

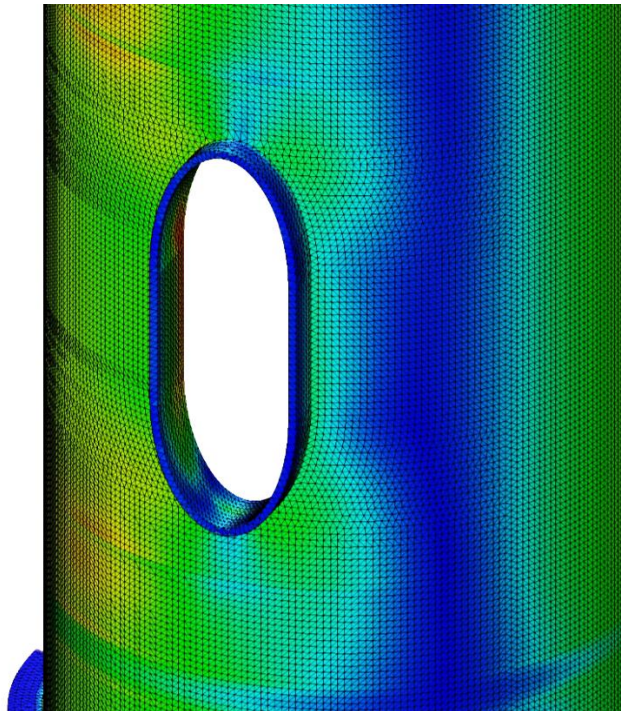


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ
ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ
ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



Διπλωματική Εργασία
Αδαμοπούλου Δήμητρα

ΕΜΚ ΔΕ 2019 20

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2019

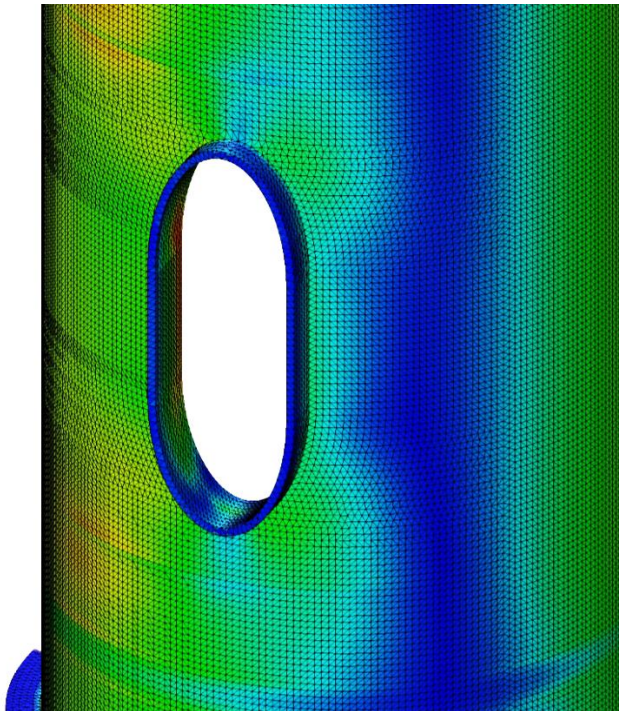


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ
ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ
ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



Διπλωματική Εργασία
Αδαμοπούλου Δήμητρα

ΕΜΚ ΔΕ 2019 20

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2019

Copyright © Αδαμοπούλου Δήμητρα, 2019
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 διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Adamopoulou Dimitra, 2019
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).

Αδαμοπούλου Δήμητρα (2019)
Διερεύνηση κόπωσης συγκολλητών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών μέσω αναλύσεων
πεπερασμένων στοιχείων
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2019 20
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Adamopoulou Dimitra (2019)
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2019 20
Fatigue investigation of wind turbine tower welded joints
through finite element analysis
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Χάρη Γαντέ αρχικώς για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και για την πλήρη καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια υλοποίησης της. Οι συμβουλές του από τα πρώτα στάδια της εργασίας μέχρι και την σύνταξη αυτής, καθώς και η ανεκτίμητη βοήθεια του στην επίλυση των προβλημάτων που εμφανίζονταν στην πορεία ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην υποψήφια διδάκτορα Κωνσταντίνα Κουλάτσου, για τις χρήσιμες πληροφορίες που μου παρείχε για την προς έλεγχο κατασκευή, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια της πάνω στο αντικείμενο της εργασίας και τις γνώσεις τις οποίες μου μετέδωσε.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2019 20

Διερεύνηση κόπωσης συγκολλητών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

Αδαμοπούλου Δήμητρα

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υ.Δ. Ε.Μ.Π
Νοέμβριος 2019

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην σημερινή εποχή, δεδομένης της συνεχώς μεγαλύτερης ζήτησης σε ενέργεια, η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας κερδίζει συνεχώς έδαφος μεταξύ των υπόλοιπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με την βελτίωση της τεχνολογίας παρατηρείται συνεχής αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών, τόσο ως προς το ύψος του πυλώνα όσο και ως προς το μήκος των πτερυγίων, προκειμένου να αξιοποιηθεί καλύτερα το αιολικό δυναμικό. Αποτέλεσμα είναι η αύξηση των φορτίων που καταπονούν την κατασκευή, και κυρίως των φορτίων που οφείλονται στον άνεμο, τα οποία λόγω της δυναμικής τους φύσης δημιουργούν την ανάγκη ελέγχου των συνδέσεων του πυλώνα της ανεμογεννήτριας σε κόπωση.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό κανονισμό EN 1993-1-9, της κόπωσης των συγκολλητών συνδέσεων γύρω από την οπή της ανθρωποθυρίδας του πυλώνα μιας τυπικής ανεμογεννήτριας μορφής κυλινδρικού κελύφους, ύψους περί τα 118m και διαμέτρου 4.30m.

Αρχικώς προσομοιώθηκε το κατώτερο τμήμα του πυλώνα, στο οποίο βρίσκεται και η οπή της ανθρωποθυρίδας, με μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για να γίνουν οι απαραίτητες αναλύσεις του φορέα. Για να είναι αποδοτικό το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε, τόσο από άποψη υπολογιστικού κόστους όσο και ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που παρέχει, χρειάστηκε μια διερεύνηση του είδους των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και της πυκνότητας του πλέγματος αυτών. Ακόμη, κρίθηκε σκόπιμη μια διερεύνηση της επιρροής που έχει στην συμπεριφορά του πυλώνα της ανεμογεννήτριας η διάνοιξη της οπής της ανθρωποθυρίδας, καθώς και του ποσοστού βελτίωσης που προσφέρει κάθε είδος ενίσχυσης στην τοπικά απομειωμένη αντοχή του κελύφους. Στην συνέχεια, έγινε εφαρμογή των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από την ανάλυση για τον έλεγχο κόπωσης των συγκολλητών συνδέσεων του υπό μελέτη τμήματος του πυλώνα. Τα εντατικά μεγέθη που ασκήθηκαν ήταν σε όρους καμπτικής ροπής, για ένα εύρος ροπών από 200kNm έως 88400kNm με βήμα 200kNm, αντιπροσωπευτικό των πραγματικών φορτίων που καταπονούν τον πυλώνα της κατασκευής.

Με βάση τις αναπτυσσόμενες τάσεις που προέκυψαν από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος των συγκολλήσεων σε κόπωση, μέσω της μεθόδου συσώρευσης βλάβης, για πλήθος κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης που αντιστοιχεί σε διάρκεια ζωής 25 ετών, και προσδιορίστηκε η κρισιμότερη θέση μεταξύ των συγκολλήσεων που μελετήθηκαν.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2019 20

Fatigue investigation of wind turbine tower welded joints through finite element analysis

Dimitra Adamopoulou

Supervisor: Professor Charis Gantes
Co-supervisor: Konstantina Koulatsou, PhD Candidate, NTUA
November 2019

ABSTRACT

Nowadays, given the ever-increasing demand for energy, the exploitation of wind energy is constantly gaining ground among other renewable resources. With the improvement of technology there is a continuous increase in the size of the wind turbine, both in the height of the wind turbine tower and in the length of the blades, in order to make the most of the wind potential. As a result, there is a significant increase in the design loads of the construction, especially the wind loads, which due to their dynamic nature require fatigue verification of the welded connections of the wind turbine tower.

The purpose of this thesis is the investigation, according to the European Regulation EN 1993-1-9, of the fatigue of welded joints around the manhole cut-out of a typical wind turbine tower, having the shape of a cylindrical shell with about 118m height and 4.30m diameter.

Firstly, the lower part of the wind turbine tower, where the manhole cut-out is located, was simulated with a finite element model to perform the necessary analysis of the structure. Aiming at the efficiency of the model, both in terms of computational cost and accuracy of the analysis results, the investigation of the type and density of the finite element mesh used in the simulation was carried out. In addition to that, the investigation of the influence that the manhole cut-out has in the behavior of the tower is deemed as of great significance, as well as the degree of improvement that the different types of stiffening provide for the upgrade of the reduced shell strength. Subsequently, the design forces obtained from the analysis for fatigue verification of the wind turbine welded joints were applied at the examined tower part. The design forces applied were in terms of bending moment, ranging from 200kNm to 88400kNm with a step of 200kNm, which represent the actual loads that are applied on the tower during its lifetime.

The fatigue verification of the welded joints was carried out based on the stresses that resulted from the finite element analysis via the damage accumulation factor for a number of cycles corresponding to 25 years of wind turbine lifetime. According to the damage accumulation factor the most critical position for fatigue crack development among the welded joints being investigated in this thesis was also determined.

Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Ιστορική Αναδρομή	1
1.2	Σήμερα.....	4
1.3	Είδη Ανεμογεννητριών.....	5
1.3.1	Ανεμογεννήτρια Οριζοντίου Άξονα.....	5
1.3.2	Ανεμογεννήτρια Κατακόρυφου Άξονα	7
1.4	Θεμελίωση Ανεμογεννήτριας	8
1.5	Βέλτιστη Παραγωγή Ενέργειας	9
1.6	Κόστος Μιας Ανεμογεννήτριας.....	10
2.	ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	13
2.1	Εξωτερικοί Παράγοντες Φόρτισης.....	13
2.1.1	Άνεμος.....	13
2.1.2	Θερμοκρασία	15
2.1.3	Πυκνότητα αέρα	15
2.1.4	Χιόνι, Βροχή, Πάγος	15
2.1.5	Σεισμός	15
2.2	Είδη φορτίων	16
2.2.1	Αδρανειακά και Βαρυτικά Φορτία.....	16
2.2.2	Αεροδυναμικά φορτία.....	16
2.3	Συνδυασμοί Φορτίσεων	18
2.4	Συντελεστές ασφαλείας	21
2.5	Έλεγχοι Σχεδιασμού	22
2.5.1	Πλαστικός Έλεγχος	22
2.5.2	Έλεγχος Ευστάθειας.....	23
2.5.3	Έλεγχος Κόπωσης.....	23
2.5.4	Έλεγχος Συντονισμού.....	23
3.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	25
3.1	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	25
3.1.1	Τμήματα Πυλών.....	26
3.1.2	Λεπτομέρεια ανθρωποθυρίδας	29
3.2	Υλικά κατασκευής	30
3.3	Φορτία Σχεδιασμού	31
4.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΕΑ.....	35
4.1	Τύπος προσομοίωσης	35
4.1.1	1 ^η μορφή προσομοίωσης	35
4.1.2	2 ^η μορφή προσομοίωσης	36
4.1.3	3 ^η μορφή προσομοίωσης	37

4.2	Επιλογή πλέγματος πεπερασμένων	38
4.3	Σύγκριση ιδιομορφών πυλώνα ανεμογεννήτριας – Έλεγχος συντονισμού	45
4.4	Τελικό προσομοίωμα	47
5.	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΠΗ ΤΗΣ ΑΝΘΡΩΠΟΘΥΡΙΔΑΣ.....	49
5.1	Αναγκαιότητα ύπαρξης ενισχυτικού κολάρου.....	49
5.1.1	Πλήρης διατομή κελύφους, χωρίς διάνοιξη οπής	51
5.1.2	Διατομή κελύφους με διάνοιξη οπής ανθρωποθυρίδας, αρχικού πάχους, χωρίς ενισχύσεις.....	51
5.1.3	Διατομή κελύφους με οπή ανθρωποθυρίδας και τοπική πάχυνση του πυλώνα	52
5.1.4	Διατομή του κελύφους με οπή ανθρωποθυρίδας και ενισχυτικό πλαίσιο συγκολλημένο περιμετρικά της οπής.....	53
5.1.5	Πραγματική διατομή, με πάχυνση του κελύφους και ενισχυτικό πλαίσιο.....	53
5.1.6.	Τοπική παραμόρφωση του φορέα - Σύγκριση	55
5.2	Μέθοδος υπολογισμού.....	56
5.2.1	Τελικό προσομοίωμα	56
5.2.2	Εφαρμογή των εντατικών μεγεθών	57
5.2.3	Επεξεργασία των αποτελεσμάτων	57
6.	ΚΟΠΩΣΗ.....	69
6.1	Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση	70
6.1.1	Το εύρος των τάσεων	70
6.1.2	Η γεωμετρία της κατασκευαστικής λεπτομέρειας.....	70
6.1.3	Τα χαρακτηριστικά του υλικού	70
6.1.4	Περιβαλλοντικές συνθήκες.....	71
6.2	Αντοχή σε κόπωση	71
6.2.1	Σταθερό εύρος τάσεων, Δσ.....	71
6.2.2	Μεταβλητό εύρος τάσεων κύκλων φόρτισης.....	72
6.2.3	Κατηγορίες ελέγχου	74
6.2.4	Μέθοδοι υπολογισμού αντοχής σε κόπωση	76
6.2.5	Επιρροή του πάχους της λεπτομέρειας.....	78
6.2.6	Υπολογισμός κύκλων αντοχής για κάθε εύρος τάσεων	79
6.2.7	Περιορισμοί εφαρμογής.....	79
6.3	Μέθοδος συσσωρευμένης βλάβης	80
7.	ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	87
7.1	Περίληψη	87
7.2	Συμπεράσματα.....	88
7.3	Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	89
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	91

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνεμος είναι μια αέρια μάζα, η οποία κινείται εξαιτίας των διαφορετικών βαρομετρικών πιέσεων που προκαλούνται κυρίως από την άνιση θέρμανση των διαφόρων περιοχών της γης από την ηλιακή ακτινοβολία. Η κίνηση αυτή του ανέμου, αποτελεί μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, και η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του πνέοντος ανέμου αποτελεί την αιολική ενέργεια. Το γεγονός ότι δεν παράγει ρύπους, αλλά και ότι η πρώτη ύλη είναι άφθονη και δωρεάν, την κάνουν μια ιδιαίτερα ανταγωνιστική μορφή ενέργειας, της οποίας η εκμετάλλευση είναι μια ιδιαίτερα ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής.

1.1 Ιστορική Αναδρομή

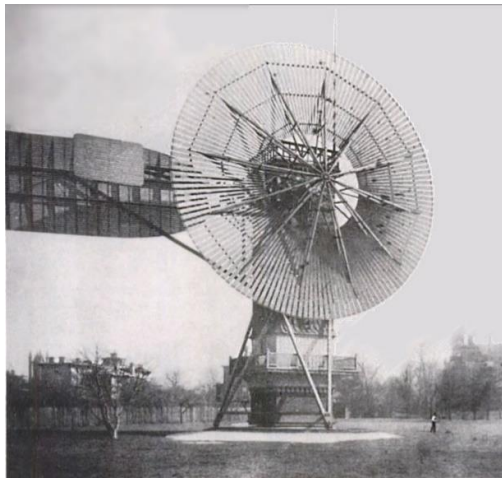
Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου από τον άνθρωπο αποτελεί μία πρακτική που βρίσκει τις ρίζες της στην αρχαιότητα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα πανιά στα ιστιοφόρα που χρησιμοποιούνταν ήδη από την αρχαιότητα για την κίνηση των πλοίων, καθώς και οι ανεμόμυλοι.

Συγκεκριμένα όμως, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η πρώτη ανεμογεννήτρια κατασκευάστηκε στην Σκωτία τον Ιούλιο του 1887 από τον καθηγητή James Blyth στο πανεπιστήμιο του Anderson. Είχε ύψος 10 μέτρων, και χρησιμοποιήθηκε για την φόρτιση μπαταριών, αλλά και για την φωταγώγηση του σπιτιού του, κρίθηκε όμως οικονομικά ασύμφορη. Λίγο αργότερα, μια μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια κατασκευάστηκε στο Cleveland, Ohio τον χειμώνα του 1887-1888 από τον Charles F. Brush. Αποτελούνταν από έναν ρότορα διαμέτρου 17 μέτρων, πυλώνα 18 μέτρων, και ισχύος 12 kW . Η μικρή παραγόμενη ισχύς οφειλόταν στο γεγονός ότι είχε 144 πτερύγια, συνεπώς η ταχύτητα περιστροφής της ήταν αρκετά μικρή.

Ο προκάτοχος όμως της σημερινής ανεμογεννήτριας θεωρείται ότι αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στην Δανία το 1891. Ο φυσικός Poul La Cour, αφού παροτρύνθηκε από την κυβέρνηση της Δανίας, η οποία έψαχνε για εναλλακτικούς τρόπους να εφοδιάσει τις αγροτικές περιοχές με ηλεκτρική ενέργεια, μαζί με μια ομάδα επιστημόνων κατασκεύασε μια πειραματική ανεμογεννήτρια με δυναμό. Το αξιοσημείωτο είναι ότι αντιμετώπισε την ίδια στιγμή και το

πρόβλημα της αποθήκευσης ενέργειας, καθώς χρησιμοποίησε το ρεύμα που παρήγαγε η ανεμογεννήτρια του και μέσω ηλεκτρόλυσης αποθήκευσε το υδρογόνο που παράγονταν, ιδιότητα που χρησιμοποιήθηκε αργότερα σε λάμπες αερίου οι οποίες ηλεκτροδότησαν το σχολείο στην πόλη του Askon. Μέχρι το 1908 είχαν κατασκευαστεί 72 γεννήτριες που αξιοποιούσαν την αιολική ενέργεια, ισχύος από 5 μέχρι 25 kW, σχεδιασμένες στο πρότυπο του La Cour, οι οποίες παρείχαν ενέργεια στις αγροτικές περιοχές. Οι μεγαλύτερες εξ αυτών είχαν πυλώνες 24 μέτρων, κα ρότορες τεσσάρων πτερυγίων, διαμέτρου 23 μέτρων.

Το 1931 κατασκευάστηκε η πρώτη ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα στις ΗΠΑ, ενώ την ίδια χρονιά κατασκευάστηκε ένας πρόδρομος της σημερινής ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα, η οποία ονομάστηκε WIDE D-30 στην Yalta με ύψος πυλώνα 32 μέτρων, είχε δε ισχύ 100 kW. Έχει αναφερθεί πως η ετήσια ικανότητα παραγωγής έφτανε το 32%, ποσοστό που δεν διαφέρει από τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες.



Σχήμα 1.1: Η πρώτη ανεμογεννήτρια του Charles F. Brush (Cleveland, Ohio) [1]

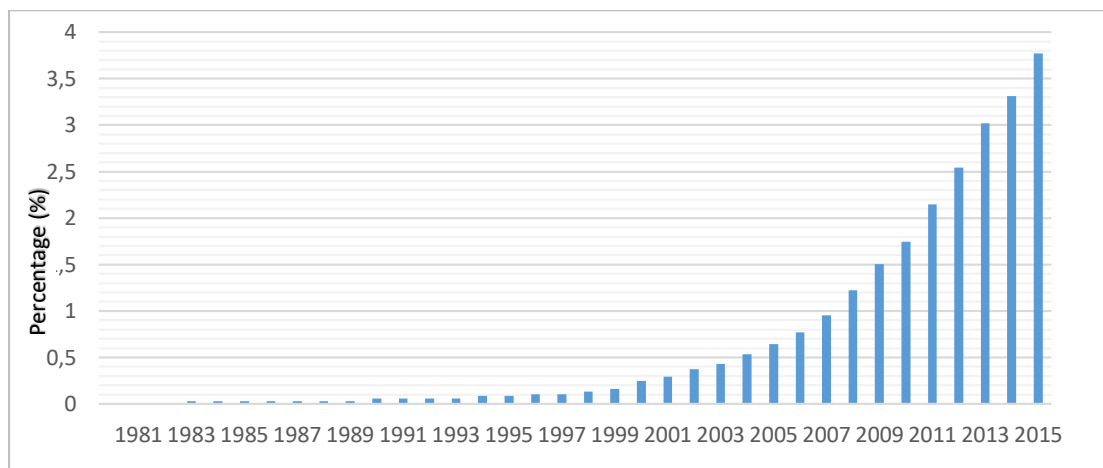


Σχήμα 1.2: Η ανεμογεννήτρια του Poul La Cour (Δανία, 1891) [2]



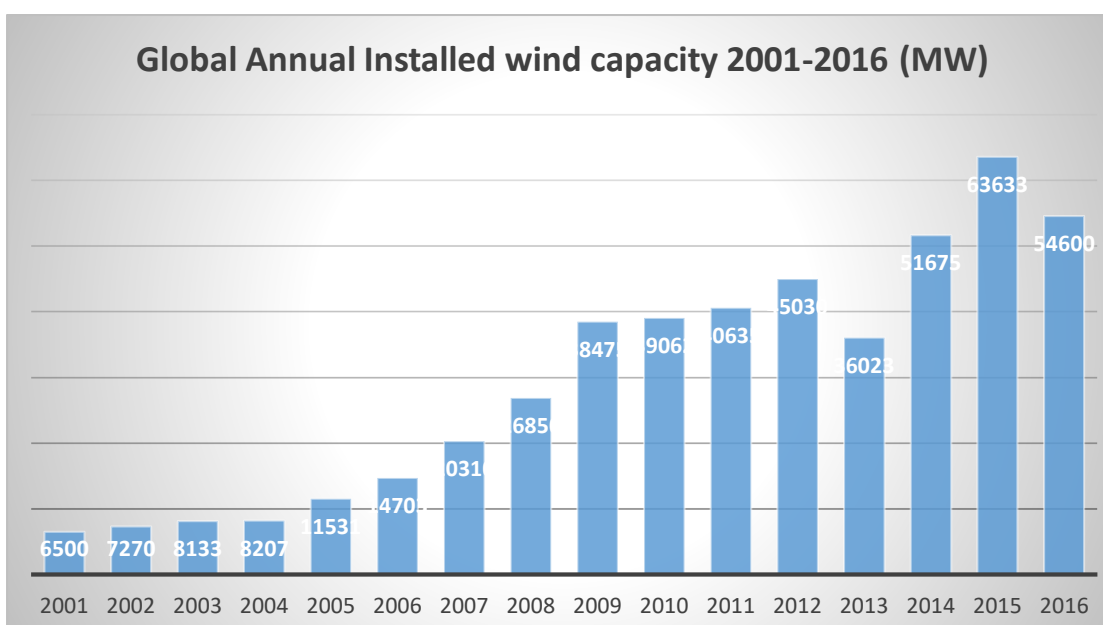
Σχήμα 1.3: Η ανεμογεννήτρια WIDE D-30 (Yalta, 1931) [2]

Στην συνέχεια, η κατασκευή των ανεμογεννητριών γνώρισε ραγδαία αύξηση, καθώς η τεχνογνωσία βελτιωνόταν και η μορφή των ανεμογεννητριών άλλαζε συνεχώς, πλησιάζοντας την σημερινή, για την βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας. Καθοριστικός παράγοντας για την στροφή στην αιολική ενέργεια αποτέλεσε η αύξηση της τιμής του πετρελαίου περί το 1973, καθώς και το γεγονός ότι τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι ανεξάντλητα και συνεπώς πρέπει να αξιοποιηθούν εναλλακτικοί τρόποι παραγωγής ενέργειας.

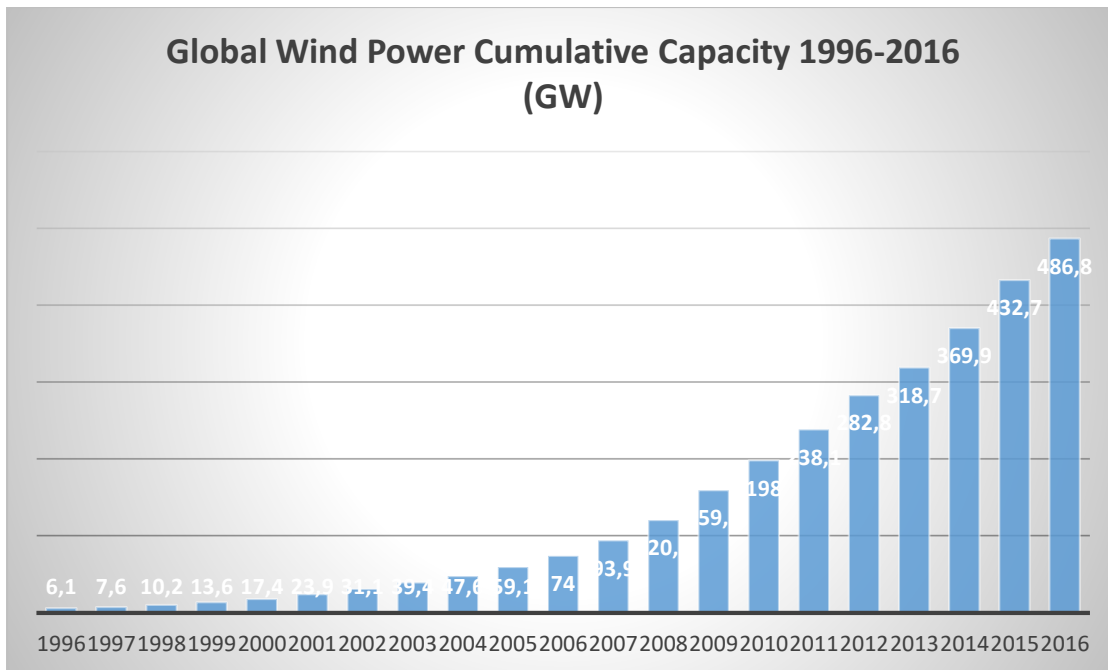


Σχήμα 1.4: Ποσοστό της συνολικής παραγόμενης ενέργειας προερχόμενη από αιολικά μέσα

Με την επιχορήγηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προώθηση της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή, και την θέσπιση πλαισίου στόχων-οδηγιών για τις επόμενες δεκαετίες, η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας αυξάνεται ραγδαία. Σε όρους εγκατεστημένης ισχύος, η ετήσια τιμή που εγκαταστάθηκε μόλις το 2015, ξεπερνά την συνολική ισχύ που ήταν εγκατεστημένη το 2005.



Σχήμα 1.5: Παγκόσμια ετήσια εγκατεστημένη ισχύς για τα έτη 2001-2016 σε MW (Δεδομένα: GWEC)



Σχήμα 1.6: Παγκόσμια συνολική εγκατεστημένη ισχύς για τα έτη 1996-2016 σε GW
(Δεδομένα: GWEC)

1.2 Σήμερα

Σήμερα, η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος, καθώς για την παραγωγή ενέργειας δεν αποδεδειγμένα υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως στις συμβατικές μεθόδους, και άρα οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον είναι μηδαμινές. Παράλληλα όμως αποτελούν και λύση στο πρόβλημα της αναμενόμενης εξάντλησης των μη ανανεώσιμων αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων. Τα τελευταία χρόνια, από την Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και από πολλά μεμονωμένα κράτη-μέλη, υιοθετούνται νέες πολιτικές για τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες προάγουν παρόμοιες εσωτερικές πολιτικές και για τα υπόλοιπα κράτη-μέλη. Συγκεκριμένα, η υφιστάμενη οδηγία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Οδηγία 2009/28/ΕΚ) ορίζει ότι το υποχρεωτικό μερίδιο 20% της κατανάλωσης ενέργειας στην ΕΕ πρέπει, έως το 2020, να καλύπτεται από ΑΠΕ. Στην συνέχεια, το 2018 η Ε.Ε. εξέδωσε την Οδηγία 2018/2001, δεσμευόμενη ότι στόχος της είναι, έως το 2030, το 32% της ενέργειας που καταναλώνεται στο έδαφος της, να προέρχεται από ΑΠΕ.

Μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η αιολική γνωρίζει την μεγαλύτερη ανάπτυξη στην εφαρμογή της, αφού αντιπροσωπεύει το 18,4% της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας παραγωγής ενέργειας της Ε.Ε. και το 14% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή την στιγμή, η Ευρώπη διαθέτει 189 Gigawatt δυναμικότητας αιολικής ενέργειας, εκ των οποίων τα 171 προέρχονται από χερσαία και τα 18 από υπεράκτια έργα.

Το 2016 το μερίδιο της αιολικής ενέργειας στην συνολική ποσότητα ενέργειας που παρήχθη από ΑΠΕ έφτασε το 31,8%, με τις Δανία, Ιρλανδία και Ηνωμένο Βασίλειο να ηγούνται στην παραγωγή. Συγκεκριμένα η Δανία κατάφερε να καλύπτει το 41% των αναγκών της καθαρά από αιολική ενέργεια, ποσοστό πολύ υψηλότερο από άλλες χώρες της Ε.Ε., και μάλιστα κατέχει το ρεκόρ για το μεγαλύτερο ποσοστό εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της παγκόσμια.

1.3 Είδη Ανεμογεννητριών

Ανεμογεννήτρια ονομάζεται ευρέως κάθε διάταξη, η οποία μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου που προσπίπτει στα πτερύγια της, σε ηλεκτρική. Ο κυριότερος διαχωρισμός των ανεμογεννητριών είναι ο άξονας στον οποίο γίνεται η περιστροφή τους, διακρίνοντάς τες σε οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα, με την πρώτη περίπτωση να είναι η πλέον διαδεδομένη.



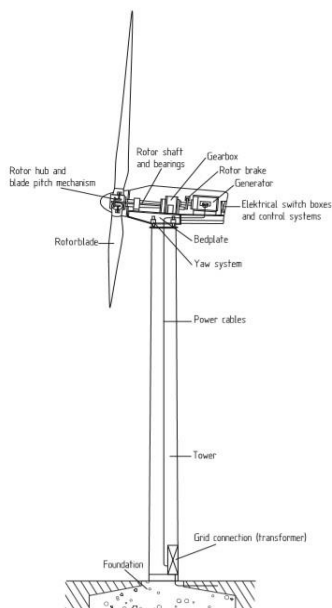
Σχήμα 1.7: Τυπικές ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων



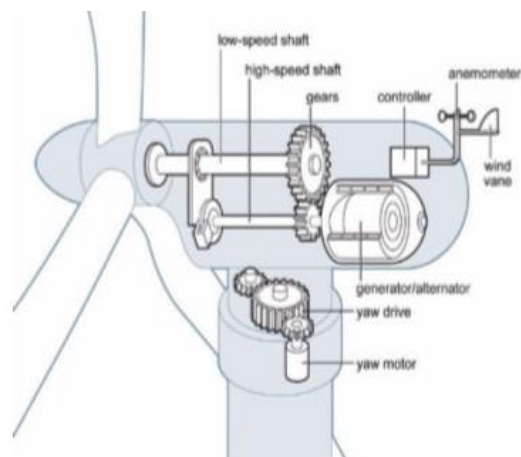
Σχήμα 1.8: Τυπική μορφή ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα

1.3.1 Ανεμογεννήτρια Οριζοντίου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν πτερύγια τα οποία περιστρέφονται σε άξονα οριζόντιο και παράλληλο ως προς το έδαφος. Ο άξονας έχει την κατεύθυνση του ανέμου και τα πτερύγια χρησιμοποιούν την άνωση για να περιστραφούν κάθετα στην διεύθυνση του.



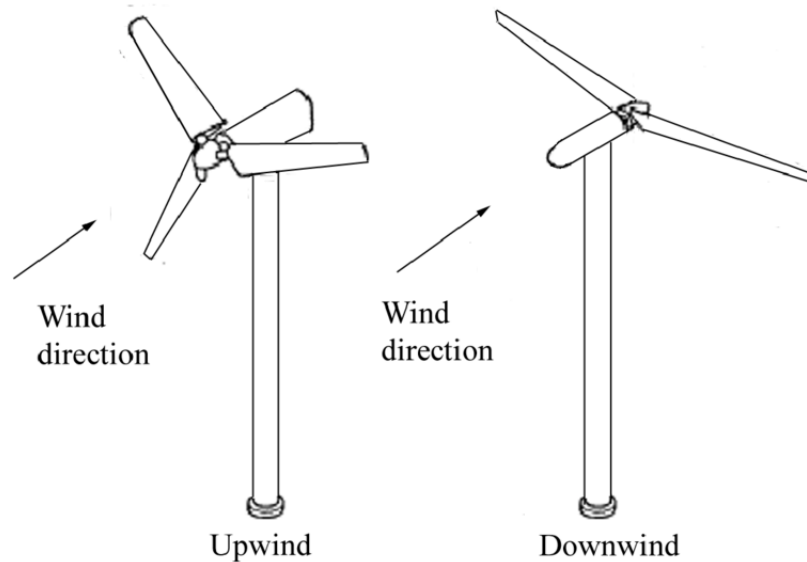
Σχήμα 1.9: Δομικά μέρη τυπικής ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα [2]



Σχήμα 1.10: Λεπτομέρεια μηχανισμού λειτουργίας ανεμογεννήτριας [3]

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μπορούν να έχουν οποιονδήποτε αριθμό πτερυγίων, προτιμάται όμως ο μικρός αριθμός αυτών, καθώς όσο περισσότερα τα πτερύγια, τόσο μεγαλύτερο το κόστος κατασκευής αλλά και μειωμένη η αποδοτικότητα αυτής. Συγκεκριμένα, συνηθέστερη είναι η ύπαρξη τριών πτερυγίων, καθώς οδηγεί ταυτόχρονα σε μέγιστη παραγωγή ενέργειας και κατασκευαστική ευστάθεια. Συγκρίνοντας την ανεμογεννήτρια των δύο με αυτή των τριών πτερυγίων, σαν τις δυο πιο διαδεδομένες, αυτή των τριών εμφανίζει λιγότερες κατασκευαστικές δυσκολίες. Ο ρότορας τριών πτερυγίων έχει σταθερή ροπή αδράνειας ως προς τον άξονα περιστροφής, ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό του. Αντίθετα, η περιστροφική ροπή αδράνειας του ρότορα δυο πτερυγίων είναι περιοδική (γίνεται μέγιστη στην οριζόντια θέση και ελάχιστη στην κατακόρυφη), και συνεπώς εμφανίζονται πιο έντονες εναλλαγές φόρτισης. Ταυτόχρονα, για ρότορα δύο πτερυγίων, η ανισοκατανομή των φορτίων του ανέμου όταν το ένα πτερύγιο βρίσκεται στην υψηλότερη και το άλλο στην κατώτερη θέση προκαλεί δυσμενείς εντάσεις στην κατασκευή. Παρ' όλα αυτά, τελευταία, οι δύο λεπίδες έχουν αρχίσει να διερευνώνται εκ νέου, καθώς το μικρότερο βάρος αυτών, αλλά και η μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση είναι παράγοντες αρκετά σημαντικοί για το κόστος παραγωγής. [4]

Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, μια βασική διάκριση είναι μεταξύ προσήνεμο και υπήνεμο δρομέα. Στον προσήνεμο, ο άνεμος προσπίπτει πρώτα στα πτερύγια και στην συνέχεια στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας, και αποτελεί την πιο συνηθισμένη μορφή ανεμογεννήτριας, χρειάζονται όμως έναν μηχανισμό περιστροφής ώστε ο άξονας του δρομέα να παραμένει ευθυγραμμισμένος με την κατεύθυνση του ανέμου.



Σχήμα 1.11: Ανεμογεννήτρια προσήνεμο και υπήνεμο προσανατολισμού πτερυγίων [5]

Ο υπήνεμος προσανατολισμός της ανεμογεννήτριας απ' την άλλη μεριά, ενώ δεν απαιτεί μηχανισμό περιστροφής του δρομέα, έχει το μειονέκτημα των εντονότερων εναλλαγών φόρτισης λόγω των φαινομένων τύρβης που εμφανίζονται, και άρα καταπονείται από πρόσθετα φορτία κόπωσης.

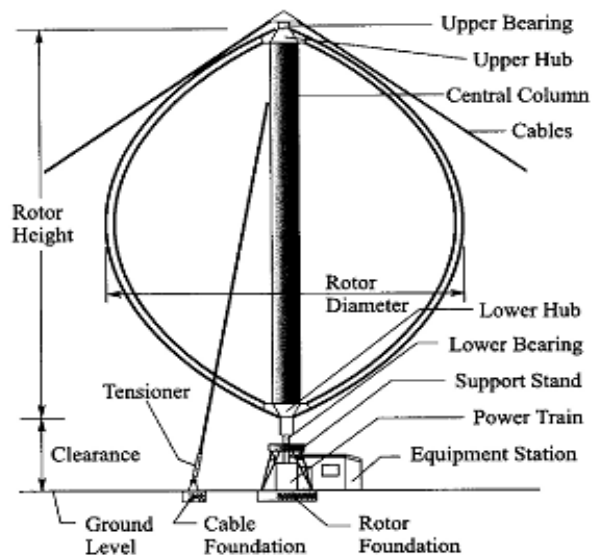
Πυλώνας Ανεμογεννήτριας

Ο πυλώνας μιας ανεμογεννήτριας είναι αυτός που υποστηρίζει την άτρακτο και τον ρότορα και αποτελεί μεγάλο μέρος του συνολικού κόστους της κατασκευής, για αυτό και συχνά γίνονται προσπάθειες βελτιστοποίησης της κατασκευής του, ώστε να μειωθεί το συνολικό κόστος. Σύνηθες υλικό κατασκευής του πυλώνα μεγάλων ανεμογεννητριών είναι ο χάλυβας, δεδομένου του μικρότερου βάρους της κατασκευής με την χρήση αυτού. Κυρίως έχουν σωληνοειδή μορφή, αποτελούμενοι από τμήματα 20-30 μέτρων, με κριτήριο τη δυνατότητα μεταφοράς και ανέγερσής τους, και με δακτυλιοειδή πέλματα (φλάντζες) στα δύο άκρα. Κάθε επιμέρους τμήμα μήκους 20-30m αποτελείται από ελάσματα, σταθερού πάχους κελύφους το καθένα, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 10-50mm. Τα ελάσματα αυτά, τα οποία έχουν πλάτος περί τα 2m το καθένα, τυλίγονται σε ένα κυκλικό σχήμα, και συγκολλώνται μεταξύ τους, δημιουργώντας κάθε διακριτό τμήμα του πυλώνα. Κατά την ανέγερση του πυλώνα, τα επιμέρους τμήματα κοχλιώνονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες, δεδομένου ότι είναι λιγότερο επιρρεπείς σε αστοχία λόγω κόπωσης. Πολλές φορές ο πυλώνας έχει κολουροκωνική μορφή, με την διάμετρο και το πάχος των επιμέρους τμημάτων να μικραίνει στα πιο ψηλά τμήματα του πυλώνα, για εξοικονόμηση υλικού όπου δεν είναι απαραίτητο. Οι σωληνοειδείς πυλώνες έχουν αρκετά πλεονεκτήματα τόσο όσον αφορά την απλότητα της κατασκευής, όσο και την ευκολία στην πρόσβαση για συντήρησή τους.

Πιο σπάνια είναι η κατασκευή δικτυωτών πυλώνων, πυλώνων σκυροδέματος, και αποτελούν εναλλακτική όταν παρουσιάζονται δυσκολίες στην μεταφορά των σωληνοειδών τμημάτων του χαλύβδινου πυλώνα λόγω του μεγέθους του.

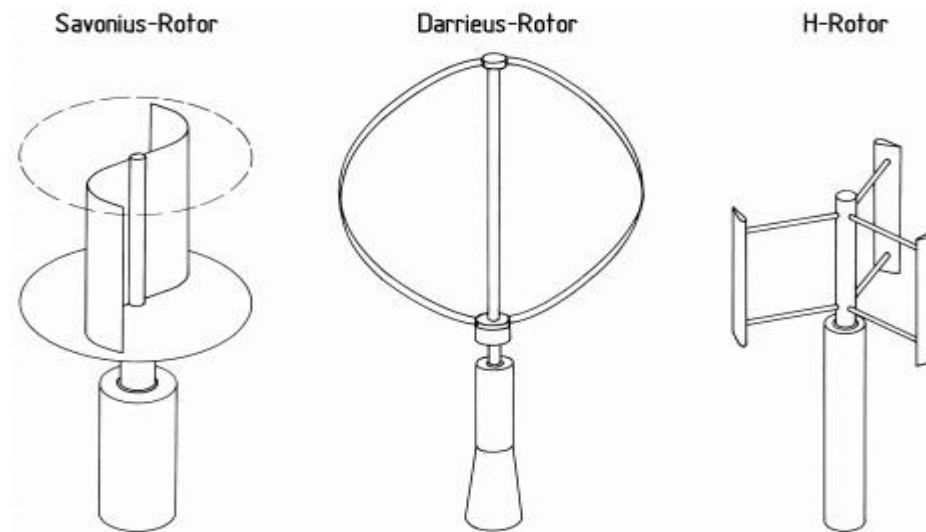
1.3.2 Ανεμογεννήτρια Κατακόρυφου Άξονα

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία ανεμογεννητριών, αν και όχι τόσο διαδεδομένη, είναι οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα. Σε αυτό το είδος ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια στρέφονται σε άξονα κάθετο στο επίπεδο του εδάφους. Ένα από τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν είναι το γεγονός ότι τα μηχανολογικά μέρη βρίσκονται στο έδαφος, και συνεπώς η πρόσβαση σε αυτά είναι εύκολη, ενώ ταυτόχρονα δεν χρειάζεται και κάποιος μηχανισμός εκτροπής.



Σχήμα 1.12: Χαρακτηριστικά μέρη ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα (www.researchgate.net)

Παρόλα αυτά, δεν προτιμάται σαν κατασκευή, καθώς έχει πολύ μικρότερη αποδοτικότητα απ' ό τι η ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, καθώς ο δρομέας είναι τοποθετημένος κοντά στο έδαφος, όπου οι ταχύτητες του ανέμου στις οποίες εκτίθεται είναι σχετικά μικρότερες.



Σχήμα 1.13: Διάφορα είδη ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα [2]

1.4 Θεμελίωση Ανεμογεννήτριας

Όλες οι δυνάμεις που εφαρμόζονται στην ανεμογεννήτρια, μεταφέρονται στην βάση της θεμελίωσης της, και αναλύονται σε μια οριζόντια δύναμη H , και μια κατακόρυφη V . Το σημείο που αυτές οι δύο δυνάμεις εφαρμόζονται στο έδαφος ονομάζεται LC , και είναι το κέντρο επιβολής του φορτίου. Αν το σημείο αυτό δεν ταυτίζεται με το γεωμετρικό κέντρο της θεμελίωσης, τότε εμφανίζεται μια εκκεντρότητα, σαν αποτέλεσμα των σημείων εφαρμογής των φορτίων. Οι χερσαίες ανεμογεννήτριες, συνήθως θεμελιώνονται είτε σε πλάκα θεμελίωσης, είτε με την χρήση πασσάλων. Κυρίαρχο κριτήριο για την επιλογή του είδους θεμελίωσης είναι οι συνθήκες του εδάφους στην περιοχή που θα κατασκευαστεί. Πλάκα θεμελίωσης επιλέγεται συνήθως όταν η ανώτερη στρώση εδάφους είναι αρκετά ανθεκτική ώστε να είναι σε θέση να υποστηρίξει τα φορτία της ανεμογεννήτριας, ενώ σε αντίθετη περίπτωση προτιμάται η χρήση πασσάλων, ώστε τα φορτία να μεταφερθούν σε κατώτερες στρώσεις εδάφους, που μπορούν να τα απορροφήσουν. Πάντα σε τέτοιες περιπτώσεις, πρέπει να ελέγχεται πόσο χαμηλά κάτω από την θεμελίωση βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας.

Γενικά, για την κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας, χρειάζεται να γίνουν διερευνήσεις τόσο γεωλογικής φύσης, ανάλογα τα δεδομένα και τις πληροφορίες που υπάρχουν για την περιοχή μελέτης, όσο και γεωφυσικής, και να διεξαχθούν γεωτεχνικές μελέτες. Η γεωτεχνική μελέτη απαιτεί τόσο την συλλογή δειγμάτων για αποστολή στο εργαστήριο, όσο και την επιτόπου εξέταση στην περιοχή μελέτης, και οι τρόποι με τους οποίους θα γίνει η διερεύνηση της αντοχής του εδάφους θα πρέπει να συνάδουν με τις γεωτεχνικές πρακτικές που εφαρμόζονται.



Σχήμα 1.14: Διαφορετικά είδη θεμελίωσης ανεμογεννητριών

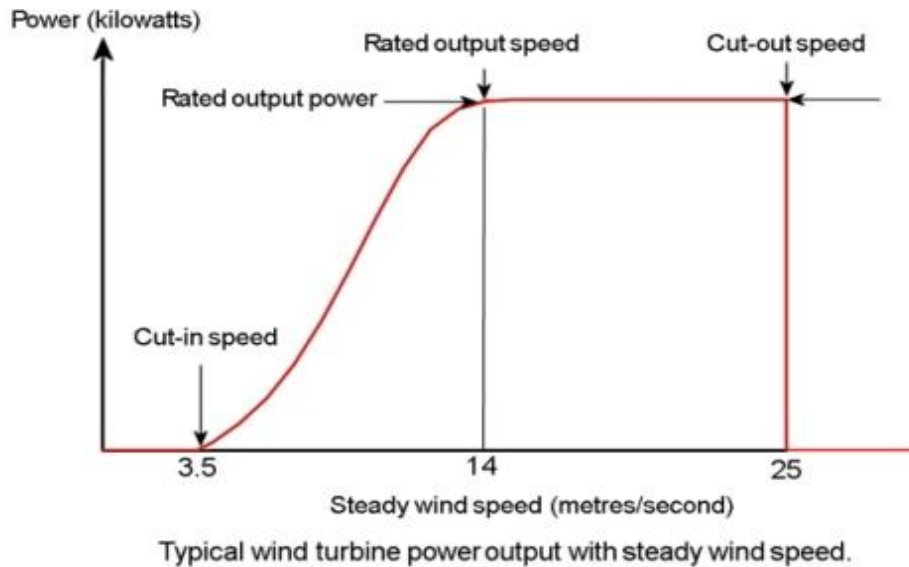
Η επιφανειακή θεμελίωση αποτελείται κυρίως από κυκλικά, ορθογωνικά ή πολυγωνικά πέδιλα. Για επιφανειακή θεμελίωση, πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στην εξέταση των επιφανειακών στρωμάτων εδάφους, και για βάθη τέτοια, ώστε να καλύπτουν κάθε πιθανή επιφάνεια αστοχίας.

Η θεμελίωση με πασσάλους αποτελείται από έναν ή περισσότερους πασσάλους που μεταβιβάζουν τα φορτία της κατασκευής στο έδαφος. Τα φορτία που εφαρμόζονται στην κεφαλή του πασσάλου μεταφέρονται και αναλαμβάνονται από το έδαφος, μέσω της αντίστασης πλευρικής τριβής και την αντίσταση αιχμής στην βάση του πασσάλου από το υποκείμενο έδαφος. Αυτού του είδους η θεμελίωση αποτελείται από μια πλάκα έδρασης που μεταβιβάζει τα φορτία της ανωδομής, και την ομάδα των πασσάλων που τα μεταφέρουν στο έδαφος. Αποτελεί το πιο συνηθισμένο είδος θεμελίωσης για αδύναμα εδάφη.

1.5 Βέλτιστη Παραγωγή Ενέργειας

Σκοπός των ανεμογεννητριών είναι η παραγωγή ενέργειας με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος. Συνεπώς, δεν είναι απαραίτητα ιδανικό να μεγιστοποιηθεί η ετήσια παραγωγή ενέργειας, αν αυτό συνεπάγεται ένα πολύ ακριβό μηχάνημα. Η πλειοψηφία αυτών είναι σχεδιασμένες να αποδίδουν μέγιστα για ανέμους ταχύτητας περί τα 15 m/s. Η κατασκευή ανεμογεννήτριας για μεγαλύτερης ταχύτητας ανέμους θα αύξανε σημαντικά το κόστος, χωρίς ταυτόχρονα να αυξάνει εξίσου την παραγωγή, καθώς ισχυρότεροι άνεμοι είναι κατά κανόνα πιο σπάνιοι. Παρ' όλα αυτά, όταν πρόκειται για ισχυρότερους ανέμους, είναι απαραίτητος ενός είδους έλεγχος της ισχύος της, για να αποφευχθεί κάποια καταστροφή στον μηχανολογικό εξοπλισμό.

Ταυτόχρονα, η ανεμογεννήτρια έχει και μια ταχύτητα – σημείο έναρξης, στην οποία ξεκινά να παράγει ενέργεια. Έτσι, η λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας οριοθετείται, απ' την ταχύτητα του ανέμου στην οποία ξεκινά να παράγει ενέργεια, και την ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια κλείνει, ώστε να αποφευχθεί κάποια πιθανή βλάβη.

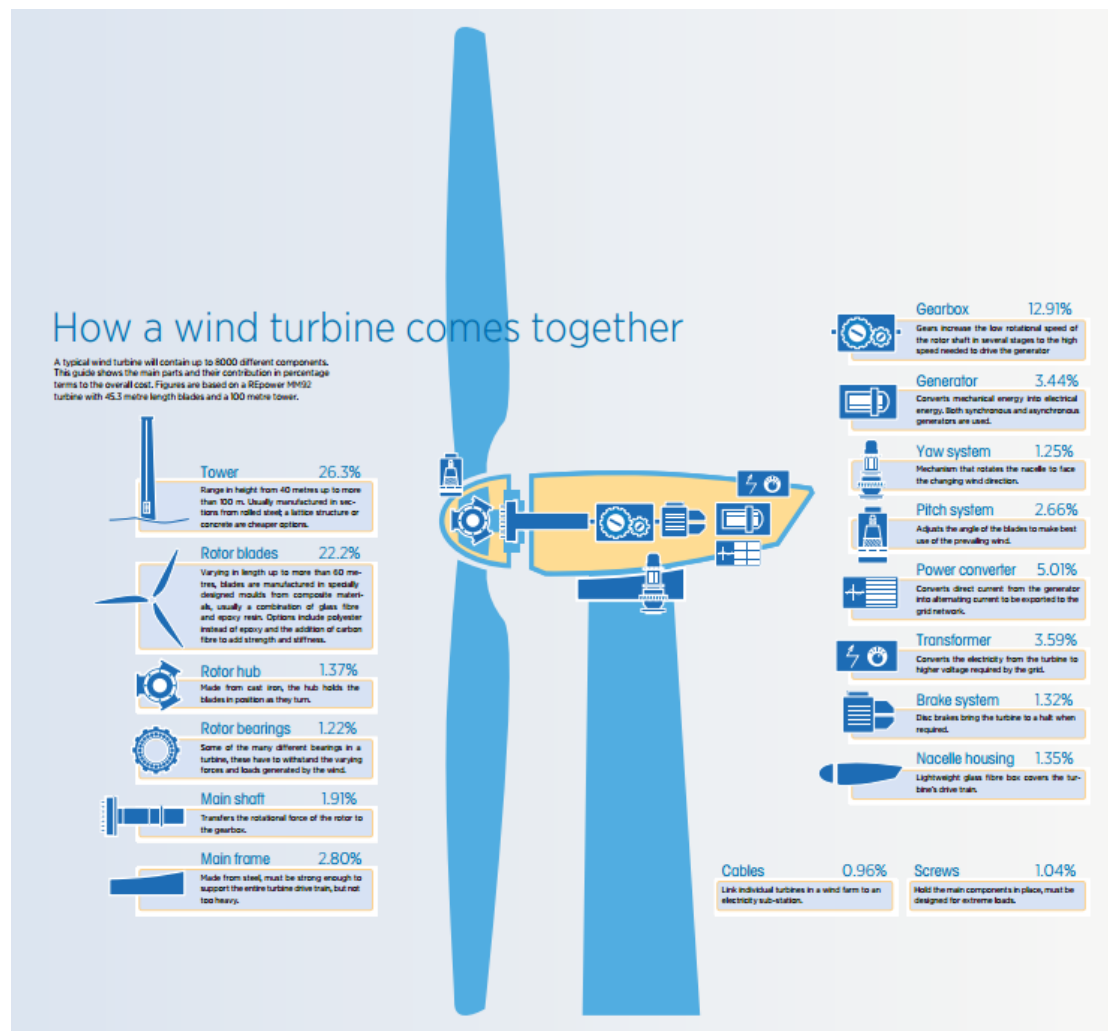


Σχήμα 1.15: Καμπύλη παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας με χαρακτηριστικά σημεία ταχύτητας ανέμου για εκκίνηση και διακοπή της λειτουργίας της (www.wind-power-program.com)

Η βέλτιστη ισχύς της ανεμογεννήτριας συνεπώς λαμβάνει υπόψιν την μέγιστη αποδοτικότητα της, με ταυτόχρονα το μικρότερο κόστος κατασκευής και λειτουργίας, και δίνεται απ' τον κατασκευαστή της. Για τον λόγο αυτό, κάθε ανεμογεννήτρια ακολουθείται από την καμπύλη παραγωγής ενέργειας που την αντιπροσωπεύει, η οποία δίνει την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος της ως συνάρτηση της ταχύτητας ανέμου και υπολογίζεται πειραματικά

1.6 Κόστος Μιας Ανεμογεννήτριας

Όταν αναφερόμαστε στο συνολικό κόστος μιας ανεμογεννήτριας, περιλαμβάνονται τόσο τα σταθερά κόστη (του μηχανολογικού εξοπλισμού, του πυλώνα κτλ.) και της εγκατάστασης αυτών, όσο και τα κόστη του επενδυτικού κεφαλαίου και της ίδιας της λειτουργίας και συντήρησης της κατασκευής καθ' όλη την διάρκεια ζωής της. Τα αρχικά κόστη του εξοπλισμού, της θεμελίωσης και της εγκατάστασης αυτών φτάνουν περίπου στο 75% του συνολικού κόστους μιας ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 1.16: Τυπικά κόστη μιας ανεμογεννήτριας αναλυμένα στα συστατικά της μέρη [6]

Μια τυπική ανεμογεννήτρια έχει μέσο προσδόκιμο ζωής τα 20-30 χρόνια, όμως είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι τα 7-10 χρόνια ορίζονται ως η μέση περίοδος αποπληρωμής του αρχικού κεφαλαίου. Όσο περισσότερο λειτουργεί η ανεμογεννήτρια μετά από αυτό, τόσο επικερδέστερη είναι η επένδυση.

2. ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

2.1 Εξωτερικοί Παράγοντες Φόρτισης

2.1.1 Άνεμος

Ο άνεμος αποτελεί την κυρίαρχη εξωτερική φόρτιση η οποία λαμβάνεται υπόψιν για τον σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας, αφού προκαλεί εντάσεις φορτίζοντας την αλλά ταυτόχρονα επηρεάζει και την λειτουργία της. Αντιπροσωπεύεται από την μέση ταχύτητα αναφοράς των 10 λεπτών, U_{10} , του ανέμου που δρα σε μια περιοχή, την τυπική απόκλιση σ_u αυτής, καθώς και την ένταση τύρβης του ανέμου της περιοχής. Η μέση ταχύτητα των 10 λεπτών μεταβάλλεται μεταξύ 10 λεπτών περιόδων, η μεταβολή της οποίας μπορεί να παρασταθεί από μια συνάρτηση πιθανοτικής κατανομής. Η κατανομή της μέσης ταχύτητας αναφοράς μπορεί για τις περισσότερες περιοχές να προσομοιωθεί από μια κατανομή Weibull της μορφής

$$F_{U_{10}}(u) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right) \quad (2.1)$$

Όπου

k : Συντελεστής σχήματος

A : μεταβλητή που εξαρτάται από το ύψος της ανεμογεννήτριας και τις τοπογραφικές συνθήκες

Η μεταβλητή A σε ύψος z μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$A = A_H \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{H}{z_0}} \quad (2.2)$$

Όπου A_H είναι η παράμετρος A σε ένα συγκεκριμένο ύψος αναφοράς, H το οποίο συνήθως είναι ίσο με 10m, και z_0 η παράμετρος τραχύτητας στο επίπεδο του εδάφους. Ένα ομογενές έδαφος χαρακτηρίζεται από έναν ενιαίο συντελεστή z_0 .

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές παραμέτρου z_0 για διάφορες φυσικές επιφάνειες [7]

Τύπος εδάφους	Παράμετρος τραχύτητας z_0 (m)
Πάγος	0.00001
Υδάτινη επιφάνεια χωρίς κυματισμούς	0.0001
Υδάτινη επιφάνεια με κυματισμούς	0.0001 - 0.003
Ακτές	0.001
Ύψαιθρος χωρίς υψηλή βλάστηση	0.01
Καλλιεργημένο έδαφος με διάσπαρτα κτίρια	0.05
Δασικές περιοχές	0.3
Πόλεις	1 - 10

Η ένταση τύρβης δίνεται από την σχέση :

$$I_\tau = \frac{\sigma_u}{U_{10}} \quad (2.3)$$

Όπου U_{10} : η μέση τιμή αναφοράς της ταχύτητας του ανέμου των 10 λεπτών

σ_u : η τυπική απόκλιση της U_{10}

Ένας βασικός διαχωρισμός των ανεμογεννητριών σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-1, κατηγοριοποιεί τις ανεμογεννήτριες σύμφωνα με την μέση ταχύτητα αναφοράς του ανέμου, διάρκειας 10 λεπτών, καθώς και την ένταση τύρβης της του ανέμου της περιοχής διερεύνησης. Σκοπός αυτού του διαχωρισμού δεν είναι η περιγραφή με ακρίβεια των συνθηκών που εμφανίζονται σε κάποια περιοχή, αλλά να γίνει τέτοια η προσομοίωση, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε περιοχή, αφού έχει μεγάλο εύρος ισχύος.

Πίνακας 2.2: Κατηγορίες ανεμογεννήτριας σύμφωνα με χαρακτηριστικά ροής ανέμου

Wind turbine class	I	II	III
Vref (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 στο ανώτερο σημείο του πυλώνα, όπου

V_{ref} : η μέση ταχύτητα αναφοράς του ανέμου, διάρκειας 10 λεπτών

I_{ref} : η αναμενόμενη ένταση τύρβης για $V_{ref} = 15$ m/s

Οι κατηγορίες A, B, C αναφέρονται στην ένταση τύρβης του ανέμου, όπου η κατηγορία A αναφέρεται σε υψηλά χαρακτηριστικά τύρβης, και οι B, C σε πιο χαμηλά. Αντίστοιχα, οι

κατηγορίες I, II, III διαχωρίζουν την κατηγορία της ανεμογεννήτριας, ανάλογα με την μέση ταχύτητα αναφοράς του ανέμου.

Ακραίες συνθήκες ανέμου υπολογίζονται συνήθως με την μέση ταχύτητα αναφοράς των 10 λεπτών, U_{10} , η οποία έχει προβλεφθεί για περίοδο επαναφοράς τα 50 χρόνια.

2.1.2 Θερμοκρασία

Κατά την κατασκευή της ανεμογεννήτριας επιλέγεται ένα εύρος θερμοκρασιών, στις οποίες λειτουργεί κανονικά. Αυτό το εύρος πρέπει πάντα να διαλέγεται με βάση τις προβλεπόμενες συστάσεις για τα επιμέρους υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της ανεμογεννήτριας. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να δοθεί σημασία:

- Στις συνδέσεις που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά, τα οποία έχουν διαφορετικές σταθερές συστολής.
- Στην επιλογή υγρών για την λειτουργία των υδραυλικών συστημάτων.
- Στα υλικά, των οποίων οι μηχανικές ιδιότητες αλλάζουν με την αλλαγή της θερμοκρασίας.

Για κατασκευαστικά μέρη, τα οποία σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας μπορεί να καταστραφούν, πρέπει κατά την κατασκευή να λαμβάνονται υπόψη οι υψηλότερες και οι κατώτερες θερμοκρασίες που είναι δυνατό να αναπτυχθούν στην περιοχή μελέτης, καθώς και η περίοδος επαναφοράς αυτών.

2.1.3 Πυκνότητα αέρα

Η πυκνότητα του αέρα εξαρτάται τόσο από την θερμοκρασία, όσο και από την ατμοσφαιρική πίεση. Υψηλές ταχύτητες ανέμου συνήθως λαμβάνουν χώρα σε χαμηλές πιέσεις, για τις οποίες η πυκνότητα του αέρα λαμβάνει συνήθως χαμηλότερες τιμές. Επίσης, σε αρκτικές περιοχές η πυκνότητα του αέρα είναι υψηλή, σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στις τροπικές περιοχές.

2.1.4 Χιόνι, Βροχή, Πάγος

Οι καιρικές συνθήκες στην περιοχή μελέτης για την κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας παίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό. Σε περιοχές με ισχυρές βροχοπτώσεις πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πιθανή δυσλειτουργία ορισμένων μελών της κατασκευής λόγω του νερού. Όταν μάλιστα μελετάται σενάριο χαλαζόπτωσης, σε πολλές περιπτώσεις είναι καθοριστική παράμετρος για τον σχεδιασμό των άκρων των πτερυγίων.

Η πιθανότητα συγκέντρωσης χιονιού στην ανεμογεννήτρια δημιουργεί ένα πρόσθετο βάρος που εφαρμόζεται στην κατασκευή, το οποίο δεν μπορεί να αγνοηθεί στην μελέτη.

2.1.5 Σεισμός

Σε σεισμογενείς περιοχές όπου η ανεμογεννήτρια κρίνεται ότι θα επηρεαστεί από πιθανό σεισμό, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά του εδάφους στον βαθμό που αυτά επηρεάζουν την κίνηση του, τόσο για τον σεισμό σχεδιασμού (10% πιθανότητα υπέρβασης στα 50 έτη) όσο και για τον σεισμό με περίοδο επαναφοράς τα 2500 έτη (2% πιθανότητα υπέρβασης στα 50 έτη).

Για την σεισμική ανάλυση μιας ανεμογεννήτριας, είναι σκόπιμο να αναλυθεί σε 3 διευθύνσεις, μια κατακόρυφη και δύο οριζόντιες. Η κατακόρυφη επιτάχυνση είναι πιθανό να οδηγήσει σε λυγισμό του πυλώνα. Στην ανάλυση για επιτάχυνση στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, η ανεμογεννήτρια μπορεί να αναπαρασταθεί σαν μια συγκεντρωμένη μάζα στην κορυφή του πυλώνα και το φάσμα απόκρισης να χρησιμοποιηθεί απευθείας για να προσδιοριστούν τα οριζόντια φορτία λόγω της κίνησης του εδάφους. Για μια τυπική ανεμογεννήτρια, η συγκεντρωμένη μάζα αποτελείται από την μάζα της ατράκτου, την μάζα του δρομέα και το 1/4 της μάζας του πυλώνα.

2.2 Είδη φορτίων

Η κυρίαρχη εξωτερική φόρτιση που δρα σε μια ανεμογεννήτρια είναι ο άνεμος. Λόγω του ότι η κατασκευή αποτελείται από λεπτά λωριδωτά μέλη, όπως ο πυλώνας και οι λεπίδες, παράγονται αδρανειακά φορτία σε αυτά. Πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη τα φορτία που οφείλονται στη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Έτσι, συνολικά τα σημαντικότερα φορτία που επιδρούν σε μια ανεμογεννήτρια είναι:

- Αεροδυναμικά φορτία των πτερυγίων και του πυλώνα
- Βαρυτικά φορτία λεπίδων, πυλώνα και ατράκτου
- Φυγόκεντρη δύναμη και επιτάχυνση Coriolis λόγω της περιστροφής του ρότορα
- Γυροσκοπικά φορτία λόγω της περιστροφής

2.2.1 Αδρανειακά και Βαρυτικά Φορτία

Τα αδρανειακά και τα βαρυτικά φορτία εξαρτώνται από την μάζα της κατασκευής. Η φυγόκεντρη δύναμη της διατομής, F_c , εξαρτάται από την γωνιακή ταχύτητα του ρότορα, την ακτινική θέση και την μάζα κάθε στοιχειώδους τμήματος του πτερυγίου. Στην βάση του πτερυγίου, αυτή η δύναμη είναι:

$$F_c = \sum_{i=1}^n m_i r_i \omega^2 \quad (2.4)$$

Στην οποία:

m_i (kg) η μάζα του i στοιχειώδους τμήματος του πτερυγίου

ω (rad/s) η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα

r_i η ακτινική απόσταση του i τμήματος του πτερυγίου, για χωρισμό του πτερυγίου σε n στοιχειώδη τμήματα.

Αντίστοιχα, η βαρυτική δύναμη προκύπτει από το ίδιο βάρος του πυλώνα των επιμέρους εξαρτημάτων στον κορυφή αυτού, το οποίο δρα έκκεντρα ως προς τον άξονα του πυλώνα.

2.2.2 Αεροδυναμικά φορτία

A) Πτερύγια

Ο προσδιορισμός των πραγματικών αεροδυναμικών φορτίων γύρω από τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας είναι αρκετά πολύπλοκος, καθώς η περιστροφή του ρότορα εισάγει νέες ταχύτητες. Συνεπώς είναι συνηθισμένο για τον υπολογισμό αυτών να χρησιμοποιούνται απλοποιητικές μέθοδοι, καθώς ένας πιο ακριβής προσδιορισμός θα απαιτούσε χρήση προγραμμάτων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Η ταχύτητα εισροής του ανέμου κάθετα στον άξονα του δρομέα, V_0 , όταν ο άνεμος διέρχεται από τον άξονα αυτού, μειώνεται κατά ένα ποσοστό αV_0 λόγω της παρεμβολής του δρομέα. Ο ρότορας περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω . Συνεπώς, ένα στοιχειώδες τμήμα του πτερυγίου το οποίο βρίσκεται σε απόσταση r από τον άξονα του ρότορα θα κινείται με ταχύτητα ωr στο επίπεδο του. Όταν ο άνεμος διέρχεται από το επίπεδο του δρομέα και αλληλοεπιδρά με το κινούμενο πτερύγιο, εισάγεται μια εφαιπτομενική ταχύτητα $\alpha' \omega r$. Έτσι, η σχετική ταχύτητα που θα αναπτύξει ο ρότορας, W , έχει την φορά του σχήματος 2.1, και δημιουργεί αεροδυναμικές φορτίσεις στο πτερύγιο:

Ανωστική δύναμη:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot c \cdot W^2 \quad (2.5)$$

Οπισθέλκουσα δύναμη:

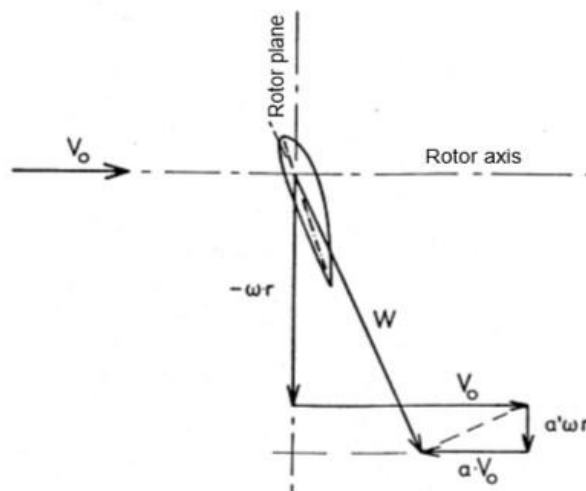
$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot c \cdot W^2 \quad (2.6)$$

Όπου C_L : σταθερά άνωσης

C_D : σταθερά οπισθέλκουσας

ρ : πυκνότητα αέρα

c : μήκος πτερυγίου



Σχήμα 2.1 : Σχεδιάγραμμα συνιστωσών ταχύτητας ανέμου κατά την περιστροφή των πτερυγίων [7]

B) Πυλώνας

Η αεροδυναμική αντίσταση του πυλώνα και της ατράκτου μπορούν να υπολογιστούν και είναι ανάλογα της προβολής της επιφάνειας κάθετα στην ροή του ανέμου. Έτσι, η F_D υπολογίζεται από τον τύπο

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_0^2 \cdot C_D \quad (2.7)$$

Όπου C_D : η σταθερά αντίστασης

A : το εμβαδόν της προβολής της επιφάνειας σε επίπεδο κάθετο στην ροή του ανέμου

2.3 Συνδυασμοί Φορτίσεων

Μια ανεμογεννήτρια πρέπει να αναλυθεί για διάφορους συνδυασμούς φορτίσεων στους οποίους πιθανόν θα υποβληθεί κατά την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής της. Ένας πρωταρχικός σκοπός είναι να επιβεβαιωθεί ότι η ανεμογεννήτρια μπορεί να αντέξει τα διάφορα φορτία με ένα επαρκές περιθώριο ασφαλείας. Αυτή η διαδικασία έχει συστηματοποιηθεί αναλύοντας την ανεμογεννήτρια σύμφωνα με ένα πλήθος συνδυασμών φορτίσεων.

Τα διαφορετικά σενάρια φόρτισης δημιουργούνται συνδυάζοντας σχετιζόμενα σενάρια εφαρμογής εξωτερικών φορτίων. Κυρίως τα σενάρια αυτά αποτελούν πραγματικές φορτίσεις της ανεμογεννήτριας κατά την διάρκεια λειτουργίας της.

Τα διαφορετικά σενάρια φόρτισης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, κατά την φάση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και τις παροδικές φορτίσεις.

Κατά την φάση λειτουργίας περιλαμβάνονται :

- Η φάση της κανονικής λειτουργίας και παραγωγής ενέργειας
- Η αρχή της λειτουργίας και η διακοπή αυτής, καθώς και η περίοδος που δεν λειτουργεί

Τα προσωρινά σενάρια αποτελούν :

- Η μεταφορά της ανεμογεννήτριας
- Η εγκατάσταση της
- Τυχόν ελαττώματα, πχ στο σύστημα ελέγχου
- Συντήρηση και επισκευή
- Δοκιμαστική λειτουργία

Ένα ελάχιστο προτεινόμενο πλήθος συνδυασμών φόρτισης αποτελείται από:

- Κανονική λειτουργία και κανονικές εξωτερικές συνθήκες
- Κανονική λειτουργία και ακραίες εξωτερικές συνθήκες
- Ελαττώματα στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας και κατάλληλα επιλεγμένες εξωτερικές φόρτισης (πχ ακραίες εξωτερικές συνθήκες)
- Μεταφορά, εγκατάσταση και συντήρηση ταυτόχρονα με επιλεγμένες εξωτερικές συνθήκες.

Αναλυτικά, τα διαφορετικά σενάρια φόρτισης και το είδος του ελέγχου που απαιτείται για κάθε ένα από αυτά για μια τυπική ανεμογεννήτρια κατά DS472 και IEC61400-1 εμφανίζονται στους πίνακες (2.3) και (2.4) αντίστοιχα.

Πίνακας 2.3: Σενάρια φόρτισης κατά DS472 [7]

Load case type	Design situation	Wind condition	Limit state		
			Fatigue	Ultimate	Accident
Normal	Power production	Normal	X	X	
	Start and switch	Normal	X	X	
	Stop and idling	Normal	X	X	
	Standstill and idling	Normal	X		
Extraordinary	Power production	Extreme stationary wind with $U_{10} = v_{10min,50yr}$	(X)	X	
	Power production	Transient wind conditions for direction change 0-90° and wind speed change 10-25m/sec in 30min	(X)	X	
	Transport, assembly and erection	Largest allowable U_{10} to be specified		X	
	Manual operation of wind turbine	To be defined according to relevance	X	X	
	Emergency stop	1.3 cut-out wind speed	X	X	
	Activation of air brakes	1.3 cut-out wind speed	X	X	
	Idling at yaw error	$0.5v_{10,min,50yr}$	X	X	
	Fault conditions	Normal	X	X	
Accidental	Serious failure	Cut- out wind speed	(X)		X
<ul style="list-style-type: none"> • X to be included • (X) to be included unless it can be established as unnecessary for the current design of the wind turbine 					

Πίνακας 2.4: Σενάρια φόρτισης κατά IEC61400-1 [7]

Design situation	Wind condition	Other conditions	Type of analysis
Power production	Normal turbulence		Ultimate
	Normal turbulence		Fatigue
	Extreme coherent gust with direction change		Ultimate
	Normal wind profile	External electrical fault	Ultimate
	Extreme operating gust, one-year recurrence period	Loss of electrical connection	Ultimate
	Extreme operating gust, fifty-year recurrence period		Ultimate
	Extreme wind shear		Ultimate
	Extreme direction change, fifty-year recurrence period		Ultimate
	Extreme coherent period		Ultimate
Power production plus occurrence of fault	Normal wind profile	Control system fault	Ultimate
	Normal wind profile	Protection system fault or preceding internal electrical fault	Ultimate
	Normal turbulence	Control or protection system fault	Fatigue
Start - up	Normal wind profile		Fatigue
	Extreme operating gust, one-year recurrence period		Ultimate
	Extreme direction change, one-year recurrence period		Ultimate
Normal shutdown	Normal wind profile		Fatigue
	Extreme operating gust, one-year recurrence period		Ultimate
Emergency shutdown	Normal wind profile		Ultimate
Parked (standing still or idling)	Extreme wind speed, fifty-year recurrence period	Possible loss of electric power network	Ultimate
	Normal turbulence		Fatigue
Parked and fault conditions	Extreme wind speed, one-year recurrence period		Ultimate
Transport, assembly, maintenance and repair	To be stated by manufacturer		Ultimate

2.4 Συντελεστές ασφαλείας

Ανάλογα την οριακή κατάσταση που εξετάζεται (οριακή κατάσταση αστοχίας, οριακή κατάσταση λειτουργικότητας και τυχηματικές φορτίσεις) στον σχεδιασμό μιας τυπικής ανεμογεννήτριας, ορίζονται και οι συντελεστές ασφαλείας των φορτίων, οι οποίοι σε κάθε σενάριο πολλαπλασιάζονται με την αντίστοιχη δράση ή αντοχή ώστε να συνυπολογιστούν πιθανές αβεβαιότητες στις υπολογισμένες τιμές.

Σε περίπτωση συνδυασμού διαφορετικών ειδών φορτίων, πρέπει να σημειωθεί ότι συνήθως συνδυάζεται μία ακραία φόρτιση με τα υπόλοιπα φορτία να είναι «κανονικά». Δύο διαφορετικά ακραία φορτία συνδυάζονται μόνο εάν έχουν κάποια μεταξύ τους συσχέτιση.

Γενικώς, για τα φορτία σχεδιασμού ισχύει ότι

$$F_d = \gamma_f F_k \quad (2.8)$$

Όπου F_d : η τιμή σχεδιασμού το φορτίου

F_k : η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου

γ_f : ο συντελεστής ασφαλείας

Στην οριακή κατάσταση αστοχίας, οι συντελεστές γ_f παίρνουν τις τιμές του πίνακα (2.5) .

Πίνακας 2.5: Συντελεστές ασφαλείας φορτίσεων γ_f για οριακή κατάσταση αστοχίας [7]

Source of loading	Unfavorable loads			Favorable loads
	Type of design situation			
	N Normal and extreme	A Abnormal	T Transport and erection	All design situations
Aerodynamic	1.35	1.1	1.5	0.9
Operational	1.35	1.1	1.5	0.9
Gravity	1.1/1.35	1.1	1.25	0.9
Other inertial forces	1.25	1.1	1.3	0.9
Heat influence	1.35	1.1	-	
*in the event of the masses not being determined by weighing.				

Στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, οι συντελεστές γ_f για όλα τα φορτία παίρνει την τιμή της μονάδας. Για τυχηματικά φορτία (πχ σεισμός) ισχύει επίσης ότι $\gamma_f = 1.0$.

Όσον αφορά τα υλικά κατασκευής, πρέπει στον υπολογισμό της αντοχής τους να συνυπολογιστούν πιθανές ατέλειες του υλικού, η γεωμετρία αυτού, καθώς και η διαδικασία επεξεργασίας που έχουν υποστεί. Για τον λόγο αυτό, οι χαρακτηριστικές αντοχές των υλικών κρίνεται σκόπιμο να διαιρεθούν με έναν συντελεστή ασφαλείας του υλικού, γ_M , οπότε και η αντοχή σχεδιασμού του υλικού προκύπτει ως :

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (2.9)$$

Όπου R_d : Η αντοχή σχεδιασμού του υλικού

R_k : η χαρακτηριστική αντοχή του υλικού

γ_M : συντελεστής ασφαλείας υλικού

Χαρακτηριστικές τιμές ανάλογα το υλικό κατασκευής και την οριακή κατάσταση που εξετάζεται, παρουσιάζονται στον πίνακα 2.6.

Πίνακας 2.6: Συντελεστές ασφαλείας υλικού γ_M [7]

Material	Ultimate limit state		Serviceability limit state
	Fracture and stability failure	Fatigue	
Concrete	1.5 ¹ (1.2) ²	1.5	1.0
Spur concrete	1.4 ¹ (1.2) ²	1.4	1.0
Reinforcing and prestressing steel	1.15 ¹	1.15	1.0

¹ For unusual design situations, e.g. earthquake calculations, $\gamma_M=1.3$ can be set for concrete and $\gamma_M=1.0$ for reinforcing steel and prestressing steel
² For the calculation of deformations when taking account of non-linearities of the geometry and/or the material, $\gamma_M=1.2$ may be taken (value in brackets)
³ For precast concrete elements a reduction of the partial safety factor for concrete γ_M is allowable if this reduction is given in the recognized design used (EC 2 or DIN 1045-1). In this case, the conditions of the code for the reduction shall be fulfilled. Required measures shall be specified in consultation with GL. Mixing of the two codes is not permitted.

Γενικά, πρέπει να ισχύει:

$$F_d \leq R_k \quad (2.10)$$

2.5 Έλεγχοι Σχεδιασμού

Για την εξασφάλιση της ασφάλειας της ανεμογεννήτριας, καθ' όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής της, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν ορισμένοι έλεγχοι, τόσο στην κατασκευή ως σύνολο, όσο και στα επιμέρους τμήματα που την απαρτίζουν και τις συνδέσεις μεταξύ αυτών. Κατά τους ελέγχους αυτούς, πρέπει οι δράσεις να μην ξεπερνούν την αντίστοιχη αντοχή της κατασκευής, για τον υπό μελέτη έλεγχο. Κύριο αντικείμενο ελέγχου είναι η αντοχή του πυλώνα στα φορτία στα οποία υπόκειται, καθώς και οι συνδέσεις μεταξύ διαφορετικών τμημάτων που τον απαρτίζουν.

2.5.1 Πλαστικός Έλεγχος

Πρωταρχικός έλεγχος που πρέπει να ικανοποιείται είναι ο έλεγχος οριακής κατάστασης πλαστικότητας (Plastic Limit State, LS1 [8]). Η οριακή κατάσταση πλαστικότητας ορίζεται ως η κατάσταση στην οποία η αντοχή της κατασκευής στην περαιτέρω παραλαβή φορτίων εξαντλείται από την διαρροή του υλικού. Ο υπολογισμός της αντοχής για τον συγκεκριμένο έλεγχο γίνεται συνήθως σε όρους τάσεων, ή με καθολική αριθμητική ανάλυση της κατασκευής. Αν και ο έλεγχος σε όρους τάσεων βασίζεται σε ελαστικές θεωρήσεις, και συνεπώς δεν μπορεί να προβλέψει εξ ολοκλήρου την αντοχή σε οριακή κατάσταση πλαστικότητας, παρ' όλα αυτά μπορεί να αποτελέσει ένα κάτω όριο της αντοχής της κατασκευής.

Ο υπολογισμός της συνολικής αντοχής της κατασκευής με χρήση καθολικής αριθμητικής ανάλυσης γίνεται με την βοήθεια προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων, και έχει μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς υπολογίζονται οι επιμέρους πλαστικοποιήσεις των μελών του φορέα και λαμβάνονται υπόψιν στην συνολική αντοχή.

2.5.2 Έλεγχος Ευστάθειας

Ο Έλεγχος ευστάθειας ή αλλιώς Οριακή Κατάσταση Λυγισμού (Buckling Limit State, LS3 [8]) αποτελεί την οριακή κατάσταση, στην οποία ολόκληρη η κατασκευή αρχίζει να αναπτύσσει ξαφνικά μεγάλες μετατοπίσεις λόγω των διατμητικών και θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται, οδηγώντας σε απώλεια ευστάθειας και αδυναμία της κατασκευής να φέρει επιπλέον φορτία. Δεδομένου της μορφής των ανεμογεννητριών (το μεγάλο ύψος της κατασκευής για εκμετάλλευση των εντονότερων ανέμων σε συνδυασμό με το ολόενα και λεπτότερο πάχος του κελύφους για εξοικονόμηση υλικού) ο έλεγχος αυτός γίνεται ο πλέον κρίσιμος, καθώς ο λόγος t/r μικραίνει σημαντικά σε συνδυασμό με την έλλειψη πλευρικών εξασφαλίσεων.

Όπως και στην Οριακή Κατάσταση Πλαστικότητας, έτσι και στην Οριακή Κατάσταση Λυγισμού, ο έλεγχος ευστάθειας είναι δυνατό να γίνει σε όρους τάσεων ή με καθολική αριθμητική ανάλυση της κατασκευής. Για τον έλεγχο σε όρους τάσεων, επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί η ελαστική θεώρηση της κατασκευής, αρκεί να χρησιμοποιηθεί μια απομειωμένη αντοχή του υλικού. Η απομείωση αυτή προκύπτει από εμπειρικές σχέσεις σύμφωνα με την γεωμετρία του φορέα και το είδος της καταπόνησης του.

Για τον προσδιορισμό της αντοχής με καθολική αριθμητική ανάλυση, χρησιμοποιούνται αριθμητικά προσομοιώματα, τα οποία εξάγουν την αντοχή της συνολικής κατασκευής, αφού λάβουν υπόψιν όλες τις επιμέρους παραμέτρους που επηρεάζουν την ευστάθεια της κατασκευής.

2.5.3 Έλεγχος Κόπωσης

Η Οριακή Κατάσταση Κόπωσης (Fatigue Limit State, LS4 [8]) αποτελεί κυρίαρχο έλεγχο σε κατασκευές οι οποίες υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενες κυκλικές φορτίσεις κατά την διάρκεια ζωής τους. Η κόπωση συμβαίνει όταν μετά από ένα συγκεκριμένο πλήθος κυκλικών φορτίσεων της κατασκευής εμφανίζεται ξαφνική θραύση ή ρηγμάτωση του υλικού, χωρίς προηγούμενη πλαστική παραμόρφωση του μέλους αυτού. Οι ανεμογεννήτριες είναι κατασκευές που είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε κόπωση, καθώς υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενες κυκλικές φορτίσεις λόγω του ανέμου, που αποτελεί έντονα εναλλασσόμενη φόρτιση, τόσο σε ένταση όσο και σε φορά άσκησης του.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος ελέγχου της αντοχής σε κόπωση είναι η μέθοδος της συσσωρευμένης βλάβης. Σύμφωνα με αυτή, όταν μια κατασκευή υπόκειται σε διαφορετικά εύρη τάσεων, $\Delta\sigma$, και κάθε $\Delta\sigma$ εμφανίζεται n_i φορές κατά τον κύκλο ζωής του έργου ορίζεται ένας μερικός συντελεστής βλάβης n_i/N_i όπου το πλήθος των κύκλων που αντέχει συνολικά η κατασκευή), και η συνολική βλάβη προκύπτει ως το άθροισμα όλων των επιμέρους μερικών συντελεστών. Δεδομένου ότι η παρούσα εργασία ασχολείται με τον έλεγχο των συγκολλητών συνδέσεων του πυλώνα της ανεμογεννήτριας σε κόπωση, ο έλεγχος αυτός θα αναλυθεί διεξοδικά στην συνέχεια της εργασίας.

2.5.4 Έλεγχος Συντονισμού

Κατά την κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας, πρέπει να δοθεί μεγάλη βάση στον έλεγχο του συντονισμού, καθώς ο πιθανός συντονισμός της ιδιοσυχνότητας της ανεμογεννήτριας με την

συχνότητα λειτουργίας αυτής (συχνότητα λειτουργίας της γεννήτριας και συχνότητα περιστροφής των πτερυγίων) απαιτεί εκτενή μελέτη ώστε να αποφευχθεί και διερευνήσεις σύμφωνα με τις συνθήκες εδάφους.

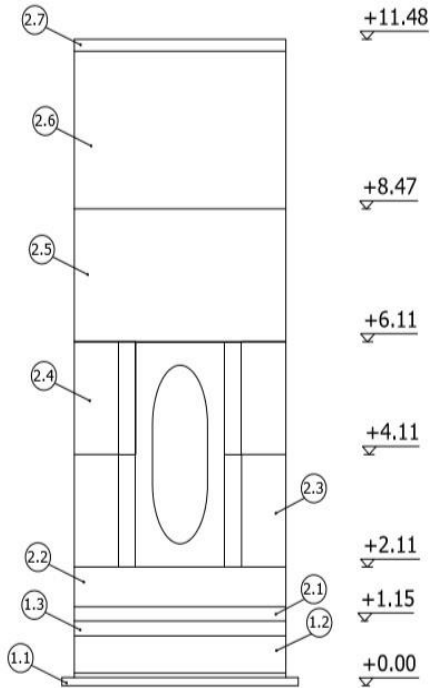
3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

3.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά

Τα δεδομένα της ανεμογεννήτριας της παρούσας εργασίας έχουν δοθεί από κατασκευαστική εταιρία ανεμογεννητριών, και συνεπώς τόσο η γεωμετρία, όσο και τα υλικά κατασκευής αλλά και οι φορτίσεις είναι δεδομένες. Ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας ελέγχου αποτελείται από επτά διαφορετικά μέρη, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες, και κάθε ένα από αυτά αποτελείται από επιμέρους συγκολλητά μέρη, μεταβαλλόμενου πάχους το καθένα. Το συνολικό ύψος της κατασκευής είναι τα 117.7m, με κάθε ένα από τα 7 επιμέρους τμήματα που αποτελούν τον πυλώνα να έχει μήκος που κυμαίνεται από 10 – 28 μέτρα. Ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας έχει κυλινδρική μορφή, με σταθερή εξωτερική διάμετρο 4.30m, με το τελευταίο τμήμα αυτού, μήκους 28m, να έχει κολουροκωνική μορφή και μεταβλητή εξωτερική διάμετρο που φτάνει τα 3.70m στην κορυφή του πυλώνα. Το πάχος του κελύφους κυμαίνεται περί τα 60mm στην βάση της ανεμογεννήτριας όπου οι εντάσεις που αναπτύσσονται απαιτούν υψηλότερη αντοχή, και μειώνεται με το ύψος, καταλήγοντας στην κορυφή του πυλώνα σε πάχη των 15mm.

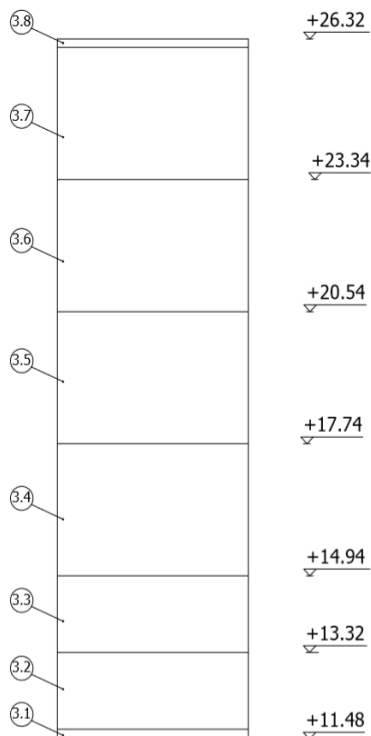
Κοντά στην βάση της ανεμογεννήτριας, και συγκεκριμένα στο 2^ο τμήμα του πυλώνα, διανοίγεται μια οπή στο κέλυφος, για την τοποθέτηση της ανθρωποθυρίδας. Η ανθρωποθυρίδα εξυπηρετεί ανάγκες προσβασιμότητας στον πυλώνα για συντήρηση του ηλεκτρικού και μηχανολογικού εξοπλισμού της ανεμογεννήτριας. Η ανθρωποθυρίδα έχει ελλειψοειδές σχήμα, και ύψος 3 μέτρων. Γύρω από την ανθρωποθυρίδα το κέλυφος ενισχύεται, και έχει σταδιακά μεταβαλλόμενο πάχος 55-75mm. Ταυτόχρονα, υπάρχει και μια ενίσχυση του ανοίγματος με ένα πλαίσιο περιμετρικά συγκολλημένο κάθετα στην παρειά του ανοίγματος, το οποίο έχει πάχος 60mm.

3.1.1 Τμήματα Πυλώνα



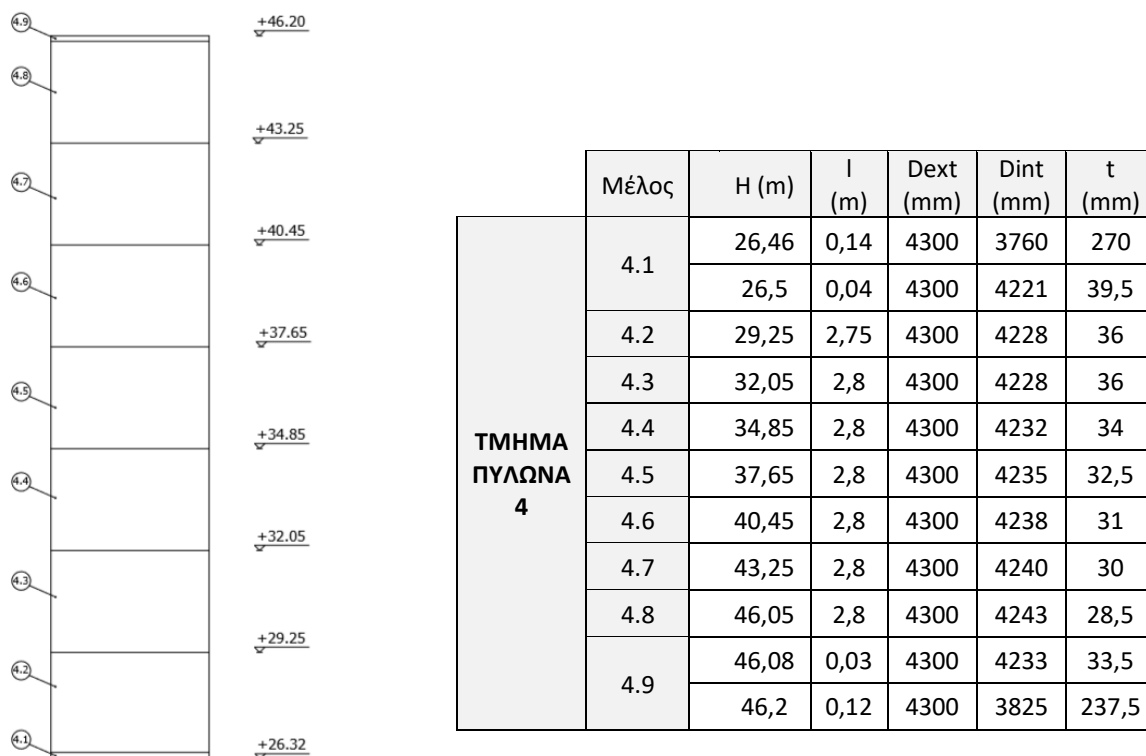
	Μέλος	H (m)	l (m)	Dext (mm)	Dint (mm)	t (mm)
ΤΜΗΜΑ ΠΥΛΩΝΑ 1	1.1	0,15	0,15	4804	3684	560
		0,23	0,08	4300	4180	60
	1.2	0,89	0,66	4300	4180	60
		1.3	0,945	0,055	4300	4180
	1,15		0,205	4300	3605	347,5
ΤΜΗΜΑ ΠΥΛΩΝΑ 2	2.1	1,355	0,205	4300	3605	347,5
		1,405	0,05	4300	4190	55
	2.2	2,11	0,705	4300	4190	55
	2.3	4,11	2	4300	4190	55
	2.4	6,11	2	4300	4193	53,5
	2.5	8,47	2,36	4300	4196	52
	2.6	11,27	2,8	4300	4200	50
		2.7	11,315	0,045	4300	4200
	11,48		0,165	4300	3700	300

Σχήμα 3.1: 1^ο και 2^ο τμήμα πυλώνα ανεμογεννήτριας ελέγχου

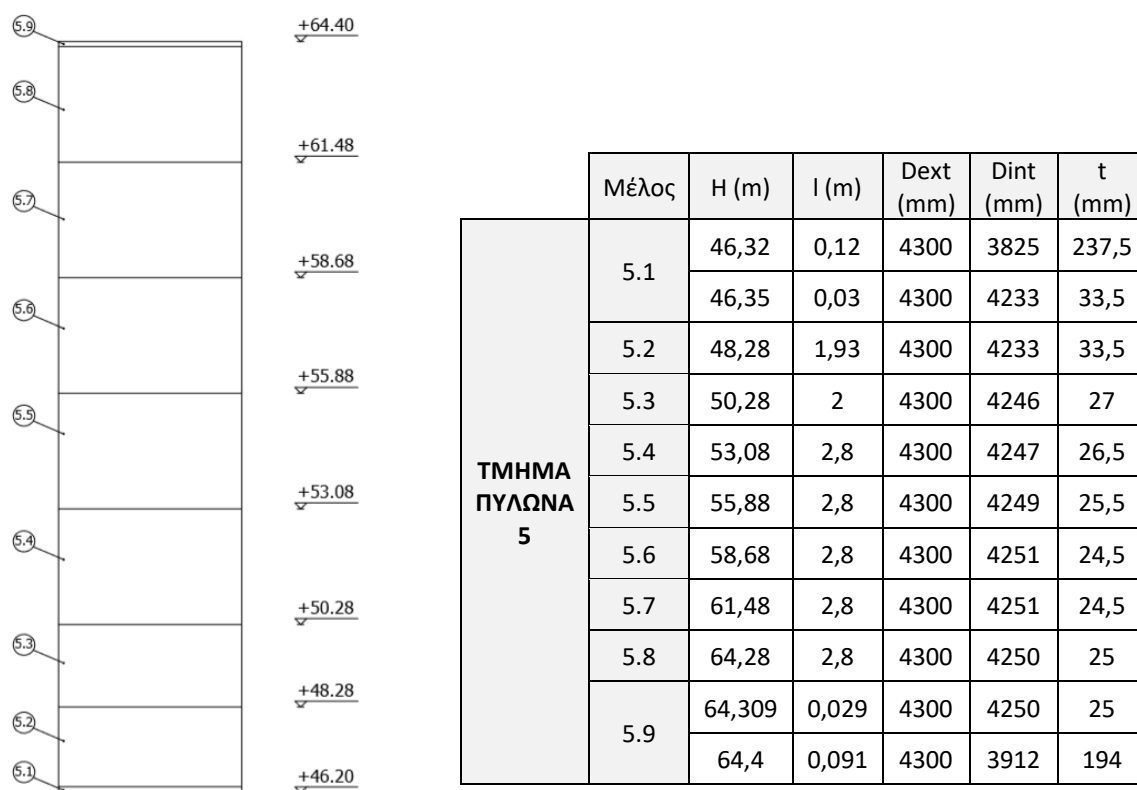


	Μέλος	H (m)	l (m)	Dext (mm)	Dint (mm)	t (mm)
ΤΜΗΜΑ ΠΥΛΩΝΑ 3	3.1	11,645	0,165	4300	3700	300
		11,69	0,045	4300	4200	50
	3.2	13,315	1,625	4300	4207	46,5
	3.3	14,94	1,625	4300	4207	46,5
	3.4	17,74	2,8	4300	4209	45,5
	3.5	20,54	2,8	4300	4213	43,5
	3.6	23,34	2,8	4300	4217	41,5
	3.7	26,14	2,8	4300	4221	39,5
	3.8	26,18	0,04	4300	4221	39,5
		26,32	0,14	4300	3760	270

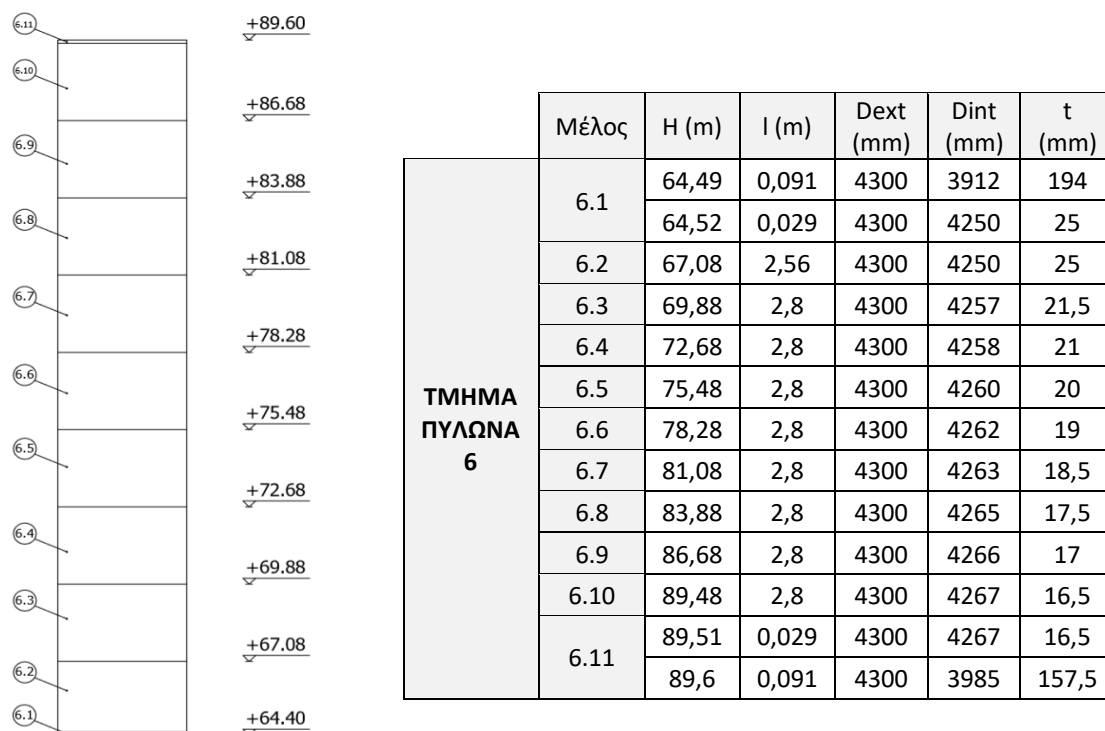
Σχήμα 3.2: 3^ο τμήμα πυλώνα ανεμογεννήτριας



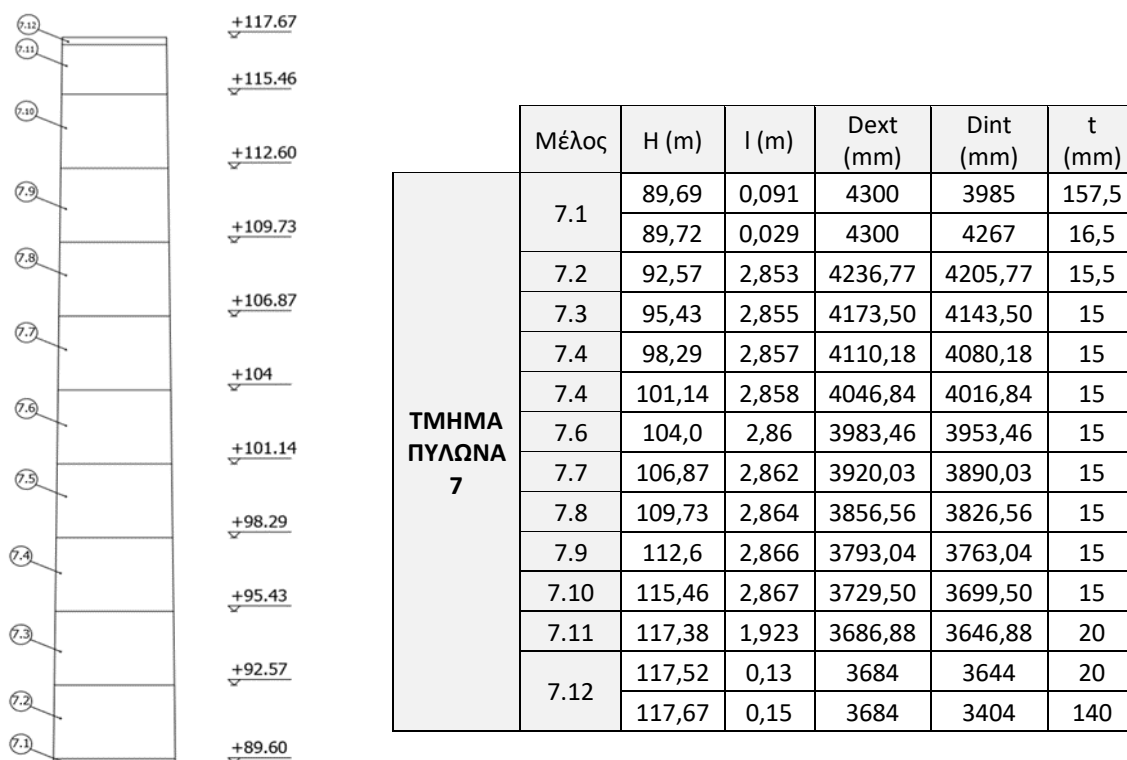
Σχήμα 3.3: 4^ο τμήμα πυλώνα ανεμογεννήτριας



Σχήμα 3.4: 5^ο τμήμα πυλώνα ανεμογεννήτριας

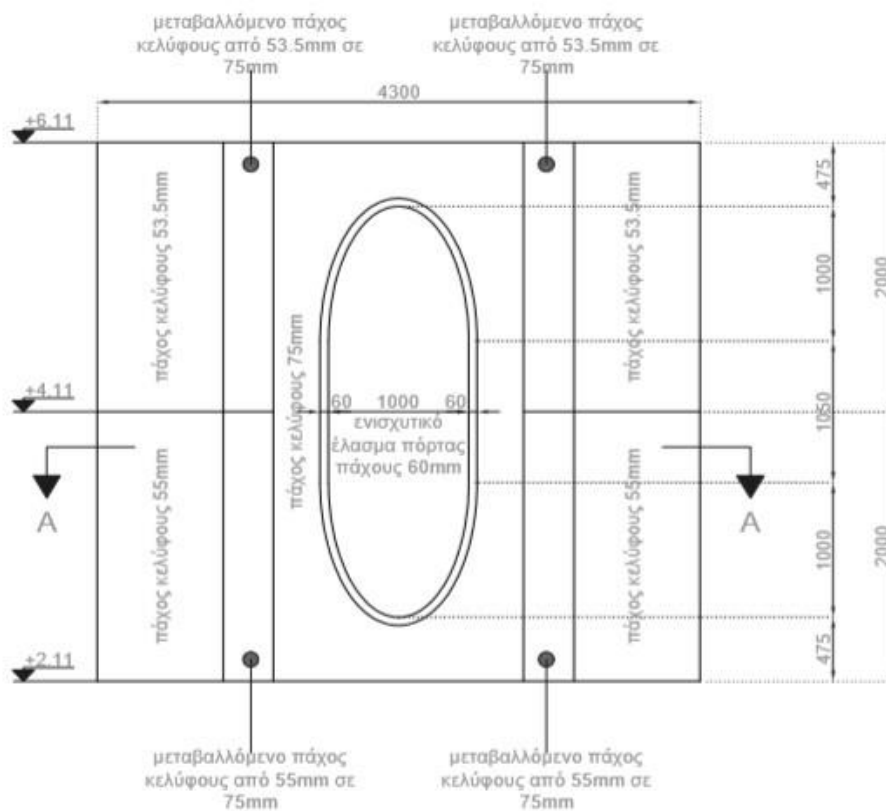


Σχήμα 3.5: 6^ο τμήμα πυλώνα ανεμογεννήτριας

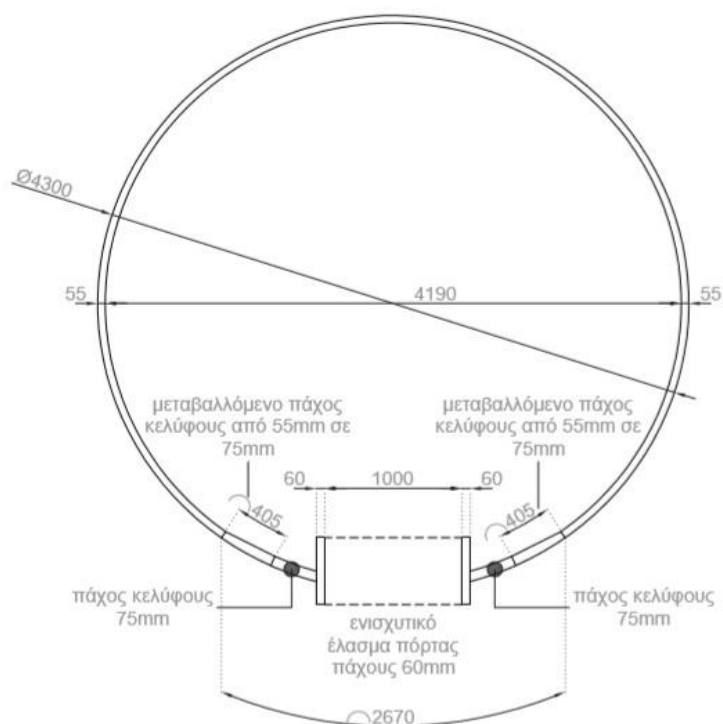


Σχήμα 3.6: 7^ο τμήμα πυλώνα ανεμογεννήτριας

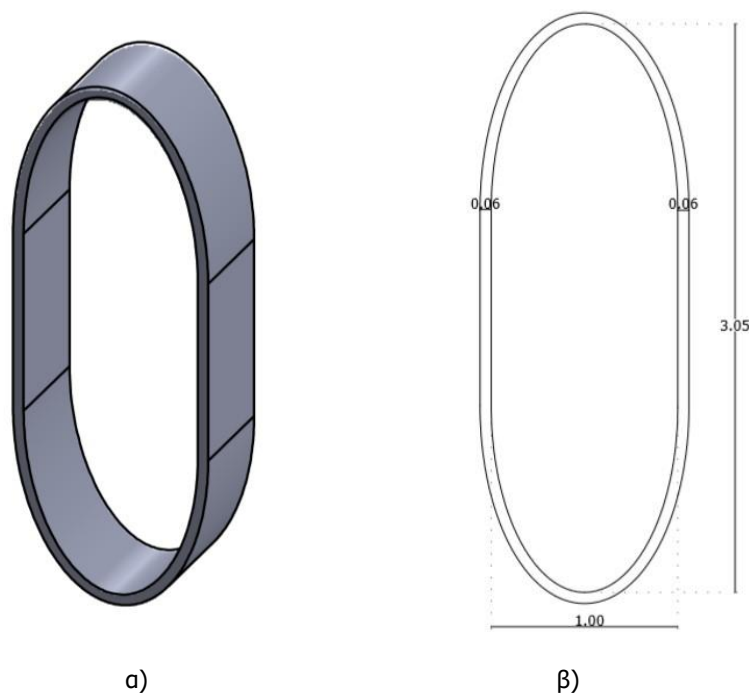
3.1.2 Λεπτομέρεια ανθρωποθυρίδας



Σχήμα 3.7: Όψη ανθρωποθυρίδας ανεμογεννήτριας ελέγχου (διαστάσεις σε mm)



Σχήμα 3.8: Κάτοψη ανθρωποθυρίδας (διαστάσεις με mm)



Σχήμα 3.9: α) Μορφή ενισχυτικού κολάρου, περιμετρικά της οπής της ανθρωποθυρίδας, β) χαρακτηριστικές διαστάσεις

3.2 Υλικά κατασκευής

Το υλικό κατασκευής του πυλώνα της ανεμογεννήτριας ελέγχου είναι χάλυβας, ποιότητας S355. Όσον αφορά τους κοχλίες που χρησιμοποιούνται για τις συνδέσεις, είναι προεντεταμένοι κοχλίες ποιότητας 10.9.

Πίνακας 3.1 : Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα [7]

Modulus of elasticity	E	210000 MPa
Poisson's ratio	ν	0.3
Shear modulus	G	$E/2(1 - \nu)$
Unit mass	ρ	7850 kg/m ³
Coefficient of linear thermal expansion	α	$12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Πίνακας 3.2 : Τιμές f_u και f_y για χάλυβα ποιότητας S355 ανάλογα το πάχος του κελύφους [7]

Reference Standard	Grade	Minimum yield strength f_y (MPa)							
		Thickness t (mm)							
		≤ 16	>16 ≤ 40	>40 ≤ 63	>63 ≤ 80	>80 ≤ 100	>100 ≤ 150	>150 ≤ 200	>200 ≤ 250
EN 10 025	S355	355	345	335	325	315	295	285	275
		Tensile strength f_u (MPa)							
		Thickness t (mm)							
		<3		≥ 3 <100		≥ 100 <150		≥ 150 <250	
		510-680		490-630		470-630		450-630	

3.3 Φορτία Σχεδιασμού

Τα φορτία σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκαν για την συγκεκριμένη μελέτη είναι αυτά που παρείχε ο μελετητής της ανεμογεννήτριας ελέγχου. Τα φορτία αυτά παραδόθηκαν σε μορφή περιβάλλουσας εντατικών μεγεθών για πολυάριθμες διατομές καθ' ύψος, χωρίς να είναι γνωστός ο συνδυασμός φόρτισης και η συσχέτιση των φορτίων μεταξύ διαφορετικών διατομών.

Έτσι, στην κορυφή του πυλώνα της ανεμογεννήτριας, τα μέγιστα στατικά φορτία φαίνονται στην πίνακα 3.9. Αντίστοιχα, στον πίνακα 3.10 παρατίθενται τα εντατικά μεγέθη από ULS που προκύπτουν στον θέση +11,461m (1^η φλάντζα πάνω από την ανθρωποθυρίδα), με την οποία θα ασχοληθούμε κυρίως στην συγκεκριμένη εργασία, αφού θα επικεντρωθούμε στις συγκολλήσεις εκείνου του τμήματος της ανεμογεννήτριας.

Πίνακας 3.3 : Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού στην κορυφή του πυλώνα (H=117,67m)

	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)	F_R (kN)	M_R (kNm)
F_z, S_{MIN}	2440	40	150	-970	385	54	155	400
F_z, S_{MAX}	4035	47	-125	2720	-4885	1020	132	4990
F_y, S_{MIN}	2760	-1010	-26	-4515	-4690	2443	1010	5300
F_y, S_{MAX}	2783	945	30	3780	130	-1880	945	1900
F_x, S_{MIN}	2855	4	-925	1700	-2420	1345	926	2770
F_x, S_{MAX}	3632	-4	1240	-3000	1850	7920	1240	8130
M_z, S_{MIN}	2915	-70	510	-11400	4870	7560	512	8995
M_z, S_{MAX}	3570	-160	432	12225	3945	6375	470	7500
M_y, S_{MIN}	2892	149	-35	2970	-12050	6860	155	13870
M_y, S_{MAX}	3510	-180	380	-5118	11570	8787	420	14530
M_x, S_{MIN}	3489	-25	-280	4465	-8000	-7580	282	11000
M_x, S_{MAX}	3600	-40	650	-2100	4208	11582	659	12322
F_R, S_{MIN}	3515	0,0	0,0	250	-2977	45	0,0	2977
F_R, S_{MAX}	3632	-4,0	1240	-2900	1846	7920	1240	8150
M_R, S_{MIN}	2800	-30	328	1012	1,6	0,9	329	1,8
M_R, S_{MAX}	3610	-140	800	-1240	-10736	10265	810	14853

Πίνακας 3.4 : Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού στην στάθμη ελέγχου (H=11,48m)

	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)	F_R (kN)	M_R (kNm)
F_z, S_{MIN}	5875	20	480	-990	37300	-2945	480	37460
F_z, S_{MAX}	8700	42	-150	2625	-20350	-4049	160	20745
F_y, S_{MIN}	6220	-1250	270	-4600	11900	123076	1280	123650
F_y, S_{MAX}	6240	1250	200	3750	13345	-118300	1265	119047
F_x, S_{MIN}	6300	100	-980	155	-105340	-4350	990	105430
F_x, S_{MAX}	7870	-28	1390	-1890	109570	7900	1388	109860
M_z, S_{MIN}	6440	-55	647	-11700	63910	18600	650	66570
M_z, S_{MAX}	7674	-76	330	12275	28090	3229	340	28270
M_y, S_{MIN}	6293	27	-970	1760	-107430	-530	970	107430
M_y, S_{MAX}	7842	24	1225	-3180	135940	6985	1227	136120
M_x, S_{MIN}	6240	1248	205	3760	13330	-118335	1265	119085
M_x, S_{MAX}	6225	-1235	160	-5330	-440	125240	1250	125240
F_R, S_{MIN}	7745	0,1	0	43	-3450	-16	0,1	3450
F_R, S_{MAX}	7870	-8	1390	280	112770	11200	1390	113328
M_R, S_{MIN}	6300	16	41	200	-3	3,5	44	4,5
M_R, S_{MAX}	7845	24	1225	-3200	135950	7030	1225	136225

Στον παραπάνω πίνακα , η διεύθυνση x ορίζει την κατακόρυφη διεύθυνση, ο άξονας y είναι στο επίπεδο του ρότορα, κάθετος στη βασική διεύθυνση του ανέμου και ο άξονας z είναι κάθετος στο επίπεδο του ρότορα, παράλληλα στη βασική διεύθυνση του ανέμου.

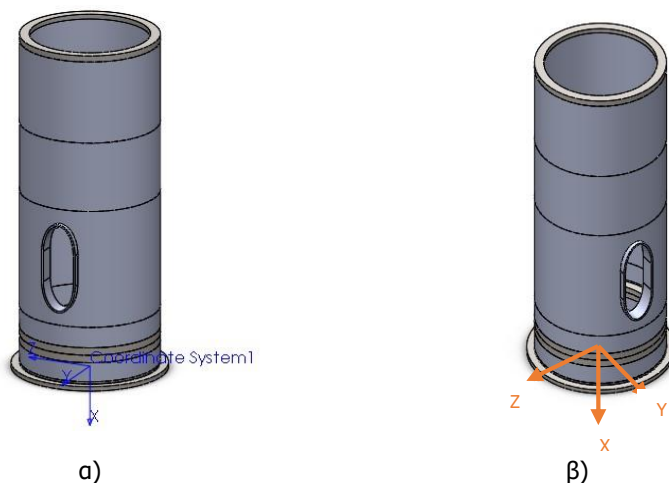
Επίσης:

F_R : είναι η συνισταμένη τέμνουσα, όπου

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3.11)$$

M_R : η συνισταμένη ροπή κάμψης

$$M_R = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \quad (3.12)$$



Σχήμα 3.10: α, β) Σύστημα αξόνων για την εφαρμογή των εντατικών μεγεθών

Ταυτόχρονα, από τον κατασκευαστή της ανεμογεννήτριας δόθηκαν και τα φορτία σχεδιασμού για τον έλεγχο της κόπωσης (τόσο δυνάμεις όσο και ροπές, σε x, y, z διεύθυνση και συνισταμένη ροπή αυτών). Για κάθε φορτίο από αυτά, δόθηκε ένα αρχείο, στο οποίο για κάθε εύρος (ΔM, ΔF αντίστοιχα) των φορτίων, αυτά συνοδεύονται με ένα πλήθος κύκλων φόρτισης το οποίο αντιπροσωπεύει την λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε διάστημα 25 ετών. Τα φορτία αυτά ήταν και τα χαρακτηριστικά με τα οποία ελέγχθηκε η κατασκευή στην παρούσα εργασία.

Τυπική μορφή ενός τέτοιου αρχείου είναι η εξής :

Πίνακας 3.5 : Συνισταμένη ροπή MR στην στάθμη ελέγχου (+11,48m)

Εύρος εντατικού μεγέθους	Πλήθος κύκλων, N	Αθροιστικό Πλήθος κύκλων, N_{tot}
200	1,116E+08	8,0186E+08
400	8,778E+07	6,9026E+08
600	7,169E+07	6,0248E+08
800	6,074E+07	5,3079E+08
1000	5,138E+07	4,7005E+08
1200	4,505E+07	4,1867E+08
1400	3,976E+07	3,7362E+08
1600	3,523E+07	3,3386E+08
1800	3,107E+07	2,9863E+08
2000	2,793E+07	2,6756E+08
2200	2,469E+07	2,3963E+08
2400	2,193E+07	2,1494E+08
2600	1,942E+07	1,9301E+08
2800	1,719E+07	1,7359E+08
3000	1,531E+07	1,5640E+08

Με την ίδια μορφή, δίνονται αντίστοιχοι πίνακες, για τα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη που καταπονούν την κατασκευή, οπότε και συνολικά ελέγχεται έτσι η αντοχή σε κόπωση για την κατασκευή στα φορτία καταπόνησης των 25 ετών.

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΕΑ

4.1 Τύπος προσομοίωσης

Η επιλογή του κατάλληλου προσομοιώματος για την αναπαράσταση του φορέα είναι μια από τις πιο κρίσιμες επιλογές σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, καθώς από αυτή κρίνεται η αξιοπιστία και η ακρίβεια των διαφόρων αποτελεσμάτων. Η επιλογή όμως αυτή δεν είναι εύκολη, καθώς αποτελεί την βέλτιστη λύση μεταξύ υπολογιστικού κόστους και ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Για να είναι ικανοποιητικό το προσομοίωμα που θα επιλεγεί, πρέπει πρωτίστως να μπορεί να περιγράψει σωστά την γεωμετρία του φορέα που αναλύεται. Για τον σκοπό αυτό, έγινε διερεύνηση μεταξύ τριών διαφορετικών τύπων προσομοίωσης του πυλώνα της ανεμογεννήτριας, ώστε να αποφασιστεί ποιος είναι ο πλέον κατάλληλος να περιγράψει τον εξεταζόμενο φορέα. Η προσομοίωση του πυλώνα με στοιχεία δοκού αποφεύχθηκε, καθώς οι τάσεις στις συνδέσεις δεν μπορούν να υπολογιστούν με μεγάλη ακρίβεια, κάτι το οποίο κρίθηκε απαραίτητο για την παρούσα εργασία. Έτσι έγιναν αναλύσεις για τους εξής τρεις συνδυασμούς πεπερασμένων στοιχείων :

- Προσομοίωση όλου του φορέα με στοιχεία κελύφους
- Προσομοίωση όλου του φορέα με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία
- Προσομοίωση των κελυφών του φορέα με στοιχεία κελύφους, και των φλαντζών αυτού με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία

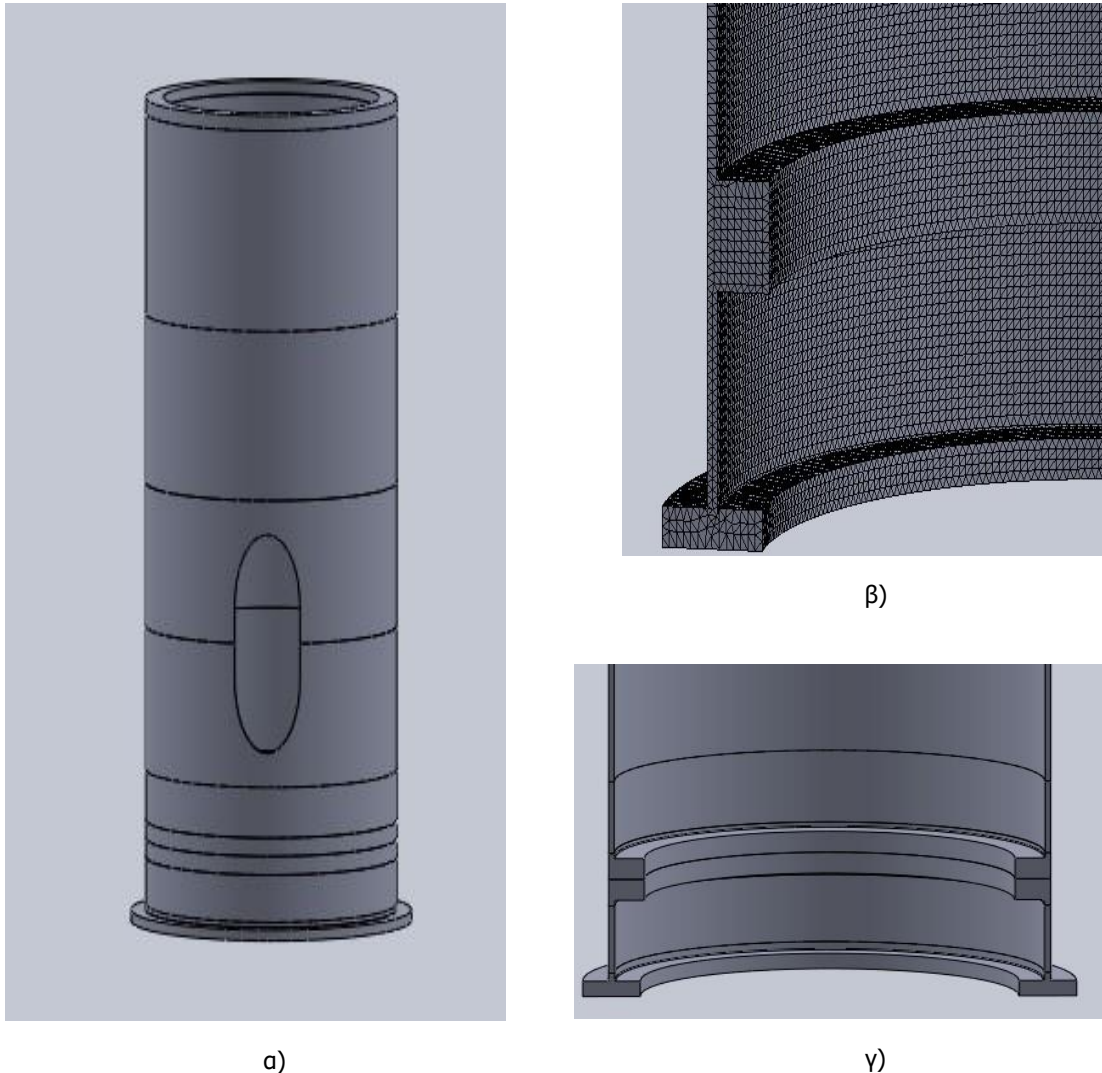
Οι διερευνητικές αναλύσεις δεν έγιναν σε ολόκληρο τον φορέα, αλλά σε ένα μικρό τμήμα αυτού, καθώς το υπολογιστικό κόστος σε ολόκληρο τον πυλώνα θα ήταν πολύ μεγάλο, και μπορούμε να πάρουμε επαρκώς αξιόπιστα αποτελέσματα για την ακρίβεια κάθε προσομοίωσης από την εφαρμογή σε ένα τμήμα αυτού. Όλες οι αναλύσεις καθώς και η δημιουργία των μοντέλων έγινε με την χρήση του λογισμικού SOLIDWORKS.

4.1.1 1^η μορφή προσομοίωσης

Το 1^ο μοντέλο που δοκιμάστηκε, ήταν η προσομοίωση όλου του φορέα με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Με την χρήση τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να προσομοιωθεί επακριβώς η σωστή γεωμετρία, με όση λεπτομέρεια είναι επιθυμητή. Για την απλούστευση της προσομοίωσης, καθώς και του υπολογιστικού χρόνου αυτής, επιλέχθηκε να

προσομοιωθεί το τμήμα του πυλώνα από την βάση του, μέχρι την πρώτη φλάντζα πάνω από την ανθρωποθυρίδα (+11.48m), απλοποιημένο, απλά με την ύπαρξη οπής, χωρίς τις τοπικές ενισχύσεις που υπάρχουν στην κανονική γεωμετρία και το κολάρο ενίσχυσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για πλέγμα πεπερασμένων πλευράς 50mm, ο χρόνος υπολογισμού της ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων ήταν περίπου μισή ώρα, οπότε για το πλήθος των αναλύσεων που έπρεπε να γίνουν για την μελέτη της κόπωσης κάτι τέτοιο θα ήταν απαγορευτικό.



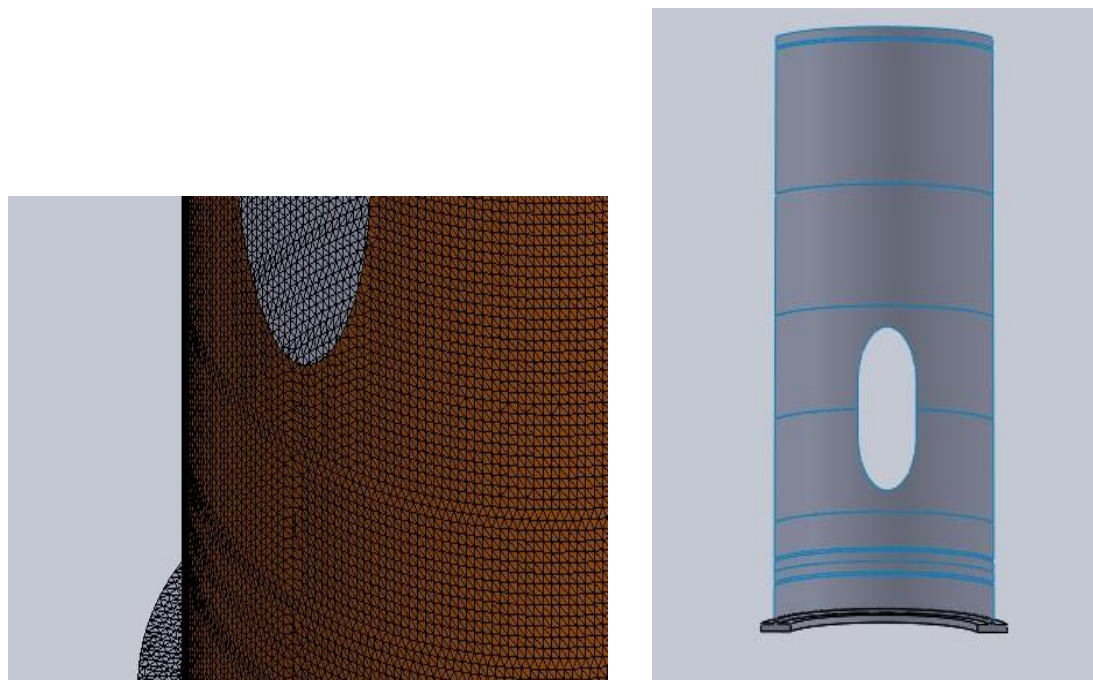
Σχήμα 4.1: Προσομοίωμα 1^{ου} τμήματος πυλώνα ανεμογεννήτριας με 3D solid στοιχεία

Για λόγους σύγκλισης μεταξύ των διαφόρων προσομοιωμάτων, μελετήθηκε η μέγιστη τάση που εμφανίστηκε στην συγκόλληση κάτω από την οπή της ανθρωποθυρίδας (+2,11 m). Για το προσομοίωμα των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, η τιμή της μέγιστης τάσης που αναπτύχθηκε σε αυτή την θέση ήταν 248,9 MPa.

4.1.2 2^η μορφή προσομοίωσης

Το 2^ο μοντέλο που δοκιμάστηκε, ήταν η προσομοίωση όλου του φορέα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (shell elements). Τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να περιγράψουν επαρκώς την τοπική συμπεριφορά του κελύφους, αλλά πολύ σημαντικό είναι επίσης το πολύ χαμηλό υπολογιστικό τους κόστος (ταχύτητα

υπολογισμών περίπου υποδεκαπλάσια αυτής των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων). Με τον ίδιο τρόπο όπως και για το 1^ο προσομοίωμα, αναλύθηκε το πρώτο τμήμα του πυλώνα, μέχρι την φλάντζα πάνω από την ανθρωποθυρίδα, για φορτία ULS στο ύψος αυτό και για συνδυασμό maxMr.



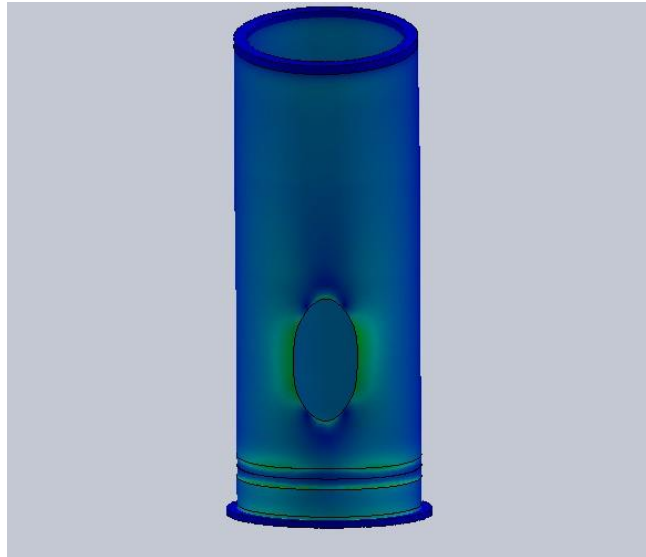
α) β)
Σχήμα 4.2: Προσομοίωμα 1^{ου} τμήματος πυλώνα ανεμογεννήτριας με shell elements

Για το προσομοίωμα των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, η τιμή της μέγιστης τάσης που αναπτύχθηκε στην συγκόλληση σε ύψος +2,11 m για πλέγμα πεπερασμένων πλευράς 50mm ήταν 210 MPa.

4.1.3 3^η μορφή προσομοίωσης

Το 3^ο προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για την σύγκριση, ήταν ένας συνδυασμός των δύο προηγούμενων, δηλαδή προσομοίωση με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία για τα κελύφη, καθώς το μικρό τους πάχος σε συνδυασμό με την μεγάλη επιφάνεια τους, είναι η πλέον κατάλληλη γεωμετρία ώστε να μπορεί να προσομοιωθεί με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Απ' την άλλη μεριά, οι φλάντζες, των οποίων το πάχος της διατομής είναι αισθητά μεγαλύτερο από αυτό των υπόλοιπων τμημάτων του πυλώνα, δεν θα ήταν τόσο ορθή και ακριβής επιλογή να προσομοιαστούν και αυτές με στοιχεία κελύφους, όπως έγινε στο 2^ο προσομοίωμα. Αντίθετα, η προσομοίωση των φλάντζων με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία αντιπροσωπεύει περισσότερο την πραγματικότητα.

Πράγματι, με την χρήση του συνδυασμού χρήσης στοιχείων κελύφους για τον κυρίως πυλώνα της ανεμογεννήτριας, και τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία για τις φλάντζες, η τάση που αναπτύσσεται στην συγκόλληση σε ύψος +2.11m για τα ίδια εντατικά μεγέθη είναι της 230 MPa, πιο κοντά στο αποτέλεσμα που είχαμε με την χρήση τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο θεωρείται και ακριβέστερο σαν μοντέλο αφού προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική γεωμετρία της κατασκευής.



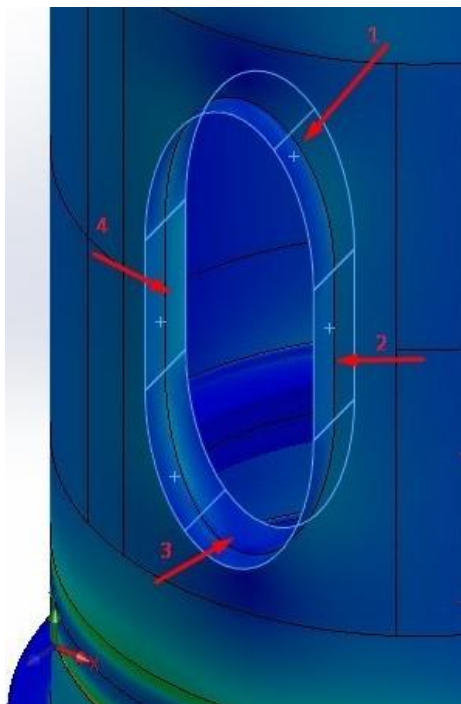
Σχήμα 4.3: Μορφή παραμόρφωσης πυλώνα κάτω από φορτία σχεδιασμού

Αποκλείστηκε λοιπόν η προσομοίωση όλων των στοιχείων του πυλώνα με στοιχεία κελύφους, αφού το μοντέλο που αυτή δημιουργεί δεν είναι αυτό που αντιπροσωπεύει καταλληλότερα τον φορέα.

4.2 Επιλογή πλέγματος πεπερασμένων

Η επιλογή του κατάλληλου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων είναι εξίσου σημαντική για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, αφού αποφασιστεί το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για τις αναλύσεις, με σκοπό την μέγιστη εκμετάλλευση της ακρίβειας που μπορεί να παρέχει το προσομοίωμα που επιλέχθηκε. Γενικά, όταν πρόκειται για τμήματα τα οποία είναι συγκολλημένα μεταξύ τους, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ενιαίο πλέγμα μεταξύ των δύο τμημάτων.

Για τον προσδιορισμό του κατάλληλου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο σύγκλισης, το οποίο και εφαρμόστηκε για σταδιακή πύκνωση του πλέγματος για το τμήμα του πυλώνα της ανεμογεννήτριας μέχρι την πρώτη φλάντζα πάνω από την οπή, χρησιμοποιώντας την πραγματική γεωμετρία του φορέα, έτσι ώστε να συνυπολογιστεί τόσο η επιρροή της οπής στο μοντέλο, όσο και η επιρροή των ενισχύσεων τοπικά στα σημεία περιμετρικά της οπής. Τα λεπτότοιχα τμήματα του πυλώνα προσομοιώθηκαν με επιφανειακά στοιχεία κελύφους, όπως και με τον ίδιο τρόπο προσομοιώθηκε το ενισχυτικό κολάρο στην οπή. Στο σημείο γύρω από την οπή, όπου το πάχος του κελύφους είναι σταδιακά μεταβαλλόμενο, από 55mm σε 75mm, επιλέχθηκε ενιαίο μέσο πάχος κελύφους τα 65mm σε όλο το τμήμα της σταδιακής πάχυνσης. Οι φλάντζες προσομοιώθηκαν με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Για να είναι επαρκής η σύγκλιση μεταξύ δύο διαφορετικών βημάτων πύκνωσης του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σύμφωνα με το κριτήριο σύγκλισης, αρκεί η απόκλιση των αποτελεσμάτων τους να είναι μικρότερη του 95%. Στο προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε, υπολογίστηκαν οι τάσεις που αναπτύσσονται στις συγκολλήσεις γύρω από την οπή για σταδιακό πύκνωμα πλέγματος, από πλευρά πεπερασμένου από 150mm μέχρι 20mm. Η περαιτέρω πύκνωση του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων ήταν απαγορευτική, λαμβάνοντας υπόψιν τον εξαιρετικά μεγάλο αριθμό στοιχείων και υπολογιστικό χρόνο που ήδη χρειάστηκε για την ολοκλήρωση της πυκνότερης ανάλυσης, αυτής των 20mm.



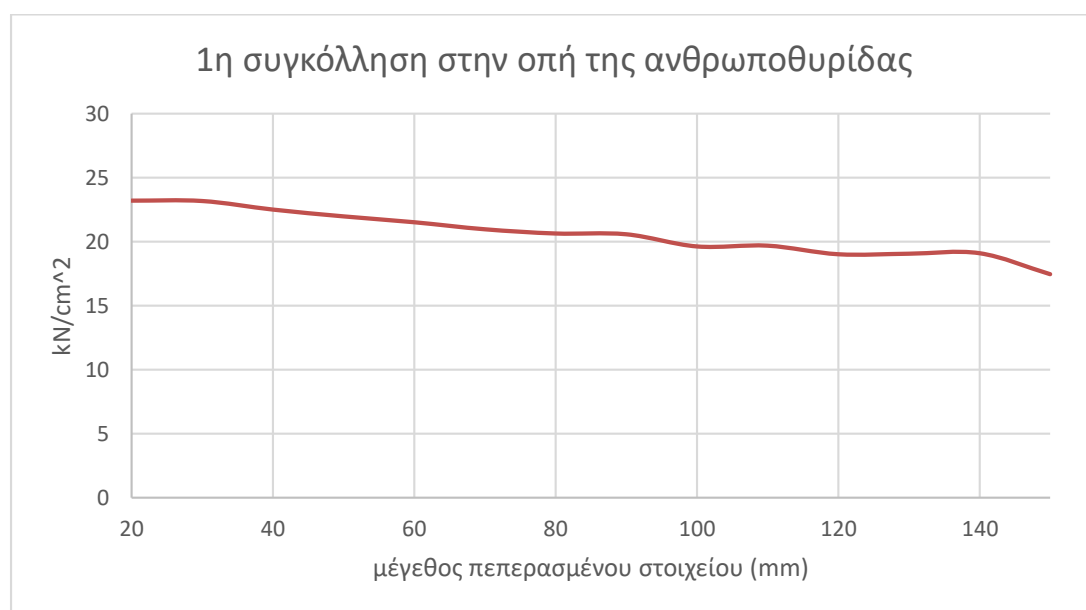
Για κάθε θέση (1, 2, 3, 4) υπολογίζονται οι τάσεις που αναπτύσσονται, μικραίνοντας σταδιακά το μέγεθος κάθε πεπερασμένου, μέχρις ότου να επιτευχθεί σύγκλιση για κάθε ξεχωριστή θέση.

Σχήμα 4.4: Θέσεις συγκολλήσεων περιμετρικά της ανθρωποθυρίδας μεταξύ επισχυτικού πλαισίου και κελύφους του πυλώνα.

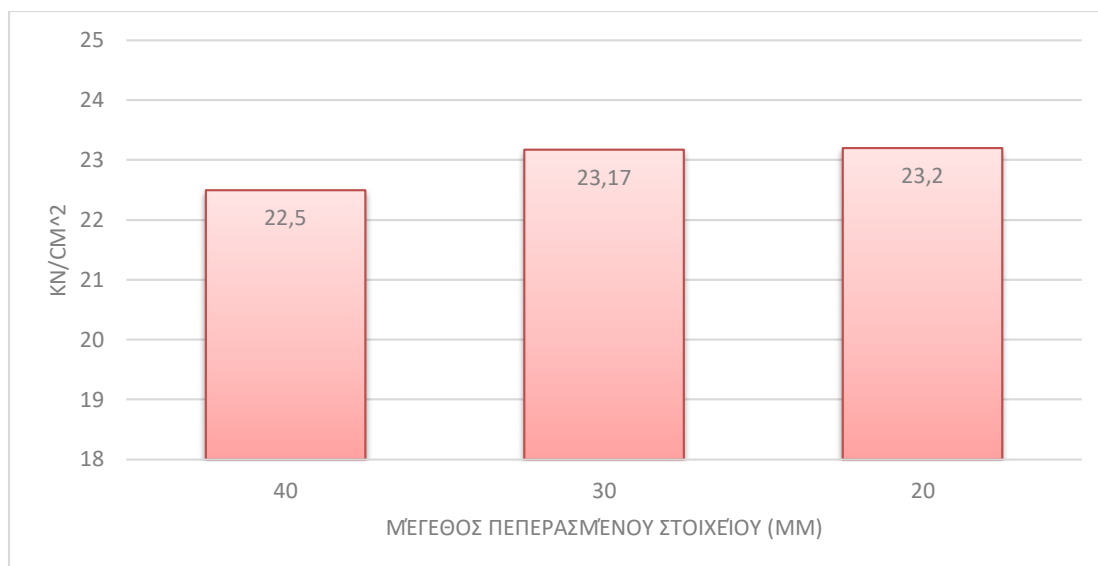
Δεδομένου ότι η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις συγκολλήσεις γύρω από την οπή της ανθρωποθυρίδας, δεν είναι απαραίτητη η διερεύνηση ολόκληρου του τμήματος του πυλώνα, αλλά κυρίως του κατώτερου τμήματος αυτού, μέχρι ύψος +11,48m. Έγινε διερεύνηση τόσο για nodal, όσο και για element stresses, δεδομένου όμως της μεγαλύτερης ακρίβειας των δευτέρων έναντι των πρώτων, επιλέχθηκε ο έλεγχος σύγκλισης αλλά και οι αναλύσεις στην συνέχεια να γίνουν με υπολογισμό των element stresses. Παρ' όλα αυτά παρατηρήθηκε, ότι όταν επιτυγχάνονταν σύγκλιση των τάσεων, αυτές ταυτίζονταν και με τις αντίστοιχες nodal, για το ίδιο μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου. Επίσης, στόχος ήταν όχι μόνο η σύγκλιση των τάσεων μεταξύ δύο διαφορετικών βημάτων να είναι μεγαλύτερη του 95%, όπως ορίζει το κριτήριο σύγκλισης, αλλά να προχωρήσουμε σε περαιτέρω ακρίβεια, έτσι ώστε αφού η περιοχή εξέτασης ήταν μικρή, συνεπώς και είχαμε το πλεονέκτημα του υπολογιστικού χρόνου, να καταφέρουμε οι τάσεις μεταξύ των δύο διαφορετικών βημάτων να είναι προσεγγιστικά ίδιες, για μεγαλύτερη ακρίβεια.

Πίνακας 4.1: Von Misses Element stress (kN/cm²) στις θέσεις περιμετρικά της οπής για κάθε μέγεθος πεπερασμένου

mm πεπερασμένου	1η οπής	2η οπής	3η οπής	4η οπής
150	17,45	20,79	18,18	22,96
140	19,09	21,24	19,82	23,44
130	19,05	21,24	19,76	23,44
120	19,01	21,22	19,76	23,48
110	19,68	21,43	20,47	23,64
100	19,62	21,47	20,42	23,69
90	20,57	21,59	21,29	23,84
80	20,63	21,57	21,39	23,84
70	20,96	21,79	21,8	23,94
60	21,51	21,82	22,23	24,09
50	21,97	21,89	22,84	24,2
40	22,5	21,97	23,05	24,22
30	23,17	22,07	23,07	24,27
20	23,2	22,08	23,08	24,3



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα πύκνωσης πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων - αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης 1



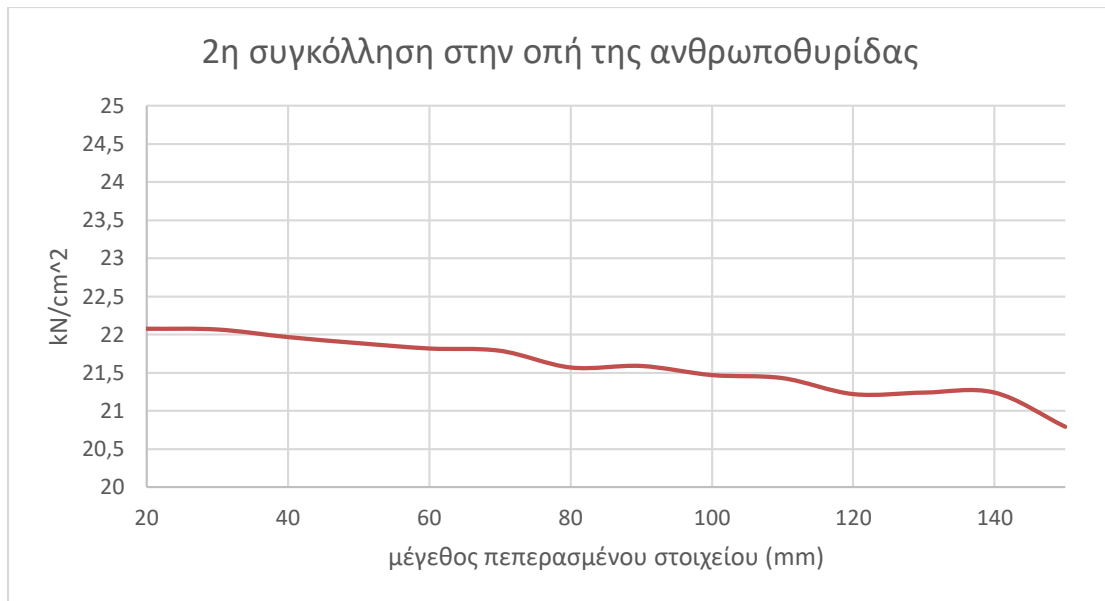
Σχήμα 4.6: Λεπτομέρεια για μεγέθη πλευράς πεπερασμένων στοιχείων 40, 30 και 20mm

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα (4.32) για μέγεθος πεπερασμένου μικρότερο των 60mm το διάγραμμα τείνει ασυμπτωτικά προς μια σταθερή τιμή, και συγκεκριμένα οι τιμές για μέγεθος μικρότερο των 30mm προσεγγιστικά ταυτίζονται. Αυτή η προσεγγιστική ταύτιση είναι και ο στόχος μας, οπότε εφαρμόζοντας τον έλεγχο σύγκλισης των τάσεων για στοιχείο μεγέθους 30cm και 20cm, προκύπτει ότι

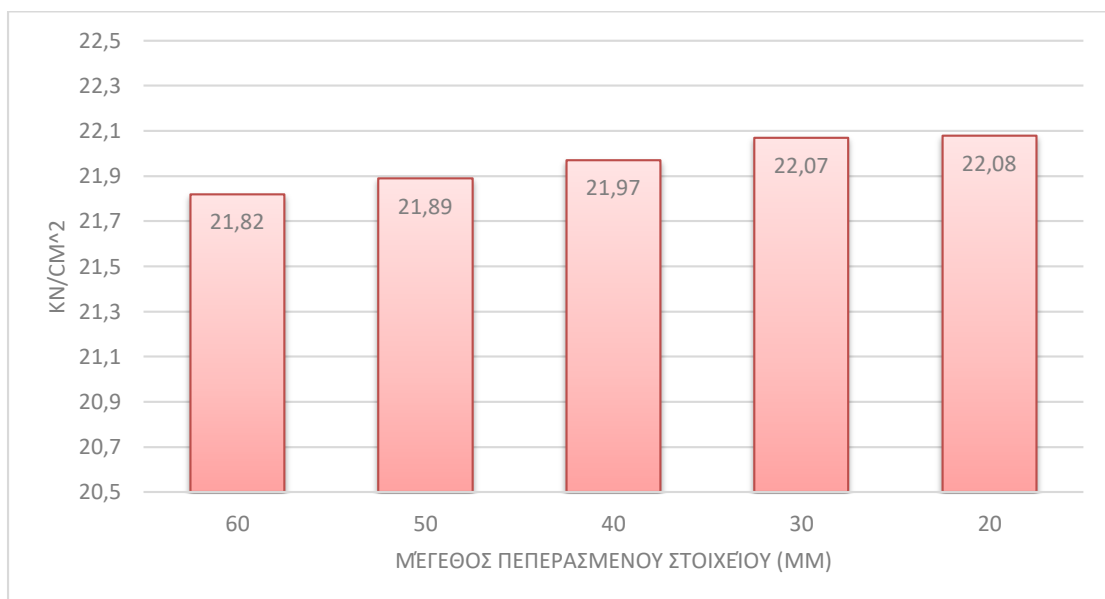
$$\frac{(23,2 - 23,17)}{23,2} = 1 \%$$

Συνεπώς, παρατηρείται ότι ενώ το πλέγμα πεπερασμένων μεγέθους 50 mm θα ήταν επαρκές σύμφωνα με το κριτήριο της σύγκλισης, δεδομένου του περιθωρίου που έχουμε από υπολογιστικής πλευράς, επιλέγεται η μεγαλύτερη ακρίβεια την οποία μας παρέχει ένα πλέγμα πεπερασμένων πλευράς 30mm για τις αναλύσεις που θα γίνουν. Χρήσιμο είναι να σημειωθεί, ότι για μέγεθος πεπερασμένου 30mm και ανάλυση σε όρους nodal stress, η τάση που προκύπτει στην συγκεκριμένη συγκόλληση είναι ίση με 23.05 kN/cm², πολύ κοντά σε αυτή που υπολογίσαμε για element stress, γεγονός που αποδεικνύει ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του πεπερασμένου που θα χρησιμοποιηθεί, η μέθοδος υπολογισμού τείνει να μην επηρεάζει τα υπολογισμένα αποτελέσματα.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκε η σύγκλιση για τις υπόλοιπες συγκολλήσεις, με το διάγραμμα της 2^{ης}, σύμφωνα με το σχήμα 4.7 να τείνει προς μια σταθερή τιμή για πλέγμα στοιχείων διάστασης μικρότερης των 100mm.



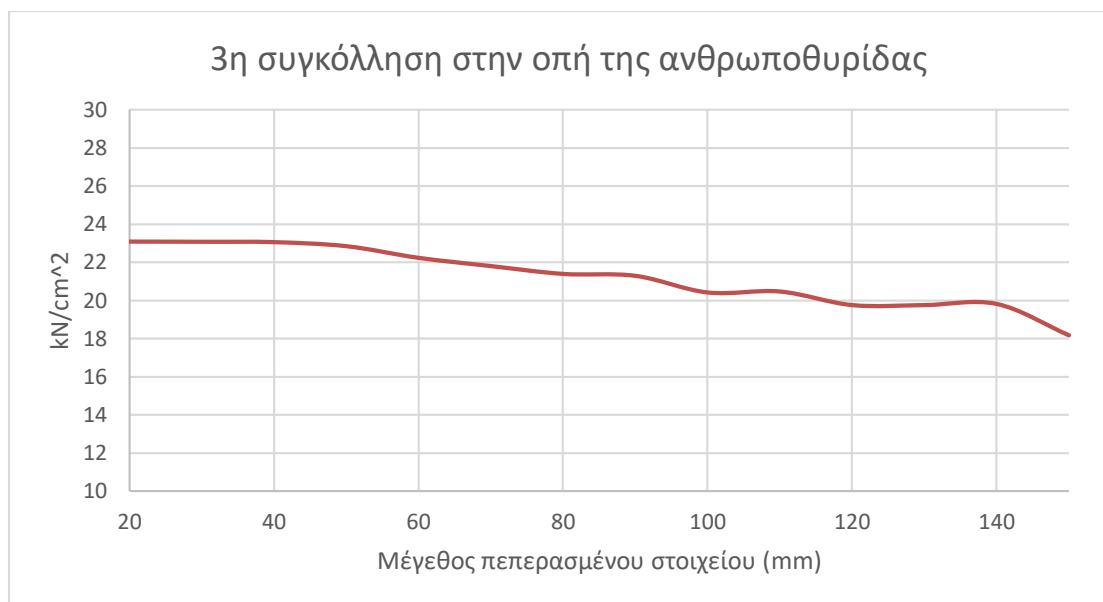
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα πύκνωσης πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων - αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης 2



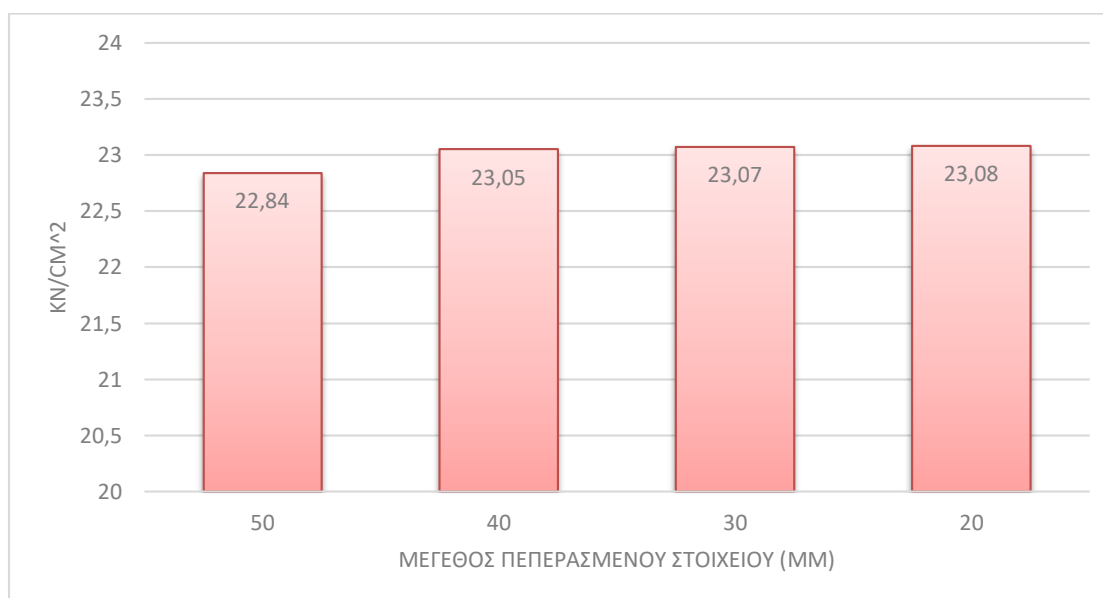
Σχήμα 4.8: Λεπτομέρεια για μεγέθη πλευράς πεπερασμένων στοιχείων 60, 50, 40, 30 και 20mm.

Δεδομένου όμως ότι για την 1^η συγκόλληση είχαμε επαρκή σύγκλιση αναπτυσσόμενων τάσεων για προσομοίωμα με πλέγμα διάστασης πεπερασμένου τα 30mm, και αφού θα χρησιμοποιηθεί ενιαίο πλέγμα για όλο τον φορέα, προκύπτει ότι και σε αυτή την συγκόλληση εμφανίζεται απόλυτη σύγκλιση για πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ίδιας διάστασης.

Με την ίδια λογική υπολογίστηκαν και οι υπόλοιπες συγκολλήσεις, ελέγχοντας κάθε φορά εάν με το πλέγμα των 30mm επιτυγχάνεται επαρκής σύγκλιση των αναπτυσσόμενων τάσεων.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα πύκνωσης πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων - αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης 3



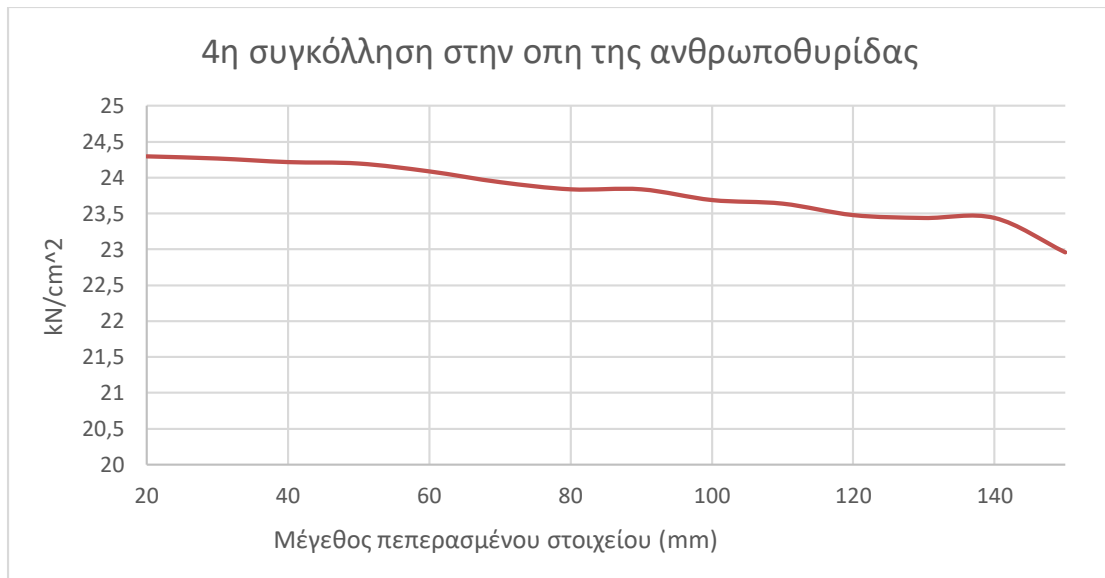
Σχήμα 4.10: Λεπτομέρεια για μεγέθη πλευράς πεπερασμένων στοιχείων 50, 40, 30 και 20mm.

Όπου πάλι έχουμε επαρκή σύγκλιση των αποτελεσμάτων, για μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου 30mm,

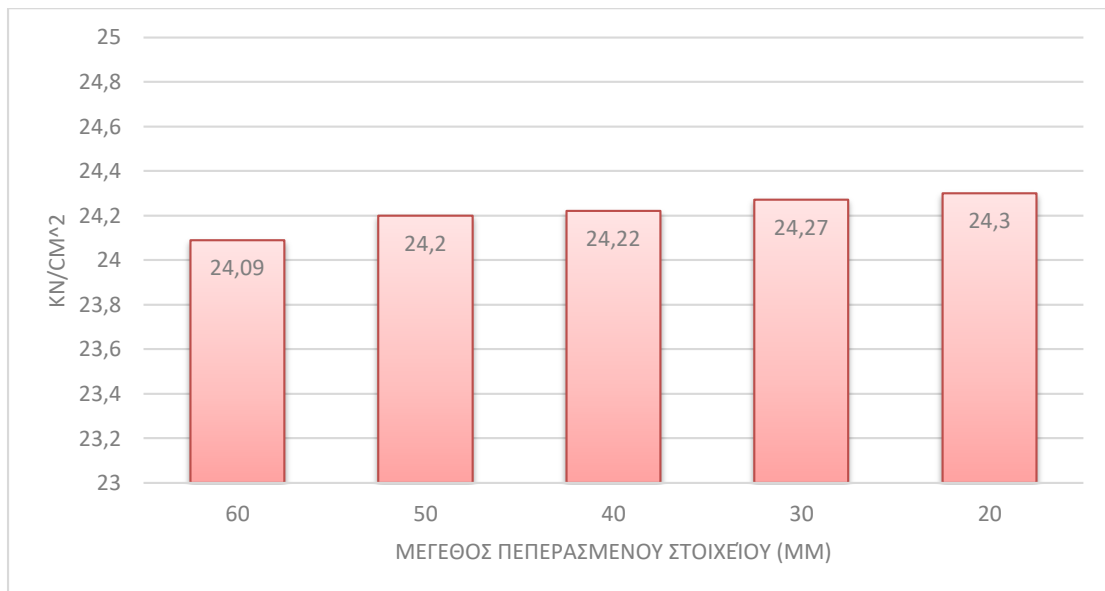
$$\frac{(23.08 - 23.07)}{23.08} \approx 0$$

Άρα και εδώ φτάνει σε ποσοστό σύγκλισης προσεγγιστικά το 100%

Για την τελευταία συγκόλληση του ενισχυτικού κολάρου στην οπή της ανθρωποθυρίδας, έχουμε ότι :



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα πυκνώσης πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων - αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης 4



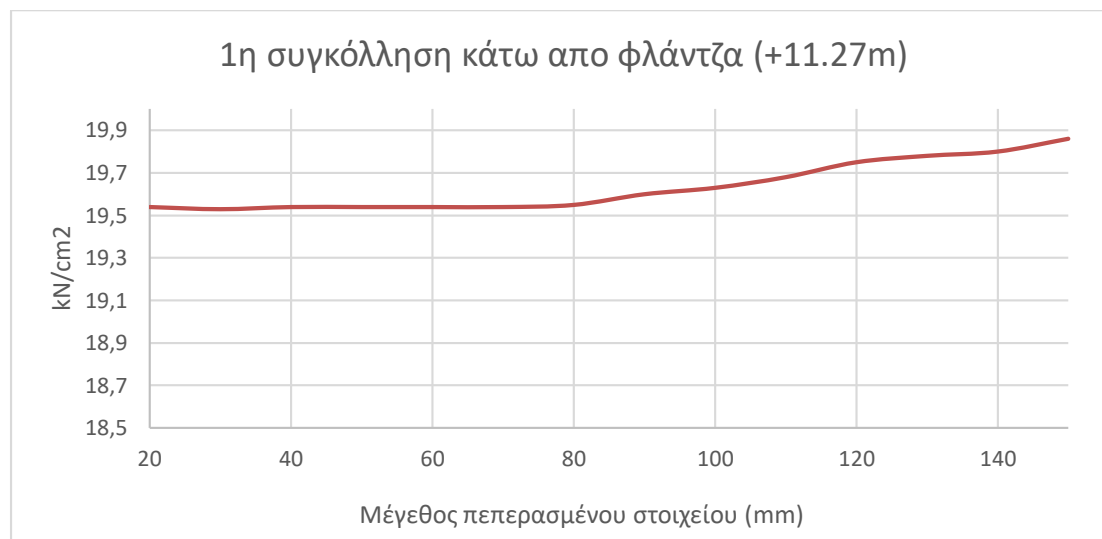
Σχήμα 4.12: Λεπτομέρεια για μεγέθη πλευράς πεπερασμένων στοιχείων 60, 50, 40, 30 και 20mm.

Οπότε και επιτυγχάνεται σύγκλιση σε ποσοστό 99.5%.

Γίνεται λοιπόν εμφανές ότι η κρίσιμη συγκόλληση, η οποία χαρακτηρίζει το πλέγμα που θα χρησιμοποιηθεί να είναι επαρκώς πυκνό ώστε οι τάσεις που θα αναπτυχθούν σε αυτή να μην εξαρτώνται από το πλήθος των πεπερασμένων που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι η 1^η συγκόλληση μεταξύ κολάρου ενίσχυσης ανθρωποθυρίδας και κελύφους πυλώνα, δεδομένης της πιο απαιτητικής γεωμετρίας σε εκείνο το σημείο του πυλώνα. Για όλα τα υπόλοιπα σημεία η σύγκλιση επιτυγχάνεται σε πολύ πιο αραιό πλέγμα, αλλά δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία ερευνάται η κόπωση στις συγκολλητές συνδέσεις, συνεπώς το μοντέλο πρέπει να δίνει ακριβή αποτελέσματα για όλες τις θέσεις συγκολλήσεων, και ιδίως σε αυτές γύρω από την ανθρωποθυρίδα, επιλέχθηκε το μέγεθος του πεπερασμένου που θα χρησιμοποιηθεί για το πλέγμα να είναι αυτό των 30mm. Αξίζει να αναφερθεί ότι για τις υπόλοιπες οριζόντιες συγκολλήσεις μεταξύ των τμημάτων του πυλώνα θα επαρκούσε πλέγμα πεπερασμένων

μεγέθους ακόμα και 70mm, αφού η τάση είναι οριακά σταθερή για μικρότερα μεγέθη, αλλά δεν θα μπορούσαν να καλυφθούν οι απαιτήσεις στην περιοχή της ανθρωποθυρίδας, στην οποία η γεωμετρία είναι πιο πολύπλοκη.

Αναφορικά, παρουσιάζεται για εφαρμογή ίδιων εντατικών μεγεθών, οι αναπτυσσόμενες τάσεις που εμφανίζονται για σταδιακή πύκνωση του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων για την πρώτη συγκόλληση κάτω από την φλάντζα του εξεταζόμενου τμήματος (+11,27m).



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα πύκνωσης πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων - αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιοχή της 1^{ης} οριζόντιας συγκόλλησης κάτω από την φλάντζα του προσομοιώματος μελέτης (+11,27m)

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, η τάση που αναπτύσσεται όσο πυκνώνουμε το πλέγμα πέρα των 80mm, είναι σταθερή και ίση με 19,4 kN/cm², ανεπηρέαστη από το μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου που χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση.

4.3 Σύγκριση ιδιομορφών πυλώνα ανεμογεννήτριας – Έλεγχος συντονισμού

Τελικώς έγινε άλλη μια προσέγγιση, αυτή την φορά όλου του πραγματικού φορέα της ανεμογεννήτριας για την σύγκριση του μοντέλου των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, με αυτό του συνδυασμένου προσομοιώματος, αυτή την φορά όσον αφορά την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής σε κάθε περίπτωση, για την κατανόηση της συμπεριφοράς του πυλώνα στο σύνολο του. Για την μελέτη ιδιοσυχνοτήτων, τοποθετήθηκε μάζα ίση με $(2970 \text{ kN})/g \approx 300000 \text{ kgr}$

Πράγματι, η σύγκριση των ιδιοσυχνοτήτων των δύο μοντέλων είναι επαρκής. Συγκεκριμένα, για το μοντέλο των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, για πλέγμα πεπερασμένων 30mm προέκυψαν οι εξής ιδιοσυχνότητες :

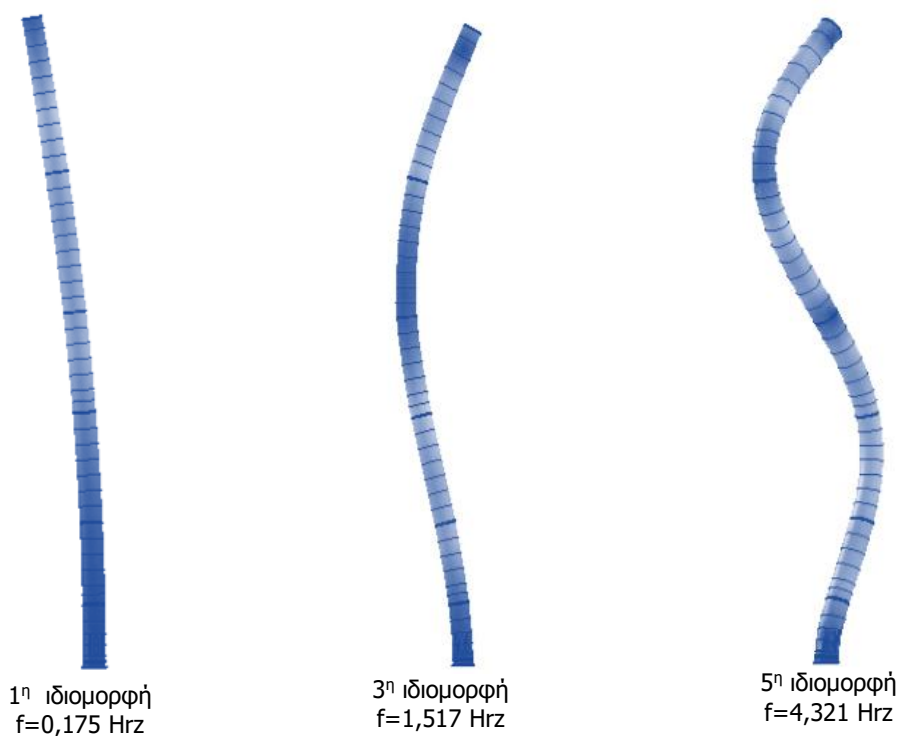
Πίνακας 4.2 :Ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν για μοντέλο αποτελούμενο από 3D solid πεπερασμένα στοιχεία

Ιδιομορφή	Ιδιοσυχνότητα (Hrz)	Ιδιοπερίοδος (sec)	ω (rad/sec)
1	0.173	5.795	1.084
2	0.174	5.745	1.0933
3	1.517	0.659	9.531
4	1.535	0.651	9.646
5	4.381	0.228	27.527

Αντίστοιχα, για το μοντέλο με τον συνδυασμό στοιχείων κελύφους – τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, οι ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν είναι οι εξής:

Πίνακας 4.3 : Ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν για μοντέλο αποτελούμενο από 3D solid και shell πεπερασμένα στοιχεία

Ιδιομορφή	Ιδιοσυχνότητα(Hrz)	Ιδιοπερίοδος (s)	ω (rad/s)
1	0.175	5.709	1.101
2	0.176	5.675	1.107
3	1.517	0.659	9.533
4	1.527	0.655	9.593
5	4.321	0.231	27.152
6	4.386	0.228	27.558



Σχήμα 4.14: Ιδιομορφές ταλάντωσης πυλώνα ανεμογεννήτριας για πάκτωση στο έδαφος

Δεδομένου ότι κατασκευή καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας της, θα υπόκειται σε περιοδικές κινήσεις, τόσο λόγω της περιστροφής των πτερυγίων της, όσο και λόγω του ανέμου που αποτελεί έντονα εναλλασσόμενη κυκλική φόρτιση, κρίνεται αναγκαίος ο έλεγχος των ταλαντώσεων αυτής. Από την ιδιομορφική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε προσδιορίστηκαν οι ιδιοπερίοδοι της κατασκευής, με σκοπό την διερεύνηση εάν βρίσκονται σε αποδεκτά όρια. Για την αποφυγή συντονισμού της κατασκευής, πρέπει οι ιδιοσυχνότητες αυτής να απέχουν αρκετά τόσο από την συχνότητα περιστροφής του ρότορα, όσο και από την συχνότητα διέλευσης του πτερυγίου μπροστά από τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας.

Ο έλεγχος των ιδιοσυχνοτήτων έγινε απλοποιητικά για το προσομοίωμα πακτωμένο στο έδαφος. Για επαρκή έλεγχο, θα έπρεπε να γίνει μια ακριβέστερη διερεύνηση της συμπεριφοράς του εδάφους θεμελίωσης, ώστε να ληφθεί υπόψη η ελαστικότητα του στις αναλύσεις, καθώς επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης της κατασκευής.

Από τον κατασκευαστή ορίζεται η συχνότητα περιστροφής του ρότορα 1P, η οποία είναι ίση με 0,984rad/sec (=9,4rpm), από την οποία προκύπτει και η συχνότητα διέλευσης διαδοχικών πτερυγίων μπροστά από τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας 3P, και ισχύει ότι: $3P = 3 \cdot 0,984 = 2,94 \text{ rad/sec}$.

Οι συχνότητες αυτές εισάγουν αυξανόμενα δυναμικά φορτία, λόγω πιθανής αστάθειας αυτού ή ακόμα και λόγω των διατμητικών δυνάμεων του ανέμου. Για να αποφευχθεί ο έλεγχος συντονισμού σύμφωνα με το πρότυπο του οργανισμού "DNV/Riso", αρκεί να πληρείται το κριτήριο σύμφωνα με το οποίο, οι ιδιοσυχνότητες της κατασκευής πρέπει να απέχουν $\pm 10\%$ από τις συχνότητες 1P και 3P. Για ανεμογεννήτριες δύο ρότορες, ή δύο ταχύτητες αυτού, η ίδια ανάλυση θα έπρεπε να γίνει για τις δύο συχνότητες περιστροφής του ρότορα. Μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δοθεί για γεννήτριες, οι οποίες λειτουργούν σε μεταβαλλόμενη ταχύτητα. Σε αυτή την περίπτωση, η ανεμογεννήτρια θα πρέπει να είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να μην επιτρέπεται να λειτουργήσει για συχνότητα με μικρότερη απόκλιση από $\pm 10\%$ της ιδιοσυχνότητάς της.

Όπως υπολογίστηκε προηγουμένως, οι πρώτες πέντε ιδιοσυχνότητες ελεύθερης ταλάντωσης του πυλώνα της ανεμογεννήτριας για συνθήκες πλήρους δέσμευσης όλων των βαθμών ελευθερίας στην βάση του πυλώνα αναφέρονται στους πίνακες (4.12) , (4.13).

Παρατηρείται ότι οι συχνότητες ελεύθερης ταλάντωσης του πυλώνα απέχουν επαρκώς από τα όρια, αφού

$$\frac{(1,084-0,984)}{0,984} = 10\% \quad \text{και} \quad \frac{(2,94-1,094)}{1,094} = 163\%$$

4.4 Τελικό προσομοίωμα

Βασικός παράγοντας που επηρεάζει το ποιο προσομοίωμα θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του πυλώνα της κατασκευής είναι το υπολογιστικό κόστος των αναλύσεων. Δεδομένου ότι το πλήθος των αναλύσεων είναι μεγάλο, ο εξαιρετικά μεγάλος αριθμός στοιχείων που απαιτεί η ανάλυση για τρισδιάστατα πεπερασμένα φορτία καθ' όλο το ύψος του πυλώνα και συνεπώς ο υπολογιστικός χρόνος που αυτό συνεπάγεται, κάνουν πολύ δυσχερή την ανάλυση για το προσομοίωμα των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο θεωρείται το πιο ακριβές μεταξύ αυτών. Αξίζει να αναφερθεί ότι για ίδιο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, η ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων για το 1^ο προσομοίωμα χρειάστηκε πενταπλάσιο χρόνο από αυτή του 2^{ου}. Αυτό κάνει επίσης σαφές ότι το μοντέλο των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων δεν αφήνει

περιθώρια επαρκούς πύκνωσης του πλέγματος που χρησιμοποιείται δεδομένου του υπολογιστικού όγκου που θα συνεπαγόταν κάτι τέτοιο.

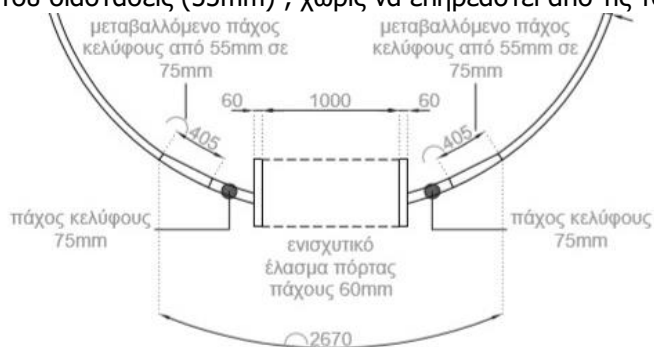
5. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΠΗ ΤΗΣ ΑΝΘΡΩΠΟΘΥΡΙΔΑΣ

5.1 Αναγκαιότητα ύπαρξης ενισχυτικού κολάρου

Λόγω του ολοένα και μεγαλύτερου ύψους των πυλώνων των ανεμογεννητριών καθώς και της αύξησης της διαμέτρου των πτερυγίων, για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του ανέμου για την παραγωγή ενέργειας, η βάση του πυλώνα υπόκειται σε μεγάλες καμπτικές ροπές επομένως και μεγάλες θλιπτικές τάσεις που δημιουργούν κίνδυνο τοπικού λυγισμού του τοιχώματος του πυλώνα. Κοντά στην βάση του πυλώνα ανοίγεται ταυτόχρονα και μια οπή ανθρωποθυρίδας, η οποία εξυπηρετεί την προσβασιμότητα στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες για έλεγχο του μηχανολογικού εξοπλισμού της, καθώς και για συντήρηση αυτού. Η παρουσία αυτής της οπής, της οποίας οι διαστάσεις δεν είναι αμελητέες, οδηγεί σε σημαντικές συγκεντρώσεις τάσεων τοπικά στο σημείο διάνοιξης της, οι οποίες προκαλούν κίνδυνο τοπικού λυγισμού του κελύφους στην περιοχή πλησίον της ανθρωποθυρίδας, και συνεπώς μείωση σε μεγάλο βαθμό της αντοχής του πυλώνα στο σημείο αυτό. Κάτι τέτοιο λοιπόν, κρίνεται αναγκαίο να διερευνηθεί κατά τον σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας. Συχνή αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού είναι η ενίσχυση της περιοχής γύρω από την ανθρωποθυρίδα, για την επαναφορά της χαμένης αντοχής του πυλώνα αυτής. Υπάρχουν πολλές πρακτικές ενίσχυσης του κελύφους σε αυτό το σημείο, με διαφορετικό βαθμό αποδοτικότητας η κάθε μία. Συνήθης πρακτική αποτελεί η σταδιακή πάχυνση τοπικά του κελύφους του πυλώνα στα σημεία γύρω από την οπή της ανθρωποθυρίδας, και ταυτόχρονα η τοποθέτηση ενός ενισχυτικού πλαισίου σταθερής διατομής, περιμετρικά συγκολλημένο στην παρεία του ανοίγματος. Σκοπός αυτών των ενισχύσεων είναι η επαναφορά της αντοχής του πυλώνα στα επίπεδα που ήταν αυτή, προτού διανοιχθεί η οπή. Συνεπώς επιδιώκεται οι τοπικές ενισχύσεις να αυξήσουν την αντοχή του πυλώνα που μειώθηκε με την διάνοιξη της οπής.

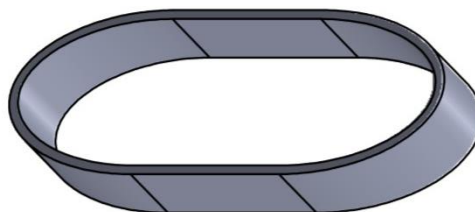
Στην συγκεκριμένη εργασία, το είδος και οι διαστάσεις των ενισχύσεων που εφαρμόζονται στην ανεμογεννήτρια, δίνονται από την κατασκευαστική εταιρία, και αποτελούνται από :

- Τοπική πάχυνση του κελύφους του πυλώνα, στα τμήματα του οποίου διανοίγεται η οπή. Στην περιοχή γύρω από την οπή, το πάχος του κελύφους είναι 75mm, για ένα τμήμα μήκους τόξου 40cm το πάχος είναι σταδιακά μεταβαλλόμενο, ξεκινώντας από 75mm και καταλήγοντας σε 55mm, και το υπόλοιπο τμήμα του πυλώνα διατηρεί τις αρχικές του διαστάσεις (55mm) , χωρίς να επηρεαστεί από τις τοπικές παχύνσεις,



Σχήμα 5.1: Λεπτομέρεια περιοχής διάνοιξης οπής

- Ενισχυτικός δακτύλιος, ύψους 3m και πλάτους 1.06m, σταθερού πάχους 60mm, ο οποίος είναι συγκολλημένος με εσωραφή και εξωραφή στην περιφέρεια της οπής.



Σχήμα 5.2: Ενισχυτικό κολάρο

Κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθεί, σε τι βαθμό επηρεάζει την αντοχή του πυλώνα η ύπαρξη οπής, καθώς και σε τι βαθμό συνεισφέρει κάθε είδος ενίσχυσης στην επαναφορά αυτής, αφού έχει διανοιχθεί η οπή. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν 5 προσομοιώματα, του πρώτου τμήματος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας μέχρι την φλάντζα πάνω από την ανθρωποθυρίδα (σε ύψος +11.48m).

- Πλήρης διατομή κελύφους, χωρίς διάνοιξη οπής
- Διατομή κελύφους με διάνοιξη οπής ανθρωποθυρίδας, αρχικού πάχους, χωρίς ενισχύσεις
- Διατομή κελύφους με οπή ανθρωποθυρίδας και τοπική πάχυνση του πυλώνα
- Διατομή του κελύφους με οπή ανθρωποθυρίδας και ενισχυτικό πλαίσιο συγκολλημένο περιμετρικά της οπής
- Πραγματική διατομή, με πάχυνση του κελύφους και ενισχυτικό πλαίσιο

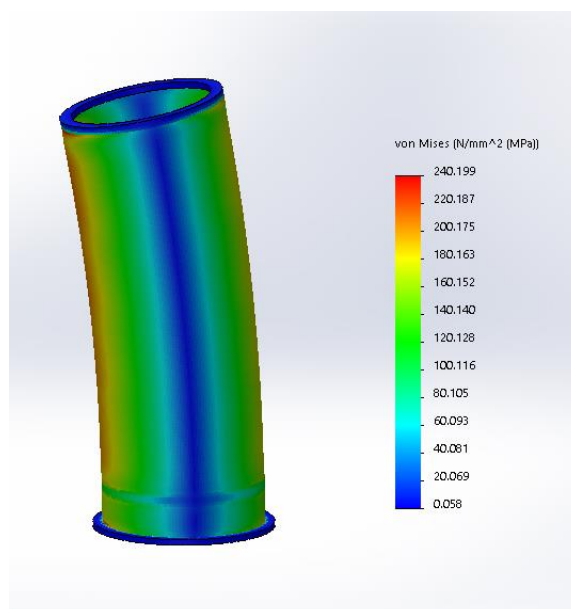
Σε κάθε προσομοίωμα, τα φορτία που εφαρμόστηκαν ήταν τα μέγιστα εντατικά φορτία σχεδιασμού που αναπτύσσονται στην διατομή +11,48m

Πίνακας 4.4: Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού στην στάθμη ελέγχου (+11,48m)

	F_z (kN)	F_y (kN)	F_x (kN)	M_z (kNm)	M_y (kNm)	M_x (kNm)
maxMr	7845	24	1225	-3200	135950	7030

5.1.1 Πλήρης διατομή κελύφους, χωρίς διάνοιξη οπής

Πρώτο προσομοίωμα που ελέγχθηκε, ήταν αυτό με την πλήρη διατομή του κελύφους, χωρίς οπή, για πάχος κελύφους 55mm. Τα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή των εντατικών μεγεθών ήταν τα εξής :

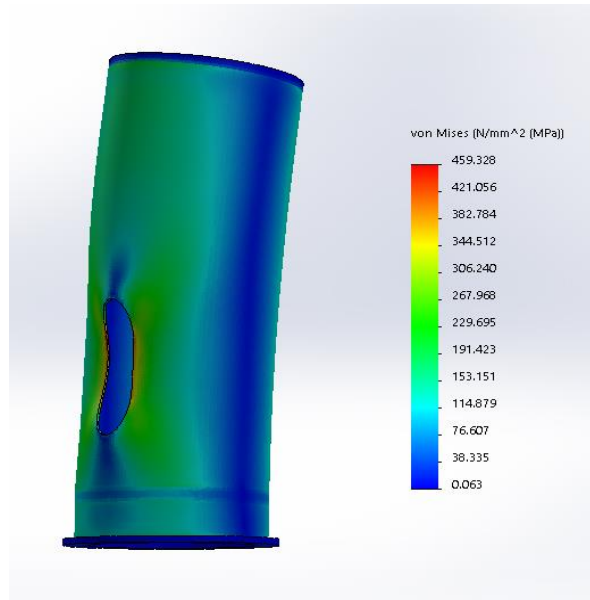


Σχήμα 5.3: Πλήρης διατομή κελύφους, χωρίς διάνοιξη οπής

Όπως φαίνεται στο σχήμα, η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση είναι της τάξης των 24 kN/cm².

5.1.2 Διατομή κελύφους με διάνοιξη οπής ανθρωποθυρίδας, αρχικού πάχους, χωρίς ενισχύσεις

Στο δεύτερο προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε, διανοίχθηκε ελλειψοειδής οπή ανθρωποθυρίδας μέγιστου ύψος 3.17m και πλάτους 1.12m, χωρίς να γίνει καμία αλλαγή στις διαστάσεις του κελύφους. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, για τα ίδια εντατικά μεγέθη όπως και πριν ήταν τα εξής:

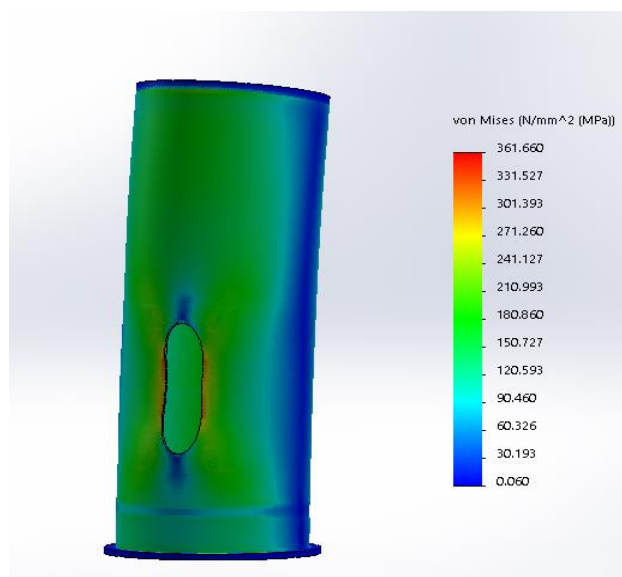


Σχήμα 5.4: Διατομή κελύφους με διάνοιξη οπής ανθρωποθυρίδας, αρχικού πάχους, χωρίς ενισχύσεις

Όπως φαίνεται στην εικόνα, υπάρχει υπέρβαση κατά πολύ της αντοχής του πυλώνα της ανεμογεννήτριας (συγκεκριμένα κατά 29%) μετά την διάνοιξη της οπής της ανθρωποθυρίδας, ενώ η περιοχή της αστοχίας συγκεντρώνεται γύρω από την οπή, όπου τοπικά παρουσιάζεται μεγάλη υπέρβαση των αναπτυσσόμενων τάσεων, ενώ ο υπόλοιπος πυλώνας δεν παρουσιάζει κάποια άλλη τοπική υπέρβαση. Είναι επομένως προφανές, ότι η περιοχή της οπής χρειάζεται κάποιου είδους ενίσχυση τοπικά για να αποκατασταθεί η αντοχή του πυλώνα.

5.1.3 Διατομή κελύφους με οπή ανθρωποθυρίδας και τοπική πάχυνση του πυλώνα

Αρχικά, ελέγχεται το ποσοστό στο οποίο επηρεάζει την συνολική αντοχή του δοκιμαστικού τμήματος του πυλώνα η τοπική πάχυνση του κελύφους του πυλώνα στην περιοχή γύρω από την οπή. Για τον λόγο αυτό, δημιουργήθηκε το 3^ο προσομοίωμα, στο οποίο το τμήμα με την σταδιακή πάχυνση λαμβάνεται ολόκληρο με πάχος ίσο με το μέσο πάχος, δηλαδή 65mm, ενώ το τμήμα γύρω από την οπή έχει πάχος ίσο με 75mm.

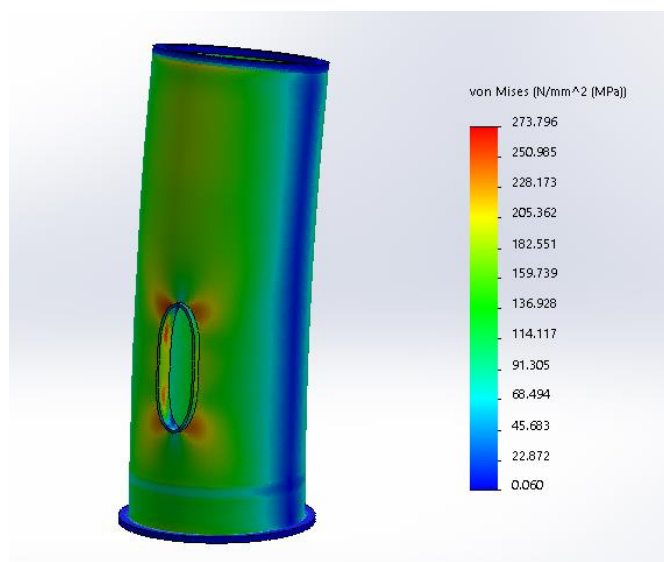


Σχήμα 5.5: Διατομή κελύφους με οπή ανθρωποθυρίδας και τοπική πάχυνση του πυλών

Όπως φαίνεται στην εικόνα, η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση είναι αρκετά μικρότερη από αυτή που εμφανιζόταν για το μοντέλο χωρίς καμία ενίσχυση, όμως και πάλι δεν φτάνει σε επίπεδο αποδεκτό, ώστε να προσομοιάσει την αντοχή του κελύφους πριν την διάνοιξη της οπής. Συνεπώς η πλάτυνση μόνο του κελύφους δεν επαρκεί για την επαναφορά της χαμένης αντοχής του πυλώνα λόγω της διάνοιξης της οπής. Βελτιώνει όμως την αντοχή κατά ένα ποσοστό της τάξης του 20%.

5.1.4 Διατομή του κελύφους με οπή ανθρωποθυρίδας και ενισχυτικό πλαίσιο συγκολλημένο περιμετρικά της οπής

Επόμενη δοκιμή, ήταν ο έλεγχος του κατά πόσο βελτιώνει την συμπεριφορά της διατομής η ύπαρξη σκέτου ενισχυτικού πλαισίου, συγκολλημένου περιμετρικά στην οπή της ανθρωποθυρίδας (χωρίς ταυτόχρονη πάχυνση της διατομής γύρω από την οπή).

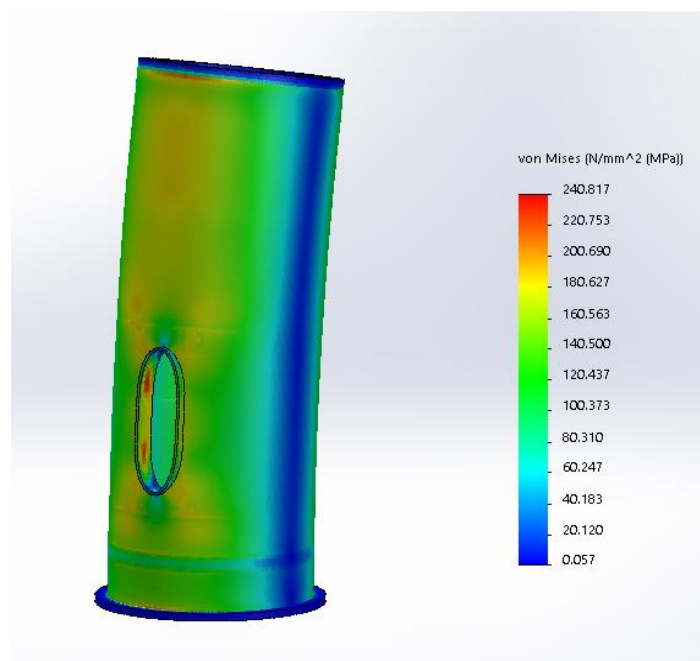


Σχήμα 5.6: Διατομή του κελύφους με οπή ανθρωποθυρίδας και ενισχυτικό πλαίσιο συγκολλημένο περιμετρικά της οπής

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η αναπτυσσόμενη μέγιστη τάση σε αυτό το δοκιμαστικό μοντέλο, είναι βελτιωμένη σε σχέση με την ενίσχυση μέσω πλάτυνσης του κελύφους του φορέα, (συνεπώς το ενισχυτικό πλαίσιο σταθερής διατομής βελτιώνει σε μεγαλύτερο βαθμό την αντοχή της κατασκευής). Όμως, και σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται ότι όσο βελτιωμένη και να είναι η αντοχή της κατασκευής, δεν φτάνει τα επίπεδα αυτής του ενιαίου κελύφους, οπότε και σε αυτή την περίπτωση, η βελτίωση της διατομής δεν επιτυγχάνει τον αρχικό της στόχο, να φτάσει την αντοχή της κατασκευής στα επίπεδα που ήταν πριν την οπή της ανθρωποθυρίδας.

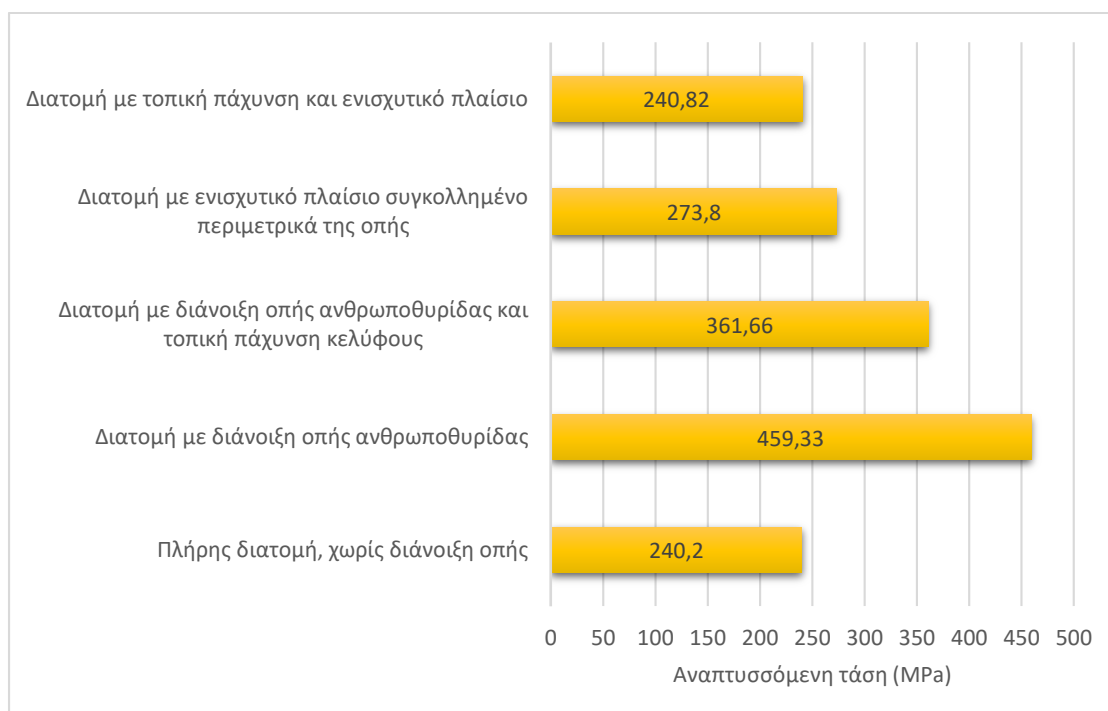
5.1.5 Πραγματική διατομή, με πάχυνση του κελύφους και ενισχυτικό πλαίσιο

Τελευταίο μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις συγκρίσεις, ήταν αυτό της πραγματικής γεωμετρίας του φορέα, όπως έχει δοθεί από τους κατασκευαστές της ανεμογεννήτριας. Έπειτα από εφαρμογή των ίδιων εντατικών μεγεθών, τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής :



Σχήμα 5.7: Πραγματική διατομή, με πάχυνση του κελύφους και ενισχυτικό πλαίσιο

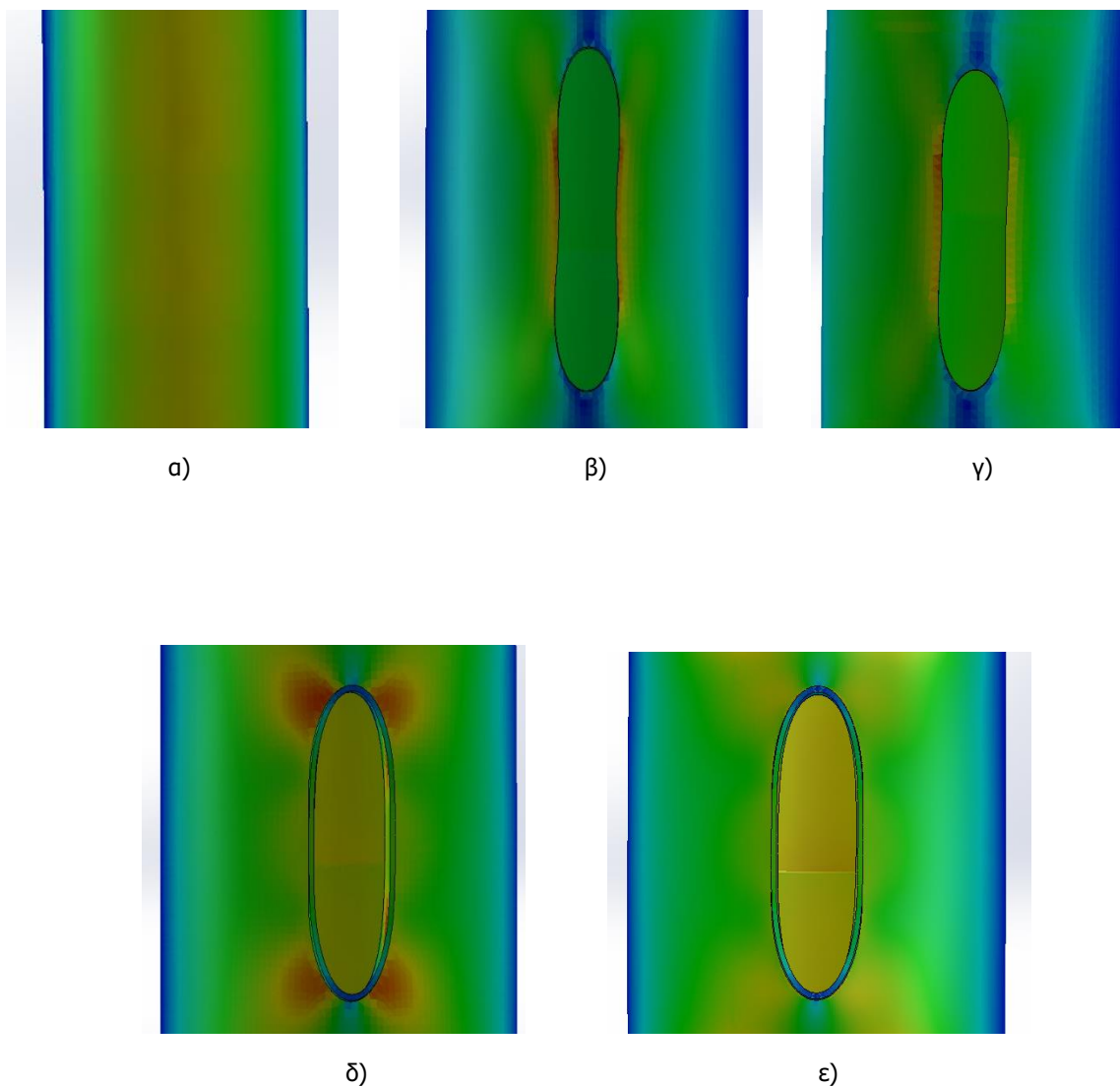
Όπως φαίνεται και από την ανάλυση, αυτή η γεωμετρία του φορέα οδηγεί σε συμπεριφορά της διατομής πανομοιότυπη με αυτή πριν την διάνοιξη οπής, με την ενιαία διάμετρο του κελύφους του πυλώνα. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στον φορέα αναπτύσσεται και πάλι στην περιοχή συγκόλλησης του ενισχυτικού ελάσματος και της οπής του κελύφους, όμως ο φορέας έχει «ανακουφιστεί» αισθητά, δεν αναπτύσσονται πλέον τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων στο σημείο διάνοιξης της οπής οι οποίες υπερβαίνουν την αντοχή του φορέα, και δεν παρατηρείται τοπικός λυγισμός του κελύφους στην περιοχή γύρω από την ανθρωποθυρίδα.



Σχήμα 5.8: Συγκριτικό διάγραμμα αναπτυσσόμενων τάσεων για κάθε προσομοίωμα που υπολογίστηκε

5.1.6. Τοπική παραμόρφωση του φορέα - Σύγκριση

Παρακάτω γίνεται και μια σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων των πέντε διαφορετικών προσομοιωμάτων, ως προς την μορφή του παραμορφωμένου σχήματος, συγκεκριμένα στο σημείο της οπής, όπου γίνεται εμφανής ο τοπικός λυγισμός του κελύφους του φορέα, αλλά και η αυξημένη συγκέντρωση τάσεων, τοπικά στην περιοχή γύρω από την ανθρωποθυρίδα. Τα αποτελέσματα της φόρτισης έχουν μεγεθυνθεί αισθητά, ώστε να φαίνεται ξεκάθαρα η μορφή του παραμορφωμένου σχήματος.

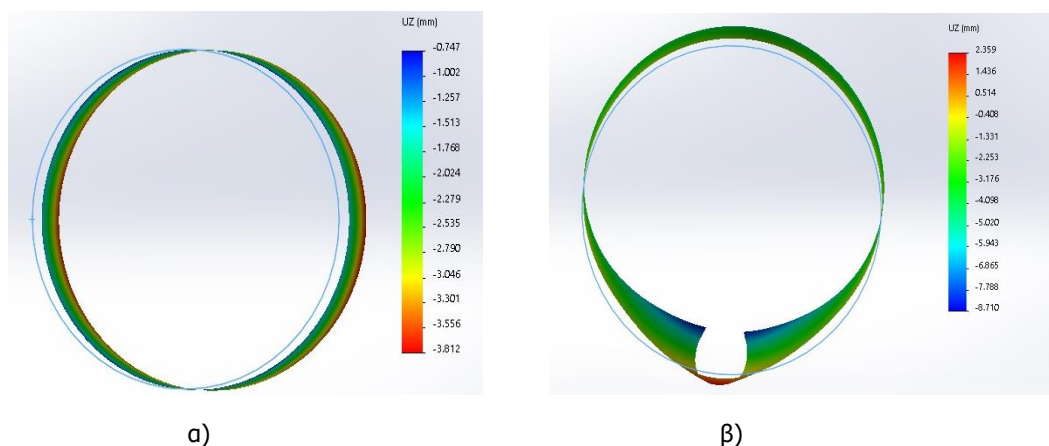


Σχήμα 5.9: Μορφές παραμορφωμένου σχήματος πυλώνα στην περιοχή της οπής της ανθρωποθυρίδας, α) χωρίς οπή, β) με οπή, χωρίς ενίσχυση, γ) με πάχυνση της περιοχής γύρω από την οπή, δ) με ενισχυτικό κολάρο περιμετρικά της οπής, ε) με πάχυνση πυλώνα γύρω από την οπή και ενισχυτικό κολάρο

Όπως φαίνεται από τις εικόνες μετά από κάθε σενάριο ανάλυσης (με ενισχύσεις ή χωρίς) η επιρροή του κάθε είδους ενίσχυσης γίνεται εμφανής στην περιοχή της οπής της ανθρωποθυρίδας. Συγκεκριμένα, για έλλειψη ενισχύσεως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9β το κέλυφος του πυλώνα λυγίζει τοπικά στην περιοχή της οπής. Όμοια, και για τοπική πάχυνση της περιοχής γύρω από την οπή, το κέλυφος του πυλώνα κινδυνεύει ακόμα σε τοπικό λυγισμό, με τις αναπτυσσόμενες τάσεις αυτή την φορά να είναι μικρότερες. Για το σενάριο στο οποίο

τοποθετείται ενισχυτικό πλαίσιο σταθερού πάχους περιμετρικά της οπής, η εικόνα του παραμορφωμένου πυλώνα είναι εμφανώς βελτιωμένη, όμως η έλλειψη πάχυνσης του ελάσματος του πυλώνα στην περιοχή γύρω από την οπή, οδηγεί σε τοπική ανάπτυξη μεγάλων εντάσεων. Συνεπώς, είναι εμφανής η ανάγκη του συνδυασμού των δύο ενισχύσεων (τοπικής πάχυνσης και ενισχυτικού κολλάρου), ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιοχή της οπής να επανέλθουν σε επίπεδα στα οποία ήταν πριν την διάνοιξη της οπής.

Όσο αφορά τις μετατοπίσεις στο ύψος της οπής της ανθρωποθυρίδας, παρουσιάζονται ενδεικτικά για το προσομοίωμα του κελύφους της ανεμογεννήτριας, πριν την διάνοιξη οπής, καθώς και αυτού μετά την διάνοιξή της, χωρίς να έχουν γίνει τοπικές ενισχύσεις, οι κατόψεις σε ύψος +4,11m (στο μέσον της οπής) στις οποίες φαίνεται τόσο η κάτοψη του πυλώνα πριν την παραμόρφωση, όσο και το παραμορφωμένο σχήμα μετά την επιβολή του φορτίου (κλίμακα παραμόρφωσης $\times 100$). Όπως παρατηρείται από τα σχήματα, στο προσομοίωμα μετά την διάνοιξη της οπής της ανθρωποθυρίδας, είναι εμφανής η ανάπτυξη τοπικού λυγισμού του κελύφους, καθώς στην περιοχή της οπής υπάρχει έντονη μεταβολή του πλάτους του κελύφους καθ' ύψος της οπής.



Σχήμα 5.10: Παραμορφωμένο σχήμα μετά την εφαρμογή των εντατικών μεγεθών σχεδιασμού, για φορέα α) χωρίς οπή β) με οπή, χωρίς ενισχύσεις

5.2 Μέθοδος υπολογισμού

5.2.1 Τελικό προσομοίωμα

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες αναλύσεις δημιουργήθηκε προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων του πυλώνα, μέσω του προγράμματος Solidworks. Για την δημιουργία της γεωμετρίας του, σύμφωνα με τις απαραίτητες διερευνήσεις που αναφέρονται στο κεφάλαιο 4.1, επιλέχθηκε η χρήση πεπερασμένων στοιχείων κελύφους για τα λεπτότοιχα τμήματα του πυλώνα καθώς και για το ενισχυτικό πλαίσιο στην περιοχή της ανθρωποθυρίδας, και τρισδιάστατων πεπερασμένων για τις φλάντζες στην περιοχή των συνδέσεων διαφορετικών τμημάτων του πυλώνα. Για τις αναλύσεις προσομοιώθηκε μόνο το τμήμα μέχρι την φλάντζα πάνω από την οπή της ανθρωποθυρίδας, καθώς η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις αναπτυσσόμενες τάσεις στις συγκολλήσεις στην συγκεκριμένη περιοχή. Συνεπώς η προσομοίωση ολόκληρου του φορέα απλά θα προσέθετε υπολογιστικό κόστος στις αναλύσεις. Κρίθηκε λοιπόν σκόπιμο να αναλυθεί μόνο το 1^ο και 2^ο τμήμα του πυλώνα, με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια ως προς το πλέγμα των πεπερασμένων που χρησιμοποιήθηκε (πλέγμα πεπερασμένων πλευράς 30mm), που όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 4.2 για το συγκεκριμένο μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου, το πλέγμα που επιλέγεται δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης, και συνεπώς έχουμε την μέγιστη δυνατή ακρίβεια με ταυτόχρονα εφικτό χρόνο διάρκειας κάθε ανάλυσης.

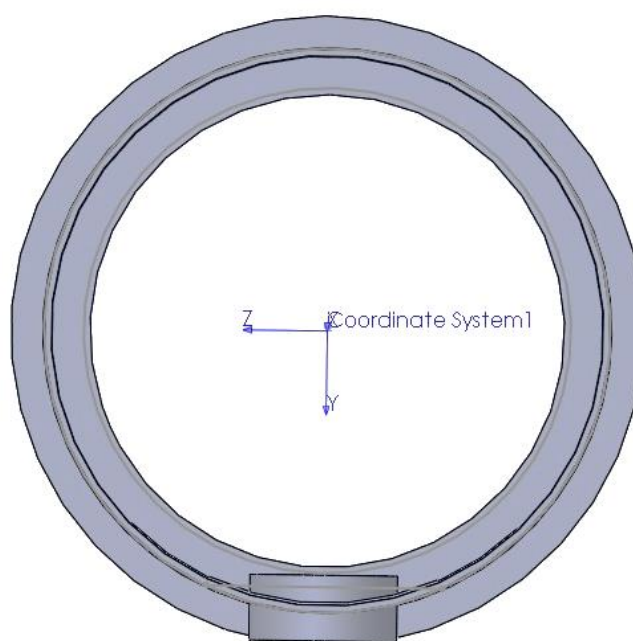
5.2.2 Εφαρμογή των εντατικών μεγεθών

Στόχος της παρούσας εργασίας, ήταν η διερεύνηση της κόπωσης των συγκολλητών συνδέσεων στην περιοχή της ανθρωποθυρίδας. Για τον σκοπό αυτό, δόθηκαν από την κατασκευαστική εταιρία αρχεία, στα οποία για κάθε εύρος εντατικού μεγέθους εφαρμογής, δόθηκε και το αντίστοιχο πλήθος κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης για διάρκεια ζωής 25 ετών της ανεμογεννήτριας ελέγχου. Προκειμένου να ελεγχθεί η κόπωση των συγκολλητών συνδέσεων του πυλώνα στο σημείο της ανθρωποθυρίδας, κρίθηκε σκόπιμη η εφαρμογή κύκλων φόρτισης της συνισταμένης ροπής, M_R , καθώς αυτή είναι που οδηγεί σε πιο κρίσιμα εντατικά μεγέθη στις συγκολλήσεις της ανθρωποθυρίδας. Κάθε εύρος ΔM_R , εφαρμόστηκε υπό την μορφή εξωτερικής φόρτισης στην στάθμη της φλάντζας του υπό μελέτη τμήματος του πυλώνα, και με φορά τέτοια, ώστε να προκαλεί τον μέγιστο εφελκυσμό σε κάθε μια από τις συγκολλήσεις της περιοχής ανθρωποθυρίδας. Η φορά αυτή επιλέχθηκε, καθώς η κυκλική εφελκυστική φόρτιση μιας σύνδεσης είναι πιο κρίσιμη για τον έλεγχο της κόπωσης. Κατά την εφελκυστική φόρτιση, δημιουργούνται πιο εύκολα τοπικές αστοχίες στην επιφάνεια του μετάλλου, αφού τα άτομα του απομακρύνονται μεταξύ τους, και συνεπώς αποτελούν την αφετηρία για δημιουργία ρωγμών στο υλικό. Αυτές οι τοπικές ασυνέχειες που δημιουργούνται, αποτελούν και τον λόγο αστοχίας, καθώς υπό επαναλαμβανόμενες κυκλικές φορτίσεις η σταδιακή αυτή ρηγμάτωση οδηγεί εν τέλει σε θραύση του υλικού λόγω κόπωσης.

Για το προσομοίωμα του φορέα, εφαρμόστηκε επομένως καμπτική ροπή ΔM_R , μεγέθους από 200kNm μέχρι 88400kNm, με βήμα τα 200kNm, και συγκεντρώθηκαν οι τάσεις, $\Delta\sigma$, που αναπτύσσονται στον φορέα σαν αποτέλεσμα, για κάθε εύρος ροπής που εφαρμόστηκε. Για τον προσδιορισμό της κρίσιμότερης διεύθυνσης εφαρμογής της ΔM_R έγιναν 4 διερευνήσεις, και για κάθε συγκόλληση αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την πιο κρίσιμη διεύθυνση.

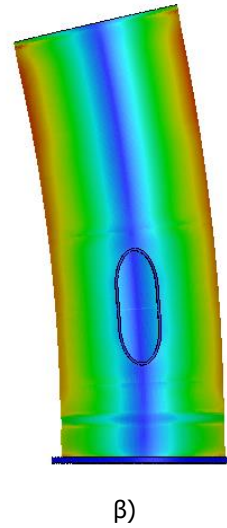
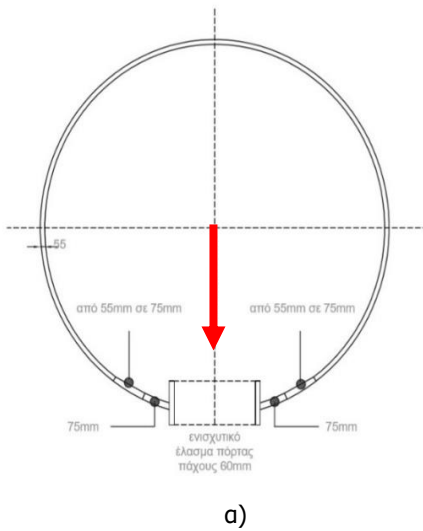
5.2.3 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Αφού υπολογίστηκαν οι τάσεις που αναπτύχθηκαν στο υπό εξέταση προσομοίωμα, μέσω προγράμματος Matlab υπολογίστηκαν αυτές, οι οποίες καταπονούν κάθε μια από τις υπό μελέτη συγκολλήσεις. Υπενθυμίζεται η φορά των αξόνων που έχουν οριστεί στο προσομοίωμα, σε κάτοψη:



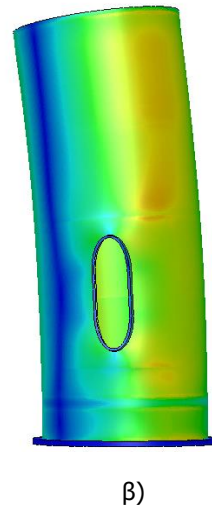
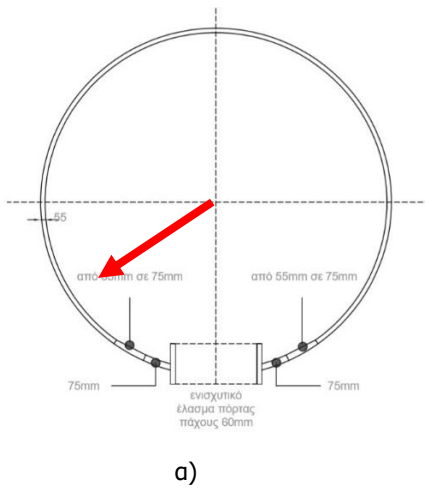
Σχήμα 5.11: Σύστημα αξόνων για την εφαρμογή της καμπτικής ροπής

Οι φορές κατά τις οποίες ασκήθηκε η ΔM_R ήταν οι εξής:

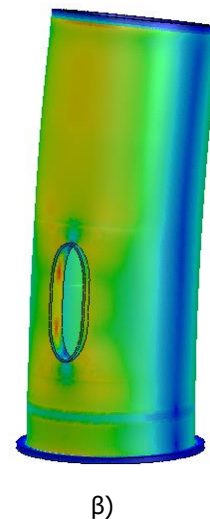
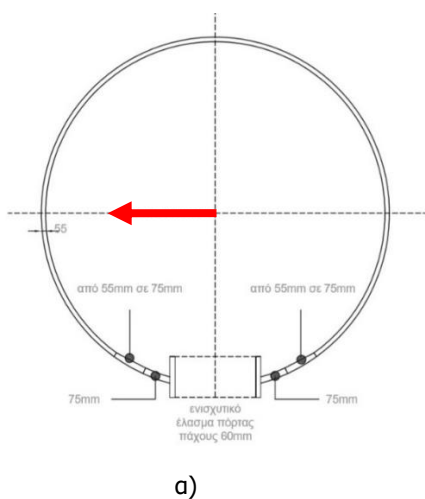


Σχήμα 5.12: α) Άσκηση κατά τον άξονα Y (0°)

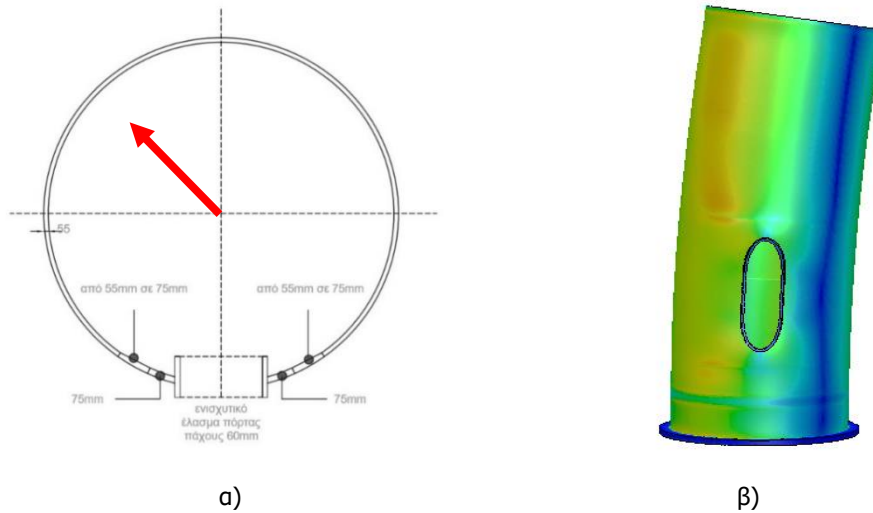
β) παραμορφωμένο σχήμα που προκαλείται



Σχήμα 5.13: α) Φορά άσκησης σχηματίζει 45° γωνία με άξονα Y β) παραμορφωμένο σχήμα που προκαλεί

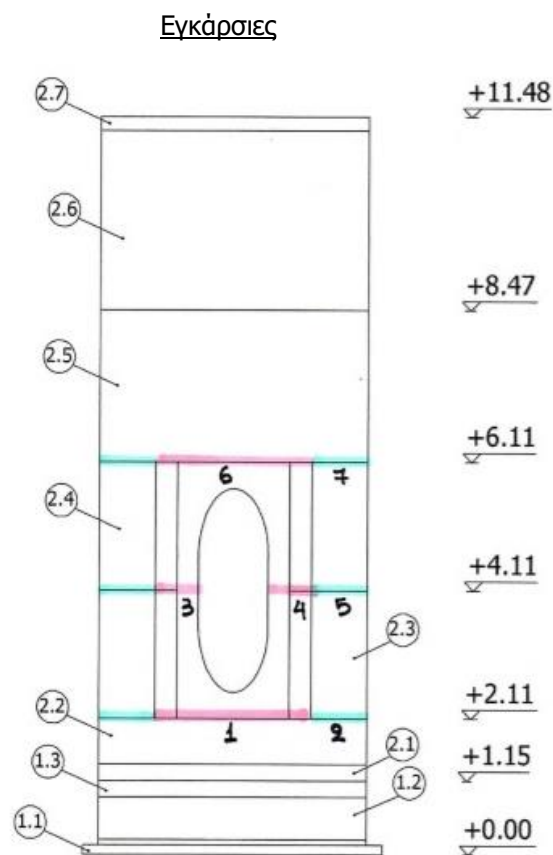


Σχήμα 5.14: α) Φορά άσκησης σχηματίζει 90° με άξονα Y β) παραμορφωμένο σχήμα που προκαλεί

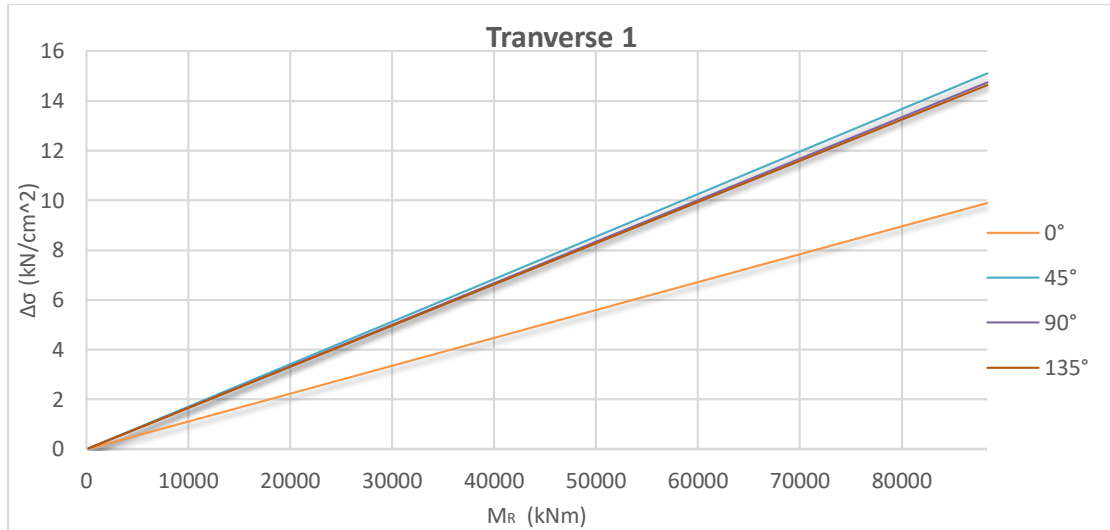


Σχήμα 5.15: α) Φορά άσκησης σχηματίζει 135° με άξονα Υ β) παραμορφωμένο σχήμα που προκαλεί

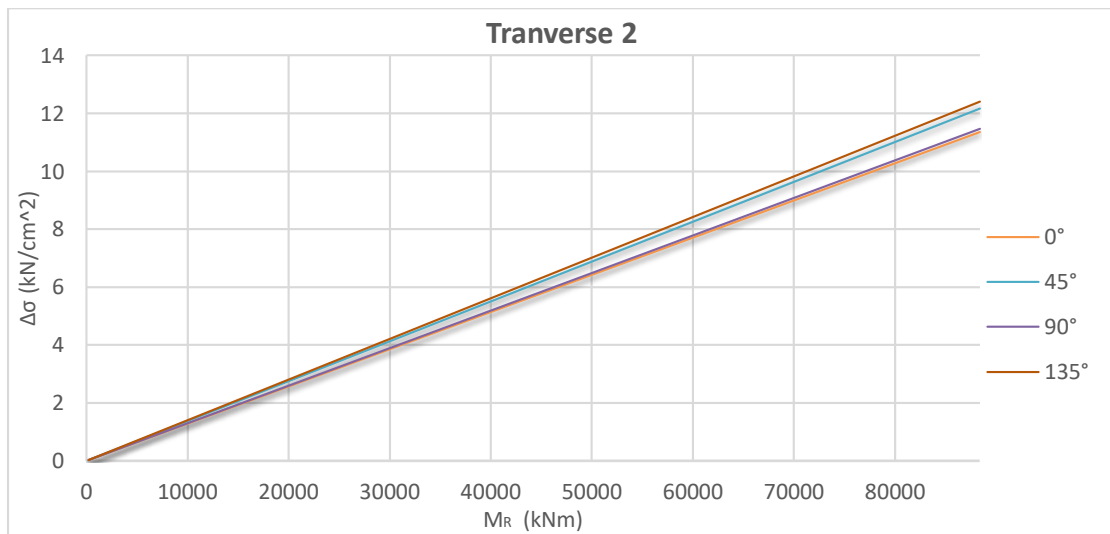
Για την διερεύνηση της κόπωσης, οι θέσεις οι οποίες αποφασίστηκε να ελεγχθούν είναι οι συγκολλήσεις στην περιοχή της ανθρωποθυρίδας, μεταξύ του ενισχυτικού πλαισίου και του κελύφους του πυλώνα



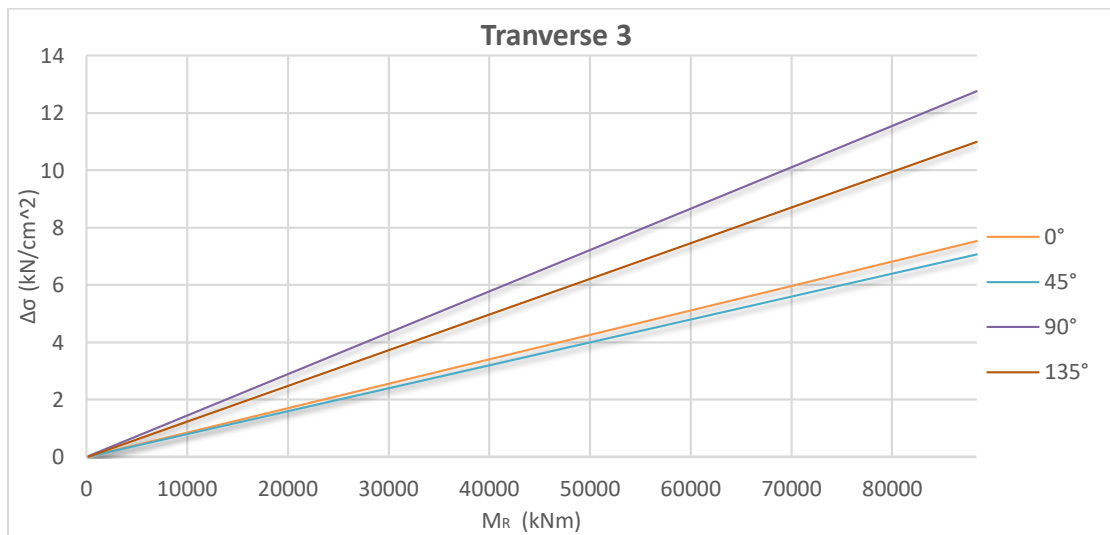
Σχήμα 5.16: Εγκάρσιες συγκολλήσεις οι οποίες θα ελεγχθούν σε κόπωση



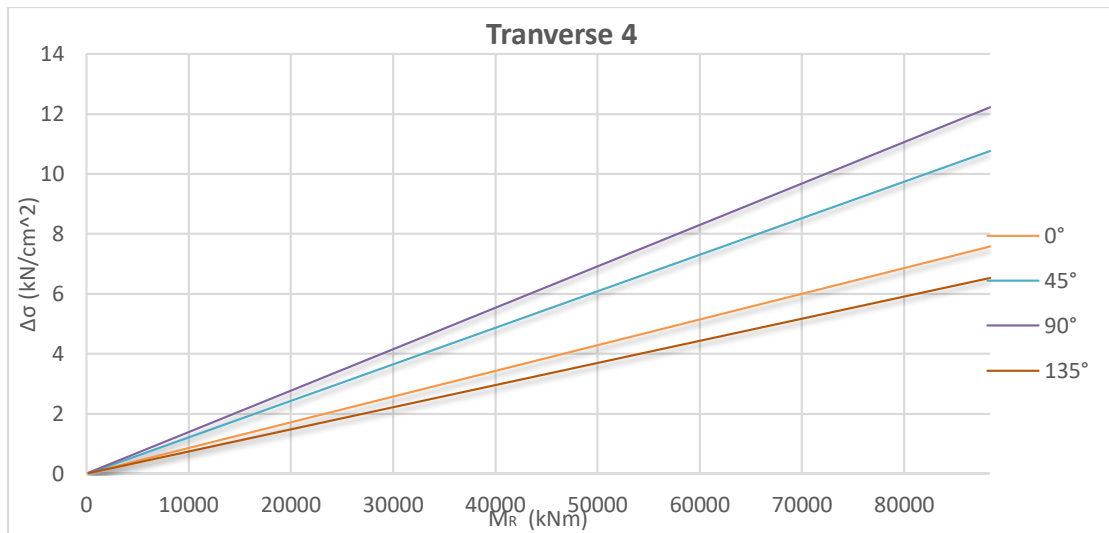
Σχήμα 5.17



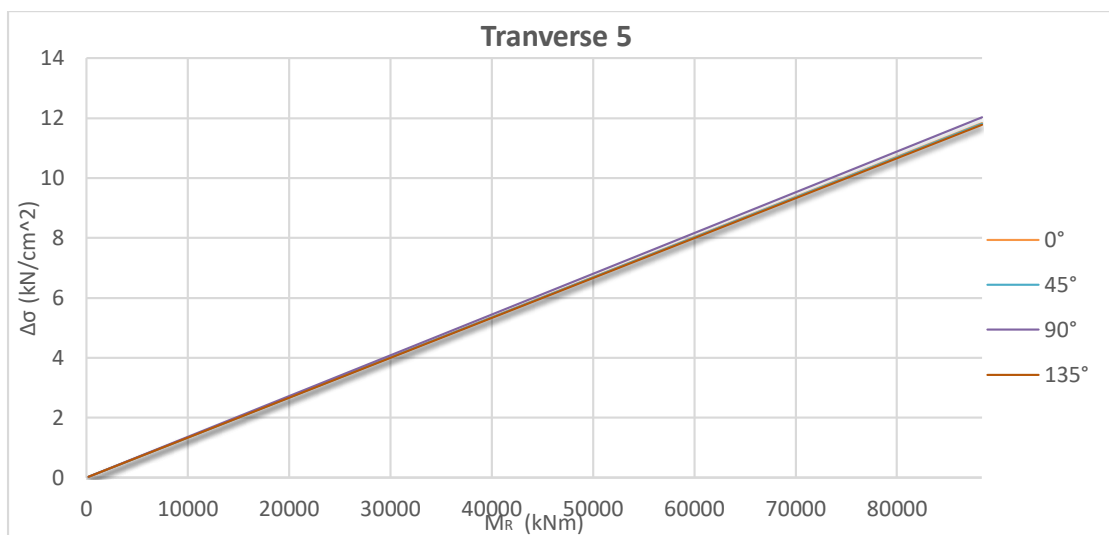
Σχήμα 5.18



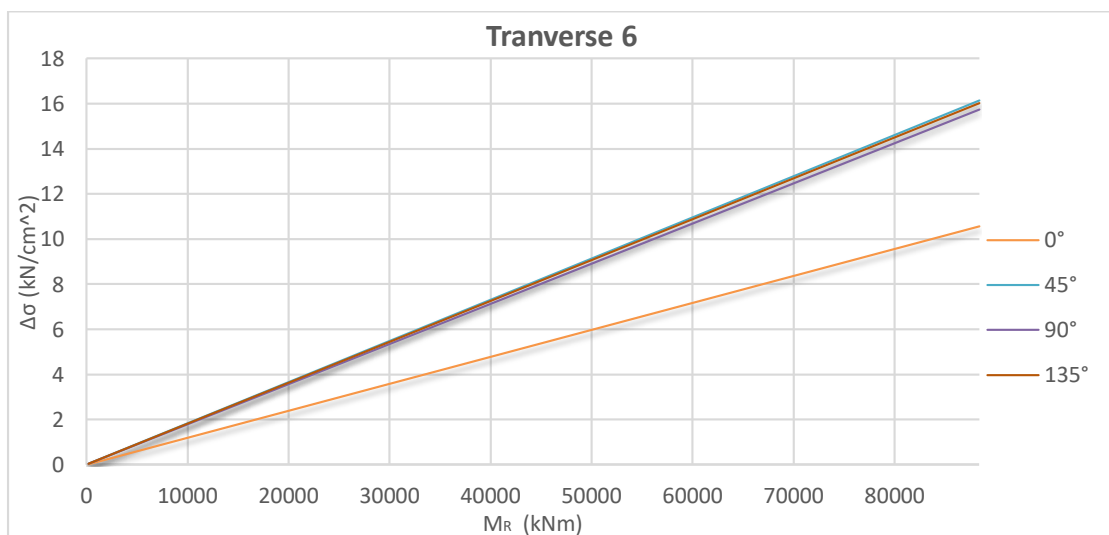
Σχήμα 5.19



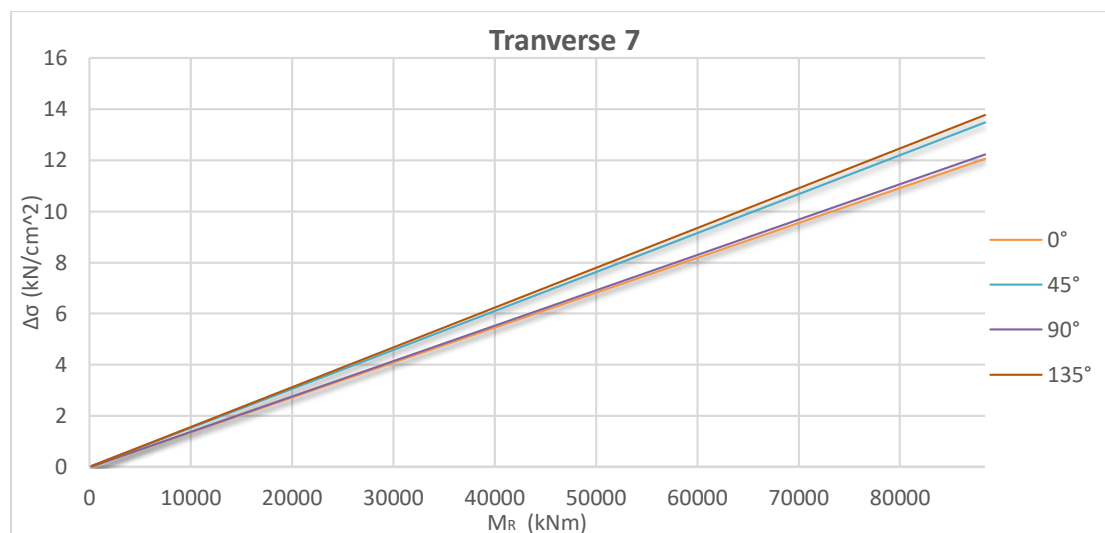
Σχήμα 5.20



Σχήμα 5.21



Σχήμα 5.22

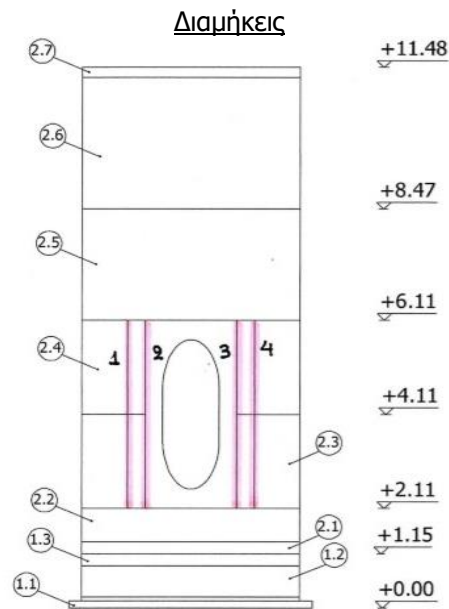


Σχήμα 5.23

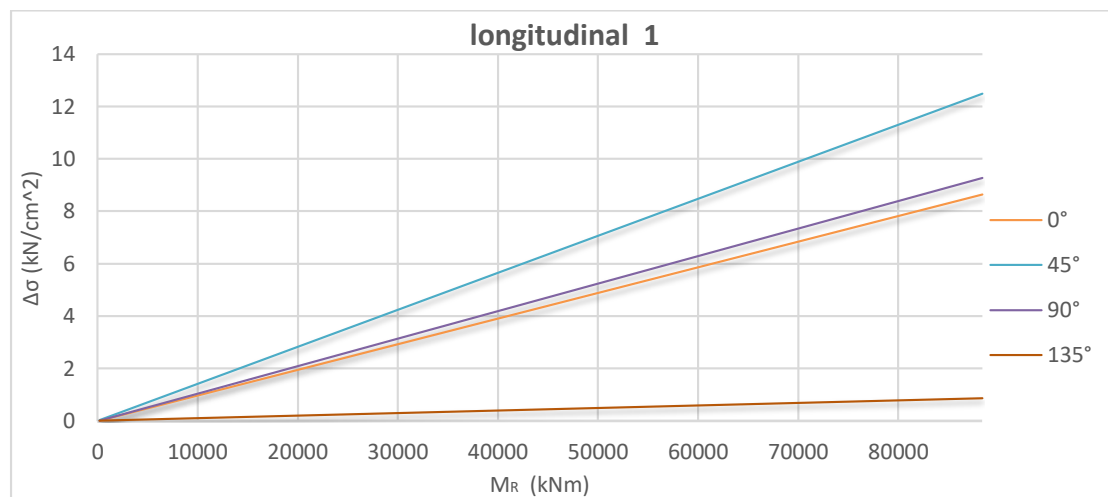
Σχήματα 5.17 – 5.23: Διερεύνηση κρίσιμης φοράς άσκησης καμπτικής ροπής M_R σε κάθε υπό εξέταση εγκάρσια συγκόλληση

Από τις παραπάνω διερευνήσεις συμπεραίνουμε ότι για τις συγκολλήσεις στις μη ενισχυμένες περιοχές (transverse 2, 5 και 7) ισχύει ότι πιο κρίσιμη φορά άσκησης του φορτίου είναι όταν σχηματίζει γωνία 135° με τον άξονα Y.

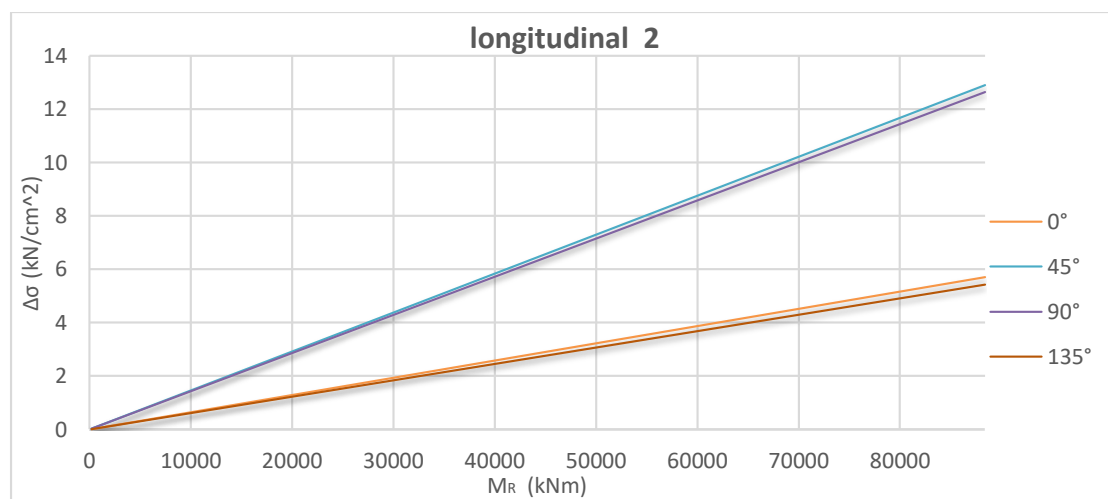
Για τα ενισχυμένα τμήματα, σε ύψη 2.11 και 6.11 αντίστοιχα (transverse 1, 6), κρίσιμη φορά άσκησης είναι αυτή που σχηματίζει γωνία 45°, με αναπτυσσόμενες τάσεις οι οποίες είναι περίπου ίσες με αυτές για φορά άσκησης 135°. Αυτό συμβαίνει διότι, για αυτές τις δύο διευθύνσεις της M_R ο μέγιστος εφελκυσμός στην περιοχή της συγκόλλησης, συμβαίνει στο τμήμα στο οποίο το πάχος του κελύφους είναι σταδιακά μεταβαλλόμενο, από 55mm σε 75mm. Συνεπώς, οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μεγαλύτερες, από ότι θα ήταν αν ασκούσαμε το φορτίο σε διεύθυνση 90° από τον άξονα Y (μέγιστος εφελκυσμός της ανθρωποθυρίδας), καθώς τότε η μέγιστη ένταση θα εμφανίζονταν στο τμήμα που το πάχος του κελύφους είναι 75mm, άρα και λιγότερο κρίσιμη η αναπτυσσόμενη τάση. Αυτό όμως διαφέρει για τις συγκολλήσεις στα ενισχυμένα τμήματα σε ύψος 4.11 m, καθώς κρίσιμη για την ανάπτυξη μέγιστων εφελκυστικών τάσεων είναι η άσκηση της ροπής με φορά τέτοια, ώστε να ο μέγιστος εφελκυσμός να εμφανίζεται στο κέντρο της οπής της ανθρωποθυρίδας. Αυτό είναι λογικό, αφού σε αυτό το ύψος η επιρροή της οπής είναι καθοριστική για τις αυξημένες τάσεις, και συνεπώς ο μέγιστος εφελκυσμός αυτής οδηγεί σε κρίσιμη εντατική κατάσταση στην περιοχή της συγκόλλησης του ενισχυμένου τμήματος 2.3 με το τμήμα 2.4.



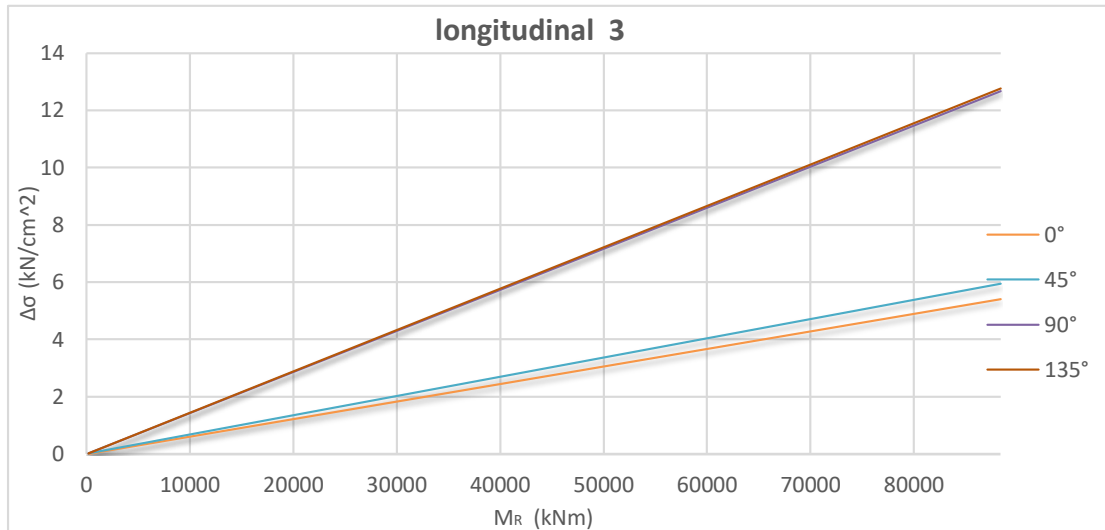
Σχήμα 5.24: Διαμήκεις συγκολλήσεις οι οποίες θα ελεγχθούν σε κόπωση



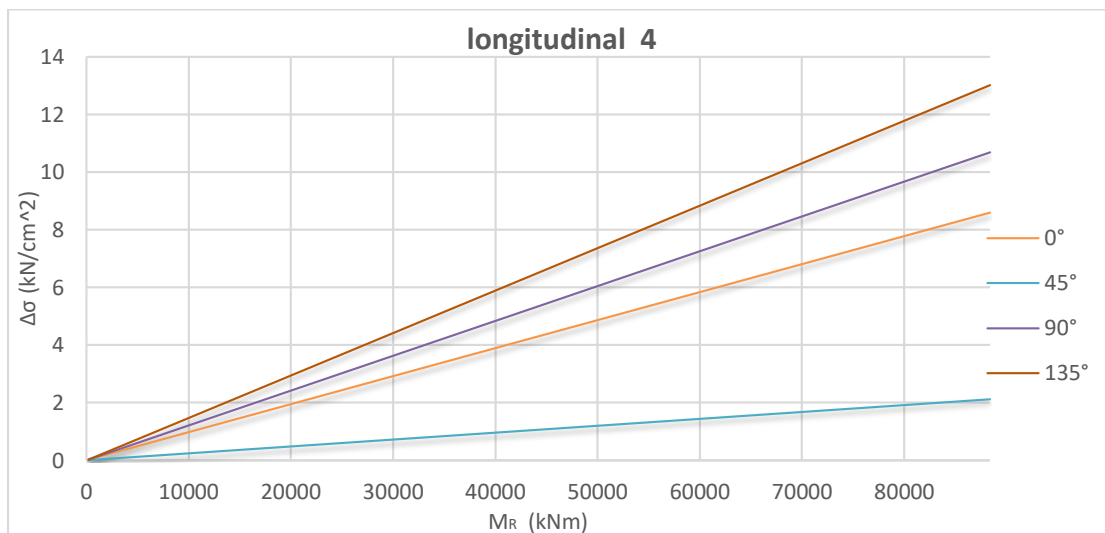
Σχήμα 5.25



Σχήμα 5.26



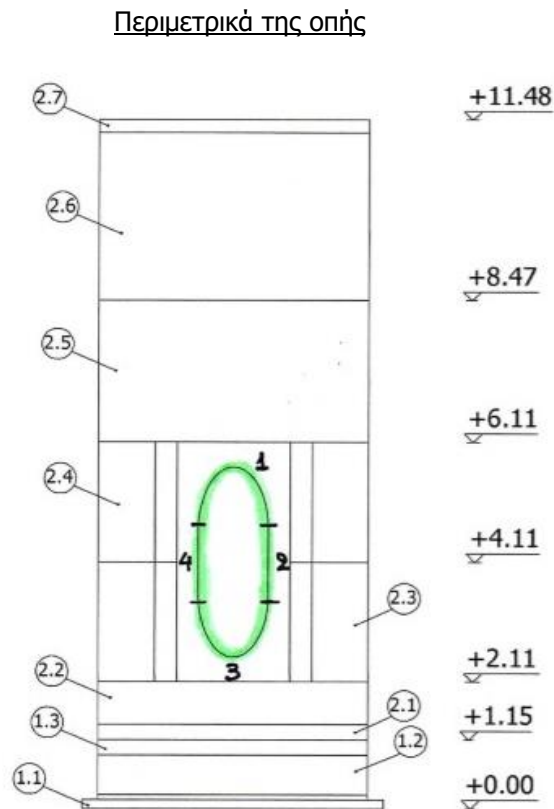
Σχήμα 5.27



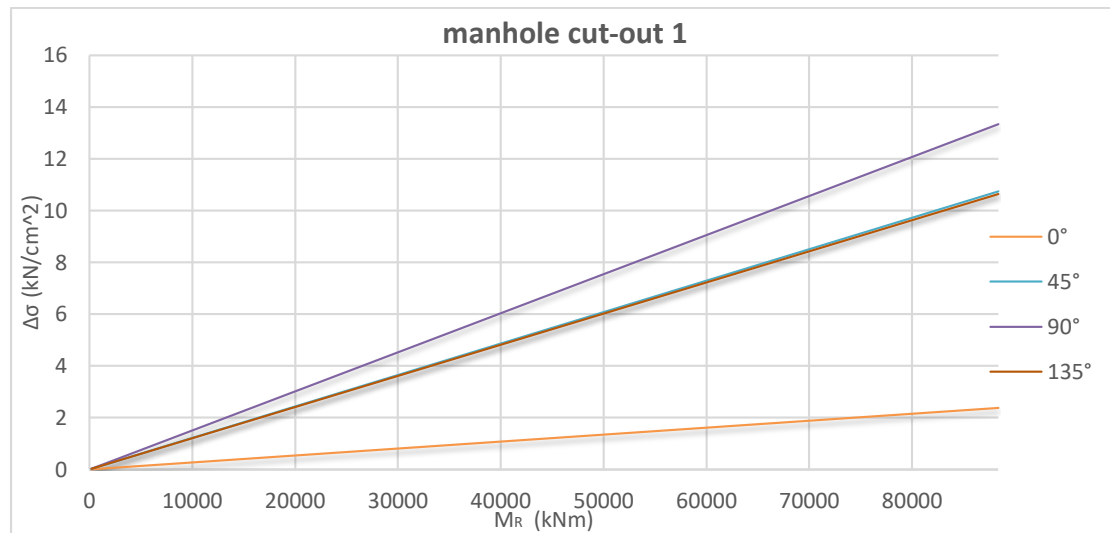
Σχήμα 5.28

Σχήματα 5.25 – 5.28: Διερεύνηση κρίσιμης φοράς άσκησης καμπτικής ροπής M_R σε κάθε υπό εξέταση διαμήκη συγκόλληση.

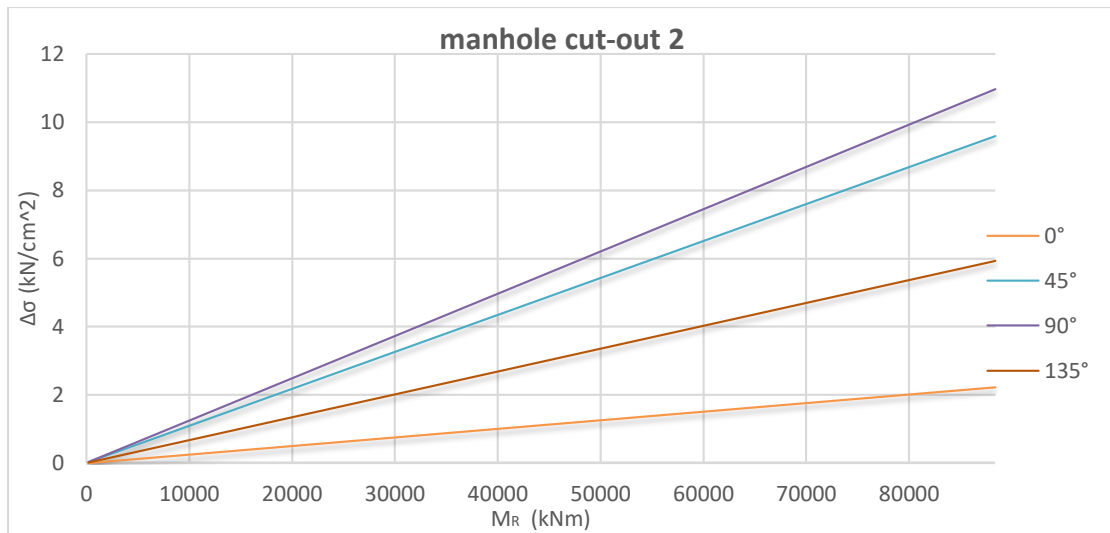
Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, για τις διαμήκεις συγκολλήσεις ισχύει ότι για τις πιο απομακρυσμένες από την οπή της ανθρωποθυρίδας (Longitudinal 1 και 4), κρίσιμη είναι η άσκηση της ροπής σε υπό γωνία 45° και 135° αντίστοιχα, καθώς τότε βρίσκονται στον μέγιστο εφελκυσμό. Για τις διαμήκεις που είναι πλησίον της οπής της ανθρωποθυρίδας, δεν είναι τόσο ξεκάθαρη η κρίσιμη φορά άσκησης της ροπής, καθώς η άσκηση με φορά τέτοια ώστε να δίνει μέγιστο εφελκυσμό στην οπή (90° με άξονα Y), δίνει επίσης κρίσιμες τάσεις σε αυτά τα σημεία. Πάλι όμως, η υπό γωνία 45° και 135° αντίστοιχα θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της κόπωσης καθώς οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι (οριακά αυτή την φορά) μεγαλύτερες.



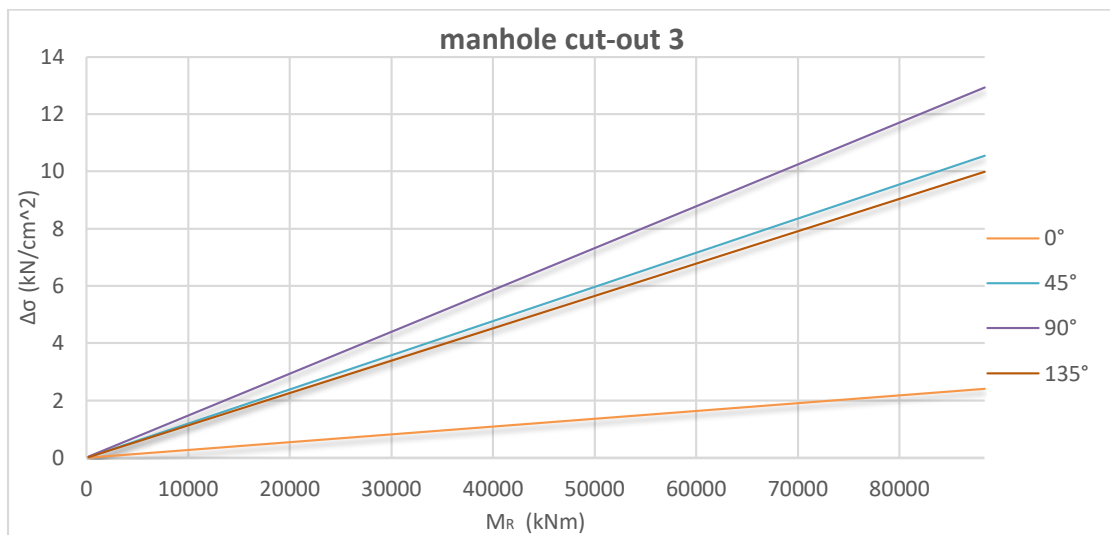
Σχήμα 5.29: Συγκολλήσεις περιμετρικά της οπής οι οποίες θα ελεγχθούν σε κόπωση



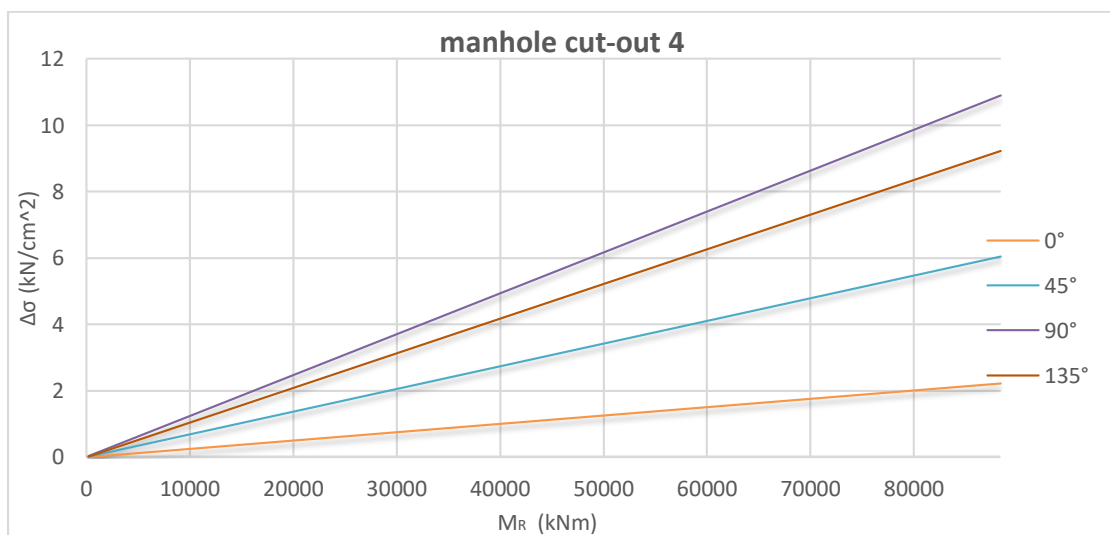
Σχήμα 5.30



Σχήμα 5.31



Σχήμα 5.32



Σχήμα 5.33

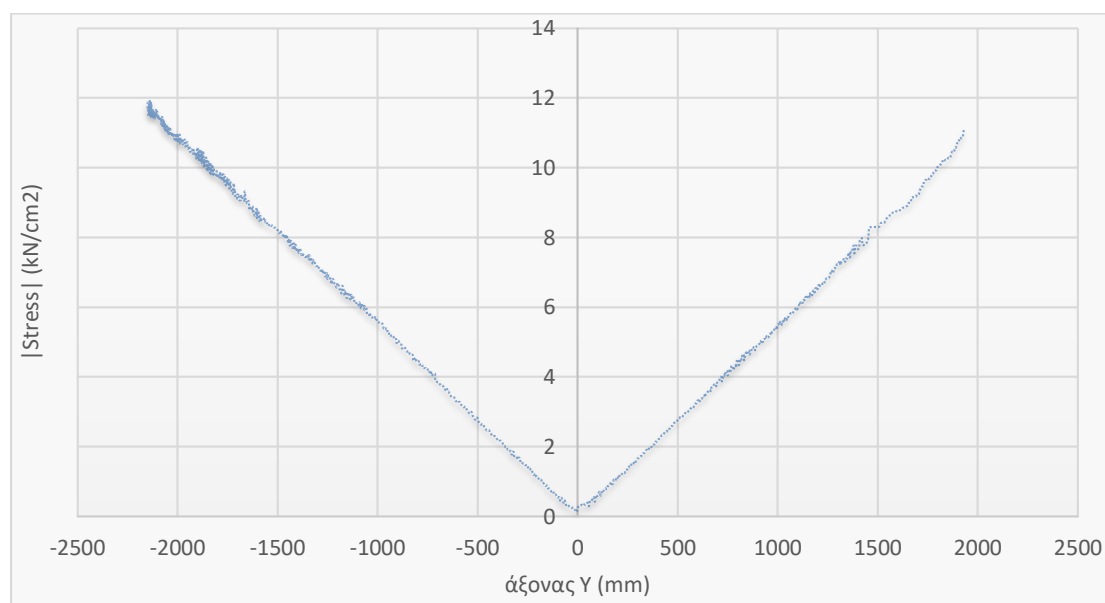
Σχήματα 5.30 – 5.33: Διερεύνηση κρίσιμης φοράς άσκησης καμπτικής ροπής M_R σε κάθε υπό εξέταση συγκόλληση στην περιοχή περιμετρικά της οπής της ανθρωποθυρίδας.

Τα παραπάνω αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα, καθώς η μέγιστη τάση στην οπή της ανθρωποθυρίδας αναπτύσσεται για μέγιστο εφελκυσμό αυτής, συνεπώς για φορά της M_R τέτοια ώστε να σχηματίζει για γωνία 90 μοιρών με τον άξονα γ .

5.2.4 Ουδέτερος άξονας

Η θέση του ουδέτερου άξονα θα πρέπει, σύμφωνα με την θεωρία, να βρίσκεται κάθετα στην διεύθυνση άσκησης του φορτίου, στην συγκεκριμένη περίπτωση λοιπόν κάθετα στην θέση επιβολής της μέγιστης M_R . Ελέγχουμε αν αυτό ικανοποιείται, για μια από τις διευθύνσεις άσκησης της M_R που διερευνήθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, και συγκεκριμένα υπό διεύθυνση τέτοια, ώστε να έχουμε μέγιστο εφελκυσμό στην ανθρωποθυρίδα. Έτσι, θα πρέπει οι τάσεις που αναπτύσσονται όσον αφορά τις οριζόντιες συγκολλήσεις να έχουν προσεγγιστικά μηδενική τιμή πάνω στον άξονα Z (κάθετα στο επίπεδο του ρότορα).

Για την διερεύνηση αυτού, με την χρήση προγράμματος Matlab, διατάχθηκαν οι τάσεις, για ένα από τα φορτία που ασκήθηκαν στην κατασκευή για τον έλεγχο της κόπωσης, (συγκεκριμένα για $M_R = 1000\text{kNm}$, με κατεύθυνση τέτοια ώστε να προκαλεί τον μέγιστο εφελκυσμό της ανθρωποθυρίδας), αρχικά ανοιγμένες κατά μήκος του άξονα Y.

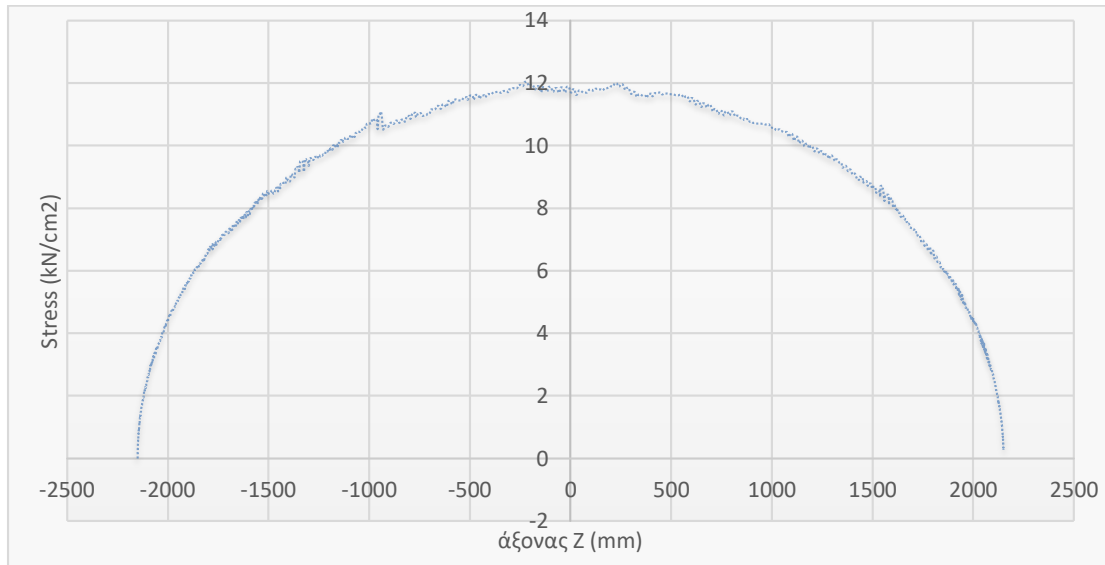


Σχήμα 5.34: Μέτρο αναπτυσσόμενης τάσεις ανοιγμένο κατά μήκος του άξονα Y, για συγκόλληση σε ύψος +2.11m και άσκηση ροπής ίσης με $M_R=1000\text{kNm}$ (φορά τέτοια ώστε να εφελκύει μέγιστα οπή ανθρωποθυρίδας)

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, στην αφετηρία του άξονα Y η αναπτυσσόμενη τάση γίνεται προσεγγιστικά μηδενική, πράγμα που περιμέναμε, καθώς βρίσκεται κάθετα στην διεύθυνση άσκησης του φορτίου. Στον κατακόρυφο άξονα έχει παρασταθεί η προβολή της αναπτυσσόμενης τάσης κατά απόλυτο τιμή, γι' αυτό και μικρές αποκλίσεις που εμφανίζονται οφείλονται στο γεγονός ότι η ύπαρξη της ανθρωποθυρίδας οδηγεί σε μικρές ασυμμετρίες όταν προβάλλονται στο επίπεδο.

Επίσης, για προβολή των αναπτυσσόμενων τάσεων στον άξονα Z, βλέπουμε ότι για +2150 και -2150 m από το 0 του άξονα (δηλαδή κάθετα στην διεύθυνση άσκησης του φορτίου) οι τάσεις είναι μηδενικές, ενώ αυξάνονται όσο πλησιάζουμε προς την οπή της ανθρωποθυρίδας, με μέγιστες αναπτυσσόμενες πάνω στην τομή του με τον άξονα Y. Παρατηρείται επίσης ότι για το

εύρος από -700mm έως 700 mm από την αφετηρία του άξονα, υπάρχει διακύμανση μεταξύ των τάσεων, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη της ανθρωποθυρίδας σε εκείνη την περιοχή.



Σχήμα 5.35: Μέτρο αναπτυσσόμενης τάσεις ανοιγμένο κατά μήκος του άξονα Z, για συγκόλληση σε ύψος +2.11m και άσκηση ροπής ίσης με $M_R=1000\text{kNm}$ (φορά τέτοια ώστε να εφελκύει μέγιστα σπή ανθρωποθυρίδας)

6. ΚΟΠΩΣΗ

Το φαινόμενο της κόπωσης, μαζί με την διάβρωση αποτελούν τις κύριες αιτίες πρόκλησης βλαβών σε μεταλλικές κατασκευές. Η κόπωση συμβαίνει όταν ένα μέλος υποβάλλεται σε μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων κυκλικών φορτίσεων, και εμφανίζεται με την μορφή σταδιακής ρηγμάτωσης και εν τέλει θραύσης του υλικού, χωρίς προηγούμενη πλαστική παραμόρφωση του μέλους αυτού. Οι ανεμογεννήτριες είναι αρκετά ευαίσθητες σε κόπωση, καθώς υποβάλλονται στα δυναμικά φορτία του ανέμου, αλλά και στην περιοδική περιστροφική κίνηση του ρότορα, τα οποία προκαλούν σημαντικού βαθμού εναλλασσόμενες φορτίσεις στην κατασκευή.

Οι θέσεις στις οποίες αναπτύσσονται οι ρωγμές που προκαλούνται από το φαινόμενο της κόπωσης είναι συγκεκριμένες. Η ρηγμάτωση συνήθως συμβαίνει στο μητρικό υλικό κοντά σε κάποια κατασκευαστική λεπτομέρεια, κάποια συγκόλληση ή σύνδεση μελών. Ακόμα και αν η αντοχή μιας σύνδεσης είναι μεγαλύτερη από αυτή του κάθε μέλους που την απαρτίζει, και πάλι η σύνδεση είναι αυτή που είναι κρίσιμη όσον αφορά την κόπωση.

Γενικά, μια ρωγμή κόπωσης αναπτύσσεται με σημείο όπου εμφανίζεται εξ' αρχής κάποια γεωμετρική ασυνέχεια ή ατέλεια στο μητρικό υλικό. Αυτή η ασυνέχεια, οδηγεί σε συγκέντρωση τάσεων σε εκείνο το σημείο και σταδιακή διάδοση της ρωγμής. Έτσι, ενώ τα επιβαλλόμενα φορτία προκαλούν τάσεις, πολύ μικρότερες από το όριο θραύσης, μάλιστα ακόμα και από το όριο διαρροής του χάλυβα της κατασκευής, τοπικά, στην ασυνέχεια, λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης των τάσεων μπορεί μετά από μεγάλο πλήθος κύκλων φόρτισης- αποφόρτισης να προέλθει απότομη θραύση του υλικού. Είναι σκόπιμο να αναφερθεί, ότι η ίδια κατασκευή, κάτω από στατικές συνθήκες, θα μπορούσε να αντέξει πολύ πιο ισχυρά φορτία, όμως, δεδομένου ότι υπόκειται σε εναλλασσόμενα φορτία τα οποία προκαλούν φθορά σταδιακά, με το χρόνο εξαντλείται η αντοχή της. Ταυτόχρονα, το γεγονός ότι η θραύση προκαλείται απότομα, κάτω από ήπιες συνθήκες λειτουργίας, και είναι ψαθυρή, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο της κόπωσης έχει καταστρεπτικές συνέπειες για την κατασκευή, και συνεπώς πρέπει να γίνεται προσεκτικός σχεδιασμός των επιμέρους μερών που απαρτίζουν κάθε κατασκευή που υπόκειται σε επαναλαμβανόμενα κυκλικά φορτία.

6.1 Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση

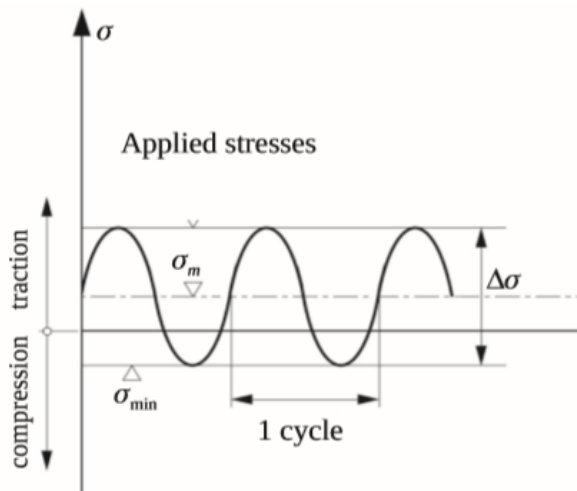
Η αντοχή σε κόπωση μιας κατασκευής που υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενες κυκλικές φορτίσεις ορίζεται ως το πλήθος των κύκλων φόρτισης που μπορεί να αντέξει μέχρι να αστοχήσει. Η αντοχή σε κόπωση είναι συνισταμένη τεσσάρων παραμέτρων:

- Του εύρους των τάσεων
- Της γεωμετρίας της κατασκευαστικής λεπτομέρειας
- Των χαρακτηριστικών του υλικού
- Των περιβαλλοντικών συνθηκών

6.1.1 Το εύρος των τάσεων

Από πειραματικές διερευνήσεις έχει αποδειχθεί ότι το εύρος των τάσεων που καταπονεί μια κατασκευή, είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή σε κόπωση μιας λεπτομέρειας συγκόλλησης. Το εύρος των τάσεων δίνεται από την σχέση:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (6.13)$$



Σχήμα 6.1: Σημασία των κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης [9]

6.1.2 Η γεωμετρία της κατασκευαστικής λεπτομέρειας

Η γεωμετρία της κατασκευαστικής λεπτομέρειας είναι καθοριστική ως προς την θέση στην οποία θα αναπτυχθεί η ρωγμή λόγω κόπωσης, αλλά και για τον βαθμό διάδοσής της. Τα αποτελέσματα της γεωμετρίας της κατασκευής στην συγκέντρωση των τάσεων μπορούν να επηρεαστούν ευνοϊκά από έναν καλό σχεδιασμό της λεπτομέρειας, πχ απότομες αλλαγές στην γεωμετρία θα πρέπει να μετριαστούν, γιατί οδηγούν σε αθέμητες συγκεντρώσεις τάσεων και συνεπώς είναι ευάλωτες σε αστοχία από κόπωση. Επίσης, πρέπει να δοθεί προσοχή στις ασυνέχειες στις συγκολλήσεις, ώστε αυτές να μην ξεπερνούν τα όρια που ορίζονται από τους κανονισμούς.

6.1.3 Τα χαρακτηριστικά του υλικού

Γενικώς, όσο καλύτερη η ποιότητα του υλικού που καταπονείται από επαναλαμβανόμενα κυκλικά φορτία, τόσο μεγαλύτερη η αντοχή του σε κόπωση. Αυτό εξηγείται εύκολα, αφού ένα υλικό με καλύτερη ποιότητα χάλυβα κάτω από τις ίδιες συνθήκες φόρτισης θα καθυστερήσει περισσότερο να μπει στην φάση ρηγμάτωσης, απ' ότι ένα υλικό χαμηλότερης ποιότητας χάλυβα. Αυτό το πλεονέκτημα όμως δεν υφίσταται σε συγκολλημένα μέλη, καθώς η αντοχή

τους σε κόπωση εξαρτάται κυρίως από την ύπαρξη εσωτερικών ρωγμών που έχουν δημιουργηθεί κατά την συγκόλληση τους.

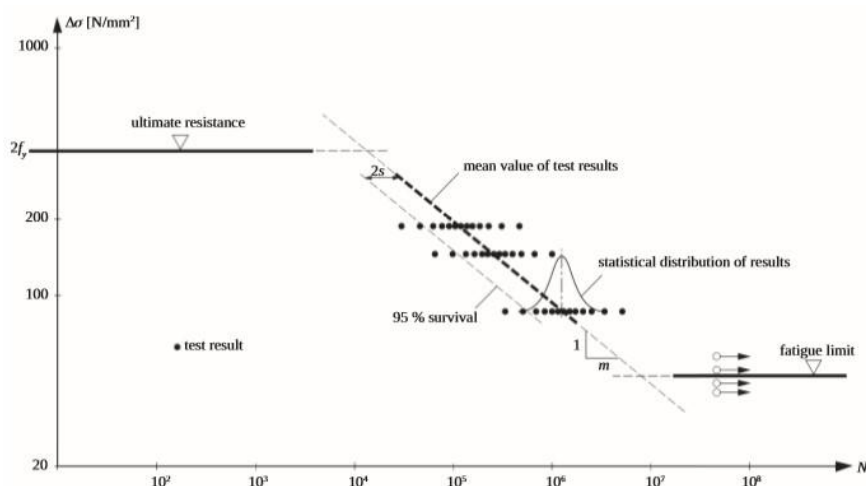
6.1.4 Περιβαλλοντικές συνθήκες

Σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον, ή σε συνθήκες αυξημένης υγρασίας, η αντοχή σε κόπωση εμφανίζεται ιδιαίτερα μειωμένη, καθώς υπό αυτές τις συνθήκες ο ρυθμός ανάπτυξης των ρωγμών είναι αυξημένος.

6.2 Αντοχή σε κόπωση

6.2.1 Σταθερό εύρος τάσεων, $\Delta\sigma$

Για τον υπολογισμό της αντοχής σε κόπωση μιας κατασκευής είναι απαραίτητη η πειραματική διερεύνηση. Δοκίμια υποβάλλονται σε επανειλημμένες κυκλικές φορτίσεις διαφορετικής έντασης κάθε φορά και μετρούνται πόσοι κύκλοι φόρτισης χρειάστηκαν για την κάθε ένταση, για να θραύσουν το δοκίμιο. Τα αποτελέσματα από αυτή την διερεύνηση συνήθως απεικονίζονται σε ένα διάγραμμα, στον οριζόντιο άξονα του οποίου απεικονίζονται οι κύκλοι φόρτισης έως την αστοχία, N , και στον κατακόρυφο το εύρος τάσεων, $\Delta\sigma$.



Σχήμα 6.2: Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών σε δομικά μέρη από χάλυβα κάτω από σταθερή κυκλική φόρτιση, σχεδιασμένα σε λογαριθμικό διάγραμμα [9]

Λογαριθμίζοντας τους δύο άξονες, η μέση τιμή των πειραματικών αποτελεσμάτων για μια δεδομένη κατασκευαστική λεπτομέρεια μπορεί να παρασταθεί από μια ευθεία γραμμή η οποία ικανοποιεί την εξίσωση:

$$N = C \cdot \Delta\sigma^{-m} \quad (6.14)$$

Όπου N : το πλήθος των κύκλων του εύρους τάσεων $\Delta\sigma$

C : σταθερά που αντιπροσωπεύει την επιρροή της κατασκευαστικής λεπτομέρειας

$\Delta\sigma$: σταθερό εύρος τάσεων

m : συντελεστής κλίσης της πειραματικής ευθείας

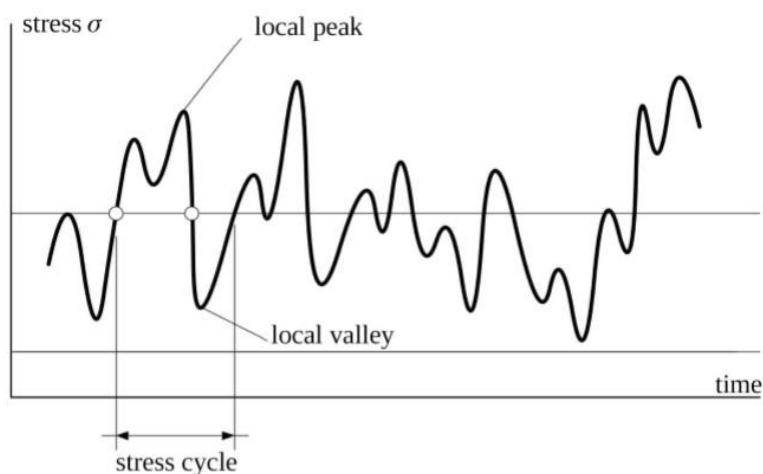
Το άνω όριο της γραμμής, το οποίο αντιστοιχεί σε μεγάλες τιμές του $\Delta\sigma$, είναι ίσο με δύο φορές την μέγιστη στατική αντοχή του υλικού. Η περιοχή για τιμές των κύκλων φόρτισης μεταξύ 10 και 10^4 ονομάζεται ολιγοκυκλική κόπωση.

Το κατώτερο όριο της γραμμής, το οποίο αντιστοιχεί σε μικρές τιμές του $\Delta\sigma$, αντιπροσωπεύει το όριο κόπωσης σταθερού πλάτους. Το όριο αυτό δηλώνει ότι κυκλικές φορτίσεις με εύρος κάτω από το συγκεκριμένο όριο, μπορούν να εφαρμόζονται σε μεγάλο πλήθος κύκλων, χωρίς να έχουν ως αποτέλεσμα την αστοχία λόγω κόπωσης. Για συνθήκες μεταβλητού πλάτους, όλα τα εύρη τάσεων πρέπει να είναι μικρότερα από αυτό το όριο για να μην σημειωθούν βλάβες λόγω κόπωσης.

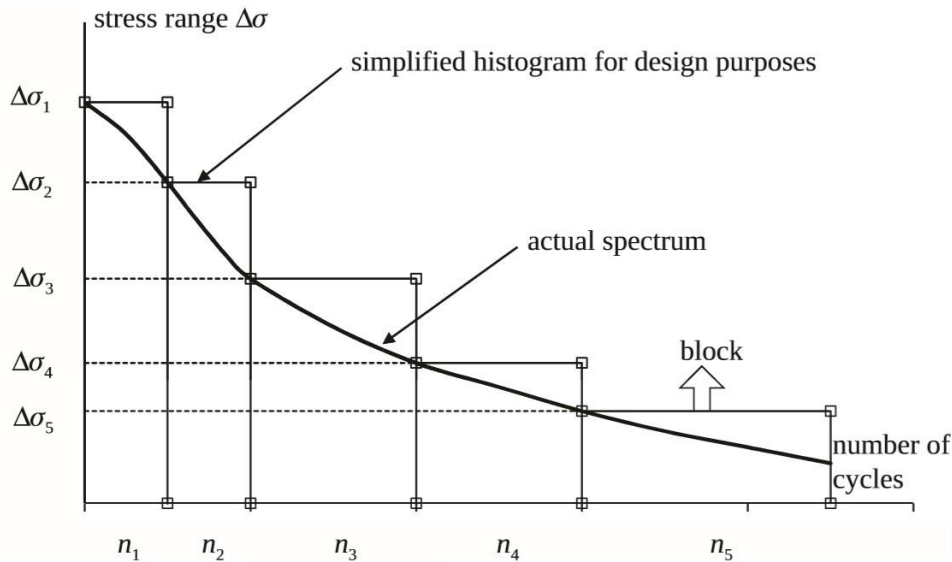
Πρέπει να αναφερθεί ότι το όριο κόπωσης μπορεί να υπολογιστεί μόνο από πειραματικά αποτελέσματα. Για να καθιερωθεί λοιπόν μια χαρακτηριστική καμπύλη κόπωσης, αυτή θα πρέπει να είναι αποτέλεσμα του διαγράμματος διασποράς των αποτελεσμάτων, και να τεθεί ένα αποδεκτό όριο πιθανότητας επιβίωσης. Στην πρακτική που ακολουθείται από την Ευρωκώδικα 3, μέρος 1-9, οι τιμές εύρους τάσεων $\Delta\sigma_c$ έχουν προσδιοριστεί για αξιοπιστία 75% με 95% πιθανότητα επιβίωσης ως προς το $\log(N)$, λαμβάνοντας υπόψη την τυπική απόκλιση, το μέγεθος του δείγματος και τις επιρροές των παραμενουσών τάσεων. Για μεγάλο πλήθος δεδομένων, η πιθανότητα επιβίωσης μπορεί να παρασταθεί από μια ευθεία γραμμή παράλληλη σε αυτή της μέσης τιμής των αποτελεσμάτων των πειραμάτων, μετατοπισμένη κατά δύο τυπικές αποκλίσεις αριστερά αυτής.

6.2.2 Μεταβλητό εύρος τάσεων κύκλων φόρτισης

Στην προηγούμενη παράγραφο, περιεγράφηκε το πως υπολογίζεται το πλήθος των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία λόγω κόπωσης, για εφαρμογή σταθερού εύρους τάσεων $\Delta\sigma$. Στην πραγματικότητα όμως, η αντιπροσωπευτική φόρτιση μιας κατασκευής αποτελείται από διαφορετικά εύρη τάσεων $\Delta\sigma_i$, με την μορφή του σχήματος 6.3.



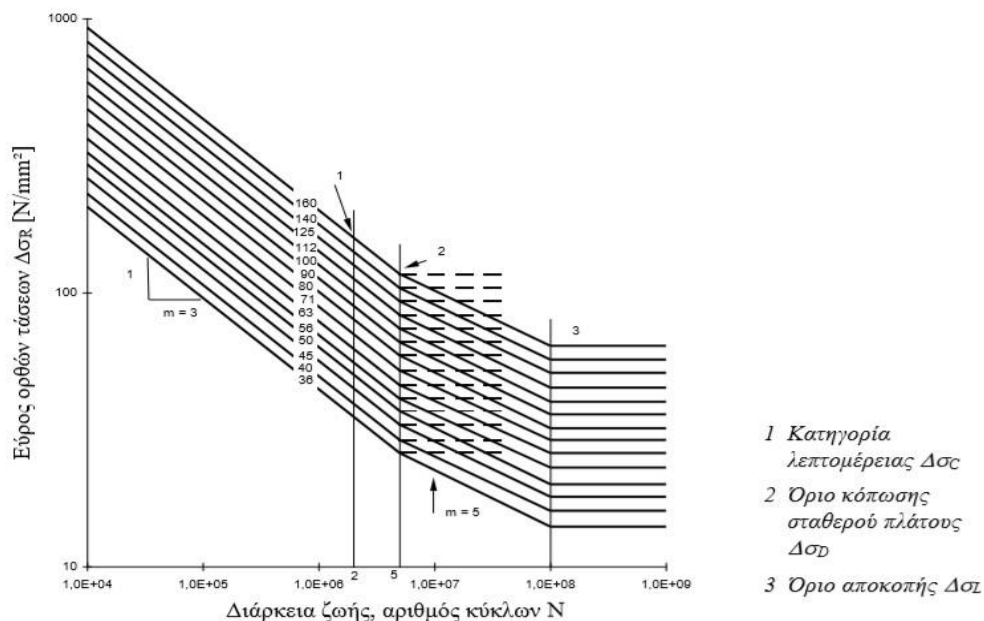
Σχήμα 6.3: Αναπαράσταση της γενικής μορφής μιας χρονοϊστορίας φόρτισης σε μια κατασκευή [9]



Σχήμα 6.4: Παράδειγμα ιστογράμματος τάσεων – κύκλων φόρτισης [9]

Το φάσμα των τάσεων μετατρέπεται σε ιστογράμμο, το οποίο στον οριζόντιο άξονα έχει το πλήθος των κύκλων n_i και στον οριζόντιο το εύρος $\Delta\sigma_i$ το οποίο καταπονεί n_i φορές την κατασκευή.

Για να μπορέσει να υπολογιστεί η αντοχή σε κόπωση, για μια φόρτιση με μεταβλητό πλάτος τάσεων, πρέπει αυτή να αναχθεί λοιπόν σε πολλαπλές καμπύλες, οι οποίες έχουν προκύψει από πειραματικές διερευνήσεις για φόρτιση σταθερού πλάτους για κάθε ξεχωριστό εύρος τάσεων. Η αντοχή σε κόπωση για ονομαστικές τάσεις εκφράζεται με σειρά καμπυλών $(\log\Delta\sigma_R) - (\log N)$, ή άλλως καμπυλών S-N, που αντιστοιχούν σε τυπικές κατηγορίες λεπτομερειών. Κάθε κατηγορία λεπτομερειών χαρακτηρίζεται από ένα αριθμό, σε N/mm^2 , ο οποίος αντιπροσωπεύει τις τιμές αναφοράς $\Delta\sigma_c$ και $\Delta\tau_c$ αντοχής σε κόπωση για 2 εκατομμύρια κύκλους.

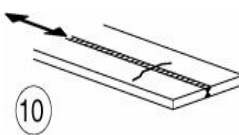


Σχήμα 6.5: Καμπύλες αντοχής σε κόπωση του EN 1993-1-9 [10]

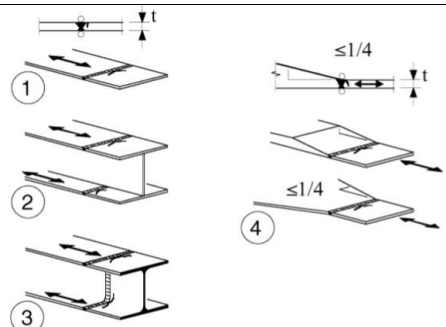
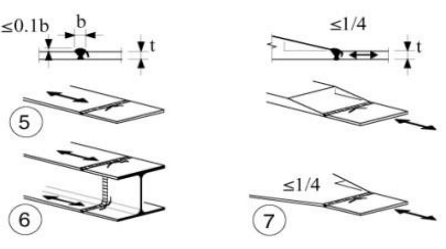
6.2.3 Κατηγορίες ελέγχου

Για την ανεμογεννήτρια ελέγχου, στις συγκολλήσεις στην περιοχή της οπής της ανθρωποθυρίδας είναι τριών ειδών:

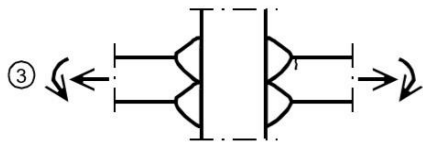
- Διαμήκεις (Longitudinal) συγκολλήσεις μεταξύ των κελυφών του πυλώνα ανήκουν στην κατασκευαστική λεπτομέρεια 10, κατηγορία 112 (πίνακας 8.2 από EN1993-1-9 [10])

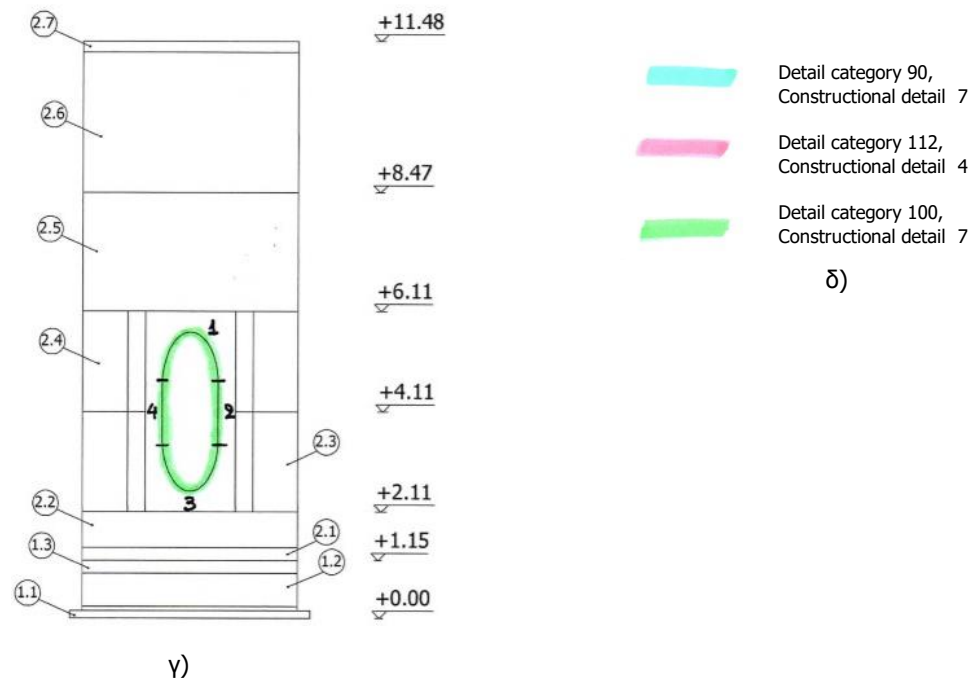
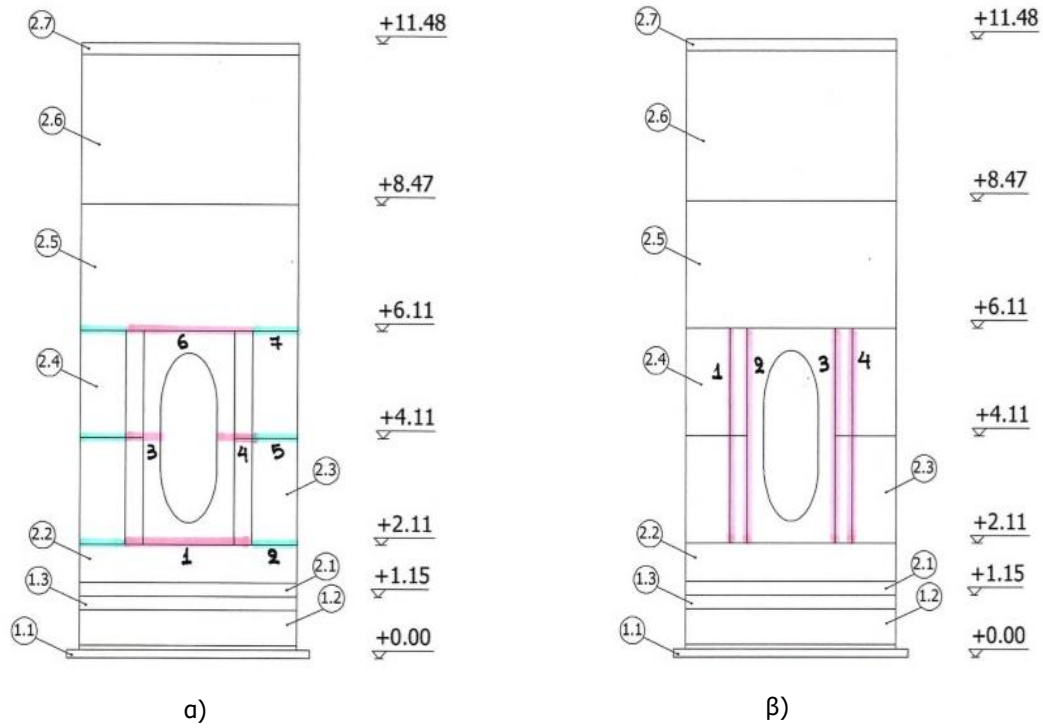
Detail category	Constructional detail	Description
125		10) Longitudinal butt weld, both sides ground flush parallel to load direction. 100% NDT
112		10) No grinding and no start/stop
90		10) with start/stop positions

- Εγκάρσιες (Transverse) συγκολλήσεις μεταξύ των κελυφών του πυλώνα ανήκουν στην κατασκευαστική λεπτομέρεια 7, κατηγορία 90 (πίνακας 8.3 από EN1993-1-9 [10])

Detail category	Constructional detail	Description
112 Size effect for $t > 25\text{mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$		<u>Without backing bar:</u> 1) Transverse splices in plates and flats. 2) Flange and web splices in plate girders before assembly. 3) Full cross-section butt welds of rolled sections without cope holes. 4) Transverse splices in plates or flats tapered in width or in thickness with a slope $\leq 1/4$
90 Size effect for $t > 25\text{mm}$: $k_s = (25/t)^{0.2}$		5) Transverse splices in plates or flats 6) Full cross-section butt welds of rolled sections without cope holes 7) Transverse splices in plates or flats tapered in width or in thickness with a slope $\leq 1/4$ Translation of welds to be machined notch free

- Συγκολλήσεις εσωραφής και εξωραφής μεταξύ του κελύφους του πυλώνα και του ενισχυτικού πλαισίου, στην περιοχή της ανθρωποθυρίδας ανήκουν στην κατασκευαστική λεπτομέρεια 3, κατηγορία 100 (πίνακας B.1 από EN1993-1-9 [10])

	Constructional detail	Description	Requirements
100		3) Cruciform joint with full penetration K-butt welds	3) - Weld toe angle $\leq 60^\circ$ - For misalignment see NOTE 1
NOTE 1: Table B.1 does not cover effects of misalignment. They have to be considered explicitly in determination of stress			



Σχήμα 6.6: Χαρακτηριστικές θέσεις για τον έλεγχο της κόπωσης των συγκολλήσεων του πυλώνα, α) εγκάρσιες, β) διαμήκειες, γ) περιμετρικά της οπής της ανθρωποθυρίδας, μεταξύ κελύφους πυλώνα και κολάρου ενίσχυσης και δ) αντίστοιχο παράρτημα κατηγοριών ελέγχου κατά EN 1993-1-9

Το όριο κόπωσης περιεγράφηκε αναλυτικώς προηγουμένως, και το όριο αποκοπής αποτελεί το όριο, κάτω από το οποίο εύρη τάσεων του φάσματος σχεδιασμού δεν συνεισφέρουν στην υπολογιζόμενη συσσώρευση βλάβης από κόπωση και για τα οποία ισχύει ότι:

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} \Delta\sigma_c = 0,737\Delta\sigma_c \quad (6.15)$$

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{2}{100}\right)^{\left(\frac{1}{5}\right)} \Delta\sigma_D = 0,549\Delta\sigma_D \quad (6.16)$$

Το $\Delta\sigma_L$ αντιστοιχεί σε περίπου 10^8 κύκλους φόρτισης μέχρι την αστοχία, και για την $\Delta\sigma_D$ ισχύει ότι $N_D = 5 \cdot 10^6$ κύκλοι.

Άρα, όσον αφορά τις συγκολλήσεις της ανεμογεννήτριας ελέγχου, για κάθε διαφορετικό είδος συγκόλλησης ισχύει :

Είδος συγκόλλησης	$\Delta\sigma_c$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
Διαμήκης	112	82.54	45.40
Εγκάρσια	90	66.53	36.59
Αμφίπλευρη εσωραφή-εξωραφή	100	73.7	40.54

6.2.4 Μέθοδοι υπολογισμού αντοχής σε κόπωση

Ο υπολογισμός αντοχής σε κόπωση γίνεται χρησιμοποιώντας μια από τις παρακάτω μεθόδους του EN 1993-1-9:

- τη μέθοδο ανοχής βλαβών (Damage tolerant)
- τη μέθοδο ασφαλούς ζωής (Safe life)

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.

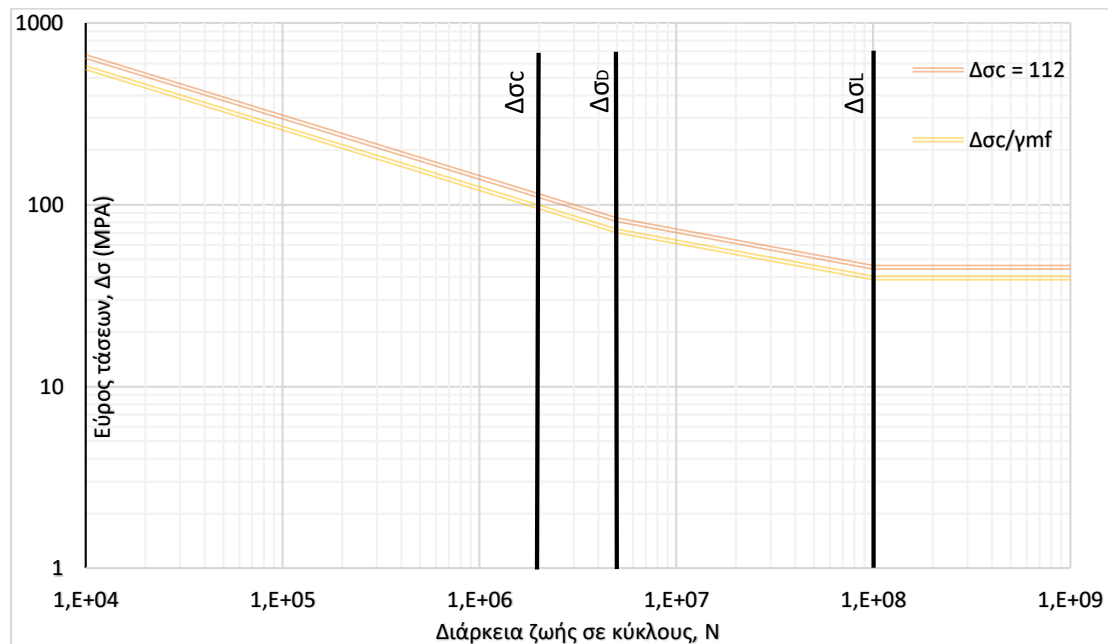
Η μέθοδος ασφαλούς ζωής θα πρέπει να παρέχει αποδεκτή αξιοπιστία ότι η κατασκευή θα λειτουργεί ικανοποιητικά κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού χωρίς την ανάγκη επιθεωρήσεων κατά τη διάρκεια λειτουργίας της για βλάβες από κόπωση. Η μέθοδος ασφαλούς ζωής θα πρέπει να εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η τοπική εμφάνιση βλαβών σε ένα στοιχείο μπορεί να οδηγήσει σε ταχεία αστοχία του στοιχείου αυτού ή του φορέα.

Αντίστοιχα λοιπόν, προσδιορίζονται και οι συντελεστές που θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του επαυξημένου φορτίου για τον έλεγχο της κόπωσης:

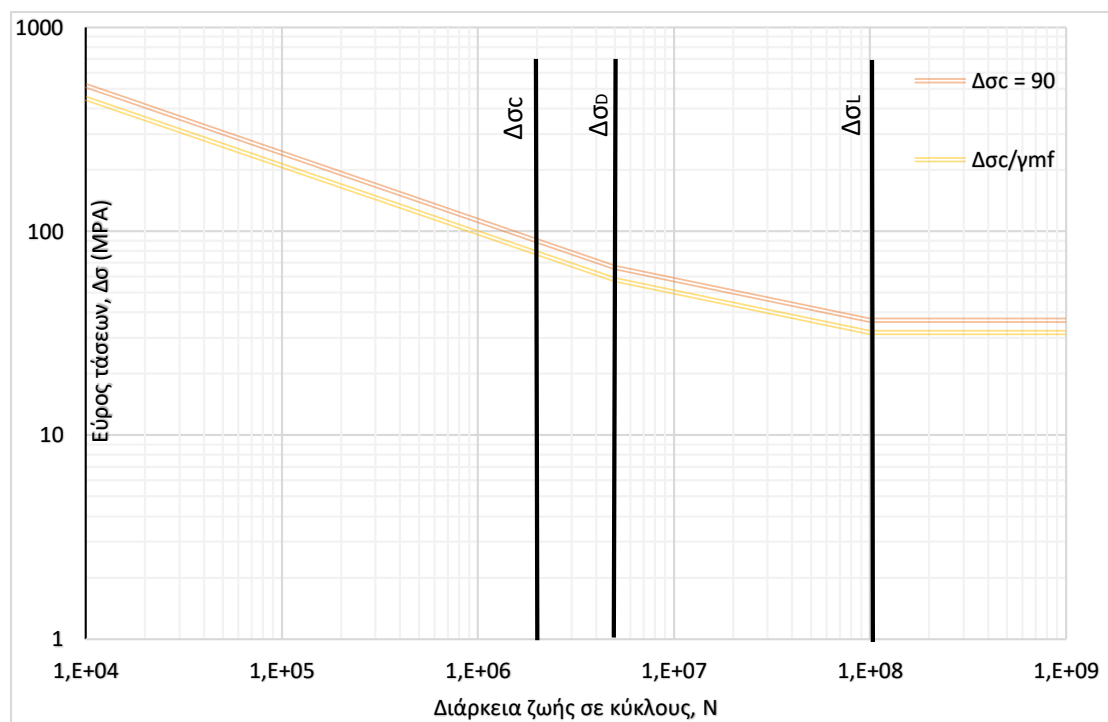
Πίνακας 6.1: Συντελεστές οριακής κατάστασης κόπωσης γ_{mf} [9]

Μέθοδος εκτίμησης	Επιπτώσεις αστοχίας	
	Χαμηλές	Υψηλές
Ανοχή βλαβών	1.00	1.15
Ασφάλεια ζωής	1.15	1.35

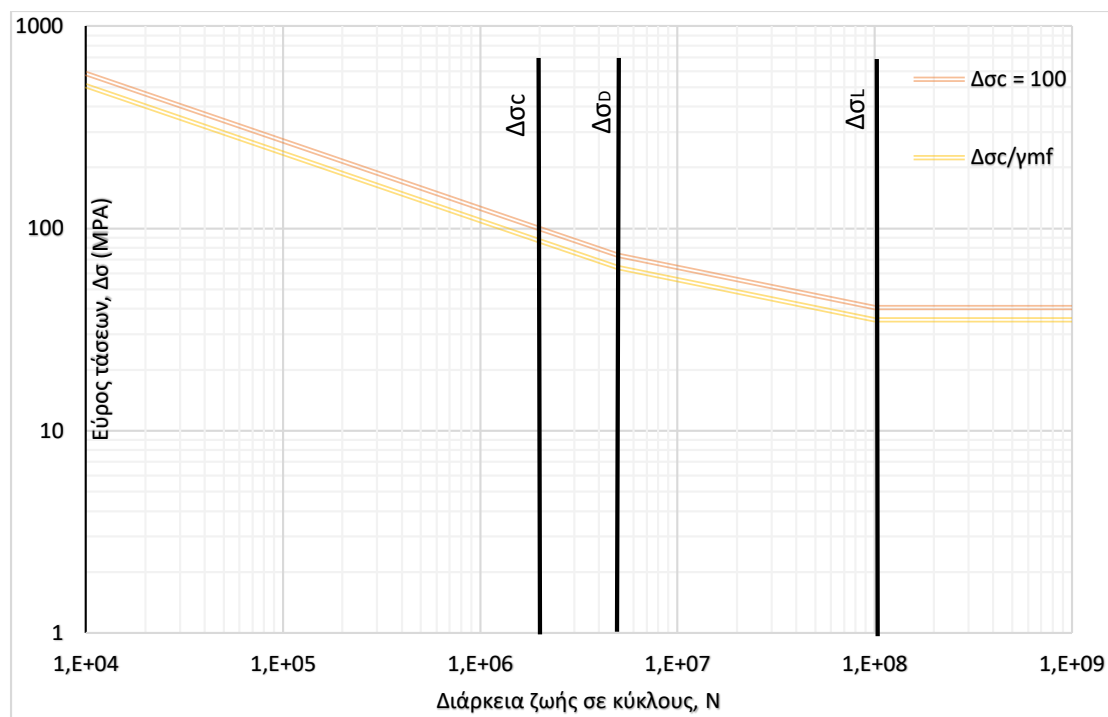
Στην παρούσα εργασία, έγινε παραδοχή επαρκούς επιθεώρησης της κατασκευής στην διάρκεια ζωής της, συνεπώς επιλέχθηκε $\gamma_{MF} = 1.15$. Παρουσιάζεται όμως μια παραμετρική διερεύνηση του βαθμού στον οποίο θα επηρεάζονταν τα αποτελέσματα του ελέγχου της κόπωσης, για $\gamma_{MF} = 1.35$, σε περίπτωση που δεν γίνονται επαρκείς επιθεωρήσεις.



Σχήμα 6.7: Υπολογισμός αντοχής σε πλήθος κύκλων, για $\Delta\sigma_c = 112$



Σχήμα 6.8: Υπολογισμός αντοχής σε πλήθος κύκλων, για $\Delta\sigma_c = 90$



Σχήμα 6.9: Υπολογισμός αντοχής σε πλήθος κύκλων, για $\Delta\sigma_c = 100$

6.2.5 Επιρροή του πάχους της λεπτομέρειας

Η επιρροή του μεγέθους της λεπτομέρειας είναι σημαντική για στην αντοχή της έναντι κόπωσης, τόσο όσο αφορά το μήκος της συγκόλλησης όσο και το πάχος αυτής. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί, δεδομένου ότι τα πειραματικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των καμπύλων κόπωσης είχαν συγκεκριμένες διαστάσεις, και συνεπώς δεν καλύπτουν κάθε λεπτομέρεια με ακρίβεια, παρά μόνο αυτές των οποίων οι διαστάσεις δεν ξεπερνούν κατά πολύ αυτές των πειραματικών δοκιμίων. Για αρκετά μεγαλύτερες διαστάσεις συγκολλήσεων, η αντοχή για τον έλεγχο της κόπωσης πρέπει να προσαρμόζεται στην υπό μελέτη λεπτομέρεια μέσω ενός μειωτικού συντελεστή, ο οποίος λαμβάνει υπόψιν το πάχος του τμήματος στο οποίο θα δημιουργηθεί η ρωγμή της κόπωσης (μικρότερο μεταξύ των δύο διαφορετικών τμημάτων που συγκολλώνται) και την απόκλιση του από το πάχος t_0 το οποίο είναι συνήθως ίσο με 25mm και είναι το χαρακτηριστικό, κάτω του οποίου δεν χρειάζεται κάποια απομείωση.

$$\Delta\sigma_{c,red} = \Delta\sigma_c \cdot k_s \quad (6.17)$$

όπου

$$k_s = \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (6.18)$$

Όπως παρατηρείται από τους πίνακες του EN 1993-1-9, για εγκάρσιες συγκολλήσεις υπεισέρχεται στην αντοχή τους έναντι κόπωσης ο μειωτικός συντελεστής k_s , ο οποίος για τις συγκολλήσεις σε ύψος +2.11m (transverse 1, 2: $t=55\text{mm}$) υπολογίζεται ως:

$$k_s = \left(\frac{25}{55}\right)^{0.2} = 0.854$$

Για τις συγκολλήσεις σε ύψος +4.11m ισχύει ότι για αυτές που βρίσκονται στα ενισχυμένα τμήματα (transverse 3 και 4) ο συντελεστής k_s είναι ίσος με:

$$k_s = \left(\frac{25}{75}\right)^{0.2} = 0.803$$

Ενώ για την συγκόλληση 5, η οποία βρίσκεται στις μη ενισχυμένες περιοχές του κελύφους το k_s είναι ίσο με:

$$k_s = \left(\frac{25}{53.5}\right)^{0.2} = 0.859$$

Τέλος, για τις συγκολλήσεις στο ανώτερο τμήμα στα +6.11 m (transverse 6, 7 : t=52mm) ο μειωτικός συντελεστής k_s παίρνει την τιμή:

$$k_s = \left(\frac{25}{52}\right)^{0.2} = 0.864$$

6.2.6 Υπολογισμός κύκλων αντοχής για κάθε εύρος τάσεων

Η αντοχή σε κύκλους φόρτισης μπορεί να υπολογιστεί με επαρκή ακρίβεια, χρησιμοποιώντας την κατασκευαστική λεπτομέρεια που αντιστοιχεί σε κάθε τμήμα μελέτης και ισχύει ότι:

$$N_i = \left(\frac{\Delta\sigma_{c,red}/\gamma_{Mf}}{\Delta\sigma_i}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6, \quad \text{για } \Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_D \quad (6.19)$$

$$N_i = \left(\frac{\Delta\sigma_{c,red}/\gamma_{Mf}}{\Delta\sigma_i}\right)^5 \cdot 2 \cdot 10^6, \quad \text{για } \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D \quad (6.20)$$

6.2.7 Περιορισμοί εφαρμογής

Οι καμπύλες κόπωσης και οι κατηγορίες λεπτομερειών που βρίσκονται στον Ευρωκώδικα 3, μέρος 1-9 βασίζονται κυρίως σε πειράματα κόπωσης τα οποία έχουν γίνει, σε χάλυβες ποιότητας από S235 μέχρι S355. Σε περιβάλλοντα μη διαβρωτικά, μελέτες έχουν δείξει ότι η πρακτική του Ευρωκώδικα 3 μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες ποιότητες και είδη χάλυβα. Η συνιστώμενη πρακτική όμως για τον έλεγχο κόπωσης έχει ένα πεδίο ισχύος, τόσο για το υλικό της κατασκευής, όσο και για την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται. Συγκεκριμένα, δεν μπορούν να εφαρμοστούν οι πρακτικές του Ευρωκώδικα 3 όταν:

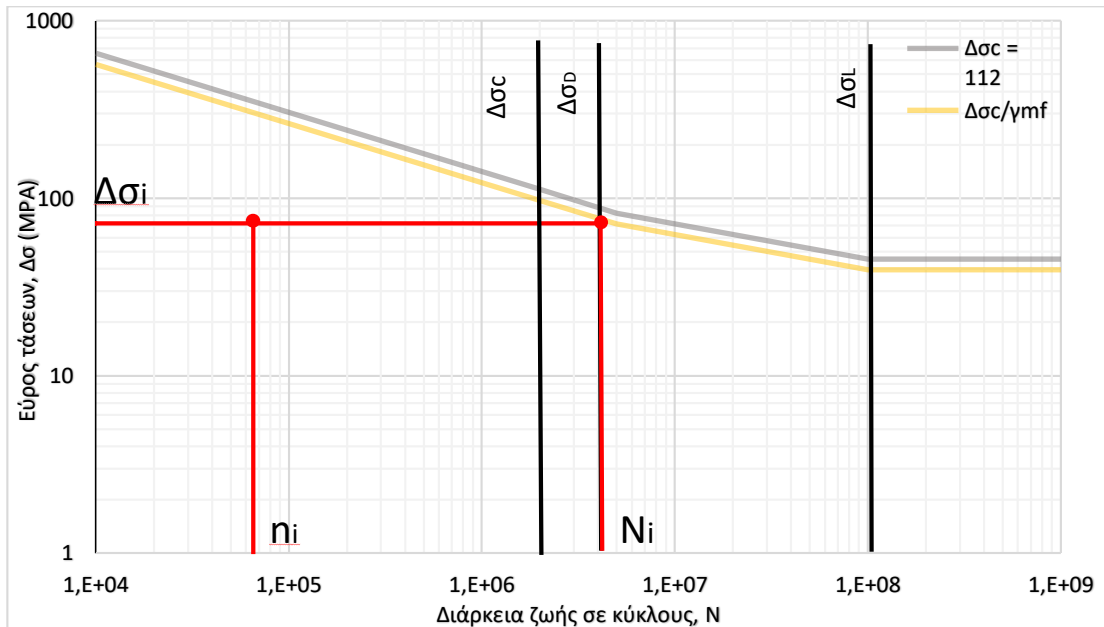
- Υπάρχει ολιγοκυκλική φόρτιση, δηλαδή όταν η αστοχία επέρχεται μετά από μικρό πλήθος κύκλων φόρτισης (π.χ. σε περίπτωση σεισμού), ή γενικότερα όταν είτε το εύρος της ονομαστικής ορθής τάσης ξεπερνά την τιμή της $1,5 \cdot f_y$ είτε η αντίστοιχα της διατμητικής τάσης ξεπερνά το $\frac{1,5 \cdot f_y}{\sqrt{3}}$.
- Η θερμοκρασία στην οποία υπόκειται η κατασκευή ξεπερνά τους 150°C.
- Το υλικό βρίσκεται σε διαβρωτικό περιβάλλον, ή γενικότερα σε συνθήκες διαφορετικές από τις ατμοσφαιρικές, είτε σε παράκτια περιοχή.
- Η ποιότητα του υλικού, αναφέρεται σε χάλυβες αντοχής μεταξύ S235 και S700.

6.3 Μέθοδος συσσωρευμένης βλάβης

Δεδομένου ότι είναι αδύνατο να προσδιοριστεί η πραγματική φόρτιση στην οποία θα υποβληθεί μια κατασκευή κατά την διάρκεια ζωής της, άρα και η πραγματική αντοχή σε κόπωση, υιοθετείται ένας απλός νόμος γραμμικής συσσώρευσης βλάβης από φορτία κόπωσης. Η θεώρηση αυτή αποτελεί τον πολύ απλό νόμο του Palmgren-Miner. Σύμφωνα με την γραμμική θεώρηση, όταν εξετάζεται μια φόρτιση με διαφορετικά εύρη τάσεων, $\Delta\sigma_i$, κάθε ένα από τα οποία εμφανίζεται n_i φορές κατά την διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, οδηγεί σε μια μερική βλάβη, η οποία παριστάνεται από τον λόγο n_i/N_i , όπου N_i ο αριθμός των κύκλων μέχρι την αστοχία λόγω κόπωσης, και αφορά το κάθε διαφορετικό εύρος τάσης, $\Delta\sigma_i$. Η πιθανή αστοχία ελέγχεται από το άθροισμα των επιμέρους μερικών βλαβών, και επέρχεται όταν το άθροισμα γίνει ίσο με την μονάδα. Ισχύει λοιπόν ότι:

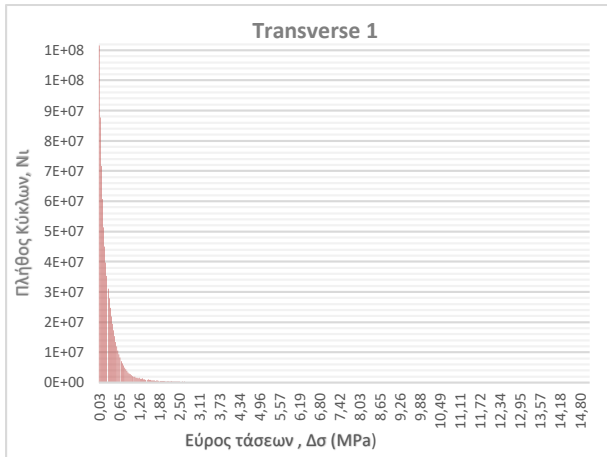
$$D_{tot} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = \sum_{i=1}^{n_{tot}} \frac{n_i}{N_i} = \int \frac{dn}{N} \leq 1 \quad (6.21)$$

Αρχικώς για τον προσδιορισμό της αντοχής των υπό μελέτη συγκολλήσεων έναντι κόπωσης, υπολογίστηκαν τα ιστογράμματα αναπτυσσόμενων τάσεων – κύκλων φόρτισης για την κάθε μια από αυτές. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις για τον έλεγχο βρέθηκαν στο κεφάλαιο 5.2.3 έπειτα από διερεύνηση της κρισιμότερης διεύθυνσης άσκησης των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από την ανάλυση για τον έλεγχο κόπωσης για κάθε δεδομένη θέση που μελετήθηκε.

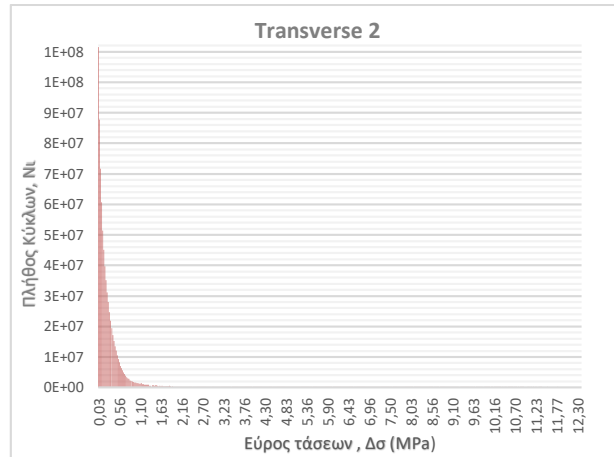


Σχήμα 6.10: Τυπική μορφή τρόπου υπολογισμού συντελεστή βλαβών, D

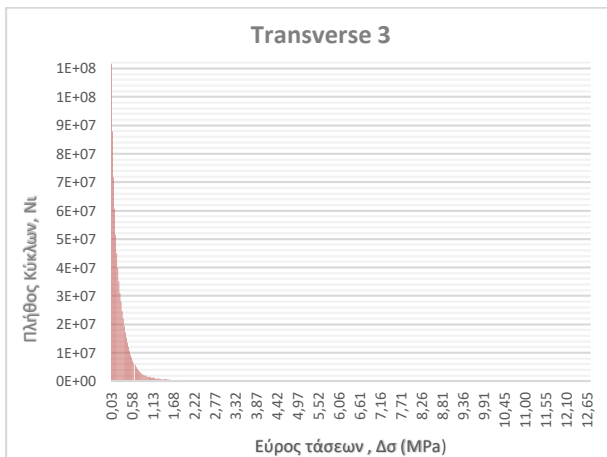
Εγκάρσιες Συγκολλήσεις



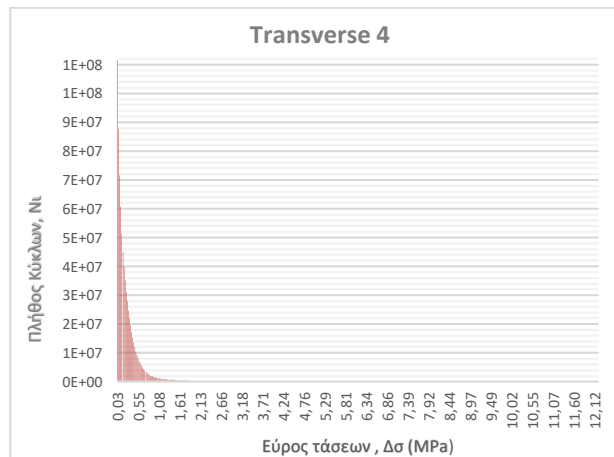
Σχήμα 6.11



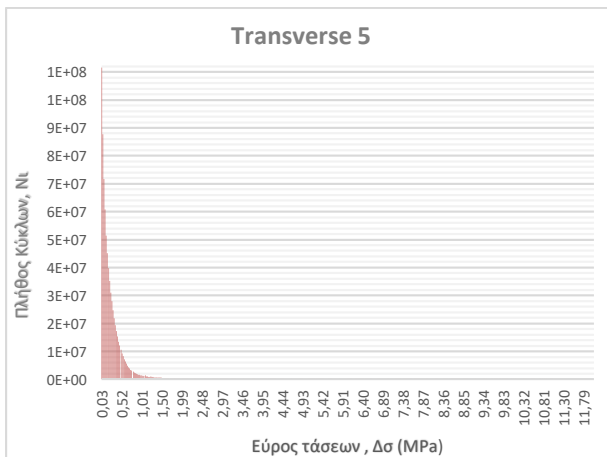
Σχήμα 6.12



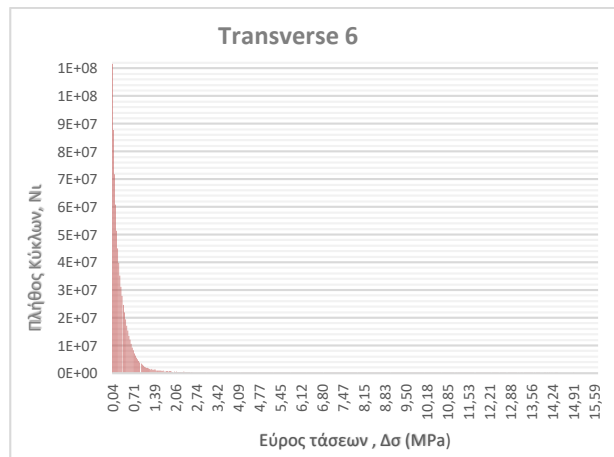
Σχήμα 6.13



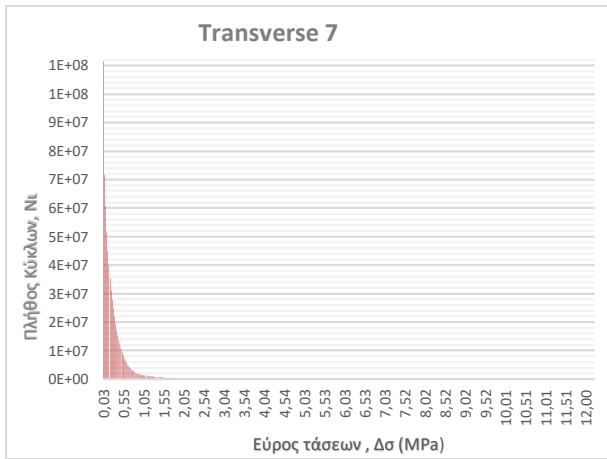
Σχήμα 6.14



Σχήμα 6.15

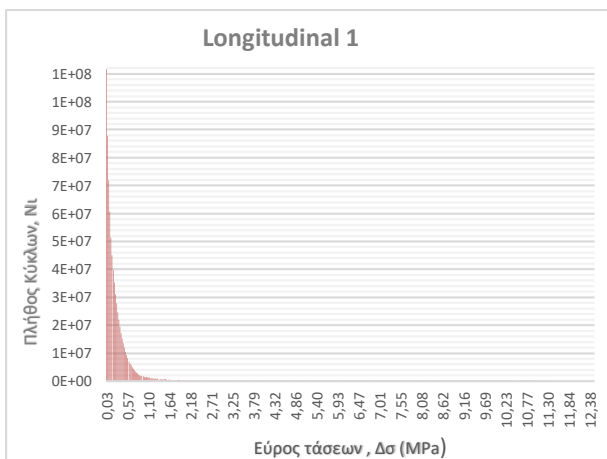


Σχήμα 6.16

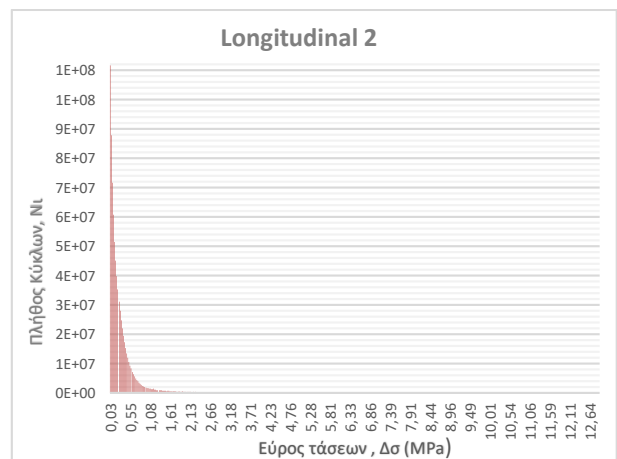


Σχήμα 6.17

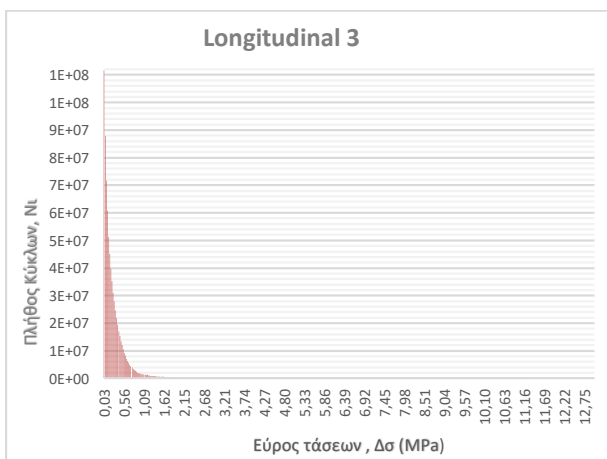
Διαμήκεις



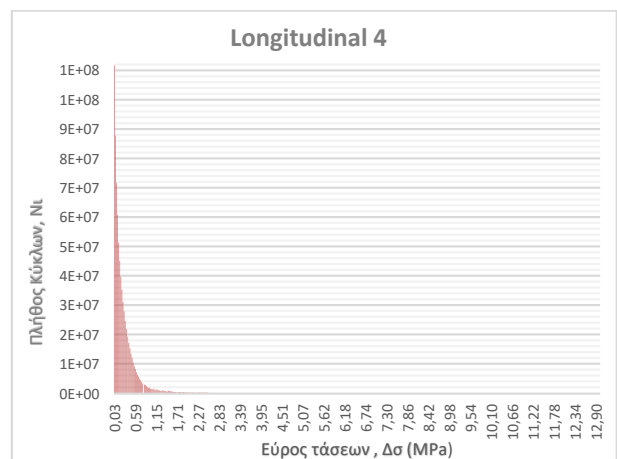
Σχήμα 6.18



Σχήμα 6.19

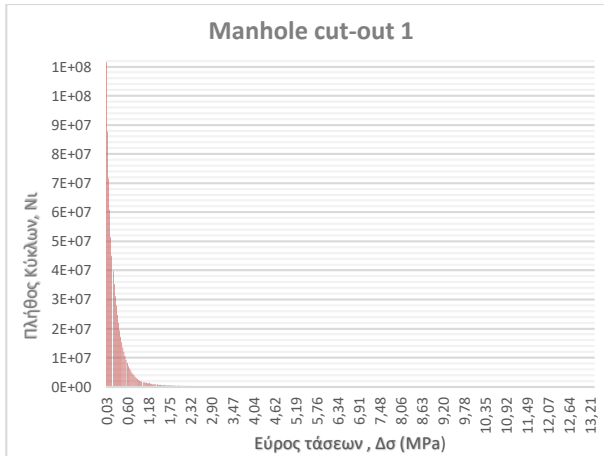


Σχήμα 6.20

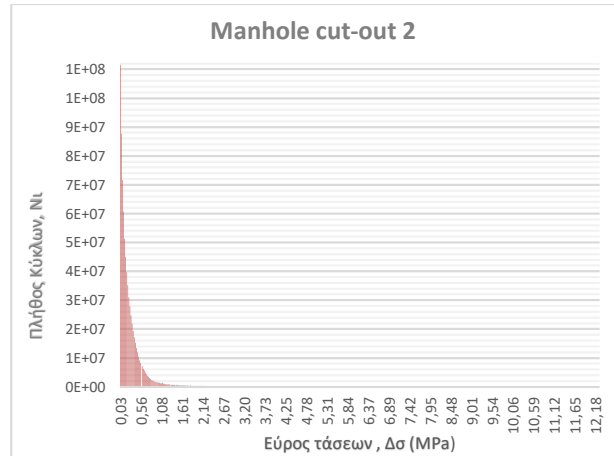


Σχήμα 6.21

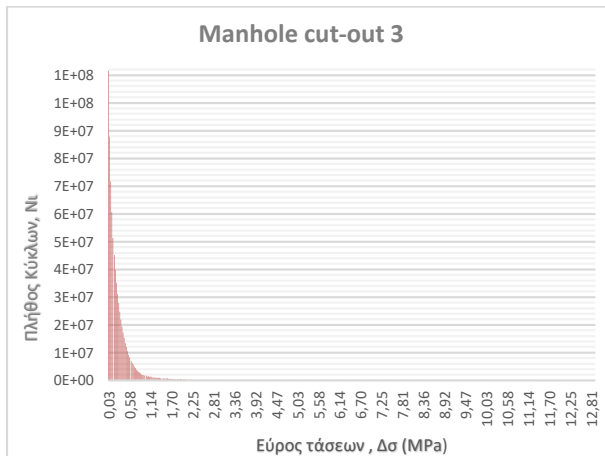
Περιμετρικά της οπής της ανθρωποθυρίδας



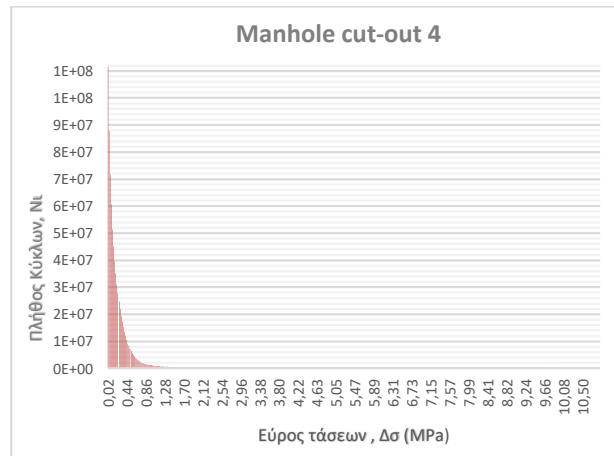
Σχήμα 6.22



Σχήμα 6.23



Σχήμα 6.24



Σχήμα 6.25

Σχήματα 6.11 – 6.25: Ιστογράμματα κύκλων φόρτισης αποφόρτισης – εύρους τάσης, $\Delta\sigma$ για κάθε μία από τις συγκολλήσεις στη περιοχή της ανθρωποθυρίδας

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος των συγκολλήσεων σε κόπωση, μέσω της μεθόδου συσσώρευσης βλάβης για τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού που προέκυψαν από την ανάλυση. Για συντελεστή $\gamma_{mf} = 1,15$ (έχουμε υποθέσει επαρκή συντήρηση της κατασκευής) βρέθηκε το πλήθος κύκλων αντοχής για κάθε εύρος τάσεων για κάθε θέση συγκόλλησης η οποία εξετάστηκε, και στην συνέχεια υπολογίστηκε το D_{tot} μέσω της σχέσης (6.21). Ο συντελεστής D_{tot} για κάθε συγκόλληση φαίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 6.2: Συσσώρευση βλάβης για $\gamma_{mf}=1,15$

Συγκόλληση		D_{tot}
Εγκάρσιες	1	0,46
	2	0,50
	3	0,29
	4	0,24
	5	0,43
	6	0,51
	7	0,45
Διαμήκειες	1	0,10
	2	0,11
	3	0,11
	4	0,12
Περιμετρικά της οπής της ανθρωποθυρίδας	1	0,22
	2	0,15
	3	0,19
	4	0,19

Ακόμη, έγινε μια διερεύνηση του ποσοστού της επιρροής που θα είχε στην συσσώρευση βλάβης εάν δεν μπορούσαμε να εξασφαλίσουμε την επαρκή συντήρηση της κατασκευής στην περίοδο μελέτης της για την ασφάλεια έναντι κόπωσης, και συνεπώς ο συντελεστής γ_{mf} θα έπρεπε να ληφθεί ίσος με 1,35. Παρουσιάζεται λοιπόν ο αντίστοιχος πίνακας που προέκυψε

Πίνακας 6.3: Συσσώρευση βλάβης για $\gamma_{mf}=1,35$

Συγκόλληση		D_{tot}
Εγκάρσιες	1	0,91
	2	0,99
	3	0,60
	4	0,50
	5	0,85
	6	1,01
	7	0,89
Διαμήκειες	1	0,20
	2	0,23
	3	0,22
	4	0,24
Περιμετρικά της οπής της ανθρωποθυρίδας	1	0,44
	2	0,31
	3	0,38
	4	0,38

7. ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως σκοπό την διερεύνηση, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό κανονισμό EN 1993-1-9, της κόπωσης των συγκολλητών συνδέσεων γύρω από την οπή της ανθρωποθυρίδας του πυλώνα μιας τυπικής ανεμογεννήτριας μορφής κυλινδρικού κελύφους σε κόπωση. Η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε για τον σκοπό αυτό είχε δεδομένη γεωμετρία, ύψος περί τα 118m και διάμετρο 4,30m σε όλο το μήκος της, εκτός του τελευταίου τμήματος που είχε κολουροκωνική μορφή.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε διερεύνηση σχετικά με τον τρόπο προσομοίωσης του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Για τον σκοπό αυτό, προσομοιώθηκε το κατώτερο τμήμα του πυλώνα της ανεμογεννήτριας με τρία διαφορετικά είδη πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό να βρεθεί η βέλτιστη λύση, η οποία να προσφέρει τόσο ακριβή και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα, αλλά και να έχει το δυνατόν μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Εξίσου μεγάλης σημασίας ήταν και η διερεύνηση του κατάλληλου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων με το οποίο θα γίνουν οι αναλύσεις του προσομοιώματος, έτσι ώστε το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων να μην επηρεάζει την μελέτη, και συνεπώς να εκμεταλλευτούμε στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό την ακρίβεια του μοντέλου που επιλέχθηκε.

Αφού προσδιορίστηκε το κατάλληλο προσομοίωμα για τις αναλύσεις, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί αρχικά ώστε να πραγματοποιηθεί μια διερεύνηση της επιρροής που έχει στην συμπεριφορά του πυλώνα της ανεμογεννήτριας η διάνοιξη της οπής της ανθρωποθυρίδας, καθώς και του ποσοστού βελτίωσης που προσφέρει κάθε είδος ενίσχυσης στην τοπικά απομειωμένη αντοχή του κελύφους. Κάτι τέτοιο είναι σημαντικό, ώστε να υπάρχει μια ποσοτικοποίηση της σημασίας των δύο ειδών ενισχύσεων (τοπικής πάχυνσης του κελύφους του πυλώνα και ενισχυτικού πλαισίου) που χρησιμοποιούνται στο προσομοίωμα, καθώς και της συμπεριφοράς του κελύφους χωρίς αυτές, ώστε να είναι δυνατόν να γίνουν προτάσεις βελτιστοποίησης αυτού.

Τελικώς, αφού προσδιορίστηκε η φορά άσκησης της ροπής, ώστε να δίνει τα δυσμενέστερα αποτελέσματα σε όρους τάσεων σε κάθε συγκόλληση από όσες μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, έγινε εφαρμογή των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από την ανάλυση για τον έλεγχο κόπωσης στο υπό μελέτη τμήμα του πυλώνα. Τα εντατικά μεγέθη που ασκήθηκαν ήταν σε όρους καμπτικής ροπής, για ένα εύρος ροπών από 200kNm έως 88400kNm με βήμα 200kNm, αντιπροσωπευτικό των πραγματικών φορτίων που καταπονούν τον πυλώνα της κατασκευής. Με βάση τις αναπτυσσόμενες τάσεις που προέκυψαν από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος των συγκολλήσεων σε κόπωση, μέσω της μεθόδου συσσώρευσης βλάβης, για πλήθος κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης που αντιστοιχεί σε διάρκεια ζωής 25 ετών, και προσδιορίστηκε η κρίσιμότερη θέση μεταξύ των συγκολλήσεων που μελετήθηκαν.

7.2 Συμπεράσματα

Από την παραπάνω διερεύνηση προέκυψαν αρκετά σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία στοχεύουν στην κατανόηση της συμπεριφοράς των συγκολλήσεων του πυλώνα στην περιοχή της ανθρωποθυρίδας, καθώς και στην επαλήθευση της αντοχής τους έναντι κόπωσης για την περίοδο των 25 ετών, η οποία διερευνήθηκε.

Όπως παρατηρήθηκε, για θεώρηση επαρκούς επιθεώρησης της κατασκευής στην διάρκεια ζωής της, συνεπώς συντελεστή $\gamma_{MF} = 1.15$ (ανοχή βλαβών), πιο κρίσιμες από τις συγκολλήσεις που μελετήθηκαν εμφανίζονται οι εγκάρσιες. Συγκεκριμένα, μεταξύ αυτών, μεγαλύτερη συσσώρευση βλαβών παρατηρείται σε αυτή μεταξύ των μη ενισχυμένων τμημάτων του πυλώνα σε ύψος 2.11m ($D_{tot} = 0,50$), και αυτή μεταξύ του ενισχυμένου τμήματος και του πυλώνα σε ύψος +6.11m ($D_{tot}=0,51$). Στην πρώτη περίπτωση, τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα, καθώς δεδομένου ότι η συγκόλληση βρίσκεται αρκετά κοντά στην βάση του πυλώνα, τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν σε εκείνο το σημείο είναι αρκετά αυξημένα, και συνεπώς οι αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω αυτών οδηγούν σε μεγαλύτερη συσσώρευση βλάβης στην συγκεκριμένη περιοχή.

Η επόμενη πιο κρίσιμη συγκόλληση, η οποία παρουσιάζεται σε ύψος +6.11m, εμφανίζεται μεταξύ του τμήματος που έχει τοπικά αυξημένο πάχος (μεταβλητό, από 55mm σε 75mm) και του επόμενου τμήματος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Οι αυξημένες τάσεις σε εκείνο το σημείο, οφείλονται στην ύπαρξη της οπής της ανθρωποθυρίδας, η επιρροή της οποίας δεν έχει εξασθενήσει πλήρως σε αυτό το ύψος (Σχήμα 5.14) αλλά οδηγεί σε αυξημένες τάσεις σε μια περιοχή γύρω της. Δεδομένου λοιπόν ότι η πιθανή αστοχία θα συμβεί στο λεπτότερο τμήμα του πυλώνα ($t=52mm$) καθώς και ότι σε εκείνο το σημείο τα εντατικά μεγέθη δεν έχουν επανέλθει στο εύρος που θα είχαν χωρίς οπή, εμφανίζεται μεγαλύτερη συσσώρευση βλαβών, η οποία πιθανόν να μειωνόταν αισθητά, εάν η τοπική πάχυνση του κελύφους του πυλώνα συνεχιζόταν για μια περιοχή πάνω από τα +6,11m, ώστε να εξασθενούσε πλήρως η επιρροή τη ανθρωποθυρίδας εντός του ενισχυμένου τμήματος του πυλώνα.

Οι διαμήκεις συγκολλήσεις δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η συσσώρευση βλάβης δεν εμφανίζεται έντονη ώστε να χρειαστεί κάποια περαιτέρω διερεύνηση. Λίγο μεγαλύτερη παρουσιάζεται η συσσώρευση βλαβών στην περιοχή περιμετρικά της οπής της ανθρωποθυρίδας, μεταξύ του τμήματος του πυλώνα που έχει παχυνθεί και του ενισχυτικού πλαισίου, όμως και πάλι δεν φτάνει σε τιμές στις οποίες φτάνουν οι εγκάρσιες συγκολλήσεις.

Σε κάθε περίπτωση όμως, από την διερεύνηση για $\gamma_{MF} = 1,35$ (ασφάλεια ζωής) στην οποία απαιτείται η ικανοποιητική λειτουργία της κατασκευής για βλάβες από κόπωση κατά την διάρκεια ζωής της χωρίς την ανάγκη επιθεωρήσεων, παρατηρείται ότι οι δύο κρίσιμες εγκάρσιες συγκολλήσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως δεν επαρκούν για τον έλεγχο της κόπωσης,

αφού εμφανίζουν $D_{tot} = 0,99$ και $1,01$ αντίστοιχα. Ταυτόχρονα όμως, και οι υπόλοιπες εγκάρσιες συγκολλήσεις παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλο συντελεστή D_{tot} , ο οποίος δεν μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτός. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι με την παρούσα γεωμετρία, είναι απαραίτητη η επαρκής επιθεώρηση της κατασκευής στην περίοδο λειτουργίας της, ώστε να θεωρείται ασφαλής η κατασκευή έναντι κόπωσης.

7.3 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση των συγκολλήσεων στην περιοχή της ανθρωποθυρίδας είναι οι εξής:

- Η δοκιμή χρήσης τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων και ταυτόχρονη πύκνωση του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη τάξη πεπερασμένων με περισσότερους κόμβους σε κάθε πλευρά, για αύξηση της ακρίβειας, ώστε τα αποτελέσματα να είναι ανεπηρέαστα από το πλέγμα που έχει χρησιμοποιηθεί.
- Δοκιμή ένταξης στο προσομοίωμα των κοχλιών για την σύνδεση μεταξύ των φλαντζών, και προσδιορισμός της απόκλισης του μοντέλου από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, όπου θεωρήθηκε προσεγγιστικά πάκτωση μεταξύ των επιμέρους φλαντζών.
- Ανάλυση του ίδιου προβλήματος κόπωσης για διαφορετικού τύπου συγκολλητές συνδέσεις.
- Διερεύνηση της επιρροής που έχουν στο προσομοίωμα οι εδαφικές παράμετροι και κατ' επέκταση οι συνθήκες στήριξης της κατασκευής στο έδαφος, και του ποσοστού μεταβολής των αναπτυσσόμενων τάσεων στην περιοχή των συγκολλήσεων λόγω μιας τέτοιας αλλαγής.
- Το ενδεχόμενο επέκτασης της περιοχής ενίσχυσης πλησίον της ανθρωποθυρίδας, με σκοπό να μειωθεί η συγκέντρωση βλάβης στην περιοχή των συγκολλήσεων που εμφανίζουν αυξημένες τάσεις λόγω της ύπαρξης της οπής.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R. W. Righter, "Wind Energy in America: A History", 1996.
- [2] E. Hau, "Wind Turbines : Fundamentals, Technologies, Application, Economics", Berlin Heidelberg: Springer - Verlag, 2013.
- [3] World Steel Association, "Steel solutions in the green economy - Wind turbines", 2012.
- [4] Franz Mühle, Lars Sætran, Muyiwa S Adaramola, "The effect of the number of blades on wind turbine wake- a comparison between 2- and 3- bladed rotors", October 2016.
- [5] J. Manwell, J. MCGowan, A. Rogers, "Wind energy explained", Massachusetts, Washington, USA: Wiley editions, 2009.
- [6] Association, European Wind Energy, "The Economics of Wind Energy", 2009.
- [7] Det Norske Veritas (DNV), "Guidelines for Design of Wind Turbines", Wind Energy Department, Risø National Laboratory, 2002.
- [8] European Committee for Standardization, EN 1993-1-9: Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-9: "Strength and Stability of Shell Structures", 2007.
- [9] Alaiian Nussbauner, Luis Borges and Laurence Davaine, "Fatigue design of steel and composite Structures", ECCS - European Convention for Constructional Steekwork, 2018.
- [10] European Committee for Standardization, EN 1993-1-9: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: "Fatigue", 2005.
- [11] European Committee for Standardization, EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: "General actions - Wind actions", 2010.

- [12] Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd , DNVGL - RP- C203 : "Fatigue design of offshore steel structures", 2016.
- [13] Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd, DNVGL - RP - C208: "Determination of structural capacity by non-linear finite element analysis methods", 2013.
- [14] Ν. Κ. Κόρακας, "Σχεδιασμός πυλώνων ανεμογεννητριών μορφής κυλινδρικού ή κολουροκωνικού κελύφους", Αθήνα, 2018.
- [15] Χ. Δημόπουλος, "Ενίσχυση οπών ανθρωποθυρίδων σε χαλύβδινα κελύφη πυλώνων ανεμογεννητριών", Διδακτορική διατριβή, Αθήνα: Ε.Μ.Π. , Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, 2012.
- [16] "www.gwec.net," [Online].