence of fault), εκκίνησης (start up), παύση λειτουργίας (shut down), αναμονής (parked), ανέγερσης και συντήρησης (erection, transport, maintenance) και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Όλοι οι σχετικοί συνδυασμοί φορτίσεων με εύλογη πιθανότητα εμφάνισης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε συνδυασμό με την συμπεριφορά των συστημάτων ελέγχου και προστασίας της ανεμογεννήτριας. Οι υπό μελέτη συνδυασμοί φόρτισης που καθορίζουν τη στατική επάρκεια της ανεμογεννήτριας πρέπει να υπολογίζονται συνδυάζοντας:

- κανονικές καταστάσεις λειτουργίας και κατάλληλες φυσιολογικές (normal) ή ακραίες (extreme) περιβαλλοντικές συνθήκες.
- ελαττωματικές καταστάσεις λειτουργίας και κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες.
- καταστάσεις μεταφοράς, εγκατάστασης και συντήρησης και κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή IEC (International Electrotechnical Commission) θα γίνει χρήση των πιο σημαντικών περιπτώσεων φορτίσεων της ανεμογεννήτριας.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ANEMOY	TAXYTHTA ANEMOY (m/sec)	ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	ΣΥΝΤ. ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
Παραγωγή ενέργειας	1.1	NTM	16	OKA	1,2
Παραγωγή ενέργειας με ταυτόχρονη εμφάνιση σφάλματος	1.4	NWP	18	OKA	1,2
Ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας	6.1	EWM 50-ετής ριπή ανέμου	50	OKA	1.35
Ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας	6.3	EWM Ετήσια ριπή ανέμου	40	OKA	1.35
Ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας με ταυτόχρονη εμφάνιση σφάλματος	7.1	EWM Ετήσιος άνεμος	38	OKA	1,1

Πίνακας 4.15 Συνδυασμοί φορτίσεων (IEC)

Στον παρακάτω **Πίνακα 4.16** επεξηγούνται τα διάφορα μοντέλα που περιγράφουν τις συνθήκες του ανέμου.

NTM	Φυσιολογική τύρβη	Αυτό το μοντέλο αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο πεδίο 3 συνιστωσών στοχαστικών μεταβλητών του ανέμου με μία τυπική απόκλιση στροβιλισμού 90%, το οποίο εξαρτάται από την κατηγορία της ανεμογεννήτριας και αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου ανάλογα με το ύψος της πλήμνης.
NWP	Φυσιολογικό προφίλ ανέμου	Αυτό το μοντέλο υποδηλώνει την μέση ταχύτητα ανέμου σαν συνάρτηση του ύψους πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.
EWM	Ακραία ταχύτητα ανέμου	Αυτό το μοντέλο αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο πεδίο 3 συνιστωσών στοχαστικών μεταβλητών του ανέμου με μία τυπική απόκλιση στροβιλισμού 0,11 κάθε 10 λεπτά με μέσο όρο ταχύτητας του ανέμου +0,2 m/s στο ύψος της πλήμνης για 1 ώρα προσομοίωσης.

Πίνακας 4.16 Συνθήκες ανέμου

Απλοποιώντας τους συνδυασμούς φορτίσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω, καταλήγουμε στους παρακάτω συνδυασμούς:

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 1	<i>ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ</i>	<i>ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ</i>	<i>ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑ ΔΡΟΜΕΑ</i>	<i>ΣΕΙΣΜΟΣ</i>
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 2	<i>ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ</i>	<i>ΦΟΡΤΙΑ ΑΚΡΑΙΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ</i>	<i>ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑ ΔΡΟΜΕΑ</i>	
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 3	<i>ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ</i>	<i>ΕΤΗΣΙΟΣ ΑΝΕΜΟΣ (10 min)</i>	<i>ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ</i>	
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 4	<i>ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ</i>	<i>ΕΤΗΣΙΑ ΡΙΠΗ ΑΝΕΜΟΥ (5 sec)</i>		
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 5	<i>ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ</i>	<i>50ετής άνεμος (10 min)</i>	<i>ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ</i>	
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 6	<i>ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ</i>	<i>50ετής ριπή ανέμου (5 sec)</i>		

Πίνακας 4.17 Τελικοί συνδυασμοί φορτίσεων

Ο συνδυασμός φορτίσεων 1 αναφέρεται ως κανονική συνθήκη λειτουργίας (Normal Wind Profile), το οποίο αναπαριστά μια μέση ταχύτητα του ανέμου και είναι κατά βάση ο κύριος συνδυασμός.

Ο συνδυασμός φορτίσεων 2 αναφέρεται ως ακραία συνθήκη λειτουργίας (Normal Turbulence Model), το οποίο αναπαριστά ένα ταραχώδες προφίλ ταχύτητας ανέμου με μια χαρακτηριστική τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου $\sigma_{U,c}$. Η χαρακτηριστική αυτή τυπική απόκλιση ορίζεται ως το ποσοστμόριο 90% στη πιθανοτική κατανομή της τυπικής απόκλισης σ_U , με μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Στις συνθήκες αυτές, η ανεμογεννήτρια δουλεύει με ταχύτητα κοντά στην ταχύτητα διακοπής λειτουργίας.

Ο συνδυασμός φορτίσεων 3 περιγράφει έναν άνεμο αρκετά ισχυρό, διάρκειας 10 λεπτών, ο οποίος έχει συχνότητα μια φορά το χρόνο. Σε αυτή τη φόρτιση προστίθεται και αυτή που προκαλείται από βλάβη ή βραχυκύκλωμα της ανεμογεννήτριας.

Ο συνδυασμός φορτίσεων 4 περιγράφει έναν άνεμο με συχνότητα εμφάνισης ενός έτους, ο οποίος καταπονεί την κατασκευή για 5 δευτερόλεπτα με εξαιρετικά μεγάλη δύναμη.

Ο συνδυασμός φορτίσεων 5 περιγράφει έναν ισχυρό άνεμο, με συχνότητα εμφάνισης μια φορά στα 50 χρόνια και διάρκεια 10 λεπτών. Σε αυτή τη φόρτιση προστίθεται και αυτή που προκαλείται από βλάβη ή βραχυκύκλωμα της ανεμογεννήτριας.

Ο συνδυασμός φορτίσεων 6 αναφέρεται σε έναν άνεμο, ο οποίος μπορεί να καταπονήσει την κατασκευή, με συχνότητα εμφάνισης μια φορά στα 50 χρόνια και διάρκεια 5 δευτερολέπτων.

Για την εφαρμογή των συνδυασμών φόρτισης, θα γίνει χρήση των συντελεστών δράσεων, σύμφωνα με τον κανονισμό Germanischer Lloyd: Rules and Regulations, Part 1-Wind Energy (1993). Λαμβάνοντας, λοιπόν υπόψη την πηγή της φόρτισης (φορτία βαρύτητας, περιβαλλοντικές δράσεις, φορτία λειτουργίας) και τον τύπο της κατάστασης σχεδιασμού (κανονικές/ακραίες συνθήκες, συνθήκες μεταφοράς) καταλήγουμε στους παρακάτω συντελεστές:

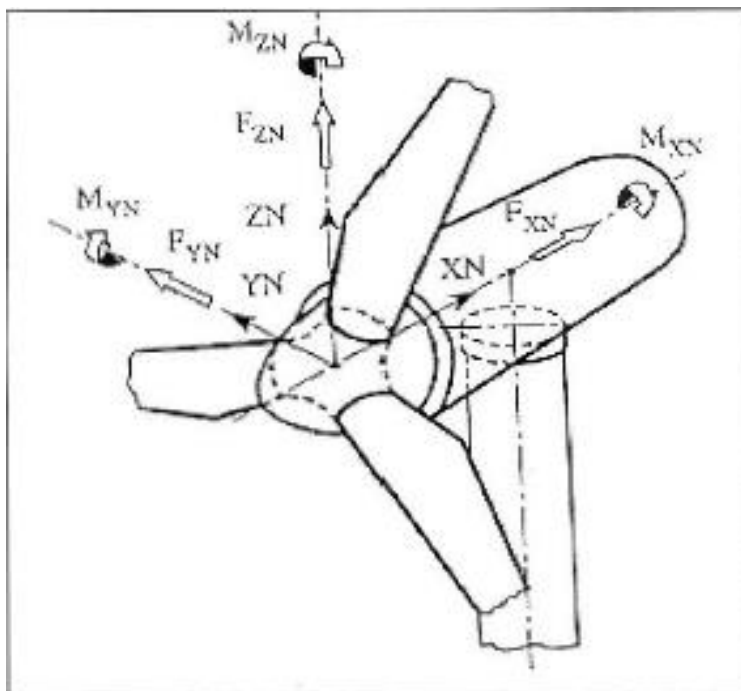
ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΡΑΣΕΩΝ
<i>ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ</i>	<i>1.10</i>
<i>ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ</i>	<i>1.20</i>
<i>ΦΟΡΤΙΑ ΑΚΡΑΙΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ</i>	<i>1.20</i>
<i>ΕΤΗΣΙΟΣ ΑΝΕΜΟΣ (10 min)</i>	<i>1.50</i>
<i>ΕΤΗΣΙΑ ΡΙΠΗ ΑΝΕΜΟΥ (5 sec)</i>	<i>1.50</i>
<i>50ετής άνεμος (10 min)</i>	<i>1.00</i>
<i>50ετής ριπή ανέμου (5 sec)</i>	<i>1.00</i>
<i>ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑ</i>	<i>1.00</i>
<i>ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑ ΔΡΟΜΕΑ</i>	<i>1.35</i>
<i>ΣΕΙΣΜΟΣ</i>	<i>1.00</i>

Πίνακας 4.18 Συντελεστές δράσεων

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά τα φορτία σχεδιασμού που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις ανωτέρω σχέσεις. Οι τιμές αυτές θα χρησιμοποιηθούν για να εισαχθούν, στη συνέχεια στο λογισμικό για τον υπολογισμό των απαραίτητων εντατικών μεγεθών. Οι θετικά προσημασμένες φορές των δυνάμεων και των ροπών είναι σύμφωνα με το **Σχήμα 4.6**.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ	ΦΟΡΤΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ					
	$F_x(kN)$	$F_y(kN)$	$F_z(kN)$	$M_x(kNm)$	$M_y(kNm)$	$M_z(kNm)$
Μόνιμα Φορτία	-	-	320	-	130	-
Φορτία Συνήθους Λειτουργίας	195,32	-	-	1821,93	1031,98	-
Φορτία Ακραίας Λειτουργίας	319,34	-	-	1424,89	-	252,91
Ετήσιος Άνεμος	93,93	-	-	-	-	80,37
Ετήσια ριπή ανέμου	286,74	-	-	-	-	227,09
50-ετής άνεμος	146,79	-	-	-	-	116,26
50-ετής ριπή ανέμου	184,13	-	-	-	-	145,82
Βραχυκύκλωμα	-	-	-	4000	-	-
Εκκεντρότητα δρομέα	10	-	-	-	-	-

Πίνακας 4.19 Φορτία σχεδιασμού



Σχήμα 4.6 Σύστημα συντεταγμένων τουρμπίνας ανεμογεννήτριας (Germanischer Lloyd: Rules and Regulations, Part 1 – Wind Energy, 1993)

Τέλος, στον παρακάτω **Πίνακα 4.20** παρατίθενται οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου που υπολογίστηκαν ξεχωριστά για κάθε κατάσταση συνθηκών λειτουργίας.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	<i>Κανονική λειτουργία</i>	<i>Ακραία λειτουργία</i>	<i>Ετήσια ριπή ανέμου</i>	<i>50-ετής ριπή ανέμου</i>	<i>Ετήσιος άνεμος</i>	<i>Άνεμος 50-ετίας</i>
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (m/sec)	12.13	15.51	60	48.08	34.34	42.93

Πίνακας 4.20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

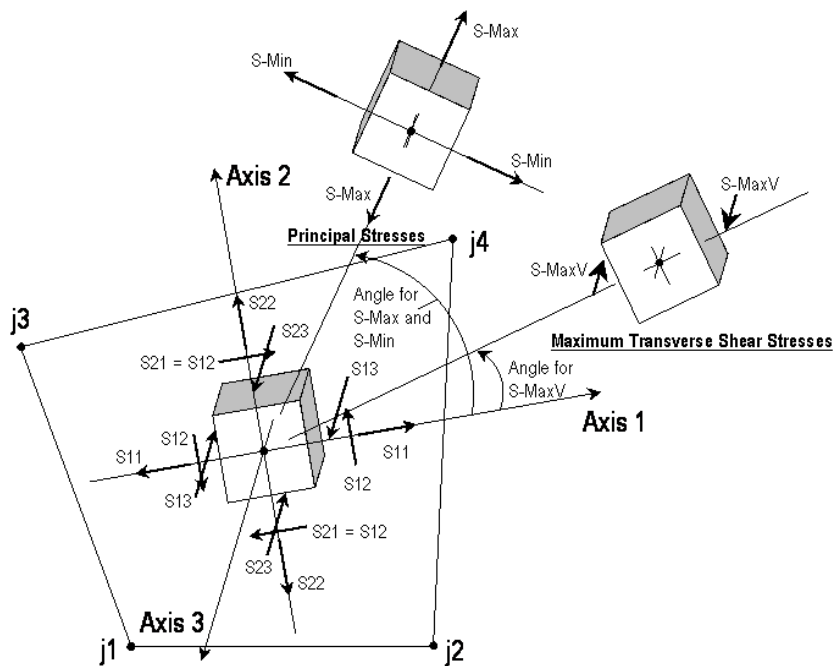
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατικής και ιδιομορφικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό SAP2000, καθώς και συγκρίσεις ανάμεσα στον πύργο της ανεμογεννήτριας από χάλυβα και από σύνθετα υλικά. Η διακριτοποίηση που επιλέχθηκε για την επίλυση του φορέα είναι ανά 1 μέτρο. Συνεπώς, θα προκύψουν αποτελέσματα για τετρακομβικά στοιχεία plate-shell σε όλες τις στάθμες.

Οι κανονισμοί ορίζουν συγκεκριμένα όρια τα οποία αν ξεπεραστούν παύουν να εξασφαλίζονται οι σχεδιαστικές απαιτήσεις. Ορίζονται επομένως οι παρακάτω οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας, οι οποίες πρέπει να ελέγχονται, σύμφωνα με τον DNV-OS-J101:

- Οριακή κατάσταση αστοχίας (Ultimate limit states ULS): Αφορά στην αστοχία εξαιτίας της υπέρβασης της αντοχής όπως αστοχία μέλους, φαινόμενα λυγισμού ή μετατροπή του φορέα σε μηχανισμό.
- Οριακή κατάσταση κόπωσης (Fatigue limit states FLS): Αφορά στην αστοχία που προκαλείται από ανακυκλιζόμενη φόρτιση.
- Τυχηματική οριακή κατάσταση (Accidental limit states ALS): Αφορά στην εξάντληση της αντοχής κάποιου μέλους το οποίο υπόκειται σε σπάνιο, τυχηματικό φορτίο ή σε περίπτωση που έχει προηγηθεί κάποιο ατύχημα.
- Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (Serviceability limit states SLS): Αφορά σε κριτήρια ανοχής που ισχύουν σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας της κατασκευής όπως μέγιστες επιτρεπόμενες παραμορφώσεις και στροφές ή διαφορικές καθιζήσεις.

Στο Σχήμα 5.1 που ακολουθεί διακρίνονται αναλυτικά οι άξονες που χρησιμοποιούνται με βάση το συγκεκριμένο λογισμικό.



Σχήμα 5.1 Προσημασμένες φορές των τάσεων (λογισμικό SAP 2000)

5.2 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ένας ικανοποιητικός σχεδιασμός του πύργου της ανεμογεννήτριας πρέπει να ικανοποιηθούν ορισμένες απαιτήσεις ως προς τις διαστάσεις, την πλαστική ροπή αντοχής, τον λυγισμό, την μετατόπιση της κορυφής του πύργου και τα όρια της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας του πύργου. Αρχικά, όσον αφορά την μετατόπιση της κορυφής του πύργου, εκείνη δε θα πρέπει να ξεπερνά το 1% του ύψους του πύργου έτσι ώστε να αποφευχθεί υπερβολική κίνηση που θα παρεμπόδιζε την ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την πλαστική οριακή ανάλυση, στην οριακή κατάσταση αστοχίας ελέγχονται οι μέγιστες τάσεις von Mises σε κάθε σημείο του πύργου οι οποίες δε θα πρέπει να ξεπερνούν το όριο θραύσης του χάλυβα. Τέλος, για να αποφύγουμε το φαινόμενο του συντονισμού η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα της κατασκευής πρέπει να είναι σε ασφαλή απόσταση από τις συχνότητες διέγερσης στην φάση λειτουργίας του δρομέα της ανεμογεννήτριας.

Στο στάδιο αυτό τρέχουμε τις στατικές αναλύσεις των φορέων για κάθε συνδυασμό φόρτισης. Ως βασικά κριτήρια για την αστοχία της κατασκευής έχουμε την παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα και την αστοχία του υλικού.

Αναλυτικότερα:

- **Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα**

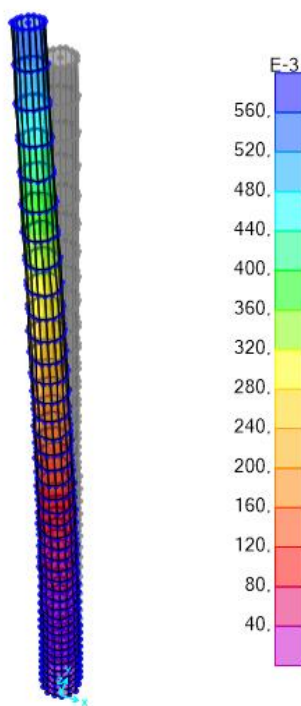
Το όριο λειτουργικότητας της πλευρικής μετατόπισης ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ του πτερυγίου του δρομέα και του πύργου. Βάσει των προδιαγραφών της ανεμογεννήτριας, το όριο αυτό λαμβάνει την τιμή 1.0.

- Περίπτωση χαλύβδινου πύργου
Ο συνδυασμός 3 αποτελεί την δυσμενέστερη περίπτωση.

<i>ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ</i>	<i>ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (m)</i>
<i>ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 1</i>	0,202
<i>ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 2</i>	0,069
<i>ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 3</i>	0,408
<i>ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 4</i>	0,132
<i>ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 5</i>	0,326
<i>ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 6</i>	0,326

Πίνακας 5.1

Deformed Shape (COMB3)

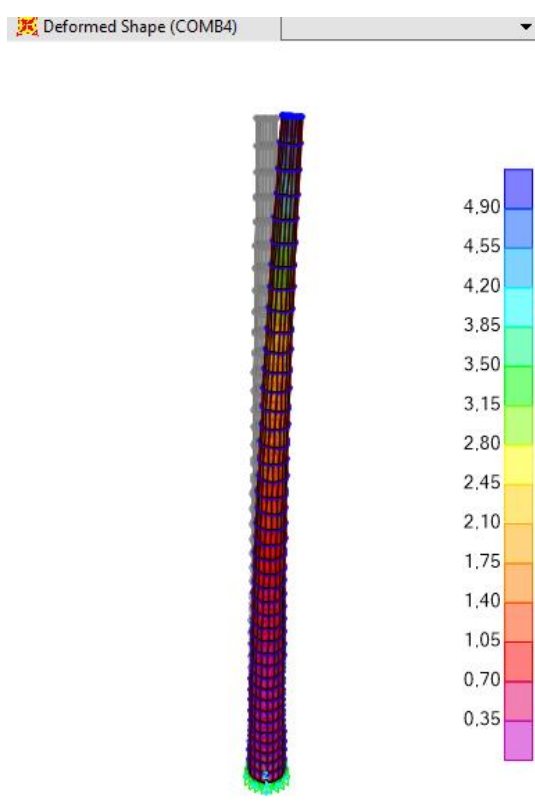


Σχήμα 5.2 Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα από χάλυβα

- Περίπτωση πύργου από σύνθετα υλικά τύπου Scotchply 1002
Ο συνδυασμός 4 αποτελεί την δυσμενέστερη περίπτωση. Στην περίπτωση αυτή η συνολική πλευρική μετατόπιση της κορυφής είναι πολύ μεγαλύτερη από το όριο λειτουργικότητας.

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (m)
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 1	2,1
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 2	4,352
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 3	1,491
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 4	4,726
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 5	1,975
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 6	1,975

Πίνακας 5.2

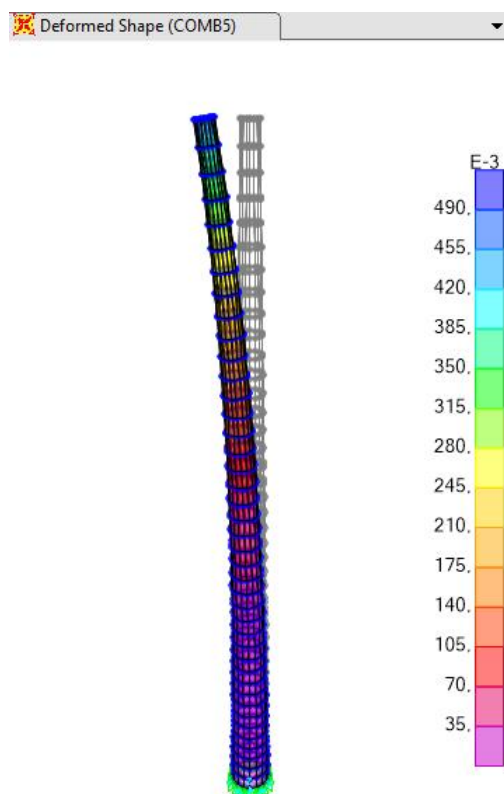


Σχήμα 5.3 Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα από σύνθετα υλικά

- Περίπτωση πύργου από σύνθετα υλικά τύπου T300/5208
Οι συνδυασμοί 5 και 6 αποτελούν την δυσμενέστερη περίπτωση. Η συνολική πλευρική μετατόπιση της κορυφής είναι αποδεκτή.

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (m)
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 1	0,383
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 2	0,089
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 3	0,522
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 4	0,168
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 5	0,418
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 6	0,418

Πίνακας 5.3



Σχήμα 5.4 Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα από σύνθετα υλικά

Αξίζει να τονιστεί ότι η παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα που επιλύεται, αποτελεί δυσμενή περίπτωση αφού τα φορτία εφαρμόστηκαν τοπικά στον κεντρικό κόμβο της κορυφής του πύργου.

- **Χρήση κριτηρίων Von Mises και Μέγιστης Τάσης**

Σε ένα ελαστικό σώμα, το οποίο υπόκειται σε ένα σύστημα φορτίων σε τρεις διαστάσεις αναπτύσσεται ένα σύνθετο τρισδιάστατο σύστημα τάσεων. Οι τάσεις αυτές ασκούνται σε διαφορετικές διευθύνσεις και η διεύθυνση και το μέγεθος των τάσεων αλλάζει από σημείο σε σημείο.

Για τα όλκιμα υλικά, όπως είναι ο χάλυβας, ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια αστοχίας είναι αυτό του Von Mises, γνωστό και ως κριτήριο στροφικής ενέργειας. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, υπολογίζεται μια ισοδύναμη τάση που είναι συνάρτηση των κύριων τάσεων που εμφανίζονται στην εντατική κατάσταση. Ο καθορισμός του αν θα υπάρξει ή όχι πλαστική διαρροή γίνεται συγκρίνοντας την ισοδύναμη τάση με το όριο διαρροής του υλικού. Γίνεται φανερό ότι η πλαστική διαρροή δεν εξαρτάται από οποιαδήποτε μεμονωμένη ορθή ή διατμητική τάση, αλλά αντίθετα είναι συνάρτηση των διαφορών των κύριων τάσεων, δηλαδή των μέγιστων διατμητικών τάσεων. Πιο συγκεκριμένα, ακόμη και εάν καμία από τις κύριες τάσεις δεν ξεπερνά την τάση διαρροής του υλικού, είναι πιθανή η διαρροή λόγω του συνδυασμού αυτών.

Η ισοδύναμη τάση είναι γνωστή ως τάση Von Mises και όταν η τιμή της ξεπεράσει αυτή την τάση διαρροής, τότε θεωρούμε ότι το υλικό αστοχεί. Ο τύπος που περιγράφει το κριτήριο αυτό είναι:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (5.1)$$

όπου, σ_u είναι η τάση Von Mises και $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ είναι οι κύριες τάσεις.

Με βάση τον παρακάτω **Πίνακα 5.4** , παρατηρούμε ότι η μέγιστη τάση που προκύπτει και εμφανίζεται κοντά στη βάση του πύργου, δεν ξεπερνά τη τάση διαρροής του υλικού ($f_y = 355MPa$). Επομένως, θεωρούμε ότι το υλικό δεν αστοχεί και ο πύργος της ανεμογεννήτριας αναλαμβάνει με ασφάλεια τα φορτία που ασκούνται.

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ	ΤΑΣΗ Von Mises (MPa)
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 1	25
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 2	25,60
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 3	102,18
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 4	22,39
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 5	89,90
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ 6	26,85

Πίνακας 5.4

Στην περίπτωση των πύργων από σύνθετα υλικά, τα κριτήρια αστοχίας διαφέρουν σε σχέση με αυτά των ισότροπων υλικών. Πιο συγκεκριμένα αξίζει να σημειωθεί ότι:

- Οι ιδιότητες είναι συνάρτηση του προσανατολισμού στο γενικό σύστημα x-y.
- Απαιτούνται τέσσερις σταθερές για τον προσανατολισμό της συμπεριφοράς.
- Επίσης, απαιτούνται έξι σταθερές για τον έλεγχο αστοχίας.
- Τα κριτήρια αστοχίας δε μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας στα σύνθετα υλικά. Τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια αστοχίας σύνθετων υλικών είναι τα εξής:

- Κριτήριο μέγιστης τάσης,
- Κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης,
- Κριτήριο Tsai-Hill και
- Κριτήριο Tsai-Wu.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει χρήση του τρίτου κριτηρίου. Το κριτήριο Tsai-Hill διατυπώθηκε από τον Hill το 1950. Αρχικά διατυπώθηκε μια θεωρία αστοχίας για τα ανισότροπα υλικά, το οποίο είναι αντίστοιχο με το κριτήριο Von Mises για τα ισότροπα υλικά. Στη συνέχεια ο Tsai συνέδεσε τις σταθερές υλικού στο κριτήριο Hill με τις κρίσιμες τάσεις αστοχίας. Σύμφωνα, λοιπόν, με το κριτήριο αυτό, αστοχία λαμβάνει χώρα όταν δεν ικανοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} \leq 1 \quad (5.2)$$

Στον παρακάτω **Πίνακα 5.5** φαίνονται οι κρίσιμες τάσεις αστοχίας σε MPa X, X', Y, Y' και S, οι οποίες προέκυψαν από πειραματικά δεδομένα.

ΤΥΠΟΣ	ΥΛΙΚΟ	X	X'	Y	Y'	S
T300/5208	Graphite Epoxy	1500	1500	40	246	68
Scotchply 1002	Glass Epoxy	1062	610	31	118	72

Πίνακας 5.5

Χρησιμοποιώντας το μητρώο μετασχηματισμού των τάσεων από το στραμμένο σύστημα x-y στο σύστημα 1-2, προσδιορίζουμε τις κύριες τάσεις σε MPa.

➤ *Πύργος από σύνθετα υλικά τύπου Scotchply 1002*

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 88,79 \\ 156,90 \\ 121,38 \end{Bmatrix}$$

και εφαρμόζοντας το κριτήριο Tsai-Hill έχουμε:

$$\frac{88,79^2}{1062^2} - \frac{88,79 \times 156,90}{1062^2} + \frac{156,90^2}{31^2} + \frac{121,38^2}{72^2} \gg 1$$

Επομένως, το υλικό αστοχεί.

Στο σημείο αυτό παρατηρούμε ότι ο συγκεκριμένος τύπος σύνθετου υλικού δε θα αποτελούσε λύση για την κατασκευή του πύργου της ανεμογεννήτριας, αφού διαθέτει πολύ χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, που του προσφέρει χαμηλά επίπεδα δυσκαμψίας.

Η επιλογή πιο μεγάλου πάχους υλικού στη βάση του πύργου (σχεδόν το διπλάσιο, $t = 40mm$) μειώνει τη μετατόπιση της κορυφής του πύργου μόνο κατά 15%. Επομένως, απαιτείται ειδική ενίσχυση της διατομής ώστε να μπορεί να αναλάβει τα ισχυρά φορτία του ανέμου.

➤ *Πύργος από σύνθετα υλικά τύπου T300/5208*

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 30,91 \\ 23,79 \\ 32,83 \end{Bmatrix}$$

και εφαρμόζοντας το κριτήριο Tsai-Hill έχουμε:

$$\frac{30,91^2}{1500^2} - \frac{30,91 \times 23,79}{1500^2} + \frac{23,79^2}{40^2} + \frac{32,83^2}{68^2} = 0,59 < 1$$

Επομένως, το υλικό δεν αστοχεί και θεωρούμε ότι ο πύργος μπορεί να αναλάβει τα επιβαλλόμενα φορτία με ασφάλεια.

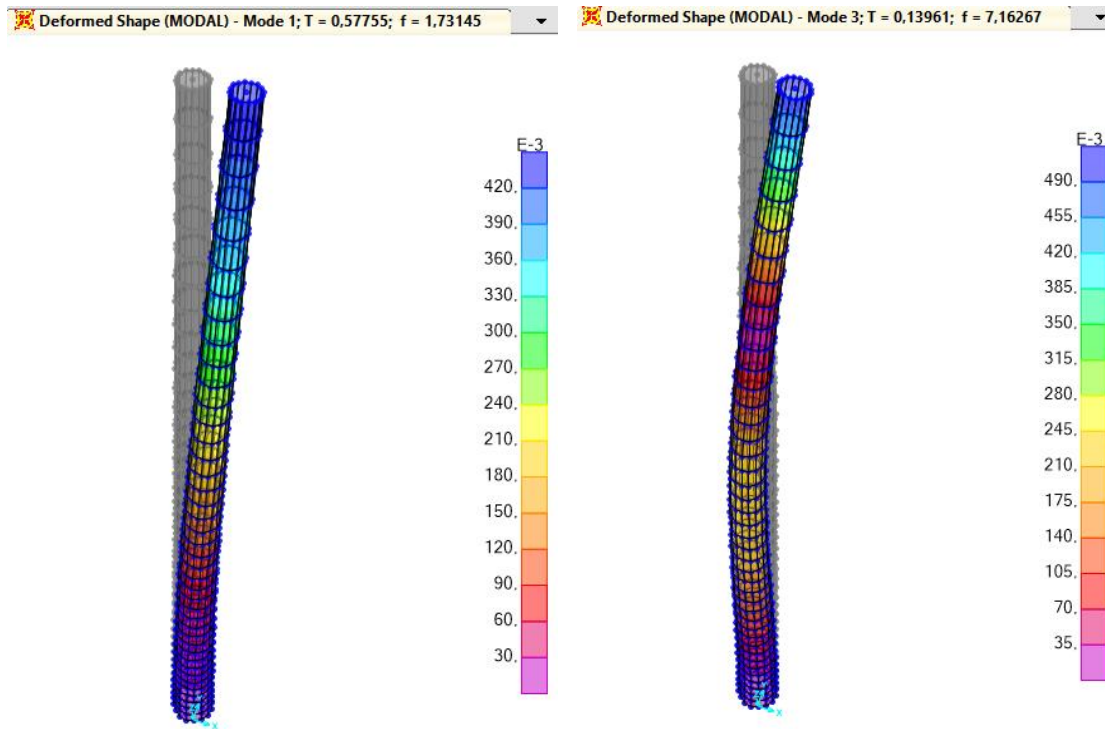
5.3 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η ανεμογεννήτρια μπορεί για απλουστευτικούς λόγους να θεωρηθεί ως μονοβάθμιος ταλαντωτής, θεωρώντας μια ενιαία μάζα από όλα τα μέρη που την απαρτίζουν, η οποία ταλαντώνεται ελεύθερα. Στην πραγματικότητα, όμως τα διάφορα μηχανολογικά και κατασκευαστικά μέρη που διαθέτει, εισάγουν διάφορες ταλαντώσεις στην κατασκευή. Για να επιτευχθεί, λοιπόν ο σωστός σχεδιασμός και η λειτουργία της κατασκευής, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι διαφορετικές περιόδους ταλάντωσης, ώστε να αποφευχθεί ο συντονισμός τους. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει η συχνότητα περιστροφής του δρομέα να διαφέρει από εκείνη της κατασκευής.

Με τη χρήση του προγράμματος SAP 2000, εφαρμόζουμε την ιδιομορφική ανάλυση ώστε να ελεγχθεί η περίοδος ταλάντωσης του πύργου σε σχέση με εκείνη του δρομέα.

Από την επίλυση του πρώτου πύργου από χάλυβα, προκύπτει ότι η τιμή της ιδιοσυχνότητας της πρώτης ιδιομορφής είναι ίση με 1.731Hz , η οποία αντιστοιχεί σε θεμελιώδη ιδιοπερίοδο $T = 0.578\text{sec}$. Σύμφωνα με τα κατασκευαστικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι $16\text{ min}^{-1} \neq 103.81\text{ min}^{-1}$.

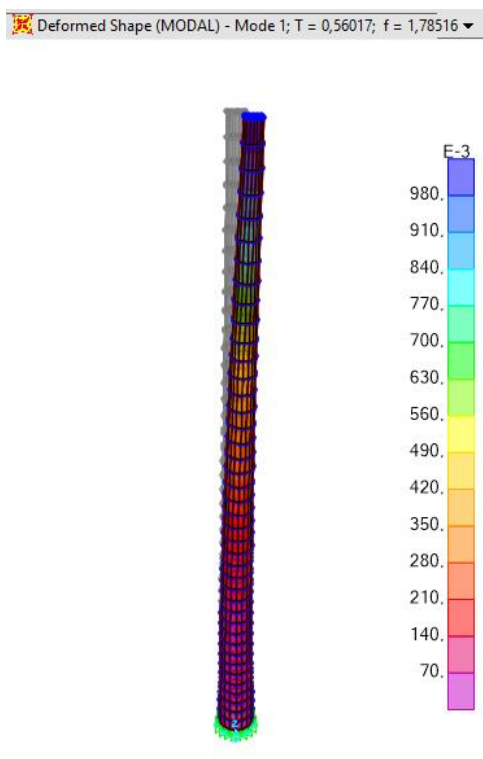
Ακολουθεί η γραφική απεικόνιση της 1^{ης} και 3^{ης} ιδιομορφής του χαλύβδινου πύργου.



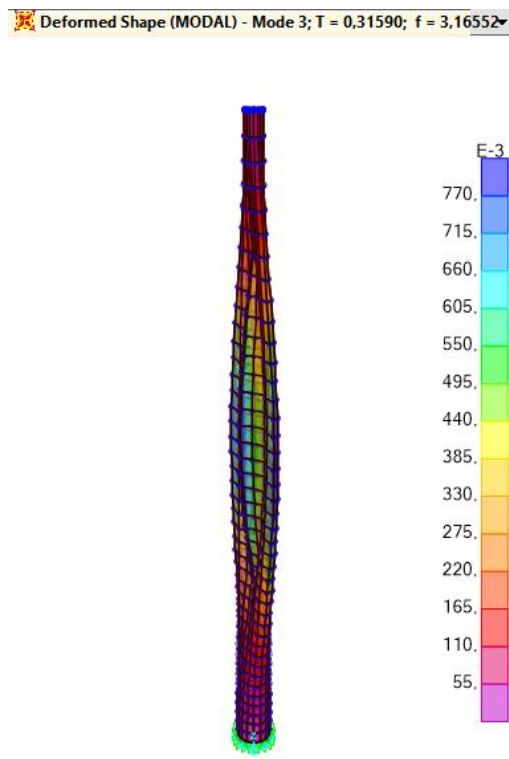
Σχήμα 5.5 1η ιδιομορφή πύργου

Σχήμα 5.6 3η ιδιομορφή πύργου

Για την περίπτωση του δεύτερου πύργου από σύνθετα υλικά τύπου Scotchply 1002, προκύπτει ότι η τιμή της ιδιοσυχνότητας της πρώτης ιδιομορφής είναι ίση με 1.785Hz , η οποία αντιστοιχεί σε θεμελιώδη ιδιοπερίοδο $T = 0.56\text{sec}$. Σύμφωνα με τα κατασκευαστικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι $16\text{ min}^{-1} \approx 107.14\text{ min}^{-1}$.

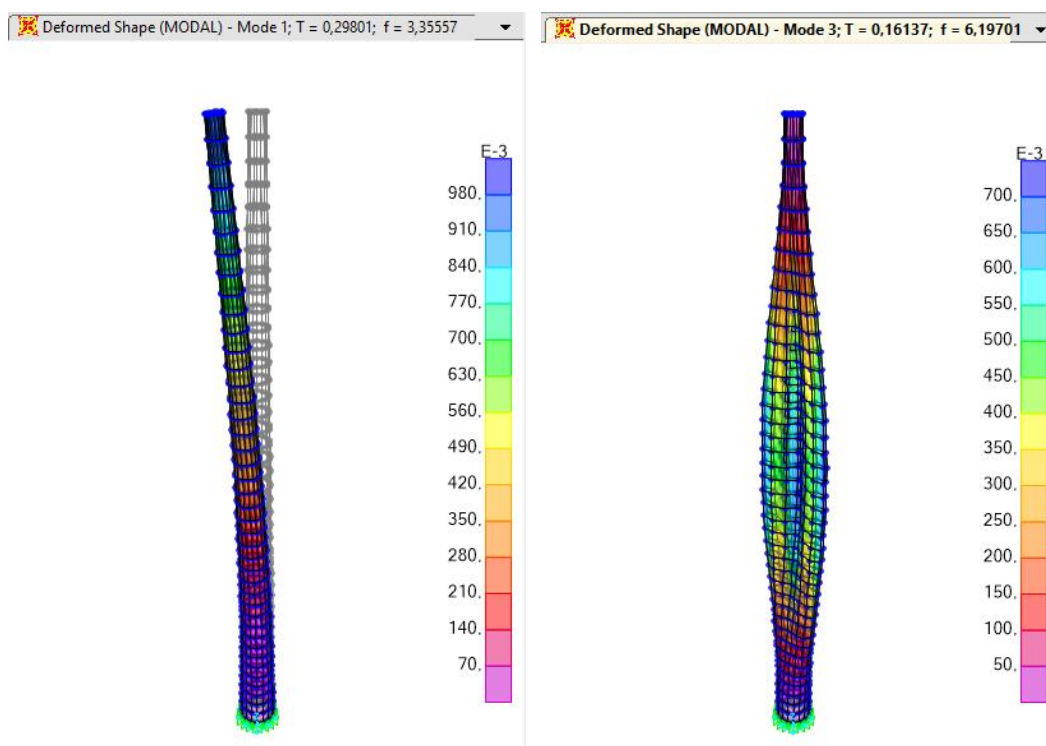


Σχήμα 5.7 1η ιδιομορφή πύργου



Σχήμα 5.8 3η ιδιομορφή πύργου

Για την περίπτωση του τρίτου πύργου από σύνθετα υλικά τύπου T300/5208, προκύπτει ότι η τιμή της ιδιοσυχνότητας της πρώτης ιδιομορφής είναι ίση με 3.356Hz , η οποία αντιστοιχεί σε θεμελιώδη ιδιοπερίοδο $T = 0.298\text{sec}$. Σύμφωνα με τα κατασκευαστικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι $16\text{ min}^{-1} \approx 201.34\text{ min}^{-1}$.



Σχήμα 5.9 1η ιδιομορφή πύργου

Σχήμα 5.10 3η ιδιομορφή πύργου

5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η προσομοίωση τριών πύργων ανεμογεννήτριας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με τη χρήση του προγράμματος SAP 2000. Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη στατική και δυναμική ανάλυση του φορέα, έχουμε:

- Σύμφωνα με τα όρια από την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας – μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση της κορυφής του πύργου, παρατηρούμε ότι η περίπτωση του πύργου από σύνθετα υλικά αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται η πιο ακραία τιμή μετατόπισης στην περίπτωση του πύργου από σύνθετα υλικά τύπου Scotchply 1002.
- Σύμφωνα με την οριακή κατάσταση αστοχίας και τον έλεγχο των τάσεων, παρατηρούμε ότι ο χάλυβας και ο δεύτερος τύπος σύνθετου υλικού αποδεικνύονται ιδιαίτερα ανθεκτικοί, ενώ ο άλλος τύπος σύνθετου υλικού παρουσιάζει αστοχία.
- Τέλος, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης, παρατηρούμε ότι το φαινόμενο του συντονισμού αποφεύγεται, δηλαδή η κατασκευή ταλαντώνεται σε συχνότητες διέγερσης διαφορετικές από αυτές του δρομέα της ανεμογεννήτριας.

Λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει η μελέτη και ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης κατασκευής, μπορούμε να αναλύσουμε εκτενέστερα τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

- Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μικρότερη δυσκαμψία σε σχέση με τον χάλυβα. Για το λόγο αυτό, η μετατόπιση της κορυφής των αντίστοιχων πύργων είναι μεγαλύτερη.
- Οι ίνες άνθρακα (τύπος T300/5208) έχουν υψηλότερη δυσκαμψία και μικρότερο βάρος από τις ίνες γυαλιού (τύπος Scotchply 1002), με αποτέλεσμα να δημιουργούν πολύ μικρότερες μετατοπίσεις και τάσεις.
- Από την ιδιομορφική ανάλυση προέκυψε ότι οι ιδιομορφές εμφανίζονται σε ζεύγη, όπως ήταν αναμενόμενο. Εκτός από την πρώτη ιδιομορφή στη σεισμική απόκριση συμμετέχει η δεύτερη και τρίτη ιδιομορφή και κατά συνέπεια δεν είναι απόλυτα ακριβής η απλοποιητική θεώρηση του πύργου ως μονοβάθμιου ταλαντωτή.
- Η συνολική μάζα του κάθε πύργου από σύνθετα υλικά είναι περίπου κατά 40% μικρότερη από τη μάζα του πύργου από χάλυβα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται το συνολικό βάρος της κατασκευής και ανάλογα και το κόστος κατασκευής.
- Ιδιαίτερη σημασία πέρα από την επιλογή των ινών είναι και η επιλογή του συνδετικού υλικού, αφού οι ίνες από μόνες τους δεν αντέχουν σε θλιπτικά ή εγκάρσια φορτία. Το συνδετικό υλικό είναι εκείνο που προστατεύει τις ίνες από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις και είναι κρίσιμα καθοριστικό για την αντοχή σε διάβρωση του σύνθετου υλικού.
- Για να καταστήσουμε τα σύνθετα υλικά μια ελκυστική λύση στην προκειμένη περίπτωση, μπορούμε επίσης να δώσουμε βάση στα εξής στοιχεία:
 - i. η χρήση ινών διαφόρων προσανατολισμών μπορεί να καταστήσει το υλικό όσο το δυνατόν ισότροπο, ώστε να είναι εφικτή η ανάληψη φορτίων διαφορετικών διευθύνσεων,
 - ii. πέρα από τη διαμόρφωση του σύνθετου υλικού με πολλές διαστρωματώσεις, μπορεί να γίνει χρήση των σύνθετων υλικών τύπου sandwich, τα οποία αποτελούνται από δυο εξωτερικές πλάκες υλικού υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων, ανάμεσα στις οποίες παρεμβάλλεται υλικό πλήρωσης ή πυρήνας. Το υλικό πλήρωσης μπορεί να είναι κάποιο αφρώδες πολυμερές και παίζει το ρόλο μοχλοβραχίονα, αυξάνοντας τη ροπή αδράνειας των δυο επιμέρους διαστρωματώσεων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καμπτική δυσκαμψία του όλου συστήματος.

Χαρακτηριστική επίσης είναι η ιδιότητα των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες, να αναλαμβάνουν τα ασκούμενα φορτία ακόμη και μετά την αστοχία τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ίνες που σταδιακά σπάνε κατά τη φάση της αστοχίας του υλικού μεταβιβάζουν τις τάσεις στις υπόλοιπες ίνες που δεν έχουν αστοχήσει ακόμα.

- Η κυρίαρχη φόρτιση στη διαστασιολόγηση του πύργου αποδείχτηκε ότι είναι η ανεμοφόρτιση.
- Τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν εξαιρετική αντοχή σε κόπωση, η οποία είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας της ανεμογεννήτριας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της.

Βιβλιογραφία

1. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ)
<http://www.cres.gr/kape/index.htm>
2. Ελληνική Εταιρεία Αιολικής Ενέργειας
<http://www.eletaen.gr>
3. European Wind Energy Association
http://www.ewea.org/STATICS/EUROPEAN_STATICS
4. Ν. Ανδρίτσος , «Ενέργεια και Περιβάλλον»
5. Α. Μπάης , «Πηγές Ενέργειας στο Περιβάλλον», Α.Π.Θ 2010
6. Κάραλης Γ. , «Βασικές γνώσεις αιολικής ενέργειας»
7. Ραυτογιάννης Ι. Γ. (2009). «Σύνθετα Υλικά», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
8. Ευρωκώδικας 1, Μέρος 1-4, Δράσεις Ανέμου
9. Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-6, Αντοχή και ευστάθεια φορέων με στοιχεία κελύφους
10. ΕΑΚ 2000
11. Design of offshore wind turbine structures, Offshore Standard DNV-OS-J101, Det Norske Veritas
12. Germanischer Lloyd Rules and Regulations, Part 1: Wind Energy (1993), Hamburg, Germany
13. International Standard, Wind Turbines, IEC 61400-1
14. SAP 2000 Manual
15. Vestas Turbine Brochure
<http://pdf.directindustry.com/pdf/vestas/v52-850-kw-brochure/20680-53603.html>
16. J.M. Jonkman and M.L. Buhl, Jr.«Loads Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine Using Fully Coupled Simulation»
17. Jones R., «Mechanics of Composite Materials», Second Edition
18. Tsai W. «Composite Design», 4th Edition
19. Hill (1950), «The Mathematical Theory of plasticity», Oxford
20. ΚΑΠΕ, «Μέτρηση φορτίων σε ανεμογεννήτριες»
<http://www.cres.gr/services/istos.chtm?prnbr=24810&locale=el>
21. Eduard Ventsel, Theodor Krauthammer, «Thin Plates and Shells», University Park Pennsylvania

22. Thomas Krogh, HAWC, «Load Simulation of Generic 5MW Offshore Wind Turbine Model»