



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ



Μεταπτυχιακή Εργασία
Αικατερίνη Η. Νταϊφώτη

ΕΜΚ ΜΕ 2016/07

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ



Μεταπτυχιακή Εργασία
Αικατερίνη Η. Νταϊφώτη

ΕΜΚ ΜΕ 2016/07

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

Copyright © Αικατερίνη Νταϊφώτη, 2016
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Aikaterini Ntaifoti, 2016
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Αικατερίνη Η. Νταϊφώτη (2016)
Συμπεριφορά συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών σε κόπωση
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2016/07
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Aikaterini I. Ntaifoti (2016)
Postgraduate Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2016/07
Fatigue behavior of wind turbine tower connections
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ για την άρτια επιστημονική καθοδήγησή του και τις ανεκτίμητες παρατηρήσεις και συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την υποψήφια Διδάκτορα ΕΜΠ κα. Κωνσταντίνα Κουλάτσου για την πολύ σημαντική συνεισφορά της. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και τον Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό κ. Ηλία Θανάσουλα για την πολύτιμη βοήθειά του και τις συμβουλές του, καθώς και για το χρήσιμο υλικό που μου παρείχε για την αποπεράτωση της εργασίας.

Αφιέρωση

Στην οικογένειά μου,



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΜΕ 2016/07

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Αικατερίνη Η. Νταϊφώτη

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Οκτώβριος 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι ανεμογεννήτριες γίνονται όλο και μεγαλύτερες αυξάνοντας το ύψος των πυλώνων και το μήκος των πτερυγίων, με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Το γεγονός αυτό όμως έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της καταπόνησής τους από τα φορτία του ανέμου. Λόγω της δυναμικής φύσης των φορτίων ανέμου, τα οποία αποτελούν το κρισιμότερο φορτίο μίας ανεμογεννήτριας, η κόπωση είναι το κυρίαρχο φαινόμενο αστοχίας μίας τέτοιας κατασκευής, γι' αυτό και η μελέτη των συνδέσεων μεταξύ διαδοχικών τμημάτων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο έλεγχος έναντι κόπωσης, σύμφωνα με τον EN 1993-1-9, μιας σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα μίας τυπικής σύγχρονης ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων, με ονομαστική ισχύ 1.5mW. Η υπό μελέτη σύνδεση βρίσκεται στα 0.85 του ύψους του πυλώνα και συνδέει το ανώτερο τμήμα ως το ρότορα με τον υπόλοιπο πυλώνα.

Αρχικά, χρησιμοποιώντας κατάλληλα υπολογιστικά εργαλεία από το εργαστήριο National Renewable Energy Laboratory (NREL), προσδιορίζονται ρεαλιστικές χρονοϊστορίες ανέμου και χρονοϊστορίες εντατικών μεγεθών από τον ρότορα στον πυλώνα. Οι χρονοϊστορίες αυτές επιβάλλονται, στην συνέχεια, ως φορτία ανέμου στην υπό μελέτη σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας.

Για την μελέτη της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας δημιουργείται κατάλληλο αριθμητικό προσομοίωμα, με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA v9.0.0. Οι συνδέσεις αυτές υλοποιούνται μέσω δακτυλιοειδών ελασμάτων συγκολλημένων σε κάθε τμήμα του πυλώνα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες. Το αριθμητικό προσομοίωμα περιλαμβάνει ολόκληρη την σύνδεση καθώς και το τμήμα του πυλώνα από την θέση της σύνδεσης ως την κορυφή. Τα δύο δακτυλιοειδή ελάσματα της σύνδεσης, ο πυλώνας, καθώς και οι κεφαλές των κοχλιών προσομοιώνονται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, ενώ οι κορμοί των κοχλιών με στοιχεία δοκού. Οι επαφές ανάμεσα στα δακτυλιοειδή ελάσματα, μεταξύ της άντυγας του ελάσματος και του κορμού του κοχλία και της κεφαλής του κοχλία με το έλασμα λαμβάνονται υπόψη με κατάλληλα στοιχεία επαφής. Στην κορυφή του πυλώνα του αριθμητικού προσομοιώματος επιβάλλονται οι χρονοϊστορίες απόκρισης από τα φορτία ανέμου στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας και μέσω δυναμικών αναλύσεων προσδιορίζονται οι χρονοϊστορίες των τάσεων στα κρίσιμα μέλη.

Τέλος, πραγματοποιείται ο έλεγχος σε κόπωση, μέσω του συντελεστή συσσώρευσης βλάβης. Προσδιορίζεται η επάρκεια της σύνδεσης στην διάρκεια ενός έτους και ο υπολοίπομος χρόνος ζωής μέχρι την αστοχία λόγω κόπωσης και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με την διαστασιολόγηση των συνδέσεων.



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

POSTGRADUATE THESIS
EMK ME 2016/07

FATIGUE BEHAVIOR OF WIND TURBINE TOWER CONNECTIONS

Aikaterini I. Ntaifoti

Supervisor: Professor Charis Gantes
October 2016

ABSTRACT

Nowadays, with the development of technology, the dimensions of the wind turbines increase continuously, in order to take better advantage of the available wind potential. This results to taller towers and longer blades. Due to the dynamic nature of the wind loads, which are the prevailing loads on wind turbines, fatigue is one of the most common types of structural failure. Thus, the investigation of the connections between adjacent parts is of particular interest.

Objective of the present postgraduate thesis is the fatigue analysis of a wind turbine tower connection, for a typical horizontal axis three-bladed wind turbine of rated power 1.5mW, according to Annex A of EN 1993-1-9. The connection is located at 85% of the tower height and connects the upper tower part up to the rotor with the rest of the tower.

Initially, realistic time histories of the wind velocity and of the wind loads acting on the tower from the rotor are obtained, via appropriate computational engineering tools from National Renewable Energy Laboratory (NREL), and applied at the connection.

For the investigation of the behavior of the connection between adjacent parts a proper numerical model is created, using finite element program ADINA v9.0.0. Such connections are realized by means of ring flanges that are pre-welded at each part of the tower and are bolted together with fully preloaded bolts. The numerical model includes the entire bolted ring flange connection, as well as the tower part from the connection until the top. For the numerical simulation, shell elements are employed for the flange and "bolt" beam elements for the bolts. The interaction between flanges and bolts and between nuts and flanges is appropriately taken into account using contact elements. The response time histories, produced by the wind pressures acting on the wind turbine blades, are applied at the top of the tower and stress time histories at critical parts are determined via dynamic analysis.

Finally, fatigue verification is performed via the calculation of the damage accumulation factor. The sufficiency of the connection and its remaining lifetime until fatigue failure are determined and useful conclusions for the proper design of such connections against fatigue are extracted.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	19
1.1	ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	19
1.2	ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	21
1.3	Ο ΠΥΛΩΝΑΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	26
1.3.1	Εισαγωγικά στοιχεία	26
1.3.2	Τύποι πυλώνων	26
1.3.3	Αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες	30
1.3.4	Τεχνικές παραγωγής και κατασκευής χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων	31
1.3.5	Θεμελίωση ανεμογεννητριών	35
2	Η ΚΟΠΩΣΗ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	37
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	37
2.2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	39
2.2.1	Παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση	40
2.2.2	Αντοχή σε κόπωση	41
2.2.3	Η έννοια της συσσώρευσης βλάβης.....	42
2.3	ΕΥΡΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 3 & ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	43
2.4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΥΡΟΥΣ ΤΑΣΕΩΝ	46
2.5	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ.....	51
2.5.1	Γενικά	51
2.5.2	Επιδράσεις μεγέθους στην αντοχή σε κόπωση.....	52
2.5.3	Επιρροή ύπαρξης οπών στην αντοχή σε κόπωση	52
2.6	ΈΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ.....	54
2.7	ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ.....	55
3	ΦΟΡΤΙΑ ΑΝΕΜΟΥ	57
3.1	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	57
3.1.1	Εισαγωγή.....	57
3.1.2	Κατανομή ταχύτητας ανέμου	59
3.2	ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ.....	60
3.3	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	61
3.4	ΒΗΜΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ	69
4	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	73
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	73
4.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ	74

4.2.1	Γεωμετρία της υπό μελέτη σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα	74
4.2.2	Παραδοχές αριθμητικής προσομοίωσης	76
4.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	80
4.3.1	Ιστορικό τάσεων στην συγκόλληση	80
4.3.2	Ιστορικό τάσεων στον κοχλία	84
5	ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ	89
5.1	ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	90
5.1.1	Μέτρηση κύκλων	90
5.1.2	Δημιουργία φάσματος σχεδιασμού	92
5.1.3	Προσδιορισμός καμπύλης αντοχής σε κόπωση	93
5.1.4	Υπολογισμός συγκέντρωσης βλάβης	95
5.2	ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ	95
6	ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	99
6.1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ	99
6.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	100
6.3	ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ	100
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103

1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Με τον όρο αιολική ενέργεια εννοούμε την ενέργεια η οποία παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου και η οποία προέρχεται από την μετακίνηση αέριων μαζών της ατμόσφαιρας. Αποτελεί μία καθαρή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας μιας και δεν εκπέμπει ούτε προκαλεί ρύπους. Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας ξεκινά χιλιάδες χρόνια πριν. Για τουλάχιστον 3000 χρόνια οι ανεμόμυλοι χρησιμοποίησαν την ενέργεια του ανέμου για το άλεσμα των σιτηρών και την άντληση νερού. Αλλά η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας ήταν τα ιστία (πανιά) των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων. Από τον 13^ο αιώνα, οι ανεμόμυλοι οριζόντιου άξονα ήταν αναπόσπαστο τμήμα της αγροτικής οικονομίας και έπεσε σε δυσμένεια με την έλευση των κινητήρων φθηνού ορυκτού καυσίμου και αργότερα με την εξάπλωση της αγροτικής ηλεκτροδότησης. Οι σύγχρονοι ανεμόμυλοι ονομάζονται ανεμογεννήτριες, εξαιτίας της ιδιότητάς τους να μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.

Αν και αρκετά χρόνια πριν, στα πλαίσια ερευνών δημιουργήθηκαν διάφορα μοντέλα ανεμογεννητριών, στην Αμερική κυρίως, η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας χρονολογείται περί το 1973, ενώ η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με συστηματικό τρόπο άρχισε την δεκαετία του 80. Το ερέθισμα για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας ήταν η τιμή του πετρελαίου και η ανησυχία για περιορισμένους πόρους ορυκτών καυσίμων. Η βασική αιτία όμως χρήσης των ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι πολύ χαμηλές εκπομπές CO₂ και οι δυνατότητες της αιολικής ενέργειας να βοηθήσουν στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής.

Επομένως, μόλις εντοπισθεί μία ανεμώδης περιοχή και αφού εκτελεσθούν οι απαιτούμενες μετρήσεις και μελέτες για την αξιοποίηση του αιολικού της δυναμικού, τοποθετούνται μερικές δεκάδες ανεμογεννήτριες οι οποίες απαρτίζουν ένα αιολικό πάρκο.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η αιολική ενέργεια προέρχεται από την μετακίνηση αέριων μαζών της ατμόσφαιρας. Οι μετακινήσεις του αέρα, οι άνεμοι, προέρχονται από τις μεταβολές και τις διαφορετικές από τόπο σε τόπο τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι διαφορετικές αυτές τιμές της πίεσης οφείλονται στη διαφορετική θέρμανση (απορρόφηση ενέργειας) της ατμόσφαιρας κάθε τόπου από τον Ήλιο. Η θέρμανση είναι πιο έντονη σε μάζες γης κοντά στον ισημερινό και προφανώς η

μεγαλύτερη θέρμανση συμβαίνει κατά την διάρκεια της μέρας. Ο θερμός αέρας υψώνεται, αναμειγνύεται με την ατμόσφαιρα, για να βυθιστεί και πάλι στην επιφάνεια σε περιοχές με ψυχρότερο κλίμα. Η προκύπτουσα, μεγάλης κλίμακας, κίνηση του αέρα επηρεάζεται έντονα από τις δυνάμεις Coriolis λόγω περιστροφής της γης. Η ημερήσια περιστροφή της Γης προκαλεί την εκτροπή των ανέμων και περιπλέκει την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας. Επιπλέον, η διαφορετική θερμική συμπεριφορά της στεριάς από τη θάλασσα, αλλά και η ανομοιομορφία του εδάφους (βουνά, κοιλάδες, κλπ) προκαλούν τοπικά φαινόμενα και ανέμους.

Από την πλευρά της αιολικής ενέργειας, το πιο εμφανές χαρακτηριστικό ενός αιολικού πάρκου είναι η μεταβλητότητά του. Διότι ο άνεμος ποικίλλει και γεωγραφικά και χρονικά. Επιπλέον, αυτή η μεταβλητότητα εξακολουθεί να υφίσταται με ένα ευρύ φάσμα, τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο.

Σε μία μεγάλη κλίμακα η χωρική μεταβλητότητα περιγράφει το γεγονός ότι υπάρχουν πολλές διαφορετικές κλιματικές περιοχές στον κόσμο, μερικές περισσότερο ανεμώδεις από άλλες. Αυτές οι περιοχές υπαγορεύονται από το γεωγραφικό πλάτος, το οποίο επηρεάζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας. Μέσα σε κάθε μία κλιματική περιοχή υπάρχει ένα σημαντικό ποσοστό ποικιλότητας σε μικρότερη κλίμακα, το οποίο υπαγορεύεται αρκετά από την φυσική γεωγραφία, την αναλογία στεριάς θάλασσας, το μέγεθος των μαζών γης και την παρουσία βουνών ή πεδιάδων για παράδειγμα. Ο τύπος της βλάστησης μπορεί επίσης να έχει μία σημαντική επιρροή στην απορρόφηση και αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας, επηρεάζοντας την θερμοκρασία στην επιφάνεια και την υγρασία.

Περισσότερο τοπικά, η τοπογραφία έχει μία σημαντική επιρροή στο αιολικό κλίμα. Για παράδειγμα, περισσότερος άνεμος παρατηρείται σε κορυφές λόφων ή βουνών παρά στην υπήνεμη πλευρά του εδάφους ή σε προστατευμένες κοιλάδες. Πιο τοπικά ακόμα, οι ταχύτητες ανέμου μπορεί να μειωθούν σημαντικά από εμπόδια, όπως δέντρα και κτίρια.

Σε μία δεδομένη τοποθεσία χρονική ποικιλότητα σε μεγάλη κλίμακα σημαίνει ότι το ποσοστό του ανέμου μπορεί να ποικίλλει από τον ένα χρόνο στον άλλο, με ακόμα μεγαλύτερη κλίμακα ποικιλότητας για περιόδους δεκαετιών ή περισσότερο. Αυτές οι μακροπρόθεσμες ποικιλότητες δεν είναι πλήρως κατανοητές και μπορεί να καταστήσουν δύσκολη την ακριβή πρόβλεψη της οικονομικής βιωσιμότητας μίας συγκεκριμένης μελέτης, ενός αιολικού πάρκου για παράδειγμα.

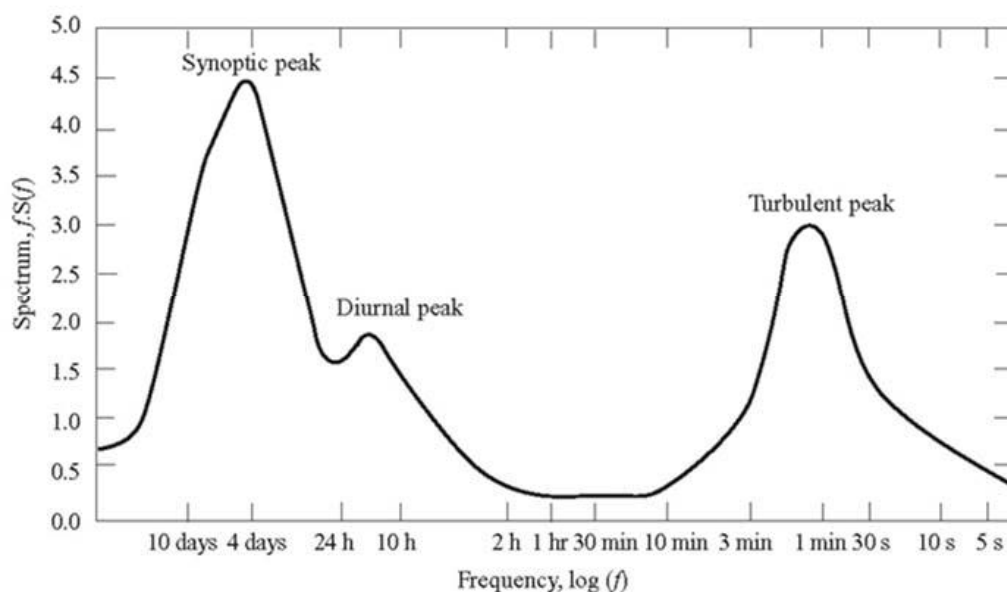
Σε κλίμακα χρόνου μικρότερη του ενός έτους, εποχιακές διακυμάνσεις είναι πολύ περισσότερο προβλέψιμες αν και υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στις συντομότερες χρονικές κλίμακες, οι οποίες αν και είναι περισσότερο κατανοητές, συχνά δεν είναι πολύ προβλέψιμες για διάστημα περισσότερο από μερικές μέρες. Ανάλογα με την περιοχή μπορεί να υπάρχουν σημαντικές μεταβολές κατά την διάρκεια της ημέρας οι οποίες επίσης είναι συνήθως αρκετά προβλέψιμες (ημερήσιες μεταβολές). Σε αυτές τις χρονικές κλίμακες, η προβλεψιμότητα του ανέμου είναι σημαντική για την ενσωμάτωση μεγάλων ποσοτήτων αιολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο ώστε να επιτρέψει στο άλλο εργοστάσιο παραγωγής που προμηθεύει το δίκτυο να οργανωθεί κατάλληλα.

Σε ακόμα μικρότερες κλίμακες χρόνου, μερικών λεπτών ή και δευτερολέπτων ή λιγότερο, οι μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου, γνωστές και ως τύρβη, μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τον σχεδιασμό και την λειτουργία μίας μεμονωμένης ανεμογεννήτριας, καθώς επίσης και την ποιότητα της ενέργειας η οποία μεταφέρεται στο δίκτυο και να έχει επιπτώσεις στους καταναλωτές.

Ο Van der Hoven κατασκεύασε ένα φάσμα ταχυτήτων ανέμου στο οποίο είναι εμφανής η χρονική μεταβλητότητα του ανέμου (σχήμα 1-1).

Λόγω της μεταβλητότητας της αιολικής ενέργειας, γίνεται αντιληπτό ότι η κατανόηση των χαρακτηριστικών ενός αιολικού πάρκου είναι κρίσιμη για όλες τις πτυχές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, από την ταυτοποίηση των κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, τις προβλέψεις για την οικονομική βιωσιμότητα του αιολικού πάρκου ως τον σχεδιασμό των ίδιων των

ανεμογεννητριών και τον προσδιορισμό της επιρροής τους στα δίκτυα κατανομής του ηλεκτρισμού και τους καταναλωτές. Γί αυτό και η μελέτη ενός τέτοιου έργου απαιτεί την πραγματοποίηση πολλών διαφορετικών μελετών.



Σχήμα 1-1: Φάσμα ταχυτήτων ανέμου στο Brookhaven της Ν. Υόρκης από τον Van der Hoven (1957) [2]

1.2 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Ο γενικός όρος ανεμογεννήτρια χρησιμοποιείται πλέον για μηχανές με περιστρεφόμενες λεπίδες που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε χρήσιμη ενέργεια. Υπάρχουν διάφορα σχέδια ανεμογεννητριών, συμπεριλαμβανομένων οριζόντιου άξονα και κατακόρυφου άξονα, καθώς επίσης και ανεμογεννήτριες που είναι εφοδιασμένες με 1, 2, 3 ή και περισσότερες λεπίδες (σχήμα 1-4 & σχήμα 1-5).

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες όπως εξελίχθηκαν, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως δυο ή τριών λεπίδων οριζόντιου άξονα και με προσηνείς ρότορες. Σήμερα, η επιλογή ανάμεσα σε ανεμογεννήτριες δυο ή τριών λεπίδων είναι απλώς θέμα συντονισμού μεταξύ της αεροδυναμικής αποτελεσματικότητας, της πολυπλοκότητας, του κόστους, του θορύβου και της αισθητικής. Ενώ μέχρι σήμερα ήταν κυρίαρχες ανεμογεννήτριες με σταθερή ταχύτητα ρότορα, ανεμογεννήτριες με μεταβαλλόμενη ταχύτητα ρότορα γίνονται όλο και περισσότερο κοινές, σε μία προσπάθεια να βελτιστοποιήσουμε την σύλληψη ενέργειας, να μειώσουμε τα φορτία, να αποκτήσουμε καλύτερη ποιότητα ενέργειας και να έχουμε πιο εξελιγμένες πτυχές ελέγχου ενέργειας.

Για να περιορίσουμε να ανεπιθύμητο φαινόμενο μεγάλων φορτίων ανέμου και για να αυξήσουμε την αποτελεσματικότητά τους οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται με λιγότερες λεπίδες, πιο μακριές και πιο λιγυρές. Για να αντισταθμίσουν την λυγηρότητα των λεπίδων, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου.

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (σχήμα 1-2) έχουν το πλεονέκτημα ότι το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια είναι στο έδαφος οπότε είναι πιο εύκολη η πρόσβαση και δεν χρειάζεται μηχανισμός εκτροπής. Ωστόσο, παρουσιάζουν μειονεκτήματα, όπως ότι έχουν ένα πολύ χαμηλότερο επίπεδο αποτελεσματικότητας, το γεγονός ότι η ανεμογεννήτρια χρειάζεται πλήρη αποσυναρμολόγηση για την

αντικατάσταση του κύριου εδράνου και ότι ο ρότορας τοποθετείται σχετικά κοντά στο έδαφος όπου δεν υπάρχει πολύς άνεμος.

Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες οριζώντιου άξονα (σχήμα 1-3) αποτελούν τον πιο συχνό τύπο ανεμογεννήτριας σε χρήση στις μέρες μας. Στην πραγματικότητα, όλες οι εμπορικές ανεμογεννήτριες που ανήκουν σε ένα δίκτυο ανεμογεννητριών σήμερα είναι σχεδιασμένες με ρότορα τύπου προπέλας τοποθετημένου σε ένα οριζόντιο άξονα στην κορυφή ενός κατακόρυφου πύργου.

Σε αντίθεση με τον τρόπο λειτουργίας των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα, οι ανεμογεννήτριες οριζώντιου άξονα πρέπει να ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση του ανέμου, επιτρέποντας έτσι στον αέρα να ρέει παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής.

Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες οριζώντιου άξονα γίνεται διάκριση μεταξύ αυτών που έχουν προσήνεμους ρότορες και υπήνεμους. Οι προσήνεμοι ρότορες αντιμετωπίζουν τον άνεμο μπροστά από έναν κατακόρυφο πύργο και έτσι έχουν το πλεονέκτημα να αποφεύγουν κάπως την επίδραση της σκιάς του ανέμου από την παρουσία του πύργου. Ανεμογεννήτριες με προσήνεμους ρότορες χρειάζονται μηχανισμό εκτροπής ώστε να διατηρήσουν τον άξονα του ρότορα ευθυγραμμισμένο με την κατεύθυνση του ανέμου. Ωστόσο, στις ανεμογεννήτριες υπήνεμου ρότορα τα φορτία κόπωσης είναι μεγαλύτερα.



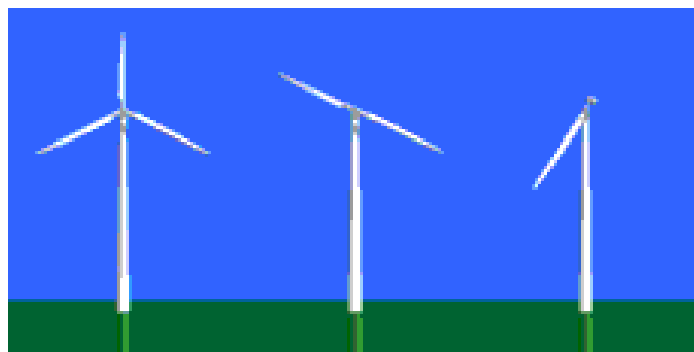
Σχήμα 1-2: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα [4]



Σχήμα 1-3: Ανεμογεννήτρια οριζώντιου άξονα [2]



Σχήμα 1-4: Ανεμογεννήτριες πολλαπλών λεπίδων [4]



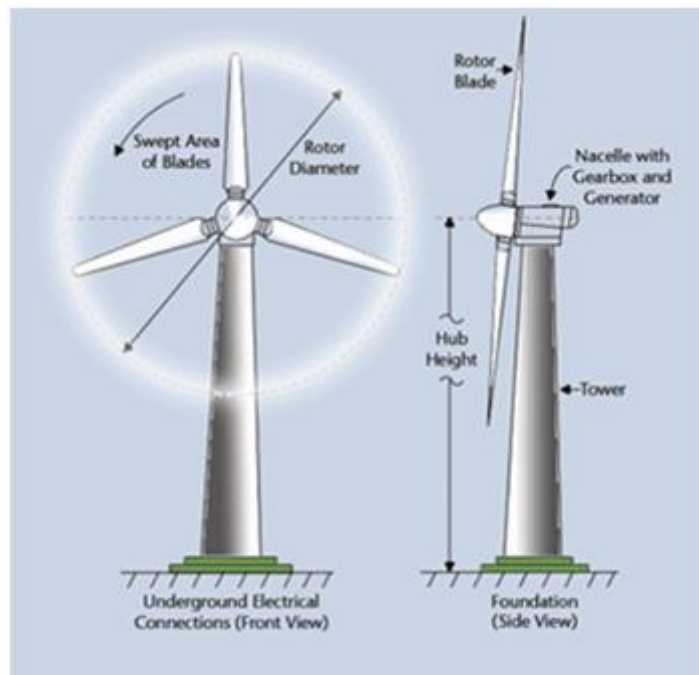
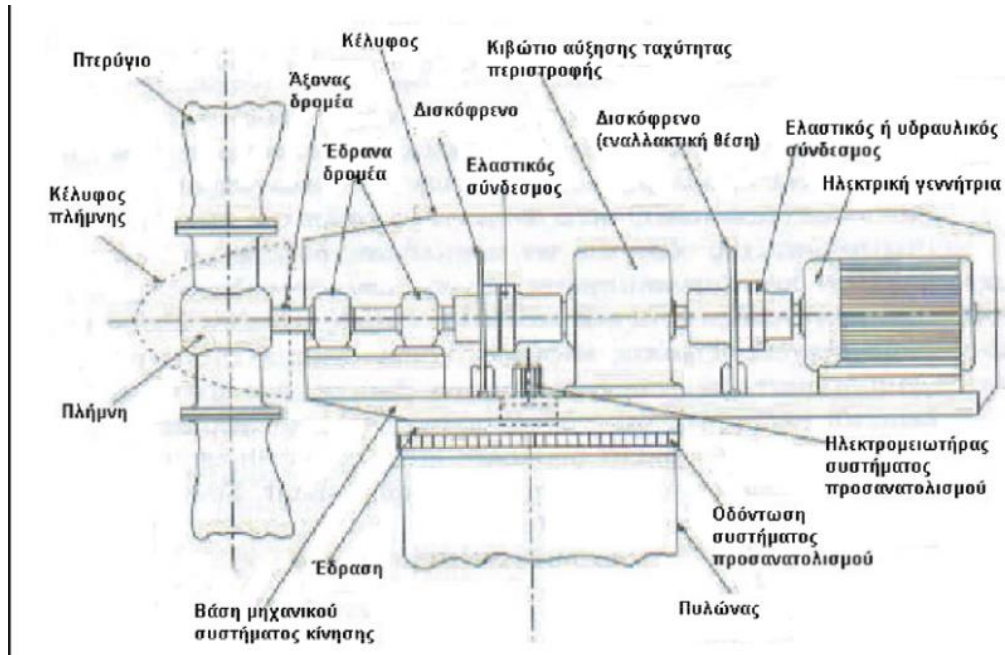
Σχήμα 1-5: Ανεμογεννήτριες 1, 2 και 3 λεπίδων [4]

Όσον αφορά τον αριθμό των λεπίδων, στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες το πιο κοινό μοντέλο είναι αυτό των 3 λεπίδων. Τα μοντέλα με 1 ή 2 λεπίδες έχουν το πλεονέκτημα να εκπροσωπούν μία πιθανή εξοικονόμηση σε σχέση με το κόστος και το βάρος του ρότορα. Ωστόσο, η χρήση λιγότερου πλήθους λεπίδων συνεπάγεται ότι χρειάζεται υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής των λεπίδων ή μεγαλύτερη χορδή για να δώσει την ίδια ενέργεια εξόδου με μία γεννήτρια ίδιου μεγέθους αλλά 3 λεπίδων.

Οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται για να παράγουν ηλεκτρισμό όσο πιο φθηνά γίνεται. Για τον σκοπό αυτό, οι ανεμογεννήτριες γενικά σχεδιάζονται για να δώσουν μέγιστη ισχύ εξόδου, σε ταχύτητες ανέμου γύρω στα 15m/s. Στην περίπτωση ισχυρότερων ανέμων, οι οποίοι ούτως ή άλλως είναι πολύ σπάνιοι, είναι χρήσιμο να σπαταλήσουμε την πλεονάζουσα ενέργεια έτσι ώστε να αποφύγουμε πιθανή βλάβη της ανεμογεννήτριας. Γι' αυτό το λόγο, η ανεμογεννήτρια χρειάζεται κάποιου είδους έλεγχο ισχύος. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό είναι μέσω ενός συστήματος ελέγχου κλίσης πτερυγίων (pitch control), ώστε τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας να στρίβουν κατάλληλα σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου.

Μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζώντιου άξονα αποτελείται από τα παρακάτω κύρια μέρη (σχήμα 1-6):

- ❖ το δρομέα, που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα.
- ❖ το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.
- ❖ την ηλεκτρική γεννήτρια, σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 πόλους η οποία 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. Υπάρχει και το σύστημα πέδης το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.
- ❖ το σύστημα προσανατολισμού, αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
- ❖ τον πύργο, ο οποίος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση.
- ❖ τον ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.



Σχήμα 1-6: Κύρια συστατικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας οριζώντιου άξονα (πηγή: ape1epalsyrou.weebly.com & www.eac.com)

1.3 Ο ΠΥΛΩΝΑΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

1.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Ο πυλώνας αποτελεί ένα πολύ βασικό στοιχείο της ανεμογεννήτριας, του οποίου ο σχεδιασμός απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Παρότι, μπορεί να θεωρηθεί μία συμβατική δομή όταν λαμβάνεται υπόψη μεμονωμένα, ο σωστός σχεδιασμός του απαιτεί την κατανόηση ενός σημαντικού ποσοστού του συνολικού συστήματος της ανεμογεννήτριας και της εφαρμογής του. Ο σχεδιασμός του πυλώνα, όπως και κάθε κατασκευής, πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις ασφάλειας και ανθεκτικότητας με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Πιο συγκεκριμένα, ο πυλώνας θα πρέπει να έχει το απαραίτητο ύψος, την απαιτούμενη δυσκαμψία και όσο το δυνατόν χαμηλότερη μάζα ώστε να μην επιβαρύνεται η κατασκευή. Και παράλληλα, να είναι εφικτή η κατασκευή του πυλώνα που θα προβλέπεται από τον σχεδιασμό. [1]

Στις μέρες μας, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα συνήθως διαθέτουν ένα πολύ ψηλό πυλώνα. Αυτό μπορεί να είναι τόσο ένα πλεονέκτημα όσο και ένα μειονέκτημα. Διότι όσο το ύψος του πυλώνα αυξάνεται η μεταφορά, η συναρμολόγηση και η ανέγερσή του καθώς και η συντήρηση των συστατικών μερών της ανεμογεννήτριας γίνεται όλο και πιο δύσκολη και δαπανηρή. Το κόστος του πυλώνα, στην περίπτωση αυτή, μπορεί να ανέλθει σε έως και 20% του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας, γεγονός το οποίο σίγουρα αποτελεί ένα μειονέκτημα. Από την άλλη μεριά, η ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας επίσης αυξάνεται με το ύψος του πυλώνα, αφού η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος και γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.

Θεωρητικά, το βέλτιστο ύψος πυλώνα βρίσκεται στο σημείο όπου οι δύο λειτουργίες, αύξησης του κόστους κατασκευής και ενεργειακής απόδοσης, τέμνονται. Ωστόσο, η εύρεση αυτού του σημείου τομής δεν είναι πάντοτε εφικτή. Διότι οι παράγοντες που υπεισέρχονται στην εύρεσή του είναι πολλοί και αντικρουόμενοι. Σε μεγάλες ανεμογεννήτριες, το κόστος κατασκευής αυξάνεται πιο γρήγορα με την αύξηση του ύψους του πυλώνα, απ' ό,τι σε μικρές ανεμογεννήτριες. Ακόμα πιο βασικό ρόλο παίζει η επιλογή του τόπου εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Σε νησιωτικές περιοχές, δηλαδή σε περιοχές με υψηλό βαθμό επιφανειακής τραχύτητας, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται πιο γρήγορα με το ύψος, απ' ό,τι σε χερσαίες περιοχές. Γι' αυτό το λόγο, σε νησιωτικές περιοχές η κατασκευή μεγάλων ανεμογεννητριών με ύψος πυλώνα από 80m και πάνω, είναι καθοριστικός παράγοντας για την οικονομική χρήση του αιολικού δυναμικού.

Η δεύτερη πιο σημαντική παράμετρος του σχεδιασμού είναι η δυσκαμψία του πυλώνα. Αυτή καθορίζει το υλικό που απαιτείται και τελικά το κόστος κατασκευής. Ο στόχος του σχεδιασμού του πυλώνα είναι να πετύχουμε το επιθυμητό ύψος πυλώνα με την απαιτούμενη δυσκαμψία στο χαμηλότερο δυνατό κόστος κατασκευής.

Η μεταφορά και η διαδικασία ανέγερσης εξελίσσεται σε ένα αυξανόμενο πρόβλημα για την τελευταία γενιά ανεμογεννητριών μεγάλης ισχύος. Όταν το απαιτούμενο ύψος του πυλώνα ξεπερνά τα 100m και το βάρος της κεφαλής του πυλώνα τις μερικές εκατοντάδες τόνους, τότε η διάμετρος στην βάση του πυλώνα θα πρέπει να ξεπερνά τα 5m προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή αντοχή. Σ' αυτή την περίπτωση όμως, δεν θα είναι πλέον εφικτή η οδική μεταφορά των τμημάτων του πυλώνα στο χώρο του έργου. Αυτό αποτελεί ένα ισχυρό κίνητρο ώστε να βρεθούν καινοτόμες λύσεις στον σχεδιασμό πυλώνων.

1.3.2 Τύποι πυλώνων

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ανάλογα με την περιοχή και τις απαιτήσεις διαφοροποιείται ο τύπος πυλώνα που θα δώσει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Οι τεχνικές απαιτήσεις που τίθενται από το συνολικό σύστημα μπορούν να ικανοποιηθούν με σχεδόν οποιαδήποτε παραλλαγή, αλλά το οικονομικό

βέλτιστο επιτυγχάνεται ταιριάζοντας κατάλληλα τον επιλεγμένο σχεδιασμό πυλώνα με τις απαιτήσεις που ορίζονται. Κάθε τύπος πυλώνα έχει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα. Εκτός από τις λειτουργικές πτυχές, δεν πρέπει να αγνοηθεί το γεγονός ότι ο πυλώνας, ακόμα περισσότερο από την άτρακτο, καθορίζει την εξωτερική εμφάνιση μιας ανεμογεννήτριας. Δέουσα προσοχή θα πρέπει συνεπώς να δοθεί στην αισθητική του έργου, ακόμη κι αν αυτό συνεπάγεται ορισμένες πρόσθετες δαπάνες.

Οι παλαιότεροι τύποι ανεμογεννητριών, οι ανεμόμυλοι είχαν χαμηλό ύψος σε σχέση με την διάμετρο του ρότορα και ογκώδη κατασκευή, λόγω της λειτουργίας τους ως χώρος εργασίας, παρέχοντας έτσι την απαιτούμενη δυσκαμψία. Σύντομα όμως αναγνωρίστηκε το πλεονέκτημα του αυξανόμενου ύψους και έτσι ο μύλος άρχισε να γίνεται πιο λυγρός, μοιάζοντας περισσότερο με πύργο. Αλλά μόνο στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιήθηκαν πυλώνες, η μόνη λειτουργία των οποίων έγκειται στην στήριξη του ρότορα και των μηχανικών εξαρτημάτων της κεφαλής του πυλώνα. Σαν συνέπεια αυτής της ανάπτυξης, σχεδιασμοί και υλικά πυλώνων παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία. Ο χάλυβας και το σκυρόδεμα πήραν τη θέση των ξύλινων κατασκευών των ανεμόμυλων και αποτελούν πλέον τα διαθέσιμα υλικά που έχουμε για τους διάφορους τύπους ανεμογεννητριών.

Δικτυωτοί πυλώνες: πρόκειται για ψηλούς και δύσκαμπτους πυλώνες των οποίων ο πύργος αποτελείται από δικτυώματα τριών διαστάσεων (σχήμα 1-7). Οι δικτυωτοί πυλώνες ήταν η προτιμώμενη μέθοδος σχεδιασμού των πρώτων πειραματικών ανεμογεννητριών. Καθώς επίσης, τα πρώτα χρόνια και των μικρότερων εμπορικών ανεμογεννητριών. Σήμερα, ο δικτυωτός πυλώνας αποτελεί εναλλακτική λύση του χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα, στην περίπτωση όπου έχουμε μεγάλες ανεμογεννήτριες με πολύ υψηλούς πυλώνες σε νησιωτικές περιοχές. Το κόστος παραγωγής δικτυωτών πυλώνων είναι χαμηλότερο ως και 20% από το κόστος των χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων. Αλλά δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι το κόστος συναρμολόγησης και συντήρησης ενός δικτυωτού πυλώνα είναι μεγαλύτερο.

Πυλώνες από οπλισμένο σκυρόδεμα: αυτού του τύπου οι πυλώνες χρησιμοποιήθηκαν για τις πρώτες μεγάλες πειραματικές ανεμογεννήτριες στην Δανία (σχήμα 1-8). Αργότερα, οι χαλύβδινοι πυλώνες κυριάρχησαν και στις εμπορικές ανεμογεννήτριες. Σήμερα, οι πυλώνες από σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται όταν το απαιτούμενο ύψος ξεπερνά τα 80m. Το μειονέκτημα αυτού του τύπου είναι ότι η συνολική μάζα αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με τον τύπο του χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα. Αλλά το κόστος εδώ είναι εξαιρετικά χαμηλό, ειδικά στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα προεντεταμένα τμήματα από σκυρόδεμα.

Αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες: αποτελεί τον πιο κοινό τύπο πυλώνα σε χρήση σήμερα. Δίνουν την δυνατότητα να μειώνεται η μάζα της κατασκευής, μιας και η δυσκαμψία σχεδιασμού είναι χαμηλότερη. Επομένως, και το κόστος μειώνεται λόγω μείωσης της μάζας.

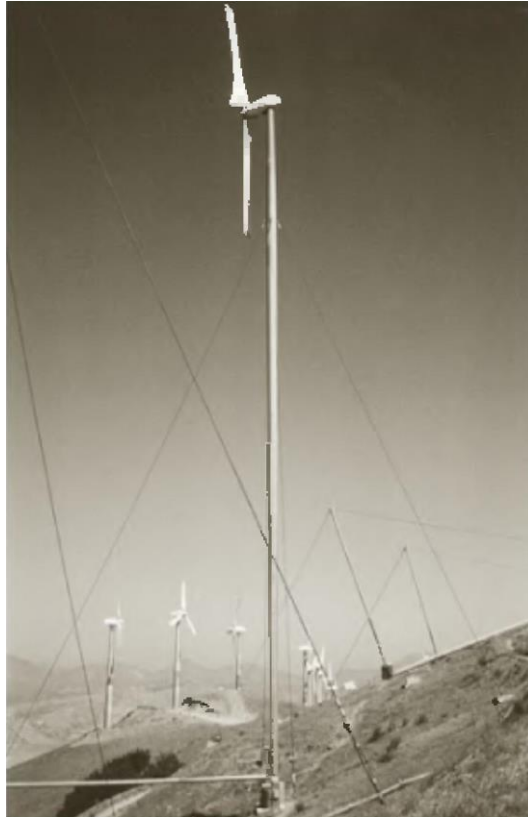
Χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες με αγκύρια: αυτοί είναι αγκυρωμένοι με χαλύβδινα καλώδια ή σε μερικές περιπτώσεις με δύσκαμπτα δικτυώματα ώστε να ενισχύσουν την απαιτούμενη καμπτική δυσκαμψία του πυλώνα (σχήμα 1-9). Η διάμετρος και η μάζα του πυλώνα μπορούν να μειωθούν σημαντικά με την χρήση αυτού του τύπου. Παρά την συγκριτικά χαμηλή συνολική τους μάζα όμως, οι αγκυρωμένοι πυλώνες δεν είναι αποδοτικοί από πλευράς κόστους. Τα αγκύρια και τα πρόσθετα απαιτούμενα θεμέλια αγκύρωσης που απαιτούνται διογκώνουν το συνολικό κόστος. Επιπλέον, σε αγροτικές περιοχές τα αγκύρια αυτά αποτελούν εμπόδια που περιορίζουν την πρόσβαση.



Σχήμα 1-7: Δικτυωτός πυλώνας ανεμογεννήτριας Vestas V80 [1]



Σχήμα 1-8: Πυλώνας από οπλισμένο σκυρόδεμα πειραματικής ανεμογεννήτριας [1]



Σχήμα 1-9: Χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες με αγκύρια [1]



Σχήμα 1-10: Αυτόνομος χαλύβδινος σωληνωτός πυλώνας μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα [1]

1.3.3 Αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες

Σήμερα, οι αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες είναι μακράν ο προτιμώμενος τύπος κατασκευής εμπορικών ανεμογεννητριών. Ο κυριότερος λόγος που οδηγεί σ' αυτή την επιλογή είναι ο μικρός χρόνος που απαιτείται για την επιτόπια συναρμολόγηση και ανέγερση. Η προτίμηση όμως στους πυλώνες αυτού του τύπου, στηρίζεται επίσης και από το γεγονός ότι η τιμή του χάλυβα σήμερα είναι πολύ χαμηλή.

Οι χαμηλοί πυλώνες με ύψος μέχρι τα 20m μπορούν να κατασκευαστούν από ένα και μόνο τμήμα το οποίο κοχλιώνεται απλά στο θεμέλιο στον χώρο του έργου. Αντίθετα, για υψηλότερους πυλώνες με ύψος μέχρι 100m επειδή δεν είναι δυνατή η οδική μεταφορά ενός μόνο τμήματος, κατασκευάζονται από περισσότερα τμήματα. Τα τμήματα αυτά κοχλιώνονται μεταξύ τους, έτσι ώστε να μην απαιτούνται συγκολλήσεις στο χώρο του έργου.

Η διαστασιολόγηση ενός πυλώνα καθορίζεται από ένα αριθμό απαιτήσεων αντοχής και δυσκαμψίας. Οι παράμετροι οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό είναι:

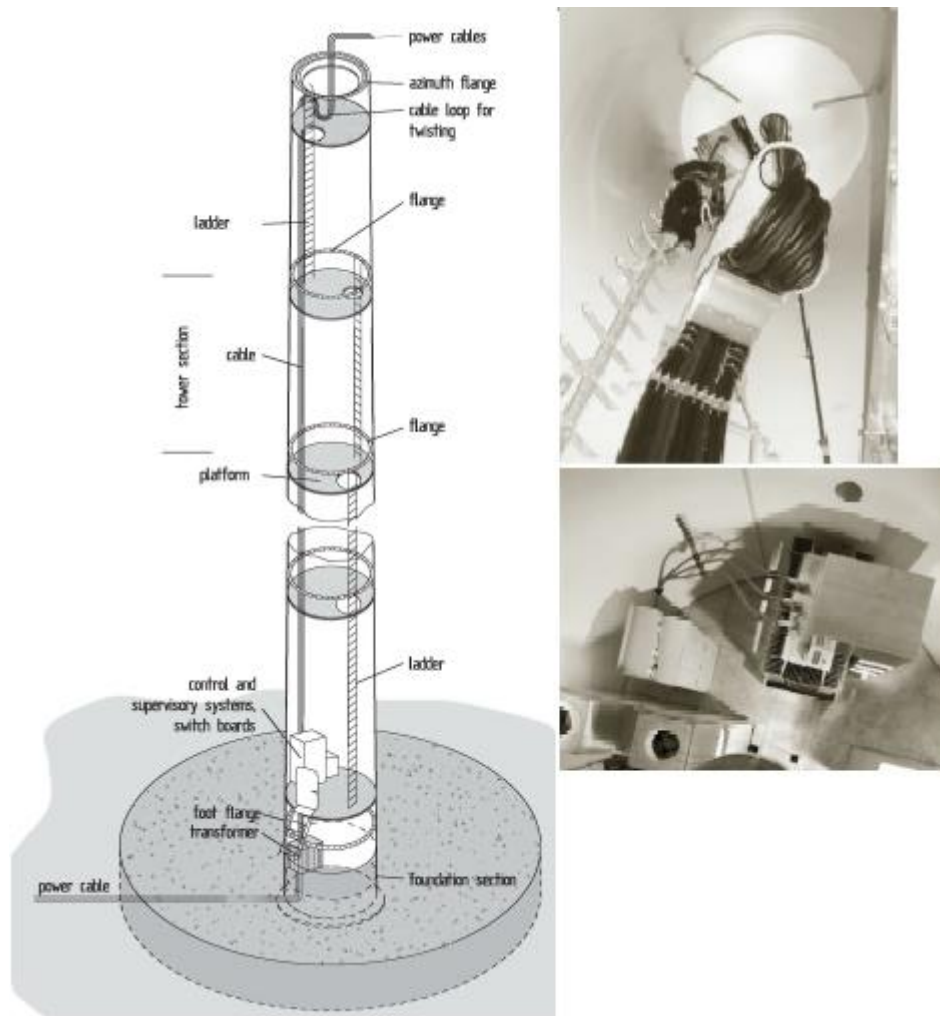
- Η αντοχή σε θραύση που απαιτείται ώστε να επιβιώσει τις ακραίες ταχύτητες ανέμου. Το στατικό φορτίο καθορίζεται από το βάρος της κεφαλής του πύργου, το ίδιο βάρος του πυλώνα και την αεροδυναμική ώθηση του ρότορα. Σημαντικό ρόλο στην τιμή αυτού του φορτίου παίζει το σύστημα ελέγχου των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, pitch control ή stall control. Στην κλασική περίπτωση, το φορτίο θραύσης είναι αυτό που θα δώσει την καμπτική ροπή που δρα στην βάση του πυλώνα.
- Η αντοχή σε κόπωση που απαιτείται για διάρκεια ζωής 20 έως 30 χρόνια λειτουργίας. Το δυναμικό φορτίο που προκαλείται από την ώθηση του ρότορα κατά την λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι καθοριστικό για την αντοχή σε κόπωση λυγρών πυλώνων. Επιπλέον, πρόσθετα φορτία που προκαλούνται από τυχόν δονητική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας σε περιπτώσεις συντονισμού πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη. Επομένως, μία αμιγώς στατική ανάλυση τάσεων στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας δεν είναι επαρκής.
- Η απαιτούμενη δυσκαμψία του πυλώνα, η οποία εκτός από μερικές εξαιρέσεις είναι το σημαντικότερο κριτήριο για την διαστασιολόγηση του πυλώνα. Είναι αυτή που καθορίζει το απαραίτητο πάχος τοιχώματος.
- Η αντοχή σε λυγισμό. Σημαντικό κριτήριο για τους λεπτότοιχους κυρίως χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες είναι η αντίσταση σε τοπικό λυγισμό του τοίχους του πυλώνα. Η βελτιστοποίηση του αυξανόμενου βάρους στους σύγχρονους χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες έχει σαν αποτέλεσμα η αντοχή σε λυγισμό να είναι συχνά καθοριστική για την επιλογή του απαιτούμενου πάχους του τοίχους του πυλώνα.

Ο σχεδιασμός ενός δύσκαμπτου πυλώνα είναι πάντοτε η πιο απλή και ασφαλής λύση, αλλά η μάζα του πυλώνα που απαιτείται ώστε να επιτευχθεί αυτό αυξάνεται πολύ. Για ανεμογεννήτριες με ύψος πυλώνα άνω των 80m για οικονομικούς λόγους η δυσκαμψία πρέπει να διατηρείται τόσο χαμηλά όσο είναι τεχνικά εφικτό.

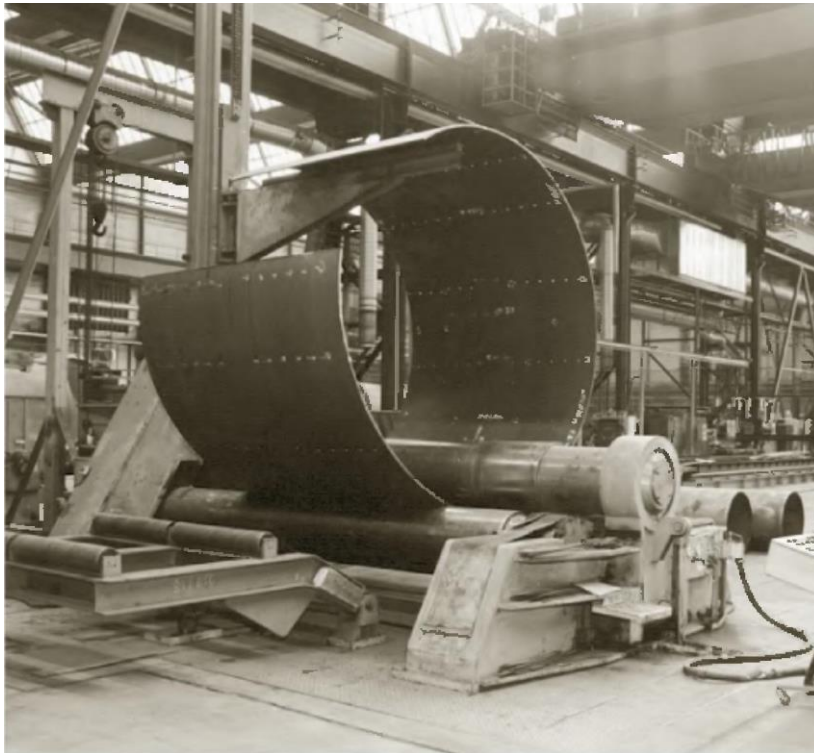
1.3.4 Τεχνικές παραγωγής και κατασκευής χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων

Σήμερα, οι πυλώνες των μεγάλων ανεμογεννητριών, σχεδόν χωρίς εξαίρεση, έχουν ένα κωνικό σχήμα. Δηλαδή η διάμετρος του πυλώνα μειώνεται σταδιακά από την βάση ως την κεφαλή του. Διότι παρότι ένας αυτόνομος κυλινδρικός σωλήνας με σταθερό πάχος τοιχώματος μπορεί να είναι απλός στην κατασκευή, δεν είναι σε καμία περίπτωση ο βέλτιστος. Για τις δεδομένες απαιτήσεις ύψους και δυσκαμψίας, η συνολική μάζα μπορεί να μειωθεί αποφασιστικά με την επιλογή μίας κωνικής γεωμετρίας πυλώνα. Η διεύρυνση της βάσης ενός χαλύβδινου πυλώνα κωνικά, μας δίνει την δυνατότητα να διαθέτουμε την απαιτούμενη δυσκαμψία με μία μειωμένη συνολική μάζα.

Ο πυλώνας αποτελείται από έναν αριθμό προκατασκευασμένων τμημάτων με μήκος μέχρι 30m. Τα τμήματα αυτά παράγονται από φύλλα ενός χαλύβδινου ελάσματος με πάχη 10mm-50mm. Τα φύλλα τα οποία έχουν πλάτος περίπου 2m, τυλίγονται σε ένα κυκλικό σχήμα σε μία κυλιόμενη βάση, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-12. Στην συνέχεια, τα τμήματα αυτά των 2m συγκολλούνται μεταξύ τους δημιουργώντας κάθε ένα από τα τμήματα πυλώνα. Στις περισσότερες περιπτώσεις για τις συγκολλήσεις αυτές χρησιμοποιούνται αυτόματοι συγκολλητές. Διότι οι συγκολλήσεις σε τέτοια έργα απαιτούν



Σχήμα 1-11: Συστατικά μέρη ενός αυτόνομου χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα [1]



Σχήμα 1-12: Κατασκευή τμημάτων πυλώνα πλάτους 2m [1]

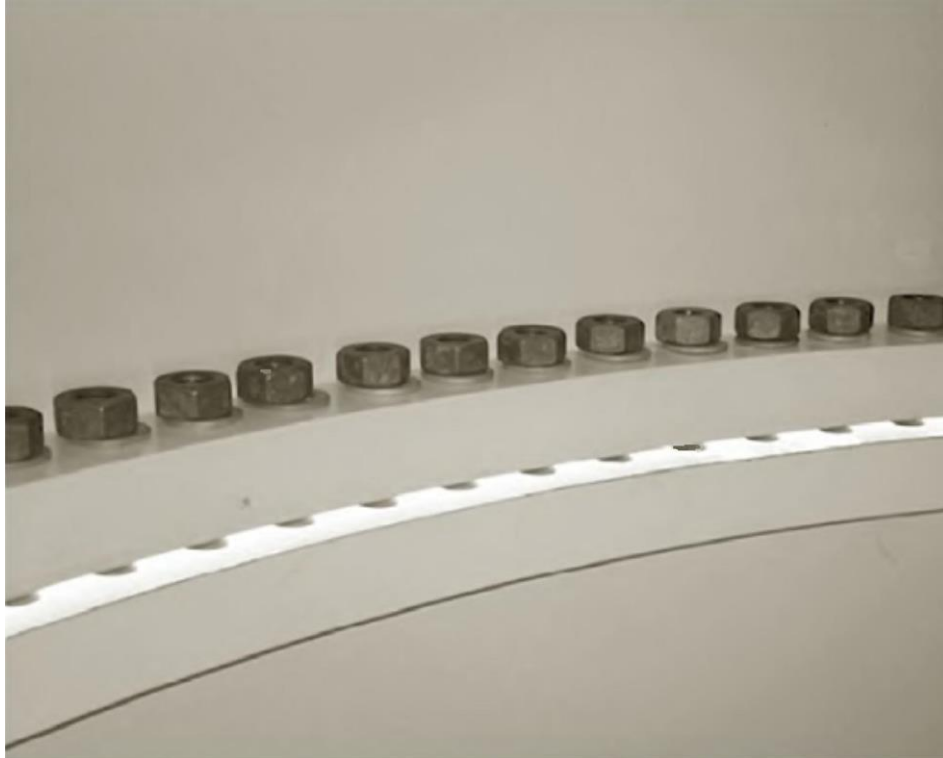
ιδιαίτερη προσοχή. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, όπως υπέρηχοι, ακτίνες X αλλά και οπτικοί έλεγχοι για επιφανειακές ρωγμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται ώστε να διασφαλισθεί η ποιότητα των συγκολλήσεων.

Στα άκρα του κάθε τμήματος πυλώνα συγκολλούνται οι εσωτερικές φλάντζες, οι οποίες κατασκευάζονται από χάλυβα υψηλής αντοχής. Και εδώ η διαμόρφωση και η συγκόλληση των δακτυλίων απαιτεί κάποια εξειδίκευση αφού τα συστατικά μέρη μπορούν εύκολα να παραμορφωθούν και αυτό θα 'χει σαν αποτέλεσμα οι δακτύλιοι να μην ταιριάζουν κατά την συναρμολόγηση. Τα προκύπτοντα κενά ανάμεσα στα τμήματα του πυλώνα είναι ένα ποιοτικό ελάττωμα το οποίο συναντάται συχνά σε χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες.

Στο σχήμα 1-13 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο κοχλιώνονται δύο τμήματα πυλώνα μεταξύ τους. Είναι πολύ βασικό να τονίσουμε ότι οι κοχλίες που χρησιμοποιούνται για την σύνδεση τμημάτων της ανεμογεννήτριας είναι πάντοτε προεντεταμένοι. Διότι μόνο έτσι μπορούμε να διασφαλίσουμε την απαιτούμενη αντοχή σε κόπωση. Οι δακτύλιοι στις περισσότερες περιπτώσεις είναι εσωτερικοί, μίας και οι διάμετροι πυλώνα των μεγάλων ανεμογεννητριών έχουν διαστάσεις που επιτρέπουν την παρουσία των τεχνικών στο εσωτερικό του πυλώνα και την πραγματοποίηση της σύνδεσης. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι οι κοχλίες τοποθετούνται ανάποδα στην σύνδεση, δηλαδή με την κεφαλή του κοχλία από κάτω και το περικόχλιο από πάνω. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό, είναι για να αποφύγουμε τυχόν αστοχίες. Επειδή υπάρχει περίπτωση λόγω εναλλασσόμενης φόρτισης από τα φορτία ανέμου κάποιος κοχλίας να χαλαρώσει και να πέσει, μ' αυτή την τοποθέτηση αυτό θα γίνει αμέσως αντιληπτό κατά την συντήρηση.

Επομένως, κατά την ανέγερση της ανεμογεννήτριας πρώτα κατασκευάζεται το θεμέλιο. Έπειτα, το κατώτερο τμήμα του πυλώνα κοχλιώνεται στο τμήμα θεμελίωσης το οποίο κατασκευάζεται χωριστά και ενσωματώνεται μέσα στο θεμέλιο. Στη συνέχεια, το επόμενο τμήμα του πυλώνα σηκώνεται από τον γερανό και πραγματοποιείται η κοχλιωτή σύνδεση κοκ. (σχήμα 1-14) Τέλος, ο πύργος ενώνεται με την άτρακτο (nacelle). Όσον αφορά την τοποθέτηση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, υπάρχουν

δύο πιθανοί τρόποι τοποθέτησης. Είτε κοχλιώνονται όλα τα πτερύγια στην άτρακτο στο έδαφος και στη συνέχεια όλο το σύστημα αυτό σηκώνεται από τον γερανό και κοχλιώνεται στον ρότορα (σχήμα 1-15). Είτε τοποθετείται πρώτα η άτρακτος στον ρότορα και στη συνέχεια ένα ένα τα πτερύγια.



Σχήμα 1-13: Κοχλιωτή σύνδεση των τμημάτων του πυλώνα [1]



Σχήμα 1-14: Ανέγερση τμήματος πυλώνα (πηγή: www.windlab.com & diamondtowerservice.com)



Σχήμα 1-15: Ανέγερση πτερυγίων (πηγή: www.bigge.com)

Όπως σε κάθε μεταλλική κατασκευή μεγάλης σπουδαιότητας, η κατεργασία των επιφανειών είναι απαραίτητη για την ποιότητα των χαλύβδινων πυλώνων. Η διάβρωση θα πρέπει να αποτρέπεται μέσα στις δεκαετίες ακόμη και σε ένα επιθετικό περιβάλλον όπως είναι το παραθαλάσσιο. Μετά την αμμοβολή των τμημάτων του πυλώνα, καλύπτονται με θερμικά εφαρμοζόμενα επιστρώματα ψευδαργύρου. Τέλος, είναι απαραίτητη η εφαρμογή 2 έως 3 στρώσεων βαφής. Μερικές χώρες οι περιοχές έχουν κανονισμούς σχετικά με το χρώμα του πυλώνα.

Η κατασκευή χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων είναι μία συμβατική τεχνολογία η οποία δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις όσον αφορά τον εξοπλισμό των κατασκευαστών. Για ύψη πυλώνα άνω των 90m η διάμετρος της βάσης του είναι μεγαλύτερη των 4.5m και το απαιτούμενο πάχος του χάλυβα ξεπερνά τα 40mm. Όμως σ' αυτές τις περιπτώσεις το κουρμπάρισμα των φύλλων χάλυβα θα απαιτεί ειδικά μηχανήματα τα οποία δεν είναι διαθέσιμα σε κανονικές βιομηχανίες χάλυβα. Επιπλέον λόγω της μεγάλης διαμέτρου βάσης τα χαμηλότερα τμήματα του πυλώνα δεν θα μπορούν να μεταφερθούν οδικά.

Ο πυλώνας πρέπει να παρέχει μία ασφαλή ανάβαση στην άτρακτο και επίσης να περιλαμβάνει κάποιες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, ιδιαίτερα τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην βάση του πυλώνα. Αυτό απαιτεί ορισμένες εσωτερικές εγκαταστάσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-11 δεξιά. Ανάλογα με το ύψος του πυλώνα ένας αριθμός από ενδιάμεσες πλατφόρμες είναι συνήθως τοποθετημένες, τυπικά μία πλατφόρμα για κάθε τμήμα του πυλώνα. Για ύψη μέχρι 60m-70m απλές κάθετες σκάλες με αναρριχητική προστασία χρησιμοποιούνται για την ανάβαση. Αν απαιτείται από το χειριστή, απλοί ανελκυστήρες αναρρίχησης εγκαθίστανται σε πυλώνες ύψους άνω των 80m.

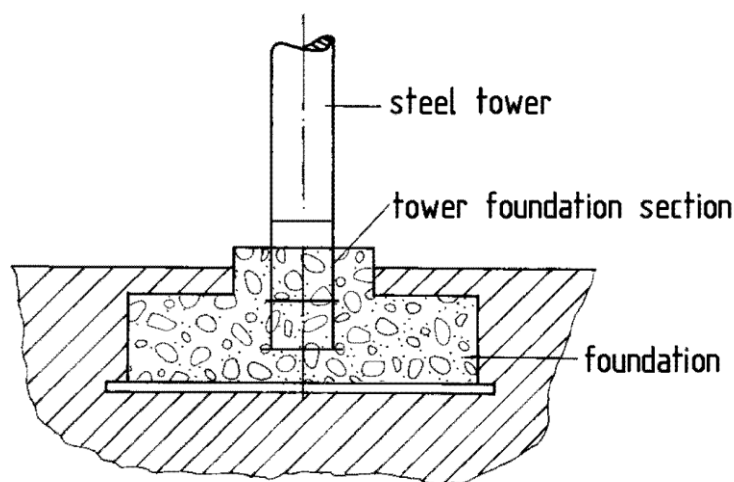
Τα καλώδια για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας κρέμονται ελεύθερα με ένα βρόγχο στο άνω τμήμα του πυλώνα (σχήμα 1-11). Επιπλέον, εσωτερικός φωτισμός είναι υποχρεωτικός για τις εργασίες συντήρησης στον πυλώνα.

1.3.5 Θεμελίωση ανεμογεννητριών

Η θεμελίωση ενός πυλώνα καθορίζεται από το μέγεθος της ανεμογεννήτριας και από τις τοπικές συνθήκες του εδάφους. Στο πλαίσιο αυτό, τα φορτία τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την διαστασιολόγηση είναι κατά κύριο λόγο τα υψηλότερα φορτία τα οποία δρουν στην ανεμογεννήτρια σε συνθήκες ακινητοποίησης. Η καθοριστική παράμετρος είναι η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα ανέμου. Ωστόσο, κάποιο ρόλο παίζει και ο τεχνικός τρόπος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Για παράδειγμα, σε μία ανεμογεννήτρια με σύστημα ελέγχου κλίσης πτερυγίων stall control δεν παρέχεται η δυνατότητα απάλυνσης των πτερυγίων και έτσι συγκριτικά μπορούν να εμφανιστούν μεγάλα στατικά φορτία στον σχεδιασμό, ένα γεγονός το οποίο έχει πολύ μεγάλη σημασία στην διαστασιολόγηση και κατ' επέκταση στην κοστολόγηση. Μια δεύτερη φορτιστική κατάσταση η οποία πρέπει να ελεγχθεί είναι αυτή στην οποία συμμετέχουν τα μέγιστα φορτία κατά την διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Κατά την λειτουργία, η μέγιστη ροπή ανατροπής για την θεμελίωση προσδιορίζεται με την ώθηση του ρότορα. Σε ανεμογεννήτριες με έλεγχο κλίσης πτερυγίων (pitch control) η ώθηση του ρότορα φτάνει την μέγιστη τιμή στην ονομαστική ισχύ ενώ σε ανεμογεννήτριες με stall control συνεχίζεται να αυξάνεται ακόμα κι όταν φτάσει την ονομαστική ισχύ. Η έγκριση σχεδιασμού και η πιστοποίηση ασφαλείας που απαιτούνται από τις αρχές στις περισσότερες περιπτώσεις βασίζονται σε αυτά τα στατικά φορτία. Οι υπολογισμοί αντοχής σε κόπωση οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη το δυναμικό φάσμα φορτίων κανονικά δεν ζητούνται. Αυτοί οι υπολογισμοί γίνονται υπ' ευθύνη του κατασκευαστή.

Ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες, η θεμελίωση που απαιτείται είναι είτε επιφανειακή θεμελίωση είτε θεμελίωση με πασσάλους. Ο καθοριστικός παράγοντας είναι το βάθος στο οποίο βρίσκονται στρώματα εδάφους τα οποία θα απορροφήσουν τα επιβαλλόμενα φορτία.

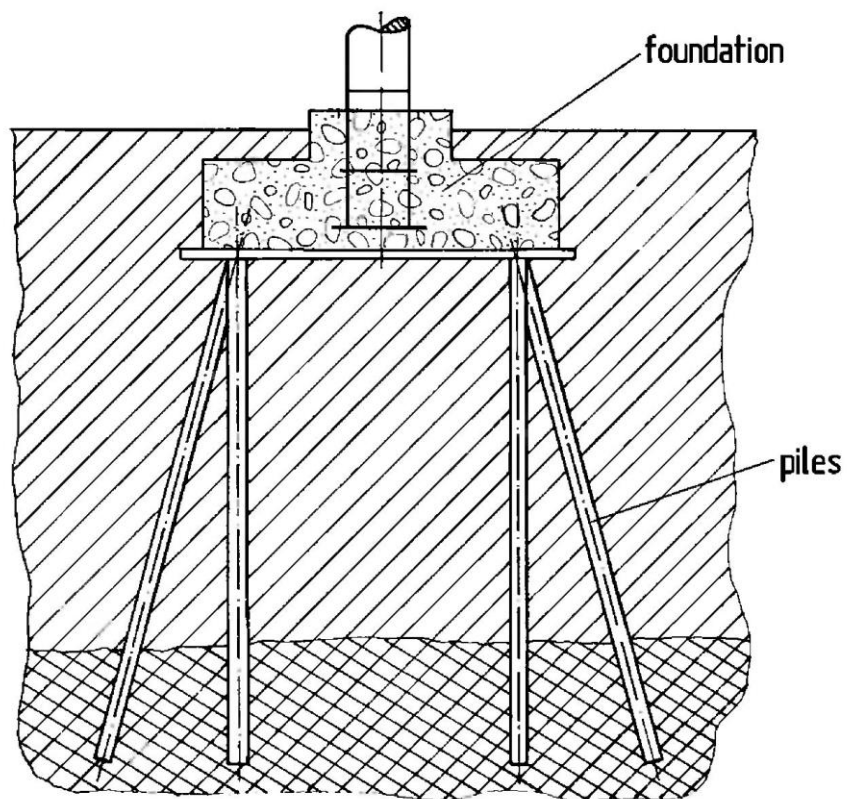
Η επιφανειακή θεμελίωση (σχήμα 1-16) είναι συνήθως κυκλικά, ορθογωνικά ή πολυγωνικά πέδιλα. Οι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες αγκυρώνονται από ένα τμήμα θεμελίωσης το οποίο έχει ενταχθεί στον χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος του θεμελίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-18. Η απαιτούμενη μάζα και οι διαστάσεις της πλάκας καθορίζονται από την ροπή ανατροπής της κατασκευής.



Σχήμα 1-16: Επιφανειακή θεμελίωση χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα [1]

Η θεμελίωση με πασσάλους (σχήμα 1-17) αποτελεί τον προτιμώμενο τύπο θεμελίωσης για αδύναμα εδάφη. Περιλαμβάνει μία πλάκα έδρασης η οποία στηρίζεται πάνω στους πασσάλους και μεταφέρει τα φορτία σε φέροντα στρώματα του εδάφους. Η ενσωμάτωση του τμήματος θεμελίωσης στο οποίο κοχλιώνεται ο δακτύλιος της βάσης του πυλώνα απαιτεί κάποια εμπειρία. Η φλάντζα του τμήματος

θεμελίωσης πρέπει να τοποθετείται σε οριζόντια και επίπεδη θέση με πολύ μικρή ανοχή από την ευθυγράμμια, ώστε να αποτρέψουμε τυχόν κλίση στον πυλώνα.



Σχήμα 1-17: Θεμελίωση με πασσάλους [1]



Σχήμα 1-18: Θεμελίωση μεγάλης εμπορικής ανεμογεννήτριας [1]

2 Η ΚΟΠΩΣΗ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

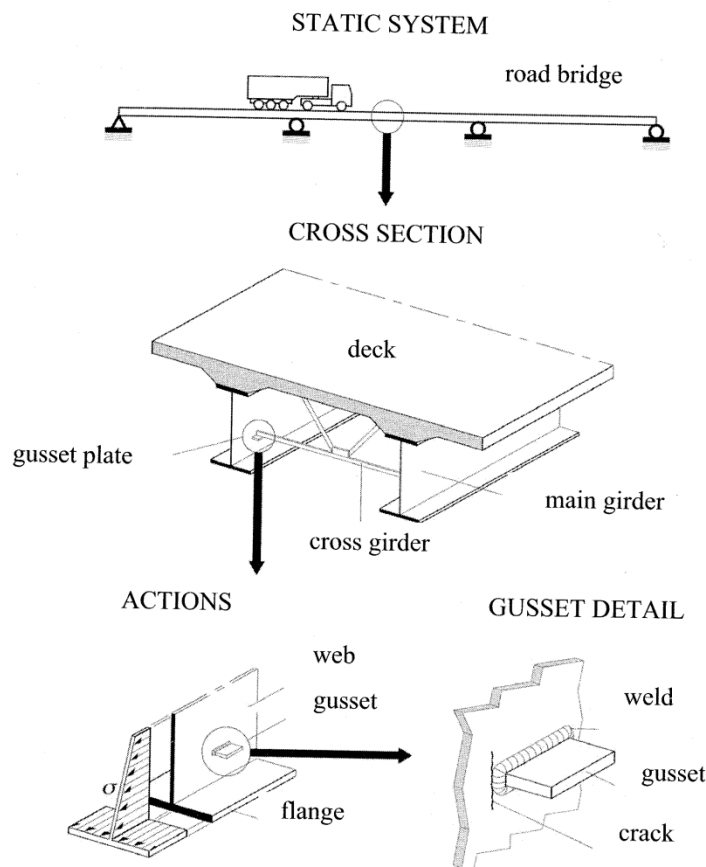
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εκτενής αναφορά στο φαινόμενο της κόπωσης και στο πώς πρέπει να γίνεται ο έλεγχος έναντι κόπωσης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, για οποιαδήποτε μεταλλική κατασκευή και συγκεκριμένες αναφορές σε περιπτώσεις φορέων όπως η ανεμογεννήτρια. Συγκεκριμένα, πρόκειται να παρουσιαστούν στη συνέχεια κάποιες βασικές έννοιες, οι παράμετροι που σχετίζονται με το φαινόμενο της κόπωσης, αλλά και τα μέρη του Ευρωκώδικα στα οποία πρέπει να ανατρέξει κανείς για την εκτέλεση ενός ελέγχου έναντι κόπωσης. Στη συνέχεια, θα αναφερθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση και ποιες από αυτές πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη. Ακόμα, ακολουθούν τα εντατικά μεγέθη που προκαλούν την κόπωση και πώς μπορούν να υπολογισθούν, αλλά και πως θα προσδιορισθεί η αντοχή σε κόπωση, προκειμένου εν τέλει να εκτελεσθεί ο έλεγχος έναντι κόπωσης, ανάλογα με την επιλεχθείσα μέθοδο.

Μέχρι παλιότερα, η ενημέρωση για το πρόβλημα της κόπωσης ήταν ελάχιστη και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να μην γίνονται καν έλεγχοι έναντι κόπωσης κατά τον σχεδιασμό των κατασκευών εκτός από πολύ εμφανείς περιπτώσεις. Με τον καιρό οι αστοχίες που προκλήθηκαν λόγω κόπωσης στις κατασκευές οδήγησαν στο να αναπτυχθούν οι πρώτες προτάσεις περί το 1985 μόλις. Με την εξέλιξη των υλικών και των κατασκευαστικών μεθόδων ο τρόπος ελέγχου άλλαζε σταδιακά, γίνονταν προσαρμογές και προσθήκες και έτσι καταλήξαμε στα σύγχρονα κείμενα του Ευρωκώδικα που δίνουν λεπτομερείς οδηγίες για την εκτέλεση ενός πλήρους ελέγχου έναντι κόπωσης ανάλογα με την περίπτωση.

Η κόπωση αποτελεί μαζί με την διάβρωση μία από τις κύριες παραμέτρους που προκαλούν βλάβες σε μέλη μεταλλικών κατασκευών. Είναι η φαινομενικά παράδοξη εκδήλωση ρηγμάτωσης και θραύσης των μετάλλων χωρίς πλαστική παραμόρφωση, όταν αυτά υποβάλλονται σε ένα μεγάλο αριθμό κυκλικών φορτίσεων, συχνά πολύ μικρής έντασης. Πρόκειται για ένα φαινόμενο το οποίο λαμβάνει χώρα όταν το μέλος υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση λόγω της δράσης κυμαινόμενων τάσεων. Η εκδήλωση του φαινομένου της κόπωσης γίνεται ορατή με την εμφάνιση κάποιων ρωγμών οι οποίες αναπτύσσονται σε συγκεκριμένες θέσεις στην κατασκευή. Σε γενικές γραμμές, κατασκευές οι οποίες υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενα κυκλικά φορτία μπορεί να υποστούν προοδευτική βλάβη η οποία γίνεται εμφανής μέσω της διάδοσης αυτών των ρωγμών. Η βλάβη αυτή ονομάζεται κόπωση των κατασκευών και το αποτέλεσμα από την δράση αυτού του φαινομένου είναι να χάνεται η αντίσταση της κατασκευής με το χρόνο.

Επαναλαμβανόμενες φορτίσεις στο χρόνο με λιγότερο περιοδικό χαρακτήρα και με μικρότερη συχνότητα παρατηρούνται στα συστήματα προσγείωσης αεροσκαφών, στις μεταλλικές κατασκευές που είναι εκτεθειμένες στην ενέργεια του ανέμου, στις ηλεκτρικές μηχανές και στροβίλους κατά την εκκίνηση, κλπ. Καταπονήσεις μεγάλης συχνότητας και μικρής σχετικά έντασης επικρατούν στον σκελετό και στα τοιχώματα πλοίων και αεροπλάνων από τις δονήσεις των κινητήρων, κλπ.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι θέσεις στις οποίες αναπτύσσονται οι ρωγμές λόγω κόπωσης είναι συγκεκριμένες. Η ρωγμάτωση αυτή σπάνια θα εμφανισθεί στο μητρικό υλικό μακριά από κάποια κατασκευαστική λεπτομέρεια, συγκολλήσεις ή συνδέσεις. Ακόμα κι αν η αντοχή της σύνδεσης είναι μεγαλύτερη απ' αυτή των συνδεόμενων μελών, κρίσιμη για την κόπωση παραμένει η σύνδεση. Για να γίνει το γεγονός αυτό περισσότερο κατανοητό παρατίθεται το σχήμα 1-2. Το σχήμα αυτό απεικονίζει το παράδειγμα μίας οδικής γέφυρας με μεταλλικό φορέα και πλάκα καταστρώματος η οποία υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση λόγω της διέλευσης των οχημάτων. Οι τάσεις που αναπτύσσονται από την διέλευση κάθε οχήματος επηρεάζονται από την παρουσία προσαρμογών, όπως αυτών που συνδέουν τις κύριες δοκούς με τις δευτερεύουσες. Στον κορμό της κύριας δοκού εκεί όπου συγκολλείται το έλασμα προκειμένου να επιτευχθεί η σύνδεση λαμβάνει χώρα μία συγκέντρωση τάσεων λόγω της απότομης αλλαγής στη γεωμετρία γι' αυτό και η ρωγμή λόγω κόπωσης θα εμφανισθεί στην θέση αυτή και συγκεκριμένα στο πόδι της συγκόλλησης. Ακόμα κι αν οι επιβαλλόμενες τάσεις παραμένουν αρκετά χαμηλότερα από το όριο διαρροής του υλικού, η συνδυασμένη δράση συγκέντρωσης τάσεων και ασυνεχειών είναι αυτές που προκαλούν τον σχηματισμό και την διάδοση μίας ρωγμής λόγω κόπωσης.



Σχήμα 2-1: Πιθανή θέση ρωγμής λόγω κόπωσης σε οδική γέφυρα [3]

Θραύσεις από κόπωση μπορούν να συμβούν με καταπονήσεις πολύ μικρότερες του ορίου θραύσης του χάλυβα, μάλιστα χαμηλότερες και του ορίου διαρροής του. Επιπλέον, η εκδήλωση του φαινομένου δεν

συνοδεύεται από πλαστική παραμόρφωση, ενώ η ρηγμάτωση είναι συχνά εσωτερική ή αόρατη. Έτσι αν και η διάδοση της ρωγμής είναι προοδευτική, η θραύση παρουσιάζεται απότομα, όταν η αρηγμάτωση διατομή του μετάλλου μειωθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μην αντέχει πια στα επιβαλλόμενα φορτία. Έχουμε τότε συνήθως ψαθυρή θραύση, γιατί το ρήγμα έχει αποκτήσει το κρίσιμο μέγεθος που χρειάζεται για να προκληθεί σχισμός.

Σε γενικές γραμμές, μία ρωγμή αναπτύσσεται μέσω ασυνεχειών που υπάρχουν εξ' αρχής στο μητρικό υλικό και έχουν βάθος μόλις μερικά δέκατα του χιλιοστού. Τέτοιες ατέλειες μπορεί να βρίσκονται στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό του αντικειμένου. Είναι σημάδι από τη μηχανουργική κατεργασία, πόρος, έγκλεισμα σκουριάς ή σημείο που αντιστοιχεί σε συγκέντρωση τάσεων και χαρακτηρίζεται ως αφορμή κόπωσης. Η αφορμή διακρίνεται συχνά δύσκολα. Μπορεί αν είναι μία ή πολλές και η κάθε μία μπορεί να ενεργοποιηθεί και να γίνει αφορμή ρήγματος.

Η διάδοση μίας τέτοιας ρωγμής μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία μέσω διαρροής της καθαρής διατομής ή ψαθυρής θραύσης γεγονός το οποίο εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του υλικού, την γεωμετρία ενός μέλους, την θερμοκρασία και τον ρυθμό καταπόνησης της διατομής. Επομένως, αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι ένα έργο που υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενα κυκλικά φορτία πρέπει να γίνεται με προσεκτικό σχεδιασμό και κατασκευή των επιμέρους μερών του και των κατασκευαστικών λεπτομερειών έτσι ώστε να αποφύγουμε την αστοχία από κόπωση. Γενικά, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αξιολόγησης ποιότητας που μπορούν να γίνουν και να εγγυηθούν ότι ο αριθμός και οι διαστάσεις των αρχικών ασυνεχειών παραμένουν εντός των ορίων ανοχής.

Οι συνέπειες των θραύσεων από κόπωση μπορεί να είναι πολύ καταστρεπτικές, διότι συμβαίνουν σε ανύποπτο χρόνο και πολύ συχνά κάτω από ήπιες συνθήκες λειτουργίας της κατασκευής. Τα ίδια μέλη, κάτω από συνθήκες στατικής καταπόνησης θα άντεχαν σε πολύ ισχυρότερα φορτία. Μάλιστα ακόμα και στην περίπτωση φόρτισης μεγαλύτερης του συνδυασμού οριακής κατάστασης αστοχίας έχουμε θραύση ύστερα από πλαστική παραμόρφωση, η οποία προειδοποιεί για πιθανή αναγκαιότητα λήψης μέτρων προστασίας.

Η ενεργοποίηση μίας αφορμής κόπωσης οφείλεται σε τοπική συγκέντρωση τάσεων που μπορεί να φτάσει στο όριο θραύσης. Το ρήγμα που γεννιέται στην αφορμή διευρύνεται σταδιακά σε κάθε νέο κύκλο φόρτισης. Η προχώρηση προκαλείται από τη μεγάλη συγκέντρωση τάσεων που δημιουργούνται περιοδικά στο μέτωπο της ρωγμής. Έτσι το ρήγμα προχωρεί σιγά-σιγά κατά βήματα. Η επιφάνεια της θραύσης από κόπωση είναι σχετικά λεία και συχνά στιλπνή. Αυτό οφείλεται στην τριβή των δύο επιφανειών της ρωγμής στη διάρκεια της κόπωσης. Αντίθετα η θραυσίγενής επιφάνεια που προκύπτει από την απότομη θραύση, όταν η διατομή έχει μειωθεί υπερβολικά έχει συνήθως τα χαρακτηριστικά της ψαθυρής θραύσης. Μπορεί όμως σε σπανιότερες περιπτώσεις να έχει τα χαρακτηριστικά όγκιμης θραύσης όταν το μέταλλο είναι εξαιρετικά όγκιμο.

2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Κόπωση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο εξαντλείται η αντίσταση της κατασκευής με το χρόνο. Η αντοχή σε κόπωση ενός μέλους ή μίας κατασκευαστικής λεπτομέρειας που υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενα κυκλικά φορτία ορίζεται ως ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που αντέχει πριν την αστοχία. Την αντοχή σε κόπωση επηρεάζουν τέσσερις βασικές παράμετροι τις οποίες και θα εξετάσουμε αναλυτικά στη συνέχεια.

2.2.1 Παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση

Η διαφορά των τάσεων

Στο σχήμα 2-2 παρουσιάζεται η εξέλιξη των τάσεων συναρτήσει του χρόνου για ένα σταθερό εύρος φόρτισης οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ σ_{min} και σ_{max} . Δοκιμές που έχουν γίνει κατά καιρούς έχουν δείξει ότι αυτή είναι η κυριότερη παράμετρος που επηρεάζει την αντοχή σε κόπωση λεπτομερειών συγκολλήσεων.

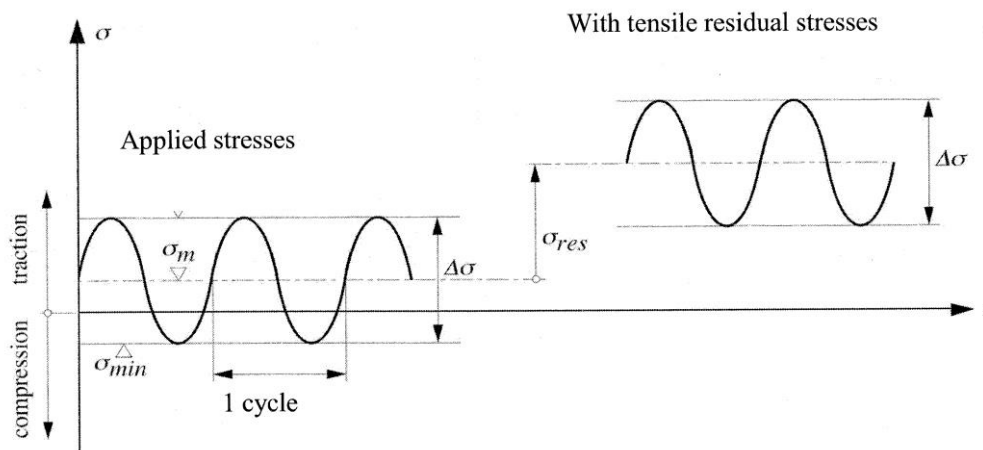
$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2-1)$$

Όπου:

σ_{max} : η μέγιστη τιμή των τάσεων

σ_{min} : η ελάχιστη τιμή των τάσεων

είναι σημαντική η διαφορά μεταξύ των εννοιών της διαφοράς των τάσεων και του εύρους των τάσεων. Το εύρος τάσεων είναι ίση με το μισό της διαφοράς των τάσεων. Ωστόσο, αυτή η παράμετρος δεν σχετίζεται με την αντοχή σε κόπωση.



Σχήμα 2-2: Προσδιορισμός των τάσεων και επιρροή των εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων [3]

Γενικά, θα μπορούσε να πει κανείς ότι η αντοχή σε κόπωση αυξάνεται όταν μέρος του κύκλου των τάσεων είναι σε θλίψη. Το γεγονός αυτό όμως δεν ισχύει στην περίπτωση που έχουμε συγκολλημένα μέλη λόγω της ύπαρξης παραμενουσών τάσεων.

Η συμπεριφορά μίας ρωγμής στην πραγματικότητα επηρεάζεται από των άθροισμα των επιβαλλόμενων και των παραμενουσών τάσεων. Ωστόσο, η αντοχή σε κόπωση μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας τις θλιπτικές παραμένουσες τάσεις μέσω της εφαρμογής μεθόδων βελτίωσης των συγκολλήσεων ή και επεμβάσεων μετά την συγκόλληση.

Η γεωμετρία της κατασκευαστικής λεπτομέρειας

Η παράμετρος αυτή είναι καθοριστική για την θέση όπου θα σχηματιστούν οι ρωγμές λόγω κόπωσης αλλά και για τον ρυθμό με τον οποίο αυτές διαδίδονται. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες γεωμετρικών επιρροών:

- Επιρροή της γεωμετρίας της κατασκευής π.χ. ο τύπος της διατομής
- Επιρροή της συγκέντρωσης τάσεων π.χ. λόγω της σύνδεσης
- Επιρροή της ύπαρξης ασυνεχειών στις συγκολλήσεις

Οι δύο πρώτες κατηγορίες μπορούν να επηρεαστούν θετικά για την κόπωση μέσω ενός καλού σχεδιασμού. Η τρίτη παράμετρος μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας επαρκείς μεθόδους κατασκευής και ελέγχου που να μπορούν να εγγυηθούν ότι οι ασυνέχειες αυτές δεν θα ξεπεράσουν τα όρια τα οποία ορίζονται από τον κανονισμό. Και γενικότερα ότι οι ασυνέχειες αυτές προέρχονται από ατέλειες των οργάνων και γενικά των συνθηκών κατά την συγκόλληση.

Τα χαρακτηριστικά του υλικού

Τα χαρακτηριστικά του υλικού επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση υπό την έννοια ότι ένα υλικό με καλύτερη ποιότητα θα έχει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και επομένως θα συμπεριφέρεται καλύτερα διότι αυξάνεται η φάση κατά την οποία σχηματίζονται οι ρωγμές λόγω κόπωσης.

Το πλεονέκτημα αυτό δεν υφίσταται στην περίπτωση συγκολλημένων μελών. Διότι σ' αυτά υπάρχουν ήδη οι ρωγμές που προέρχονται από ατέλειες της συγκόλλησης και επομένως η φάση η οποία κυριαρχεί σε αυτά είναι φάση διάδοσης των ρωγμών.

Το περιβάλλον

Η παράμετρος αυτή σχετίζεται άμεσα με το φαινόμενο της διάβρωσης. Σίγουρα η διάβρωση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αντοχή σε κόπωση γι' αυτό και σε ειδικές περιπτώσεις θα πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα προστασίας. Οι παράκτιες περιοχές καθώς και οι εγκαταστάσεις με χημικά απόβλητα είναι μερικές μόνο από τις ειδικές περιπτώσεις όπου η εφαρμογή ειδικών μέτρων προστασίας είναι αναγκαία αλλά και πολύτιμη.

2.2.2 Αντοχή σε κόπωση

Όλες αυτές οι παράμετροι οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω και επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση μπορούν να συμπτυχθούν σε μία μόνο σχέση η οποία και περιγράφει την αντοχή σε κόπωση ενός μέλους.

$$N = C \times \Delta\sigma^{-m} \quad (2-2)$$

Όπου:

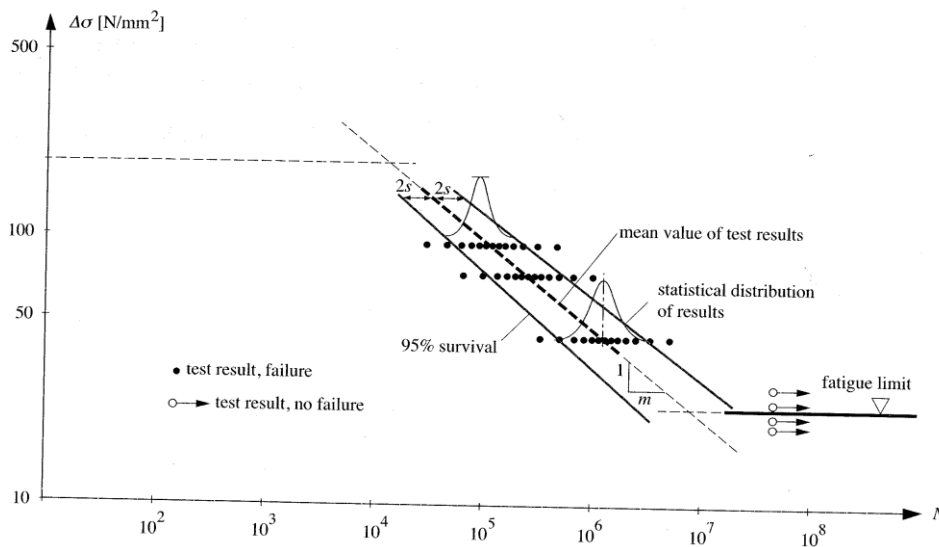
N: ο αριθμός των κύκλων που αντέχει για διαφορά τάσεων $\Delta\sigma$

C: σταθερά η οποία λαμβάνει υπόψη την γεωμετρία της κατασκευαστικής λεπτομέρειας της οποία αναζητείται η αντοχή σε κόπωση

$\Delta\sigma$: διαφορά των τάσεων σταθερού εύρους

m: συντελεστής που εκφράζει την κλίση της μέσης γραμμής του διαγράμματος που προκύπτει από πειραματικά δεδομένα (σχήμα 2-3)

Προκειμένου η εξίσωση 2-2 να έχει την γραμμική μορφή του σχήματος 2-3 θα πρέπει οι συντελεστές της σχέσης να λογαριθμηθούν.



Σχήμα 2-3: Αποτελέσματα πειραματικών ελέγχων σε κόπωση σε κατασκευαστικά χαλύβδινα μέλη σε διπλή λογαριθμική κλίμακα τα οποία εκτελεστήκαν υπό σταθερού εύρους φόρτιση [3]

2.2.3 Η έννοια της συσσώρευσης βλάβης

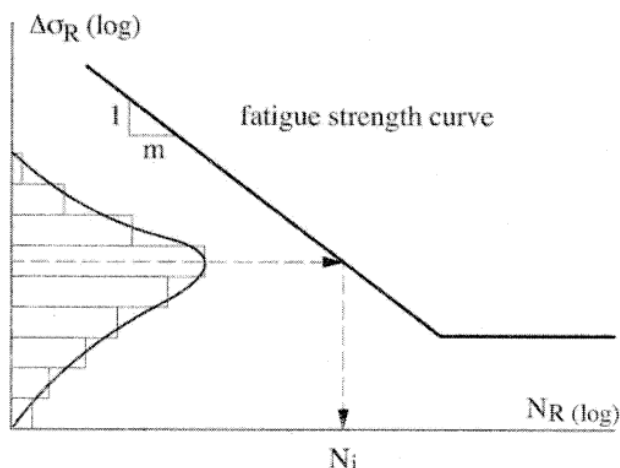
Η αξιολόγηση της βλάβης που μπορεί να υποστεί μία κατασκευή λόγω κόπωσης κατά την διάρκεια ζωής της είναι ένα πολύ δύσκολο εγχείρημα. Δεδομένου ότι είναι αδύνατο προσδιορισθεί η πραγματική φόρτιση στην οποία θα υποβληθεί το έργο καθώς και η συχνότητα των φορτίων. Έχουν επινοηθεί κάποια μοντέλα φόρτισης τα οποία όμως δεν μπορούν να αποδώσουν απόλυτα τα πραγματικά φορτία. Επομένως, αν δεν είναι εφικτό να προσδιορισθεί η πραγματική φόρτιση δεν μπορεί κατ' επέκταση να αξιολογηθεί η προκύπτουσα βλάβη λόγω κόπωσης, η οποία μάλιστα σχετίζεται με εναλλασσόμενα φορτία.

Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται ένας απλός γραμμικός νόμος, ο νόμος των Palmgren-Miner, προκειμένου να προσδιορισθεί η συσσώρευση βλάβης λόγω κόπωσης D . Όταν μία κατασκευή υπόκειται σε μία φόρτιση με διαφορετικές διαφορές τάσεων $\Delta\sigma$, οι οποίες εμφανίζονται n_i φορές κατά την διάρκεια ζωής του έργου, τότε ορίζεται μία μερική βλάβη ίση με τον λόγο n_i/N_i όπου το N_i αντιπροσωπεύει των αριθμών κύκλων φόρτισης που αντέχει μέχρι την αστοχία υπό την διαφορά τάσεων $\Delta\sigma_i$. Επομένως, η συνολική βλάβη, σύμφωνα με τον νόμο των Palmgren-Miner, δίνεται από την σχέση:

$$D_{tot} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = \sum_{i=1}^{n_{tot}} \frac{n_i}{N_i} = \int \frac{dn}{N} \quad (2-3)$$

Προκειμένου να μην επέλθει αστοχία λόγω κόπωσης στην κατασκευή θα πρέπει:

$$D_{tot} \leq 1.0$$



Σχήμα 2-4: Damage accumulation scheme [3]

2.3 ΕΥΡΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 3 & ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Στο σχήμα 2-5 παρουσιάζεται το σύνολο των μερών του Ευρωκώδικα 3 που αφορούν τον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών. Το μέρος 1-9 και 1-10 του EN 1993 (EN 1993-1-9:2005 & EN 1993-1-10:2005) σχετίζονται με την κόπωση και την ψαθυρή θραύση.

Κατασκευές για τις οποίες είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός έναντι κόπωσης είναι:

- Χαλύβδινες κατασκευές, γενικοί κανόνες και έλεγχοι που πρέπει να ικανοποιούνται για κτίρια (EN1993-1-1)
- Χαλύβδινες γέφυρες (EN 1993-2)
- Πύργοι και καπνοδόχοι (EN 1993-3)
- Σιλό και δεξαμενές (EN 1993-4)
- Δοκοί κυλίσεως γερανογεφυρών

Στο μέρος 3 του EN1993 ανήκει και ο σχεδιασμός έναντι κόπωσης μίας ανεμογεννήτριας. Δεδομένου ότι ο φορέας της ανεμογεννήτριας υποβάλλεται σε εναλλασσόμενα φορτία λόγω της επαναλαμβανόμενης δράσης του ανέμου, οι συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας των τμημάτων του πυλώνα της είναι πολύ ευαίσθητες στο φαινόμενο της κόπωσης. Κρίσιμη φόρτιση για την περίπτωση της ανεμογεννήτριας είναι η κόπωση και απαιτεί τον σχεδιασμό ισχυρών συνδέσεων και απαραίτητως ισχυρή προένταση των κοχλιών.

Γενικά, οι κανόνες του EN 1993 εφαρμόζονται σε κατασκευές με κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες και προστασία σε διάβρωση επαρκή με τακτική συντήρηση. Περιπτώσεις στις οποίες δεν μπορεί να εφαρμοσθεί ο κανονισμός είναι:

- ❖ Σε περιπτώσεις όπου η κατασκευή αστοχεί λόγω κόπωσης, ύστερα από λίγους κύκλους φόρτισης (π.χ. στην περίπτωση ενός σεισμού)
- ❖ Όταν η θερμοκρασία ξεπερνά τους 150 °C
- ❖ Όταν στην περιοχή του έργου το περιβάλλον είναι διαβρωτικό
- ❖ Όταν το διαθέσιμο υλικό δεν είναι όλκιμο και δεν συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας του EN 1993-1-10
- ❖ Σε παράκτιες κατασκευές
- ❖ Κατασκευές που υπόκεινται σε μονή κρούση
- ❖ Όταν έχουμε ενίσχυση με σκυρόδεμα και ράβδους χάλυβα

Στη συνέχεια θα αναφερθούν κάποιες βασικές παράμετροι οι οποίες υπό προϋποθέσεις μπορεί να επηρεάσουν την εφαρμοσιμότητα του EN1993.

Επιρροή του υλικού

Όσον αφορά το υλικό, πειράματα έχουν δείξει ότι, υπό την προϋπόθεση ότι δεν έχουμε διαβρωτικό περιβάλλον, ανεξάρτητα από την ποιότητα του χάλυβα μπορούν να εφαρμοστούν οι κανόνες του Ευρωκώδικα. Επομένως, αμελείται η επιρροή του υλικού στην αντοχή σε κόπωση σε σύγκριση με τυχόν ατέλειες στην λεπτομέρεια της σύνδεσης.

Επιρροή διαβρωτικού περιβάλλοντος

Οι κανονικές ποιότητες χάλυβα πρέπει να έχουν επαρκή προστασία σε διάβρωση. Αυτή περιλαμβάνει: σύστημα βαφής πιστοποιημένο, εν θερμώ γαλβανισμό των επιφανειών, καθοδική προστασία, στρώματα αυτοπροστασίας.

Ωστόσο, θα πρέπει να τονισθεί ότι η ύπαρξη συγκολλήσεων σε συνδυασμό με την διάβρωση μειώνει δραματικά την αντοχή σε κόπωση για κάθε τύπο χάλυβα.

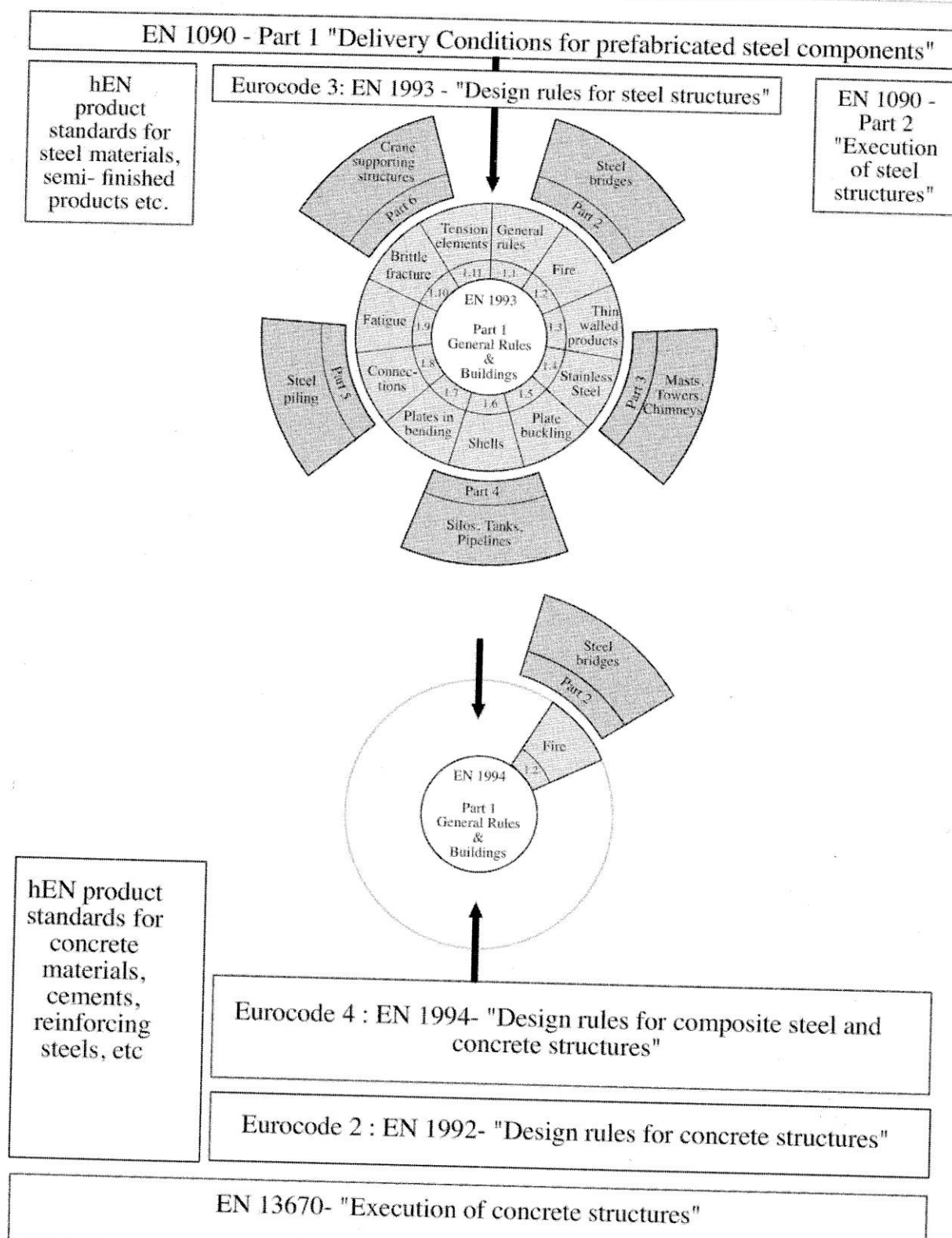
Επιρροή της θερμοκρασίας

Σε γενικές γραμμές, η θερμοκρασία δεν επηρεάζει το ποσοστό αύξησης των ρωγμών κόπωσης για θερμοκρασίες ως -50°C εκτός κι αν η ψαθυρή θραύση διέπει τον τρόπο διάδοσης της ρωγμής. Γενικά, για κατασκευές από χάλυβα μία καλή ποιότητα υλικού για την αποφυγή ψαθυρής θραύσης, επαρκεί και έτσι δεν λαμβάνονται υπόψη οι χαμηλές θερμοκρασίες.

Υψηλές θερμοκρασίες άνω των 150°C δεν λαμβάνονται υπόψη μιας και δεν περιλαμβάνονται στο μέρος 1-9 του EN1993. Γενικά, η επιρροή των υψηλών θερμοκρασιών εξαρτάται από το υλικό και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Επειδή είναι πιθανόν να προκληθεί μείωση της αντοχής σε κόπωση όταν η θερμοκρασία ξεπερνά τους 100°C γενικά συνιστάται συντηρητική προσέγγιση σχεδιασμού. Επιπλέον, υπάρχουν κατάλληλες σχέσεις με σκοπό να λάβουν υπόψη την μείωση αυτή της αντοχής.

Επιρροή της συχνότητας του φορτίου

Συχνότητα φορτίου έως 100Hz δεν επηρεάζει την αντοχή σε κόπωση. Η συχνότητα του φορτίου μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην περίπτωση συνδυασμένης επιρροής διάβρωσης, κυκλικής φόρτισης καθώς και υψηλών θερμοκρασιών. Ο συνδυασμός τέτοιων παραμέτρων δεν περιλαμβάνεται ωστόσο, στο πεδίο εφαρμογής του EN 1993-1-9.



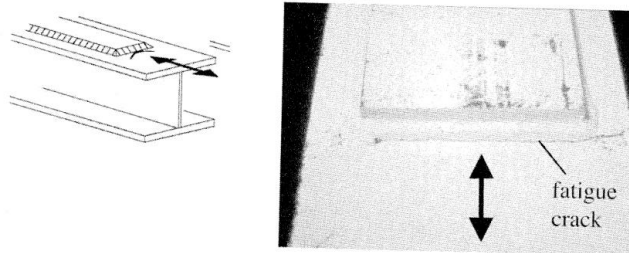
Σχήμα 2-5: Σύστημα τυποποίησης για χαλύβδινες κατασκευές και σύμμικτες κατασκευές από χάλυβα και σκυρόδεμα [3]

2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΥΡΟΥΣ ΤΑΣΕΩΝ

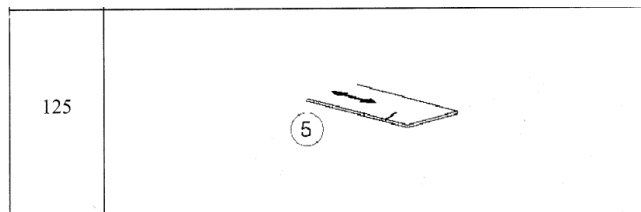
Το πρώτο βήμα για την εκτέλεση ενός ελέγχου έναντι κόπωσης είναι ο υπολογισμός της διαφοράς των τάσεων $\Delta\sigma$. Προκειμένου να γίνει αυτό θα πρέπει πρώτα να προσδιορισθεί το φορτίο λόγω κόπωσης. Ανάλογα με το είδος της κατασκευής το φορτίο λόγω κόπωσης εκφράζεται ως κινητό φορτίο (π.χ. ένα φορτηγό διερχόμενο από μία μεταλλική γέφυρα) ή σαν ένα εύρος φόρτισης που ενεργεί σε σταθερή θέση (π.χ. φόρτιση λόγω ανέμου σε κατακόρυφο ιστό).

Ο Ευρωκώδικας δίνει για κάθε τύπο κατασκευής τα μοντέλα φόρτισης που πρέπει να εφαρμοσθούν στην περίπτωση της κόπωσης. Έπειτα, με αυτά τα φορτία πραγματοποιείται ελαστικός υπολογισμός του φορέα ώστε να προσδιορισθούν τα μέγιστα και ελάχιστα δρώντα εντατικά μεγέθη και κατ' επέκταση η διαφορά των εντατικών μεγεθών. Για να υπολογισθούν οι ζητούμενες διαφορές τάσεων όμως θα πρέπει να προσδιορισθούν οι θέσεις του φορέα που είναι κρίσιμες για την κόπωση.

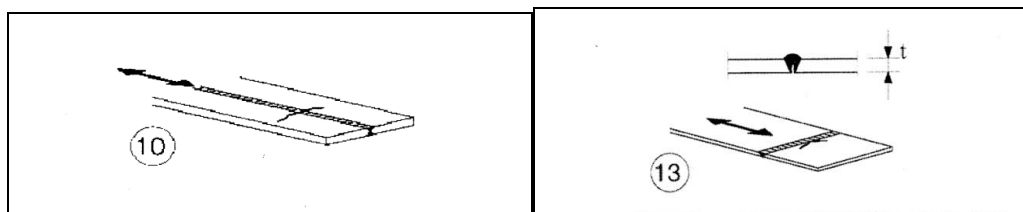
Κρίσιμες θέσεις είναι εκείνες στις οποίες θα εμφανισθούν πρώτα οι ρωγμές λόγω κόπωσης. Ο Ευρωκώδικας 3 περιέχει πίνακες με όλες τις πιθανές κατηγορίες κατασκευαστικών λεπτομερειών που είναι κρίσιμες για τον έλεγχο σε κόπωση. Δίπλα σε κάθε κατασκευαστική λεπτομέρεια αναγράφεται και το εύρος τάσεων $\Delta\sigma$ που η λεπτομέρεια αυτή αντέχει. Στις περισσότερες περιπτώσεις πιθανή θέση ρωγμής είναι στο μητρικό υλικό γειτονικά σε κάποιας μορφής συγκέντρωση τάσεων (π.χ. οπή, γωνία ελάσματος, συγκόλληση και γενικότερα σε θέσεις όπου έχουμε απότομη αλλαγή της γεωμετρίας). Στο σχήμα 2-6 παρατηρείται ότι η ρωγμή εμφανίζεται στο τέλος της πλάκας κάλυψης στο μητρικό υλικό για την συγκεκριμένη διεύθυνση φόρτισης. Στο σχήμα 2-7 έχουμε την περίπτωση ρωγμής σε γωνία ελάσματος και τέλος στο σχήμα 2-8 ρωγμές σε συγκολλήσεις.



Σχήμα 2-6: Παράδειγμα λεπτομέρειας (από EN 1993-1-9, πίνακας 8.5, λεπτομέρεια 6), ρωγμή στο τέλος πλάκας κάλυψης [3]



Σχήμα 2-7: Θέση ρωγμής λόγω κόπωσης σε γωνία ελάσματος (πίνακας 8.1, λεπτομέρεια 5 EN1993-1-9) [3]



Σχήμα 2-8: Ρωγμές λόγω κόπωσης σε συγκολλήσεις (EN 1993-1-9 πίνακας 8.2 λεπτομέρεια 10 και πίνακας 8.3 λεπτομέρεια 13 αντίστοιχα [3])

Για κάθε λεπτομέρεια η θέση και η διεύθυνση στην οποία υπολογίζεται η τάση υποδεικνύεται από το βέλος. Το επίπεδο στο οποίο υπολογίζεται η τάση είναι κάθετο στο τόξο και παράλληλο βέβαια στην ρωγμή που αναπτύσσεται. Επομένως, το μόνο το οποίο χρειάζεται είναι να επιλέξουμε σωστά την κατασκευαστική λεπτομέρεια η οποία αντιστοιχεί στην περίπτωση την οποία εξετάζουμε.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, συνήθως οι σχετικές ονομαστικές τάσεις από φορτία κόπωσης υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το ίδιο στατικό σύστημα μοντέλου όπως και για την στατική ανάλυση του εκάστοτε φορέα. Εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά στους πίνακες των λεπτομερειών του EN1993-1-9 [5], τότε η τάση βασίζεται πάντοτε στην καθαρή διατομή.

Όσον αφορά τις κοχλιωτές συνδέσεις υπάρχει διάκριση ανάμεσα στις λεπτομέρειες κοχλιών και κοχλιωτών συνδέσεων. Στις κοχλιωτές συνδέσεις υπολογίζουμε τις ονομαστικές τάσεις στα στοιχεία που απαρτίζουν την σύνδεση. Εάν οι κοχλίες είναι προεντεταμένοι τότε ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται στην μεικτή διατομή. Όταν έχουμε κοινούς κοχλίες (δηλαδή μη προεντεταμένους) η σύνδεση μπορεί να γλιστρήσει σε σημαντικό ποσοστό οπότε πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι παραμένει σε επαφή όλη την ώρα και έτσι δεν επιτρέπονται ανατροπές στο φορτίο.

Υπάρχει συχνά πιθανότητα να εμφανίζεται συγκέντρωση τάσεων όχι σε κάποιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της εκάστοτε λεπτομέρειας αλλά σε οπές, γωνίες, εκκεντρότητες και κακές ευθυγραμμίσεις οι οποίες δεν λήφθησαν υπόψη αρχικά. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη αυτή η συγκέντρωση τάσεων, για τον υπολογισμό των τάσεων στις θέσεις αυτές χρησιμοποιείται ένας συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων λόγω κόπωσης k_f . Επομένως, πολλαπλασιάζοντας τις ονομαστικές τάσεις με τον συντελεστή αυτό αυξάνονται οι υπολογιζόμενες τάσεις. Οι τάσεις που προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό αυτό ονομάζονται τροποποιημένες ονομαστικές τάσεις. Η τροποποίηση αυτή των ονομαστικών τάσεων μπορεί να ληφθεί υπόψη μειώνοντας την κατηγορία αντοχής της λεπτομέρειας και κατ' επέκταση την αντοχή σε κόπωση.

$$\sigma_{mod} = k_f \times \sigma_{nom} \quad (2-4)$$

Ο γενικός τύπος ο οποίος δίνει το εύρος τάσεων $\Delta\sigma$ είναι:

$$\Delta\sigma_{Ed} \times (\gamma_{Ff} \times Q_k) = \sigma_{Ed,max} \times (\gamma_{Ff} \times Q_k) - \sigma_{Ed,min} \times (\gamma_{Ff} \times Q_k) \quad (2-5)$$

Για την απλοποιημένη επαλήθευση κόπωσης με τους συντελεστές ασφαλείας γ το μοντέλο φόρτισης της κόπωσης τοποθετείται στις δύο πιο αντίθετες θέσεις ώστε να προκύψουν τα σ_{max} και σ_{min} . Αντίστοιχη σχέση με την 2-5 ισχύει και για την περίπτωση διατμητικών τάσεων.

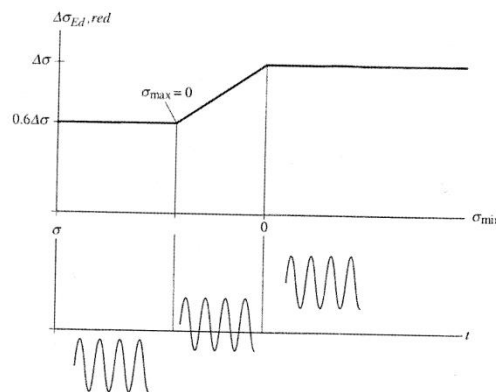
Εύρος τάσεων σε λεπτομέρειες χωρίς συγκολλήσεις

Σε λεπτομέρειες χωρίς συγκόλληση μπορούμε να κάνουμε την υπόθεση ότι δεν υπάρχουν παραμένουσες τάσεις και επομένως να επωφεληθούμε από τις προνομιακές επιδράσεις που έχουν οι ασκούμενες θλιπτικές τάσεις στην συμπεριφορά έναντι κόπωσης. Γι' αυτό και οι σχέσεις για την εύρεση των $\Delta\sigma$ αλλάζουν σ' αυτή την περίπτωση. Μ' αυτόν τον τρόπο το $\Delta\sigma$ μπορεί να μειωθεί ως και 40% όταν έχουμε λεπτομέρειες υπό θλίψη πάντα. Αυτή η μείωση μπορεί να εκφραστεί και ως αύξηση της αντοχής σε κόπωση. Η μείωση αυτή όμως δεν ισχύει στην περίπτωση εξέτασης των διατμητικών τάσεων. Στο σχήμα 2-9 έχουμε την σχηματική απεικόνιση των σχέσεων αυτών.

$$\Delta\sigma_{Ed,red} = \sigma_{Ed,max} - \sigma_{Ed,min} \quad \text{όταν: } \sigma_{Ed,min} \geq 0 \quad (2-6)$$

$$\Delta\sigma_{Ed,red} = \sigma_{Ed,max} - 0,6 \times \sigma_{Ed,min} \quad \text{όταν: } \sigma_{Ed,min} < 0 \quad \text{και} \quad \sigma_{Ed,max} \geq 0 \quad (2-7)$$

$$\Delta\sigma_{Ed,red} = 0,6 \times (\sigma_{Ed,max} - \sigma_{Ed,min}) \quad \text{όταν: } \sigma_{Ed,max} < 0 \quad (2-8)$$

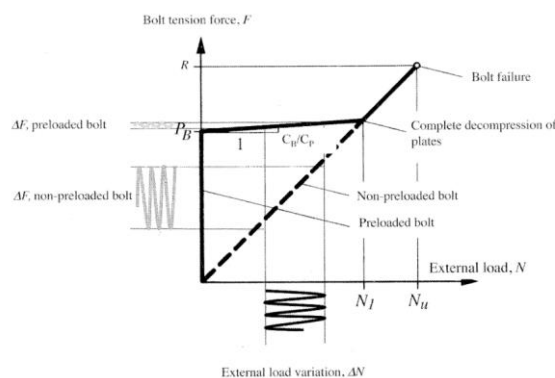


Σχήμα 2-9: Παρουσίαση του μειωμένου εύρους τάσεων για λεπτομέρειες χωρίς συγκολλήσεις [3]

Εύρος τάσεων σε κοχλιωτές συνδέσεις

Όσον αφορά τις κοχλιωτές συνδέσεις υπάρχουν τρεις κατηγορίες φορτίου στις οποίες μπορεί να υποβάλλονται οι κοχλίες: προεντεταμένοι κοχλίες σε διάτμηση, προεντεταμένοι κοχλίες σε εφελκυσμό και απλοί κοχλίες σε διάτμηση. Ακόμα μπορεί να έχουμε προεντεταμένους κοχλίες σε συνδυασμένη διάτμηση και εφελκυσμό.

Στην περίπτωση ενός κοχλία σε εφελκυσμό η αντοχή σε κόπωση σε αντίθεση με την στατική του αντοχή είναι χαμηλή λόγω συγκέντρωσης τάσεων στα σπειρώματα. Πιο κρίσιμη φορτιστική κατάσταση για τον κοχλία είναι ο εφελκυσμός και όχι η διάτμηση. Γι' αυτό το λόγο, όταν έχουμε κοχλίες σε εφελκυσμό υπό κυκλική φόρτιση η προέντασή τους είναι απαραίτητη (όπως π.χ. συμβαίνει και στις κοχλιωτές συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας των τμημάτων του πυλώνα μίας ανεμογεννήτριας, στην οποία ο άνεμος είναι κυρίαρχη φόρτιση). Διότι το στέλεχος και το σπείρωμα ενός μη προεντεταμένου κοχλία υποβάλλονται σε τάσεις $\Delta\sigma$ που είναι μίας τάξης μεγέθους μεγαλύτερες απ' ότι ενός προεντεταμένου. Στο σχήμα 2-10 φαίνεται η μεταβολή στον τρόπο δράσης ενός κοχλία λόγω της προέντασης.



Σχήμα 2-10: Σύγκριση του εύρους τάσεων μεταξύ μίας μη προεντεταμένης και μίας προεντεταμένης κοχλιωτής σύνδεσης [3]

Η αρχική αυξημένη δυσκαμψία μίας προεντεταμένης σύνδεσης προέρχεται από το γεγονός ότι η δυσκαμψία του συνδεδεμένου ελάσματος c_p και η αξονική δυσκαμψία του κοχλία c_B δρουν μαζί ώστε να αντέξουν το εξωτερικό επιβαλλόμενο φορτίο της σύνδεσης ή την διαφορά φορτίου ΔN . Το μεγαλύτερο κομμάτι του φορτίου δαπανάται για την αποσυμπίεση των ελασμάτων ενώ ένα πολύ μικρό κομμάτι του φορτίου παραλαμβάνεται από τους κοχλίες. Το κομμάτι του φορτίου το οποίο παραλαμβάνεται από τους κοχλίες προσδιορίζεται μέσω της σχέσης:

$$\Delta F = \Delta N' \times \frac{C_B}{C_B + C_p} = p \times \Delta N' \quad (2-9)$$

Όπου:

ΔF : διαφορά φορτίου στον κοχλία

$\Delta N'$: η συνολική εξωτερική δύναμη της κοχλιωτής σύνδεσης

C_B : αξονική δυσκαμψία κοχλία

C_p : αξονική δυσκαμψία συνδεδεμένου ελάσματος

Ωστόσο, στην παραπάνω σχέση δεν είναι γνωστές οι αξονικές δυσκαμψίες κοχλία και ελάσματος και δεν είναι δυνατό ούτε οικονομικό να πραγματοποιηθεί μία λεπτομερή ανάλυση της σύνδεσης προκειμένου να προσδιορισθεί ο λόγος αυτών των δυσκαμψιών. Για τον συντελεστή κατανομής του φορτίου p υπάρχουν διάφορες μέθοδοι υπολογισμού διαθέσιμες στην βιβλιογραφία.

Οι σχέσεις κατά Petersen (2000) για τον υπολογισμό των δυσκαμψιών για ένα κομμάτι μορφής L μίας κοχλιωτής σύνδεσης δακτυλίων σε εφελκυσμό είναι οι ακόλουθες:

$$\Delta N' = \frac{e \times s \times \Delta \sigma_{shell} \times \left(\frac{b-s}{2}\right) \times \left(1 + \frac{a + \frac{s}{2}}{b'}\right)}{\left(\frac{b}{2} + a\right)} \quad (2-10)$$

$$C_B = \frac{E \times \pi \times D^2 / 4}{2 \times t_f + 2 \times t_{was}} \quad (2-11)$$

$$C_{p,f} = \frac{E}{2 \times t_f} \times \frac{\pi}{4} \times \left[\left(d_a + \frac{2 \times t_f}{10} \right)^2 - d_i^2 \right] \quad (2-12)$$

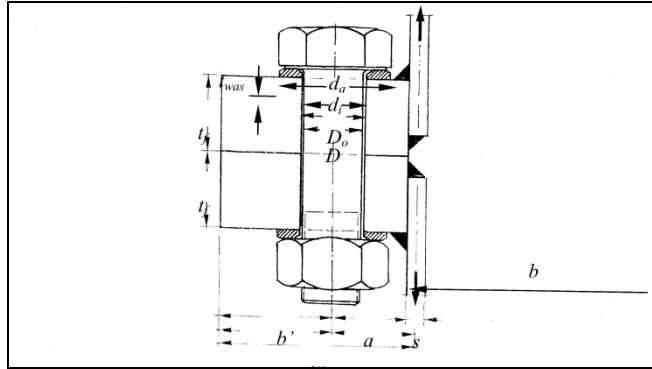
$$C_{p,was} = \frac{E}{t_{was}} \times \frac{\pi}{4} \times (d_a^2 - d_i^2) \quad (2-13)$$

Όπου:

$\Delta \sigma_{shell}$: το εύρος τάσεων στο κέλυφος του πυλώνα το οποίο προκύπτει από τον λόγο της καμπτικής ροπής στην θέση ελέγχου και της ροπής αντίστασης της διατομής

$C_{p,f}$: αξονική δυσκαμψία του δακτυλίου της σύνδεσης (φλάντζας)

$C_{p,was}$: αξονική δυσκαμψία περικοχλίου



Σχήμα 2-11: Γεωμετρία και συμβολισμοί για ένα κομμάτι μίας κοχλιωτής σύνδεσης δακτυλίων μορφής βραχέος L [3]

Επομένως, η προκύπτουσα δυσκαμψία της σύνδεσης δίνεται από την σχέση της Εξ. (2-14):

$$C_p = \frac{1}{\frac{1}{C_{p,f}} + \frac{2}{C_{p,was}}} \quad (2-14)$$

Τελικά, ο συντελεστής κατανομής φορτίου προκύπτει:

$$p = \frac{C_B}{C_B + C_p} \quad (2-15)$$

Το ποσοστό p του φορτίου το οποίο παραλαμβάνεται από τον κοχλία πηγαινει στο σπείρωμα, γι' αυτό για τον υπολογισμό του εύρους τάσεων στον κοχλία η διαφορά φορτίου στον κοχλία ΔF διαιρείται με το εμβαδόν του σπειρώματος A_s .

$$\Delta\sigma_E = \frac{\Delta F}{A_s} \quad (2-16)$$

2.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

2.5.1 Γενικά

Τον υπολογισμό των επιβαλλόμενων τάσεων ακολουθεί ο προσδιορισμός της αντοχής σε κόπωση προκειμένου να εκτελεσθεί ο έλεγχος σε κόπωση της εκάστοτε κατασκευής και να εξασφαλισθεί η αποφυγή της αστοχίας λόγω των επαναλαμβανόμενων φορτίων της κόπωσης.

Σε προηγούμενη υποενότητα δόθηκε η εξίσωση με την οποία υπολογίζεται ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που αντέχει η θέση ελέγχου, καθώς επίσης και το διάγραμμα της σχέσης αυτής. Ο προσδιορισμός της αντοχής ενός μετάλλου σε κόπωση κάτω από καθορισμένες συνθήκες λειτουργίας απαιτεί πολλές δοκιμές. Σε κάθε δοκιμή μετρείται ο αριθμός των κύκλων N που χρειάστηκαν για να θραυσθεί το δοκίμιο. Τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων συγκεντρώνονται σε ένα τυπικό διάγραμμα που απεικονίζει το εύρος της έντασης των καταπονήσεων $\Delta\sigma$, σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων N μέχρι την θραύση, σε λογαριθμική κλίμακα. Κάθε δοκίμιο που θραύστηκε αντιστοιχεί σε ένα σημείο της καμπύλης $S-N$. Παρατηρήθηκε ότι οι καμπύλες αυτές αντοχής σε κόπωση είναι λίγο πολύ παράλληλες μεταξύ τους (σχήμα 2-12). Οπότε, η αντοχή σε κόπωση είναι μόνο συνάρτηση της σταθεράς C που η τιμή της είναι συγκεκριμένη για κάθε κατασκευαστική λεπτομέρεια.

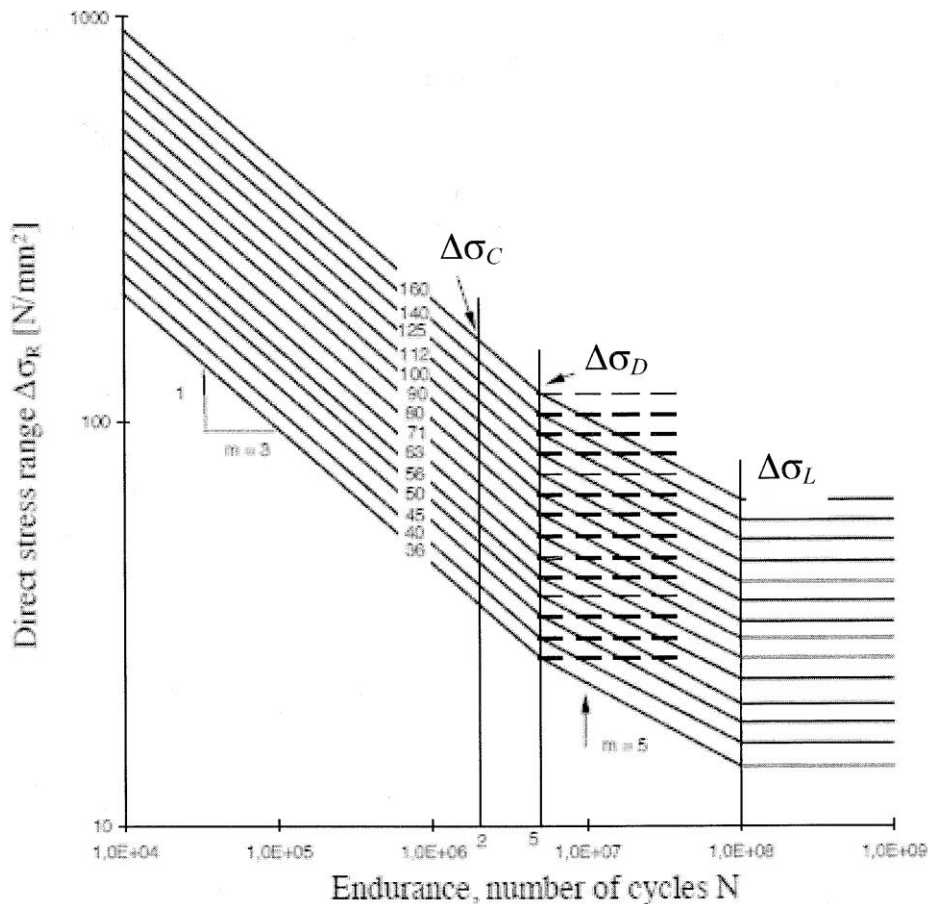
$$\log N = \log C - m \times \log_{10}(\Delta\sigma) \quad (2-17)$$

Γενικά, επειδή υπάρχουν πολλές διαφορετικές λεπτομέρειες, αναπόφευκτα θα υπήρχαν και πολλές διαφορετικές καμπύλες, γεγονός το οποίο δεν βοηθά στον σχεδιασμό. Η κατηγοριοποίηση των διαφορετικών κατασκευαστικών λεπτομερειών με ένα αντίστοιχο σύνολο καμπυλών αντοχής σε κόπωση αποτέλεσε τη λύση στο πρόβλημα αυτό. Κάθε κατηγορία λεπτομέρειας των πινάκων του EN 1993 αντιστοιχεί σε μία $S-N$ καμπύλη (σχήμα 2-12) όπου $\Delta\sigma$ είναι συνάρτηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης σε λογαριθμική κλίμακα. Σε κάθε λεπτομέρεια του Ευρωκώδικα αναγράφεται το εύρος τάσεων $\Delta\sigma_c$ που αυτή αντέχει.

Οπότε, όταν είναι δυνατή η διαμόρφωση μίας κατασκευαστικής λεπτομέρειας σύμφωνα με κάποια από αυτές των πινάκων του Ευρωκώδικα 3, και αντιστοιχούν σωστά η περιγραφή και οι απαιτήσεις, τότε η αντοχή σε κόπωση μπορεί να προέρχεται από την αντίστοιχη καμπύλη του κανονισμού.

Αναφορικά ως προς την ένταση της καταπόνησης διακρίνονται τρεις περιοχές οι οποίες ξεχωρίζουν στις καμπύλες αντοχής σε κόπωση. Το όριο κόπωσης σταθερού πλάτους $\Delta\sigma_D$ είναι το οριακό εύρος ορθών ή διατμητικών τάσεων, κάτω από το οποίο δεν σημειώνονται βλάβες από κόπωση σε πειράματα με τάσεις σταθερού πλάτους. Για συνθήκες μεταβλητού πλάτους, όλα τα εύρη τάσεων πρέπει να είναι μικρότερα από αυτό το όριο για να μην σημειωθούν βλάβες λόγω κόπωσης. Εύρη τάσεων κάτω από το όριο αποκοπής $\Delta\sigma_L$ δεν συνεισφέρουν στην υπολογιζόμενη συσσώρευση βλάβης από κόπωση. Τέλος, το εύρος τάσεων $\Delta\sigma_c$ είναι το εύρος τάσεων που αντέχει κάθε κατασκευαστική λεπτομέρεια και ταυτίζεται με την κατηγορία της λεπτομέρειας.

Ομοίως δημιουργούνται καμπύλες αντοχής σε κόπωση για εύρη διατμητικών τάσεων.



Σχήμα 2-12: Καμπύλες αντοχής σε κόπωση για διάφορα εύρη ορθών τάσεων [3]

2.5.2 Επιδράσεις μεγέθους στην αντοχή σε κόπωση

Η αντοχή και κατ' επέκταση και η κατηγορία της κατασκευαστικής λεπτομέρειας μπορεί να διαφοροποιηθεί λόγω ποικίλων διαστάσεων ενός ή δύο συστατικών μερών της λεπτομέρειας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-13 ανάλογα με το μήκος της προσαρμογής διαφοροποιείται το εύρος τάσεων που αντέχει. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος της η αντοχή σε κόπωση μειώνεται.

Detail category	Constructional detail		Description
80	$L \leq 5 \text{ m}$		Longitudinal attachments: 1) The detail category varies according to the length of the attachment L.
71	$50 < L \leq 80 \text{ mm}$		
63	$80 < L \leq 100 \text{ mm}$		
56	$L > 100 \text{ mm}$		
71	$L > 100 \text{ mm}$ $\alpha < 45^\circ$		2) Longitudinal attachments to plate or tube.

Σχήμα 2-13: Επιρροή του μήκους μιας διαμήκου προσαρμογής στην κατηγορία της λεπτομέρειας [3]

2.5.3 Επιρροή ύπαρξης οπών στην αντοχή σε κόπωση

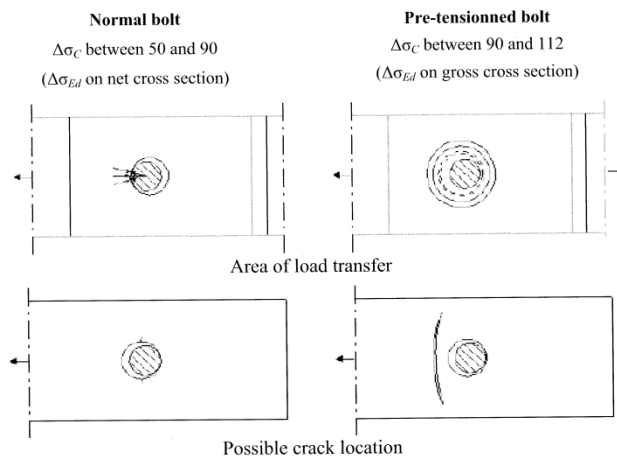
Σε λεπτομέρειες χωρίς συγκολλήσεις συνήθως οι ρωγμές ξεκινούν οι σε ανωμαλίες της επιφάνειας ή στις γωνίες της διατομής ή σε θέσεις οπών. Όσον αφορά τις κοχλιωτές συνδέσεις η αστοχία ξεκινά απ'

την άκρη της οπής και διαδίδεται κατά μήκος της καθαρής διατομής. Ωστόσο, μπορεί να αρχίσει και από τον ίδιο τον κοχλία. Σε συνδέσεις όπου οι κοχλίες επιλέγονται έτσι ώστε να έχουν υψηλή αντοχή σε τριβή αυτές οι μορφές αστοχίας περιορίζονται μέσω της προέντασης των κοχλίων. Σ' αυτήν την περίπτωση η αστοχία μπορεί να ξεκινήσει στην επιφάνεια κοντά στο σύνορο του δακτυλίου συμπίεσης λόγω διάβρωσης κάτω από επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Σε κοχλιωτές συνδέσεις που φορτίζονται σε εφελκυσμό ή σε συνδυασμένη δράση εφελκυσμού και διάτμησης, ρωγμές λόγω κόπωσης συνήθως ξεκινούν από την ρίζα του σπειρώματος. Εναλλακτικά, μπορεί να εμφανισθεί αμέσως κάτω από την κεφαλή του κοχλία.

Επίσης, η αντοχή σε κόπωση μπορεί να μειωθεί ανάλογα με την διάμετρο του κοχλία στην θέση της οπής. Όταν η διάμετρος του κοχλία ξεπερνά την διάμετρο αναφοράς $\Phi_o = 30mm$ τότε η αντοχή σε κόπωση είναι μειωμένη $\Delta\sigma_{red}$:

$$\frac{\Delta\sigma_{red}}{\Delta\sigma_c} = \left(\frac{\Phi_o}{\Phi}\right)^n \tag{2-18}$$

Όπου n εκθέτης ο οποίος είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης τάσεων και κυμαίνεται από 0,1 έως 0,33 ανάλογα με τον τύπο του σπειρώματος.



Σχήμα 2-14: Κοχλιωτές συνδέσεις σε διάτμηση, περιοχή διάδοσης φόρτισης και πιθανές θέσεις ρωγμών λόγω κόπωσης για απλούς και προεντεταμένους κοχλίες [3]

2.6 ΈΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Υπάρχουν τρεις μορφές εκτέλεσης του ελέγχου αντοχής έναντι του φαινομένου της κόπωσης.

- Επαλήθευση χρησιμοποιώντας το όριο κόπωσης

$$\max(\Delta\sigma_{Ed,i}) \leq \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} \quad (2-19)$$

Όπου:

$\max(\Delta\sigma_{Ed,i})$: μέγιστη τιμή του εύρους τάσεων (από τον σχεδιασμό)

$$\Delta\sigma_{Ed,i} = \gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_i \quad (2-20)$$

$\Delta\sigma_D$: αντοχή σε κόπωση, το CAFL της εκάστοτε λεπτομέρειας

γ_{Mf} : μερικός συντελεστής για την αντοχή σε κόπωση

Ο έλεγχος σε κόπωση πραγματοποιείται με την χρησιμοποίηση του εύρους των τάσεων όταν ο συνολικός αριθμός των κύκλων φόρτισης είναι πολύ μεγάλος, δηλαδή ξεπερνά τους 10^8 κύκλους φόρτισης. Ο συνολικός αριθμός των κύκλων φόρτισης δίνεται από την σχέση:

$$N_v = 2 \times T \times n_{y,1} \times \varepsilon_0 \times \left(\frac{v_{crit,1}}{v_0}\right)^2 \times e^{-\left(\frac{v_{crit,1}}{v_0}\right)^2} \quad (2-21)$$

- Επαλήθευση χρησιμοποιώντας τον διορθωτικό συντελεστή λ

Ο διορθωτικός συντελεστής λ εισάγεται με στόχο να προσαρμόσει τα φορτιστική κατάσταση η οποία προκύπτει από τα μοντέλα φόρτισης του κανονισμού για την κόπωση στην πραγματική φόρτιση.

$$\gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \quad (2-22)$$

Όπου:

$$\gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2} = \lambda \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \times Q_k) \quad (2-23)$$

- Επαλήθευση χρησιμοποιώντας τον συντελεστή βλάβης D

Με τον συντελεστή βλάβης D υπολογίζεται η συγκέντρωση βλάβης λόγω κόπωσης. Κατά τη φόρτιση μεταβλητής διακύμανσης και διαφορετικού κύκλου επαναλήψεων, προκαλείται στην υπό έλεγχο λεπτομέρεια μία συσσώρευση βλάβης, για την εκτίμηση της οποίας έχουν διατυπωθεί διάφορες θεωρίες. Η απλούστερη είναι αυτή που διατυπώθηκε από τους Palmgren-Miner, γνωστή ως κανόνας Miner η οποία ορίζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$D_d = \sum D_i = \sum \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq D_{max} \tag{2-24}$$

Όπου:

n_{Ei} ο αριθμός των κύκλων που αντιστοιχεί σε εύρος τάσεων $\gamma_{FF}\Delta\sigma_i$ για τη ζώνη i στο φάσμα σχεδιασμού

Το επιβαλλόμενο εύρος τάσεων $\Delta\sigma_i$ πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή γ_{FF} .

N_{Ri} η διάρκεια ζωής (σε κύκλους) που προκύπτει από την επαυξημένη καμπύλη $\Delta\sigma_c/\gamma_{Mf} - N_R$ για εύρος τάσεων $\gamma_{FF}\Delta\sigma_i$

Για τον συντελεστή συγκέντρωσης βλάβης D πρέπει να ισχύει η παρακάτω συνθήκη:

$$0 \leq D \leq 1 \tag{2-25}$$

Για $D=0$ δεν υπάρχει καμία βλάβη, ενώ για $D=1$ υπάρχει αστοχία από κόπωση.

Στην περίπτωση του φορέα της ανεμογεννήτριας ο έλεγχος σε κόπωση πραγματοποιείται είτε με τον πρώτο τρόπο, στην περίπτωση μεγάλου αριθμού των κύκλων φόρτισης, είτε με τον τρίτο τρόπο. Γενικότερα, ανάλογα με την κατασκευή και τα διαθέσιμα δεδομένα επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος αντοχής της σε κόπωση.

2.7 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Πίνακας 2-1: Συνιστώμενες τιμές συντελεστή ασφαλείας γ_{Mf}

Assessment method	Consequence of failure	
	Low consequence	High consequence
Damage Tolerant	1.00	1.15
Safe life	1.15	1.35

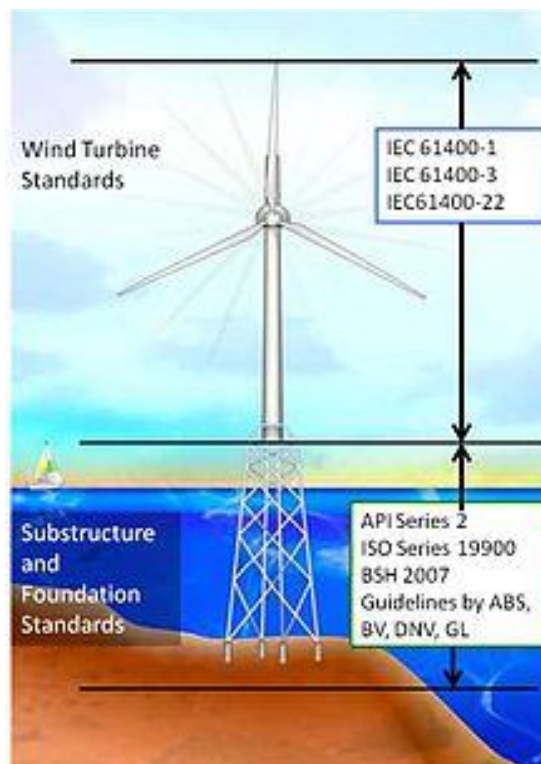
Στον Πίνακα 2-1 παρουσιάζονται οι συνιστώμενες τιμές του συντελεστή ασφαλείας ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιείται κατά την διαστασιολόγηση, σύμφωνα με τον EN 1993-1-9 [5]. Ο υπολογισμός της αντοχής σε κόπωση γίνεται χρησιμοποιώντας μία από τις μεθόδους που αναφέρονται στον πίνακα, δηλαδή τη μέθοδο ασφαλούς ζωής ή τη μέθοδο ανοχής βλαβών. Η μέθοδος ανοχής βλαβών θα πρέπει να παρέχει αποδεκτή αξιοπιστία ότι η κατασκευή θα λειτουργεί ικανοποιητικά κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού. Μπορεί να εφαρμοσθεί υπό την προϋπόθεση ύπαρξης συγκεκριμένου πλαισίου επιθεώρησης και συντήρησης για τη διαπίστωση και την επιδιόρθωση βλαβών από κόπωση ή όταν είναι δυνατή η ανακατανομή της έντασης στα στοιχεία του φορέα στην περίπτωση εμφάνισης βλαβών από κόπωση. Η μέθοδος ασφαλούς ζωής θα πρέπει να παρέχει αποδεκτή αξιοπιστία ότι η κατασκευή θα λειτουργεί ικανοποιητικά κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού χωρίς την ανάγκη επιθεωρήσεων κατά τη διάρκεια λειτουργίας της για βλάβες από κόπωση. Η μέθοδος ασφαλούς ζωής θα πρέπει να εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η τοπική εμφάνιση βλαβών σε ένα στοιχείο μπορεί να οδηγήσει σε ταχεία αστοχία του στοιχείου αυτού ή και ολόκληρου του φορέα.

3 ΦΟΡΤΙΑ ΑΝΕΜΟΥ

3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1.1 Εισαγωγή

Οι βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού που πρέπει να ικανοποιούν οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες τίθενται από το πρότυπο IEC 61400-1 [6]. Μέσω αυτών εξασφαλίζεται η ασφάλεια έναντι αστοχιών κατά την διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας. Οι προϋποθέσεις που ορίζει το πρότυπο αυτό αφορούν όλες της πτυχές της ζωής της ανεμογεννήτριας, από τις συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας πριν την κατασκευή ως τα διάφορα μέλη της ανεμογεννήτριας τα οποία ελέγχονται και στη συνέχεια συναρμολογούνται μεταξύ τους. Στο Σχήμα 3-1 παρουσιάζονται τα πρότυπα που προβλέπονται τόσο για τον σχεδιασμό της ίδιας της ανεμογεννήτριας όσο και για την θεμελίωσή της και την υποκατασκευή.



Σχήμα 3-1: Πρότυπα σχεδιασμού ανεμογεννητριών (πηγή: www.en.wikipedia.org)

Πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες, είτε αυτές είναι συνήθεις που αφορούν καταστάσεις σχεδιασμού που επαναλαμβάνονται συχνά κατά την διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας είτε ακραίες που αφορούν καταστάσεις σχεδιασμού οι οποίες εμφανίζονται σπάνια. Ο όρος «περιβαλλοντικές συνθήκες» περιλαμβάνει διάφορους παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, ο σεισμός κλπ. Οι συνθήκες αυτές επιδρούν τόσο στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας (π.χ. ταχύτητα περιστροφής του δρομέα) όσο και στην ανάπτυξη εντάσεων στην ανεμογεννήτρια που μεταφράζεται σε επιβολή φορτίων.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες μεταβάλλονται ανάλογα με την περιοχή στην οποία είναι εγκατεστημένη η ανεμογεννήτρια. Γι' αυτό το λόγο, το πρότυπο αυτό κατηγοριοποιεί τις ανεμογεννήτριες ανάλογα με την μέση ταχύτητα αναφοράς 10 λεπτών και την ένταση τύρβης του ανέμου της περιοχής (Πίνακας 3-1). Όπως είναι φυσικό, η κατηγοριοποίηση αυτή δεν έχει ως στόχο να περιγράψει επακριβώς τις συνθήκες που επικρατούν σε μία περιοχή, αλλά να συμπεριλάβει όσο το δυνατόν περισσότερες διαφορετικές συνθήκες.

Πίνακας 3-1: Βασικές παράμετροι για την κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών

Wind turbine class		I	II	III
V_{ref}	(m/s)	50	42.5	37.5
A	I_{ref}	0.16		
B	I_{ref}	0.14		
C	I_{ref}	0.12		

Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στο ύψος της πλήμνης (hub height), όπου:

- V_{ref} η μέση ταχύτητα αναφοράς ανέμου 10 λεπτών
- I_{ref} η αναμενόμενη ένταση τύρβης για $V_{ref}=15$ m/s
- Για υψηλά, μεσαία και χαμηλά χαρακτηριστικά τύρβης ορίζονται οι κατηγορίες τύρβης A, B & C αντίστοιχα

Η διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας για τις κατηγορίες ανεμογεννητριών I έως III πρέπει να είναι τουλάχιστον 20 χρόνια.

Η ένταση τύρβης υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (3-1), όπου σ είναι η τυπική απόκλιση και μ η μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου των 10 λεπτών.

$$I = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3-1)$$

Το πεδίο του ανέμου στο χώρο ορίζεται από τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας στην διαμήκη, στην εγκάρσια και στην κατακόρυφη διεύθυνση του ανέμου. Η διαμήκης συνιστώσα είναι η παράλληλη στη διεύθυνση της μέσης ταχύτητας του ανέμου, η εγκάρσια συνιστώσα είναι η κάθετη στη διαμήκη διεύθυνση και βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο, ενώ η κατακόρυφη συνιστώσα είναι η κάθετη τόσο στη διαμήκη διεύθυνση όσο και στο οριζόντιο επίπεδο.

Για τις τυπικές κατηγορίες ανεμογεννητριών το τυχαίο πεδίο της ταχύτητας του ανέμου πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω απαίτηση. Για την τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου στην διαμήκη, την εγκάρσια και την κατακόρυφη διεύθυνση του ανέμου, οι οποίες συμβολίζονται με σ_1 , σ_2 και σ_3 αντίστοιχα, θα πρέπει να ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες: (Εξίσωση (3-2))

$$\sigma_2 \geq 0.7 \times \sigma_1 \quad (3-2)$$

$$\sigma_3 \geq 0.5 \times \sigma_1$$

3.1.2 Κατανομή ταχύτητας ανέμου

Η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου είναι σημαντική για τον σχεδιασμό των ανεμογεννητριών διότι καθορίζει την συχνότητα εμφάνισης μεμονωμένων συνθηκών φόρτισης σε συνήθεις καταστάσεις σχεδιασμού. Για συνήθεις συνθήκες ανέμου, η μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου των 10 λεπτών στο ύψος της πλήμνης, θεωρείται σύμφωνα με το IEC 61400 [6] ότι ακολουθεί την κατανομή Rayleigh (Εξ. (3-3)).

$$P_R(V_{hub}) = 1 - e^{[-\pi \times (V_{hub}/2V_{ave})^2]} \quad (3-3)$$

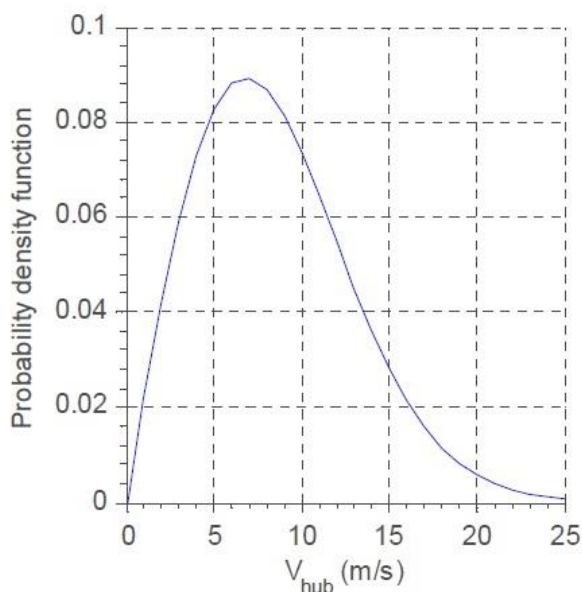
όπου:

V_{hub} το ύψος της πλήμνης

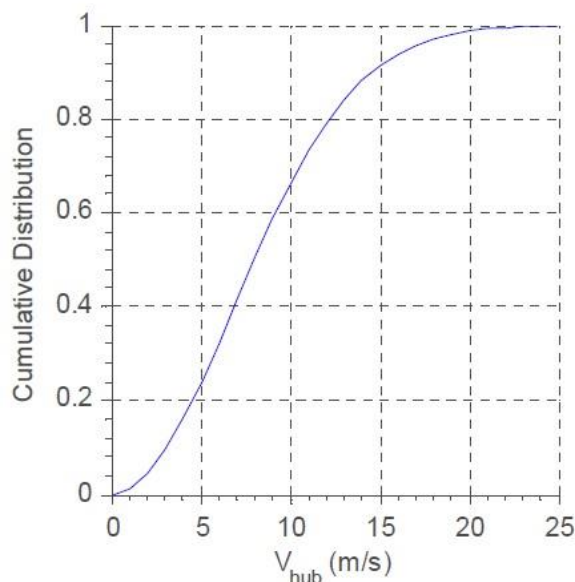
$P_R(V_{hub})$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μέσης ταχύτητας 10λέπτου του ανέμου

$V_{ave}=0.2 V_{ref}$ για τις τυπικές κατηγορίες ανεμογεννητριών, $V_{ref}=42.5\text{m/s}$ για την ανεμογεννήτρια της εργασίας

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της κατανομής Rayleigh παρουσιάζονται στα σχήματα Σχήμα 3-2 και Σχήμα 3-3 αντίστοιχα. Μέσω αυτής της κατανομής θα προκύψει για διάφορα εύρη ταχύτητας ανέμου η αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης. Προκειμένου να καλύψουμε όλο το φάσμα πιθανών τιμών της ταχύτητας ανέμου χρησιμοποιούνται τα εύρη 0-4m/s, 4-8m/s, 8-12m/s, 12-16m/s, 16-20m/s και 20-24m/s. Για κάθε εύρος υπολογίζεται μέσω της κατανομής Rayleigh η πιθανότητα εμφάνισής του, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 3-2.



Σχήμα 3-2: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατανομής Rayleigh



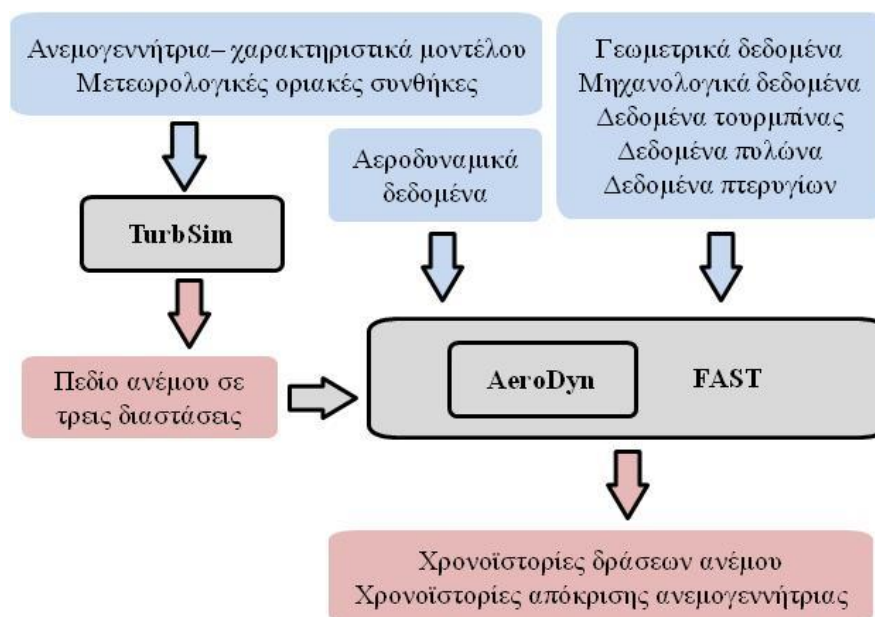
Σχήμα 3-3: Συνάρτηση αθροιστικής κατανομής της κατανομής Rayleigh

Πίνακας 3-2: Πιθανότητες εμφάνισης ταχυτήτων ανέμου

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Πιθανότητα
0-4	0.160
4-8	0.342
8-12	0.290
12-16	0.147
16-20	0.049
20-24	0.011

3.2 ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Προκειμένου να παραχθούν αξιόπιστες και ρεαλιστικές τεχνητές χρονοϊστορίες ανέμου στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιήθηκαν τρία υπολογιστικά εργαλεία από το εργαστήριο National Renewable Energy Laboratory (NREL) [7] και το κέντρο National Wind Technology Center (NWTC) [8] των ΗΠΑ. Τα λογισμικά αυτά είναι το TurbSim [9], το AeroDyn [10] και το FAST [11]. Το λογισμικό TurbSim [9] χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενός ρεαλιστικού πεδίου ανέμου, το AeroDyn [10] εφαρμόζει την αεροδυναμική θεωρία των πτερυγίων και τέλος το FAST [11] παράγει τα δυναμικά φορτία τα οποία δρουν στην κορυφή του πυλώνα της ανεμογεννήτριας στη θέση του ρότορα. Στο Σχήμα 3-4 παρουσιάζεται και σχηματικά ο τρόπος λειτουργίας των τριών αυτών λογισμικών.



Σχήμα 3-4: Τρόπος λειτουργίας των λογισμικών TurbSim, AeroDyn και FAST

Πιο συγκεκριμένα, το TurbSim παράγει χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου. Το λογισμικό αυτό είναι ένας στοχαστικός προσομοιωτής πλήρους και τυρβώδους πεδίου ανέμου, ο οποίος χρησιμοποιεί ένα στατιστικό μοντέλο για την αριθμητική προσομοίωση χρονοϊστοριών των τριών συνιστωσών της ταχύτητας ανέμου σε σημεία ενός δισδιάστατου, κάθετα στην κύρια διεύθυνση του ανέμου, ορθογωνικού πλέγματος, το οποίο θεωρείται σταθερό στο χώρο. Το πλέγμα πρέπει να περικλείει το θεωρητικό δίσκο που δημιουργείται από τη σάρωση των πτερυγίων. Τα σημαντικότερα δεδομένα που εισάγονται στο TurbSim [9] είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας, τα οποία καθορίζουν το πλέγμα. Μερικά από αυτά είναι το ύψος της ανεμογεννήτριας, η διάμετρος του δίσκου και τα μετεωρολογικά δεδομένα. Το τελευταίο περιλαμβάνει το μοντέλο τυρβώδους ροής, το προφίλ του ανέμου (σύνθηες ή ακραίο) και την ταχύτητα αναφοράς του, η οποία χρειάζεται για να καθοριστεί

το πεδίο του ανέμου, όπως αυτό ορίζεται στον ισχύοντα κανονισμό IEC 61400-1 [6]. Το TurbSim [9] παράγει χρονοϊστορίες για τις τρεις συνιστώσες ταχύτητας του ανέμου, τη συνιστώσα u , κατά την κύρια διεύθυνση του ανέμου κάθετα στο θεωρητικό δίσκο, τη συνιστώσα v , η οποία είναι οριζόντια και παράλληλη στο θεωρητικό δίσκο και τη συνιστώσα w , η οποία είναι κατακόρυφη και παράλληλη στο θεωρητικό δίσκο.

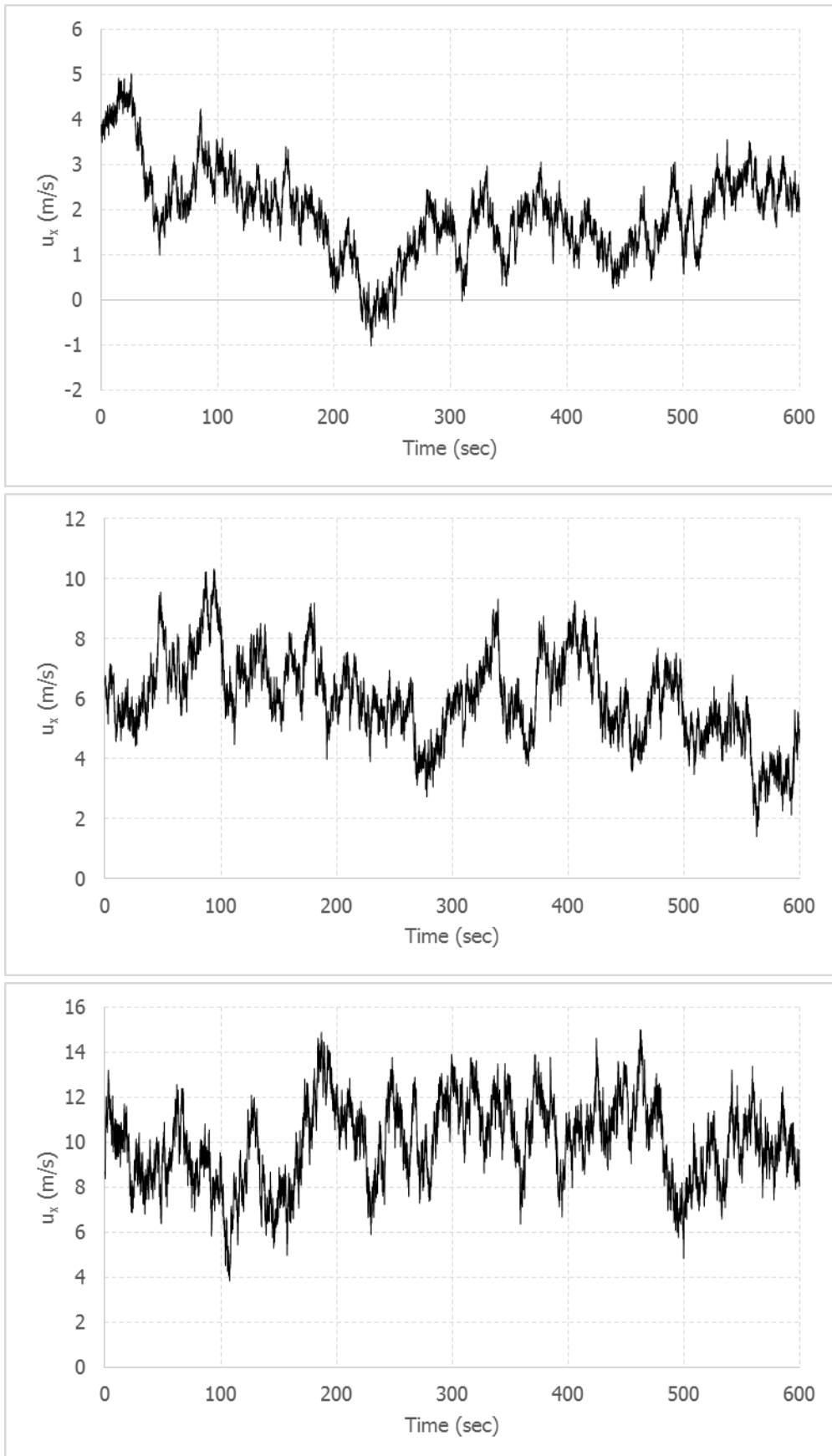
Τα αποτελέσματα του TurbSim [9] χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από τα λογισμικά AeroDyn [10] και FAST [11] για τον υπολογισμό των χρονοϊστοριών των φορτίων ανέμου στην κορυφή του πυλώνα. Το AeroDyn [10], το οποίο λειτουργεί μέσα από το FAST [11], υπολογίζει σύμφωνα με την αεροδυναμική θεωρία των πτερυγίων, τις δυνάμεις άνωσης F_L (Lift force) και αντίστασης F_D (Drag force) και τις αντίστοιχες ροπές σε κάθε στοιχείο των πτερυγίων, οι οποίες αποτελούν κατανεμημένες δράσεις κατά μήκος των πτερυγίων. Σε συνδυασμό με το FAST, οι δράσεις αυτές ολοκληρώνονται κατά μήκος κάθε πτερυγίου και με τη μεταφορά τους ως δύναμη και ροπή στο κέντρο του δρομέα υπολογίζονται οι χρονοϊστορίες δυνάμεων και ροπών. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητα ως δεδομένα η γεωμετρία, τα μηχανολογικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και τα αδρανειακά χαρακτηριστικά του πυλώνα. Στα στοιχεία αυτά περιλαμβάνονται:

- Παράμετροι λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και βασική γεωμετρία, όπως, διάταξη και συστήματα ελέγχου, περιβαλλοντικές και αρχικές συνθήκες, μάζα και αδράνεια.
- Στοιχεία γεωμετρίας και αδρανειακών χαρακτηριστικών του πυλώνα και των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.
- Δεδομένα πλατφόρμας, στην περίπτωση υπεράκτιων ανεμογεννητριών.
- Δεδομένα για την περίπτωση που η ανεμογεννήτρια έχει σύστημα αναδιπλώσεως σε περίπτωση υπερτάχυνσης, όπως, αν υπάρχει ουρά, και τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της.

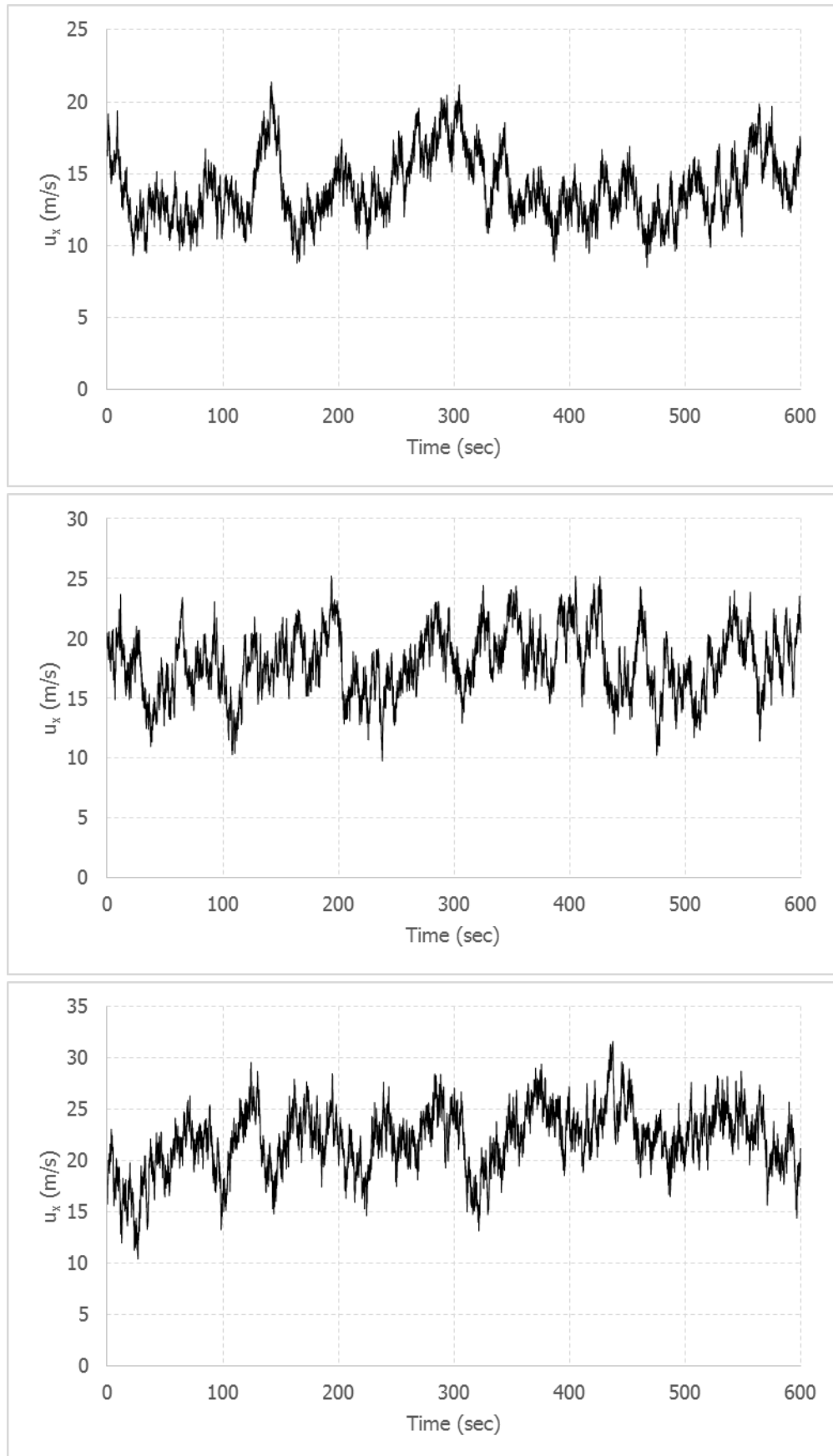
3.3 ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο έλεγχος έναντι κόπωσης των συνδέσεων του πυλώνα μίας τυπικής σύγχρονης ανεμογεννήτριας. Για το σκοπό αυτό παρήχθησαν, μέσω των προγραμμάτων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη υποενότητα, ρεαλιστικές χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου και απόκρισης στην κορυφή του πυλώνα για την ανεμογεννήτρια της εργασίας. Η ανεμογεννήτρια που μελετήθηκε είναι μία τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων, ονομαστικής ισχύος 1,5mW και μεταβλητής ταχύτητας. Επίσης, περιλαμβάνει τα επιμέρους συστήματα ελέγχου των σύγχρονων ανεμογεννητριών τα οποία είναι: α) κλίσης πτερυγίων (pitch control) β) μετατροπέων ισχύος και γεννήτριας και γ) περιστροφής της ατράκτου (yaw control). Το συνολικό ύψος του πυλώνα της εν λόγω ανεμογεννήτριας είναι 82.39m, ενώ το ύψος της πλήμνης 84.29m, αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας θα παρουσιασθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Οι παρακάτω χρονοϊστορίες δημιουργήθηκαν για άνεμο κατηγορίας τύρβης Β, δηλαδή για μεσαία χαρακτηριστικά τύρβης, σύμφωνα με το φάσμα συχνοτήτων τύπου Kaimal.

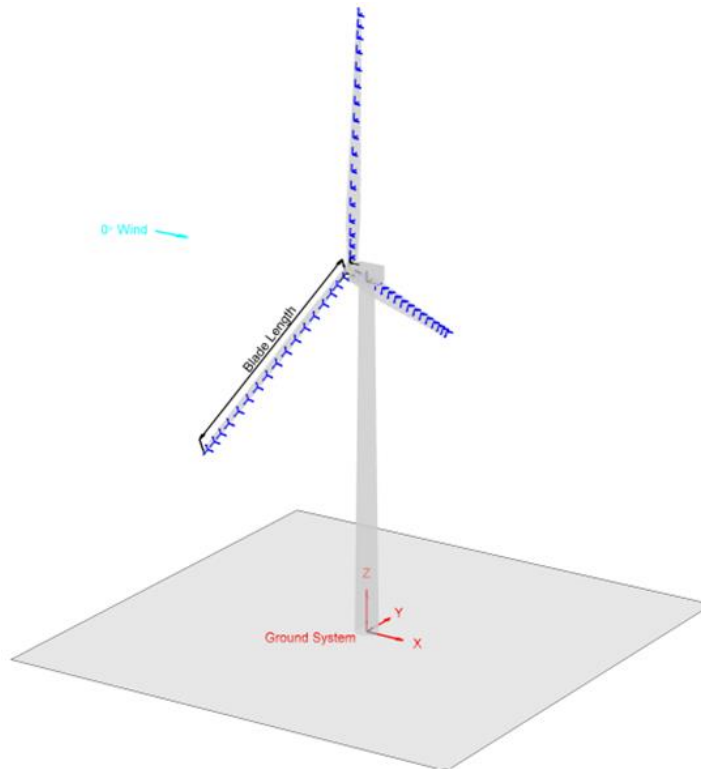
Χρησιμοποιώντας λοιπόν το λογισμικό TurbSim [9] και για μία ανεμογεννήτρια με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω, προέκυψαν οι χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου που παρουσιάζονται στα σχήματα Σχήμα 3-5 και Σχήμα 3-6. Οι χρονοϊστορίες αυτές αναφέρονται σε συνήθεις περιβαλλοντικές συνθήκες στο ύψος της πλήμνης. Δημιουργήθηκαν έξι χρονοϊστορίες ταχυτήτων ανέμου με διάρκεια 10min (600sec) και με μέση ταχύτητα 2m/s, 6m/s, 10m/s, 14m/s, 18m/s και 22m/s προκειμένου να καλυφθεί όλο το εύρος πιθανών ταχυτήτων υπό συνήθεις εξωτερικές συνθήκες. Η ταχύτητα που μελετάται είναι αυτή κατά την διαμήκη συνιστώσα του ανέμου η οποία είναι κάθετη στο επίπεδο των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Στις άλλες δύο διευθύνσεις, κατά την εγκάρσια και την κατακόρυφη συνιστώσα, η μέση τιμή της ταχύτητας είναι μηδέν διότι η οριζόντια και κατακόρυφη γωνία της μέσης ταχύτητας λήφθηκε μηδέν. Στο Σχήμα 3-7 παρουσιάζεται μία εικόνα της ανεμογεννήτριας με το σύστημα αξόνων του ανέμου, όπου φαίνεται η διεύθυνση κατά x .



Σχήμα 3-5: Χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου 10λέπτου με μέση τιμή 2m/s, 6m/s, 10m/s αντίστοιχα



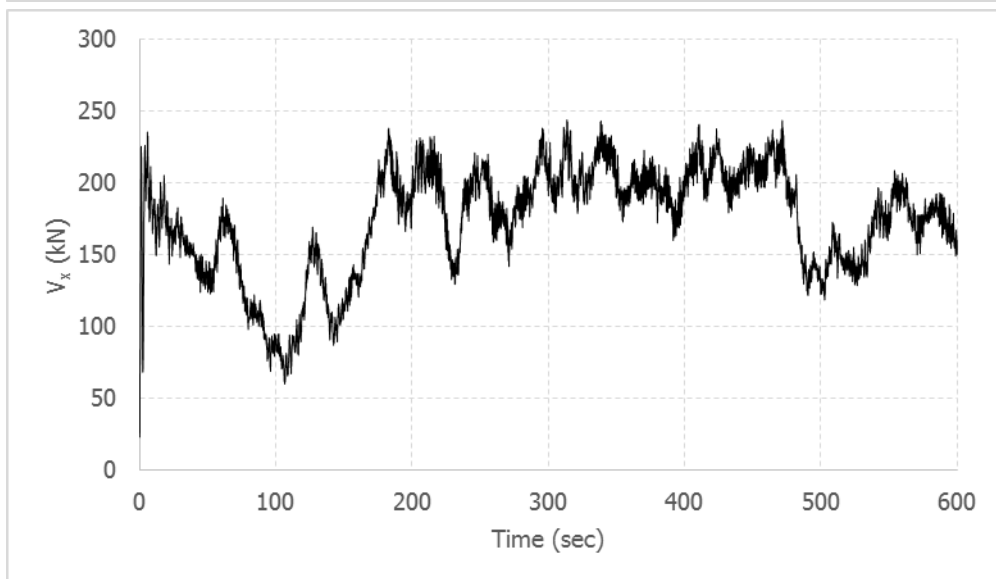
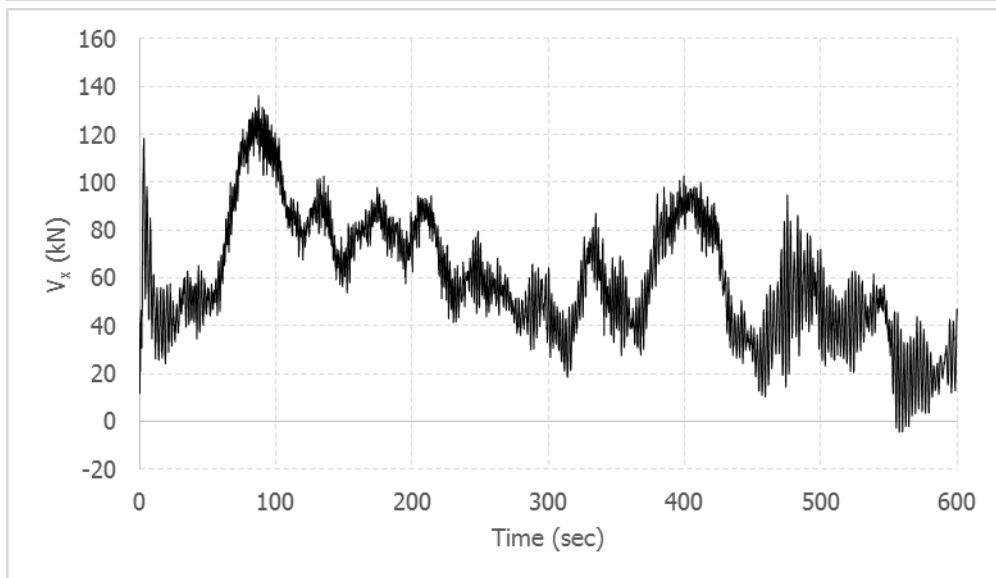
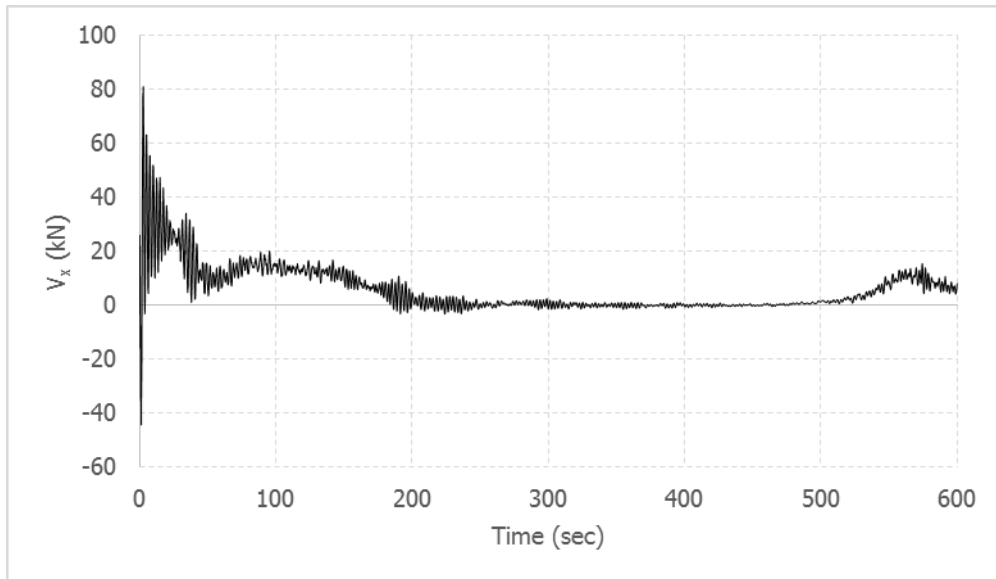
Σχήμα 3-6: Χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου 10λέπτου με μέση τιμή 14m/s, 18m/s, 22m/s αντίστοιχα

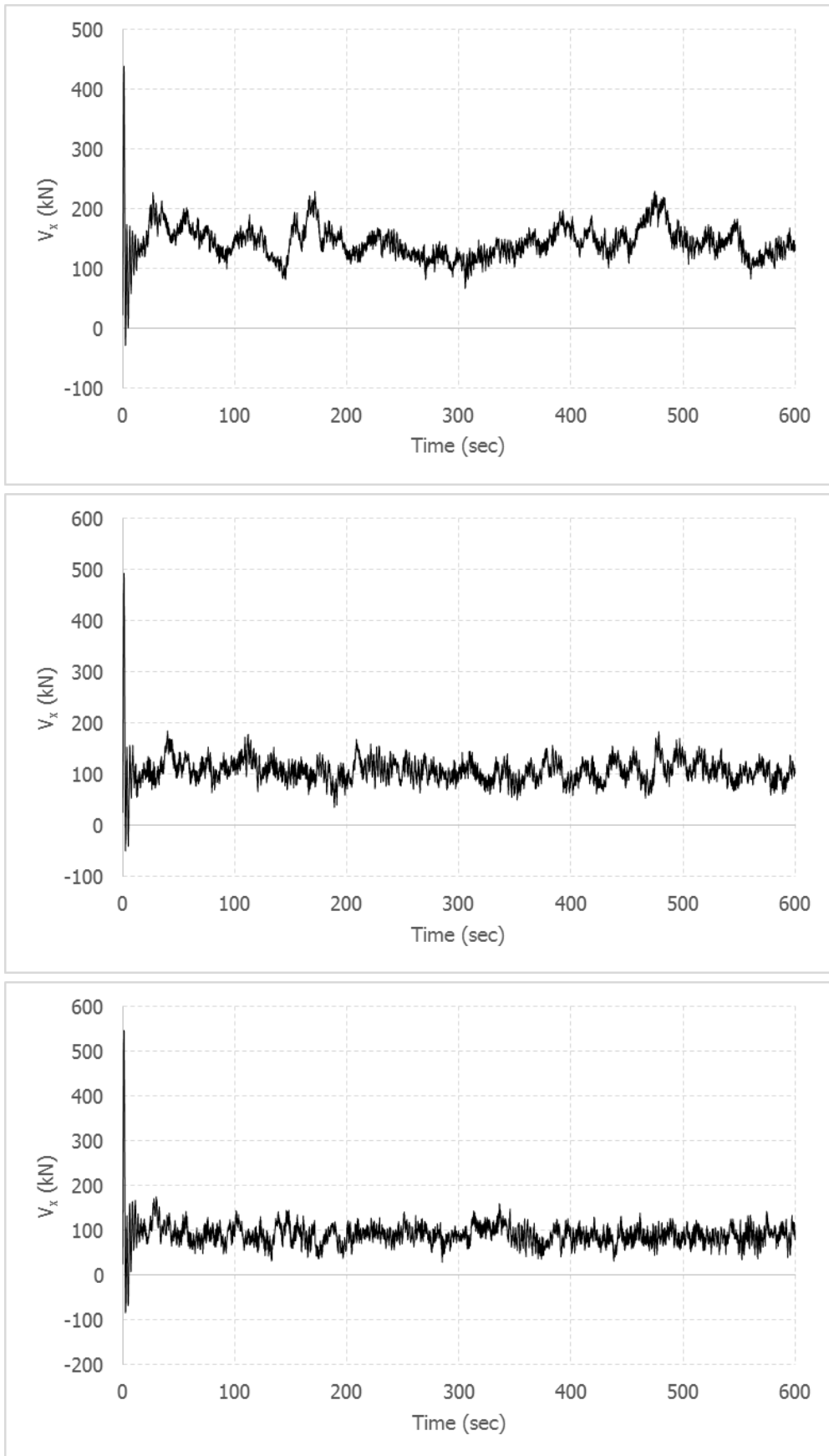


Σχήμα 3-7: Σύστημα αξόνων ανεμογεννήτριας

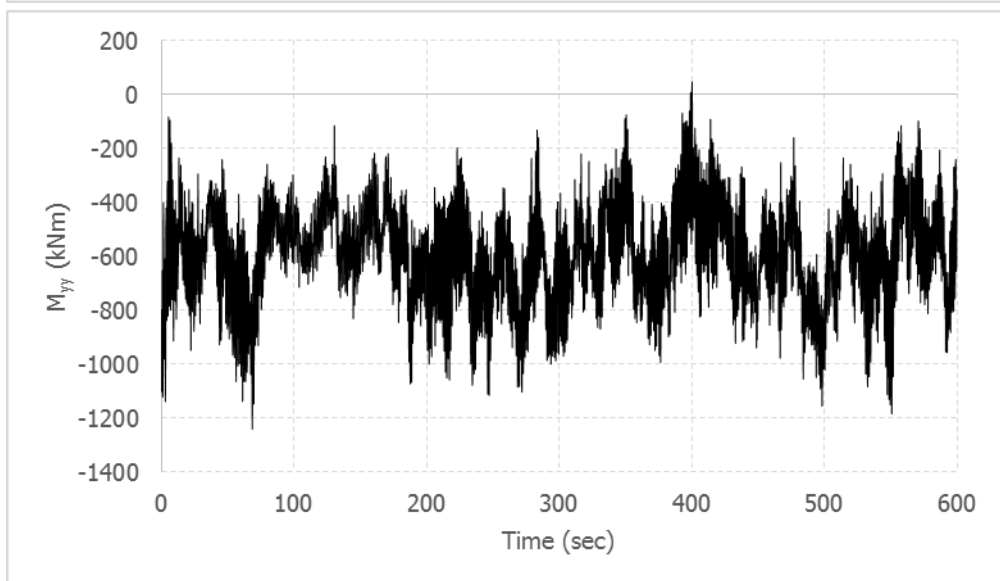
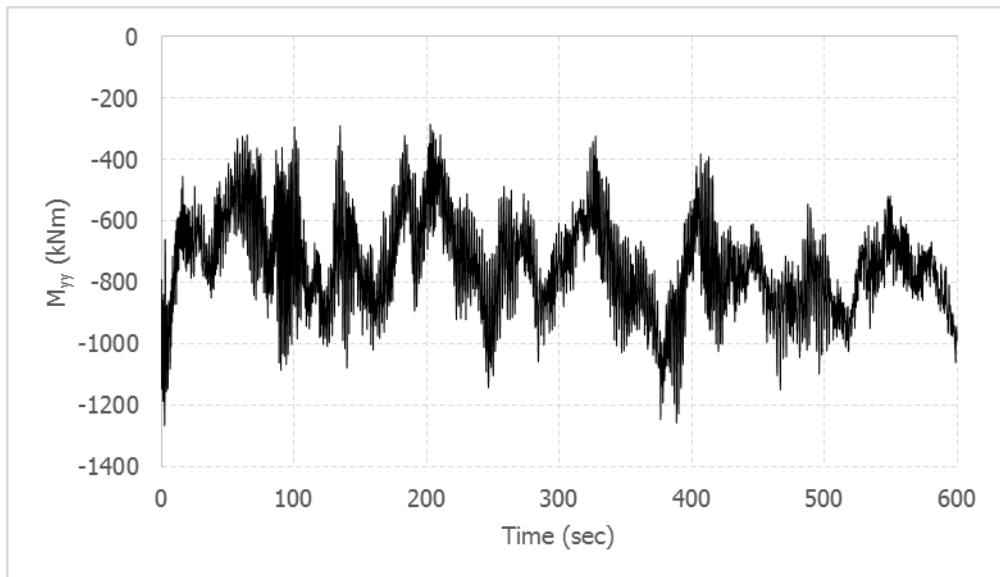
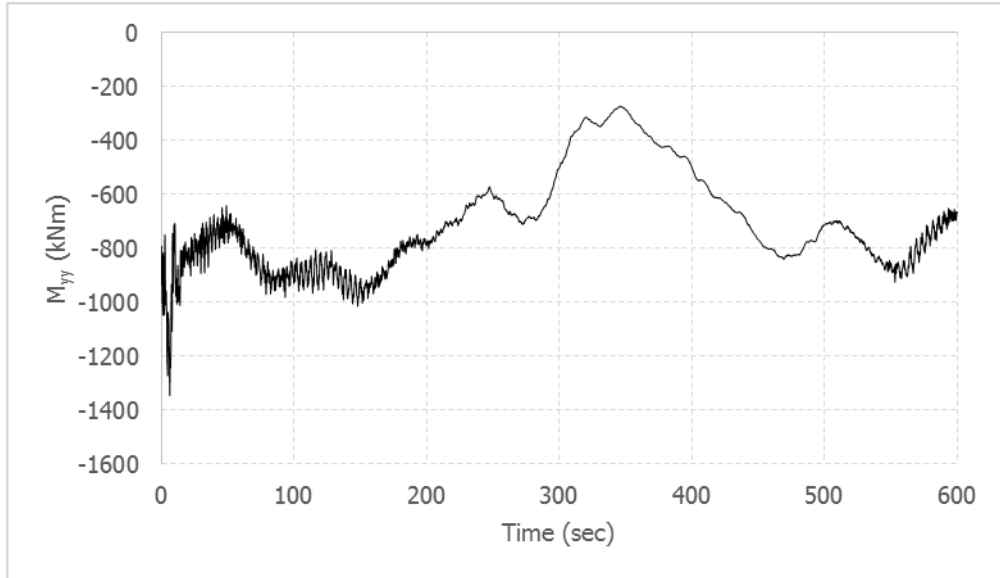
Το σύστημα κλίσης πτερυγίων (pitch control) ενεργοποιείται σε μεγάλες ταχύτητες ώστε να αποφεύγεται η περιστροφή σε πολύ μεγάλες ταχύτητες. Ενεργοποιείται για ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μεγαλύτερη της ονομαστικής και ρυθμίζεται με τρόπο ώστε να διατηρείται όσο το δυνατόν σταθερή κυκλική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ίση με την ονομαστική.

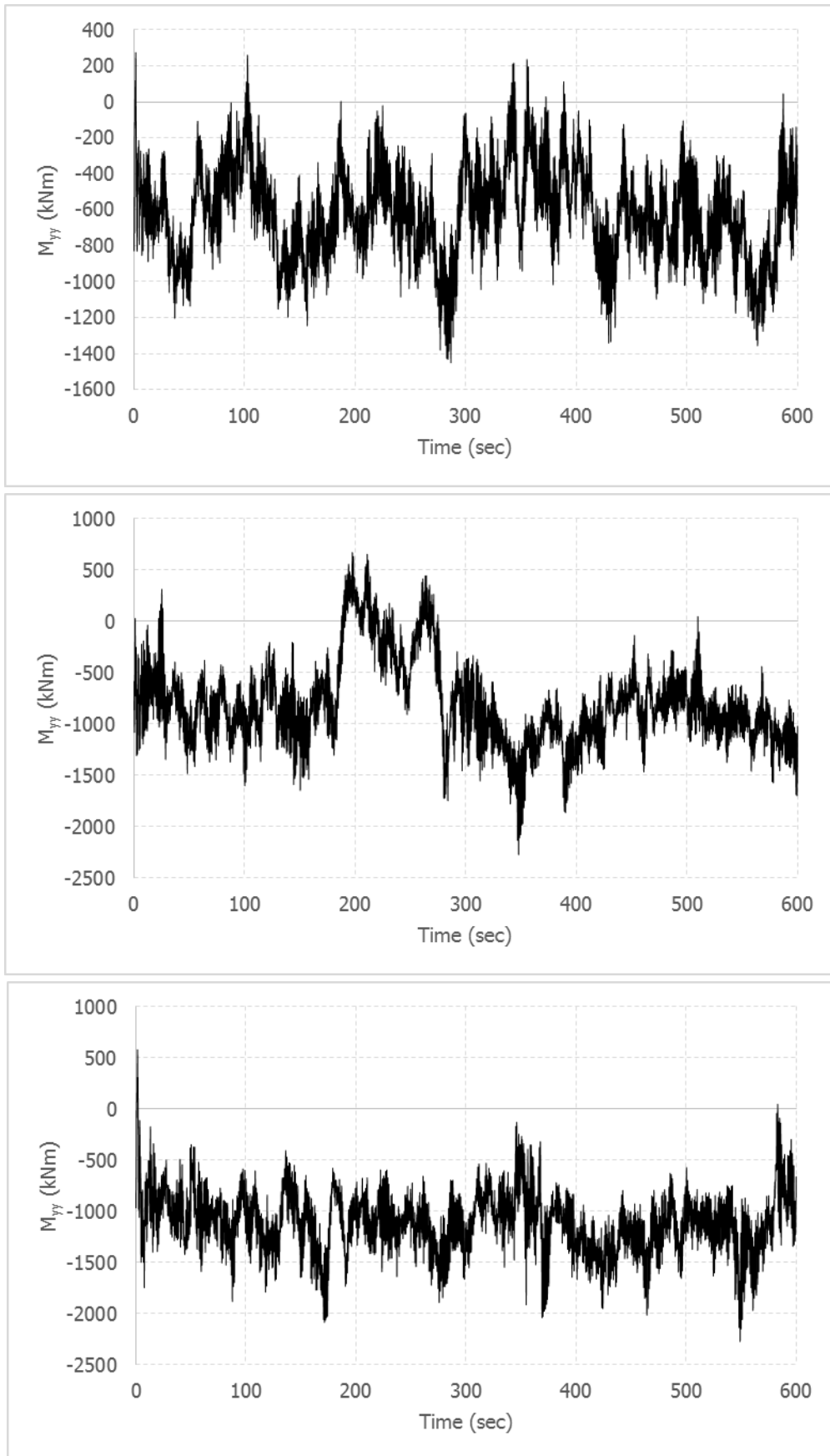
Στη συνέχεια, οι ιστορίες ταχυτήτων ανέμου που παρήχθησαν, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της απόκρισης της ανεμογεννήτριας, μέσω των λογισμικών FAST και AeroDyn. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από το FAST είναι ιστορίες εντατικών μεγεθών στην κορυφή του πυλώνα λόγω ανέμου. Στα σχήματα 3-8 και 3-9 παρουσιάζονται οι ιστορίες τέμνουσας κατά x και ροπής κατά y στην κορυφή του πυλώνα λόγω ανέμου για τις διάφορες μέσες ταχύτητες ανέμου που μελετώνται. Η τέμνουσα κατά τον άξονα y έχει μηδενική μέση τιμή και λαμβάνει μικρές τιμές λόγω της τυρβώδους συνιστώσας του ανέμου στην ίδια διεύθυνση. Η αξονική δύναμη στην κορυφή οφείλεται στο ίδιο βάρος της ατράκτου και του δρομέα. Στις αναλύσεις που θα περιγραφούν στο επόμενο κεφάλαιο αυτή λαμβάνεται υπόψη μέσω μίας σταθερής τιμής της αξονικής δύναμης. Η καμπτική ροπή περί τον άξονα x οφείλεται στις τριβές που αναπτύσσονται στη μηχανή κατά την περιστροφή, επομένως από την ταχύτητα του δρομέα, ο οποίος περιστρέφεται σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού. Τέλος, η καμπτική ροπή περί τον άξονα y έχει κατά κανόνα αρνητικές τιμές, γεγονός που οφείλεται στο έκκεντρο ίδιο βάρος του δρομέα σε σχέση με το κέντρο βάρους της διατομής του πυλώνα.





Σχήμα 3-8: Χρονοϊστορίες τέμνουσας κατά x στην κορυφή του πυλώνα για μέσες ταχύτητες ανέμου 2m/s, 6m/s, 10m/s, 14m/s, 18m/s, 22m/s αντίστοιχα





Σχήμα 3-9: Χρονοϊστορίες καμπτικής ροπής κατά y στην κορυφή του πυλώνα για μέσες ταχύτητες ανέμου 2m/s, 6m/s, 10m/s, 14m/s, 18m/s, 22m/s αντίστοιχα

3.4 ΒΗΜΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

Τα εντατικά μεγέθη που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη υποενότητα θα επιβληθούν σε κατάλληλο αριθμητικό προσομοίωμα μίας σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα της ανεμογεννήτριας προκειμένου να προσδιορισθούν οι τάσεις στην συγκόλληση και στους κοχλίες της σύνδεσης και με τα μεγέθη αυτά να γίνει ο έλεγχος σε κόπωση. Λόγω της δυναμικής φύσης των φορτίων ανέμου που καταπονούν την σύνδεση, πολύ σημαντικό βήμα για την πραγματοποίηση των δυναμικών αναλύσεων είναι ο προσδιορισμός του κατάλληλου βήματος καταγραφής.

Το βήμα καταγραφής του σήματος εξαρτάται άμεσα από την μέγιστη συχνότητα του φορτίου ω_u και από την ιδιοπερίοδο του συστήματος. Συγκεκριμένα, η τιμή του βήματος καταγραφής για την πραγματοποίηση δυναμικών αναλύσεων σε δομοστατικά προβλήματα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με αυτή που υπολογίζεται από την εξίσωση (3-4) [12].

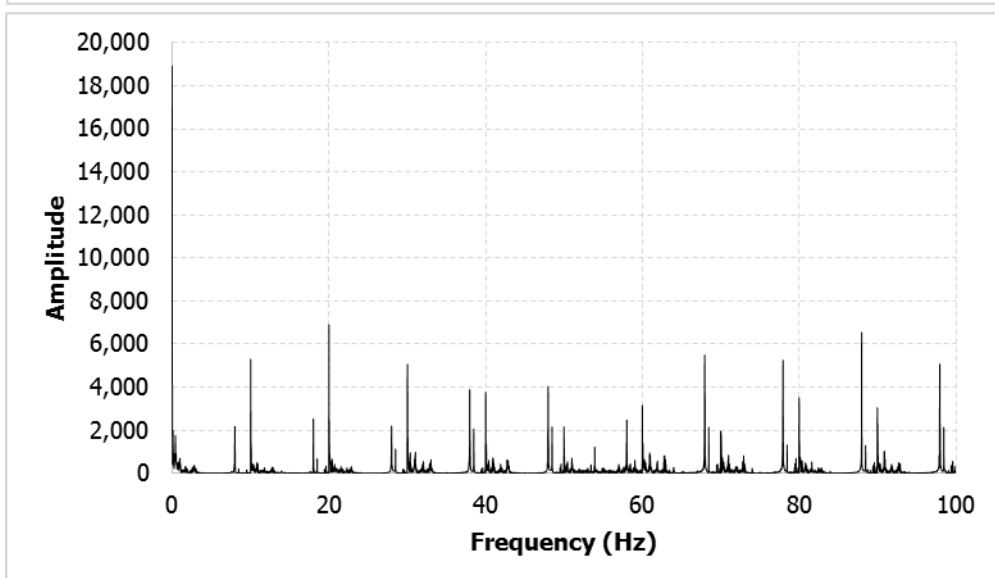
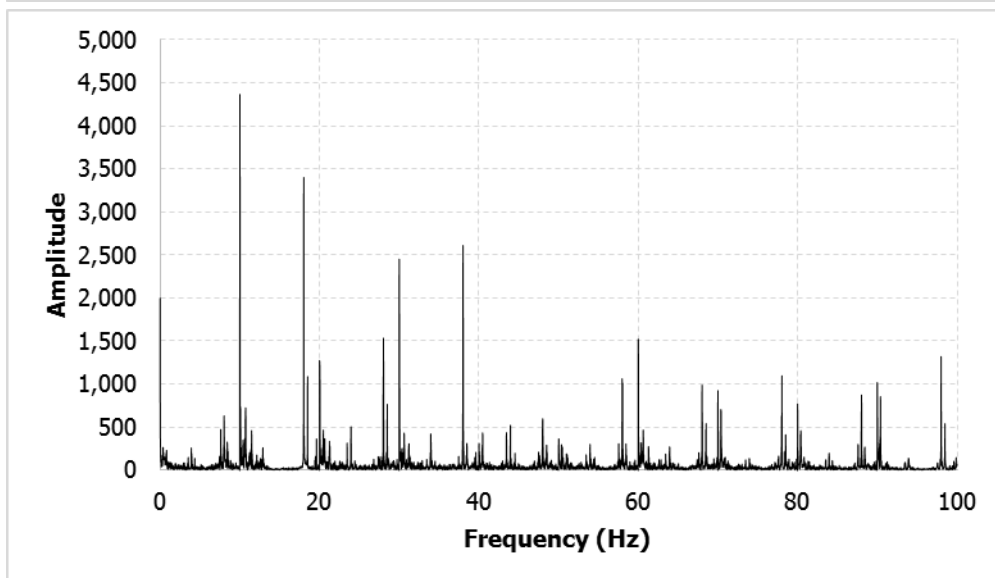
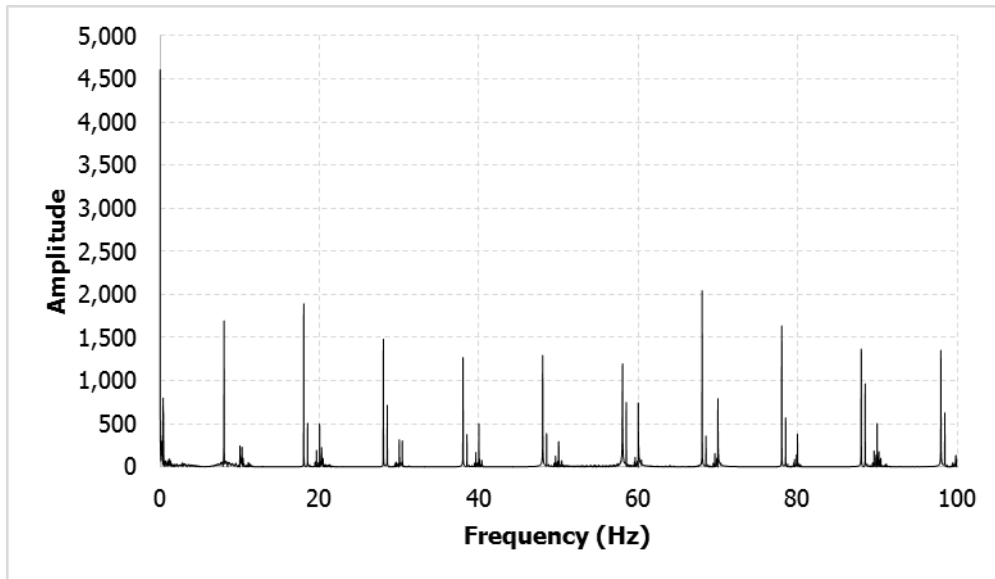
$$\Delta t = \frac{1}{20} \times T \quad (3-4)$$

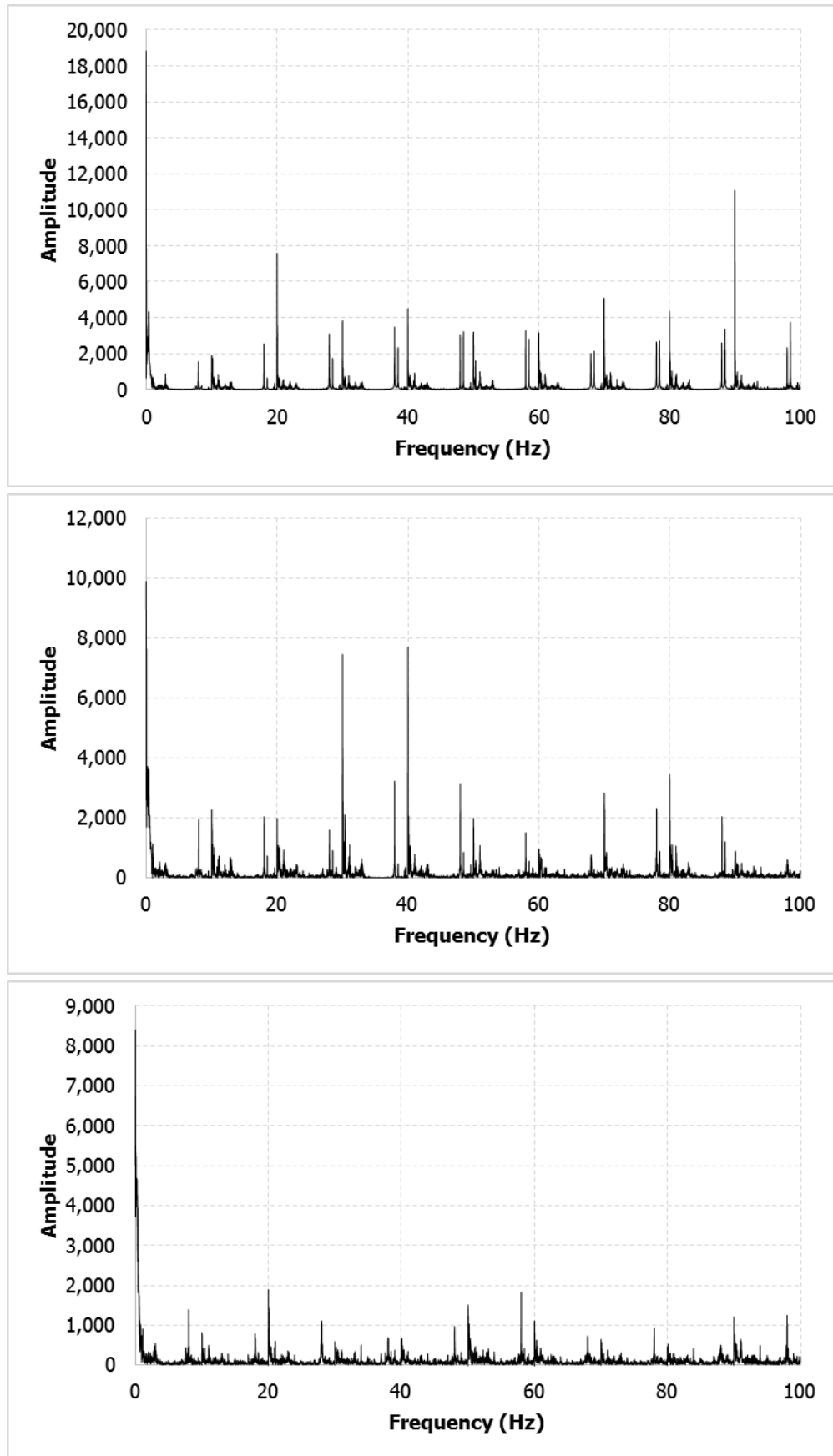
$$T = \frac{2 \times \pi}{\omega} \quad (3-5)$$

όπου:

Τ η μικρότερη περίοδος μεταξύ της ιδιοπερίοδου του συστήματος και της περιόδου του φορτίου
Φυσικά, στην περίπτωση τυχαίας φόρτισης, όπως ο άνεμος στην περίπτωση μας, δεν υπάρχει μία σταθερή περίοδος T_u του σήματος, ωστόσο με μετασχηματισμό Fourier στο φορτίο μπορούμε να δούμε αν έχουμε ισχυρές μεγάλες συχνότητες με μεγάλα πλάτη ταχύτητας ανέμου. Στο Σχήμα 3-10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα Fourier για κάθε μία από τις χρονοϊστορίες για τις διάφορες μέσες τιμές ταχύτητας ανέμου. Η μέγιστη συχνότητα παρατηρείται ότι εμφανίζεται για μέση ταχύτητα ανέμου 18m/s και είναι ίση με 1Hz. Η συχνότητα αυτή μεταφράζεται σε ελάχιστη περίοδο του φορτίου ίση με 1sec. Από την εξίσωση (3-4) προκύπτει λοιπόν ότι το απαιτούμενο βήμα καταγραφής του σήματος Δt είναι ίσο με 0.05sec.

Για τον υπολογισμό της ιδιοπερίοδου του συστήματος έγινε ιδιομορφική ανάλυση, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα μη γραμμικών αναλύσεων ADINA. Το αριθμητικό προσομοίωμα της σύνδεσης που δημιουργήθηκε και οι παραδοχές της προσομοίωσής του, παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Στο Σχήμα 3-11 παρουσιάζεται η πρώτη ιδιομορφή του συστήματος με ιδιοπερίοδο 0,05sec. Παρατηρήθηκε ότι η τιμή της ιδιοπερίοδου των πέντε πρώτων ιδιομορφών παραμένει η ίδια ανεξάρτητα από την δύναμη προέντασης που επιβάλλεται στους κοχλίες. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η τιμή της ιδιοπερίοδου δεν επηρεάζεται από την σύνδεση την οποία και θέλουμε να μελετήσουμε. Επομένως, τελικά για την επιλογή του κατάλληλου βήματος καταγραφής λαμβάνεται υπόψη η περίοδος του φορτίου, όπως αυτή υπολογίστηκε από τον μετασχηματισμό Fourier. Το βήμα καταγραφής των χρονοϊστοριών που παρατέθηκαν παραπάνω ταυτίζεται και με το βήμα της δυναμικής ανάλυσης και είναι ίσο με 0.05sec.





Σχήμα 3-10: Διάγραμμα Fourier του φορτίου για μέσες τιμές της ταχύτητας του ανέμου 2m/s, 6m/s, 10m/s, 14m/s, 18m/s, 22m/s αντίστοιχα



Σχήμα 3-11: 1^η ιδιομορφή του αριθμητικού προσομοιώματος της σύνδεσης

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται μία χαρακτηριστική σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα της ανεμογεννήτριας της εργασίας έναντι κόπωσης σύμφωνα με το EN 1993-1-9 [5]. Περιγράφεται το αριθμητικό προσομοίωμα που δημιουργήθηκε για την μελέτη της σύνδεσης και παρατίθενται τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων. Η υπό μελέτη σύνδεση βρίσκεται στα 0.85 του ύψους του πυλώνα και είναι η ανώτερη σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα μέχρι το ρότορα. Η σύνδεση αυτή πραγματοποιείται μέσω δακτυλιοειδών ελασμάτων που συγκολλούνται στα άκρα των δύο τμημάτων πυλώνα μεταξύ των οποίων γίνεται η σύνδεση και τα οποία κοχλιώνονται μεταξύ τους μέσω προεντεταμένων κοχλιών.

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης δημιουργήθηκε κατάλληλο αριθμητικό προσομοίωμα της σύνδεσης το οποίο θα παρουσιαστεί αναλυτικά στη συνέχεια. Στο αριθμητικό αυτό προσομοίωμα επιβλήθηκαν οι χρονοϊστορίες τέμνουσας και ροπής στην κορυφή του πυλώνα που προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι αναλύσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν ήταν δυναμικές λαμβάνοντας υπόψη την μη γραμμικότητα της επαφής μεταξύ των δακτυλιοειδών ελασμάτων της σύνδεσης καθώς επίσης και της κεφαλής των κοχλιών με τα ελάσματα.

Το EN 1991-1-4 [13] δεν παρέχει προσομοίωμα φορτίων κόπωσης σε πυλώνες ανεμογεννητριών, επομένως για τον προσδιορισμό των φορτίων κόπωσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που περιγράφεται στο Παράρτημα Α του EN 1993-1-9 [5]. Συνοπτικά τα βήματα της μεθόδου είναι:

- Προσδιορισμός γεγονότων φόρτισης
- Προσδιορισμός ιστορικού των τάσεων της λεπτομέρειας
- Μέτρηση κύκλων
- Δημιουργία φάσματος σχεδιασμού
- Υπολογισμός συγκέντρωσης βλάβης
- Έλεγχος συσσώρευσης βλαβών

Τα φορτία ανέμου προσδιορίστηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ο προσδιορισμός του ιστορικού των τάσεων της λεπτομέρειας, ενώ τα επόμενα βήματα θα μελετηθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑΤΟΣ

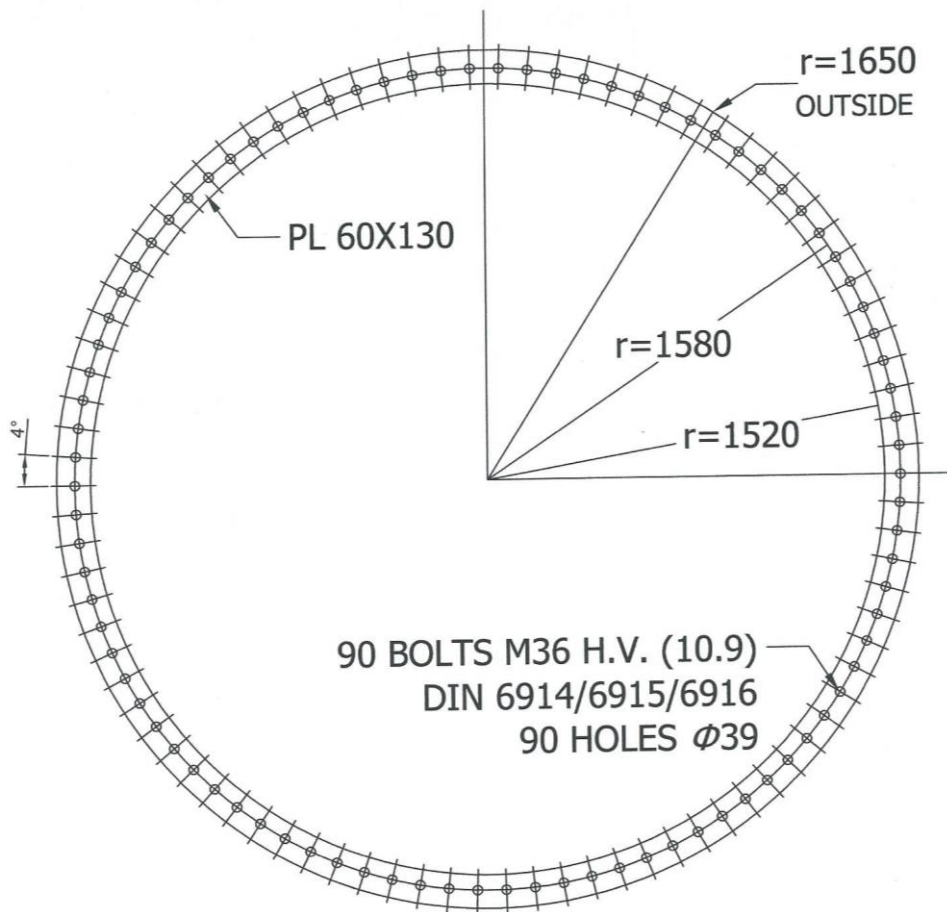
Το αριθμητικό προσομοίωμα το οποίο δημιουργήθηκε για την μελέτη της κόπωσης περιλαμβάνει ολόκληρη τη σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας καθώς και μέρος του πυλώνα. Πιο συγκεκριμένα, συμπεριλήφθηκαν το άνω δακτυλιοειδές έλασμα, η άνω επιφάνεια του κάτω ελάσματος στην οποία εφαρμόστηκαν και οι συνοριακές συνθήκες, οι κοχλίες και τμήμα του πυλώνα αρκετά μεγάλο ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση του πυλώνα στην μεταφορά των φορτίων στην σύνδεση. Η προσομοίωση των δακτυλιοειδών ελασμάτων, του πυλώνα και των κεφαλών των κοχλιών πραγματοποιήθηκε με στοιχεία κελύφους, ενώ η προσομοίωση του κορμού των κοχλιών έγινε με στοιχεία δοκού. Η διακριτοποίηση του φορέα έγινε με χρήση του προγράμματος FEMAP v11.0.1 [14], ενώ όλες οι αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA 9.0 [15].

4.2.1 Γεωμετρία της υπό μελέτη σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα

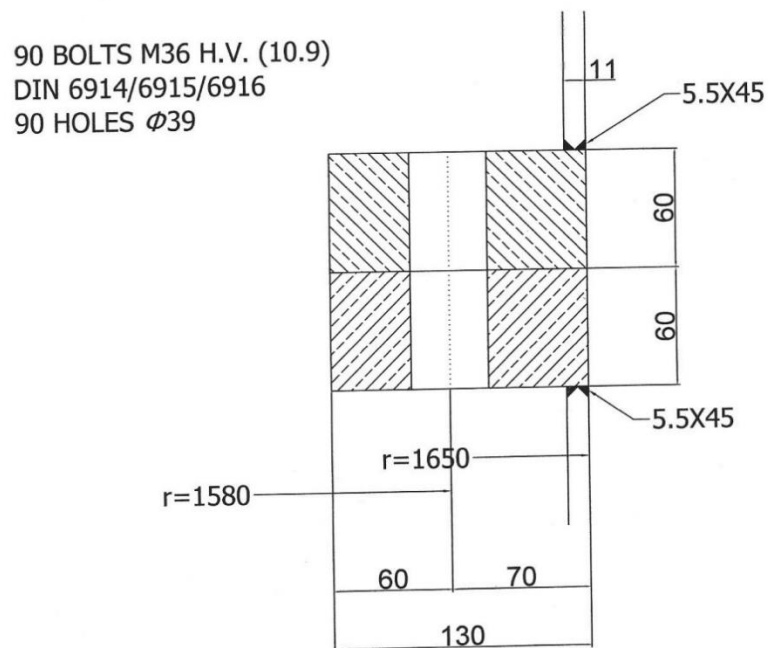
Η σύνδεση που μελετάται στην παρούσα εργασία ανήκει σε μία τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων ισχύος 1.5mW και με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον πίνακα (Πίνακας 4-1). Η ανεμογεννήτρια περιλαμβάνει τα επιμέρους συστήματα ελέγχου των σύγχρονων ανεμογεννητριών, που είναι: (α)κλίση πτερυγίων (pitch control), (β)μετατροπέων ισχύος και γεννήτριας και (γ)περιστροφής της ατράκτου (yaw control). Η γεωμετρία η οποία προσομοιώθηκε περιλαμβάνει την κοχλιωτή σύνδεση των ελασμάτων στο υψηλότερο τμήμα του πυλώνα (στα 0.85 του ύψους του πυλώνα) κοντά στην κορυφή, καθώς επίσης και ένα μέρος του πυλώνα. Το ύψος αυτό του πυλώνα πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 3D, όπου D η διάμετρος του πυλώνα στο ύψος της σύνδεσης, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή του.

Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά υπό μελέτη ανεμογεννήτριας

Χαρακτηριστικά	Τιμή
Ύψος πυλώνα (m)	82.39
Διάμετρος θεωρητικού δίσκου (m)	70.00
Μέγιστη εξωτερική διάμετρος πυλώνα (m)	5.625
Ελάχιστη εξωτερική διάμετρος πυλώνα (m)	2.831
Μάζα πυλώνα (kg)	123003.39
Μάζα πτερυγίου (ένα από τρία) (kg)	3912.59
Μάζα δρομέα (kg)	15148.00
Μάζα ατράκτου (kg)	51170.00
Συνολική μάζα θεωρητικού δίσκου (kg)	26885.77
Συνολική μάζα στην κορυφή του πυλώνα (kg)	78055.77
Συνολική μάζα (kg)	201059.16



Σχήμα 4-1: Κάτοψη της σύνδεσης σε κλίμακα 1/20



Σχήμα 4-2: Τομή της σύνδεσης σε κλίμακα 1/2.5

Η γεωμετρία του πυλώνα του προσομοιώματος είναι κωνική με διάμετρο στο κάτω μέρος, δηλαδή στην θέση της σύνδεσης 3.3m και διάμετρο στην κορυφή 2.83m. Το ύψος πυλώνα του προσομοιώματος είναι 12.36m, όσο είναι η απόσταση της υπό μελέτη σύνδεσης της ανεμογεννήτριας με την κορυφή του πυλώνα. Επομένως, η κορυφή του αριθμητικού προσομοιώματος ταυτίζεται με την κορυφή του πυλώνα στην οποία ασκούνται και τα κυρίαρχα φορτία ανέμου. Στο σχήμα 4-1 παρουσιάζεται η κάτοψη της κοχλιωτής σύνδεσης με τις απαιτούμενες διαστάσεις, ενώ στο σχήμα 4-2 μία τομή του κοχλία και των ελασμάτων. Η εξωτερική διάμετρος του πυλώνα είναι 3.3m και η εσωτερική 3.04m. Το πάχος των ελασμάτων είναι 60mm και το πάχος του πυλώνα είναι 11mm. Τα 2 ελάσματα κοχλιώνονται με 90 προεντεταμένους κοχλίες M36 ποιότητας 10.9 ανά 4°. Η σύνδεση είναι κατηγορίας E συνδέσεων εφελκυσμού και κατηγορίας B σε διάτμηση. Οι επιφάνειες των ελασμάτων ελήφθησαν ως αμμοβολισμένες και οι οπές τους κανονικές.

4.2.2 Παραδοχές αριθμητικής προσομοίωσης

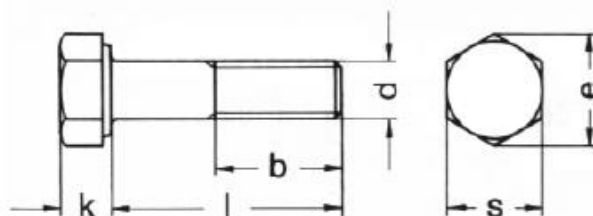
Στο σχήμα 4-3 παρουσιάζεται το αριθμητικό προσομοίωμα της σύνδεσης έτσι όπως εισήχθη στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις. Ενώ στο σχήμα 4-4 παρουσιάζεται η ποιότητα του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Στην κλίμακα ποιότητας που φαίνεται δεξιά του σχήματος παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα η καλύτερη πυκνότητα πλέγματος, ενώ με κόκκινο η χειρότερη. Θεωρητικά, θα μπορούσαμε να πυκνώσουμε κι άλλο το πλέγμα, ώστε να πετύχουμε καλύτερη ποιότητα όμως αυτό θα σήμαινε ακόμα μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος.

Λόγω συμμετρίας μόνο οι μισοί κοχλίες της σύνδεσης, δηλαδή 45 σε πλήθος, έχουν συμπεριληφθεί στο προσομοίωμα, προκειμένου να μειωθεί και το μέγεθος του προσομοιώματος. Στο ADINA εισήχθησαν το πάνω και το κάτω έλασμα, η κεφαλή των κοχλιών και ο πυλώνας ως επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (shell elements), ενώ ο κορμός των κοχλιών ως στοιχεία δοκού (beam elements). Στο σχήμα 4-4 αριστερά, εμφανίζεται με διαφορετικό χρώμα κάθε ένα από τα επιφανειακά στοιχεία που αναφέραμε.

Οι επιφάνειες οι οποίες έχουν προσομοιωθεί είναι οι μέσες επιφάνειες των στοιχείων και μεταξύ των στοιχείων της σύνδεσης έχουν ληφθεί υπόψη και κατάλληλες τιμές ανοχών. Μεταξύ των δύο δακτυλιοειδών ελασμάτων η ληφθείσα τιμή ανοχής είναι 0,1mm, ενώ για την επαφή της κεφαλής του κοχλία με το άνω έλασμα η αντίστοιχη τιμή είναι 0,2mm. Όσον αφορά την ανοχή των οπών των κοχλιών λαμβάνεται ίση με 3mm για κοχλία M36, σύμφωνα με τον κανονισμό.

Στο σχήμα 4-5 παρουσιάζεται το προσομοίωμα σε τρισδιάστατη μορφή με τις πραγματικές διαστάσεις των μελών και των στοιχείων της σύνδεσης. Το κάτω έλασμα της σύνδεσης δεν περιλαμβάνεται καθώς είναι αυτό στο οποίο επιβάλλονται οι συνοριακές συνθήκες και η στήριξη της σύνδεσης.

Η γεωμετρία του κοχλία δίνεται αναλυτικά από τον κανονισμό DIN6914 [16].

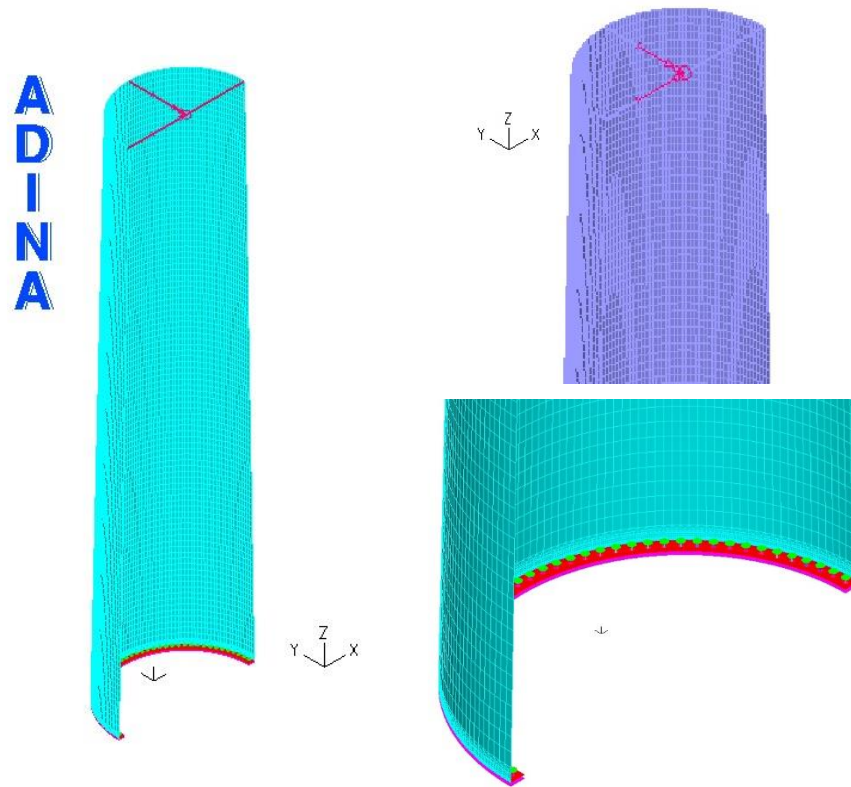


Για κοχλία M36:

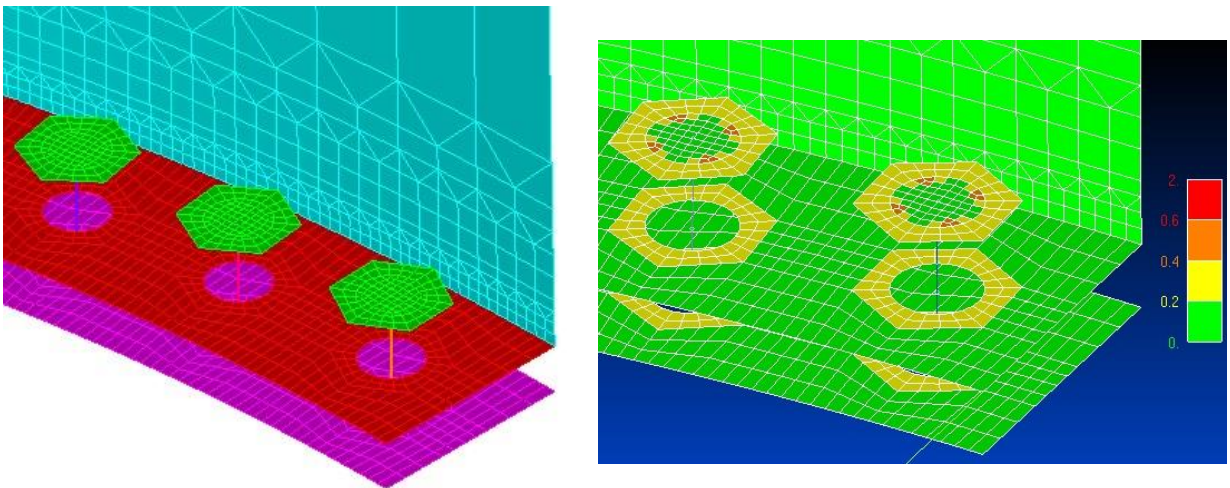
$k=23\text{mm}$

$e=66.44\text{mm}$

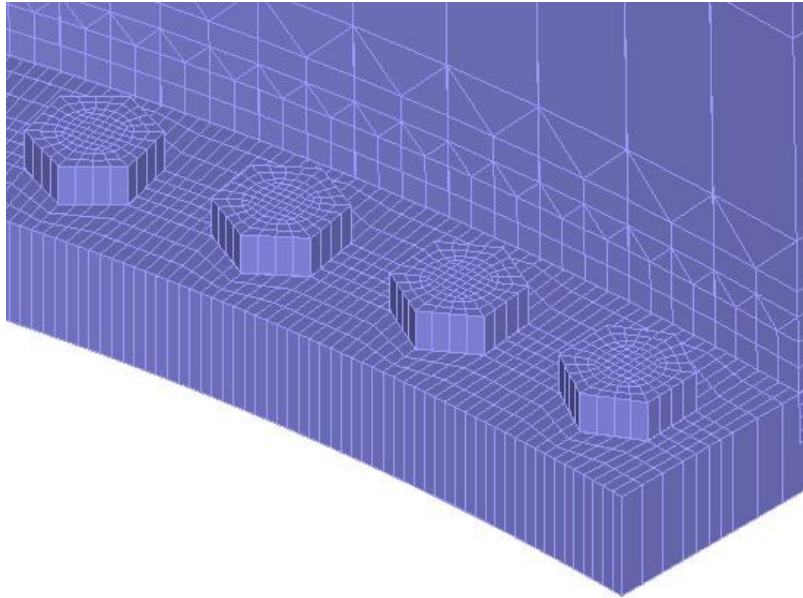
$s=60\text{mm}$



Σχήμα 4-3: Αριθμητικό προσομοίωμα της σύνδεσης στο ADINA



Σχήμα 4-4: Διαβάθμιση ποιότητας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων



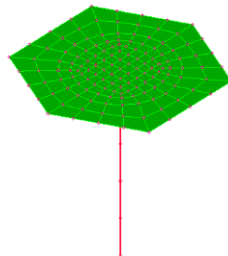
Σχήμα 4-5: Αριθμητικό προσομοίωμα της σύνδεσης με τις πραγματικές του διαστάσεις

Όσον αφορά την ανοχή της οπής, εξαρτάται από την διάμετρο του κοχλία.

Διάμετρος οπής: $d_o = d + a = 36\text{mm} + 3\text{mm} = 39\text{mm}$

Όπου $a=3\text{mm}$ για κοχλία M36

Στο σχήμα 4-6 παρουσιάζεται το προσομοίωμα κάθε κοχλία στο ADINA, όπου διευκρινίζεται σαφώς η προσομοίωση της κεφαλής του κοχλία με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία και του κορμού με στοιχεία δοκού.



Σχήμα 4-6: Τρόπος προσομοίωσης του κοχλία

Η παρουσία προέντασης σε τέτοιες κατασκευές, όπου η κόπωση αποτελεί μία από τις κυρίαρχες μορφές αστοχίας, είναι απαραίτητη. Η ύπαρξη και μόνο της δύναμης προέντασης, ακόμα και μία χαμηλή τιμή, είναι ευεργετική για την κόπωση και μπορεί να αυξήσει κατακόρυφα την αντοχή του κοχλία σε κόπωση, σε σχέση με ένα μη προεντεταμένο κοχλία. Η μέγιστη δύναμη προέντασης ενός κοχλία, σύμφωνα με τον EC3, είναι ίση με το 70% της εφελκυστικής αντοχής του, και δίνεται από την σχέση της Εξ. (4-1).

$$F_{p,c} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s \quad (4-1)$$

όπου: f_{ub} είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλία και A_s το εμβαδόν σπειρώματος

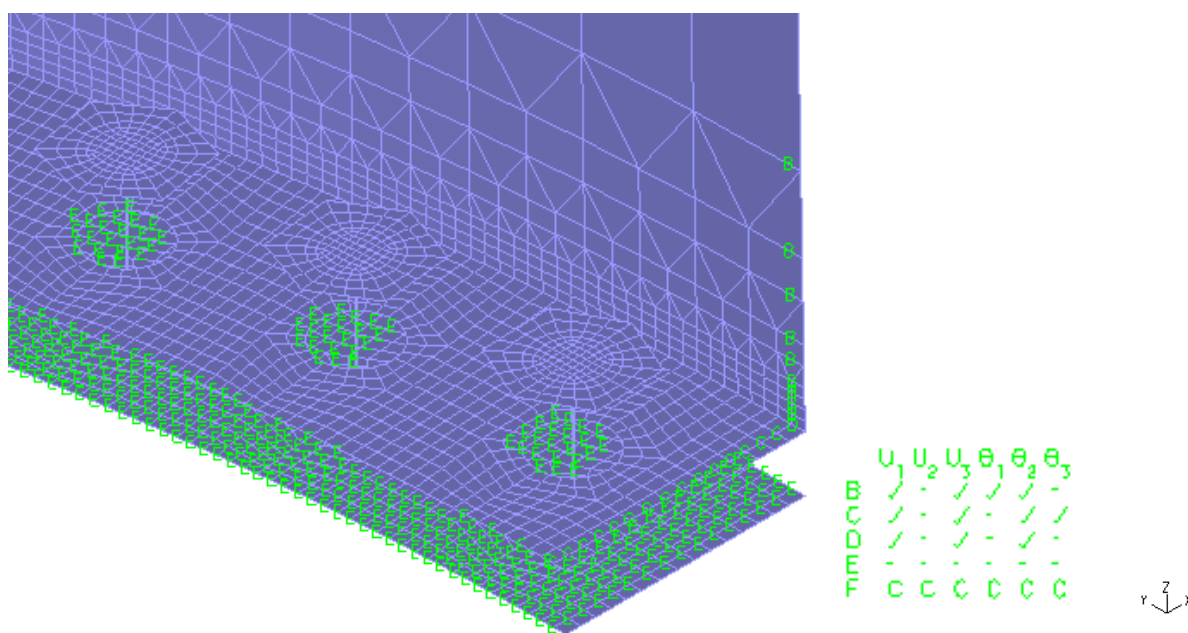
Για κοχλία M36: $A_s=8,17\text{cm}^2$

Για ποιότητα κοχλία 10.9: $f_{ub}=1000\text{MPa}$

$$\text{Οπότε, } F_{p,C} = 0.7 \times \frac{1000000\text{kN}}{10000\text{cm}^2} \times 8.17\text{cm}^2 = 571.9\text{kN}$$

Η επιβαλλόμενη δύναμη προέντασης στους κοχλίες του προσομοιώματος είναι ίση με $100\text{kN} < 571.9\text{kN}$. Επιλέχθηκε μία χαμηλή τιμή της δύναμης προέντασης προκειμένου να αξιολογηθεί και η διακύμανση της αξονικής δύναμης των κοχλιών λόγω της δυναμικής φύσης του κυρίαρχου φορτίου που είναι ο άνεμος.

Η επαφή μεταξύ του άνω ελάσματος της σύνδεσης και της κεφαλής των κοχλιών, καθώς και η επαφή στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων ελήφθη υπόψη με κατάλληλα στοιχεία επαφής. Είναι πολύ σημαντική η ύπαρξη αυτών των στοιχείων επαφής, καθώς αυτή αποτελεί την κυρίαρχη μορφή μη γραμμικότητας του προβλήματος. Η επαφή του κορμού του κοχλία με την άντυγα του ελάσματος δεν είναι δυνατό να ληφθεί υπόψη λόγω της προσομοίωσης του κορμού του κοχλία ως στοιχείο δοκού. Όσον αφορά, τις επιβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος έχει πακτωθεί το κάτω έλασμα μιας και αποτελεί την βάση του πυλώνα στο προσομοίωμα καθώς και οι κάτω κόμβοι των κοχλιών. Οι υπόλοιπες συνοριακές συνθήκες έχουν ως στόχο να λάβουν υπόψη τις συνθήκες συμμετρίας. Δηλαδή καθ' ύψος του πυλώνα έχει δεσμευθεί η μετακίνηση κατά y και η στροφή περί τον άξονα z (σχήμα 4-7).

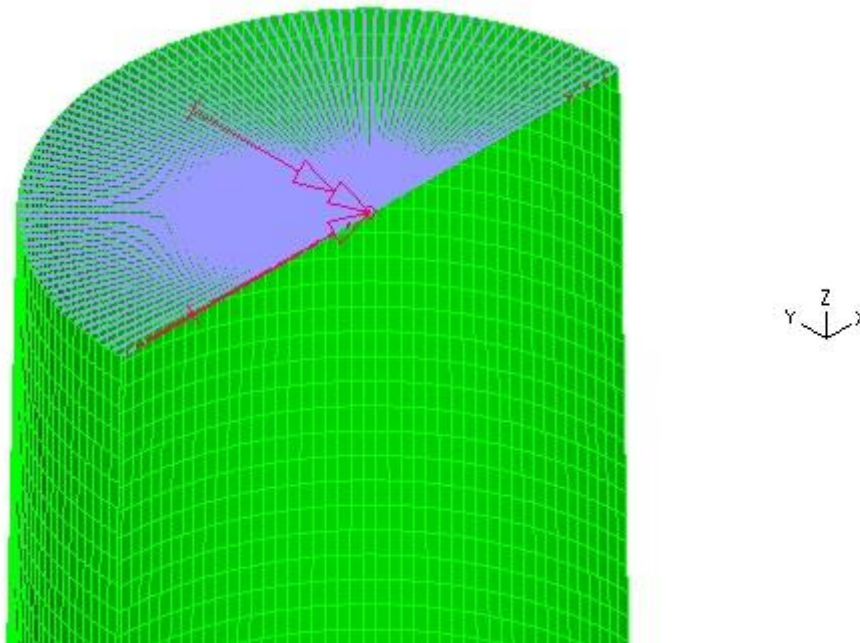


Σχήμα 4-7: Συνοριακές συνθήκες αριθμητικού προσομοιώματος της σύνδεσης

Τέλος, η ανάλυση πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Στην 1^η φάση επιβάλλεται η δύναμη προέντασης στους κοχλίες και τα ίδια βάρη της σύνδεσης. Τα ίδια βάρη περιλαμβάνουν εκτός από το ίδιο βάρος της σύνδεσης και του πυλώνα, ένα κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο ίσο με 390kN που αντιπροσωπεύει το βάρος του ρότορα, του μηχανολογικού εξοπλισμού και των πτερυγίων. Στην 2^η φάση επιβάλλονται τα φορτία του ανέμου, όπως αυτά προσδιορίστηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, μέσω δυναμικής ανάλυσης.

Τα φορτία ανέμου επιβάλλονται στην κορυφή του πυλώνα, στην θέση του ρότορα, σε έναν κεντρικό κόμβο (Σχήμα 4-8). Συγκεκριμένα, οι βαθμοί ελευθερίας όλων των κόμβων της κορυφής του πυλώνα

δεσμεύτηκαν σε ένα κεντρικό (rigid link). Στον κόμβο αυτό επιβάλλονται οι χρονοϊστορίες τέμνουσας κατά x και καμπτικής ροπής κατά y, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.



Σχήμα 4-8: Επιβαλλόμενα φορτία στην κορυφή του πυλώνα

4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων που περιγράφηκαν παραπάνω. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα που θέλουμε να μελετήσουμε για τον έλεγχο σε κόπωση είναι η τάση στην θέση της συγκόλλησης των δακτυλιοειδών ελασμάτων με τον πυλώνα και η αναπτυσσόμενη τάση στον δυσμενέστερο κοχλία της σύνδεσης.

4.3.1 Ιστορικό τάσεων στην συγκόλληση

Στη ραφή της συγκόλλησης αναπτύσσονται ορθές τάσεις σ_{wf} κάθετες στον άξονα της ραφής και διατμητικές τάσεις τ_{wf} κατά μήκος του άξονα της ραφής. Οι ορθές τάσεις υπολογίζονται μέσω της Εξ. (4-2), ενώ οι διατμητικές μέσω της Εξ. (4-3), σύμφωνα με το EN 1993-1-9 [5].

$$\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp f}^2 + \tau_{\perp f}^2} \quad (4-2)$$

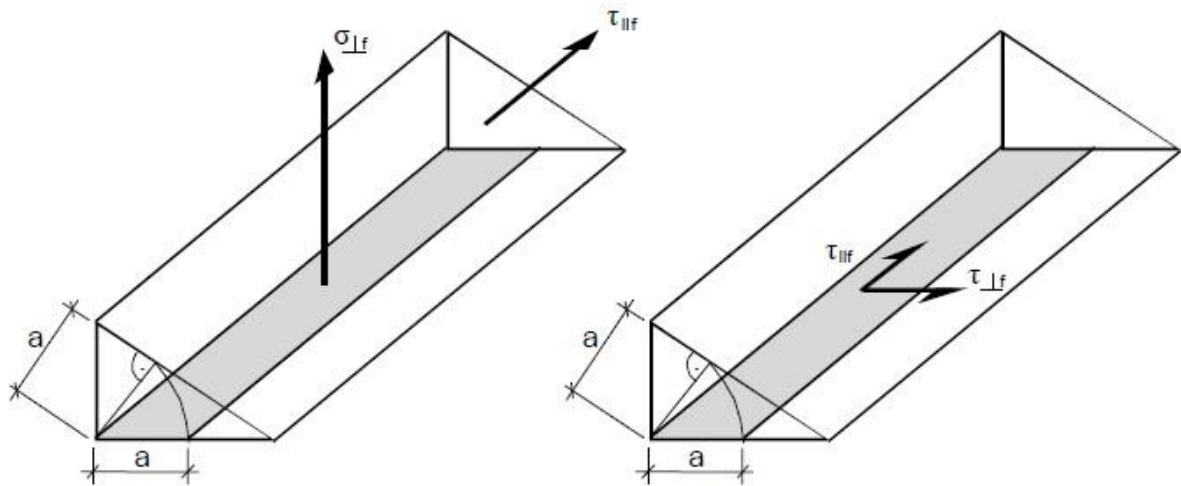
$$\tau_{wf} = \tau_{\parallel f} \quad (4-3)$$

Στο Σχήμα 4-9 παρουσιάζονται και σχηματικά οι τάσεις που αναπτύσσονται στην συγκόλληση των δακτυλιοειδών ελασμάτων της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας με τον πυλώνα.

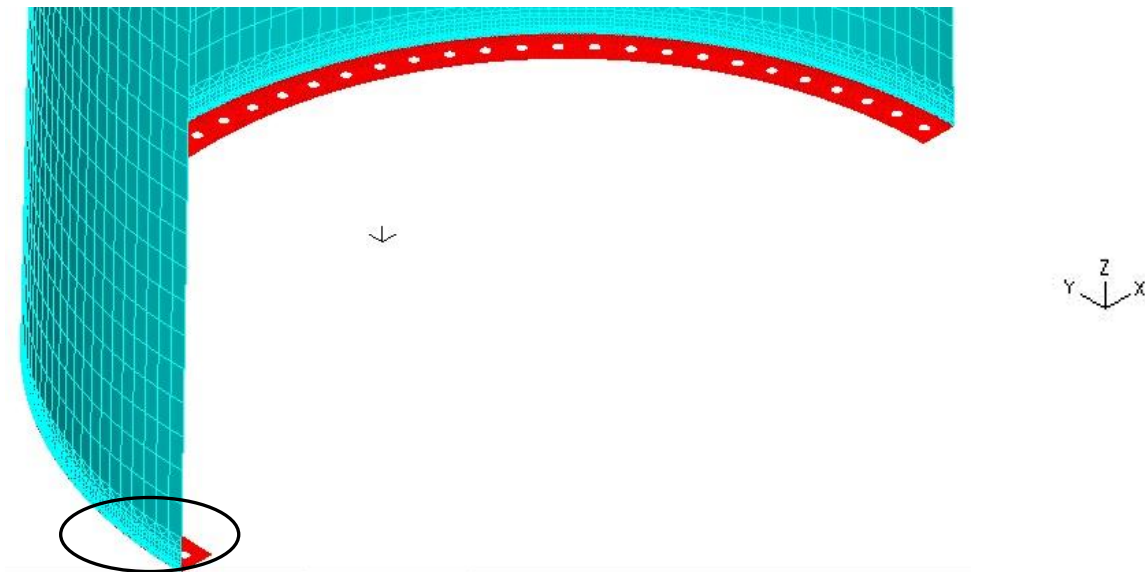
Η θέση ελέγχου της τάσης στην συγκόλληση βρίσκεται στην εφελκυσόμενη παρειά του πυλώνα. Στο Σχήμα 4-10 σημειώνεται με μαύρο χρώμα η θέση ελέγχου πάνω στο αριθμητικό προσομοίωμα. Το στοιχείο συγκεκριμένα, του οποίου η τάση ελέγχεται, ανήκει στον πυλώνα και βρίσκεται ακριβώς στην θέση της ένωσης του πυλώνα με το άνω δακτυλιοειδές έλασμα.

Η διατμητική τάση $\tau_{\parallel f}$ παίρνει αξιοσημείωτες τιμές στη θέση αυτή όταν ο κυρίαρχος άνεμος δεν έχει μηδενική οριζόντια γωνία, και αναπτύσσεται τέμνουσα κατά y στον πυλώνα που στην περίπτωση μας

αμελείται. Επομένως, στην δική μας περίπτωση ανέμου όπου έχουμε θεωρήσει μηδενική οριζόντια και κατακόρυφη γωνία ανέμου, δεν έχουμε ανάπτυξη διατμητικών τάσεων στην θέση ελέγχου. Η διατμητική τάση $\tau_{\perp f}$ λαμβάνει αμελητέες τιμές, καθώς ο έλεγχος γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια της συγκόλλησης όπου η $\sigma_{\perp f}$ είναι μέγιστη.

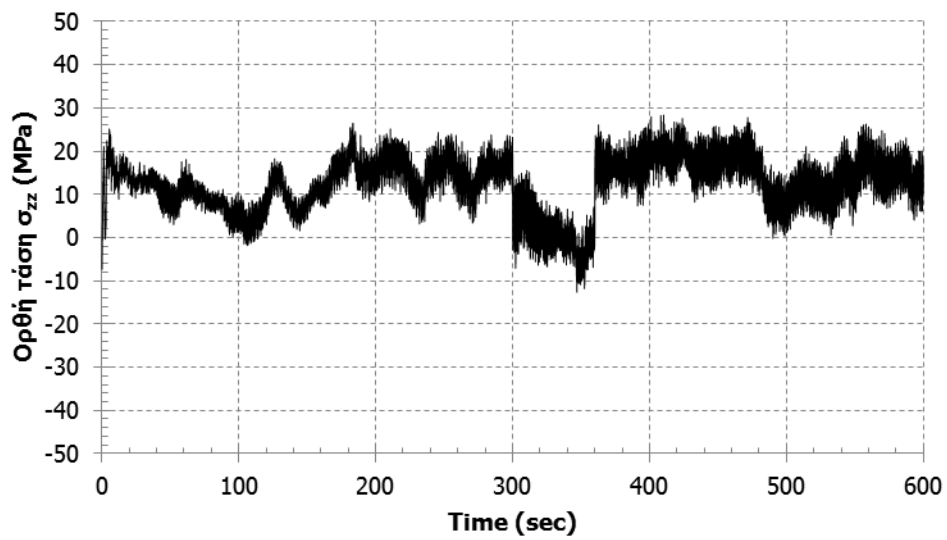
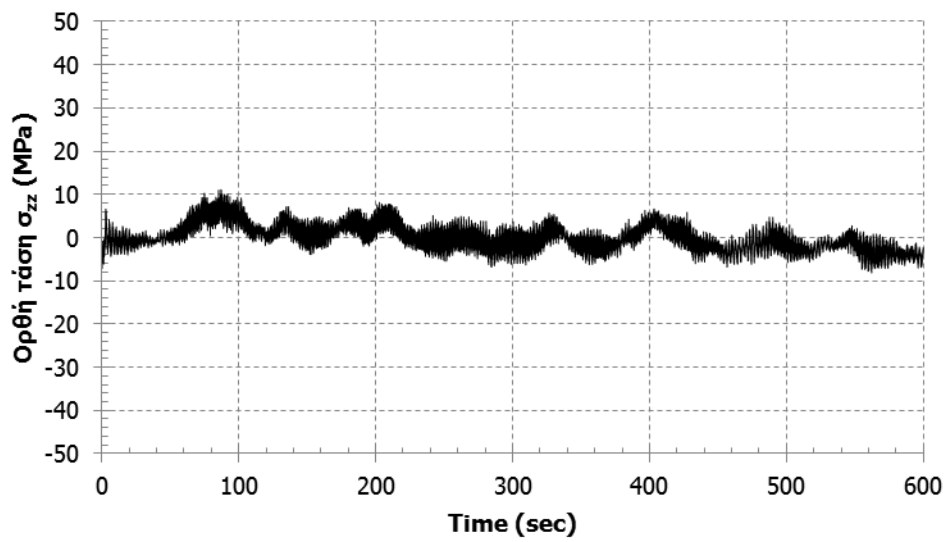
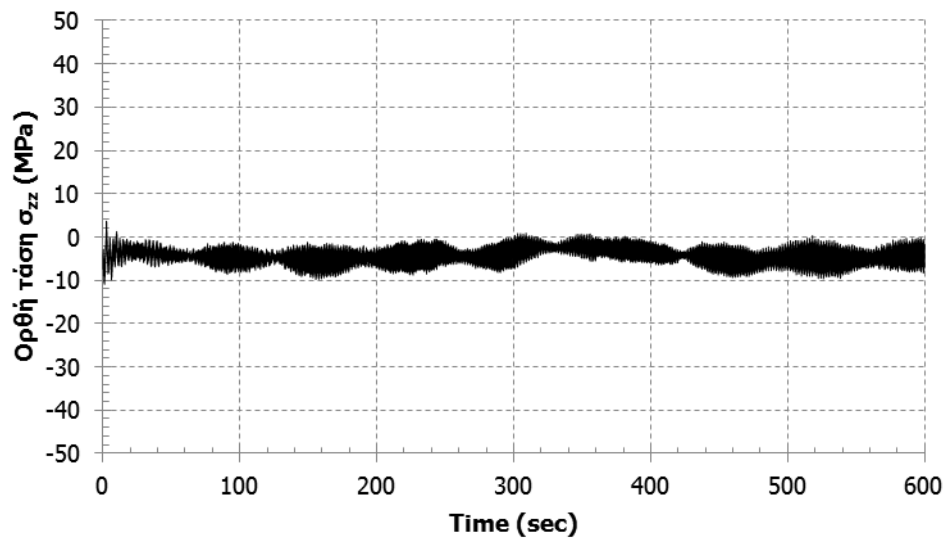


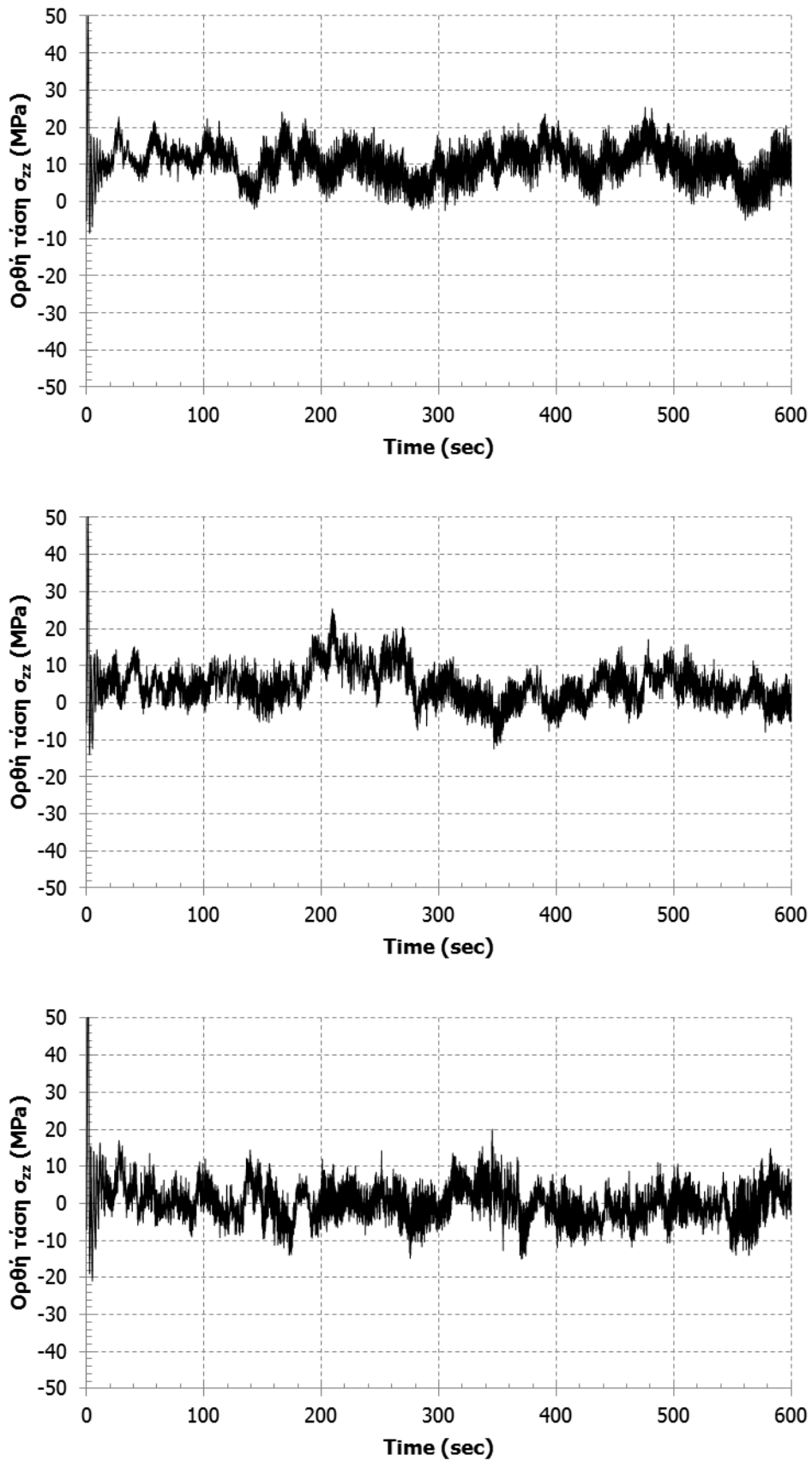
Σχήμα 4-9: Αναπτυσσόμενες τάσεις στη συγκόλληση [5]



Σχήμα 4-10: Θέση ελέγχου της τάσης στην συγκόλληση

Τα διαγράμματα ιστορικού των τάσεων σ_{zz} στην συγκόλληση για τις έξι διαφορετικές μέσες τιμές ταχύτητας ανέμου που ελήφθησαν υπόψη παρουσιάζονται στο σχήμα 4-11. Στα διαγράμματα αυτά δίνεται η κατακόρυφη ορθή τάση σ_{zz} στην συγκόλληση συναρτήσεως του χρόνου. Όπως είναι αναμενόμενο, το διάγραμμα αυτό είναι τυχαίο και ακανόνιστο σε κάθε σημείο με μεταβλητή συχνότητα και εύρος.



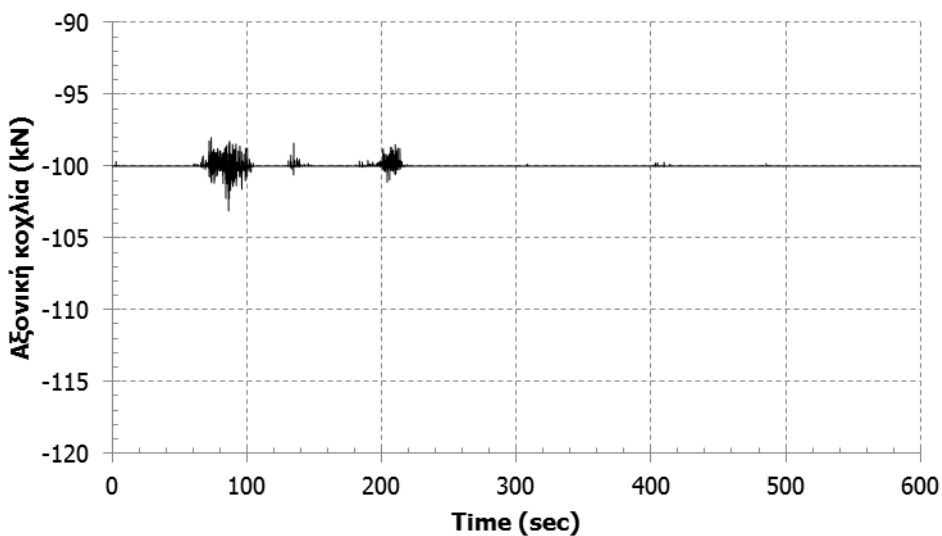
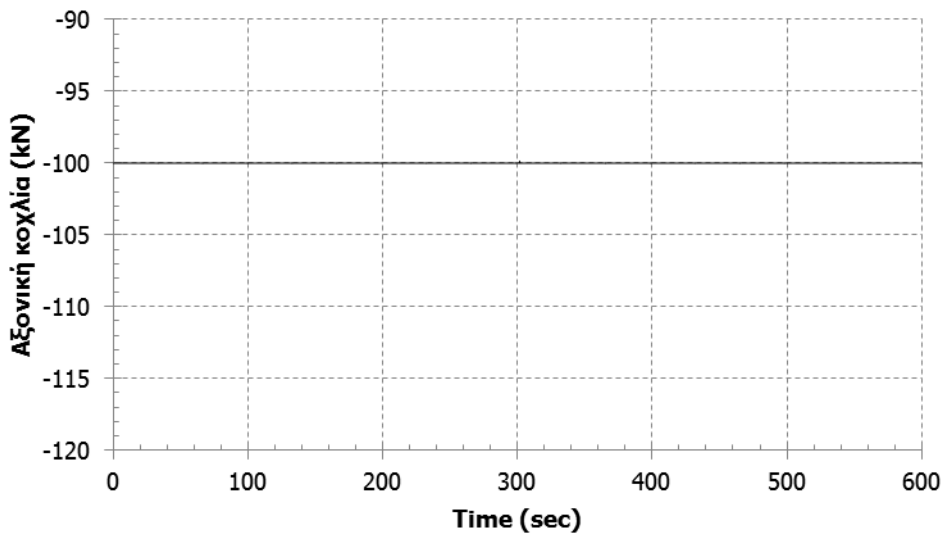


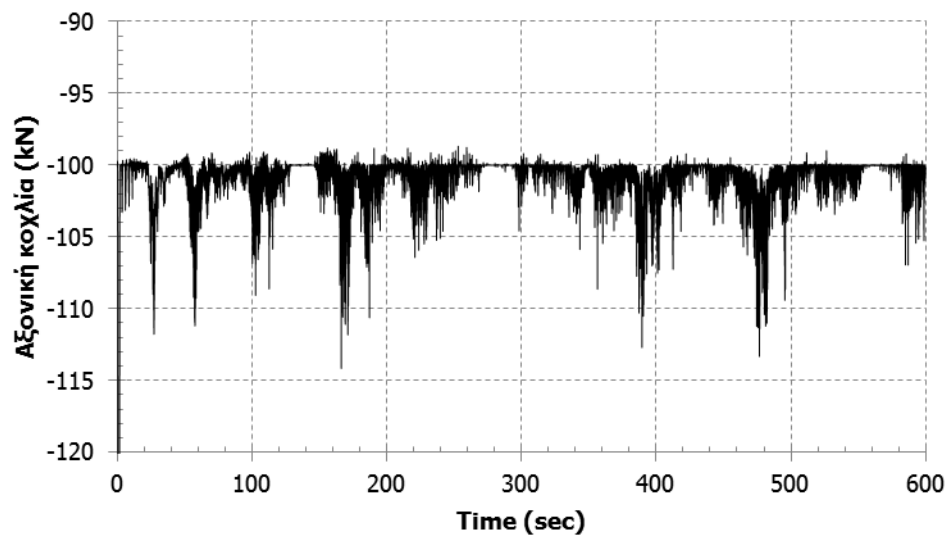
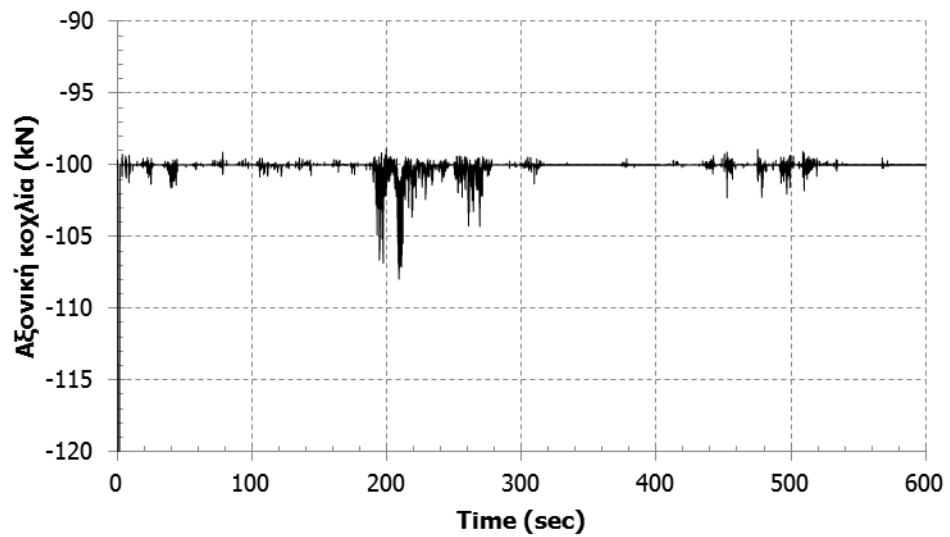
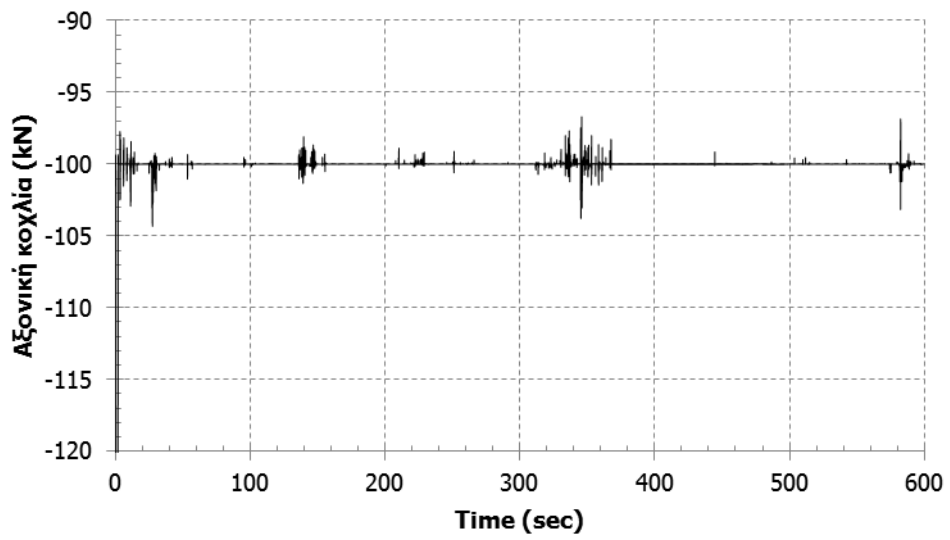
Σχήμα 4-11: Χρονοϊστορίες ορθών τάσεων στην συγκόλληση για μέσες τιμές ταχύτητας ανέμου 2m/s, 6m/s, 10m/s, 14m/s, 18m/s, 22m/s αντίστοιχα

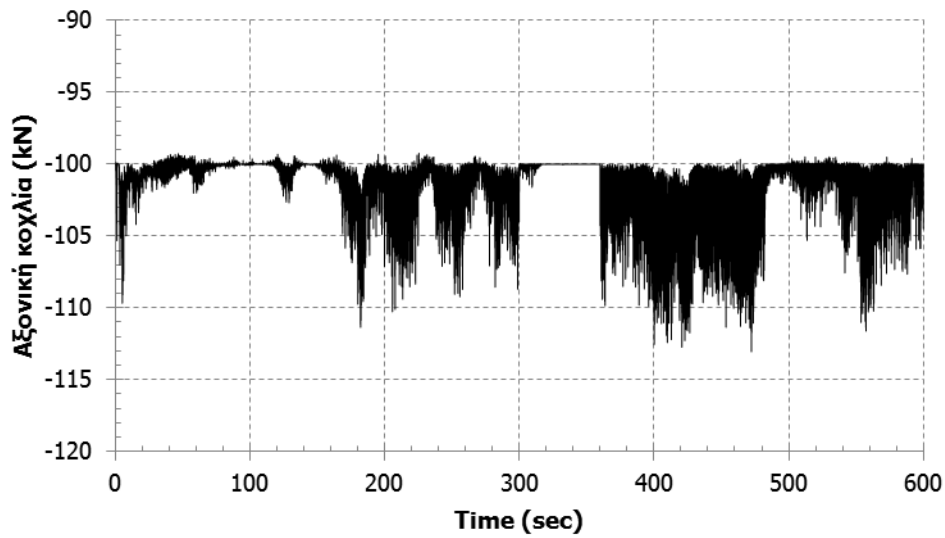
4.3.2 Ιστορικό τάσεων στον κοχλία

Όπως αναφέρθηκε κατά την περιγραφή του αριθμητικού προσομοιώματος, στους κοχλίες της σύνδεσης έχει επιβληθεί δύναμη προέντασης 100kN. Γενικά, η δύναμη προέντασης είναι πολύ σημαντική διότι περιορίζει την αυξομείωση των τάσεων στον κοχλία και αυξάνει την αντοχή του σε κόπωση. Γενικά, η ύπαρξη και μόνο δύναμης προέντασης σε ένα κοχλία είναι ευεργετική για την αντοχή του έναντι κόπωσης. Η επιβολή μίας μέσης τιμής δύναμης προέντασης στον κοχλία έχει ως αποτέλεσμα να διατηρήσει ο κοχλίας σταθερή αξονική δύναμη και το μεγαλύτερο μέρος της επιβαλλόμενης φόρτισης να παραληφθεί μέσω ανακατανομής της αντίδρασης μεταξύ των δύο ελασμάτων. Η δύναμη προέντασης που επιλέχθηκε στις συγκεκριμένες αναλύσεις είναι αρκετά χαμηλή, σε σχέση με τα 571.9kN που ήταν η μέγιστη δυνατή για αυτή τη διάμετρο και ποιότητα κοχλία.

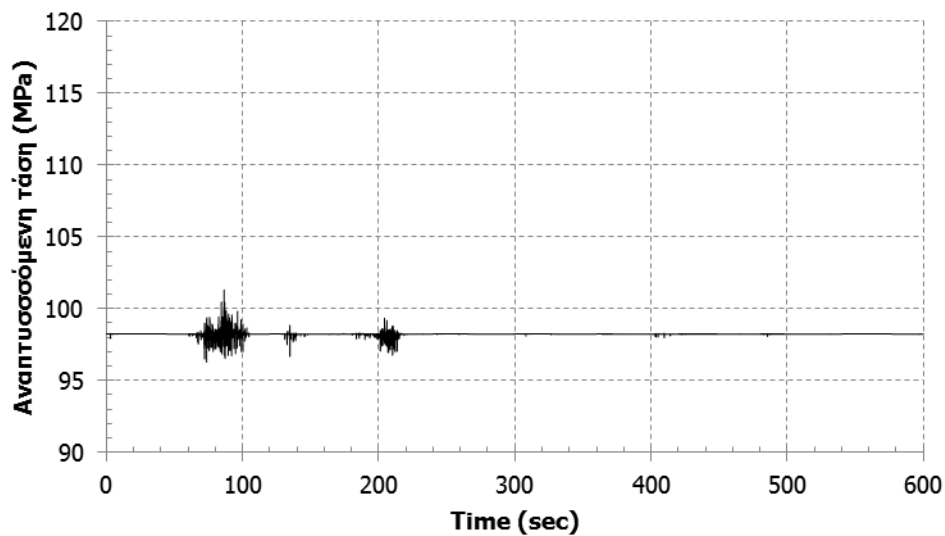
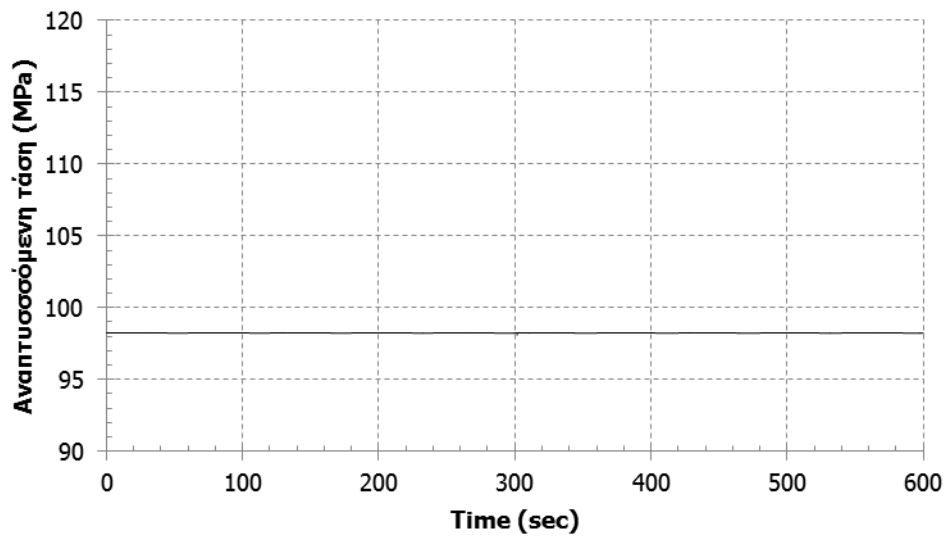
Στο Σχήμα 4-12 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της αξονικής δύναμης του κοχλία, ενώ στο Σχήμα 4-13 τα αντίστοιχα διαγράμματα για την εφελκυστική τάση. Ο κοχλίας του οποίου η αξονική δύναμη ελέγχεται είναι ο ακραία εφελκυσμένος κοχλίας που είναι και ο δυσμενέστερος. Παρατηρείται ότι η αξονική του κοχλία κυμαίνεται κοντά στη δύναμη προέντασης (100kN) και η μεγαλύτερη μεταβολή της αξονικής που εντοπίζεται ΔN είναι 15kN περίπου.

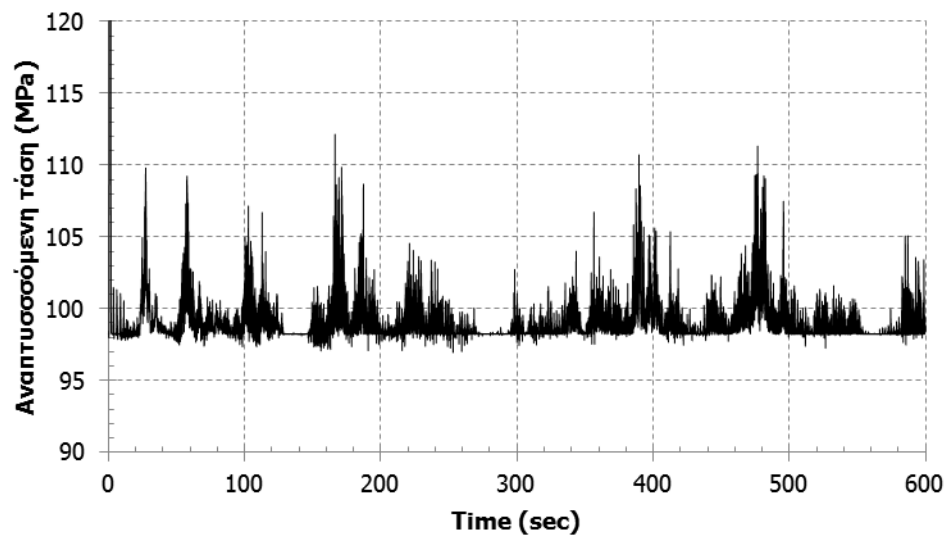
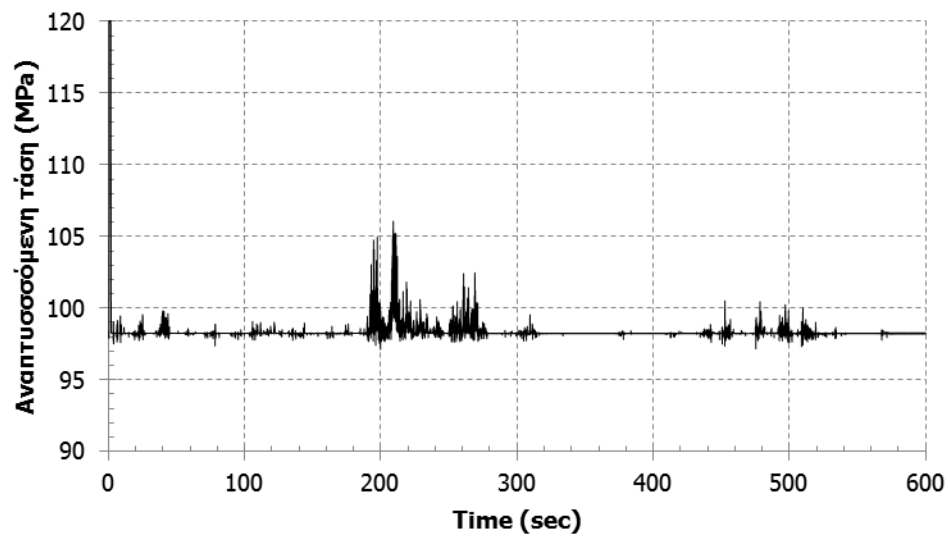
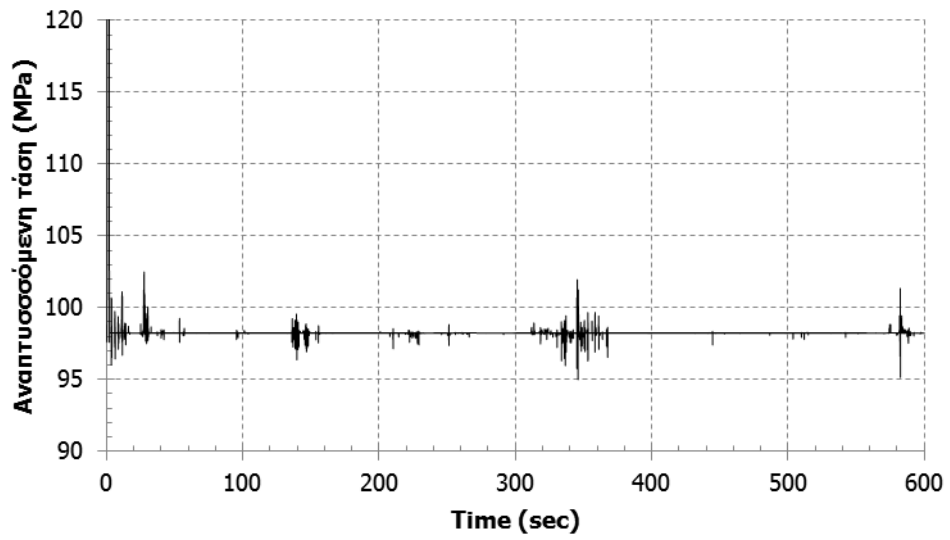


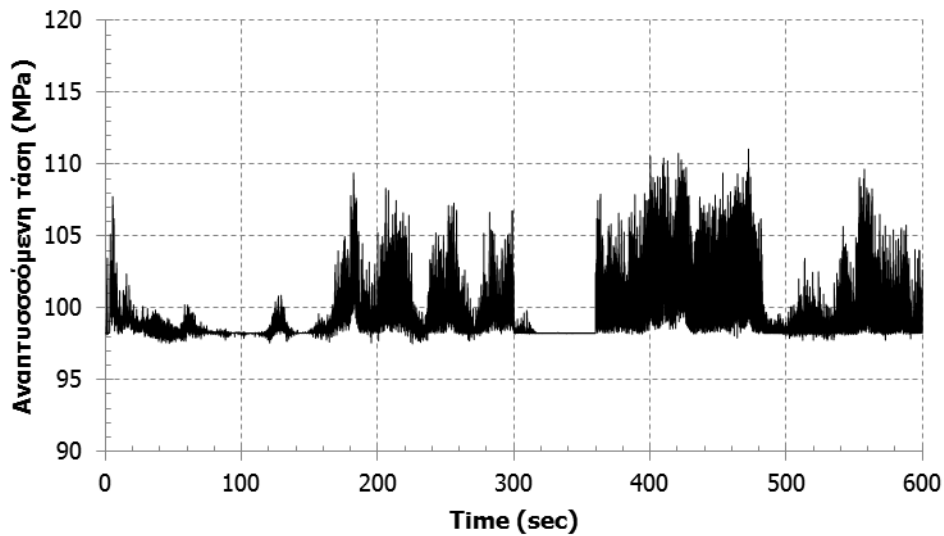




Σχήμα 4-12: Χρονοϊστορίες αξονικής δύναμης κοχλία για μέσες τιμές ταχύτητας ανέμου 2m/s, 6m/s, 10m/s, 14m/s, 18m/s, 22m/s αντίστοιχα







Σχήμα 4-13: Χρονοϊστορίες εφελκυστικής τάσης κοχλία για μέσες τιμές ταχύτητας ανέμου 2m/s, 6m/s, 10m/s, 14m/s, 18m/s, 22m/s αντίστοιχα

Τέλος, από τις χρονοϊστορίες της αξονικής δύναμης και τάσης παρατηρείται ότι για μικρές μέσες τιμές ταχύτητας ανέμου, δηλαδή για ταχύτητα ανέμου 2m/s, 6m/s και 10m/s, η αξονική δύναμη παρουσιάζει ελάχιστες αποκλίσεις από την τιμή της δύναμης προέντασης. Συγκεκριμένα, για ταχύτητα ανέμου 2m/s η αξονική δύναμη είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των 10 λεπτών και ίση με την δύναμη προέντασης. Αυτό σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση ολόκληρη η επιβαλλόμενη φόρτιση παραλαμβάνεται μέσω της ανακατανομής των εντάσεων στα δύο δακτυλιοειδή ελάσματα της σύνδεσης, τα οποία είναι σε επαφή.

5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται ο έλεγχος σε κόπωση για την σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας που μελετάται, σύμφωνα με το EN 1993-1-9 [5]. Προκειμένου να ελεγχθεί η επάρκεια της σύνδεσης και να επιβεβαιωθεί ότι υπάρχει αποδεκτό επίπεδο πιθανότητας η λειτουργία της ανεμογεννήτριας να είναι ικανοποιητική κατά την διάρκεια ζωής σχεδιασμού θα πρέπει να προσδιορισθεί η καμπύλη αντοχής σε κόπωση για τα κρίσιμα μέλη. Στη συγκεκριμένη σύνδεση αυτά είναι η συγκόλληση των δακτυλιοειδών ελασμάτων με τον πυλώνα και οι κοχλίες της σύνδεσης. Από τις ιστορίες των τάσεων για τα δύο αυτά στοιχεία, οι οποίες προσδιορίστηκαν μέσω των δυναμικών αναλύσεων που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα προκύψουν τα ιστογράμματα των τάσεων. Μέσω αυτών και των καμπυλών αντοχής σε κόπωση θα γίνει ο έλεγχος αντοχής σε κόπωση, χρησιμοποιώντας τον συντελεστή συγκέντρωσης βλάβης D. Έτσι, θα προσδιοριστεί η ετήσια συσσώρευση βλάβης και τα έτη στα οποία θα επέλθει αστοχία της υπό μελέτη σύνδεσης λόγω κόπωσης.

Το EN 1991-1-4 [13] δεν παρέχει προσομοίωμα φορτίων κόπωσης σε πυλώνες ανεμογεννητριών, επομένως για τον προσδιορισμό των φορτίων κόπωσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που περιγράφεται στο Παράρτημα A του EN 1993-1-9 [5]. Συνοπτικά τα βήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Προσδιορισμός γεγονότων φόρτισης
- Προσδιορισμός ιστορικού των τάσεων της λεπτομέρειας
- Μέτρηση κύκλων
- Δημιουργία φάσματος σχεδιασμού
- Προσδιορισμός καμπύλης αντοχής σε κόπωση
- Υπολογισμός συγκέντρωσης βλάβης
- Έλεγχος συσσώρευσης βλαβών

Στο 3^ο κεφάλαιο έγινε προσδιορισμός των γεγονότων φόρτισης λόγω ανέμου που επεβλήθησαν στο αριθμητικό προσομοίωμα της σύνδεσης, ώστε να προκύψουν οι ιστορίες των τάσεων της λεπτομέρειας οι οποίες παρατίθενται στο 40 κεφάλαιο. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η μέτρηση των κύκλων μέσω των ιστογραμμάτων των τάσεων, τα οποία θα προκύψουν με εφαρμογή της μεθόδου rainflow. Το φάσμα σχεδιασμού ετήσιου αριθμού κύκλων θα προσδιορισθεί μέσω της κατανομής Rayleigh την οποία ακολουθεί η μέση ταχύτητα ανέμου των 10 λεπτών. Οι καμπύλες αντοχής σε κόπωση θα προκύψουν μετά την επιλογή της κατάλληλης κατασκευαστικής λεπτομέρειας που αντιστοιχεί στη συγκόλληση και τον κοχλία του συγκεκριμένου τύπου σύνδεσης και τέλος θα

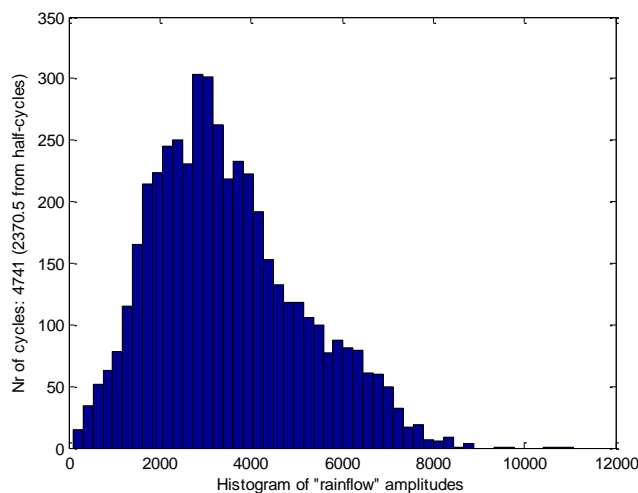
υπολογισθεί ο συντελεστής συγκέντρωσης βλάβης ώστε να ελεγχθεί η τιμή του ως προς τα επιτρεπτά όρια και έτσι να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα.

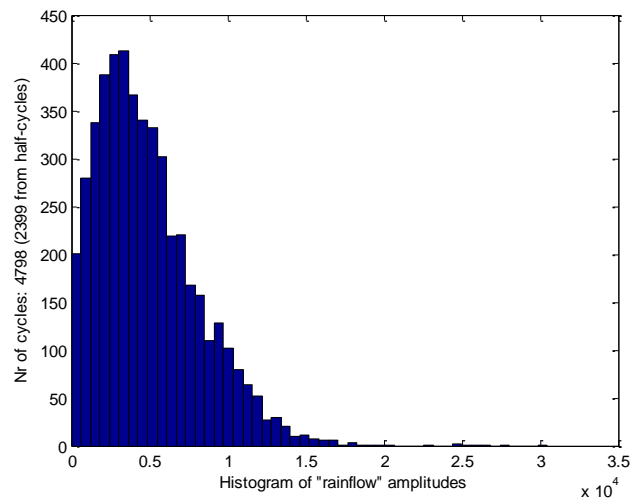
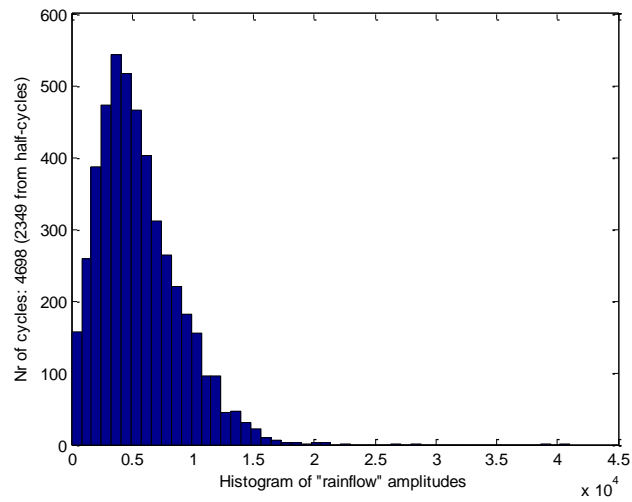
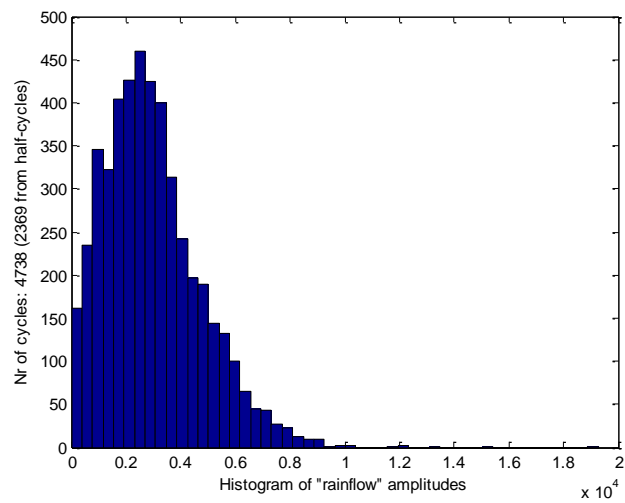
5.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

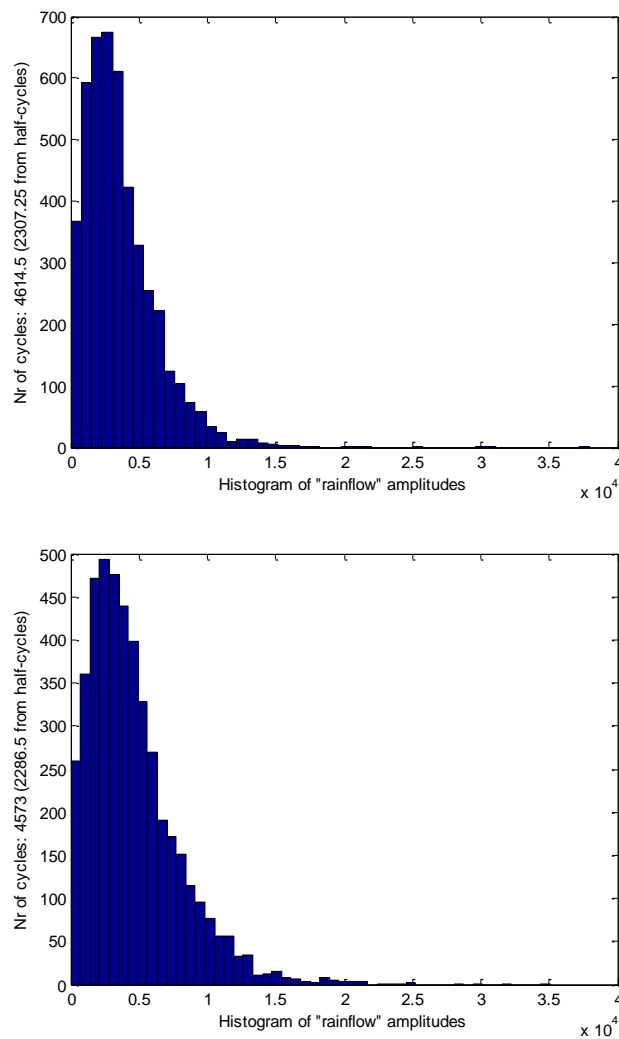
5.1.1 Μέτρηση κύκλων

Το διαγράμματα των τάσεων συναρτήσει του χρόνου σε κάθε σημείο είναι ακανόνιστο και τυχαίο, με μεταβλητή συχνότητα και διακύμανση. Το πρόβλημα το οποίο ανακύπτει στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι τι σημαίνει κύκλος και ποιο είναι σε κάθε κύκλο το αντίστοιχο εύρος τάσης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με διάφορες μεθόδους που κατά καιρούς έχουν προταθεί, οι δύο πιο γνωστές από τις οποίες είναι: a) η μέθοδος reservoir (ή αλλιώς μέθοδος της δεξαμενής) και b) η μέθοδος rainflow (ή αλλιώς μέθοδος της βροχής). Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος rainflow για τον προσδιορισμό του ιστορικού των τάσεων, η οποία εφαρμόζεται με αντιστροφή των αξόνων της χρονοϊστορίας των τάσεων, οπότε προκύπτει μία κατασκευή με διαδοχικές κεκλιμένες οροφές. Νερό υπό μορφή βροχής αφήνεται να πέσει από ψηλά και ακολουθεί τη φυσική διαδρομή νερού κατά την ελεύθερη πτώση του. Παρότι αλλάζει η διαδικασία υπολογισμού τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συμπίπτουν.

Τα πρώτα 10sec των χρονοϊστοριών των τάσεων αγνοούνται, διότι παρουσιάζονται έντονες αυξομειώσεις κατά την έναρξη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, ενώ ο έλεγχος πραγματοποιείται για συνθήκες περιβαλλοντικές συνθήκες. Στο Σχήμα 5-1 παρουσιάζονται τα ιστογράμματα των τάσεων που προέκυψαν, ύστερα από εφαρμογή της μεθόδου rainflow, για κάθε ιστορικό τάσεων της συγκόλλησης για κάθε μία από τις έξι μέσες ταχύτητες ανέμου.







Σχήμα 5-1: Ιστογράμματα εύρους ορθών τάσεων της συγκόλλησης για μέσες ταχύτητες ανέμου 2m/s, 6m/s, 10m/s, 14m/s, 18m/s, 22m/s αντίστοιχα

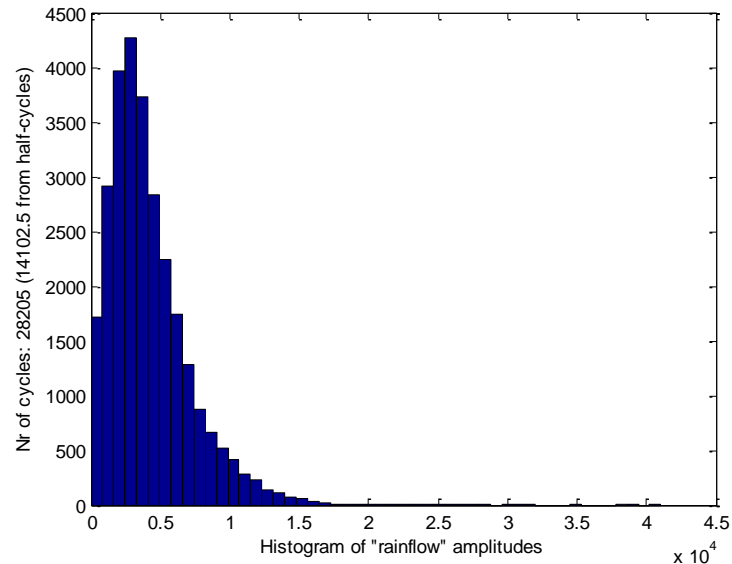
5.1.2 Δημιουργία φάσματος σχεδιασμού

Όπως αναφέρθηκε στο 3^ο κεφάλαιο η μέση ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί την κατανομή Rayleigh, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-1 [6]. Με εφαρμογή της σχέσης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας μέσης ταχύτητας 10λέπτου του ανέμου της κατανομής Rayleigh, προκύπτουν οι πιθανότητες εμφάνισης κάθε μέσης ταχύτητας ανέμου (Πίνακας 5-1).

Πίνακας 5-1: Πιθανότητες εμφάνισης ταχυτήτων ανέμου

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Πιθανότητα
0-4	0.160
4-8	0.342
8-12	0.290
12-16	0.147
16-20	0.049
20-24	0.011

Πολλαπλασιάζοντας την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης με το συνολικό άθροισμα του αριθμού κύκλων των 10 λεπτών και με το πλήθος των 10 λεπτών στη διάρκεια ενός έτους, το οποίο είναι ίσο με $6 \cdot 24 \cdot 365 \text{d} (=52560 \text{ 10λεπτα})$ προκύπτει το φάσμα σχεδιασμού ετήσιου αριθμού κύκλων. Στο Σχήμα 5-2 παρουσιάζεται το ετήσιο αυτό ιστόγραμμα.

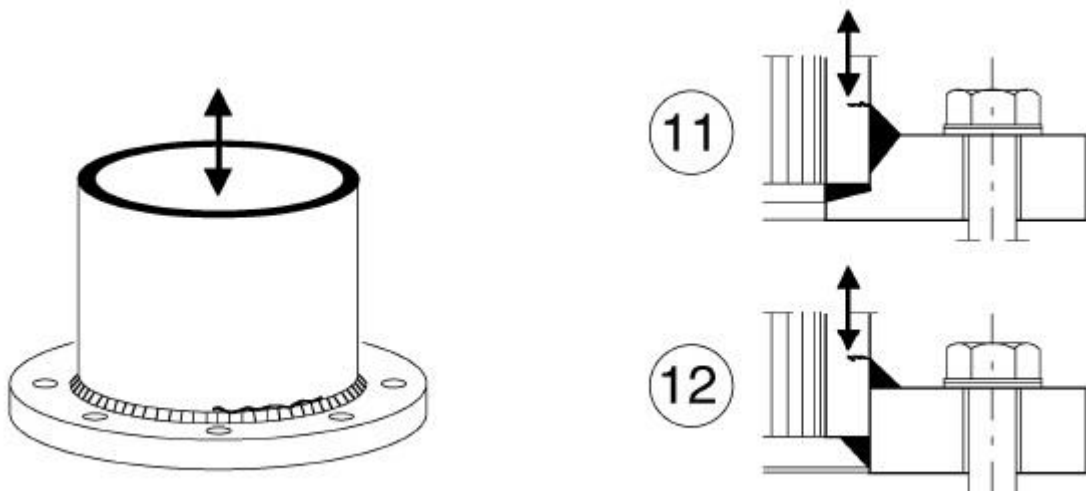


Σχήμα 5-2: Φάσμα σχεδιασμού ετήσιου αριθμού κύκλων

5.1.3 Προσδιορισμός καμπύλης αντοχής σε κόπωση

Για τον έλεγχο της συγκόλληση του δακτυλιοειδούς ελάσματος στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας, η αντίστοιχη λεπτομέρεια βρίσκεται στον πίνακα 8.5 του EN 1993-1-9 [5] και παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-3. Ο συντελεστής ασφαλείας γ_{Mf} λαμβάνεται ίσος με 1.35 όπως προβλέπεται από την μέθοδο ασφαλούς ζωής.

71		11)	11) Weld toe ground. $\Delta\sigma$ computed in tube.
40		12)	12) $\Delta\sigma$ computed in tube.



Σχήμα 5-3: Κατηγορία λεπτομέρειας σύνδεσης του δακτυλιοειδούς ελάσματος στον πυλώνα [5]

Στην καμπύλη κόπωσης S-N διακρίνονται τρεις διαφορετικές περιοχές, η πρώτη με κλίση $m=3$, η δεύτερη με κλίση $m=5$ και η τρίτη με κλίση $m=0$. Η πρώτη αλλαγή κλίση από $m=3$ σε $m=5$ αντιστοιχεί σε αριθμό κύκλων $N_D = 5 \cdot 10^6$, ενώ από $N_L = 10^8$ η κλίση μηδενίζεται. Για τον προσδιορισμό της επαυξημένης καμπύλης αντοχής σε κόπωση εκτός από τα $\Delta\sigma_C$ απαιτείται ο υπολογισμός των $\Delta\sigma_D$ και $\Delta\sigma_L$ (Εξ. (5-1) έως (5-4)).

Στην περιοχή με $m=3$ ισχύει:

$$\left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_C}\right)^3 = \frac{N_C}{N_D} = \frac{2 \times 10^6}{5 \times 10^6} \quad (5-1)$$

$$\Delta\sigma_D = 0.737 \times \Delta\sigma_C \quad (5-2)$$

Στην περιοχή με $m=5$ ισχύει:

$$\left(\frac{\Delta\sigma_L}{\Delta\sigma_D}\right)^3 = \frac{N_D}{N_L} = \frac{5 \times 10^6}{1 \times 10^8} \quad (5-3)$$

$$\Delta\sigma_L = 0.549 \times \Delta\sigma_D \quad (5-4)$$

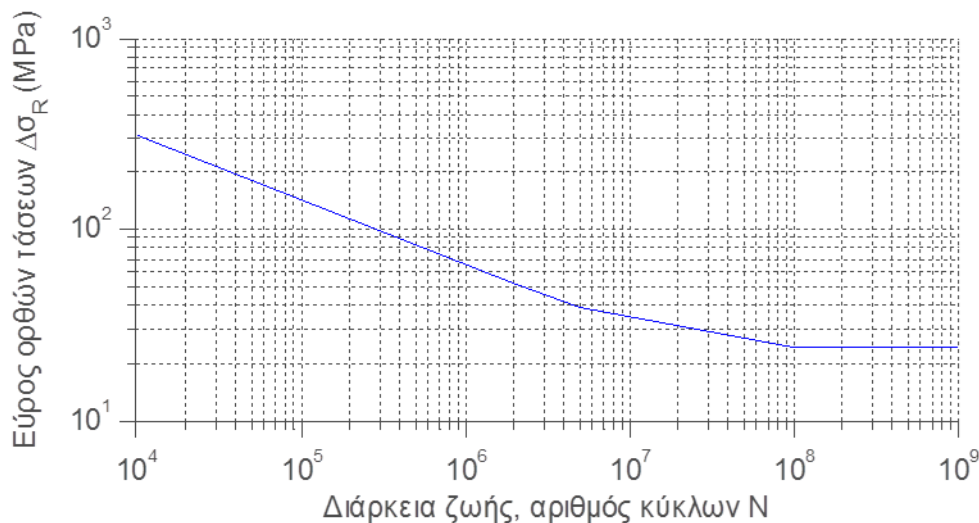
Εξετάζονται και οι δύο περιπτώσεις συγκόλλησης:

- ❖ Σύνδεση πέλματος – σωλήνα με 80% της πλήρους διείσδυσης να είναι εσωραφές

Σ' αυτή την περίπτωση η κατηγορία της λεπτομέρειας είναι 71, επομένως και η αντοχή του συγκεκριμένου τύπου σύνδεσης είναι $\Delta\sigma_C = 71\text{MPa}$. Στο Σχήμα 5-4 παρουσιάζεται η επαυξημένη καμπύλη $\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf} - N_R$ για την περίπτωση της εσωραφής. Το όριο σταθερού πλάτους δίνεται από την Εξ.(5-5), ενώ το όριο αποκοπής από την Εξ.(5-6).

$$\Delta\sigma_D = 0.737 \times \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} = 38.76\text{MPa} \quad (5-5)$$

$$\Delta\sigma_L = 0.549 \times \Delta\sigma_D = 21.28\text{MPa} \quad (5-6)$$



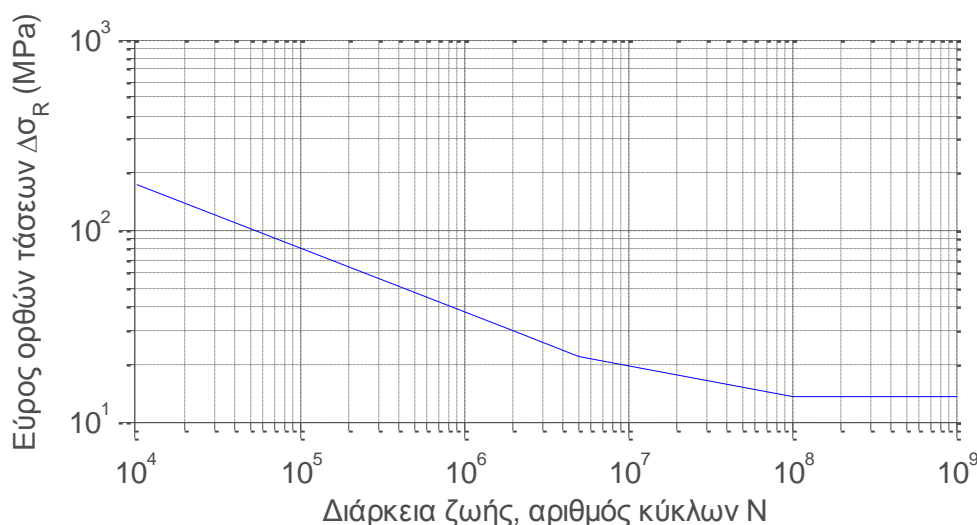
Σχήμα 5-4: Επαυξημένη καμπύλη $\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf} - N_R$ για την περίπτωση συγκόλλησης εσωραφής

❖ Σύνδεση πέλματος – σωλήνα με εξωραφές

Σ' αυτή την περίπτωση η κατηγορία της λεπτομέρειας είναι 40, επομένως και η αντοχή του συγκεκριμένου τύπου σύνδεσης είναι $\Delta\sigma_C = 40\text{MPa}$. Στο Σχήμα 5-5 παρουσιάζεται η επαυξημένη καμπύλη $\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf} - N_R$ για την περίπτωση της εξωραφής. Το όριο σταθερού πλάτους δίνεται από την Εξ.(5-7), ενώ το όριο αποκοπής από την Εξ.(5-8).

$$\Delta\sigma_D = 0.737 \times \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} = 21.84\text{MPa} \quad (5-7)$$

$$\Delta\sigma_L = 0.549 \times \Delta\sigma_D = 11.99\text{MPa} \quad (5-8)$$



Σχήμα 5-5: Επαυξημένη καμπύλη $\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf} - N_R$ για την περίπτωση συγκόλλησης εξωραφής

5.1.4 Υπολογισμός συγκέντρωσης βλάβης

Εφαρμόζοντας την θεωρία Palmgren – Miner, της οποίας η σχέση υπολογισμού αναφέρθηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, προκύπτουν τελικά οι ακόλουθοι συντελεστές συγκέντρωσης βλάβης.

❖ Σύνδεση πέλματος – σωλήνα με 80% της πλήρους διείσδυσης να είναι εσωραφές

Συντελεστής ετήσιας συσσώρευσης βλάβης $D_d = 0.0049 < 1.0$

Επομένως, αστοχία της σύνδεσης αναμένεται σε: 202.17έτη

❖ Σύνδεση πέλματος – σωλήνα με εξωραφές

Συντελεστής ετήσιας συσσώρευσης βλάβης $D_d = 0.1141 < 1.0$

Επομένως, αστοχία της σύνδεσης αναμένεται σε: 8.765έτη

5.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ

Για τον έλεγχο των προεντεταμένων κοχλιών της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα της ανεμογεννήτριας, η αντίστοιχη λεπτομέρεια βρίσκεται στον πίνακα 8.1 του EN 1993-1-9 [5] και παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-6.

Η κατηγορία της συγκεκριμένης λεπτομέρειας είναι 50, επομένως και η αντοχή του κοχλία έναντι κόπωσης είναι $\Delta\sigma_C = 50\text{MPa}$. Επειδή όμως η διάμετρος των κοχλιών της υπό μελέτη σύνδεσης είναι

M36 μεγαλύτερη από το όριο των 30mm απαιτείται απομείωση της αντοχής σε κόπωση. Η απομειωμένη αντοχή σε κόπωση δίνεται από την Εξ.(5-9).

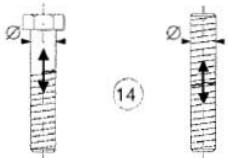
$$\frac{\Delta\sigma_{red}}{\Delta\sigma_c} = \left(\frac{\phi_o}{\phi}\right)^n \quad (5-9)$$

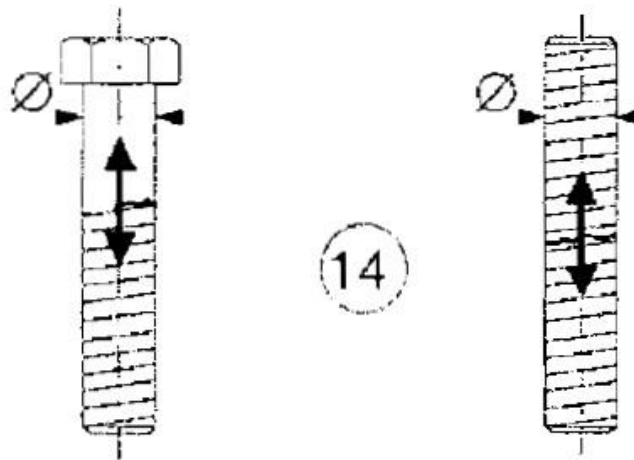
$$\Delta\sigma_{red} = \left(\frac{\phi_o}{\phi}\right)^n \times \Delta\sigma_c = \left(\frac{30mm}{36mm}\right)^{0.25} \times 50MPa = 47.772MPa \quad (5-10)$$

Το όριο σταθερού πλάτους δίνεται από την Εξ.(5-11), ενώ το όριο αποκοπής από την Εξ.(5-12).

$$\Delta\sigma_D = 0.737 \times \Delta\sigma_{red} = 35.208MPa \quad (5-11)$$

$$\Delta\sigma_L = 0.549 \times \Delta\sigma_D = 19.329MPa \quad (5-12)$$

50	size effect for $t > 30mm$: $k_s = (30/t)^{0.25}$		<p>14) Bolts and rods with rolled or cut threads in tension. For large diameters (anchor bolts) the size effect has to be taken into account with k_s.</p>	<p>14) $\Delta\sigma$ to be calculated using the tensile stress area of the bolt. Bending and tension resulting from prying effects and bending stresses from other sources must be taken into account. For preloaded bolts, the reduction of the stress range may be taken into account.</p>
----	---	---	---	--



Σχήμα 5-6: Κατηγορία λεπτομέρειας του κοχλία [5]

Στην περίπτωση των κοχλιών, όπως προέκυψε από τις δυναμικές αναλύσεις στο κεφάλαιο 4, η μεταβολή της αξονικής δύναμης καθ' όλη τη διάρκεια των 10 λεπτών για όλες τις μέσες ταχύτητες ανέμου δεν ξεπερνά τα 15kN. Το όριο αποκοπής $\Delta\sigma_L = 19.329MPa$ αντιστοιχεί σε εύρος αξονικής ΔN , όπως δίνεται στην Εξ. (5-13).

$$\Delta N = \Delta\sigma_L \times A = 19.329MPa \times \pi \times \frac{0.036m^2}{4} = 19.67kN \quad (5-13)$$

Επομένως, τα εύρη τάσεων στην περίπτωση των κοχλιών είναι μικρότερα από το όριο αποκοπής, γεγονός που σημαίνει ότι κανένα δεν υπεισέρχεται στον υπολογισμό του συντελεστή συσσώρευσης βλάβης D.

Άρα, η τιμή του συντελεστή συσσώρευσης βλάβης είναι 0, και η αντοχή των προεντεταμένων κοχλιών M36 με δύναμη προέντασης 100kN έναντι κόπωσης είναι άπειρη. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι έστω και μία πολύ χαμηλή τιμή δύναμης προέντασης είναι αρκετή για εξασφάλιση απεριόριστης αντοχής σε κόπωση για τον κοχλία.

6 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η συμπεριφορά συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας του σωληνωτού πυλώνα μίας ανεμογεννήτριας έναντι κόπωσης. Για μία τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων, με ονομαστική ισχύ 1,5mW και ύψος πυλώνα περί τα 80m, διερευνήθηκε η επάρκεια της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας κοντά στην κορυφή και συγκεκριμένα στα 0,85 του ύψους του πυλώνα σε κόπωση για ρεαλιστικά φορτία ανέμου. Ο έλεγχος σε κόπωση για τα μέλη της σύνδεσης έγινε σύμφωνα με τον EN 1993-1-9 και λόγω έλλειψης κάποιου προσομοιώματος για φορτία κόπωσης σε πυλώνες ανεμογεννητριών, πραγματοποιήθηκε η ακόλουθη διαδικασία.

Αρχικά, μέσω τριών ελεύθερων για το κοινό υπολογιστικών εργαλείων από το εργαστήριο National Renewable Energy Laboratory (NREL) και το κέντρο National Wind Technology Center (NWTC) των ΗΠΑ, προσδιορίστηκαν ρεαλιστικές χρονοϊστορίες ανέμου και χρονοϊστορίες εντατικών μεγεθών από τον ρότορα στον πυλώνα. Για την περιοχή κατασκευής και τις περιβαλλοντικές συνθήκες έγιναν λογικές παραδοχές. Οι χρονοϊστορίες αυτές επιβλήθησαν, στην συνέχεια, ως φορτία ανέμου στην υπό μελέτη σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας.

Στην συνέχεια, δημιουργήθηκε ένα αριθμητικό προσομοίωμα της υπό μελέτη σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας, η οποία είναι η ανώτερη σύνδεση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA v9.0.0. Το προσομοίωμα αυτό περιλαμβάνει ολόκληρη την σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας καθώς και το τμήμα του πυλώνα από την θέση της σύνδεσης ως την κορυφή του πυλώνα. Τα δύο δακτυλιοειδή ελάσματα της σύνδεσης, ο πυλώνας, καθώς και οι κεφαλές των κοχλιών προσομοιώθηκαν με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, ενώ οι κορμοί των κοχλιών με στοιχεία δοκού. Οι επαφές ανάμεσα στα δακτυλιοειδή ελάσματα, μεταξύ της άντυγας του ελάσματος και του κορμού του κοχλία και της κεφαλής του κοχλία με το έλασμα λήφθηκαν υπόψη με κατάλληλα στοιχεία επαφής. Η ανάλυση πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Στην 1^η φάση επιβάλλεται η δύναμη προέντασης στους κοχλίες και τα ίδια βάρη της σύνδεσης. Τα ίδια βάρη περιλαμβάνουν εκτός από το ίδιο βάρος της σύνδεσης και του πυλώνα, ένα κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο ίσο με 390kN που αντιπροσωπεύει το βάρος του ρότορα, του μηχανολογικού εξοπλισμού και των πτερυγίων. Στην 2^η φάση επιβάλλονται οι χρονοϊστορίες των εντατικών μεγεθών στην κορυφή του πυλώνα, που αντιπροσωπεύουν τα φορτία λόγω ανέμου, μέσω δυναμικής ανάλυσης.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε έλεγχος σε κόπωση της υπό μελέτη σύνδεσης, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων, δηλαδή τις χρονοϊστορίες των αναπτυσσόμενων τάσεων

στην συγκόλληση και στους κοχλίες. Μέσω του συντελεστή συσσώρευσης βλάβης, προσδιορίστηκε η επάρκεια της σύνδεσης στην διάρκεια ενός έτους και ο υπολοιπόμενος χρόνος ζωής μέχρι την αστοχία λόγω κόπωσης.

6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα, σχετικά με τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης που μεταβάλλουν την αντοχή σε κόπωση και την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα, ο τύπος της συγκόλλησης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και μπορεί να μειώσει δραστικά τον χρόνο ζωής.

Η συγκόλληση των δακτυλιοειδών ελασμάτων της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας στον πυλώνα με 80% της πλήρους διείσδυσης να είναι εσωραφές αυξάνει κατακόρυφα τον εκτιμώμενο χρόνο ζωής της σύνδεσης, αντίθετα με την περίπτωση συγκόλλησης με εξωραφές. Στην 1^η περίπτωση η αστοχία της σύνδεσης από κόπωση αναμένεται σε 202 έτη, ενώ στην 2^η περίπτωση σε 8.7 μόλις έτη. Επίσης, πέρα από την μείωση του ορίου αντοχής της λεπτομέρειας της σύνδεσης, ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει έντονα την διάρκεια ζωής είναι η αύξηση του εύρους τάσεων, διότι αυξάνει δραστικά και τον αριθμό των κύκλων που υφίσταται η ανεμογεννήτρια.

Όσον αφορά τον έλεγχο των κοχλιών της σύνδεσης έναντι κόπωσης, παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη μίας μικρής σχετικά τιμής δύναμης προέντασης ήταν αρκετή ώστε να εξασφαλίσει άπειρη αντοχή του κοχλία σε κόπωση. Η ύπαρξη δηλαδή και μόνο της προέντασης είναι ευεργετική, διότι διατηρεί σταθερή την αξονική δύναμη των κοχλιών, για χαμηλές τιμές της ταχύτητας ανέμου και χαμηλές τιμές του εύρους τάσεων, για μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας ανέμου, κάτω από το όριο αποκοπής. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι κοχλίες της σύνδεσης είναι υπερδιαστασιοποιημένοι για συνήθεις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Σε γενικές γραμμές, το φαινόμενο που ευθύνεται για τον σχεδιασμό τόσο ισχυρών και δύσκαμπτων συνδέσεων είναι η κόπωση. Δεδομένου ότι η κυρίαρχη φόρτιση στην οποία υποβάλλονται τέτοιοι πυλώνες είναι οι ανεμοπιέσεις, η μεγάλη διακύμανση αυτών των φορτίων καθιστά το φαινόμενο της κόπωσης την κύρια παράμετρο που καθορίζει την αστοχία της κατασκευής. Πιθανότατα όμως να είναι σκόπιμη μία λεπτομερέστερη διερεύνηση των κοχλιών της σύνδεσης, προκειμένου να καταλήξουμε σε κάποιο λιγότερο αντιοικονομικό αποτέλεσμα.

6.3 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

Προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια των προσδιοριζόμενων χρονοϊστοριών τάσεων στη συγκόλληση μέσω των δυναμικών αναλύσεων, θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν στο αριθμητικό προσομοίωμα της σύνδεσης στοιχεία 3D solid για την προσομοίωση της συγκόλλησης και την ακτίνα καμπυλότητας. Πιθανόν, μία τέτοια προσέγγιση να μείωνε λίγο την τόσο δραστική επιρροή του τύπου της συγκόλλησης (εσωραφή ή εξωραφή).

Επιπλέον, θα μπορούσαν να διερευνηθούν στα μοντέλα και οι διάφοροι τύποι συγκόλλησης που υπάρχουν και να μελετηθεί πιθανή επιρροή στα αποτελέσματα. Έτσι, θα ήταν ακριβέστερος ο υπολογισμός των ορθών και διατμητικών τάσεων στην θέση αυτή, γεγονός το οποίο είναι χρήσιμο δεδομένου ότι έλεγχος κόπωσης πραγματοποιείται για τους κοχλίες και τη συγκόλληση.

Τέλος, θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθεί η πιθανότητα αύξησης της διατομής του πυλώνα και μείωσης της διαμέτρου των κοχλιών, προκειμένου να βελτιωθεί η συμπεριφορά της συγκόλλησης (στην περίπτωση της εξωραφής) και να επιτευχθούν λιγότερο αντιοικονομικά αποτελέσματα για τον κοχλία.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Erich Hau, "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics", 2nd edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [2] Burton T., Sharpe D., Jenkins N. and Bossanyi E. (2001), "Wind energy handbook" John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England.
- [3] Alain Nussbauner, Luis Borges and Laurence Davaine, "Fatigue design of steel and composite Structures", ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, 1st Edition, 2011.
- [4] "Guidelines for Design of Wind Turbines", 2nd Edition, Det Norske Veritas, Copenhagen (Wind.Turbine.Certification@dnv.com) and Wind Energy Department, Risø National Laboratory (Certification@risoe.dk), 2002.
- [5] EN 1993- 1- 9: 2003, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue, European Committee for Standardization, 2003.
- [6] IEC 61400- 1: 2005, Wind turbines – Part 1: Design Requirements, International standard, 3rd edition, 2005
- [7] National Renewable Energy Laboratory, NREL, <http://www.nrel.gov/>
- [8] National Wind Technology Center, NWTC, <http://www.nrel.gov/nwtc/>
- [9] NWTC Computer- Aided Engineering Tools (TurbSim by Neil Kelley, Bonnie Jonkman), <http://wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/turbsim/>, last modified 30- May- 2013; accessed 1- Nov.- 2013.
- [10] NWTC Computer- Aided Engineering Tools (AeroDyn by David J. Laino, Ph.D.), <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/aerodyn/>, last modified 23- Feb.- 2013; accessed 1- Nov.- 2013.
- [11] NWTC Computer- Aided Engineering Tools (FAST by Jason Jonkman, Ph.D.), <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast/>, last modified 28- Oct.- 2013; accessed 1- Nov.- 2013.
- [12] K.J. Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, 1982.

- [13] EN 1991-1-4: 2005, Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions, European Committee for Standardization, 2005.
- [14] FEMAP 101, Introduction to Femap with NX Nastran Student Guide, Version 10.1.1, Siemens PLM Software, 2010.
- [15] ADINA System 9.0, Release Notes ADINA R&D Inc, 71 Elton Avenue, Watertown, USA, 2013.
- [16] DIN 6914, High Strength hexagon head bolts, Deutsche Norm, 1989
- [17] C. Petersen, Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, Vieweg, 1993.
- [18] EN 1993-1-8: 2005, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, European Committee for Standardization, 2005.
- [19] Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι, Ιωαννίδης Γ, Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα, με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων, Εκδόσεις Κλειδάριθμος 2005.

