



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Σύγκριση στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς
μεταξύ πύργων ανεμογεννητριών από χάλυβα
και σύνθετα υλικά



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεανώ Γ. Καμπάνη

Επιβλέπων: Ιωάννης Ραυτογιάννης

Αθήνα, Ιούλιος 2012

ΕΜΚ ΔΕ 2012/19

Καμπάνη Θ. Γ. (2012).
Σύγκριση στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς μεταξύ πύργων ανεμογεννητριών από
χάλυβα και σύνθετα υλικά
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2012/19
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Kampani T. G. (2012).
Comparison between structural behavior of a steel and a composite wind tower
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2012/19
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	1
Abstract	2
Ευχαριστίες	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο – Αιολική Ενέργεια και Ανεμογεννήτριες	5
1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Γενικά περί Αιολικής Ενέργειας	5
1.2.1 Αιολική Ενέργεια	5
1.2.2 Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας	6
1.2.3 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα	7
1.3 Ανεμογεννήτριες	9
1.3.1 Τύποι ανεμογεννητριών.....	9
1.3.2 Υποσυστήματα ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα	12
1.3.3 Πύργοι ανεμογεννητριών	16
1.3.4 Πύργοι ανεμογεννητριών από σύνθετα υλικά	18
1.3.5 Πειραματική διερεύνηση σωληνωτών FRP κατασκευών.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο - Χαρακτηριστικά ανέμου.....	20
2.1 Εισαγωγή.....	20
2.2 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος.....	20
2.3 Μεταβολή ταχύτητας του ανέμου σε σύνθετη τοπογραφία	22
2.4 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο	23
2.5 Τύρβη ανέμου.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών	28
3.1 Εισαγωγή.....	28
3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πύργου.....	28
3.3 Ιδιότητες Υλικών.....	30
3.3.1 Επίπεδη εντατική κατάσταση.....	31
3.3.2 Μετασχηματισμός μητρώου τάσεων	34
3.3.3 Μετασχηματισμός μητρώου παραμορφώσεων	36
3.3.4 Μετασχηματισμός των όρων ακαμψίας	38
3.3.5 Μετασχηματισμός των όρων ευκαμψίας.....	41
3.3.6 Μηχανικές Σταθερές Υλικού.....	43
3.4 Τρόπος κατασκευής πύργου ανεμογεννήτριας από σύνθετα υλικά με τη διαδικασία της περιέλιξης.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο - Φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων	49
4.1 Εισαγωγή.....	49

4.2	Φορτία που ασκούνται στον πύργο της ανεμογεννήτριας.....	49
4.3	Φορτία που μεταφέρονται από την τουρμπίνα στον πύργο.....	57
4.4	Φορτία λόγω σεισμού.....	62
4.5	Φορτία κόπωσης.....	65
4.6	Συνδυασμοί φορτίσεων	66
4.7	Υπολογισμός φορτίων σχεδιασμού	68
4.7.1	Φορτία σχεδιασμού στον πύργο	68
4.7.2	Φορτία σχεδιασμού στην κορυφή του πύργου	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο - Μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (SOFiSTiK)		72
5.1	Εισαγωγή.....	72
5.2	Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	72
5.3	Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα SOFiSTiK	74
5.3.1	Δημιουργία της γεωμετρίας του φορέα	74
5.3.2	Καθορισμός του υλικού.....	81
5.3.3	Εφαρμογή των φορτίων.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο - Ανάλυση του φορέα με το πρόγραμμα SOFiSTiK και παρουσίαση των αποτελεσμάτων		85
6.1	Εισαγωγή.....	85
6.2	Στατική Ανάλυση	85
6.2.1	Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα	85
6.2.2	Αποτελέσματα κριτηρίων Von Mises και Μέγιστης Τάσης.....	89
6.3	Ιδιομορφική Ανάλυση	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ^ο - Συμπεράσματα.....		100
Βιβλιογραφία.....		103

Σύγκριση στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς μεταξύ πύργων ανεμογεννητριών από χάλυβα και σύνθετα υλικά

Καμπάνη Θ. Γ. (Επιβλέπων: Ραυτογιάννης Ι.)

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και διερεύνηση της συμπεριφοράς ενός πύργου από σύνθετα υλικά (Graphite/Epoxy) και ενός πύργου από χάλυβα S355 ύψους 50m, με τη χρήση του προγράμματος SOFiSTiK. Πραγματοποιήθηκε ιδιομορφική ανάλυση, έλεγχος αστοχίας του υλικού και ευστάθειας του κάθε φορέα υπό την επίδραση του δυσμενέστερου συνδυασμού φορτίσεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά και γραφικά ενώ στο τέλος της εργασίας εξάγονται τα συμπεράσματα της έρευνας.

Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες σχετικά με τις ανεμογεννήτριες, τα μέρη από τα οποία αποτελούνται και τους πύργους που τις στηρίζουν. Περιγράφεται η συμπεριφορά των σωληνωτών FRP κατασκευών καθώς και διάφορες προσπάθειες κατασκευής πύργου από σύνθετα υλικά.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα κύρια χαρακτηριστικά του ανέμου, που αποτελεί την κυρίαρχη φόρτιση στους πύργους ανεμογεννητριών.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται η γεωμετρία του φορέα και τα χαρακτηριστικά του. Παρουσιάζεται το υλικό που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για κάθε πύργο της ανεμογεννήτριας, οι ιδιότητές του και ο τρόπος κατασκευής του.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφονται και υπολογίζονται τα φορτία τα οποία ασκούνται απευθείας στον υπό εξέταση πύργο και εκείνα τα οποία μεταφέρονται από τη τουρμπίνα στην κορυφή του πύργου. Ακόμη περιγράφονται τα φορτία σεισμού και τα φορτία κόπωσης. Τέλος, δίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές σχεδιασμού αυτών των φορτίων και οι συνδυασμοί των φορτίσεων.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία της μοντελοποίησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και η εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα SOFiSTiK. Παρατίθενται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα, τον καθορισμό του υλικού, την επιβολή των συνοριακών συνθηκών και την εφαρμογή των φορτίων.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατικής και ιδιομορφικής ανάλυσης για κάθε φορέα για το δυσμενέστερο συνδυασμό φορτίσεων.

Στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας καθώς και ιδέες για μελλοντική έρευνα.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2012/19

Comparison between structural behavior of a steel and a composite wind tower

Kampani T. G. (supervised by Raftogiannis I.)

Abstract

The main purpose of the present thesis is the modeling and study of the structural behavior of two wind towers 50m high (one made from steel S355 grade and one made from FRP materials – graphite/epoxy) with the aid of SOFiSTiK FE Analysis software. A static and dynamic analysis as well as material failure and stability check at limit state conditions is conducted. The results are presented both analytically and graphically and interesting conclusions are drawn.

In Chapter 1, an introduction to the basic concepts of wind turbines, their consisting parts and wind towers is presented. The behavior of FRP tubular structures and an attempt to construct wind towers made from FRP composite materials is described.

In Chapter 2, we analyze the main characteristics of the wind loading, which is the dominant load in wind turbine towers.

In Chapter 3, the geometry of the structure and its characteristics are presented, as well as material properties and construction methods for each wind tower.

In Chapter 4, the loads applied directly to the tower as well as those transferred from the turbine at the top of the tower are analyzed and calculated. Moreover, earthquake and fatigue loads are given. Finally, the aggregated values of the above design loads and combinations of loads are presented.

In Chapter 5, the modeling process using the finite element method and the data entry procedure in the program SOFiSTiK is described i.e., the steps to enter geometry and material data for the structure as well as the boundary conditions and the applied loads.

In Chapter 6, results from the static and dynamic analysis for the most unfavorable combination of loads are presented for each structure.

In Chapter 7, interesting conclusions and ideas for future research are presented.

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Επ. Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Ι. Ραυτογιάννη τόσο για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα, όσο και για την προθυμία και υπομονή που έδειχνε κάθε φορά που χρειάστηκα τη βοήθειά του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο – Αιολική Ενέργεια και Ανεμογεννήτριες

1.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή σε θέματα αιολικής ενέργειας. Περιγράφονται οι βασικοί τύποι ανεμογεννητριών (οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα), τα μέρη από τα οποία αποτελείται μία ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα και οι πύργοι που τις στηρίζουν. Ακόμη, εξετάζεται κατά πόσο η τεχνολογία των σύνθετων υλικών διαθέτει το δυναμικό να χρησιμοποιηθεί και στην κατασκευή των πύργων, μειώνοντας το συνολικό βάρος καθώς και το κόστος μεταφοράς και ανέγερσης τους. Στο τέλος του κεφαλαίου αναφέρονται μερικές προσπάθειες κατασκευής πύργου από σύνθετα υλικά καθώς και τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης των σωληνωτών FRP κατασκευών.

1.2 Γενικά περί Αιολικής Ενέργειας

1.2.1 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι μία μορφή ενέργειας που δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους.

Ο άνεμος είναι δυνατό να περιστρέφει ανεμόμυλους, ανεμοτροχούς, να προωθήσει ιστιοφόρα πλοία και οχήματα ή να κινήσει αντικείμενα, μπορεί δηλαδή να καταστήσει την ενέργεια του εκμεταλλεύσιμη.

Η πηγή αυτή ενέργειας είναι φιλική προς το περιβάλλον, πρακτικά ανεξάντλητη και ανανεώσιμη.

Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5.1 m/s, σε ύψος 10 μέτρων πάνω από το έδαφος. Όταν οι άνεμοι πνέουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, τότε το αιολικό δυναμικό του τόπου θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα. Άλλωστε το κόστος κατασκευής έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την πρώτη περίοδο ωριμότητας, καθώς είναι πλέον ανταγωνιστική των συμβατικών μορφών ενέργειας.

1.2.2 Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας

Ο ανεμόμυλος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως ανεμογεννήτρια το 1890 όταν εγκαταστάθηκε πάνω σε χαλύβδινο πύργο ο ανεμόμυλος του Roul la Cour στη Δανία, με ισχία με σχισμές και διπλά πτερύγια αυτόματης μετάπτωσης προς τη διεύθυνση του ανέμου.

Μετά τον Α΄ Παγκόσμιο πόλεμο, έγιναν πειράματα με ανεμόμυλους που είχαν ισχία αεροτομής, δηλαδή όμοια με πτερύγια αεροπορικής έλικας. Το 1931 μία τέτοια ανεμογεννήτρια εγκαταστάθηκε στην Κριμαία και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς διοχετευόταν στο τμήμα χαμηλής τάσης του τοπικού δικτύου. Πραγματικές ανεμογεννήτριες με δύο πτερύγια λειτούργησαν στις ΗΠΑ κατά τη δεκαετία του 1940, στην Αγγλία τη δεκαετία του 1950 καθώς και στη Γαλλία.

Μετά το Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο πολλοί περίμεναν ότι η αιολική ενέργεια θα συνέβαλλε σημαντικά στην παραγωγή ηλεκτρισμού, αλλά οι προσπάθειες ατόνησαν μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970.

Τότε, λόγω της πετρελαϊκής κρίσης, η διεθνής κοινότητα άρχισε να αναγνωρίζει το πεπερασμένο των παγκοσμίων αποθεμάτων των συμβατικών πηγών ενέργειας (κάρβουνο, πετρέλαιο, ουράνιο κλπ) σε σύγκριση με την ανεξέλεγκτη αύξηση των ρυθμών κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα στις ανεπτυγμένες χώρες του πλανήτη μας.

Ταυτόχρονα η επιταχυνόμενη συσσώρευση επικίνδυνων ρυπαντών (τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα) και η αντίστοιχη καταστροφή του περιβάλλοντος οδήγησε στην εμφάνιση σημαντικών προβλημάτων υγείας, υποβαθμίζοντας παράλληλα την ποιότητα ζωής στις περισσότερες μεγαλουπόλεις π.χ. Ρώμη, Λονδίνο, κ.α.

Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας και η προσπάθεια ελέγχου της πυρηνικής σύνταξης έδωσαν προσωρινά κάποιες ελπίδες για τη συνέχιση των υφιστάμενων ρυθμών ανάπτυξης.

Δυστυχώς, η αναμενόμενη όξυνση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, κυρίως από τη διάθεση των ραδιενεργών καταλοίπων και την πιθανότητα μείζονος ατυχήματος, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος προστασίας από τη ραδιενέργεια, έθεσε σοβαρά και αναπάντητα ερωτήματα που αφορούν τη βιωσιμότητα αντιστοίχων συμβατικών πηγών ενέργειας.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα παραπάνω προβλήματα, αρκετοί ειδικοί έφεραν ξανά στο προσκήνιο τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και υποκίνησαν μία σειρά από κυβερνητικά χρηματοδοτούμενα προγράμματα για έρευνα και ανάπτυξη των ανεμογεννητριών.

Στο διάστημα μέχρι σήμερα, σημειώνεται μια αλματώδης ανάπτυξη, κάτι που ενισχύεται και από την επιτακτική ανάγκη για την προστασία του περιβάλλοντος. Γίνεται πλέον συνείδηση σε όλο και περισσότερο κόσμο, πως η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν.

Σήμερα, η αιολική βιομηχανία είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη ενεργειακή τεχνολογία, με εντυπωσιακούς ρυθμούς ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια.

Πολλά αιολικά πάρκα υπάρχουν στην Ευρώπη σε χώρες όπως η Ολλανδία, η Δανία, η Πορτογαλία, η Γαλλία, η Μεγάλη Βρετανία, η Ισπανία, η Ιταλία και βέβαια η χώρα μας.

Το 2011, μάλιστα, εγκαταστάθηκαν στην Ευρωπαϊκή Ένωση νέα αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 9.616MW φτάνοντας συνολικά την εγκατεστημένη αιολική ισχύ σε 93.957MW.

Τα τελευταία 17 χρόνια η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας έχει μέση ετήσια αύξηση 15,6% (1995-2011).

1.2.3 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι μια χώρα που διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό και η αιολική ενέργεια μπορεί να γίνει σημαντικός μοχλός ανάπτυξής της. Από τις πλέον πρόσφορες περιοχές για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι οι παράλιες περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας και κυρίως τα νησιά του Αιγαίου, στα οποία πνέουν ισχυροί άνεμοι.

Ενέργειες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχουν γίνει σε ολόκληρη τη χώρα, ενώ στο γεγονός αυτό έχει συμβάλει και η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις ΑΠΕ, η οποία ενθαρρύνει και επιδοτεί επενδύσεις στις ήπιες μορφές ενέργειας. Σε εθνική κλίμακα, ο νέος αναπτυξιακός νόμος 3299/04, σε συνδυασμό με το νόμο για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας 3468/06, παρέχει ισχυρότητα κίνητρα ακόμα και για επενδύσεις μικρής κλίμακας.

Οι πρώτες δραστηριότητες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα άρχισαν το 1975, με την πραγματοποίηση από τη ΔΕΗ μετρήσεων των ανεμολογικών στοιχείων σε πολλές περιοχές της χώρας. Από τα στοιχεία αυτά προέκυψε ότι η Ελλάδα διαθέτει ορισμένες από τις καλύτερες θέσεις παγκοσμίως για την εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου. Έτσι, από το 1982, οπότε και εγκαταστάθηκε το πρώτο αιολικό πάρκο στην Κύθνο, έως σήμερα αιολικά πάρκα έχουν κατασκευαστεί σε Άνδρο, Νάξο, Εύβοια, Λήμνο, Σαμοθράκη, Λέσβο, Χίο, Σάμο, Κεφαλονιά, Κάρπαθο, Κω, Ρόδο και Κρήτη.



Εικόνα 1.1: Αιολικό Πάρκο στο Ημεροβίγλι της Κεφαλονιάς



Εικόνα 1.2: Το αιολικό πάρκο στο όρος Όχη στη Νότια Εύβοια

1.3 Ανεμογεννήτριες

1.3.1 Τύποι ανεμογεννητριών

Υπάρχουν πολλών ειδών ανεμογεννήτριες οι οποίες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής τους:

α) Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα

Στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, ο άξονας περιστροφής των πτερυγίων είναι παράλληλος προς το έδαφος. Έχουν δύο ή τρία πτερύγια, τα οποία προσδένονται σταθερά ή με τη δυνατότητα να μεταβάλλουν τη γωνία τους σε σχέση με τον άνεμο. Ο δρομέας και η γεννήτρια τοποθετούνται στην κορυφή του πύργου ώστε να εκμεταλλεύονται καλύτερα το διαθέσιμο άνεμο. Στον πύργο τοποθετείται και στηρίζεται όλος ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός. Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα συνήθως κατατάσσονται σε:

- Ανεμογεννήτριες μεταβλητού βήματος (pitch control) ή ανεμογεννήτριες σταθερού βήματος (stall control), ανάλογα με τον τρόπο ρύθμισης της αποδιδόμενης ισχύος όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου. Στις ανεμογεννήτριες μεταβλητού βήματος η διατήρηση της ισχύος σε ορισμένα επιθυμητά όρια επιτυγχάνεται με τη στροφή των πτερυγίων ($0-90^\circ$) περί το μεγάλο άξονα τους. Στις ανεμογεννήτριες σταθερού βήματος η διατήρηση της ισχύος επιτυγχάνεται αεροδυναμικά, μέσω του αεροδυναμικού φαινομένου της απώλειας στήριξης (αποκόλληση της ροής στο πτερύγιο με την αύξηση της ταχύτητας). Στις ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου η ισχύς αυξάνει μέχρι μία ορισμένη ταχύτητα ανέμου (εξαρτώμενη από τον τύπο του πτερυγίου και την ταχύτητα περιστροφής). Πέραν της ταχύτητας αυτής προκαλείται μείωση ισχύος λόγω του φαινομένου της απώλειας στήριξης (stall).
- Ανάλογα με τον προσανατολισμό του ρότορα ως προς την πνοή του ανέμου (upwind, downwind). Οι ανεμογεννήτριες τύπου upwind έχουν τον άνεμο μπροστά από το ρότορα και έχουν το πλεονέκτημα ότι διαταράσσουν το πεδίο του ανέμου λιγότερο κατά τη λειτουργία τους. Το βασικό μειονέκτημά τους είναι ότι ο ρότορας πρέπει να σχεδιάζεται δύσκαμπτος, γεγονός το οποίο είναι δυσμενές για τη δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας (συντονιστικά φαινόμενα πύργου- ρότορα), καθώς και το ότι τοποθετείται σε κάποια απόσταση από τον πύργο. Πρόκειται για το συνήθη τύπο ανεμογεννητριών.
Αντίθετα, στις ανεμογεννήτριες τύπου downwind ο ρότορας είναι τοποθετημένος στην υπήνεμη πλευρά της γεννήτριας. Έχουν το θεωρητικό πλεονέκτημα ότι μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς σύστημα περιστροφής- ευθυγράμμισης του ρότορα, εφόσον ο ρότορας έχει σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να ακολουθεί παθητικά τον άνεμο. Μεγάλο τους μειονέκτημα είναι η διαταραχή που δημιουργούν στο πεδίο του ανέμου, με κύρια συνέπεια την πτώση της παραγωγικής ικανότητας και τη δημιουργία αυξημένων φορτίων κόπωσης.
- Ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων τους. Οι σημερινές ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως τρία πτερύγια. Υπάρχουν όμως και δίπτερες ανεμογεννήτριες.

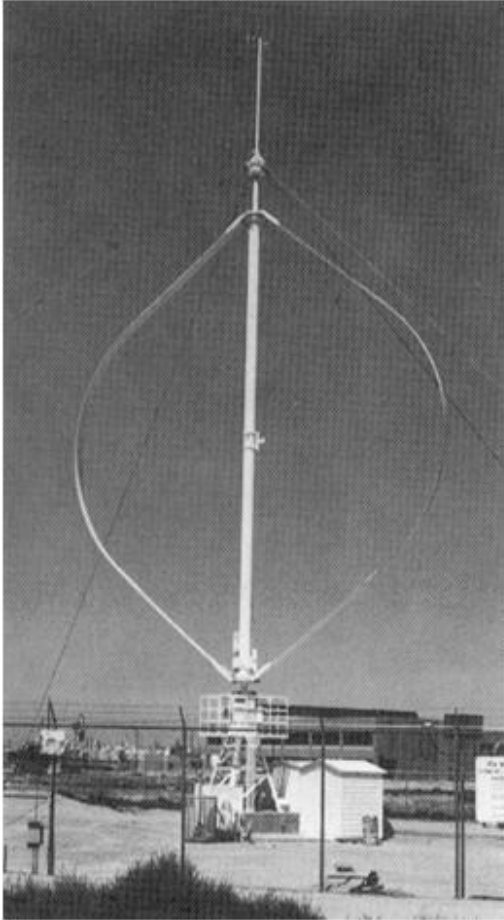


Εικόνα 1.3: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

β) Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.

Οι ανεμογεννήτριες αυτές περιλαμβάνουν έναν κατακόρυφο άξονα περιστροφής και έχουν συνήθως δύο ή τρία πτερύγια σχήματος C.

Σα βασικό αεροδυναμικό τους πλεονέκτημα θεωρείται ότι στρέφονται σε οποιαδήποτε κατεύθυνση και αν φυσάει ο άνεμος, χωρίς όμως να χρειάζονται ιδιαίτερο σύστημα προσανατολισμού. Ένα άλλο πρόσθετο πλεονέκτημα τους θεωρείται ότι το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια μπορούν να συνδεθούν με τον άξονα στο επίπεδο της γης και όχι στο ύψος του θαλαμίσκου των Α/Γ οριζοντίου άξονα. Τα χαρακτηριστικά αυτά απλοποιούν τη σχεδίαση της μηχανής αλλά παρά ταύτα η ροπή που παράγεται στη διάρκεια περιστροφής διαφέρει σημαντικά ακόμη και με σταθερή ταχύτητα του ανέμου, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένη καταπόνηση και κόπωση των υλικών.



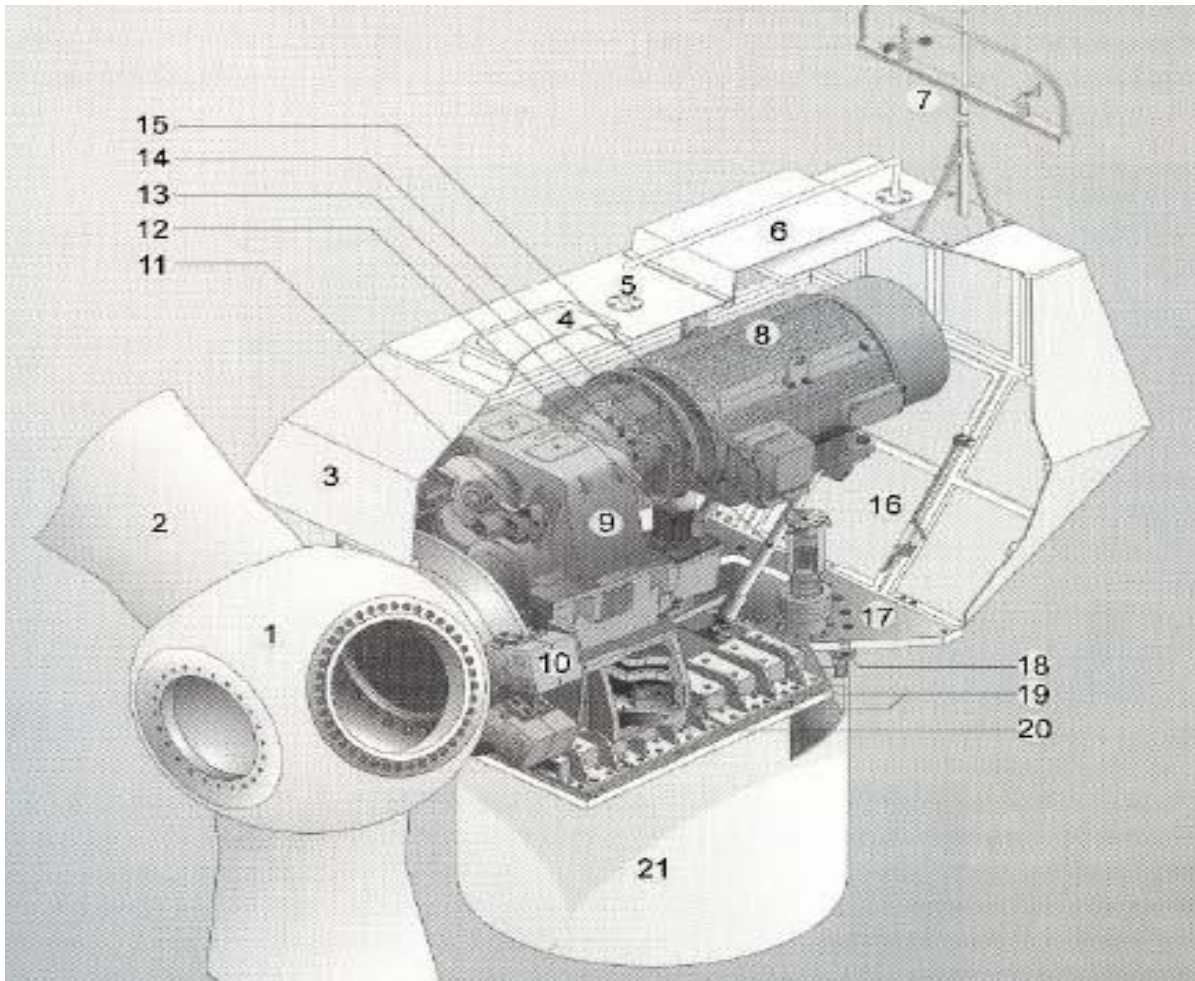
Εικόνα 1.4: Α/Γ Κατακόρυφου άξονα



Α/Γ Οριζοντίου άξονα (τύπου Η)

Παρόλο που δεν υφίσταται κανένας καθοριστικός λόγος, εκτός ίσως από την εμφάνιση, στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα σε ποσοστό 90%.

1.3.2 Υποσυστήματα ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα



- | | |
|---|---|
| 1. Πλήμνη δρομέα | 12. Υδραυλικά |
| 2. Πτερύγια δρομέα | 13. Ελαστικός σύνδεσμος |
| 3. Κάλυμμα ατράκτου | 14. Αναρτήσεις γεννήτριας |
| 4. Φωταγωγός | 15. Σύστημα προσανατολισμού |
| 5. Ράβδος ασφαλείας | 16. Θυρίδα επισκόπησης |
| 6. Εξαγωγή αέρα | 17. Εξέδρα |
| 7. Αλεξικέραυνο και μετρητής ταχύτητας ανέμου | 18. Στεφάνη ρουλεμάν συστήματος προσανατολισμού |
| 8. Γεννήτρια | 19. Φρένο συστήματος |
| 9. Κιβώτιο ταχυτήτων προσανατολισμού | 20. Αποζεύκτης θορύβου |
| 10. Δισκόφρενα δρομέα | 21. Πύργος |
| 11. Εφεδρικό φρένο | |

Εικόνα 1.5: Κύρια μέρη ατράκτου ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα

Τα κυριότερα μέρη μιας ανεμογεννήτριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο δρομέας με τα πτερύγια και η γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος. Η απλουστευμένη αυτή περιγραφή της συγκρότησης της ανεμογεννήτριας πρέπει βεβαίως να συμπληρωθεί με την αναφορά των υποσυστημάτων που συγκροτούν τη μηχανή αφού προκειμένου να κατασκευασθεί και να λειτουργήσει μία Α/Γ θα πρέπει ο δρομέας με τα πτερύγια να στηριχθεί με τρόπο που του

επιτρέπει να περιστρέφεται και να προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση του ανέμου, ο μικρός αριθμός των περιστροφών του ανά λεπτό να αυξηθεί ώστε να προσαρμοσθεί προς τις απαιτήσεις λειτουργίας της γεννήτριας, το όλο δε σύστημα να μπορεί να ξεκινά και να σταματάει με ασφάλεια είτε όταν οι ανεμολογικές συνθήκες υπερβαίνουν τα όρια σχεδιασμού του είτε όταν αυτό επιβάλλεται από λόγους λειτουργίας.

Τα κυριότερα μέρη είναι τα εξής:

α) Ο δρομέας. Αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια και την πλήμνη. Η πλήμνη είναι μία μεταλλική κατασκευή από χυτοσίδηρο ή χυτοχάλυβα, πάνω στην οποία στερεώνονται τα πτερύγια. Η πλήμνη των ανεμογεννητριών μεταβλητού βήματος φέρει στο εσωτερικό της διάταξη για την αλλαγή του βήματος των πτερυγίων.

Τα πτερύγια κατασκευάζονται συνήθως από ενισχυμένο πολυεστέρα με υαλοϋφασμα (GFRP, glass fiber reinforced polyester), λόγω του μικρού ειδικού βάρους και της αντοχής έναντι κοπώσεως. Εκτός του GFRP χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά όπως ίνες άνθρακα, ξύλο και αλουμίνιο.

β) Ο κύριος άξονας. Κατασκευάζεται από χάλυβα υψηλής αντοχής και μεταφέρει την ισχύ από το δρομέα στο κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών. Ο κύριος άξονας μπορεί να είναι συμπαγής ή κοίλος.

γ) Το κιβώτιο πολλαπλασιασμού των στροφών (ή πολλαπλασιαστής στροφών). Αυτό μεταφέρει την ισχύ από τον κύριο άξονα στην ηλεκτρογεννήτρια μέσω συστήματος οδοντωτών τροχών. Επειδή η ταχύτητα περιστροφής της ηλεκτρογεννήτριας είναι 1000-1500 rpm ενώ η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μικρότερη από 50 rpm η σχέση μετάδοσης του κιβωτίου είναι 20 έως 50.

δ) Το σύστημα προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας. Το σύστημα αυτό συνήθως διαθέτει αισθητήρα ανέμου και είναι απαραίτητο στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα για να διατηρείται το επίπεδο περιστροφής του δρομέα κάθετο προς τη διεύθυνση του ανέμου. Ο σωστός προσανατολισμός του δρομέα είναι ουσιώδης όχι μόνο για την αύξηση της ενεργειακής παραγωγής αλλά και για την αύξηση της ζωής των πτερυγίων. Σε μικρές Α/Γ η αλλαγή του προσανατολισμού γίνεται με ανεμοδείκτη. Η ρύθμιση της κλίσης των πτερυγίων στη βέλτιστη θέση (αν υπάρχει τέτοια δυνατότητα) μεγιστοποιεί την ενέργεια που παράγεται από την Α/Γ για κάθε ταχύτητα ανέμου. Αν υπάρχουν μετατροπείς ισχύος, η λειτουργία τους ελέγχεται από ξεχωριστό σύστημα ελέγχου.

ε) Η ηλεκτρική γεννήτρια. Συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας

Χρησιμοποιούνται δύο τύποι ανεμογεννητριών οι σύγχρονες και οι ασύγχρονες. Οι σύγχρονες ηλεκτρογεννήτριες στρέφονται με περίπου σταθερό αριθμό στροφών που καθορίζεται από τη συχνότητα του ρεύματος του ηλεκτρικού δικτύου το οποίο εξυπηρετούν. Οι γεννήτριες αυτές απαιτούν ακρίβεια στην τιμή της ταχύτητας περιστροφής προκειμένου να συγχρονισθούν στο δίκτυο.

Οι ασύγχρονες γεννήτριες στρέφονται με κάποιο αριθμό στροφών που είναι ελαφρά διαφορετικός από τον αριθμό στροφών που αντιστοιχεί στη συχνότητα του δικτύου. Η διαφορά αυτή είναι συνήθως αρνητική και κυμαίνεται μεταξύ 1-5%, προκαλεί δε κάποια διαφορά φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσεως.

στ) *Η μηχανική πέδη.* Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για την ακινητοποίηση του δρομέα κυρίως για λόγους προστασίας έναντι υπερτάχυνσης ή οποτεδήποτε είναι επιθυμητή η πέδηση της ανεμογεννήτριας. Συνήθως αποτελείται από δισκόφρενο.

ζ) *Η αεροδυναμική πέδη.* Αυτή χρησιμοποιείται μόνο στις ανεμογεννήτριες σταθερού βήματος (stall) ως πρόσθετο μέτρο ασφαλείας έναντι υπερτάχυνσης του δρομέα τους, σε περίπτωση που η μηχανική πέδη αποτύχει να λειτουργήσει. Τα αεροδυναμικά φρένα αποτελούν διατάξεις ενσωματωμένες στα πτερύγια, οι οποίες όταν ενεργοποιηθούν μεταβάλλουν το σχήμα των πτερυγίων κατά τρόπο που να προκαλεί αύξηση της αεροδυναμικής αντίστασης και συνεπώς μείωση της ταχύτητας περιστροφής τους.

η) *Το σύστημα εποπτικού ελέγχου.* Το σύστημα αυτό αποτελείται από ηλεκτρονικό εξοπλισμό (ηλεκτρονικό υπολογιστή, μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και ψηφιακού σήματος σε αναλογικό κτλ.) και ειδικό λογισμικό. Σκοπός του συστήματος εποπτικού ελέγχου είναι:

- Η παρακολούθηση της λειτουργικής κατάστασης της ανεμογεννήτριας (πχ. ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, θερμοκρασίες σε επιλεγμένα μέρη της μηχανής, φθορά των επιφανειών τριβής του συστήματος πέδησης, η παραγόμενη ενέργεια, το επίπεδο δονήσεων της ατράκτου, κτλ.)
- Η καταγραφή σφαλμάτων (υπερθέρμανσης, υπερέντασης, δονήσεων, κτλ.)
- Η καταγραφή στατιστικών στοιχείων από τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

θ) *Ο πύργος.* Στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο πύργος είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα.

ι) *Η θεμελίωση.* Το θεμέλιο μιας ανεμογεννήτριας κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Προτιμάται η κατασκευή άκαμπτων θεμελίων με τετραγωνικό ή δακτυλιώδες σχήμα. Για τη διαστασιολόγηση του θεμελίου συνήθως είναι κρίσιμοι οι έλεγχοι σε ευστάθεια. Για μεγάλες ανεμογεννήτριες έχει αποδειχθεί ότι το δακτυλιώδες 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. Αυτός είναι και ο κλασικός τύπος σύνδεσης που χρησιμοποιείται και σε άλλες παρόμοιες κατασκευές όπως οι καμινάδες. Οι κοχλίες αγκύρωσης στις ανεμογεννήτριες 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.
- 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 φλατζωτής σύνδεσης τύπου L με πλήρως προεντεταμένους κοχλίες υψηλής αντοχής (συνήθως 10.9).



Εικόνα 1.6: Μορφή θεμελίωσης με αγκύρια υψηλής αντοχής



Εικόνα 1.7: Μορφή θεμελίωσης με τοποθέτηση, εντός του σώματος του θεμελίου, κυλινδρικού σώματος αγκύρωσης. Εικόνα πριν τη σκυροδέτηση.

1.3.3 Πύργοι ανεμογεννητριών

Οι πύργοι των ανεμογεννητριών μπορούν να καταταγούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Δικτυωτοί πύργοι
- Σωληνωτοί πύργοι μορφής ελευθέρου προβόλου
- Πύργοι τύπου λεπτής κολώνας που στηρίζονται σε επίτονα

Ιστορικά, οι δικτυωτοί πύργοι χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980. Έκτοτε, πήραν σαφές προβάδισμα οι σωληνωτοί πύργοι μορφής ελευθέρου προβόλου.

Οι σωληνωτοί πύργοι είναι οι πιο συνηθισμένοι τύποι πύργων που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη μεγάλων ανεμογεννητριών. Αυτού του είδους οι πύργοι έχουν κωνικό σχήμα και η διάμετρος τους αυξάνει πλησιάζοντας στη βάση, προκειμένου να επιτευχθεί εξοικονόμηση υλικού και για να αυξηθεί η αντοχή τους. Προτιμώνται ακόμη και για αισθητικούς λόγους. Τέλος, σε περιπτώσεις που η θερμοκρασία πέφτει κάτω του μηδενός, οι σωληνωτοί πύργοι παρέχουν προστασία από τον άνεμο στη φάση συντήρησής τους.



Εικόνα 1.8: Σωληνωτοί πύργοι

Οι δικτυωτοί πύργοι κατασκευάζονται με συγκόλληση χαλύβδινων διατομών και το βασικό τους πλεονέκτημα είναι το χαμηλότερο κόστος τους καθώς απαιτείται η μισή ποσότητα υλικού σε σχέση με τους σωληνωτούς, προκειμένου να κατασκευασθεί ένας πύργος με την ίδια ακαμψία. Από την άλλη, μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι είναι δύσκολες οι εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης όταν επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες. Κυρίως όμως

αισθητικοί είναι οι λόγοι για τους οποίους δε χρησιμοποιούνται πλέον για την κατασκευή μοντέρνων και μεγάλων ανεμογεννητριών.

Τέλος, πολλές μικρές ανεμογεννήτριες στηρίζονται σε πύργους τύπου λεπτής κολώνας, η οποία όμως προσδένεται με συρματόσχοινα. Αυτού του τύπου οι πύργοι χρησιμοποιήθηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις και για τη στήριξη μεγάλων ανεμογεννητριών κατά τη δεκαετία του 80. Αυτοί έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα κόστους έναντι των άλλων τύπων δεδομένου ότι μπορούν να ανυψωθούν ή να χαμηλωθούν με τη βοήθεια μιας μηχανής ανύψωσης φορτίων, χωρίς την ανάγκη για γερανό. Επομένως, είναι δυνατή η συντήρηση του δρομέα και της ατράκτου στο έδαφος. Πάντως, απαιτούν μεγαλύτερο εμβαδό εδάφους λόγω της ανάγκης για αρκετά ευρεία εξάπλωση των επιτόνων, το οποίο μπορεί να αποτελεί μειονέκτημα εάν χρησιμοποιούνται μηχανές για καλλιέργειες γύρω από τις βάσεις των Α/Γ.



Εικόνα 1.9: Δικτυωτός πύργος



Εικόνα 1.10: Σωληνωτός πύργος που στηρίζεται σε επίτονα

1.3.4 Πύργοι ανεμογεννητριών από σύνθετα υλικά

Η αγορά της αιολικής ενέργειας, προσπαθώντας να επεκτείνει την εμβέλειά της, πιέζει για ανεμογεννήτριες μεγαλύτερου ύψους που θα εκμεταλλεύονται το ισχυρό αιολικό δυναμικό στα υψηλότερα υψόμετρα. Οι πύργοι πιθανόν να ξεπεράσουν το σημερινό πρότυπο ύψος των 80m για τουρμπίνες με ονομαστική ισχύ 3MW και να φτάσουν τα 100 με 150 μέτρα και τουρμπίνες από 5 έως 7MW, ειδικότερα σε υπεράκτια αιολικά πάρκα βαθέων υδάτων. Ως αποτέλεσμα, η χρησιμότητα των παραδοσιακών πύργων από χάλυβα ωθείται στα όρια της.

Πολλοί βλέπουν σε αυτό την ευκαιρία τα σύνθετα υλικά να αποτελέσουν μία ανταγωνιστική λύση. Ήδη, τα σύνθετα υλικά βρίσκουν όλο και περισσότερες εφαρμογές στις νασέλλες ανεμογεννητριών, στις καμπίνες και στα πτερύγια. Η βιομηχανία εκτιμά μάλιστα ότι πάνω από 80.000 τόνοι απαιτούνται ετησίως μόνο για λεπίδες πτερυγίων. Ωστόσο, η τεχνολογία των σύνθετων υλικών διαθέτει το δυναμικό να χρησιμοποιηθεί και στην κατασκευή του πύργου, μειώνοντας το συνολικό του βάρος και οδηγώντας έτσι σε σημαντική εξοικονόμηση στο κόστος ανέγερσης και στον τομέα των μεταφορών. Επιτρέπει, δηλαδή, την κατασκευή ελαφρότερου και πιο ανθεκτικού πύργου ανεμογεννήτριας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πιο απομακρυσμένες περιοχές -όπου τα προβλήματα μεταφοράς και ανέγερσης καθιστούν τη χρήση βαρέως εξοπλισμού δύσκολη- καθώς και σε υπεράκτιες περιοχές όπου η διάβρωση είναι μείζον πρόβλημα.

Πολλές ευρεσιτεχνίες έχουν κατατεθεί συμπεριλαμβανομένων δύο από την General Electric (Shenectady, Νέα Υόρκη) και μία από το πανεπιστήμιο της Manitoba (Winnipeg, Καναδάς).

1.3.5 Πειραματική διερεύνηση σωληνωτών FRP κατασκευών

Κατά τη διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας, υπήρξαν αρκετοί ερευνητές οι οποίοι διεξήγαγαν έρευνα σχετικά με τη συμπεριφορά των σωληνωτών FRP κατασκευών.

Οι McClure κ.α (1992) [16] διεξήγαγαν μία μελέτη για τους στύλους καθώς και ένα ερευνητικό πρόγραμμα στο Centre de Recherche du Reseau Exterieur του Μόντρεαλ. Τα δείγματα ήταν κοίλα και κωνικά και κατασκευασμένα με φυγόκεντρο χύτευση. Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν ότι οι GFRP στύλοι αντιστέκονται με ασφάλεια σε φορτίσεις συγκρίσιμες με αυτές των ξύλινων στύλων κάτω από τις ίδιες συνθήκες ενώ η συμπεριφορά τους αποδείχθηκε ελαστική. Αυτοί οι GFPP στύλοι δεν υπέστησαν μόνιμες παραμορφώσεις ακόμα και στην περίπτωση ισχυρής κάμψης.

Ο Lin (1995) [17] διερεύνησε τη συμπεριφορά σωλήνων από ινοπλισμένα πολυμερή υπό συνθήκες προβόλου, Το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας ήταν θεωρητικό. Τέσσερα δείγματα υποβλήθηκαν σε έλεγχο μέχρι να αστοχήσουν. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν και πάλι γραμμική σχέση μεταξύ φορτίου και παραμόρφωσης.

Έρευνα για σύνθετους στύλους διεξάγεται στο University of Manitoba, Canada, από το 1994. Ο Ibrahim (2000) [18] μελέτη την απόδοση πλαστικών στύλων ενισχυμένων με ίνες γυαλιού (GFRP) στις ίνες επικοινωνίας. Συνολικά 12 GFRP στύλοι των 2.50m και 12 GFRP στύλοι των 6.00m εξετάστηκαν υπό την επίδραση πλευρικής φόρτισης. Οι στύλοι αυτοί σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με τη διαδικασία της περιέλιξης από ερευνητές του πανεπιστημίου. Οι παράμετροι της δοκιμής περιελάμβαναν προσανατολισμένες ίνες και αριθμό στρωμάτων της επικάλυψης. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι GFRP στύλοι μπορούν να αντέξουν φορτία ίσα με αυτά των ξύλινων, των χαλύβδινων στύλων καθώς και των

στύλων από σκυρόδεμα. Η αστοχία λόγω τοπικού λυγισμού ήταν η κυρίαρχη μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε στα δείγματα που εξετάστηκαν. Ο Ibrahim επίσης ανέπτυξε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ANSYS για να προβλέψει τη συμπεριφορά των στύλων από ινοπλισμένα πολυμερή και τα αριθμητικά αποτελέσματα μπορούν να συγκριθούν με τα πειραματικά. Επίσης, διερεύνησε την επίδραση του προσανατολισμού των ινών στους στύλους από ινοπλισμένα πολυμερή.

Ο Φιλόπουλος (2002) [19] στην έρευνα του υπέβαλλε τέσσερις ενωμένους GFRP στύλους σε κάμψη. Τα περισσότερα δείγματα αστόχησαν σε τοπικό λυγισμό κοντά στη βάση. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν πως σε περίπτωση μικρού μήκους συναρμογής μπορεί να υπάρξει αστοχία στη θέση αυτή. Προτείνεται λοιπόν ως ελάχιστη τιμή του μήκους συναρμογής το 1/10 του μήκους του συνδεδεμένου τμήματος.

Τέλος, το 2002 η εταιρεία Wind Tower Systems (Park City, Utah) διεξήγαγε ένα πολυετές ερευνητικό πρόγραμμα υπό την αιγίδα του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ για την εμπορευματοποίηση ενός ελαφρύτερου και ψηλότερου πύργου ανεμογεννήτριας που θα μπορεί να υποστηρίξει τουρμπίνες πολλών MW. Η εταιρεία, έκτοτε γνωστή ως 'Wind Tower Composites' ανέπτυξε και δοκίμασε ένα πύργο 80m με τουρμπίνα ονομαστικής ισχύος 1.5MW. Κατασκευασμένος από σύνθετο υλικό με ινοπλισμό άνθρακα (carbon fiber-reinforced polymer tubes), ο πύργος μείωσε το συνολικό βάρος της κατασκευής κατά 20% και το συνολικό κόστος κατά 25% συγκριτικά με ένα χαλύβδινο πύργο. Ωστόσο, το ερευνητικό πρόγραμμα τελείωσε το 2005 χωρίς εμπορικό προϊόν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - Χαρακτηριστικά ανέμου

2.1 Εισαγωγή

Ο άνεμος αποτελεί την κυρίαρχη φόρτιση στις ανεμογεννήτριες. Κύριο γνώρισμα του ανέμου είναι τα εντόνως στοχαστικά χαρακτηριστικά του. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε σύνθετη τοπογραφία, με το ύψος και με το χρόνο. Τέλος περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της τύρβης του ανέμου.

2.2 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος

Οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών του ανέμου συνήθως γίνονται σε ύψος 10 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους. Υπάρχει όμως μία σημαντική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου καθώς αυξάνει το ύψος πάνω από το έδαφος, διότι οι αέριες μάζες που περιβάλλουν τη γη επιβραδύνονται από την τραχύτητα στην επιφάνεια της γης.

Το πρόβλημα της έκφρασης με κάποιο νόμο, εκθετικό ή λογαριθμικό, της κατακόρυφης μεταβολής του μέτρου της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου είναι θέμα αρκετών μελετών.

Η έκφραση που χρησιμοποιείται από τον εκθετικό νόμο για τη μεταβολή της ταχύτητας με το ύψος είναι:

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^n \quad (2.1)$$

όπου v_1, v_2 οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας στα ύψη z_1, z_2 , αντίστοιχα

και n ο δείκτης τραχύτητας εδάφους που παίρνει τιμές από 0.1 έως 0.4.

Η έκφραση που χρησιμοποιείται από το λογαριθμικό νόμο για τη μεταβολή της ταχύτητας με το ύψος είναι:

$$\frac{v}{v^*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.2)$$

όπου v η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας σε ύψος z .

$v^* = (\tau / \rho)^{\frac{1}{2}}$ η ταχύτητα τριβής (friction velocity) που εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα και την επιφανειακή τάση Reynolds.

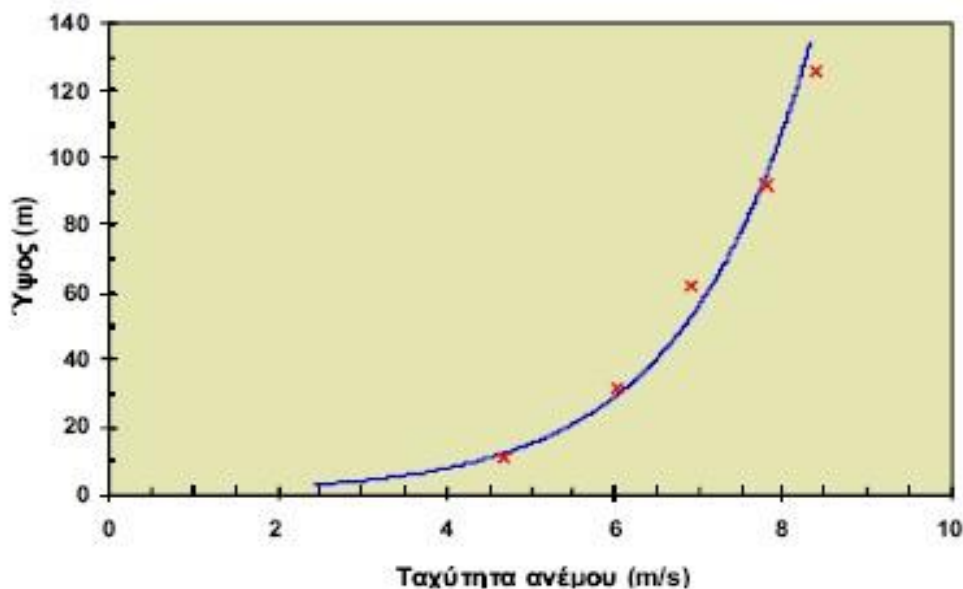
$k=0.4$ είναι η σταθερά του Karman (σταθερά αναλογίας)

τ : η διατμητική τάση στην επιφάνεια του εδάφους

ρ : η πυκνότητα του αέρα

z_0 : παράμετρος τραχύτητας ή μήκος τραχύτητας. Οι ενδεικτικές τιμές του z_0 για διάφορα είδη εδάφους δίνονται στον πίνακα 2.1.

Η τραχύτητα του εδάφους επιδρά στη διάτμηση του ανέμου καθορίζοντας το πόσο επιβραδύνεται ο άνεμος κοντά στο έδαφος. Σε περιοχές με υψηλό βαθμό τραχύτητας, όπως τα δάση ή οι πόλεις, οι ταχύτητες του ανέμου κοντά στην επιφάνεια τείνουν να είναι μικρές και η διάτμηση του ανέμου μεγάλη, ενώ το αντίστροφο ισχύει σε περιοχές με μικρή τραχύτητα, όπως είναι οι επίπεδοι, ανοικτοί αγροί. Η διάτμηση του ανέμου μπορεί να ελαττωθεί πολύ ή να εξαλειφθεί όπου υπάρχει μία απότομη αλλαγή στο ύψος του πεδίου, όπως μία απότομη ακρογιαλιά ή κορυφογραμμή. Στο σχήμα παρουσιάζεται μία πιθανή μορφή του οριακού στρώματος του ανέμου.



Σχήμα 2.1: Κατακόρυφο προφίλ ανέμου

Ο εκθετικός νόμος εφαρμόζεται σε μεγάλο πλήθος μετρήσεων και εμφανίζει καλή ακρίβεια σε περιπτώσεις που η διαφορά ύψους είναι περισσότερο από 30-50m. Η ακρίβεια όμως ελαττώνεται πολύ για μεγάλες διαφορές υψών.

2.3 Μεταβολή ταχύτητας του ανέμου σε σύνθετη τοπογραφία

Σε μία σύνθετη τοπογραφία, η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά μεταξύ κοντινών περιοχών. Έτσι έχουμε τη δυνατότητα να μεγιστοποιήσουμε την απόδοση μιας μηχανής ή ενός αιολικού πάρκου, από την άλλη όμως υπάρχει κίνδυνος αποτυχίας ολόκληρης της επένδυσης αν δεν γίνει προσεκτική επιλογή της θέσης. Ο θεωρητικός υπολογισμός των επιδράσεων της ανώμαλης τοπογραφίας στην ταχύτητα του ανέμου είναι ιδιαίτερα δύσκολος και γίνεται μόνο με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αποδεκτά για περιπτώσεις τοπογραφίας με μικρές κλίσεις, ενώ για απότομες κλίσεις δεν υπάρχει ακόμα αξιόπιστο μοντέλο.

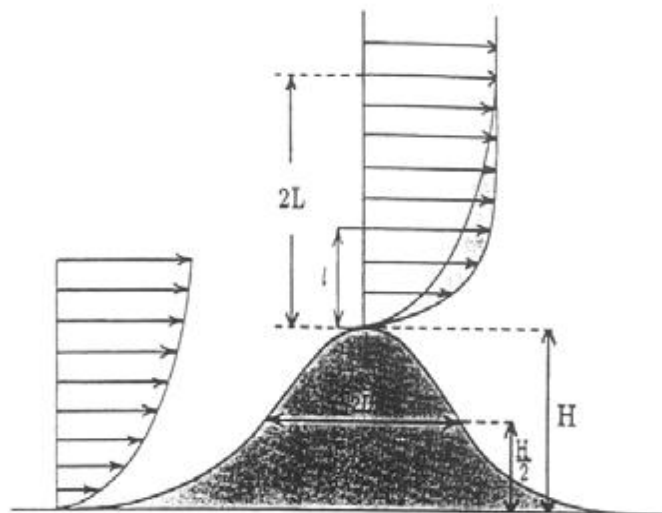
Παρά τη δυσκολία που υπάρχει στον υπολογισμό του ανέμου σε ανώμαλη τοπογραφία, σε απλούστερες περιπτώσεις υπάρχουν εμπειρικοί κανόνες που μπορούν να εφαρμοστούν και να δώσουν ποιοτικές και ποσοτικές εκτιμήσεις. Σε μια λοφοσειρά (Σχήμα 2.2), ο άνεμος που τη συναντάει, επιταχύνεται στην κορυφή και επιβραδύνεται στους πρόποδες.

Έστω H το ύψος του λόφου και L 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, ενώ z_0 είναι το ύψος τραχύτητας που εξαρτάται από τη μορφή της επιφάνειας του εδάφους.



Σχήμα 2.2: Προφίλ ταχύτητας

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):

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

2.4 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο

Ως χαρακτηριστικό για το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής θεωρείται η μέση ταχύτητα του ανέμου. Όμως, η γνώση αυτής δεν αποτελεί από μόνη της κριτήριο για την εκτίμηση της αιολικής ενέργειας που μπορεί να προσφέρει μία περιοχή. Απαιτείται επιπλέον πληροφόρηση σχετικά με τη συχνότητα της κάθε ταχύτητας ανέμου.

Η στατιστική κατανομή της ετήσιας ταχύτητας ανέμου μπορεί να προκύψει από ανεμολογικά δεδομένα μετρούμενα σε ένα καθορισμένο ύψος (10 μέτρα συνήθως). Κατά τη διαδικασία αυτή συνηθίζεται η χρήση μέσων τιμών δεκαλέπτων, τα οποία αξιολογούνται σε διάστημα ενός έτους, ώστε να προκύψει η ετήσια μέση ταχύτητα του ανέμου και η ετήσια σχετική κατανομή του.

Συγκεκριμένα, η U_{10} αποτελεί την κύρια μεταβλητή με την οποία περιγράφουμε τη μεταβολή του ανέμου με το χρόνο, σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς και Αμερικάνικους κανονισμούς. Έχει ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 0.02, (γεγονός που ισοδυναμεί με μια μέση περίοδο επαναφοράς 50 ετών), ανεξάρτητα από τη διεύθυνση του ανέμου, σε ύψος 10 m πάνω από επίπεδη ανοιχτή περιοχή εδάφους και λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του υψομέτρου (εάν απαιτείται).

Ωστόσο, για να προκύψουν αξιόπιστα στατιστικά αποτελέσματα, χρειάζονται δεδομένα τουλάχιστον μερικών ετών, μέχρι δέκα σύμφωνα με τη μετεωρολογική επιστήμη. Η στατιστική κατανομή της συχνότητας της ταχύτητας του ανέμου συνηθίζεται να μετράται ως συνάρτηση πυκνότητας-πιθανότητας.

Εξαιτίας των ελλειπών ιστορικών δεδομένων για την ταχύτητα ανέμου στις περισσότερες περιοχές, χρησιμοποιείται η μαθηματική συνάρτηση Weibull (σχήμα 2.3), για να χαρακτηρίσει το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής, η οποία προσεγγίζει σε πολύ καλό βαθμό την κατανομή του ανέμου.

Η κατανομή Weibull $P(v)dv$ εκφράζει την πιθανότητα να φυσάει άνεμος στην περιοχή ταχύτητας μεταξύ $v+dv/2$ και $v-dv/2$ (Σχήμα). Κάθε κατανομή έχει μία συγκεκριμένη παράμετρο σχήματος k όπου $1 < k < 3$ και μία παράμετρο μεγέθυνσης c , η οποία είναι συνάρτηση του ύψους και της περιοχής.

Στον Ελλαδικό χώρο συνήθως λαμβάνονται τιμές μεταξύ 1.5 και 2.0. Συχνά (όταν είναι γνωστή μόνο η μέση ταχύτητα του ανέμου) κι επειδή είναι δύσκολος ο προσδιορισμός της παραμέτρου σχήματος, λαμβάνεται η τιμή $k=2$ και τότε η κατανομή Weibull ονομάζεται κατανομή Rayleigh.

Για να σχεδιαστεί μία καμπύλη Weibull θα πρέπει να βρεθεί η πιθανότητα για κάθε ταχύτητα από 0 m/s μέχρι 24 m/s, χωρίζοντας τις ταχύτητες σε κλάσεις εύρους 1 m/s. Όταν μετρηθούν όλες οι ταχύτητες σε μία συγκεκριμένη περιοχή για ένα χρόνο, τότε μπορεί να παρατηρηθεί στις περισσότερες περιπτώσεις ότι πολύ ισχυροί άνεμοι είναι σπανιότερο να εμφανιστούν από ότι οι μέτριοι ή ασθενείς άνεμοι, όπως επίσης σπάνιο είναι να επικρατεί πλήρης άπνοια. Έτσι λοιπόν, η πιθανότητα να επικρατούν άνεμοι μηδενικής έντασης είναι πολύ κοντά στο μηδέν όπως επίσης η πιθανότητα να επικρατούν άνεμοι πολύ ισχυροί είναι επίσης πολύ μικρή.

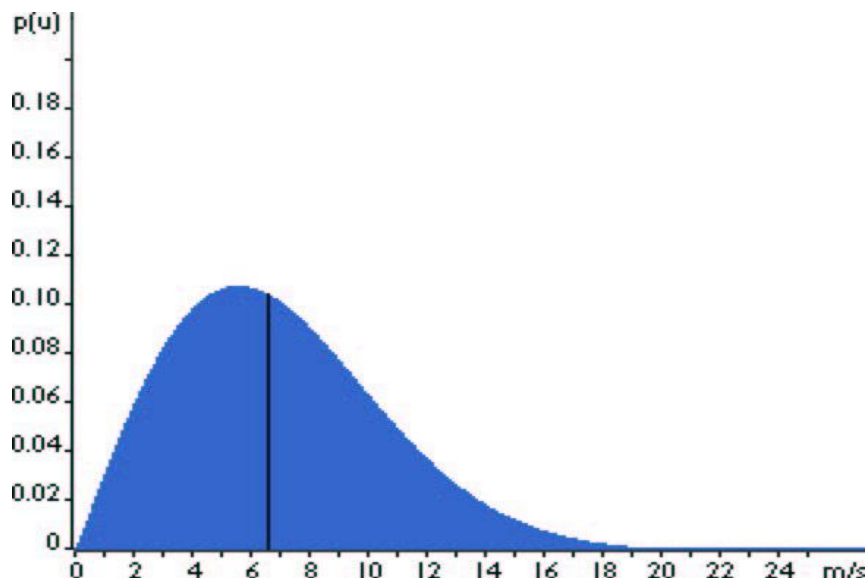
Η μαθηματική έκφραση της κατανομής Weibull είναι:

$$P(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{c} \right)^k} \quad (2.6)$$

Οι παράμετροι k και c της κατανομής Weibull υπολογίζονται προσεγγιστικά από τις σχέσεις:

$$c = \frac{2\bar{u}}{\sqrt{\pi}} \quad (2.7)$$

$$k = \frac{\sqrt{\pi} 3c^3}{2\bar{U}^3} \quad (2.8)$$



Σχήμα 2.3: Κατανομή Weibull

Η μορφή της κατανομής διαφέρει από τόπο σε τόπο και εξαρτάται από τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, το ανάγλυφο του εδάφους και άλλους γεωγραφικούς παράγοντες.

2.5 Τύρβη ανέμου

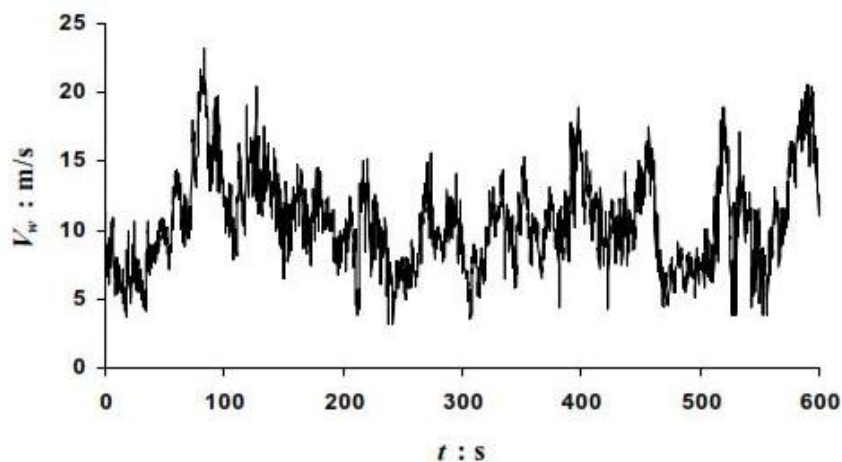
Όπως προαναφέρθηκε, η ταχύτητα του ανέμου συνηθίζεται να μετράται σε μέσες τιμές 10λέπτου. Οι στιγμιαίες τιμές του ανέμου, από τις οποίες προκύπτει η μέση τιμή, θεωρούνται ως το άθροισμα της μέσης τιμής συν την απόκλιση τους από αυτή τη μέση τιμή, τη λεγόμενη τυρβώδη συνιστώσα. Η τύρβη, λοιπόν αποτελεί τη διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου γύρω από τη μέση τιμή της. Είναι έντονη σε περιπτώσεις ξαφνικών ριπών ανέμου και ακραίων καιρικών φαινομένων. Εξαρτάται από τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου κατά κύριο λόγο, από το μήκος τραχύτητας μιας περιοχής, την ατμοσφαιρική σταθερότητα αλλά και τα επιμέρους τοπογραφικά χαρακτηριστικά.

$$V_w(t) = \overline{V_w} + v(t) \quad (2.9)$$

όπου $V_w(t)$ η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου

$\overline{V_w}$ η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου

$v(t)$ η στιγμιαία τύρβη



Σχήμα 2.4: Χρονοϊστορία ταχύτητας ανέμου

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι παρόλο που θεωρούμε ένα χρονικό διάστημα δέκα λεπτών κατά το οποίο όλες οι παράμετροι που καθορίζουν το πεδίο του ανέμου δεχόμαστε ότι είναι σταθερές, στην πραγματικότητα το πεδίο του ανέμου χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβλητότητα ως προς το μέτρο της ταχύτητας αλλά και τη διεύθυνση του ανέμου. Για το λόγο αυτό πολλές φορές χρησιμοποιούμε χρονοϊστορίες της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου, οι οποίες αποδίδουν σαφώς με περισσότερη ακρίβεια την πραγματική φύση του πεδίου.

Ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μαθηματικά την τύρβη λέγεται ένταση ή διασπορά τύρβης κι εξαρτάται από τη μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου κι από τη διασπορά

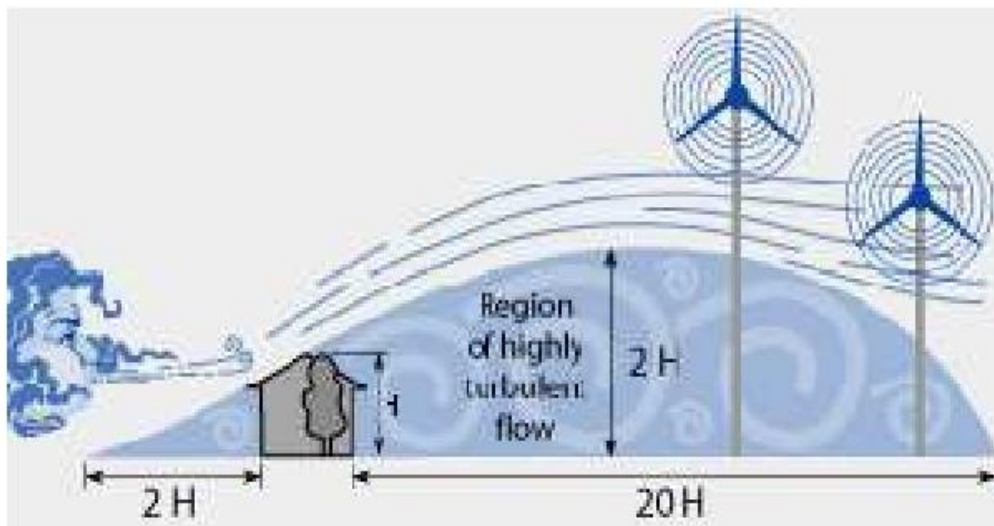
αυτής, ενώ παίρνει τιμές 5-20%. Για το σχεδιασμό των Α/Γ οι συνήθεις τιμές που λαμβάνονται είναι 16-18%.

$$I = \frac{\sigma_v}{v_w} = \frac{1}{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)} \quad (2.10)$$

όπου, σ_v η διασπορά της ταχύτητας του ανέμου από τη μέση τιμή στο διάστημα που υπολογίζεται η μέση τιμή και δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_v = \frac{\overline{v_w}}{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)} \quad (2.11)$$

και H το ύψος μέτρησης της ταχύτητας ανέμου.



Σχήμα 2.5: Μέγεθος τυρβώδους ανέμου μετά από πρόσκρουση σε εμπόδιο

Πρέπει ακόμη να τονισθεί ότι η παρουσία της τύρβης επηρεάζει σημαντικά την επιλογή της σωστής τοποθεσίας για την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για χαμηλά ύψη και μικρής ισχύος ανεμογεννήτριες. Πρακτικά η τύρβη επηρεάζεται από την τραχύτητα του εδάφους αλλά και την παρουσία εμποδίων. Ως εμπόδιο, μπορεί να θεωρηθεί οτιδήποτε έχει σημαντικό ύψος σε σχέση με το ύψος μέτρησης του ανέμου, άρα και της τυρβώδους συνιστώσας του. Συνήθως, δέντρα και πυκνοί θάμνοι θεωρούνται εμπόδια όταν μελετάται η εγκατάσταση στην ύπαιθρο, ενώ οικίες και ψηλοί φράκτες για περιπτώσεις εγκατάστασης σε κατοικημένες περιοχές. Το ίχνος του ανέμου (wake), που δημιουργείται όταν ο άνεμος διαπερνά αυτά τα εμπόδια, παρουσιάζεται εξασθενημένο και αναταραγμένο, προκαλώντας ένα ρεύμα ανέμου που μόνο αρνητικές συνέπειες έχει για την παραγωγή μιας ανεμογεννήτριας αλλά και για την αντοχή της. Έτσι θα πρέπει να αποφεύγεται η εγκατάσταση ιδιαίτερα μικρών Α/Γ σε απόσταση μικρότερη των 20 μέτρων από ένα σημαντικό ύψους εμπόδιο, αλλά θα πρέπει να τοποθετούνται σε μεγαλύτερη απόσταση και

μάλιστα σε ύψος όπου το χαμηλότερο σημείο της φτερωτής να απέχει από το έδαφος 3 φορές τουλάχιστον το ύψος του εμποδίου (Σχήμα 4.5)

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι κατά τον υπολογισμό των παρακάτω φορτίων, έχουν ληφθεί υπόψη χρονοϊστορίες, η περιβάλλουσα των οποίων δίνει τα φορτία ακραίας λειτουργίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πύργων που πρόκειται να συγκριθούν καθώς και οι ιδιότητες των υλικών τους. Όσον αφορά στον πύργο από σύνθετα υλικά, επεξηγείται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθείται προκειμένου να προσδιοριστούν οι μηχανικές σταθερές του υλικού.

3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πύργου

Ο πύργος ανεμογεννήτριας που εξετάζεται στην παρούσα εργασία έχει κυλινδρική μορφή. Το συνολικό του ύψος είναι 50m και η εξωτερική διάμετρος αρχίζει από 3.50m στη βάση και καταλήγει στα 2.50m στην κορυφή. Ενδέχεται να στηρίζεται μία τουρμπίνα ονομαστικής ισχύος 750kW (NM48/750), της οποίας τα τεχνικά χαρακτηριστικά δίνονται αναλυτικά στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά τουρμπίνας

Παράμετρος	Τιμή
Ονομαστική ισχύς (kW)	750
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (m/s)	16
Ταχύτητα ανέμου έναρξης περιστροφής (m/s)	4
Ταχύτητα ανέμου λήξης περιστροφής (m/s)	25
Ταχύτητα ρότορα (rpm)	22
Διάμετρος ρότορα (m)	48,2
Επιφάνεια σάρωσης ρότορα (m^2)	1.824
Αριθμός λεπίδων	3
Ύψος πλήμνης (m)	50

Δίνεται ακόμη η κατανομή της μάζας των τμημάτων από τα οποία αυτή απαρτίζεται στον πίνακα 3.2 και προέρχονται από στοιχεία της εταιρίας NEG Micon (2002).

Πίνακας 3.2. Κατανομή μάζας μελών τουρμπίνας

Μέλος	Μάζα (kg)	Κέντρο βαρύτητας (m)
Πτερύγια	3*3.466	7,85 (από το κέντρο του ρότορα)
Πλήμνη	2.997	-
Ολικός ρότορας	13.395	2,237 (άνω του κέντρου του πύργου)
Πλαίσιο μηχανής	4.850	0,75 (κάτω του κέντρου του πύργου)
Κιβώτιο ταχυτήτων	4.670	1,04
Γεννήτρια	3.450	3,50
Κύριος άξονας	2.015	-1,00
Κάλυμμα- Κέλυφος	600	1,50
Κατευθυντήριο σύστημα	562	0,00
Φρένο	2.815	-
Ολική άτρακτος	18.962	1,125

Θεωρούμε ότι ο πύργος πρόκειται να κατασκευαστεί σε περιοχή που απέχει λιγότερο από 10km από την ακτή, στοιχείο βασικό για τον υπολογισμό των φορτίων του ανέμου που θα περιγραφεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Προχωρήσαμε λοιπόν στο σχεδιασμό δύο πύργων με παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά αλλά από διαφορετικά υλικά. Συγκεκριμένα, ο πρώτος πύργος είναι κατασκευασμένος από χάλυβα S355 και ο δεύτερος από σύνθετο υλικό Graphite/Epoxy. Οι ιδιότητες των δύο υλικών δίνονται στη συνέχεια.

3.3 Ιδιότητες Υλικών

Στην περίπτωση του πύργου από χάλυβα, χρησιμοποιήθηκε κατασκευαστικός χάλυβας υψηλής αντοχής S355 με τις εξής μηχανικές ιδιότητες: $f_y=355\text{MPa}$, $f_u=510\text{MPa}$, $E=210\text{GPa}$, $\nu=0.3$ και $\rho=7850\text{kg/m}^3$.

Στην περίπτωση τώρα του πύργου από σύνθετα υλικά, προκειμένου να προσδιορίσουμε τις ιδιότητές του, που θα εισάγουμε στη συνέχεια στο πρόγραμμα, βασιστήκαμε στα πειραματικά αποτελέσματα της διδακτορικής διατριβής που είχε διεξαχθεί στο πανεπιστήμιο της Manitoba ('Development of wind turbine towers using fiber reinforced polymers' by Nibong Ungkurapinan, Department of Civil Engineering, University of Manitoba, July 2005) [22]. Σε μία από τις φάσεις της συγκεκριμένης εργασίας κατασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν 50 'κουπόνια' του σύνθετου υλικού προκειμένου να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητές του. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θεωρήθηκε σταθερός λόγος ινών ίσος με $\nu_f=0.70$ και τελικώς οι ιδιότητες του υλικού παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Ιδιότητες σύνθετου υλικού

Ιδιότητες	FRP (Graphite/Epoxy)
ν_f	0.70
Πυκνότητα (g/cm^3)	1.60
E_1 (GPa)	181
E_2 (GPa)	10.3
G_{12} (GPa)	7.17
ν_{12}	0.28
F_1^{tu} (MPa)	1500
F_1^{cu} (MPa)	1500
F_2^{tu} (MPa)	40
F_2^{cu} (MPa)	246
F^{su} (MPa)	68

Ο πύργος από σύνθετα υλικά θα αποτελείται από 10 στρώσεις πάχους 3mm η καθεμία και θα εξεταστούν δύο περιπτώσεις διαστρωμάτωσης με κώδικες αλληλουχίας $[(+10/-10)_5]_T$ και $[(+30/-30)_5]_T$

Ο δείκτης 1 στον παραπάνω πίνακα δηλώνει την παράλληλη διεύθυνση προς τις ίνες διεύθυνση (κύρια διεύθυνση), ενώ ο δείκτης 2 την εγκάρσια προς τις ίνες διεύθυνση. Τα E_1 και E_2 είναι τα μέτρα ελαστικότητας στη διεύθυνση των ινών και κάθετα σε αυτές αντίστοιχα, η παράμετρος G_{12} είναι το μέτρο διάτμησης, τα F_1^{tu} και F_1^{cu} είναι η τάση αντοχής σε εφέλκυσμό και θλίψη κατά τη διεύθυνση των ινών, τα F_2^{tu} και F_2^{cu} είναι η τάση αντοχής σε εφέλκυσμό και θλίψη αντίστοιχα κάθετα στη διεύθυνση των ινών και τέλος η τιμή F^{su} είναι η τάση αντοχής σε διάτμηση του υλικού.

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι μηχανικές σταθερές E_x , E_y , G_{xy} , ν_{xy} και ν_{yx} στο σύστημα συντεταγμένων x-y θα πρέπει να δημιουργηθεί το μητρώο μετασχηματισμού.

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία προσδιορισμού των μηχανικών σταθερών.

3.3.1 Επίπεδη εντατική κατάσταση

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:

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

Οι ανεξάρτητες σταθερές είναι πλέον τέσσερις, δηλ. E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12} και ισχύει:

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

Αντιστρέφοντας τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων (3.2) για τη γενική περίπτωση ορθότροπου υλικού έχουμε:

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

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

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

έχουμε τη σχέση (3.4) υπό την ακόλουθη συμβολική μορφή:

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

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

Για το σύνθετο υλικό Graphite/Epoxy του πύργου έχουμε:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{181}{1-0.28 \cdot 0.02} = 181.81, & Q_{22} &= \frac{10.30}{1-0.28 \cdot 0.02} = 10.35, \\ Q_{12} &= \frac{0.02 \cdot 181}{1-0.28 \cdot 0.02} = 2.90, & Q_{66} &= 7.17 \end{aligned}$$

Χρησιμοποιώντας τους όρους ευκαμψίας S_{ij} , η εξίσωση (3.2) γράφεται:

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

όπου:

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

$$S_{12} = S_{21} = -\nu_{12}/E_1 = -\nu_{21}/E_2 \quad (3.8)$$

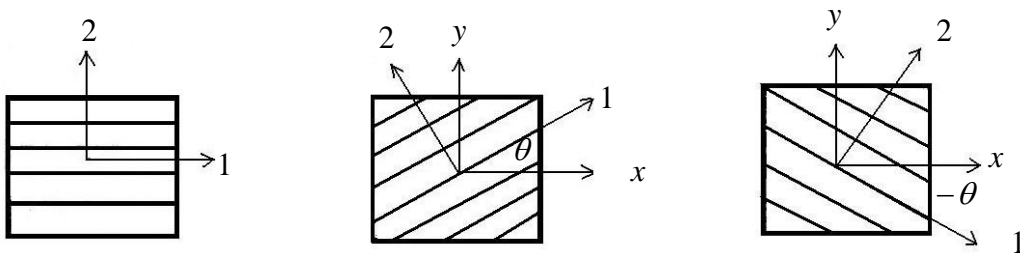
$$S_{66} = 1/G_{12}$$

Οπότε

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

Εξαιρέσει ορισμένων περιπτώσεων όπου απαιτείται η χρήση τρισδιάστατης θεώρησης (3D), τα σύνθετα υλικά αντιμετωπίζονται συνήθως σα 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).

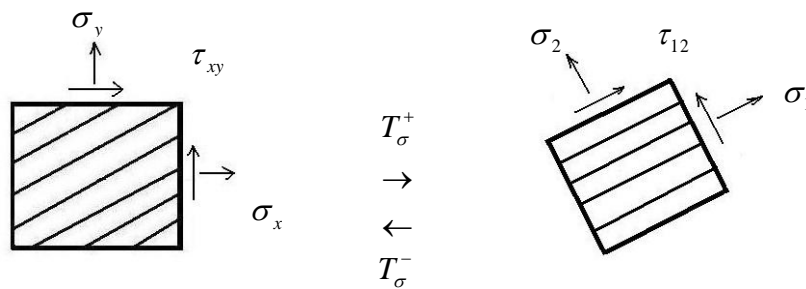
Γνωρίζοντας τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων στο σύστημα υλικού 1-2 το οποίο αντιστοιχεί στη διεύθυνση των ινών και την κάθετό της, θέλουμε να προσδιορίσουμε την ανάλογη σχέση σε ένα άλλο σύστημα x-y στραμμένο υπό γωνία θ ως προς το σύστημα 1-2. Το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός των σχέσεων μετασχηματισμού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



Σχήμα 3.1: 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.

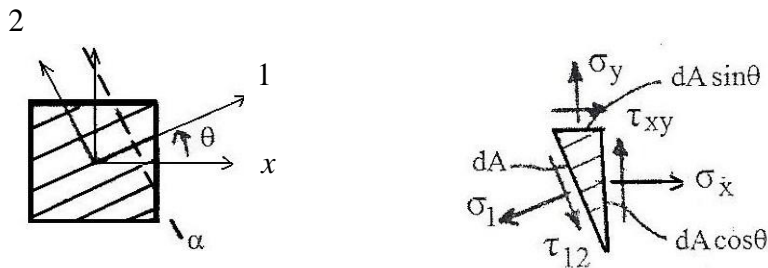
3.3.2 Μετασχηματισμός μητρώου τάσεων



Σχήμα 3.2: Μετασχηματισμός τάσεων

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

Κάνουμε μία 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 3.3: 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:

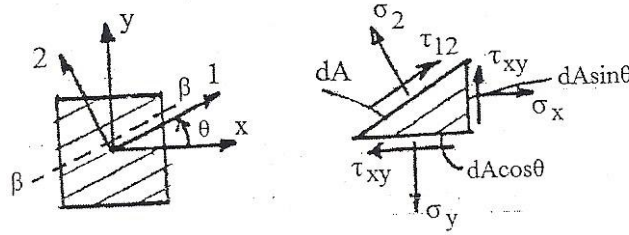
$$s\sigma_y + c\tau_{xy} = s\sigma_1 - c\tau_{12} \quad (3.10)$$

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 3.4: 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 γραφούν ως ακολούθως:

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

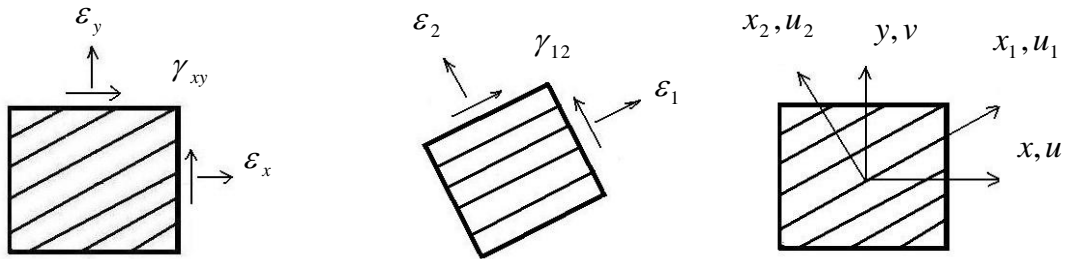
όπου $[T_\sigma^+]$ είναι το μητρώο μετασχηματισμού των τάσεων $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ από το στραμμένο σύστημα x-y στο σύστημα υλικού 1-2. Έτσι προσδιορίζονται οι τάσεις σ_1, σ_2 και τ_{12} (η γωνία στροφής θ είναι θετικά ορισμένη).

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:

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

3.3.3 Μετασχηματισμός μητρώου παραμορφώσεων



Σχήμα 3.5: Μετασχηματισμός παραμορφώσεων

Οι παραμορφώσεις ορίζονται βάσει των μετατοπίσεων ως ακολούθως:

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

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

Για τα συστήματα συντεταγμένων ισχύει:

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

$$x_2 = -x \sin \theta + y \cos \theta = -sx + cy \quad (3.21)$$

και αντιστρόφως:

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

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

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:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = \frac{\partial u_1}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{\partial(cu + sv)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_1} + \frac{\partial(cu + sv)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x_1} =$$

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

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

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

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

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

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

Εισάγοντας το συντελεστή $\frac{1}{2}$, 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 Μετασχηματισμός των όρων ακαμψίας

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 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$

$$\begin{aligned} \sigma_x &= c^2 \sigma_1 + s^2 \sigma_2 - 2cs \tau_{12} \\ &= c^2 [(c^2 Q_{11} + s^2 Q_{12}) \varepsilon_x + (s^2 Q_{11} + c^2 Q_{12}) \varepsilon_y + cs (Q_{11} - Q_{12}) \gamma_{xy}] + \\ &+ s^2 [(c^2 Q_{12} + s^2 Q_{22}) \varepsilon_x + (s^2 Q_{12} + c^2 Q_{22}) \varepsilon_y + cs (Q_{12} - Q_{22}) \gamma_{xy}] - \\ &- 2cs [-2cs Q_{66} \varepsilon_x + 2cs Q_{66} \varepsilon_y + (c^2 - s^2) Q_{66} \gamma_{xy}] \end{aligned} \quad (3.39)$$

και ανακατατάσσοντας έχουμε:

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

Ομοίως:

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

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

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

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

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.

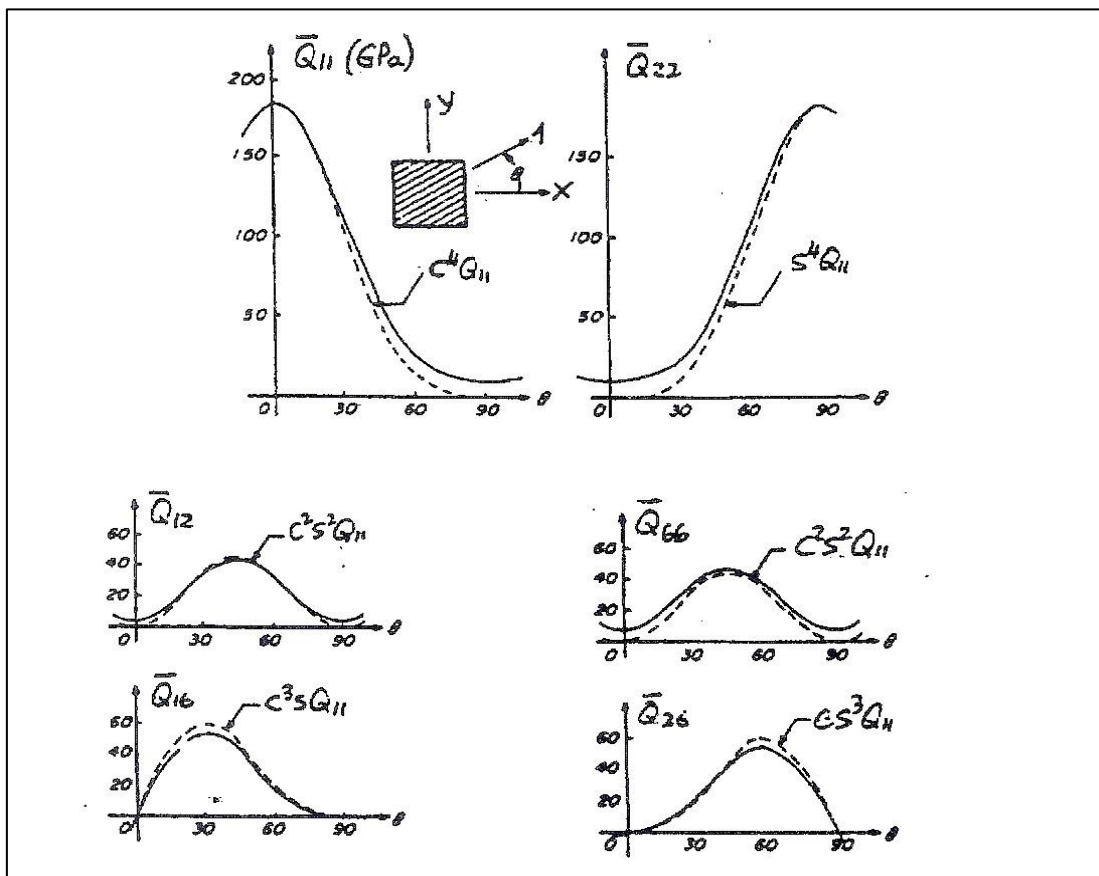
Ο μετασχηματισμός ισχύει για την προσήμανση του σχήματος 3.3 (γωνία θ θετική).

Αν η γωνία θ είναι αρνητική απαιτείται αλλαγή προσήμων στη σχέση (2.43)

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.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & 0 \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \tag{3.44}$$



Σχήμα 3.6: Μεταβολή των μετασχηματισμένων όρων ακαμψίας συναρτήσει της γωνίας θ

Παρατηρήσεις

1. Στην αντισυμμετρία έχουμε:

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

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

Στη συμμετρία έχουμε:

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

2. Σημείο καμψής

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

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

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 Μετασχηματισμός των όρων ευκαμψίας

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

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

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

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

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:

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

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

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

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 $\theta=80^\circ$ (για τη διαστρωμάτωση με κώδικα αλληλουχίας [(+10/-10)₅]_T)¹

$$\begin{Bmatrix} \bar{S}_{11} \\ \bar{S}_{22} \\ \bar{S}_{12} \\ \bar{S}_{66} \\ \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{26} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4 + s^4 & -c^2s^2 \\ 4c^2s^2 & 4c^2s^2 & -8c^2s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ 2c^3s & -2cs^3 & 2(cs^3 - c^3s) & cs^3 - c^3s \\ 2cs^3 & -2c^3s & 2(c^3s - cs^3) & c^3s - cs^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{12} \\ S_{66} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.09531 \\ 0.00927 \\ -0.00253 \\ 0.13552 \\ -0.01023 \\ -0.02374 \end{Bmatrix}$$

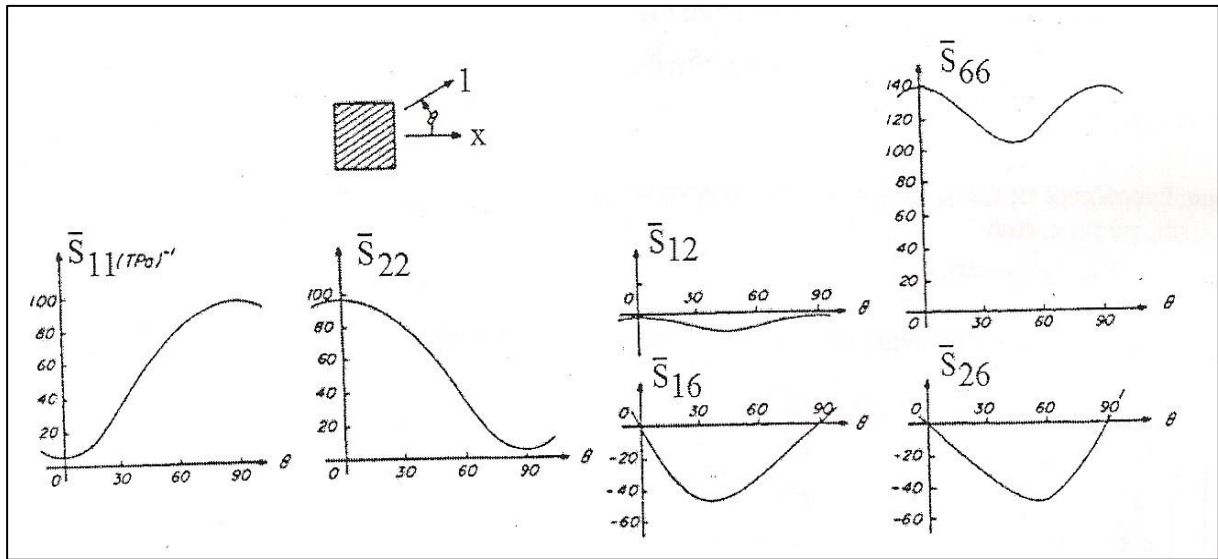
Για $\theta=60^\circ$ (για τη διαστρωμάτωση με κώδικα αλληλουχίας [(+30/-30)₅]_T)¹

$$\begin{Bmatrix} \bar{S}_{11} \\ \bar{S}_{22} \\ \bar{S}_{12} \\ \bar{S}_{66} \\ \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{26} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4 + s^4 & -c^2s^2 \\ 4c^2s^2 & 4c^2s^2 & -8c^2s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ 2c^3s & -2cs^3 & 2(cs^3 - c^3s) & cs^3 - c^3s \\ 2cs^3 & -2c^3s & 2(c^3s - cs^3) & c^3s - cs^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{12} \\ S_{66} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.08053 \\ 0.03475 \\ -0.00788 \\ 0.11415 \\ -0.03234 \\ 0.01343 \end{Bmatrix}$$

¹ Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων ενός πεπερασμένου στοιχείου του SOFiSTiK είναι στραμμένο κατά 90 μοίρες σε σχέση με το καθολικό σύστημα συντεταγμένων. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να υπολογιστούν οι μηχανικές σταθερές για κώδικες αλληλουχίας [(+10/-10)₅]_T και [(+30/-30)₅]_T οι γωνίες μετασχηματισμού δόθηκαν $\theta=80^\circ$ και $\theta=60^\circ$ αντίστοιχα.

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 3.7: Μεταβολή των μετασχηματισμένων όρων ευκαμψίας συναρτήσει της γωνίας θ

3.3.6 Μηχανικές Σταθερές Υλικού

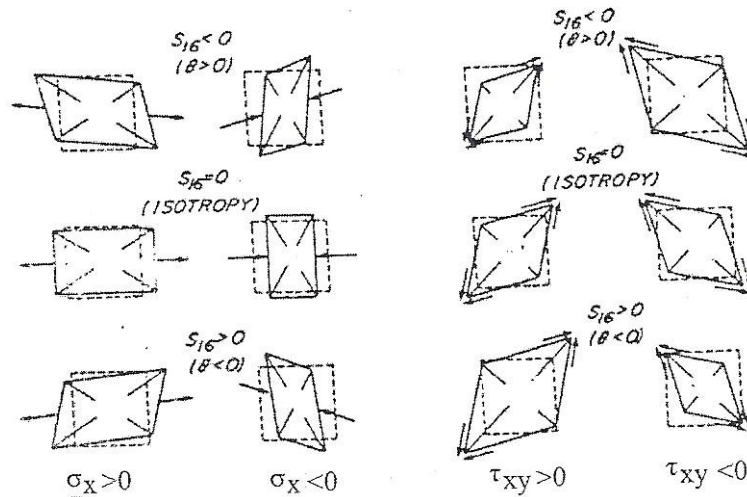
Για να έχουμε μία εικόνα της μηχανικής συμπεριφοράς ενός υλικού, οι ίνες του οποίου σχηματίζουν γωνία θ με το σύστημα x-y, είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε τα μέτρα ελαστικότητας, τους λόγους Poisson και το μέτρο διάτμησης που αντιστοιχούν στο στραμμένο σύστημα x-y ονομάζονται μηχανικές σταθερές του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

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{21} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{61} & \bar{S}_{62} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{yx}/E_y & \nu_{sx}/G_{xy} \\ -\nu_{xy}/E_x & 1/E_y & \nu_{sy}/G_{xy} \\ \nu_{xs}/E_x & \nu_{ys}/E_y & 1/G_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

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.

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



Σχήμα 3.8: Επιρροή του όρου ακαμψίας 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 $[(+10/-10)_5]_T$ βρίσκω το μητρώο μετασχηματισμού $[T_s]$ για στρώση με κατεύθυνση ινών $\theta = 80^\circ$ (στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του SOFiSTiK) και υπολογίζω τις μηχανικές σταθερές:

$$E_x = \frac{1}{S_{11}} = 10.49 \text{ GPa}$$

$$E_y = \frac{1}{S_{22}} = 107.84 \text{ GPa}$$

$$G_{xy} = \frac{1}{S_{66}} = 7.38 \text{ GPa}$$

$$\nu_{xy} = -\frac{S_{21}}{S_{11}} = 0.03$$

$$\nu_{yx} = -\frac{S_{12}}{S_{22}} = 0.27$$

Ομοίως για $\theta = -80^\circ$.

Για κώδικα αλληλουχίας $[(+30/-30)_5]_T$ βρίσκω το μητρώο μετασχηματισμού $[T_s]$ για στρώση με κατεύθυνση ινών $\theta = 60^\circ$ (στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του SOFiSTiK) και υπολογίζω τις μηχανικές σταθερές:

$$E_x = \frac{1}{S_{11}} = 12.42 \text{ GPa}$$

$$E_y = \frac{1}{S_{22}} = 28.78 \text{ GPa}$$

$$G_{xy} = \frac{1}{S_{66}} = 8.76 \text{ GPa}$$

$$\nu_{xy} = -\frac{S_{21}}{S_{11}} = 0.10$$

$$\nu_{yx} = -\frac{S_{12}}{S_{22}} = 0.23$$

Ομοίως για $\theta = -60^\circ$.

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

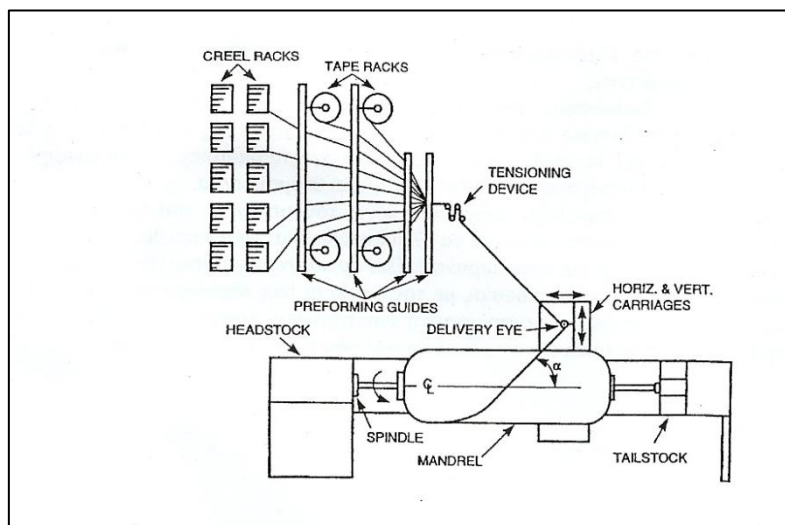
3.4 Τρόπος κατασκευής πύργου ανεμογεννήτριας από σύνθετα υλικά με τη διαδικασία της περιέλιξης

Τα περισσότερα σχήματα που μορφώνονται με τη διαδικασία της περιέλιξης είναι επιφάνειες κυλινδρικών ή σφαιρικών κελυφών, όπως σωλήνες, κύλινδροι και σφαίρες. Στη διαδικασία της περιέλιξης (filament winding), συνεχείς ενισχύσεις, όπως δέσμες ινών (roving) περιτυλίγονται γύρω από ένα περιστρεφόμενο καλούπι/άξονα (mandrel) μέχρι η επιφάνεια να καλυφθεί και να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται ακατέργαστα υλικά, ίνες και ρητίνες, σε μία σχεδόν αυτοματοποιημένη μορφή με μικρό κόστος εργασίας που συνεισφέρει στο μικρό κόστος παραγωγής. Η εκ των προτέρων προγραμματισμένη περιστροφή του άξονα και η οριζόντια μετακίνηση του στομίου παροχής (delivery eye) παράγει ένα ελικοειδές σχήμα, που είναι η απλούστερη μέθοδος λειτουργίας της ελικοειδούς μηχανής περιέλιξης (helical winding machine).

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι των μηχανών περιέλιξης: η ελικοειδής και η πολική ως προς σημείο (polar). Η ελικοειδής είναι παρόμοια με τον τόρνο (lathe). Ο άξονας-καλούπι περιστρέφεται συνεχώς ενώ το στόμιο παροχής παλινδρομεί εμπρός-πίσω. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα και η γραμμική ταχύτητα του στομίου μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να παράγουν κάθε προσανατολισμό ινών μεταξύ 5-90 μοιρών. Το τελευταίο ονομάζεται hoop

winding. Για να ολοκληρωθεί μία στρώση επικάλυψης του άξονα απαιτούνται αρκετές κινήσεις εμπρός-πίσω του βαγονιού/φορείου (carriage). Μία τέτοια μόρφωση είναι πάντα ισορροπημένη διαστρωμάτωση (2ply balanced laminate) δύο στρώσεων υπό γωνία $\pm \theta$. Οι ίνες έρχονται από καλάθια ή ταινιοδρόμους και τεντώνονται μέσω μιας συσκευής ελέγχου τάσεως που προσαρμόζεται στο άκρο του φορείου. Στη συνέχεια η ενίσχυση περνά μέσα από ένα λουτρό ρητίνης (resin bath) όπου προσκολλάται η ρητίνη. Έπειτα, η εμποτισμένη ίνα περνά μέσω του στομίου παροχής, το οποίο είναι τοποθετημένο στο φορείο. Επιπροσθέτως, με την περιστροφή του καλουπιού/άξονα, το φορείο και το στόμιο παροχής μπορούν να κινηθούν με πολλούς τρόπους που έχουν σχεδιαστεί για να βοηθήσουν στην τοποθέτηση των ινών σε πολύπλοκες διαδρομές (complicated contours). Μία ελικοειδής περιέλιξη (helical winder) έχει τη δυνατότητα για τρεις πιθανές κινήσεις που ονομάζονται άξονες, αλλά είναι διαθέσιμες μηχανές που έχουν μέχρι και 6 άξονες. Μία μηχανή με έξι άξονες ξεχωριστά ελέγχει την περιστροφική κίνηση, την οριζόντια τροφοδότηση του φορείου, την ακτινική θέση του φορείου, τη γωνία του στομίου και την παρέκκλιση (yaw) και την κάθετη τροφοδότηση του φορείου. Οι περιελίξεις (winders) με λιγότερους άξονες χρησιμοποιούνται για πιο απλά τμήματα, όπως μπαστούνια του γκολφ, και αυτές με μεγαλύτερο αριθμό αξόνων χρησιμοποιούνται για περισσότερα πολύπλοκα τμήματα, όπως οι πτέρυγες των ανεμογεννητριών. Μία ελικοειδής περιέλιξη (helical winder), παράγει μία γεωδαιτική τροχιά (geodesic path), δηλ. μια τροχιά που ακολουθεί το νήμα υπό ένταση στην επιφάνεια του περιστρεφόμενου καλουπιού/άξονα. Ένα παράδειγμα τέτοιας τροχιάς χρησιμοποιείται στην περιέλιξη κυλινδρικού δοχείου. Για πιο πολύπλοκα σχήματα, η περιέλιξη (winder), μπορεί να προγραμματιστεί να παρεκκλίνει από τη γεωδαιτική τροχιά. Σε αυτή την περίπτωση η δέσμη ινών τείνει να γλιστρήσει πίσω στη γεωδαιτική τροχιά.

Η διαφορά μεταξύ της γεωδαιτικής και της ορισμένης τροχιάς (set) είναι η γωνία απόκλισης (slip angle), η οποία περιορίζεται από τις συνθήκες της διαδικασίας. Ένα νήμα (string) ελεύθερο να ολισθήσει/αποκλίνει, τεντωμένο μεταξύ δύο σημείων πάνω στην κυρτή πλευρά κάθε επιφάνειας ακολουθεί τη γεωδαιτική τροχιά. Αν το σχήμα της επιφάνειας μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε η γεωδαιτική τροχιά να συμπίπτει με τη συνισταμένη (resultant) στο hoop και των meridional forces, το σχήμα ονομάζεται γεωδαιτικός θόλος (dome). Ο σχεδιασμός τέτοιων σχημάτων χρησιμοποιείται στα καμπύλα άκρα των λεβήτων πίεσης.



Σχήμα 3.9: Διαδικασία περιέλιξης

Η ως προς σημείο περιέλιξη με πολικές συντεταγμένες (polar winders), χρησιμοποιείται για την παραγωγή σφαιρικών δοχείων ή κυλινδρικών, με λόγο μήκους προς διάμετρο μικρότερο του 2. Μία τέτοια περιέλιξη ως προς σημείο είναι πιο απλή μηχανικά, επιπλέον λιγότερο ακριβή και ταχύτερη από την ελικοειδή. Αποτελείται από ένα βραχίονα που περιστρέφει τον άξονα παραδίδοντας στο νήμα σε μία δισδιάστατη τροχιά (planar path). Ο άξονας προχωράει αργά ώστε ο βραχίονας να καλύπτει την επιφάνειά του. Εκτός από την τέλεια σφαίρα, η δισδιάστατη τροχιά πάντα έχει μία γωνία απόκλισης σε σχέση με η γεωδαιτική τροχιά, που περιορίζει την εφαρμογή της περιέλιξης ως προς σημείο (polar winding) σε σχεδόν σφαιρικά σχήματα.

Μετά την περιέλιξη, το τμήμα μετακινείται σε ηλεκτρικό φούρνο και επιπλέον ελευθερώνει τη μηχανή για την περιέλιξη άλλου τμήματος. Η ανάγκη συνεχούς έντασης της ίνας γύρω από έναν άξονα σχεδόν αποτρέπει την παραγωγή σχημάτων με αρνητική καμπύλωση (), εκτός αν χρησιμοποιηθούν ειδικά εξαρτήματα. Οι μικρές ακτίνες καμπύλωσης είναι ~~εξίσου~~ πρόβλημα διότι τσακίσματα ινών και ξαφνικές αλλαγές στην καμπύλωση τείνουν να δημιουργήσουν ζώνες πλούσιες σε ρητίνη. Η ανάγκη ενός άξονα και η απομάκρυνση αυτού αφού το σύνθετο υλικό έχει στερεοποιηθεί περιορίζουν επίσης τα σχήματα που μπορούν να υποστούν περιέλιξη. Γενικά στη διαδικασία της περιέλιξης βρίσκουν εφαρμογή οι περισσότερες επιφάνειες εκ περιστροφής (revolution).

Αρκετοί τύποι περιστρεφόμενων καλουπιών/αξόνων έχουν αναπτυχθεί για να διευκολύνουν την απομάκρυνση του τελικού προϊόντος. Η πιο εύκολη εναλλακτική λύση που χρησιμοποιείται στα δοχεία πίεσης είναι η χρήση ενός μεταλλικού γραμμικού στοιχείου, όπως ο άξονας και η εγκατάλειψη αυτού του γραμμικού στοιχείου ως εσωτερικό τμήμα του τελικού προϊόντος. Αυτό μερικές φορές απαιτείται για την αποφυγή διαρροής αερίων με διάχυση μέσω του τοιχώματος του σύνθετου υλικού. Πτυσσόμενοι άξονες μορφώνονται από τμήματα τα οποία μπορούν να αποσυνδεθούν αφού το τμήμα στερεοποιηθεί. Αυτοί είναι οι πλέον ακριβοί άξονες και χρησιμοποιούνται σε μεγάλους όγκους παραγωγής. Ένας άξονας από ευδιάλυτη άμμο (soluble sand mandrel) μορφώνεται από άμμο και polyvinyl alcohol. Το μίγμα μορφώνεται σε δύο ή περισσότερα τμήματα τα οποία όταν ενωθούν δίνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Εφόσον το σύνθετο υλικό στερεοποιηθεί, ο άξονας διαλύεται με την έγχυση ζεστού νερού. Καλούπια από πηλό χρησιμοποιούνται μόνο για πρωτότυπα ή μικρής διάρκειας (low runs) μεγάλα τμήματα επειδή απαιτούν αρκετό κόπο και μπορεί να γίνει κάποια ζημιά στο τμήμα κατά την αφαίρεση.

Εκτός της χρήσης εμποτισμένων ινών, είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν prepregs ή υγρά ξαναρολλαρισμένα (wet re-rolled) υλικά, αλλά αυτές οι επιλογές πάντα προσθέτουν περισσότερο κόστος στο προϊόν. Η χρήση υγρών ενισχύσεων, η τοποθέτηση των ινών, ο εμποτισμός και η στερεοποίηση γίνονται ταυτόχρονα. Η εμποτισμένη ίνα τοποθετείται στον άξονα υπό τάση, και επιπλέον συμπιέζει το υλικό πριν γίνει η περιέλιξη. Η μέγιστη τάση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι σε σχέση με την αντοχή της ίνας και του ρυθμού τροφοδοσίας που χρησιμοποιείται. Η στερεοποίηση δεν είναι τόσο καλή όσο αυτή που αποκτάται μέσω κλιβάνου καταλήγοντας σε υψηλότερο λόγο όγκου κενών και κάπως χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Πάντως, το να μην απαιτείται κλίβανος είναι σημαντικό πλεονέκτημα γιατί μειώνεται το κόστος εξοπλισμού και ο χρόνος της διαδικασίας, οδηγώντας και στη μείωση τελικά του συνολικού κόστους. Για το λόγο αυτό, τα μεγάλα τμήματα που δε χωρούν σε κανένα διαθέσιμο κλίβανο μπορούν να κατασκευαστούν με τη διαδικασία της περιέλιξης.

Το μέγιστο πάχος με αυτή τη διαδικασία περιορίζεται από την ολίσθηση (slippage) των ινών και το τσαλάκωμα υπό την πίεση των νέων στρώσεων που είναι από πάνω. Όταν το πάχος

είναι μεγάλο, μπορεί να είναι απαραίτητο να σταματήσει η περιέλιξη και να αφεθεί το τμήμα να στερεοποιηθεί τμηματικά, μέχρι να πήξει η ρητίνη, πριν προστεθούν και άλλες στρώσεις. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία καταλήγει σε επιπρόσθετο κόστος. Για το λόγο αυτό, σχεδόν σε όλες τις διαδικασίες περιέλιξης, προτιμώνται σχετικά λεπτές διαστρωματώσεις από την άποψη της παραγωγής.

Οι μεγαλύτεροι περιορισμοί της διαδικασίας περιέλιξης είναι οι περιορισμοί του μεγέθους, των γεωμετρικών πιθανοτήτων, του προσανατολισμού των ινών και του τελειώματος της επιφάνειας στο τελικό προϊόν. Το περιεχόμενο των κενών μπορεί να είναι υψηλό αφού δε χρησιμοποιήθηκε ούτε αναρρόφηση (vacuum) ούτε κλίβανος (autoclave) και η ρητίνη στερεοποιείται σε χαμηλή θερμοκρασία.

Οι ρυθμοί παραγωγής της διαδικασίας περιέλιξης ποικίλουν λόγω του μεγέθους του τμήματος και του τύπου του άξονα που υπαγορεύει τον απαιτούμενο χρόνο για να ολοκληρωθεί και να αφαιρεθεί το τμήμα από τη μηχανή περιέλιξης. Αν ο χρόνος στερεοποίησης και απομάκρυνσης (set up και removal time) δεν ενδιαφέρουν, ο ρυθμός παραγωγής υπαγορεύεται από ο ρυθμό τροφοδοσίας με τον οποίο οι ίνες περιτυλίγονται γύρω από τον άξονα. Οι ρυθμοί τροφοδοσίας ποικίλλουν σύμφωνα με την αντοχή των ινών που χρησιμοποιούνται, και τυπικά είναι 0.6-1.2m/sec για την παραγωγή χρησιμοποιώντας στερεοποίηση υγρών ινών (wet fiber set up).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - Φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο επεξηγείται λεπτομερώς ο τρόπος υπολογισμού των φορτίων που ασκούνται σε μία ανεμογεννήτρια. Περιγράφονται: τα φορτία τα οποία ασκούνται απευθείας στον υπό εξέταση πύργο, τα φορτία τα οποία μεταφέρονται από τη τουρμπίνα στην κορυφή του πύργου, τα φορτία του σεισμού και τα φορτία κόπωσης. Ο πύργος σχεδιάστηκε προκειμένου να αναλάβει τα δύο αυτά είδη φορτίων καθώς και το συνδυασμό τους με τους κατάλληλους συντελεστές για κάθε περίπτωση.

4.2 Φορτία που ασκούνται στον πύργο της ανεμογεννήτριας

Κατά το σχεδιασμό του πύργου λήφθηκαν υπόψη οι παρακάτω φορτίσεις:

α) Μόνιμα φορτία

Τα μόνιμα φορτία περιλαμβάνουν το ίδιο βάρος του υλικού της κατασκευής και υπολογίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα εφόσον κατά την εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα έχει οριστεί η πυκνότητα του υλικού του κελύφους του πυλώνα.

β) Φορτία λόγω ανέμου

Ο πύργος σχεδιάστηκε για όλα τα φορτία του ανέμου και/ή τις αποκλίσεις που προκαλούνται από αυτόν. Ο υπολογισμός των φορτίων έγινε βάσει του Ευρωκώδικα 1 – Μέρος 1.4. Δράσεις ανέμου.

Η απόκριση της κατασκευής υπολογίζεται από την πίεση q_p που αντιστοιχεί στην ταχύτητα αιχμής στο αδιατάραχτο πεδίο ανέμου και από το συντελεστή πίεσης

Συγκεκριμένα, η πίεση του ανέμου που δρα στις εξωτερικές επιφάνειες, w_e , λαμβάνεται από την εξίσωση:

$$w_e = q_p(z_e)c_{pe} \quad (4.1)$$

όπου $q_p(z_e)$ είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής

z_e είναι το ύψος αναφοράς για την εξωτερική πίεση

c_{pe} είναι ο συντελεστής πίεσης για την εξωτερική πίεση

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

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = c_e(z) q_b \quad (4.2)$$

όπου:

ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, που εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και τη βαρομετρική πίεση που αναμένονται σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια ανεμοθυελλών ($\rho=1.25 \text{ kg/m}^3$)

$I_v(z)$ είναι η ένταση στροβιλισμού σε ύψος z

$c_e(z)$ είναι ο συντελεστής έκθεσης και δίνεται από τη σχέση:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (4.3)$$

$$\text{όπου } q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 \quad (4.4)$$

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

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} \quad (4.5)$$

Στη σχέση αυτή είναι

c_{dir} ο συντελεστής διεύθυνσης (με προτεινόμενη τιμή 1.0),

c_{season} ο εποχικός συντελεστής (με προτεινόμενη τιμή 1.0) και

$v_{b,0}$ η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου.

Η $v_{b,0}$ 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, $v_{b,0}$, 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 $v_{b,0}$.

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

$$v_m(z) = c_r(z)c_0(z)v_b \quad (4.6)$$

Στη σχέση αυτή είναι:

$c_0(z)$ ο συντελεστής αναγλύφου του εδάφους, που λαμβάνεται ως 1.0.

$c_r(z)$ ο συντελεστής τραχύτητας

Ο συντελεστής τραχύτητας $c_r(z)$ 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 συναρτήσει του ύψους z από τις ακόλουθες λογαριθμικές σχέσεις:

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{για } z \leq z_{\min} \quad (4.7)$$

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

όπου:

z_0 είναι το μήκος τραχύτητας

k_r είναι ο συντελεστής εδάφους εξαρτώμενος από το μήκος τραχύτητας z_0 που υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (4.8)$$

όπου:

$z_{0,II} = 0.05m$ (κατηγορία εδάφους II, Πίνακας 4.1)

z_{\min} είναι το ελάχιστο ύψος που ορίζεται στον Πίνακα 4.1

$z_{\max} = 200m$

Τα z_0, z_{\min} εξαρτώνται από την κατηγορία εδάφους.

Οι προτεινόμενες τιμές δίνονται στον Πίνακα 4.1. για πέντε αντιπροσωπευτικές κατηγορίες εδάφους.

Η εξίσωση (4.8) ισχύει όταν το έδαφος στη διεύθυνση του ανέμου έχει ομοιόμορφη τραχύτητα σε αρκετά μεγάλο μήκος ώστε να μπορεί να θεωρείται σταθερή η κατηγορία εδάφους.

Πίνακας 4.1 Προτεινόμενες τιμές για κατηγορίες εδάφους

Κατηγορία εδάφους	$z_0(\text{m})$	$z_{\min}(\text{m})$
0 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	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	0,3	5
IV Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15m.	1,0	10

Δεχόμαστε κατηγορία εδάφους II.

$I_v(z)$ είναι η ένταση του στροβιλισμού σε ύψος z και 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 τη σχέση:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \ln(z/z_0)} \quad \text{για} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4.9)$$

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

όπου:

k_I ο συντελεστής στροβιλισμού. Η τιμή του k_I που θα χρησιμοποιηθεί σε μια χώρα μπορεί να δίνεται στο Εθνικό Προσάρτημα. Η προτεινόμενη τιμή του $k_I = 1.0$.

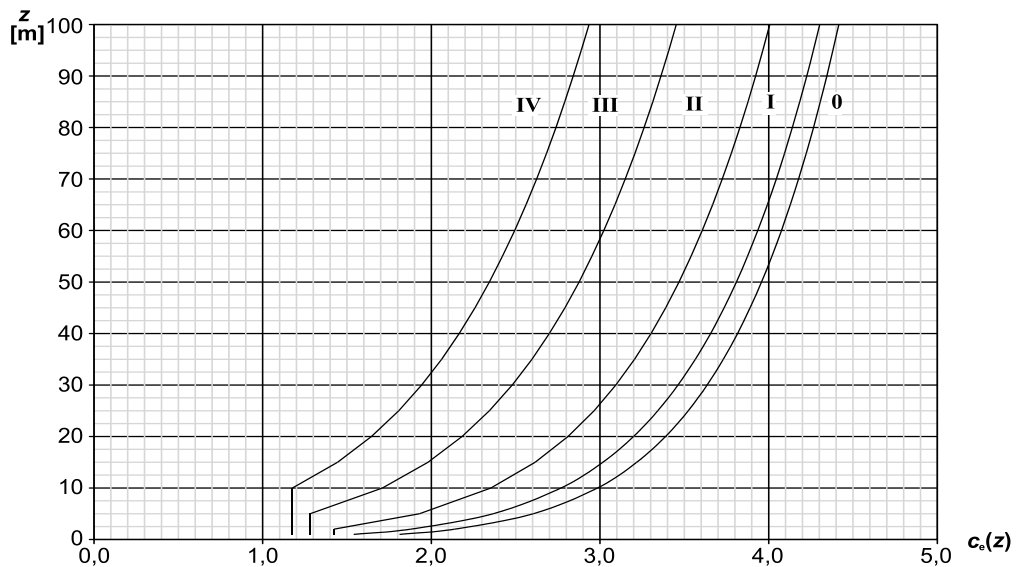
$c_0(z)$ ο συντελεστής αναγλύφου του εδάφους, που λαμβάνεται ως 1.0.

z_0 το μήκος τραχύτητας, που δίνεται στον πίνακα 4.1.

$c_e(z)$ είναι ο συντελεστής έκθεσης και δίνεται από τη σχέση:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (4.10)$$

Για επίπεδο έδαφος, όπου $c_0(z) = 1.0$, ο συντελεστής έκθεσης $c_e(z)$ δίνεται σε διάγραμμα στο σχήμα 4.1 ως συνάρτηση του ύψους πάνω από το έδαφος και της κατηγορίας εδάφους όπως ορίζεται στον πίνακα 4.1.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα συντελεστή έκθεσης $c_e(z)$ για $c_0=1.0$, $kI=1.0$

Το ύψος αναφοράς z_e είναι ίσο με το μέγιστο ύψος πάνω από το έδαφος του θεωρούμενου στοιχείου

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

$$Re = \frac{bv(z_e)}{\nu} \quad (4.11)$$

όπου:

b είναι η διάμετρος του κυλίνδρου

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

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

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

$$c_{pe} = c_{p,0} \psi_{\lambda\alpha} \quad (4.12)$$

όπου:

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

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

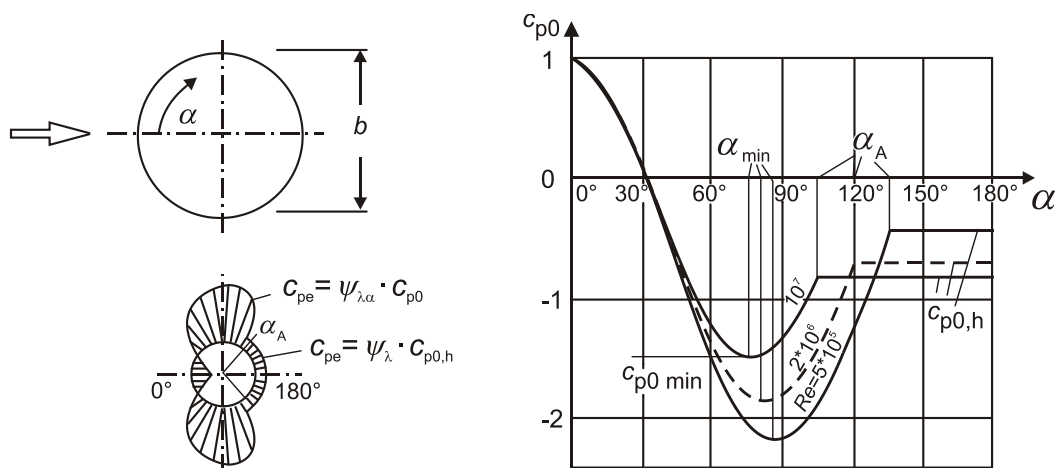
Ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης $c_{p,0}$ δίνεται στο σχήμα για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds, ως συνάρτηση της γωνίας α .

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

$$\begin{aligned} \psi_{\lambda\alpha} &= 1 & 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \psi_{\lambda\alpha} &= \psi_\lambda + (1 - \psi_\lambda) \cos\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{a_A - \alpha_{\min}}\right)\right) & a_{\min} \leq \alpha \leq a_A \\ \psi_{\lambda\alpha} &= \psi_\lambda & a_A \leq \alpha \leq 180^\circ \end{aligned} \quad (4.13)$$

α_A είναι η θέση του διαχωρισμού ροής (βλέπε σχήμα 4.2)

ψ_λ είναι ο συντελεστής επίδρασης άκρων (βλέπε πίνακα 4.2)



Σχήμα 4.2: Κατανομή πιέσεων για κυκλικούς κυλίνδρους για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds και χωρίς επίδραση άκρων.

Πίνακας 4.2 Τυπικές τιμές κατανομής πίεσης κυκλικών κυλίνδρων 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

όπου:

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

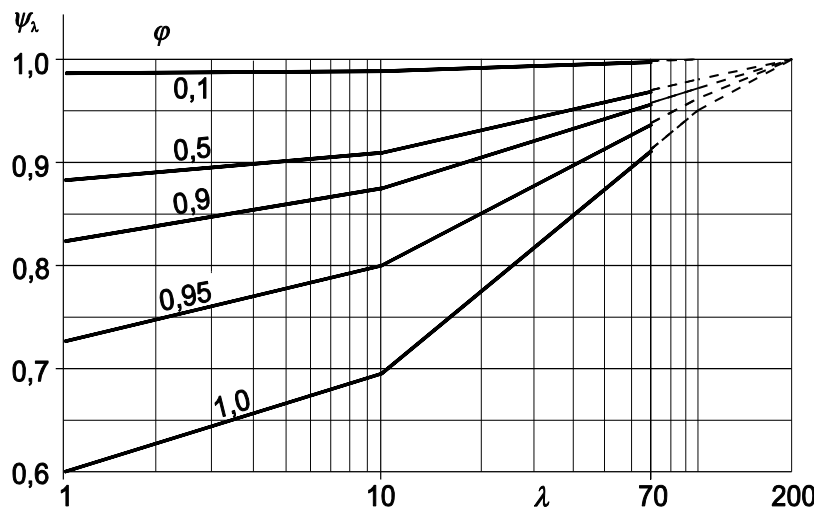
$C_{p0,min}$ είναι η τιμή του ελάχιστου συντελεστή πίεσης

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

$C_{p0,h}$ είναι ο συντελεστής της βασικής πίεσης

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

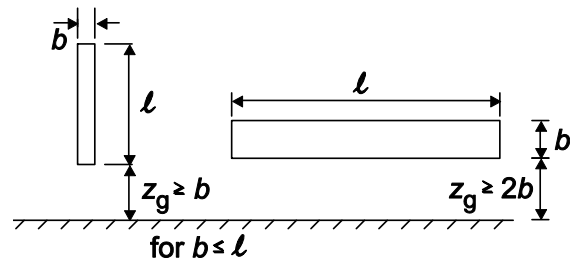
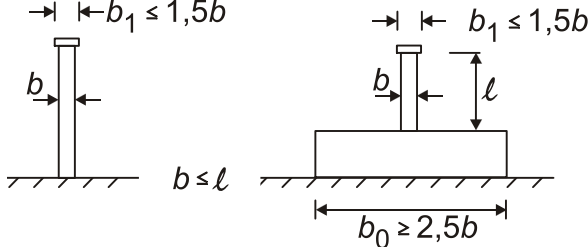
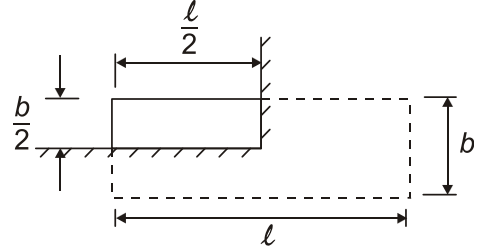
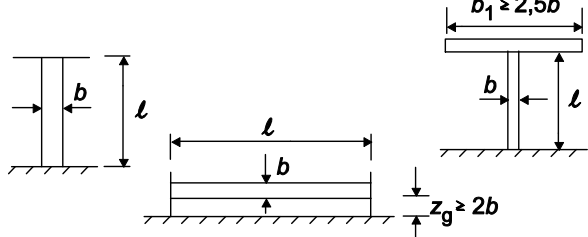
Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει υπόψη τη μειωμένη αντίσταση της κατασκευής λόγω της ροής του ανέμου γύρω από τα άκρα (επίδραση άκρων). Το σχήμα και ο πίνακας βασίζονται σε μετρήσεις σε υποστρωβιλώδη ροή.



Σχήμα 4.3: Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή επίδρασης άκρων ψ_λ ως συνάρτηση του συντελεστή πληρότητας ϕ και της λυγηρότητας λ

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

Πίνακας 4.3. Προτεινόμενες τιμές του λ για κυλίνδρους, πολυγωνικές διατομές, ορθογωνικές διατομές, πινακίδες σήμανσης, διατομές με αιχμηρές ακμές και δικτυωτές κατασκευές

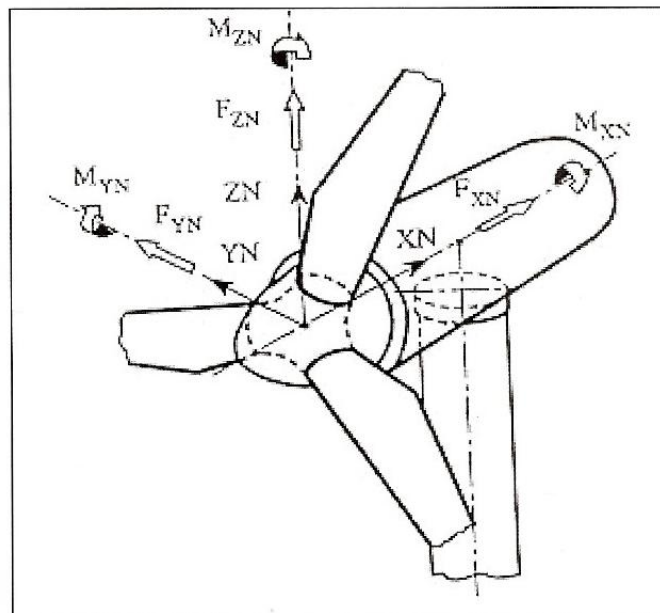
No.	Θέση της κατασκευής, άνεμος κάθετα στο επίπεδο της σελίδας	Ενεργός λυγηρότητα λ
1		<p>Για πολυγωνικές, ορθογωνικές και διατομές με αιχμηρές γωνίες: για $l \geq 50$ m, $l=1,4$ l/b ή $l=70$, όποιο είναι μικρότερο για $l < 15$ m, $l=2l/b$ ή $l=70$, όποιο είναι μικρότερο</p>
2		<p>Για κυκλικούς κυλίνδρους: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

4.3 Φορτία που μεταφέρονται από την τουρμπίνα στον πύργο

Σύμφωνα με τον κανονισμό Germanischer Lloyd: Rules and Regulations, Part 1- Wind Energy (1993), οι πύργοι των ανεμογεννητριών πρέπει να σχεδιάζονται προκειμένου να αντέχουν όχι μόνο τις παρακάτω περιπτώσεις φορτίσεων αλλά και τους συνδυασμούς αυτών:

- Μόνιμα φορτία (ίδιο βάρος τουρμπίνας)
- Φορτία κανονικής λειτουργίας (περιλαμβάνουν την πίεση του ανέμου, τις διαταραχές κατά τη λειτουργία, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το φρενάρισμα)
- Φορτία ακραίας λειτουργίας (περιλαμβάνουν την πίεση του ανέμου, την πλάγια προβολή του ανέμου, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας)
- Ετήσιος άνεμος (10 minutes)
- Ετήσια ριπή ανέμου (5 seconds)
- 50- ετής άνεμος (10 minutes)
- 50- ετής ριπή ανέμου (5 seconds)
- Ειδική επιρροή του περιβάλλοντος- Βλάβη – Βραχυκύκλωμα γεννήτριας
- Εκκεντρότητα ρότορα

Το σύστημα των συντεταγμένων που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των φορτίων παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου ο άξονας XN είναι κατά τη φορά του ανέμου.



Σχήμα 4.4: Σύστημα συντεταγμένων τουρμπίνας ανεμογεννήτριας (Germanischer Lloyd: Rules and Regulations, Part 1 – Wind Energy, 1993)

α) Μόνιμα φορτία

Τα μόνιμα φορτία σε αυτή την περίπτωση οφείλονται στο μηχανικό εξοπλισμό που βρίσκεται στην κορυφή του πύργου. Τρία βασικά μέλη θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό του βάρους: τα πτερύγια, η άτρακτος και ο ρότορας.

Το συνολικό αξονικό φορτίο, F_z , είναι συνδυασμός του βάρους των παραπάνω μελών. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η εκκεντρότητα της μάζας του ρότορα η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$e_m = 0.05R \quad (4.14)$$

όπου R η ακτίνα του ρότορα. Λόγω της εκκεντρότητας του ρότορα, υπάρχει και μία

β) Φορτία κανονικής λειτουργίας

Στην περίπτωση αυτή, μία μέση πίεση P_n , η οποία εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του ανέμου, χρησιμοποιείται και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_n = C_{fb} \rho \frac{v_r^2}{2} \quad (4.15)$$

όπου

$$C_{fb} = \frac{8}{9}$$

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

v_r , η σχετική ταχύτητα του ανέμου σε m/s ($v_r = 16 \text{ m/s}$ σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας).

Επομένως, η δύναμη που ασκείται στην κορυφή του πύργου είναι: $F_x = P_n A$ (4.16)

όπου A η επιφάνεια σάρωσης του ρότορα.

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

$$e_w = \frac{wR^2}{2v_r^2} \quad (4.17)$$

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

Ακόμη κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, ο ρότορας περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του και προκαλεί τη ροπή αντίστασης. Αυτή η ροπή είναι ανάλογη της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, P_{el} και αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα n και δίνεται από τη σχέση:

$$M_x = 14 \frac{P_{el}}{n} \quad (4.18)$$

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 μία ροπή ανατροπής στην κορυφή του πύργου. Η τιμή αυτή είναι διπλάσια αυτής που υπολογίζεται από τη σχέση (4.17).

γ) Φορτία ακραίας λειτουργίας

Τα φορτία υπολογίζονται όπως και στην προηγούμενη φάση λειτουργίας θεωρώντας όμως ταχύτητα ριπής ανέμου

$$v_b = k_b v_r, \quad (4.19)$$

όπου $k_b = 5/3$

Επομένως η πίεση του ανέμου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_n = C_{fb} \rho \frac{v_r^2}{2} \quad (4.20)$$

και η οριζόντια δύναμη που ασκείται στην κορυφή του πύργου υπολογίζεται από τη σχέση (4.15).

Τα φορτία που οφείλονται στην πλάγια ροή του ανέμου ή σε κλίσεις αυτού, θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη καθώς κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας ο άνεμος μπορεί να αλλάξει κατεύθυνση. Αυτή η δύναμη χαρακτηρίζεται ως πλευρική επίδραση του ανέμου και το μέτρο της μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$F_y = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} P_n A \quad (4.21)$$

Ασκείται στο ρότορα κατά την Y διεύθυνση και έχει ως αποτέλεσμα την επιβολή καμπτικών ροπών στον άξονα του ρότορα 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 τη χρήση της σχέσης (4.17).

δ) Ετήσιος άνεμος (10 minutes)

Ετήσιος άνεμος 10 λεπτών, είναι ο μέσος άνεμος δέκα λεπτών, με πιθανότητα υπέρβασης μία φορά το χρόνο. Η ταχύτητα ετησίου ανέμου (10 λεπτών) 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 ανέμου σε ύψος πλήμνης h , προϋποθέτει την προσαρμογή της ταχύτητας του 10-λεπτου μέσου ανέμου με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$v(h) = v \left(\frac{h}{h^*} \right)^a \quad (4.22)$$

όπου:

v η ταχύτητα του ανέμου

h^* το ύψος αναφοράς

$\alpha=0.16$ για άνεμο και 0.11 για ριπή ανέμου

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:

$$P_s = \frac{v^2}{1600} \quad (4.23)$$

Συνεπώς, η οριζόντια δύναμη F_x που ασκείται στην κορυφή του πύργου, υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (4.15), όπου λαμβάνεται υπόψη η επιφάνεια σάρωσης του ρότορα.

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

ε) Ετήσια ριπή ανέμου (5 seconds)

Ετήσια ριπή ανέμου 5 δευτερολέπτων ονομάζεται η μέγιστη ανά 5 δευτερόλεπτα μέση ταχύτητα του ανέμου, με πιθανότητα υπέρβασης μία 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 (4.22). Η πίεση 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 ρότορα και επιβραδυντικών ροπών M_z στο περιστρεφόμενο τμήμα της ατράκτου.

στ) Άνεμος 50-ετίας (10 minutes)

Ο άνεμος 50-ετίας είναι ο ανά 10 λεπτά μέσος όρος ανέμου με πιθανότητα υπέρβασης μία φορά τα 50 χρόνια. Παρόμοια με τη συνθήκη ετήσιου ανέμου (10 λεπτών), η ταχύτητα του 50-ετούς ανέμου πρέπει να προσαρμοστεί στο ύψος της πλήμνης με βάση τη σχέση (4.21). Τα φορτία σε αυτή την περίπτωση υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως και για τον ετήσιο άνεμο (10 λεπτών).

ζ) Ριπή ανέμου 50-ετίας (5 seconds)

Η ριπή ανέμου 50-ετίας είναι η μέγιστη ανά 5 δευτερόλεπτα μέση ταχύτητα του ανέμου, με πιθανότητα υπέρβασης μία 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 (4.22). Τα φορτία σε αυτή την περίπτωση προσδιορίζονται με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε και για ετήσια ριπή ανέμου (5 δευτερολέπτων).

η) Επιρροή περιβάλλοντος – Βραχυκύκλωμα

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 μία μεγάλη στρεπτική ροπή, η οποία, για σύγχρονες γεννήτριες, προσεγγίζεται αν οκταπλασιάσουμε τη ροπή που αναπτύσσεται κατά την παραγωγή ενέργειας από την ανεμογεννήτρια.

θ) Εκκεντρότητα ρότορα

Με αυτή τη φόρτιση καλύπτουμε την περίπτωση ατέλειας κατά την τοποθέτηση του έλικα πάνω στη νασέλλα. Έτσι λοιπόν υπάρχει μία εκκεντρότητα ίση με:

$$e_r = 0.005R \quad (4.24)$$

και λόγω αυτής της εκκεντρότητας εμφανίζεται μία δύναμη F_x η οποία είναι ίση με:

$$F_x = me_r\Omega^2 \quad (4.25)$$

m= μάζα των λεπίδων του ρότορα

Ω = γωνιακή ταχύτητα ρότορα

ι) Εκκεντρότητα του κέντρου βάρους της ατράκτου ως προς το κέντρο της κορυφής του πύργου

Λόγω αυτής της εκκεντρότητας (1.125m) προστίθεται στην τιμή της M_y μία πρόσθετη ροπή ίση με $M_y = 1.125F_x$

4.4 Φορτία λόγω σεισμού

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού αναπτύσσονται στο έδαφος επιταχύνσεις (οριζόντιες και κατακόρυφες), που έχουν ως συνέπεια τη δημιουργία αδρανειακών δυνάμεων επί των κατασκευών.

Η ένταση των εδαφικών σεισμικών διεγέρσεων, καθορίζεται συμβατικά από με μία μόνη παράμετρο, τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού A , ανάλογα με τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας της χώρας στην οποία βρίσκεται το έργο. Η Ελλάδα, υποδιαιρείται σε τρεις Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας (I έως III), τα όρια των οποίων καθορίζονται στο Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας (σχήμα 4.5).

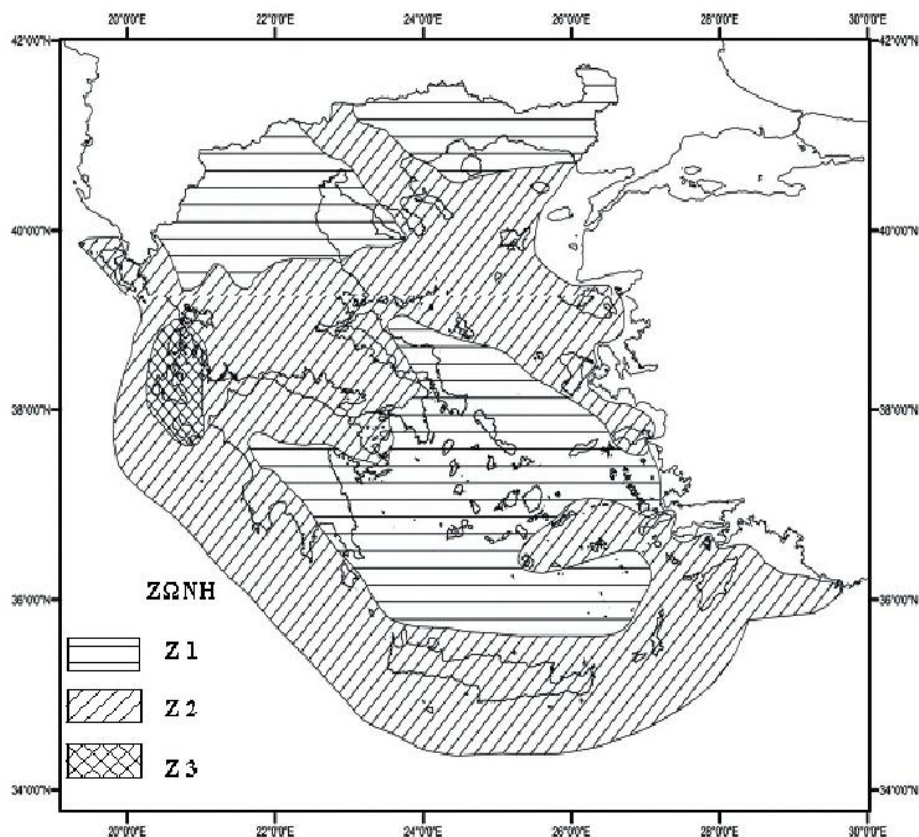
Σε κάθε ζώνη αντιστοιχεί μία τιμή σεισμικής επιτάχυνσης του εδάφους A , η οποία έχει πιθανότητα υπέρβασης 10% σε μία περίοδο 50 ετών (ή περίοδο επαναφοράς 475 χρόνια), με βάση τη σχέση $A = ag$

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

και $\alpha=0.16$ για Ζώνη I

$\alpha=0.24$ για Ζώνη II

$\alpha=0.36$ για Ζώνη III

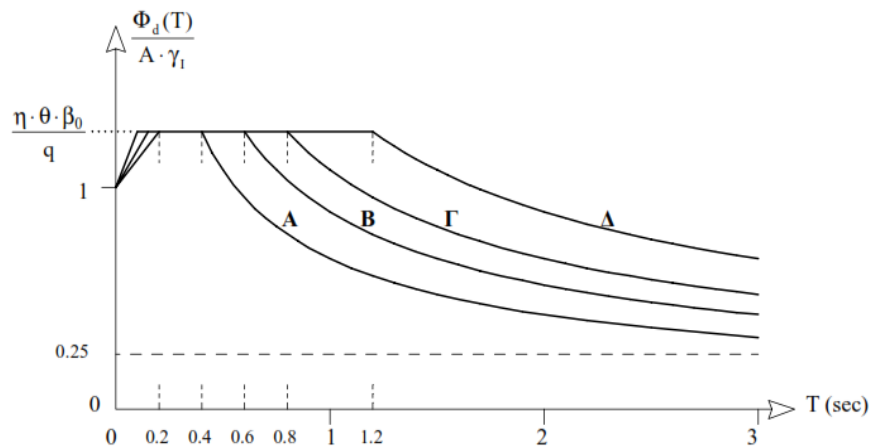


Σχήμα 4.5: Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας

Η εδαφική επιτάχυνση κλιμακώνεται περαιτέρω μέσα στην ίδια ζώνη ανάλογα με την κατηγορία σπουδαιότητας των έργων, μέσω του συντελεστή σπουδαιότητας γ_1 , κυμαινόμενου μεταξύ 0.85 και 1.30, ο οποίος εκφράζει μικρότερες ή μεγαλύτερες απαιτήσεις απόκρισης.

Οι σεισμικές διεγέρσεις σχεδιασμού ορίζονται στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους ως δύο οριζόντιες (κάθετες μεταξύ τους) και μία κατακόρυφη συνιστώσα, στατιστικά ανεξάρτητες μεταξύ τους, καθορίζονται δε με τη βοήθεια φασμάτων απόκρισης (σε όρους επιτάχυνσης) ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Για τον προσδιορισμό της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής μας, δίνεται το φάσμα σχεδιασμού κατά ΕΑΚ2000 με πιθανότητα υπέρβασης 10% σε μία περίοδο 50 ετών:



Σχήμα 4.6: Φάσμα Σχεδιασμού ΕΑΚ2000

$$0 \leq T \leq T_1 \quad S_d(T) = \gamma_1 A \left[1 + \frac{T}{T_1} \left(\frac{\eta \theta \beta_0}{q} - 1 \right) \right] \quad (4.26)$$

$$T_1 \leq T \leq T_2 \quad S_d(T) = \gamma_1 A \frac{\eta \theta \beta_0}{q} \quad (4.27)$$

$$T_2 \leq T \quad S_d(T) = \gamma_1 A \frac{\eta \theta \beta_0}{q} \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} \quad (4.28)$$

όπου

$A = ag$, η μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση του εδάφους

$\alpha = 0.16$, ο συντελεστής σεισμικής επικινδυνότητας για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II

$g = 9.81$, η επιτάχυνση της βαρύτητα

$\gamma = 1.00$, ο συντελεστής σπουδαιότητας της κατασκευής για κατηγορία σπουδαιότητας Σ_2

$q=1.00$, ο συντελεστής συμπεριφοράς της κατασκευής (επιθυμητή η ελαστική συμπεριφορά της κατασκευής ως ένα μέτρο προστασίας έναντι κόπωσης)

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\zeta}} = \sqrt{\frac{7}{2+8}} = 0.837$$

ο διορθωτικός συντελεστής για απόσβεση 8% για τον πύργο από σύνθετα υλικά και

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\zeta}} = \sqrt{\frac{7}{2+3}} = 1.183$$

ο διορθωτικός συντελεστής για απόσβεση 3% για τον πύργο από χάλυβα.

$\theta=1.00$ ο συντελεστής επιρροής της θεμελίωσης

$\beta_0 = 2.5$ ο συντελεστής φασματικής ενίσχυσης

T_1 και T_2 οι χαρακτηριστικές περιόδου του φάσματος Α, Β, Γ, Δ η κατηγορία εδάφους

Δεχόμαστε κατηγορία εδάφους Β.

Πίνακας 4.4 Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων T_1 και T_2 (sec)

Κατηγορία εδάφους	Α	Β	Γ	Δ
T1	0.10	0.15	0.20	0.20
T2	0.40	0.60	0.80	1.20

Με τα δεδομένα του φάσματος του σεισμού πραγματοποιήθηκαν δύο αναλύσεις: στατική ανάλυση και δυναμική ανάλυση.

Στη στατική ανάλυση προσομοιώνουμε το μοντέλο μας με αυτό του μονοβάθμιου ταλαντωτή και θεωρούμε πως τα φορτία λόγω σεισμού επιβάλλονται στατικά. Λαμβάνουμε υπόψη μόνο τα φορτία που αναφέρονται πιο κάτω με τον κατάλληλο σεισμικό συνδυασμό. Η βασική λογική της διαδικασίας είναι να μετατρέψουμε τα κατακόρυφα φορτία σε επικόμβιες δράσεις κατά τη διεύθυνση x. Γνωρίζοντας τη συνολική μάζα της ατράκτου στην κορυφή καθώς και τη συνολική μάζα του πύργου, υπολογίζουμε το βάρος τους πολλαπλασιάζοντας με την επιτάχυνση της βαρύτητας g. Στη συνέχεια υπολογίζουμε το συντελεστή σεισμικής επιβάρυνσης ε με τον οποίο πολλαπλασιάζουμε τις παραπάνω δυνάμεις και με τις νέες τιμές επιβάλλουμε στην κορυφή του πύργου αλλά και καθ' ύψος αυτού επικόμβιες δυνάμεις.

Στη δυναμική ανάλυση υπολογίστηκε η απόκριση του συστήματος από την κατάλληλη επαλληλία των μέγιστων αποκρίσεων που αντιστοιχούν σε κάθε ιδιομορφή.

4.5 Φορτία κόπωσης

Πέρα από τις μέγιστες πιθανές καταστάσεις καταπόνησης, στη διάρκεια λειτουργίας της, μία ανεμογεννήτρια υπόκειται συστηματικά σε κόπωση ως αποτέλεσμα της μεταβλητότητας των ανεμολογικών δεδομένων (και κυρίως της τύρβης). 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.

Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το υλικό τους να βρίσκεται πάντα κάτω από το όριο διαρροής του. Διαφορετικά καταλαβαίνουμε ότι η εισαγωγή στην ανελαστική περιοχή σε συνδυασμό με το εναλλασσόμενο πρόσημο της τιμής των εντατικών μεγεθών θα δημιουργούσε συσσωρευμένη ζημιά στα υλικά της κατασκευής και θα έκανε αδύνατη την ασφαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής της.

Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης λαμβάνεται από τα παραρτήματα Β, C, E του Ευρωκώδικα 1-Μέρος 1.4. Για τον πύργο από χάλυβα τα φορτία κόπωσης δίνονται από την ανάλυση Vestas. Ωστόσο, για τον πύργο από σύνθετα υλικά απαιτούνται άλλες καμπύλες SN που ανταποκρίνονται σε διαφορετική διαστρωμάτωση υλικών.

4.6 Συνδυασμοί φορτίσεων

Οι συνδυασμοί φορτίσεων των παραπάνω περιπτώσεων δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί βάσει των προδιαγραφών που ισχύουν για ανεμογεννήτριες.

Πίνακας 4.5 Συνδυασμοί δράσεων

Συνδυασμοί Περιπτώσεις φορτίσεων	1	2	3	4	5	6
Μόνιμα φορτία	X	X	X	X	X	X
Φορτία κανονικής λειτουργίας	X					
Φορτία ακραίας λειτουργίας		X				
Ετήσιος άνεμος (10 min)			X			
Ετήσια ριπή ανέμου (5 sec)				X		
50ετής άνεμος (10 min)					X	
50 ετής ριπή ανέμου (5 sec)						X
Βραχυκύκλωμα			X		X	
Εκκεντρότητα ρότορα	X	X				
Σεισμός	X					

Ο συνδυασμός φορτίσεων 1 αναφέρεται ως κανονική συνθήκη λειτουργίας και συνδυάζει τα μόνιμα φορτία, τα φορτία λόγω κανονικής λειτουργίας, τα φορτία λόγω εκκεντρότητας, η οποία προκαλείται κατά την τοποθέτηση του ρότορα και τα φορτία λόγω σεισμού. Είναι κατά βάση ο κύριος συνδυασμός.

Ο συνδυασμός φορτίσεων 2 αναφέρεται ως ακραία συνθήκη λειτουργίας γι' αυτό και δε συνδυάζεται με το σεισμό. Σε αυτές τις συνθήκες η ανεμογεννήτρια δουλεύει με ταχύτητα πολύ κοντά στην ταχύτητα διακοπής λειτουργίας.

Ο συνδυασμός φορτίσεων 3 είναι αυτός που περιγράφει έναν άνεμο, αρκετά ισχυρό, διάρκειας 10 λεπτών, ο οποίος έχει συχνότητα μία φορά το χρόνο. Σε αυτή τη φόρτιση έρχεται να προστεθεί και άλλη μία που προκαλείται από βλάβη ή βραχυκύκλωμα της ανεμογεννήτριας.

Ο συνδυασμός φορτίσεων 4 περιγράφει έναν άνεμο συχνότητας εμφάνισης 1 έτους, ο οποίος καταπονεί την κατασκευή για 5 δευτερόλεπτα με εξαιρετικά μεγάλη δύναμη. Λόγω του ότι η συχνότητα του είναι πολύ μικρή, είναι εξαιρετικά σπάνιο να συνδυαστεί και στην πραγματικότητα με άλλο τυχηματικό γεγονός που μπορεί να καταπονήσει την κατασκευή.

Ο συνδυασμός φορτίσεων 5 είναι αυτός που περιγράφει έναν ισχυρό άνεμο, ο οποίος έχει συχνότητα εμφάνισης μία φορά στα 50 χρόνια και διάρκεια 10 λεπτών. Σε αυτή τη φόρτιση, όπως και στη φόρτιση 3, προστίθεται η φόρτιση που προκαλείται από μία βλάβη ή ένα βραχυκύκλωμα.

Ο συνδυασμός φορτίσεων 6 αναφέρεται σε έναν άνεμο, ο οποίος μπορεί να καταπονήσει την κατασκευή μας με συχνότητα εμφάνισης μία φορά στα 50 χρόνια. Πρόκειται για έναν άνεμο πολύ ισχυρό, ο οποίος διαρκεί 5 δευτερόλεπτα.

Για τη διατύπωση των συνδυασμών δράσεων, ανάλογα με την περίπτωση φόρτισης, χρησιμοποιούμε τους παρακάτω συντελεστές δράσεων που αναφέρονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα (Germanischer Lloyd: Rules and Regulations, Part 1- Wind Energy (1993))

Πίνακας 4.6 Συντελεστές δράσεων

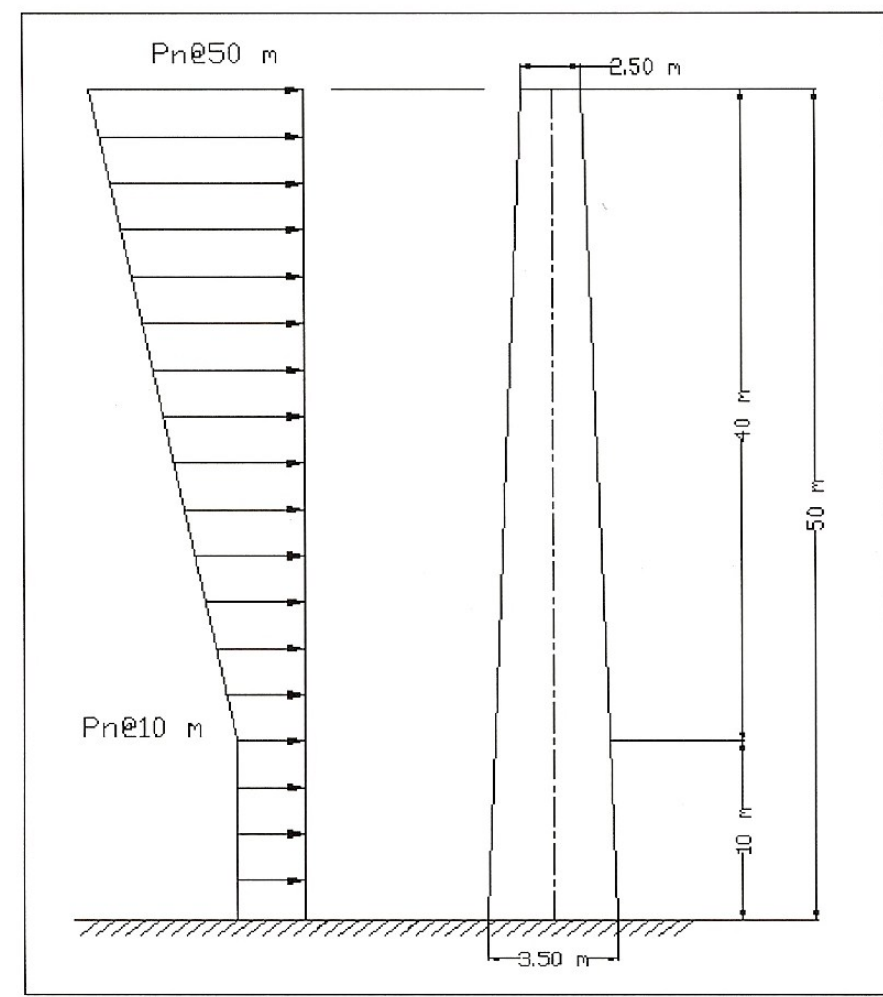
Περιπτώσεις φορτίσεων	Συντελεστές δράσεων
Μόνιμα φορτία	1.10
Φορτία συνήθους λειτουργίας	1.20
Φορτία ακραίας λειτουργίας	1.20
Ετήσιος άνεμος (10 min)	1.50
Ετήσια ριπή ανέμου (5 sec)	1.50
50-ετής άνεμος (10 min)	1.00
50-ετής ριπή ανέμου (5 sec)	1.00
Βραχυκύκλωμα	1.00
Εκκεντρότητα ρότορα	1.35
Σεισμός	1.00

4.7 Υπολογισμός φορτίων σχεδιασμού

4.7.1 Φορτία σχεδιασμού στον πύργο

Η ανεμοφόρτιση στο κέλυφος επιβλήθηκε καθ' ύψος και περιφερειακά σε όλες τις επιφάνειες του αφού ολοκληρώθηκε η σχετική εξίσωσης κατανομής σύμφωνα με την ακριβή μέθοδο του Ευρωκώδικα 1-Μέρος 1.4. Επειδή ο φορέας είναι συμμετρικός εκ περιστροφής αρκεί η εφαρμογή του φορτίου υπό οποιαδήποτε γωνία.

Η τυπική κατανομή της πίεσης του ανέμου που ασκείται στον πύργο της ανεμογεννήτριας παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7, ενώ η πίεση σχεδιασμού του ανέμου δίνεται στον πίνακα 4.7



Σχήμα 4.7: Κατανομή πίεσης ανέμου στον πύργο

Πίνακας 4.7 Πίεση σχεδιασμού

Περιπτώσεις φορτίσεων	Πίεση σχεδιασμού (kN/m ²)	
	0-10m	50m
1	0.37	0.43
2	0.92	1.10
3	0.92	1.27
4	1.61	2.37
5	1.50	1.50
6	2.59	2.59

4.7.2 Φορτία σχεδιασμού στην κορυφή του πύργου

Τα φορτία που μεταφέρονται στον πύργο από την ανεμογεννήτρια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.8 Φορτία σχεδιασμού στην κορυφή του πύργου

Περιπτώσεις φορτίσεων	Φορτία σχεδιασμού στην κορυφή του πύργου					
	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)
Μόνιμα φορτία	-	-	349.16	-	420.74	-
Φορτία συνήθους λειτουργίας	311.30	-	-	1145.45	1412.46	-
Φορτία ακραίας λειτουργίας	864.71	-	-	572.79	-	1202.16
Ετήσιος άνεμος (10 min)	126.65	-	-	-	-	75.39
Ετήσια ριπή ανέμου (5 sec)	209.82	-	-	-	-	482.59
50-ετής άνεμος (10 min)	131.06	-	-	-	-	78.02
50-ετής ριπή ανέμου (10 min)	219.25	-	-	-	-	504.27
Βραχυκύκλωμα	-	-	-	3818.18	-	-
Εκκεντρότητα ρότορα	11.57	-	-	-	-	-

Πίνακας 4.9 Συνδυασμοί δράσεων

Συνδυασμοί δράσεων	Φορτία σχεδιασμού στην κορυφή του πύργου					
	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)
1	358.35	-	455.39	1145.45	2236.34	-
2	876.28	-	349.16	572.79	1406.56	1202.16
3	126.65	-	349.16	3818.18	563.22	75.39
4	209.82	-	349.16	-	656.79	482.59
5	131.06	-	349.16	3818.18	568.18	78.02
6	219.25	-	349.16	-	667.40	504.27

Στον παραπάνω πίνακα, η πρόσθετη ροπή εξαιτίας της εκκεντρότητας του κέντρου βάρους της ατράκτου σε σχέση με το κέντρο της κορυφής του πύργου (1.125m), προστέθηκε στην τιμή M_y , δηλαδή, η πρόσθετη ροπή είναι ίση με $M_y=1.125F_x$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - Μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (SOFiSTiK)

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση του φορέα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επεξηγούνται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα, τον καθορισμό των υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και τέλος την εφαρμογή των φορτίων στο πρόγραμμα SOFiSTiK.

5.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος (δηλ. μέθοδος υπολογισμού με χρήση Η/Υ) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Η ευρεία χρήση της μεθόδου έγκειται στη δυνατότητά της να παρουσιάζεται ως ενιαίο εργαλείο για τη στατική και δυναμική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από τρία στάδια:

1. Το πρώτο στάδιο συνίσταται στην υποδιαίρεση και διάσπαση της κατασκευής σε ένα, ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια, μικρότερο ή μεγαλύτερο πλήθος στοιχείων πεπερασμένων διαστάσεων (elements), τα οποία εφάπτονται μεταξύ τους χωρίς να αφήνουν κανένα κενό και συνδέονται με τους κόμβους (nodes) που βρίσκονται στα σύνορα των στοιχείων. Το σύνολο αυτό των στοιχείων ονομάζεται δίκτυο ή πλέγμα (mesh) και η προσομοίωση του φορέα με το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζεται διακριτοποίηση του φορέα (discretization).
2. Στο δεύτερο βήμα, μετά τη διακριτοποίηση της κατασκευής, θεωρείται κάθε τέτοιο πεπερασμένο στοιχείο ξεχωριστά και για το λόγο αυτό αποσπάται από το σύμπλεγμα των στοιχείων που συνθέτουν την κατασκευή.
3. Αφού μελετηθεί και καθορισθεί η μηχανική συμπεριφορά κάθε στοιχείου ακολουθεί το τρίτο βήμα της διαδικασίας επίλυσης που είναι η σύνθεση της κατασκευής από τα επιμέρους πεπερασμένα στοιχεία, η κατάλληλη δηλαδή επανασύνδεση των στοιχείων προς σχηματισμό της διακριτοποιημένης κατασκευής. Η μηχανική συμπεριφορά κάθε στοιχείου καθορίζεται συνήθως από τη σχέση ανάμεσα στις δυνάμεις και τις μετατοπίσεις στους κόμβους του.

Ωστόσο, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι προσεγγιστική εφόσον ο αρχικός συνεχής φορέας (κατασκευή), για να μπορέσει να επιλυθεί, μετατρέπεται σε ένα ασυνεχές σύμπλεγμα πεπερασμένων στοιχείων. Όσο περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του ασυνεχούς μοντέλου υπολογισμού του αρχικού φορέα, όσο πιο ακριβές δηλαδή είναι το μηχανικό/υπολογιστικό προσομοίωμα του πραγματικού συστήματος, τόσο ακριβέστερα μπορούν να θεωρηθούν γενικώς τα αποτελέσματα (εφόσον βέβαια και η μηχανική συμπεριφορά των χρησιμοποιούμενων στοιχείων περιγράφεται ικανοποιητικά).

Γενικές αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το στοιχείο είναι η βασική δομική μονάδα με προκαθορισμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας.

Το πλέγμα προσομοιάζει με ιστό αράχνης, στον οποίο από κάθε κόμβο εκτείνεται ένα στοιχείο πλέγματος σε κάθε γειτονικό κόμβο. Το πλέγμα προγραμματίζεται ώστε να περιέχει τις δομικές ιδιότητες και τις ιδιότητες υλικού που καθορίζουν με ποιό τρόπο θα συμπεριφερθεί μία κατασκευή υπό ορισμένες συνθήκες φόρτισης.

Οι κόμβοι τοποθετούνται με ορισμένη πυκνότητα εντός του υλικού ανάλογα με τα επίπεδα τάσης που αναπτύσσονται σε κάθε συγκεκριμένη περιοχή. Περιοχές με μεγαλύτερη αναμενόμενη τάση θα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα κόμβων από αυτές που η αναμενόμενη τάση είναι μικρότερη.

Η επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος (mesh density) είναι σημαντικός παράγοντας επιτυχίας του μοντέλου, προκειμένου να επιλυθεί το υπό μελέτη πρόβλημα.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε λεπτότοιχες κατασκευές, όπως οι ανεμογεννήτριες είναι επιφανειακά στοιχεία, τα οποία διακρίνονται σε Plate Elements και Shell Elements. Το Plate Element είναι τριγωνικό στοιχείο επίπεδης έντασης-παραμόρφωσης 3 κόμβων και χρησιμοποιείται κυρίως για αναλύσεις μοντέλων με μικρές παραμορφώσεις. Το Shell Element είναι τετραπλευρικό ισοπαραμετρικό στοιχείο επίπεδης έντασης-παραμόρφωσης με 4 έως 32 κόμβους και χρησιμοποιείται σε λεπτά και παχιά κελύφη. Τα Shell Elements με περισσότερους κόμβους μπορούν να αποδώσουν καλύτερα την παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα και να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα.

5.3 Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα SOFiSTiK

Το πρόγραμμα SOFiSTiK είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που επιτρέπει στο μηχανικό την προσομοίωση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής. Είναι ικανό να δημιουργήσει τόσο το δίκτυο των στοιχείων κατά την προεπεξεργασία όσο και να μας βοηθήσει να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης μας.

Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται στην ανάλυσή μας είναι οι εξής:

- Οι μονάδες γεωμετρίας δίνονται σε m
- Το ειδικό βάρος εισάγεται σε kN/m^3
- Οι δυνάμεις δίνονται σε kN
- Η πίεση που εφαρμόζεται δίνεται σε MPa
- Οι τάσεις δίνονται σε MPa
- Τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης δίνονται σε MPa

5.3.1 Δημιουργία της γεωμετρίας του φορέα

Με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πύργου που περιγράφονται αναλυτικά στο 3ο Κεφάλαιο, δημιουργούμε τη γεωμετρία του φορέα.

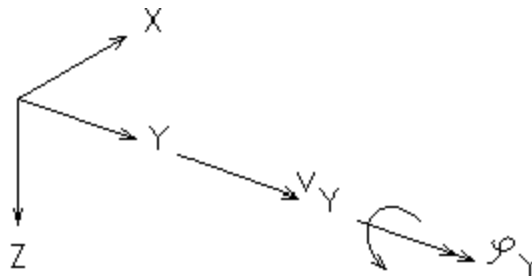
Στην προσομοίωση μας, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο από πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία είναι τετρακομβικά επιφανειακά στοιχεία κελύφους, συνολικά σε αριθμό 6948.

Για να δημιουργηθεί το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων ακολουθείται η εξής διαδικασία:

1. Η περιφέρεια της βάσης χωρίζεται σε 36 τμήματα, καθένα εκ των οποίων αντιστοιχεί σε γωνία $\theta = 10^\circ$. Θεωρώντας την αρχή των αξόνων στο κέντρο της περιφέρειας της βάσης και τον άξονα των z να έχει διεύθυνση προς τα κάτω (βλ. σχήμα 5.1), βρίσκουμε τις συντεταγμένες των σημείων της περιφέρειας της βάσης από τις σχέσεις:

$$x_i = R_1 \cos(\theta_i) \text{ και } y_i = R_1 \sin(\theta_i) \quad (5.1)$$

όπου $R_1 = 1.75m$ η ακτίνα της βάσης και $i = 1 - 36$.



Σχήμα 5.1: Σύστημα συντεταγμένων του SOFiSTiK

2. Θεωρούμε $z_1 = 0$ την πρώτη στάθμη και προχωράμε με βήμα $\Delta z_1 = \theta(\text{rad})R_1$, δηλ. όσο και το μήκος του τόξου που αντιστοιχεί σε γωνία $\theta = 10^\circ$ της πρώτης στάθμης. Έχουμε $z_2 = z_1 - \Delta z_1$.
3. Καθώς η ακτίνα τη κορυφής μειώνεται γραμμικά σε σχέση με την ακτίνα της βάσης του πύργου ($\tan \phi = \frac{1.75 - 1.25}{50} = \text{σταθ.}$), έχουμε $R_2 = R_1 - \tan(\phi)\Delta z_1$, η ακτίνα της δεύτερης στάθμης.
4. Οι συντεταγμένες των κόμβων δίνονται τώρα από τις σχέσεις:

$$x_i = R_2 \cos(\theta_i) \text{ και } y_i = R_2 \sin(\theta_i), \quad (5.2)$$
 με $i=37-72$
5. Για να υπολογιστούν οι συντεταγμένες των κόμβων στις επόμενες στάθμες χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$\Delta z_v = \theta(\text{rad})R_{v-1} \quad (5.3)$$

$$z_v = z_{v-1} - \Delta z_{v-1} \quad (5.4)$$

$$R_v = R_{v-1} - \tan(\phi)\Delta z_{v-1} \quad (5.5)$$
6. Δημιουργούμε το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Ενδεικτικά, στον παρακάτω πίνακα δίνεται ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται οι κόμβοι από τις πρώτες δύο στάθμες προκειμένου να προκύψουν τα πρώτα 36 πεπερασμένα στοιχεία κελύφους με αριστερόστροφη σύνδεση κόμβων.

Πίνακας 5.1: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

QUAD	1	1	2	38	37
	2	2	3	39	38
	3	3	4	40	39
	4	4	5	41	40
	5	5	6	42	41
	6	6	7	43	42
	7	7	8	44	43
	8	8	9	45	44
	9	9	10	46	45
	10	10	11	47	46
	11	11	12	48	47
	12	12	13	49	48
	13	13	14	50	49
	14	14	15	51	50
	15	15	16	52	51
	16	16	17	53	52
	17	17	18	54	53
	18	18	19	55	54
	19	19	20	56	55
	20	20	21	57	56
	21	21	22	58	57
	22	22	23	59	58
	23	23	24	60	59
	24	24	25	61	60
	25	25	26	62	61
	26	26	27	63	62
	27	27	28	64	63
	28	28	29	65	64
	29	29	30	66	65
	30	30	31	67	66
	31	31	32	68	67
	32	32	33	69	68
	33	33	34	70	69
	34	34	35	71	70
	35	35	36	72	71
	36	36	1	37	72

7. Εφόσον ολοκληρωθούν όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί στο Excel, η εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων του φορέα στο SOFiSTiK πραγματοποιείται μέσω της γλώσσας CANDINP υπό τη μορφή κειμένου. Το υποπρόγραμμα GENF είναι αυτό το οποίο δημιουργεί το βασικό δομικό σύστημα του φορέα.

8. Αρχικά, εισάγονται οι κόμβοι του μοντέλου. Ορίζονται από έναν αριθμό, τις συντεταγμένες τους στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων του SOFiSTiK, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1, και τις γεωμετρικές συνθήκες στήριξης. Οι πρώτοι 36 κόμβοι, που είναι οι κόμβοι της βάσης θεωρούνται πακτωμένοι στο έδαφος ενώ οι υπόλοιποι είναι ελεύθεροι. Η εντολή εισαγωγής κόμβου NODE συντάσσεται δίνοντας NO(Node number-Αριθμός κόμβου), X(X-coordinate - X-Συντεταγμένη), Y(Y-coordinate - Y-Συντεταγμένη), Z(Z-coordinate - Z-Συντεταγμένη) και FIX (Node constraint-Δέσμευση Κόμβου)

Η γραμμή εντολών παρουσιάζεται παρακάτω:

```

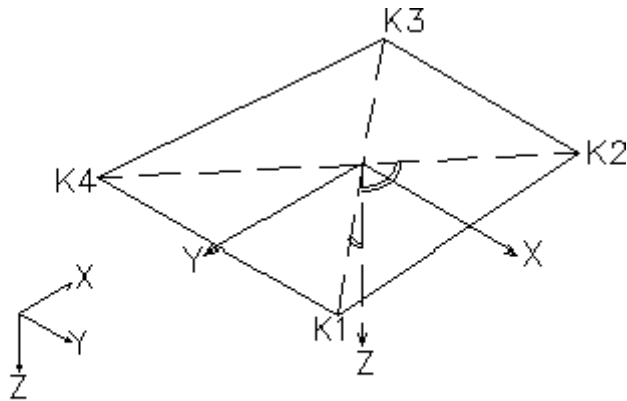
*PROG GENE urs:2
PAGE FIRS 1 LINE 65 LANO 1
ECHO FULL
SYST SPAC
NODE 1 1.7500 0.0000 0.0000 PP
2 1.7234 0.3039 0.0000 PP
3 1.6445 0.5985 0.0000 PP
4 1.5155 0.8750 0.0000 PP
5 1.3406 1.1249 0.0000 PP
6 1.1249 1.3406 0.0000 PP
7 0.8750 1.5155 0.0000 PP
8 0.5985 1.6445 0.0000 PP
9 0.3039 1.7234 0.0000 PP
10 0.0000 1.7500 0.0000 PP
11 -0.3039 1.7234 0.0000 PP
12 -0.5985 1.6445 0.0000 PP
13 -0.8750 1.5155 0.0000 PP
14 -1.1249 1.3406 0.0000 PP
15 -1.3406 1.1249 0.0000 PP
16 -1.5155 0.8750 0.0000 PP
17 -1.6445 0.5985 0.0000 PP
18 -1.7234 0.3039 0.0000 PP
19 -1.7500 0.0000 0.0000 PP
20 -1.7234 -0.3039 0.0000 PP
21 -1.6445 -0.5985 0.0000 PP
22 -1.5155 -0.8750 0.0000 PP
23 -1.3406 -1.1249 0.0000 PP

```

Εικόνα 5.1: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής κόμβων

9. Έπειτα, εισάγονται τα πεπερασμένα στοιχεία του μοντέλου και το πλέγμα τους. Τα στοιχεία κελύφους που χρησιμοποιούνται στο SOFiSTiK είναι επιφανειακά στοιχεία. Τα μεμονωμένα στοιχεία βρίσκονται πάντα σε επίπεδο κάθετο προς το διάνυσμα $((X3-X1) \cdot (X2-X4))$ των διαγωνίων και η απόκλιση τους από τους κόμβους λαμβάνεται υπόψη με τη βοήθεια των πρόσθετων εκκεντροτήτων. Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων είναι προσανατολισμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο τοπικός άξονας z να βρίσκεται κάθετα στο επίπεδο του πεπερασμένου στοιχείου, ενώ ο τοπικός άξονας x

μπορεί να επιλέγεται ελεύθερα. Ο προεπιλεγμένος προσανατολισμός είναι παράλληλος με το καθολικό x-y επίπεδο με γωνία μικρότερη ή ίση των 90 μοιρών σε σχέση με τον άξονα x και οι κόμβοι αριθμούνται αντίστροφα από τους δείκτες του ρολογιού. Εάν το επίπεδο του πεπερασμένου στοιχείου συμπίπτει με το καθολικό x-y επίπεδο, τότε το τοπικό και το καθολικό σύστημα συντεταγμένων ταυτίζονται.



Σχήμα 5.2: Πεπερασμένο επιφανειακό στοιχείο SOFiSTiK – Τοπικό σύστημα συντεταγμένων

Τα πεπερασμένα στοιχεία ορίζονται από έναν αριθμό, τους κόμβους από τους οποίους αποτελούνται, το υλικό και το πάχος τους.

Η εντολή δημιουργίας πεπερασμένου στοιχείου QUAD συντάσσεται δίνοντας NO(Element number-Αριθμός Στοιχείου), N1(Number of node 1-Αριθμός 1^{ου} κόμβου), N2(Number of node 2-Αριθμός 2^{ου} κόμβου), N3(Number of node 3-Αριθμός 3^{ου} κόμβου), N4(Number of node 4-Αριθμός 4^{ου} κόμβου), MNO (Element material number-Αριθμός υλικού στοιχείου) και T (Thickness t-Πάχος).

Η γραμμή εντολών είναι η εξής:

QUAD	1	1	2	38	37	MNO	1	T	0.02
	2	2	3	39	38	MNO	1	T	0.02
	3	3	4	40	39	MNO	1	T	0.02
	4	4	5	41	40	MNO	1	T	0.02
	5	5	6	42	41	MNO	1	T	0.02
	6	6	7	43	42	MNO	1	T	0.02
	7	7	8	44	43	MNO	1	T	0.02
	8	8	9	45	44	MNO	1	T	0.02
	9	9	10	46	45	MNO	1	T	0.02
	10	10	11	47	46	MNO	1	T	0.02
	11	11	12	48	47	MNO	1	T	0.02
	12	12	13	49	48	MNO	1	T	0.02
	13	13	14	50	49	MNO	1	T	0.02
	14	14	15	51	50	MNO	1	T	0.02
	15	15	16	52	51	MNO	1	T	0.02
	16	16	17	53	52	MNO	1	T	0.02
	17	17	18	54	53	MNO	1	T	0.02
	18	18	19	55	54	MNO	1	T	0.02
	19	19	20	56	55	MNO	1	T	0.02
	20	20	21	57	56	MNO	1	T	0.02
	21	21	22	58	57	MNO	1	T	0.02
	22	22	23	59	58	MNO	1	T	0.02
	23	23	24	60	59	MNO	1	T	0.02
	24	24	25	61	60	MNO	1	T	0.02
	25	25	26	62	61	MNO	1	T	0.02

Εικόνα 5.2: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής πεπερασμένων στοιχείων χαλύβδινου πύργου

Όσον αφορά το υλικό ο αριθμός 1 ορίζει το χάλυβα στην περίπτωση του πρώτου πύργου και το σύνθετο υλικό στην περίπτωση του δεύτερου και του τρίτου πύργου, για τους οποίους επεξηγείται αναλυτικότερα η διαστρωμάτωση στην επόμενη παράγραφο.

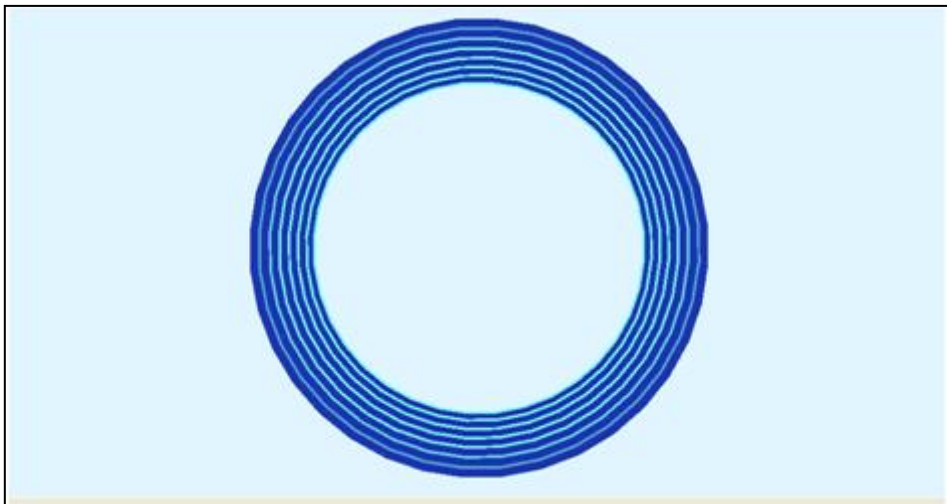
Το πάχος του κελύφους για τον πύργο από χάλυβα δεν είναι σταθερό καθ' ύψος αλλά παρουσιάζει μία σταδιακή μείωση όσο ανεβαίνουμε προς τα πάνω. Ο πύργος χωρίζεται σε 4 τμήματα: το 1^ο τμήμα είναι 5m και το πάχος του κελύφους είναι 20mm, το 2^ο και το 3^ο τμήμα είναι 15m το καθένα και το πάχος του κελύφους είναι 18 και 16mm αντίστοιχα, το 4^ο τμήμα είναι 15m και το πάχος του κελύφους είναι 12mm.

Το πάχος του υλικού για τον πύργο από σύνθετα υλικά είναι 30mm σε όλο το ύψος του. Ακόμη, λάβαμε υπόψη την πρόταση του Φιλόπουλου (βλ. παράγραφο 1.3.5) και υπολογίσαμε μήκος συναρμογής 2.50m ίσο με το 1/10 του μήκους του κάθε τμήματος αν θεωρήσουμε ότι ο πύργος αποτελείται από 2 τμήματα των 25 μέτρων. Στο μήκος αυτό επομένως όπως είναι φυσικό το πάχος του υλικού διπλασιάζεται.

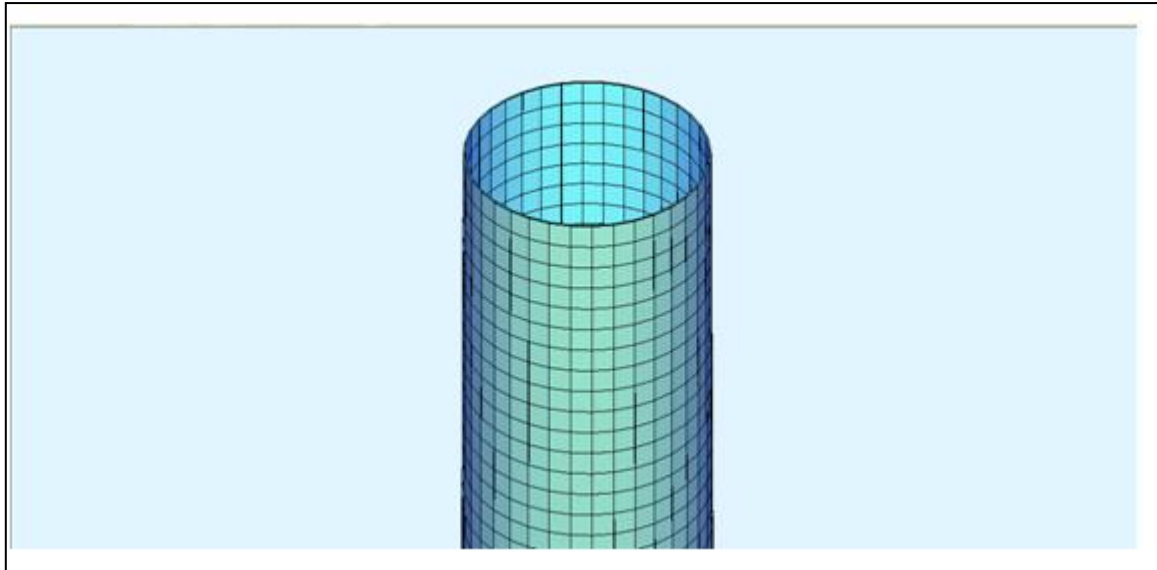
Η δομή που δημιουργείται είναι αποθηκευμένη στη βάση δεδομένων και μπορεί να παρασταθεί γραφικά από το πρόγραμμα Graf, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 5.3: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 5.4: Κάτοψη πύργου



Εικόνα 5.5: Διακριτοποίηση πύργου

5.3.2 Καθορισμός του υλικού

Μετά τη δημιουργία της βασικής γεωμετρίας του φορέα ορίζουμε τις ιδιότητες των υλικών μέσω του υποπρογράμματος AQUA. Το AQUA επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει διατομές με αυθαίρετη γεωμετρία και υλικά.

Όσον αφορά στο χαλύβδινο πύργο, το υλικό που χρησιμοποιείται είναι χάλυβας S355 και είναι ισότροπο και εισάγεται με την εντολή “STEE 1 S355”. Ο αριθμός 1 είναι αυθαίρετος.

```
+PROG AQUA urs:1
HEAD
ECHO FULL
STEE 1 S 355
END
```

Εικόνα 5.6: Ορισμός υλικού πρώτου πύργου –χάλυβας S355

Όσον αφορά τώρα στην ιδιαίτερη περίπτωση του πύργου από σύνθετα υλικά, το υλικό που χρησιμοποιείται είναι Graphite/Epoxy με κώδικα αλληλουχίας $[(+10/-10)_5]_T$ και $[(+30/-30)_5]_T$. Με τη συγκεκριμένη διαστρωμάτωση αναιρείται η ανισοτροπία και το υλικό είναι ειδικώς ορθότροπο (specially orthotropic).

Οι μηχανικές σταθερές του υλικού για τον κώδικα αλληλουχίας $[(+10/-10)_5]_T$ είναι $E_x = 10.49GPa, E_y = 107.84GPa, G_{xy} = 7.38GPa, \nu_{xy} = 0.03, \nu_{yx} = 0.27$ και για τον κώδικα αλληλουχίας $[(+30/-30)_5]_T$ είναι $E_x = 12.42GPa, E_y = 28.78GPa, G_{xy} = 7.38GPa, \nu_{xy} = 0.10, \nu_{yx} = 0.23$ όπως υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 3.

Οι παραπάνω μηχανικές σταθερές υπολογίστηκαν για γωνία μετασχηματισμού $\theta=80^\circ$ και $\theta=30^\circ$ αντίστοιχα. Κάτι τέτοιο έγινε σκόπιμα καθώς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων ενός πεπερασμένου στοιχείου του SOFiSTiK είναι στραμμένο κατά 90 μοίρες σε σχέση με το καθολικό σύστημα συντεταγμένων του. Έτσι, αυτές οι γωνίες μετασχηματισμού ανταποκρίνονται σε διαστρωμάτωση του καθολικού συστήματος συντεταγμένων $[(+10/-10)_5]_T$ και $[(+30/-30)_5]_T$.

Το υλικό σε αυτή την περίπτωση ορίζεται με την εντολή MATE δίνοντας NO(Material Number-Αριθμός Υλικού), E(Elastic Modulus-Μέτρο Ελαστικότητας), MUE(Poisson's Ratio-Λόγος Poisson, ανάμεσα στην τιμή 0 και 0.49), G(Shear Modulus-Μέτρο Διάτμησης), GAM(Specific Weight-Ειδικό Βάρος), E90(Anisotropic Elastic Modulus-Μέτρο Ελαστικότητας στην άλλη διεύθυνση), M90(Anisotropic Poisson's Ratio-Μέτρο ελαστικότητας στην άλλη διεύθυνση).

```
+PROG AQUA urs:1
HEAD
ECHO FULL
MATE 1 E 10.49*1000 MUE 0.03 G 7.38*1000 GAM 20 E90 107.84*1000 M90 0.27
END
```

Εικόνα 5.7: Ορισμός υλικού δεύτερου πύργου από σύνθετα υλικά

```
+PROG AQUA urs:1
HEAD
ECHO FULL
MATE 1 E 12.42*1000 MUE 0.10 G 8.76*1000 GAM 20 E90 28.78*1000 M90 0.23
END
```

Εικόνα 5.8: Ορισμός υλικού τρίτου πύργου από σύνθετα υλικά

5.3.3 Εφαρμογή των φορτίων

Μετά τη δημιουργία της γεωμετρίας και τον καθορισμό του υλικού, εφαρμόζουμε τα φορτία στο φορέα μας. Για την εφαρμογή των φορτίων χρησιμοποιείται το υποπρόγραμμα ASE.

Ανατρέχοντας στο κεφάλαιο 4 στις παραγράφους (4.6.1) και (4.6.2), τα φορτία εφαρμόζονται με τον εξής τρόπο:

- Το μόνιμο φορτίο λόγω ίδιου βάρους του πύργου εισάγεται με την εντολή DLZ=1.00 (Dead Weight Factor).
- Η κατακόρυφη συγκεντρωμένη δύναμη F_z μοιράζεται στους κόμβους της κορυφής και επιβάλλεται σε καθέναν από αυτούς ως επικόμβια δύναμη κατά τη φορά του θετικού άξονα z του συστήματος συντεταγμένων. Οι επικόμβιες δυνάμεις εισάγονται με την εντολή "NL", δίνοντας NO(Node Number-Αριθμός Κόμβου) και PZ(Load in Z-direction-Φορτίο στη Z-διεύθυνση).

- Η οριζόντια συγκεντρωμένη δύναμη F_x επίσης μοιράζεται στους κόμβους της κορυφής του πύργου και εφαρμόζεται ως επικόμβια δύναμη κατά τη φορά του θετικού άξονα x του συστήματος συντεταγμένων. Εισάγεται με την εντολή “NL” δίνοντας αυτή τη φορά PX(Load in X-direction-Φορτίο στη X-διεύθυνση)
- Οι καμπτικές ροπές M_x και M_y στην κορυφή του πύργου μετατρέπονται σε ζεύγη δυνάμεων F_z τα οποία επιβάλλονται ως επικόμβιες δυνάμεις στον κόμβους της κορυφής και αντισυμμετρικά των αξόνων x και y προκειμένου να δημιουργήσουν καμπτικές ροπές κατά το θετικό άξονα x και y αντίστοιχα. Οι τιμές των F_z για κάθε περίπτωση φόρτισης εισάγονται με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω.
- Οι στρεπτικές ροπές M_z στην κορυφή του πύργου μετατρέπονται επίσης σε ζεύγη δυνάμεων στο επίπεδο x-y και εφαρμόζονται με τη μορφή επικόμβιων οριζόντιων δυνάμεων στους κόμβους της κορυφής και με τέτοια φορά ώστε να δημιουργούν στρεπτική ροπή M_z .
- Οι πιέσεις του ανέμου που δρουν στην επιφάνεια του πύργου εισάγονται με την εντολή “ELLO”. Για τα πρώτα 10m, η τιμή της πίεσης είναι σταθερή ενώ μετά τα 10m θεωρούμε γραμμική αύξηση αυτής. Η εντολή ‘ELLO’ συντάσσεται ως εξής: FROM(Start Element Number-Αριθμός Στοιχείου Αρχής), TO(End Element Number-Αριθμός στοιχείου τέλους), INC(Increment-Αύξηση), P(Load Value- Τιμή Φορτίου, εδώ PXP, Global X Loading-Φόρτιση στον Καθολικό Άξονα X), DPZ(Load Increase in Z-direction- Αύξηση Φορτίου κατά τη Z-διεύθυνση) και QUAD(Load acts only at QUAD- Το φορτίο ασκείται μόνο στο πεπερασμένο στοιχείο).

Το DPZ χρησιμοποιείται για να καθορίσει φορτία που μεταβάλλονται καθ’ ύψος, αλλά μόνο για στοιχεία QUAD. Στην περίπτωση αυτή το φορτίο P αντιπροσωπεύει την πίεση στη στάθμη z=0 και DPZ είναι η αύξηση με το ύψος. Η φόρτιση σε κάποιο σημείο δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P(z) = P + z \cdot DPZ \quad (5.6)$$

```
+PROG ASE rs:3 urs:3
HEAD
PAGE LINE 65 LANO 1
ECHO LOAD
ECHO FORC
ECHO DISP
ECHO REAC
CTRL QTFP
HEAD SYNDYASMOS DRASEWN 1
LC 1 DLZ 1.00
NL 6985 PX 358.35
NL 6985 PZ 455.39
NL 6985 MX 1145.45
NL 6985 MY 2236.34
ELLO 1 1224 1 PXP 1.29 0.00 QUAD
ELLO 1225 6948 1 PXP 1.29 -0.01525278363 QUAD
```

Εικόνα 5.9: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής 1^{ου} συνδυασμού φορτίσεων

- Τέλος, δίνονται τα δεδομένα του φάσματος σχεδιασμού του ΕΑΚ του σεισμού σύμφωνα με την παράγραφο (4.3). Χρησιμοποιούμε ελαστικό φάσμα σχεδιασμού για το λόγο ότι απαιτούμε ελαστική συμπεριφορά της κατασκευής έναντι κόπωσης.
Η γραμμή εντολών είναι η εξής:

```
+prog DYNA M 130000000 -e urs:6
head euresh idiomorfwn
echo eige full
MASS -899      $ upologismos sugkentrwmenwn pros8etwn mazwn (apo Lc 899)
eige 20   lc   1031   type lanc

#DEFINE FASMA      $ dedomena fasmatos sxediasmou
LET#g1  1.00      $ suntelesths spoudaiothtas s2
LET#U   1.00      $ suntelsths epirohs 8emeliwshs
LET#bo  2.5       $ suntelesths fasmatikhs mege8unshs
LET#q   1.00      $ suntelesths sumperiforas kataskeuhs
LET#n   1.183     $ dior8wtikos suntelesths aposveshs
LET#a   0.16      $ seismikh epitaxunsh edafous A=ag
LET#T1  0.15      $ karakthristikes periodoi fasmatos (edafos B)
LET#T2  0.60
LET#Fm  0.25      $ elaxisth epitrepth - sxesh (2.3) EAK 2000
LET#S   #a*#g1*9.81  $ P #a*#g1*10  afou sth metatroph fortiwn se mazes exoume (1/g=0.1)
LET#SB  #S*#n*#U*#bo/#q
LET#Sm  #S*#Fm
LET#T3  #T2*(#SB/#Sm)^1.5
#ENDDF

+prog DYNA M 130000000 urs:5
head ÓÁÉÓÍÍÓ Åx
```

Εικόνα 5.10: Παράθυρο διαλόγου εισαγωγής φάσματος σεισμού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - Ανάλυση του φορέα με το πρόγραμμα SOFiSTiK και παρουσίαση των αποτελεσμάτων

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατικής και ιδιομορφικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα SOFiSTiK και πραγματοποιούνται ανάλογες συγκρίσεις μεταξύ του πύργου από χάλυβα και των δύο πύργων από σύνθετα υλικά.

6.2 Στατική Ανάλυση

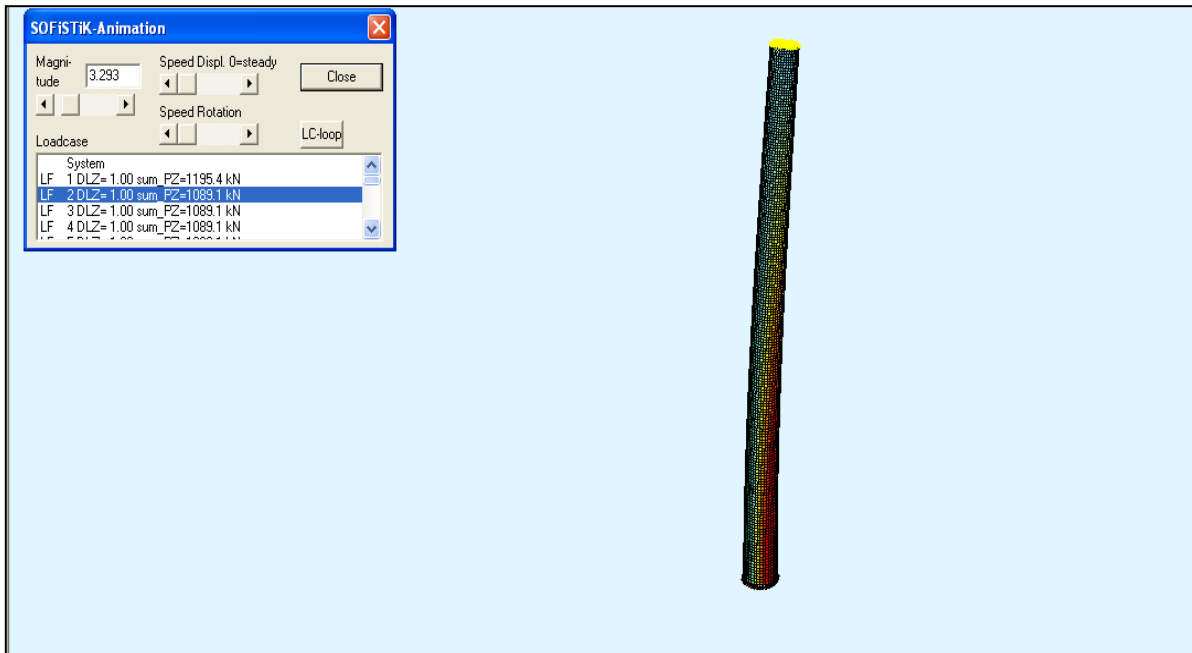
Προκειμένου να ελέγξουμε την παραμορφωμένη γεωμετρία του κάθε φορέα καθώς και το αν τελικά έχουμε αστοχία του υλικού του, τρέχουμε τις στατικές αναλύσεις των φορέων για κάθε συνδυασμό φόρτισης.

Ο 2^{ος} συνδυασμός φόρτισης είναι ο δυσμενέστερος, γι αυτό το λόγο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης που προέκυψαν μόνο από αυτό το συνδυασμό.

6.2.1 Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα

Το όριο λειτουργικότητας της πλευρικής μετατόπισης ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ του περυγίου του ρότορα και του πύργου. Βάσει των προδιαγραφών που δίνονται για την ανεμογεννήτρια, το όριο αυτό λαμβάνει τιμή 1.0.

- Στην περίπτωση του χαλύβδινου πύργου, η συνολική πλευρική μετατόπιση της κορυφής είναι 0.779m και μικρότερη από το όριο λειτουργικότητας του.



Εικόνα 6.1: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα από χάλυβα

```

Loadcasenumber Title
      1 DLZ= 1.00 sum_PZ=1195.4 kN
      2 DLZ= 1.00 sum_PZ=1089.1 kN
      3 DLZ= 1.00 sum_PZ=1089.1 kN
      4 DLZ= 1.00 sum_PZ=1089.1 kN
      5 DLZ= 1.00 sum_PZ=1089.1 kN
      6 DLZ= 1.00 sum_PZ=1089.1 kN
      9 DLZ= 1.00 sum_PZ=1195.4 kN
    452 MAX S      (CQC )
    462 MAX S      (CQC )

Printvolume : Max. or/and min. values
              for all selected columns of results with
              corresponding values of selected load cases
              and elements.
Loadcases   : 1-462
Elements    : All

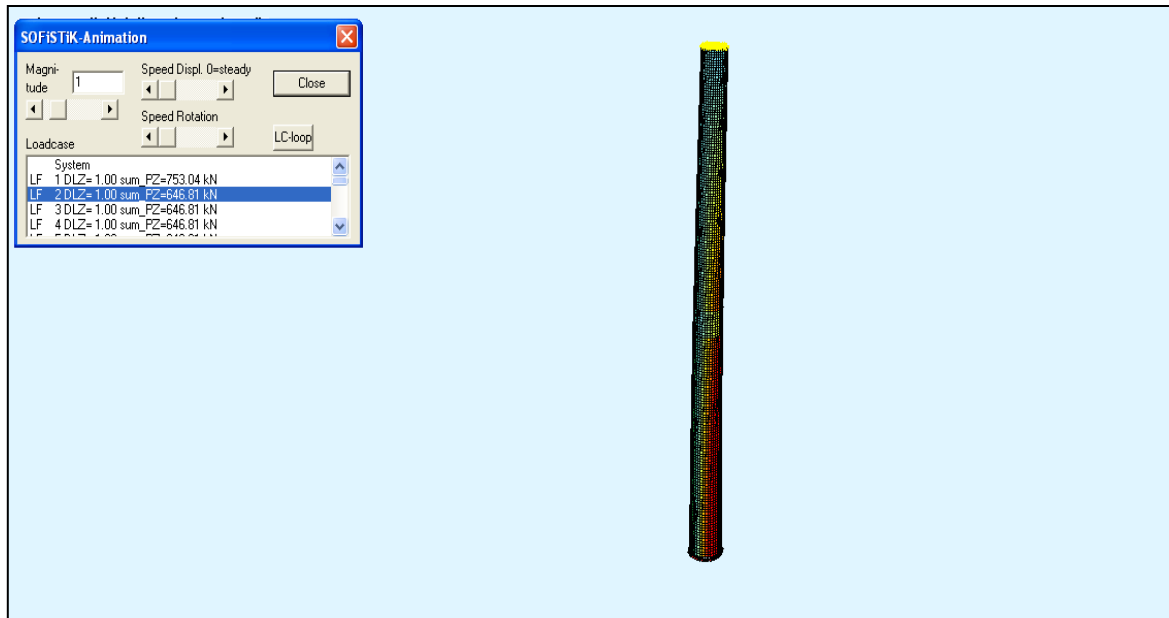
Nodes

Nodal Displacements
Node.  LC Name      VX      VY      VZ      PHIX      PHIY      PHIZ
Nr     Nr           [mm]    [mm]    [mm]    [mrad]    [mrad]    [mrad]
  1     1 MINZ-VX      0.000    0.000    0.000   -0.026    -1.969    0.000
6976   2 MAXZ-VX     778.692   14.299    0.009    0.687   -24.068    1.878
6967   6 MINZ-VY     267.334   -0.984   -8.999    0.000    -7.898    0.788
6949  462 MAXZ-VY      0.000   144.942    0.000    4.596     0.000    0.000
5743   2 MINZ-VZ     592.411     7.750  -30.428    0.464   -23.658    1.457
5797   2 MAXZ-VZ     603.376   11.864   31.988    0.603   -23.731    1.466

```

Εικόνα 6.2: Παράθυρο παρουσίασης αποτελεσμάτων μετατοπίσεων για το χαλύβδινο πύργο

- Στην περίπτωση του πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση $[(+10/-10)_5]_T$, η συνολική πλευρική μετατόπιση της κορυφής είναι 1.038m και ελάχιστα μεγαλύτερη από το όριο λειτουργικότητας του.



Εικόνα 6.3: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση $[(+10/-10)_5]_T$

```

Loadcasenumber Title
      1 DLZ= 1.00 sum_PZ=753.04 kN
      2 DLZ= 1.00 sum_PZ=646.81 kN
      3 DLZ= 1.00 sum_PZ=646.81 kN
      4 DLZ= 1.00 sum_PZ=646.81 kN
      5 DLZ= 1.00 sum_PZ=646.81 kN
      6 DLZ= 1.00 sum_PZ=646.81 kN
      9 DLZ= 1.00 sum_PZ=753.04 kN
    452 MAX S (CQC )
    462 MAX S (CQC )

Printvolume : Max. or/and min. values
for all selected columns of results with
corresponding values of selected load cases
and elements.
Loadcases : 1-462
Elements : All

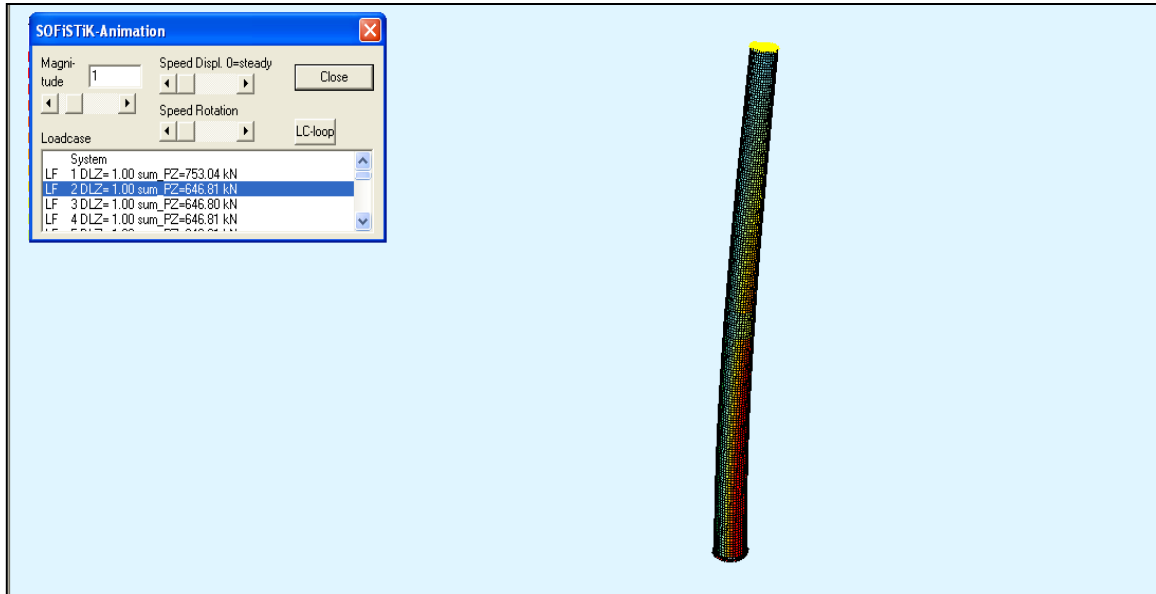
Nodes

Nodal Displacements
Node. LC Name VX VY VZ PHIX PHIY PHIZ
Nr Nr [mm] [mm] [mm] [mrad] [mrad] [mrad]
  1 1 MINZ-VX 0.000 0.000 0.000 -0.004 -0.876 0.000
6976 2 MAXZ-VX 1032.465 17.855 -0.313 0.869 -30.047 13.362
6967 6 MINZ-VY 351.327 -7.007 -11.537 0.000 -9.857 5.605
6965 462 MAXZ-VY 0.178 472.462 6.493 15.179 0.123 0.000
5743 2 MINZ-VZ 780.203 -1.516 -38.312 0.201 -30.339 10.236
5797 2 MAXZ-VZ 794.231 26.104 39.650 1.134 -30.422 10.412

```

Εικόνα 6.4: Παράθυρο παρουσίασης αποτελεσμάτων μετατοπίσεων για τον πύργο από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση $[(+10/-10)_5]_T$

- Στην περίπτωση του πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση $[(+30/-30)_5]_T$, η συνολική πλευρική μετατόπιση της κορυφής είναι 3.690m και πολύ μεγαλύτερη από το όριο λειτουργικότητας του.



Εικόνα 6.5: Παραμορφωμένη γεωμετρία φορέα από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση $[(+30/-30)_5]_T$

```

Loadcasenumber Title
1 DLZ= 1.00 sum_PZ=753.04 kN
2 DLZ= 1.00 sum_PZ=646.81 kN
3 DLZ= 1.00 sum_PZ=646.80 kN
4 DLZ= 1.00 sum_PZ=646.81 kN
5 DLZ= 1.00 sum_PZ=646.81 kN
6 DLZ= 1.00 sum_PZ=646.81 kN
9 DLZ= 1.00 sum_PZ=298.65 kN
452 MAX S (CQC )
462 MAX S (CQC )

Printvolume : Max. or/and min. values
for all selected columns of results with
corresponding values of selected load cases
and elements.
Loadcases : 1-462
Elements : All

Nodes

Nodal Displacements
Node. LC Name VX VY VZ PHIX PHIY PHIZ
Nr Nr [mm] [mm] [mm] [mrad] [mrad] [mrad]
91 9 MINZ-VX -0.006 0.000 0.019 0.000 -0.002 0.000
6976 2 MAXZ-VX 3689.931 67.036 -1.161 3.238 -112.929 11.257
6967 6 MINZ-VY 1268.282 -5.916 -43.439 0.000 -37.092 4.722
6949 5 MAXZ-VY 960.126 448.101 37.033 21.599 -27.326 0.731
5743 2 MINZ-VZ 2811.212 33.876 -143.859 2.086 -111.177 8.645
5833 2 MAXZ-VZ 2888.384 58.694 148.864 2.932 -111.740 8.836

```

Εικόνα 6.6: Παράθυρο παρουσίασης αποτελεσμάτων μετατοπίσεων για τον πύργο από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση $[(+30/-30)_5]_T$

Και στις τρεις περιπτώσεις, η παραμορφωμένη κατάσταση το φορέα είναι αυτή που περιμέναμε λόγω της μορφής των φορτίων που επιβάλλονται στην κορυφή αλλά κυρίως λόγω της επίδρασης του ανέμου.

Θα πρέπει ωστόσο να λάβουμε υπόψη ότι τα φορτία που μεταφέρονται από την ανεμογεννήτρια στον πύργο, εφαρμόστηκαν στο φορέα μας ως επικόμβιες δυνάμεις μόνο στους κόμβους της κορυφής, γεγονός που προκαλεί δυσμενέστερα αποτελέσματα τοπικά.

6.2.2 Αποτελέσματα κριτηρίων Von Mises και Μέγιστης Τάσης

Για τη γραφική απεικόνιση των κριτηρίων Von Mises και Μέγιστης Τάσης, επιλέγουμε να εμφανιστούν οι τάσεις στα πεπερασμένα στοιχεία.

Στην περίπτωση των ισότροπων ελαστικών υλικών και κυρίως των ιδεατών όλκιμων υλικών, όπως είναι ο χάλυβας που εξετάζουμε στην παρούσα εργασία, μπορούμε να κάνουμε χρήση της ισοδύναμης τάσης Von Mises για να ελέγξουμε αν το υλικό αστοχεί.

Πιο αναλυτικά, όταν ένα ελαστικό σώμα υποβάλλεται σε τριαξονική φόρτιση, αναπτύσσεται ένα πολύπλοκο τριαξονικό σύστημα τάσεων. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε σημείο του σώματος αναπτύσσονται τάσεις που δρουν σε διαφορετικές διευθύνσεις ενώ το μέτρο και η διεύθυνση αυτών μεταβάλλονται από σημείο σε σημείο. Το κριτήριο Von Mises χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συνδυασμού των τάσεων που μπορεί να προκαλέσει αστοχία σε συγκεκριμένο σημείο. Σε κάθε σημείο υπολογίζονται τρεις κύριες τάσεις, οι οποίες ενεργούν κατά τη x, y και z διεύθυνση (κύριοι άξονες των οποίων η διεύθυνση αλλάζει από σημείο σε σημείο). Ο Von Mises παρατήρησε ακόμη ότι και στην περίπτωση που καμία από τις κύριες τάσεις δεν υπερβαίνει την τιμή της τάσης διαρροής του υλικού, ωστόσο είναι δυνατόν ο συνδυασμός αυτών να προκαλέσει διαρροή. Το κριτήριο Von Mises λοιπόν, είναι η μαθηματική έκφραση του συνδυασμού των τριών κύριων τάσεων σε μία ισοδύναμη τάση με την οποία στη συνέχεια συγκρίνεται η τάση διαρροής του υλικού.

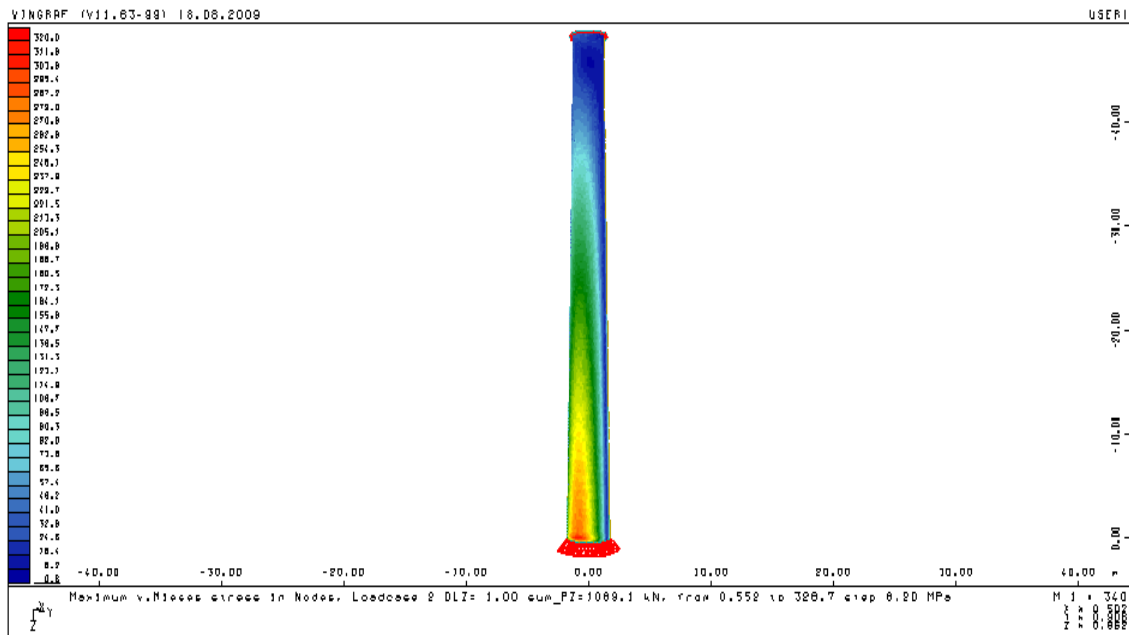
Η ισοδύναμη τάση είναι γνωστή ως τάση Von Mises και όταν η τιμή της ξεπεράσει αυτή την τάση διαρροής, τότε θεωρούμε ότι το υλικό αστοχεί. Η μαθηματική έκφραση της ισοδύναμης τάσης δίνεται με τον εξής τύπο:

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

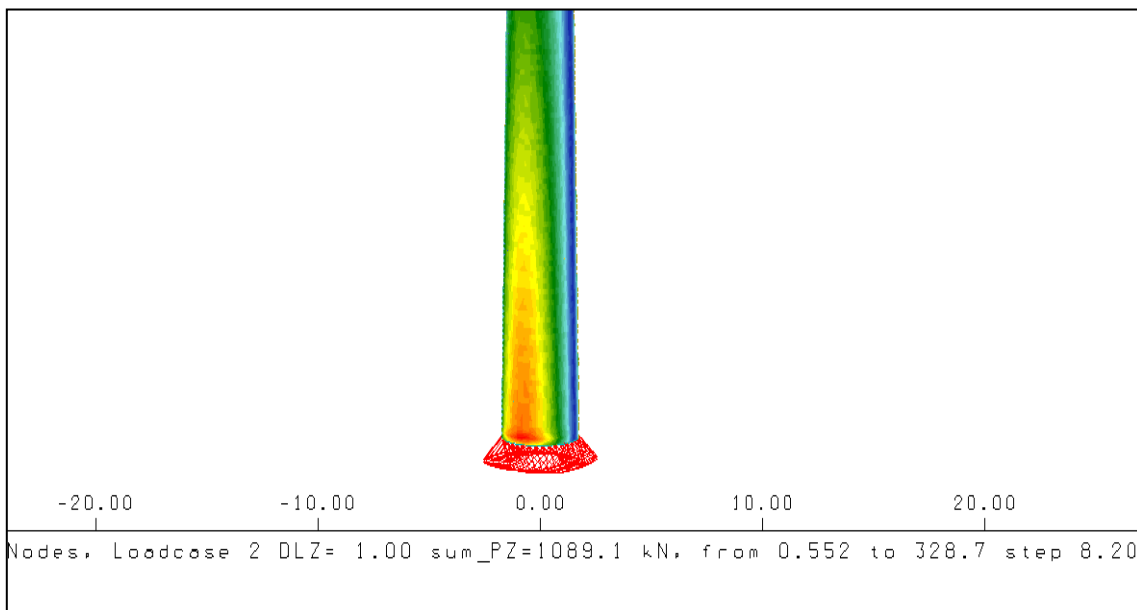
όπου σ_u είναι η τάση Von Mises

και $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ είναι οι κύριες τάσεις

Τα αποτελέσματα της κατανομής των τάσεων Von Mises απεικονίζονται γραφικά στις εικόνες 6.7 και 6.8.



Εικόνα 6.7: Γραφική απεικόνιση τάσεων Von Misses στοιχείων χαλύβδινου πύργου S355



Εικόνα 6.8: Γραφική απεικόνιση τάσεων Von Misses στη βάση του χαλύβδινου πύργου

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται κοντά στη βάση του πύργου και έχει τιμή 328.7MPa. Με βάση τα όσα αναφέραμε πιο πάνω για το κριτήριο αστοχίας Von Mises, εφόσον η μέγιστη τιμή της τάσης Von Mises δεν ξεπερνά την τάση διαρροής $f_y=355\text{MPa}$ του χάλυβα S355, θεωρούμε πως το υλικό δεν αστοχεί και πύργος μπορεί να αναλάβει με ασφάλεια τα επιβαλλόμενα φορτία σχεδιασμού του 2ου συνδυασμού φόρτισης, που θεωρείται και ο πιο δυσμενής.

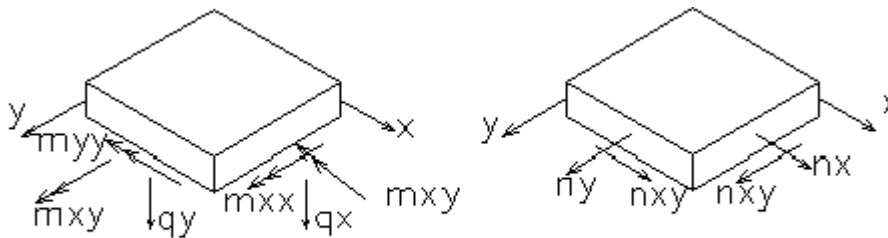
Στην περίπτωση τώρα του πύργου από σύνθετα υλικά, γνωρίζουμε ότι τα κριτήρια αστοχίας των ισότροπων υλικών δε μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας στα σύνθετα υλικά. Στις διαστρωματώσεις από σύνθετα υλικά που εξετάζουμε, κάθε στρώση μπορεί να εμφανίσει ορθές εφελκυστικές, θλιπτικές τάσεις κατά τη διεύθυνση των ινών και κάθετα σε αυτές αλλά και διατμητικές τάσεις. Απαιτείται επομένως ο προσδιορισμός ενός κριτηρίου αστοχίας για τον έλεγχο κάθε στρώσης. Τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια αστοχίας των σύνθετων υλικών είναι τα: κριτήριο μέγιστης τάσης, κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης, κριτήριο Tsai-Hill και κριτήριο Tsai-Wu.

Στην παρούσα εργασία επιλέξαμε το κριτήριο μέγιστης τάσης. Το κριτήριο μέγιστης τάσης διατυπώθηκε από τον Jenkins (1920) για τα ορθότροπα υλικά και αποτελεί επέκταση του κριτηρίου Rankine για τα ισότροπα. Ωστόσο απαιτεί την εισαγωγή των τιμών της τάσης αστοχίας σε εφελκυσμό και σε θλίψη και της τάσης αστοχίας σε διάτμηση. Οι τιμές αυτές X , X' , Y , Y' , S είναι γνωστές από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 3.

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, αστοχία λαμβάνει χώρα όταν δεν ικανοποιείται έστω μία από τις παρακάτω σχέσεις:

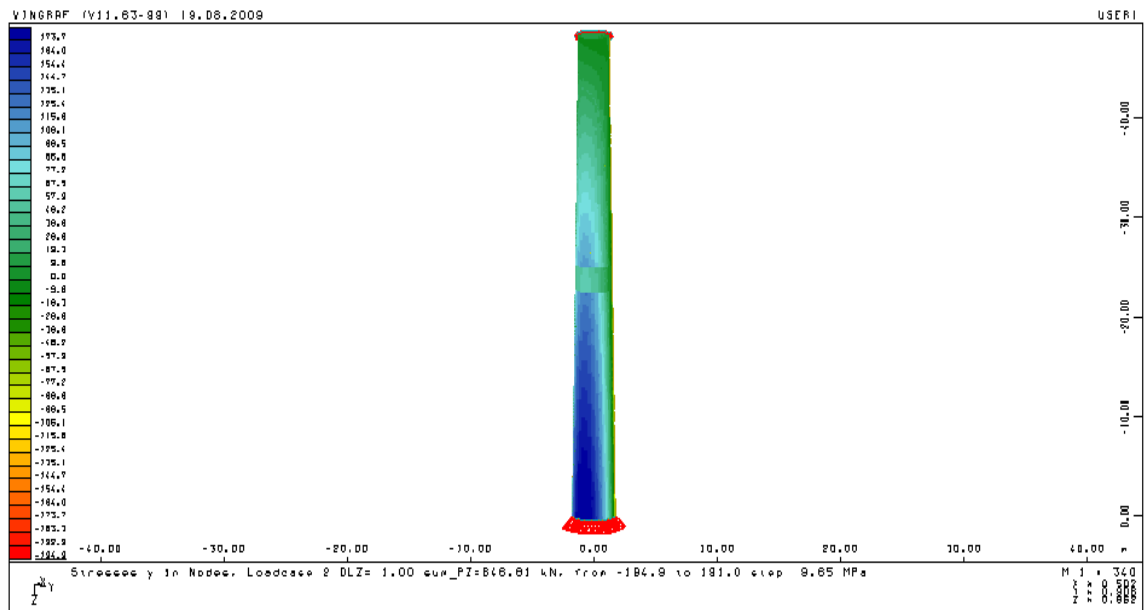
$$X' < \sigma_1 < X \quad Y' < \sigma_2 < Y \quad \tau_{12} < S$$

Προκειμένου λοιπόν να ελεγχθεί το κριτήριο μέγιστης τάσης απεικονίζονται τα αποτελέσματα των τάσεων $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$. Δίνεται το τοπικό σύστημα συντεταγμένων για ένα πεπερασμένο στοιχείο στο SOFiSTiK.

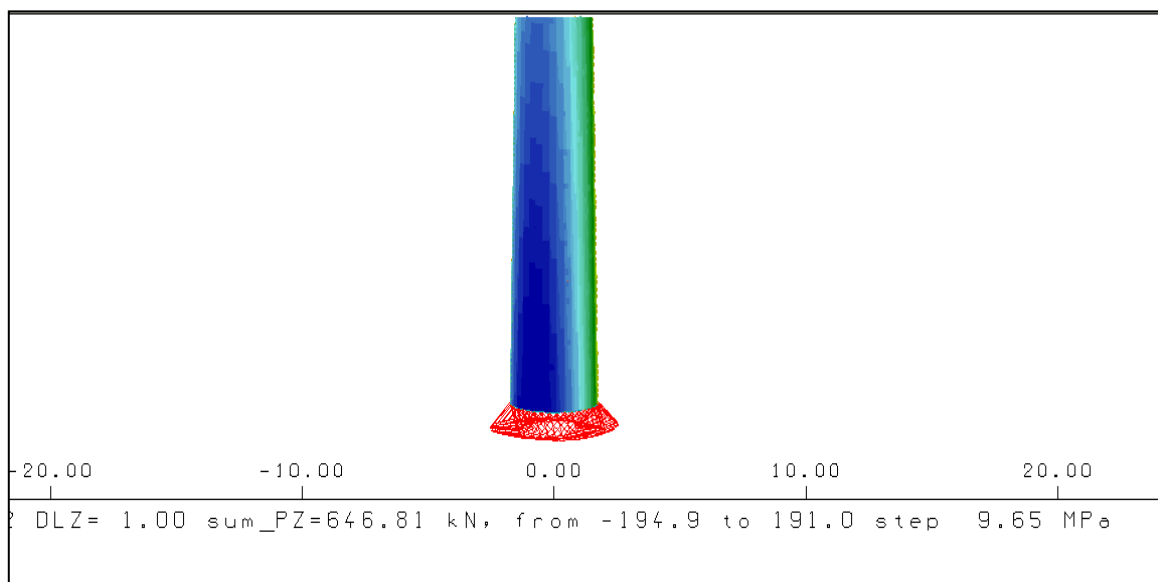


Σχήμα 6.1:Τοπικό σύστημα συντεταγμένων SOFiSTiK

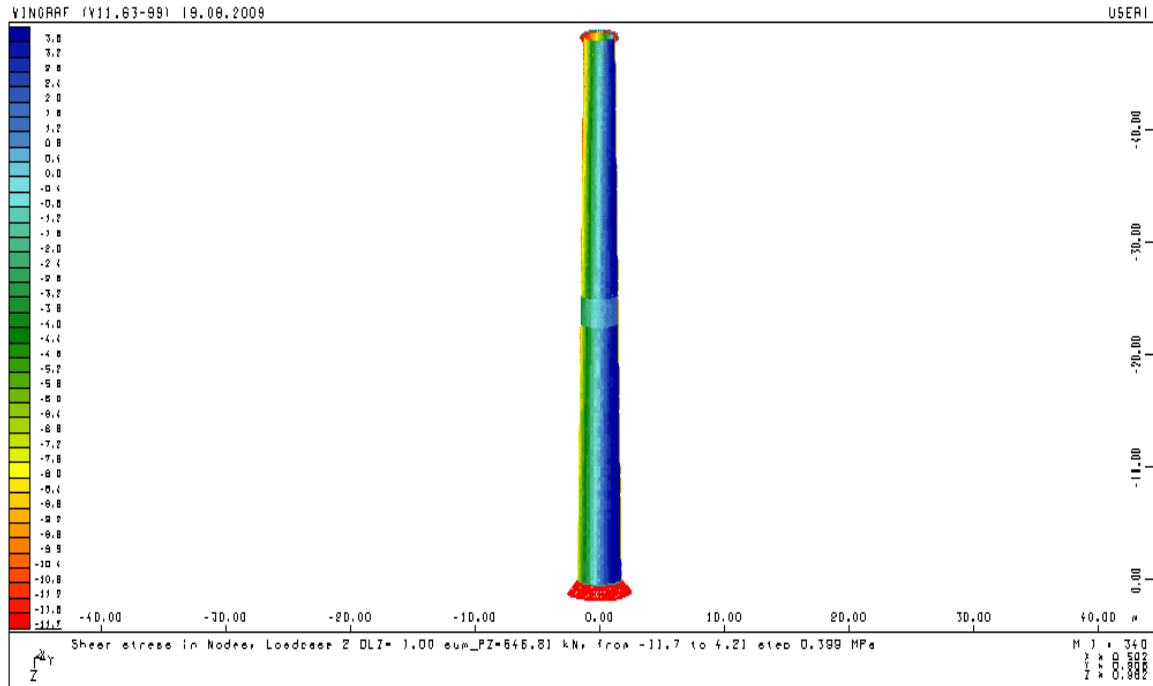
Τα αποτελέσματα της κατανομής των τάσεων για το πύργο με διαστρωμάτωση [(+10/-10)₅]_T απεικονίζονται γραφικά στις εικόνες 6.9, 6.10, 6.11:



Εικόνα 6.9: Γραφική απεικόνιση τάσεων σ_y του πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση [(+10/-10)₅]_T



Εικόνα 6.10: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης τάσεων σ_y στη βάση του πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση [(+10/-10)₅]_T



Εικόνα 6.11: Γραφική απεικόνιση τάσεων τ_{xy} πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση $[(+10/-10)_5]_T$

Χρησιμοποιώντας το μητρώο μετασχηματισμού των τάσεων από το στραμμένο σύστημα x-y στο σύστημα 1-2, προσδιορίζουμε τις κύριες τάσεις για το 2^ο πύργο:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 186.71 \\ 5.00 \\ 28.59 \end{Bmatrix}$$

και εφαρμόζοντας το κριτήριο μέγιστης τάσης έχω:

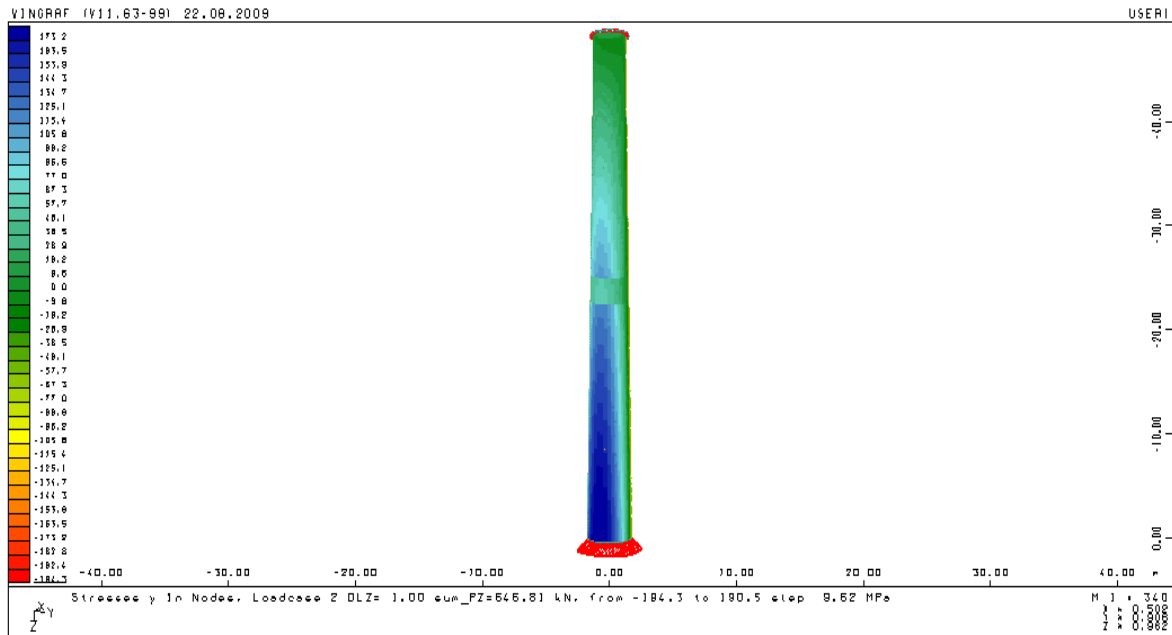
$$-1500 < 186.71 < 1500$$

$$-246 < 5 < 40$$

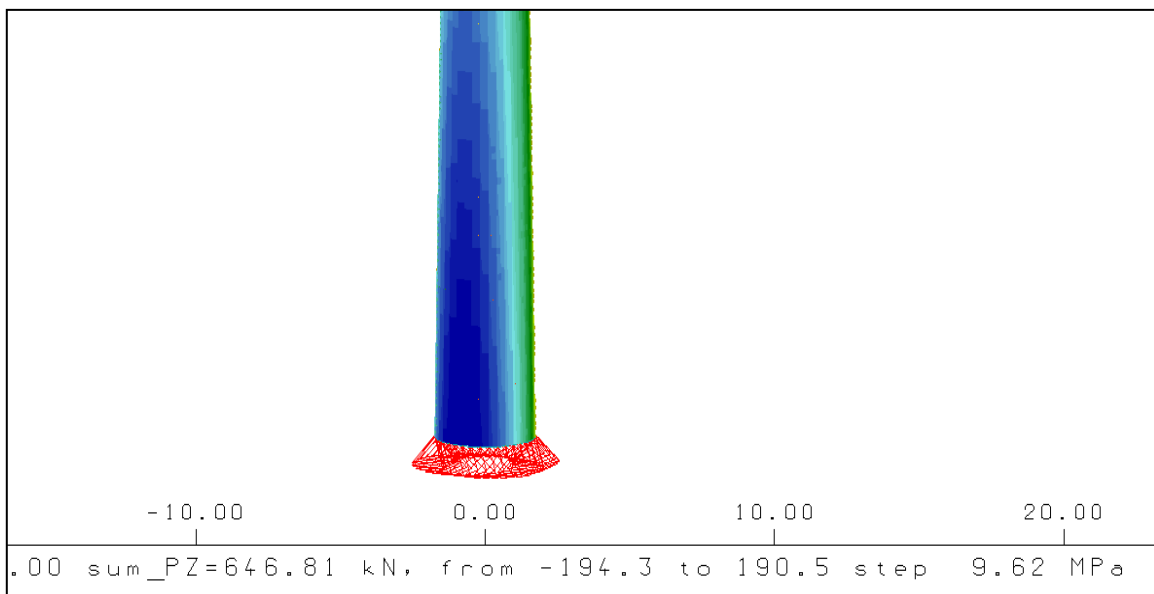
$$28.59 < 68$$

Επομένως, το υλικό του 2^{ου} πύργου δεν αστοχεί και θεωρούμε ότι μπορεί να αναλάβει τα φορτία που επιβάλλονται με το δυσμενέστερο συνδυασμό.

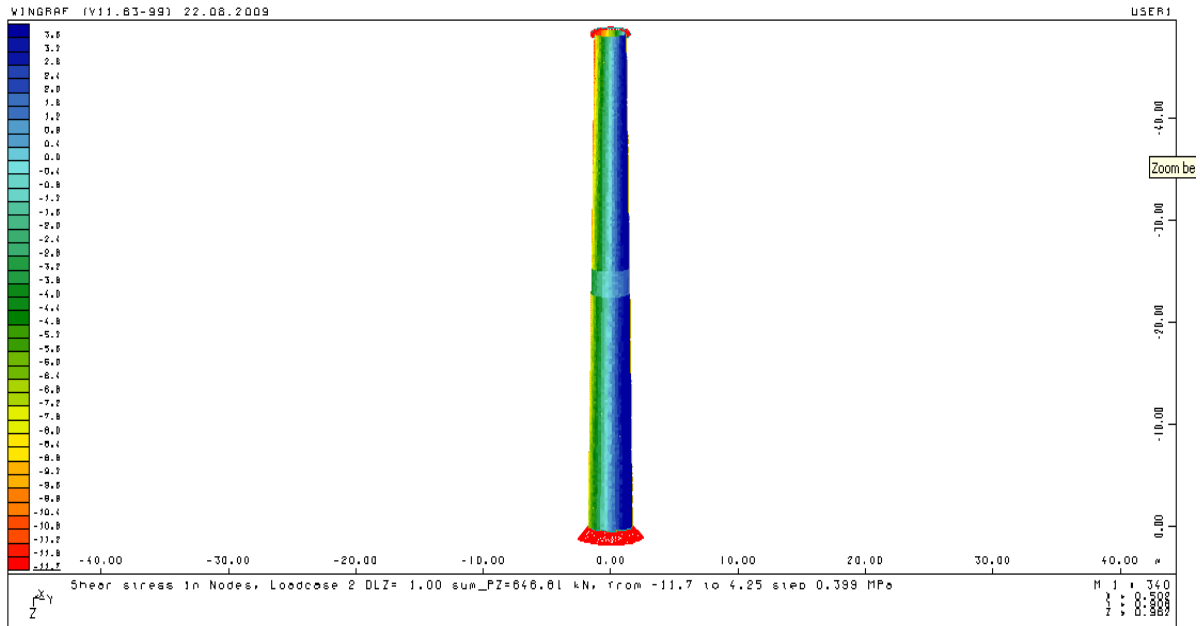
Τα αποτελέσματα της κατανομής των τάσεων για το πύργο με διαστρωμάτωση [(+30/-30)₅]_T απεικονίζονται γραφικά στις εικόνες 6.12, 6.13, 6.14:



Εικόνα 6.12: Γραφική απεικόνιση τάσεων σ_y του πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση [(+30/-30)₅]_T



Εικόνα 6.13: Γραφική απεικόνιση συγκέντρωσης τάσεων σ_y στη βάση του πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση [(+30/-30)₅]_T



Εικόνα 6.14: Γραφική απεικόνιση τάσεων τ_{xy} πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση $[(+30/-30)_5]_T$

Για τον 3ο πύργο τώρα έχουμε:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 147.07 \\ 44.62 \\ 28.59 \end{Bmatrix}$$

και εφαρμόζοντας το κριτήριο μέγιστης τάσης:

$$-1500 < 147.07 < 1500$$

$$44.62 > 40$$

$$28.59 < 68$$

Επομένως, το υλικό του 3^{ου} πύργου αστοχεί και θεωρούμε ότι δε μπορεί να αναλάβει τα φορτία που επιβάλλονται με το δυσμενέστερο συνδυασμό.

Τέλος, παρατηρούμε ότι στο μήκος συναρμογής των δύο τμημάτων η τιμή των τάσεων είναι μειωμένη καθώς έχουμε θεωρήσει διπλάσιο πάχος υλικού κατά την προσομοίωση της σύνδεσης του κάτω και του άνω τμήματος.

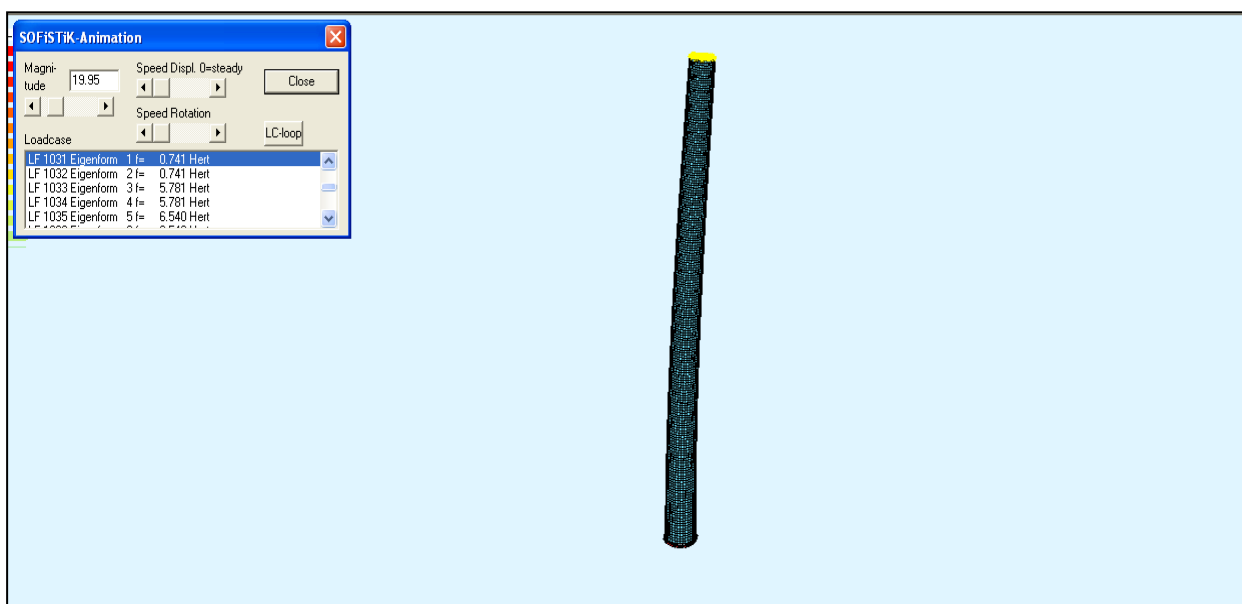
6.3 Ιδιομορφική Ανάλυση

Η ανεμογεννήτρια ως κατασκευή έχει το χαρακτηριστικό ότι αποτελείται από διάφορα μηχανολογικά και κατασκευαστικά μέρη που είτε εισάγουν ταλαντώσεις σε άλλα μέρη είτε ταλαντώνονται τα ίδια. Είναι χαρακτηριστικό ότι το καθένα ταλαντώνεται με το δικό του τρόπο. Τα κύρια μέρη που εκτελούν ταλαντώσεις είναι ο ρότορας που αποτελεί το κύριο μηχανολογικό κομμάτι και ο πύργος που αποτελεί το κύριο κατασκευαστικό. Κύρια επιδίωξη λοιπόν σίγουρα πρέπει να αποτελεί ο σχεδιασμός των μελών με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται ο συντονισμός τους. Για το λόγο αυτό απαιτούνται λεπτομερείς δυναμικές αναλύσεις και ακριβείς υπολογισμοί των ιδιοπεριόδων των μελών μιας ανεμογεννήτριας. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο συντονισμού θα πρέπει η συχνότητα περιστροφής του ρότορα να είναι διαφορετική τη συχνότητα ταλάντωσης της κατασκευής.

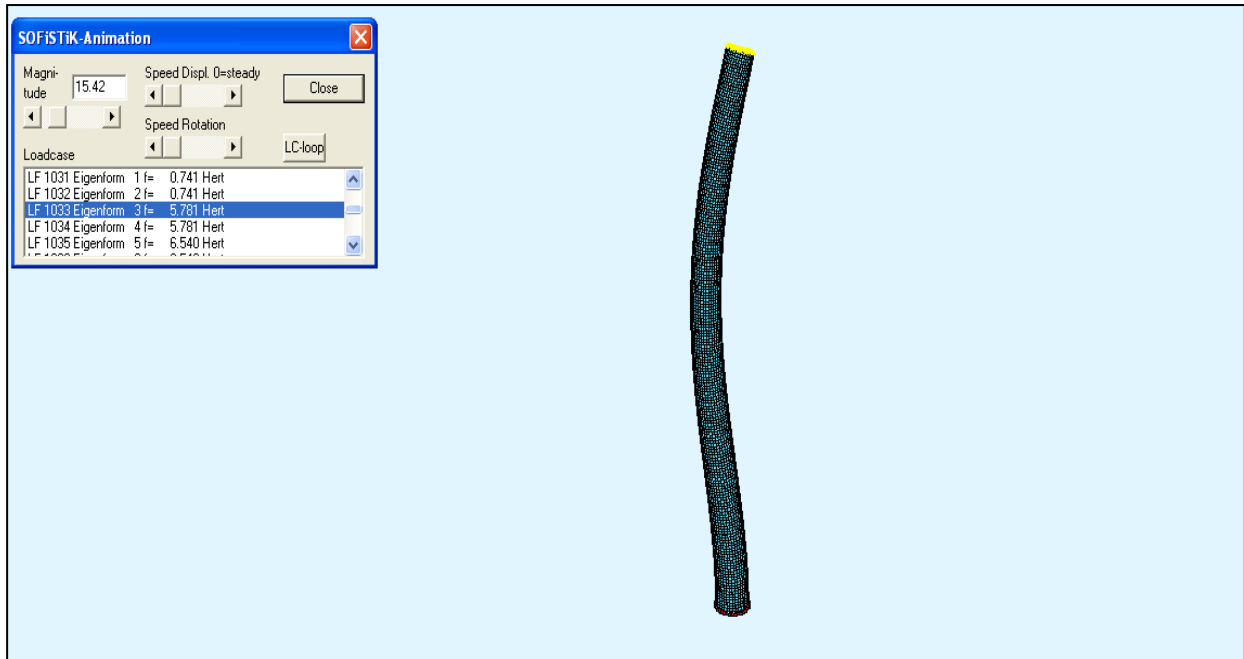
Προκειμένου να καθοριστούν οι φυσικές ιδιοσυχνότητες και να απεικονιστούν γραφικά οι ιδιομορφές χρησιμοποιείται το υποπρόγραμμα DYNA.

Στη φασματική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η επαλληλία των 20 πρώτων ιδιομορφών με τη μέθοδο CQC. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι ιδιομορφές εμφανίζονται σε ζεύγη (πχ. η 1^η και η 2^η ιδιομορφή είναι ίδιες στις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα). Ωστόσο, το απαραίτητο ποσοστό ιδιομορφικής μάζας καλύπτεται από τις πρώτες 4 ιδιομορφές και έτσι δεν είναι απαραίτητες και οι είκοσι.

- Για το χαλύβδινο πύργο, η τιμή της ιδιοσυχνότητας της πρώτης ιδιομορφής είναι ίση με 0.741Hz, η οποία αντιστοιχεί σε θεμελιώδη ιδιοπερίοδο $T=1.350\text{sec}$. Όπως ορίζεται στο κεφάλαιο 3, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα είναι $22\text{min}^{-1} \neq 44.46\text{min}^{-1}$, που είναι η ιδιοσυχνότητα του φορέα. Ακολουθεί η γραφική απεικόνιση της 1^{ης} και 3^{ης} ιδιομορφής του χαλύβδινου πύργου.



Εικόνα 6.15: 1^η ιδιομορφή χαλύβδινου πύργου (f=0.741Hz)

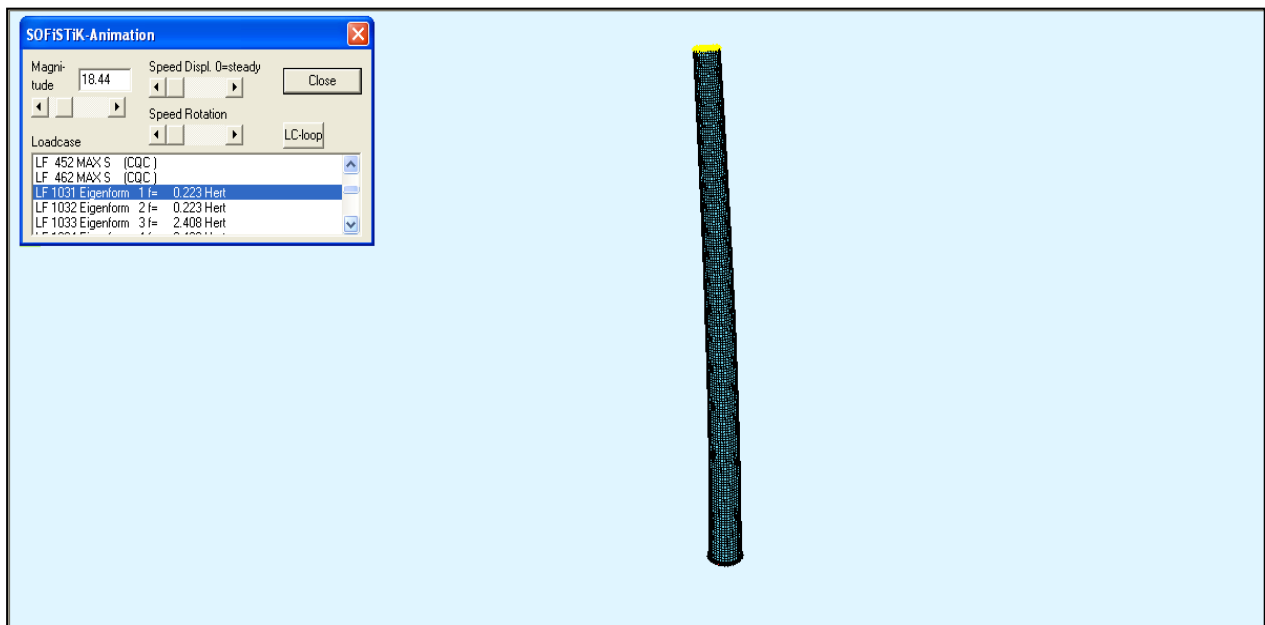


Εικόνα 6.16: 3^η ιδιομορφή χαλύβδινου πύργου (f=5.781Hz)

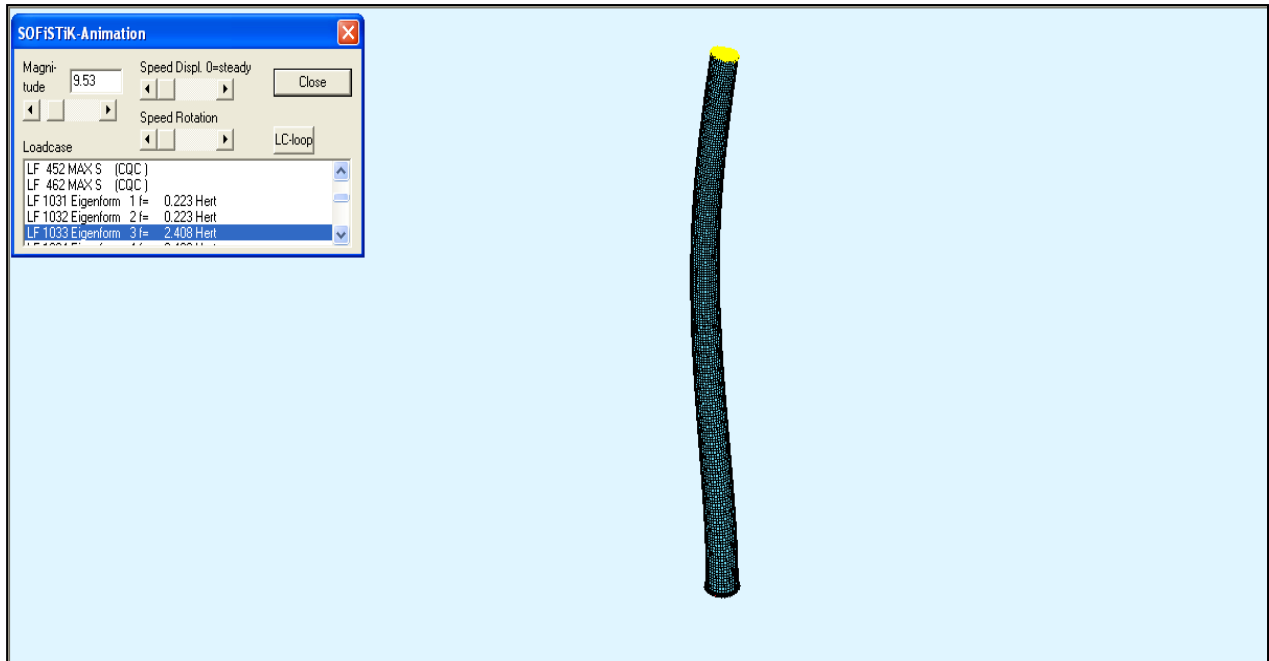
- Για τον πύργο από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση [(+10/-10)₅]_T, η τιμή της ιδιοσυχνότητας της 1^{ης} ιδιομορφής είναι ίση με 0.223Hz, η οποία αντιστοιχεί σε θεμελιώδη ιδιοπερίοδο T=4.48sec.

Όπως ορίζεται στο κεφάλαιο 3, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα είναι $22 \text{ min}^{-1} \neq 13.38 \text{ min}^{-1}$, που είναι η ιδιοσυχνότητα του φορέα.

Ακολουθεί η γραφική απεικόνιση της 1^{ης} και 3^{ης} ιδιομορφής του πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση [(+10/-10)₅]_T.

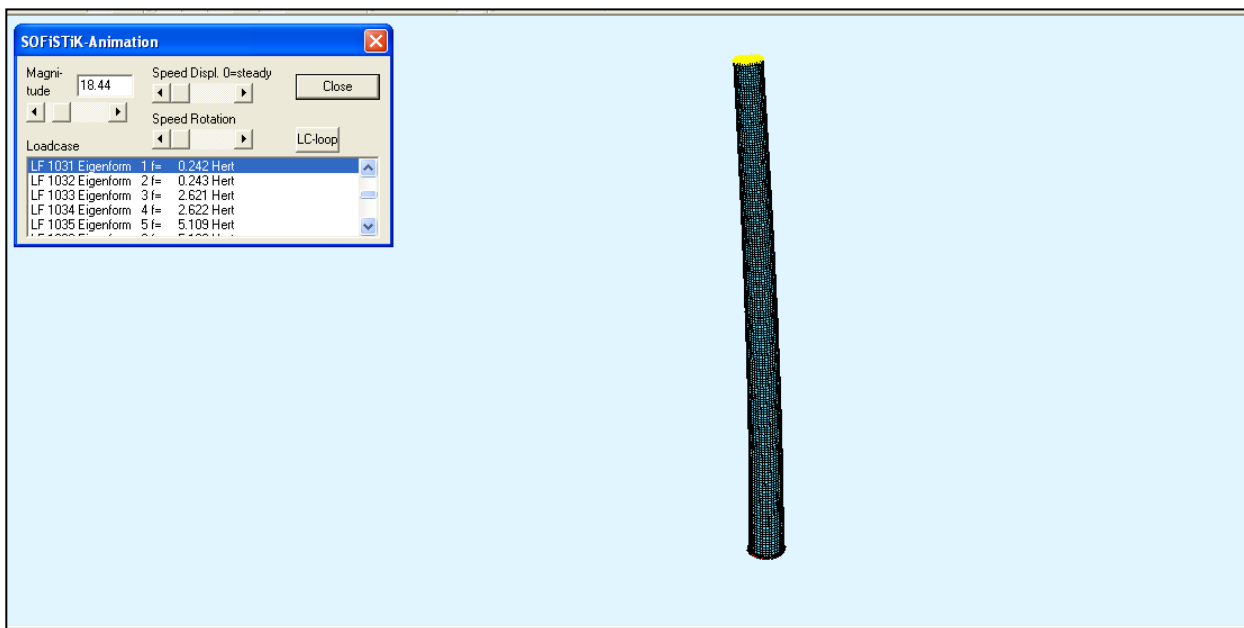


Εικόνα 6.17: 1^η ιδιομορφή πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση [(+10/-10)₅]_T (f=0.223Hz)

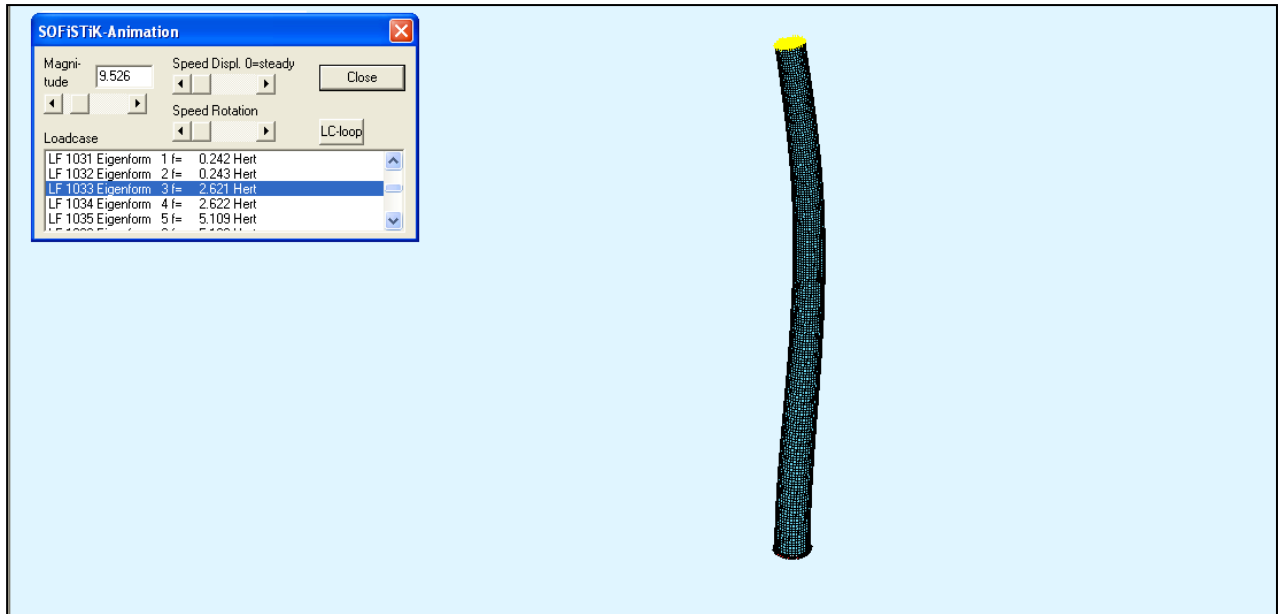


Εικόνα 6.18: 3^η ιδιομορφή πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση [(+10/-10)₅]_T (f=2.408Hz)

- Για τον πύργο από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση [(+30/-30)₅]_T, η τιμή της ιδιοσυχνότητας της 1^{ης} ιδιομορφής είναι ίση με 0.242Hz, η οποία αντιστοιχεί σε θεμελιώδη ιδιοπερίοδο T=4.12sec.
Όπως ορίζεται στο κεφάλαιο 3, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα είναι 22 min⁻¹ ≠ 14.52 min⁻¹, που είναι η ιδιοσυχνότητα του φορέα.
Ακολουθεί η γραφική απεικόνιση της 1^{ης} και 3^{ης} ιδιομορφής του πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση [(+30/-30)₅]_T



Εικόνα 6.19: 1^η ιδιομορφή πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση [(+30/-30)₅]_T (f=0.242Hz)



Εικόνα 6.20: 3^η ιδιομορφή πύργου από σύνθετα υλικά με διαστρωμάτωση [(+30/-30)_s]_T (f=2.621Hz)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο - Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώσαμε 3 μοντέλα πύργων ανεμογεννήτριας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα SOFiSTiK. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της στατικής και δυναμικής ανάλυσης και λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε πύργου, τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών βάσει προδιαγραφών, πειραμάτων αλλά και βιβλιογραφίας, οδηγηθήκαμε στα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργικότητα και την αντοχή των πύργων καθώς και των υλικών τους:

- Από τη βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι το χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι η μικρή δυσκαμψία τους σε σχέση με το χάλυβα. Κάτι τέτοιο επιβεβαιώνεται παρατηρώντας τη συνολική μετατόπιση της κορυφής των πύργων από σύνθετα υλικά που είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του πύργου από χάλυβα S355 όταν και οι τρεις πύργοι καταπονούνται από τον ίδιο συνδυασμό φορτίσεων. Επομένως, ο πύργος από χάλυβα είναι πολύ πιο δύσκαμπτος.
- Συγκρίνοντας τώρα τους δύο πύργους από σύνθετα υλικά (Graphite/Epoxy) με διαφορετικούς κώδικες αλληλουχίας παρατηρούμε ότι για διαφορετική γωνία προσανατολισμού των ινών έχουμε μεταβολή της αντοχής του υλικού. Μάλιστα, καθώς αυξάνεται η γωνία προσανατολισμού σε σχέση με τον άξονα x (στον οποίο ασκούνται τα επιβαλλόμενα φορτία) το υλικό είναι πιο εύκαμπτο, μειώνεται η αντοχή του και αυξάνεται η πλευρική μετατόπιση της κορυφής του πύργου. Προφανώς η μέγιστη δυσκαμψία παρατηρείται όταν οι ίνες βρίσκονται παράλληλα με τη διεύθυνση των επιβαλλόμενων φορτίων.
- Η κυρίαρχη φόρτιση στη διαστασιολόγηση του κελύφους αποδείχτηκε ότι είναι η ανεμοφόρτιση. Η ένταση του σεισμού είναι περίπου κατά 25% μικρότερη στα αποτελέσματα των μετατοπίσεων.
- Κατά τον έλεγχο των κριτηρίων αστοχίας προέκυψε πως ο πύργος από χάλυβα και ο πύργος από Graphite/Epoxy με διαστρωμάτωση $[(+10/-10)_5]_T$ δεν αστοχούν. Μάλιστα, οι τάσεις που αναπτύσσονται στον πύργο από Graphite/Epoxy είναι πολύ μικρότερες από τις τάσεις αστοχίας του υλικού ενώ στον πύργο από χάλυβα η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται κοντά στη βάση του βρίσκεται κοντά στο όριο διαρροής του υλικού.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο πύργος από σύνθετα υλικά παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα όσον αφορά στην αστοχία του υλικού.

- Όσον αφορά τώρα τον πύργο με διαστρωμάτωση [(+30/-30)₅]_T οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται δε βρίσκονται ανάμεσα στα επιτρεπτά όρια.
- Από την ιδιομορφική ανάλυση προέκυψε ότι οι ιδιομορφές εμφανίζονται σε ζεύγη όπως ήταν αναμενόμενο. Εκτός από την πρώτη ιδιομορφή (που είναι ίδια με τη δεύτερη), στη σεισμική απόκριση συμμετέχει και η τρίτη ιδιομορφή και κατά συνέπεια δεν είναι τελείως ακριβής η απλοποιητική θεώρηση του πύργου ως μονοβάθμιου ταλαντωτή.
- Υπογραμμίζεται επίσης η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της ιδιομορφικής ανάλυσης, η οποία εκτός από την συμπεριφορά του πύργου στο σεισμό, έχει σημασία και για την αποφυγή της δυναμικής αλληλεπίδρασής του με τον ρότορα. Και στους τρεις πύργους ελέγχθηκε και αποκλείστηκε η πιθανότητα συντονισμού της συχνότητας περιστροφής του ρότορα με τη συχνότητα ταλάντωσης της κατασκευής.
- Η συνολική μάζα του κάθε πύργου από σύνθετα υλικά είναι περίπου κατά 40% μικρότερη από τη μάζα του πύργου από χάλυβα S355 παρ' όλο που το πάχος του κελύφους στην πρώτη περίπτωση είναι μεγαλύτερο. Κάτι τέτοιο περιορίζει το βάρος της κατασκευής, μειώνοντας συνεπακόλουθα και το κόστος μεταφοράς και ανέγερσης του πύργου.
- Τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν εξαιρετική αντοχή σε κόπωση, η οποία είναι επιθυμητή κατά το σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας λόγω της μεταβλητότητας των ανεμολογικών δεδομένων.
- Η μικρή δυσκαμψία που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά (μικρό μέτρο ελαστικότητας) μπορεί να θεωρηθεί άλλοτε ως πλεονέκτημα, αν επιθυμούμε από το υλικό να απορροφά μεγάλα ποσά ενέργειας χωρίς να αστοχεί, και άλλοτε ως μειονέκτημα αν ζητείται σε κάποια σημεία τη κατασκευής μεγάλη δυσκαμψία. Ωστόσο, η χρήση διαφορετικού τύπου ινών που αστοχούν σε διαφορετικά μεγέθη παραμόρφωσης μπορεί να δημιουργήσει μία ψευδο-πλάστιμη συμπεριφορά
- Σε αντίθεση με το χάλυβα, τα σύνθετα υλικά μπορούν να προσαρμοστούν για να παράσχουν πρόσθετη αντοχή ακριβώς όπου χρειάζεται. Ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές ποιότητες χάλυβα, ουσιαστικά μπορεί μόνο να τροποποιηθεί μόνο το πάχος και η γεωμετρία της διατομής για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Με τα σύνθετα υλικά, αυτό μπορεί να γίνει τροποποιώντας τα χαρακτηριστικά του οπλισμού, το υλικό του πυρήνα και τη ρητίνη με διάφορους τρόπους.

Δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης ενισχυτικών ινών ακριβώς στα σημεία που χρειάζονται (πχ. στις διευθύνσεις των επιβαλλόμενων φορτίων) χρησιμοποιώντας με αυτό τον τρόπο το λιγότερο αναγκαίο υλικό.

- Επίσης σημαντική είναι και η αντοχή των σύνθετων υλικών στη διάβρωση, ιδίως στο θαλασσινό περιβάλλον, αφού τα ινώδη σύνθετα υλικά δε διαβρώνονται, δε σαπίζουν και γενικά δεν αλλοιώνονται με κανένα τρόπο. Μάλιστα εμφανίζουν εξαιρετική συμπεριφορά έναντι χημικών ενώσεων. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε υπεράκτια αιολικά πάρκα όπου η διάβρωση είναι μείζον πρόβλημα.
- Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, ο καθοριστικός παράγοντας για την κατασκευή ενός πύργου ανεμογεννήτριας από σύνθετα υλικά είναι το όριο λειτουργικότητας της πλευρικής μετατόπισης.
- Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η χρήση σύνθετου υλικού στην κατασκευή πύργου ανεμογεννήτριας μπορεί να αποτελέσει μία εναλλακτική μορφή υλικού, καθώς εμφανίζει ικανοποιητική ανθεκτικότητα και αντοχή στην ανάληψη των φορτίων σχεδιασμού σε σχέση με αυτή των συμβατικών υλικών όπως ο χάλυβας S355. Ωστόσο, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η γωνία προσανατολισμού των ινών προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακαμψία της κατασκευής. Λύση ακόμη μπορεί να αποτελούν οι κατασκευές τύπου sandwich όπου ένας ασθενής πυρήνας από στερεοποιημένο αφρό ή με κυψελωτή διάταξη τοποθετείται μεταξύ δυο ισχυρών και δύσκαμπτων διαστρωματώσεων. Ο πυρήνας μεταξύ των δύο διαστρωματώσεων παίζει το ρόλο μοχλοβραχίονα, αυξάνοντας τη ροπή αδράνειας των δύο επιμέρους διαστρωματώσεων, υπό την προϋπόθεση ότι εξασφαλίζεται η μεταξύ τους συνεργασία και τελικώς καταλήγει σε καμπτική δυσκαμψία του όλου συστήματος με πολύ μικρή επιβάρυνση στο βάρος και το κόστος του τελικού προϊόντος.

Βιβλιογραφία

1. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ)
<http://www.cres.gr/kape/index.htm>
2. Global Wind Energy Council (GWEC)
<http://www.gwec.net/>
3. European Renewable Energ Council (EREC)
<http://www.erec.org/>
4. European Wind Energy Association (EWEA)
<http://www.ewea.org/>
5. The World of Wind Atlases
<http://www.windatlas.dk>
6. Ελληνική Εταιρεία Αιολικής Ενέργειας
<http://www.eletaen.gr>
7. American Council on Renewable Energy (ACORE)
<http://www.acore.org/>
8. American Wind Energy Association (AWEA)
<http://www.acore.org/>
9. Danish Wind Turbine Manufactures Association (DWTMA). (2005); and Wind Tower Composites (2004)
10. Τριανταφύλλου (2003). «Παγκόσμια χρήση σύνθετων υλικών το έτος 2002».
11. Σπυράκος Κ. (2004). «Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία». Εκδόσεις Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα
12. Μιτολίδης Γ. Ι., Σαλονικιός Θ. Ν., Κάππος Α.Ι. (2006). «Μηχανικά Χαρακτηριστικά Ανθρακοϋφασμάτων (CFRP) και Χαλυβδοϋφασμάτων (SRP) και Διερεύνηση της Εφαρμογής τους στην ενίσχυση Δοκών Ωπλισμένου Σκυροδέματος». Εκδόσεις ΤΕΕ, 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Βιβλίο Εισηγήσεων, Τόμος Γ
13. Τριανταφύλλου Θ.Χ. (1994). «Ενισχύσεις Κατασκευών Σκυροδέματος με Ινοπλισμένα Πλαστικά Υλικά, Τόμος ΙΙΙ», 11^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Εκδόσεις ΤΕΕ
14. Κάππος Α.Ι. «Ενίσχυση κτιρίων με σύνθετα υλικά», Σεμινάριο
15. Troitsky M.S. (1986). «Tubular steel structures: theory and design, The Jame F. Lincoln Arc Welding Foundation», Cleveland, Ohio

16. McCluure G., Boire L., Carrier J.C. (1992). «Advanced Composite in Bridges and Structures», Canadian Society for Civil Engineers, Montreal
17. Lin Z.M. (1995). «Analysis of Pole-Type Structures of Fiber Reinforced Plastics by Finite Element Method, Ph.D Thesis», University of Manitoba, Canada
18. Ibrahim S. (2000) «Performance Evaluation of Fiber Reinforced Plastic Poles for Transmission Lines, Ph.D Thesis», University of Manitoba, Canada
19. Philopoulos S.D. (2002). «An Investigation on Structural Performance of Jointed Filament Wound GFRP Poles for Light Utility Applications, Undergraduate Thesis», University of Manitoba
20. Ραυτογιάννης, Ι.Γ. (2009). «Σύνθετα Υλικά», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
21. NEG Micon, Wind Turbine Properties of NM48/750 (2002)
22. Polyzois J.D., Raftogiannis I.G., Ungkurapinan N. «Static and dynamic characteristics of multi-cell jointed GFRP wind turbine towers»
23. Ευρωκώδικας 1 – Μέρος 1.4 Δράσεις ανέμου
24. ΕΑΚ 2000
25. Germanischer Lloyd Rule and Regulations, Part 1: Wind Energy. (1993), Hamburg, Germany
26. Κουμούσης Β. (1998). «Ανάλυση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία, Α Μέρος», Αθήνα
27. Jones R. «Mechanics of Composite Materials, Second Edition»
28. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005α). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
29. SOFiSTiK Manual
30. Ευρωκώδικας 3 – Μέρος 1.6 Αντοχή και Ευστάθεια φορέων με στοιχεία κελύφους
31. Tsai W. (1989). «Composite design», 4th edition
32. Pinho S. «Failure Models and Criteria for FRP under in-plane or three-dimensional stress states including shear non-linearity»
33. Von Misses R. (1913). «Mechanik der Festen Korper im plastisch deformablen Zustand»
34. Hill (1950) «The Mathematical Theory of Plasticity», Oxford
35. Hess T.E. (1961). «Stability of orthotropic cylindrical shells under combined loading», American Rocket Society
36. Holston A. (1968). «Buckling of inhomogeneous anisotropic cylindrical shells by bending», A/AA Journal