



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προκαταρκτικός Σχεδιασμός Μονοπάσσαλης Θαλάσσιας Ανεμογεννήτριας



Νίκος Κουκουλάς

Επιβλέπων: Καθ.Ε.Μ.Π. Δρ. Χάρης Γαντές

Αθήνα, Νοέμβριος 2014

EMK2014/29

Κουκουλάς Ι. Ν. (2014).
Προκαταρκτικός σχεδιασμός μονοπάσσαλης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2014/29
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Koukoulas I. N. (2014).
Preliminary design of a monopile offshore wind turbine
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2014/29
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ, οποίος μου έδωσε την δυνατότητα να συνεργαστώ μαζί του και με βοήθησε να αποκτήσω σημαντικές εμπειρίες και να αναπτύξω δεξιότητες οι οποίες είμαι πεπεισμένος ότι θα μου φανούν χρήσιμες στην αρχή της επαγγελματικής μου πορείας. Ο χαρακτήρας, οι άρτιες επιστημονικές γνώσεις και η οξυδέρκεια του αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης και δημιουργίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Πολιτικό Μηχανικό κ. Γεωργία Μαργαρίτη για την πολύτιμη και αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επιπλέον ευχαριστώ πολύ τους υποψήφιους διδάκτορες Βασίλη Μελισσιανό και Κωνσταντίνα Κουλάτσου για τις πολύτιμες συμβουλές τους καθώς επίσης και την Ισαβέλλα Βασιλοπούλου για την μορφοποίηση των κειμένων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους φίλους και συμφοιτητές μου για την υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2014/29

Προκαταρκτικός σχεδιασμός μονοπάσσαλης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας

Νίκος Ι. Κουκουλάς

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται αφενός να καταγραφούν τα βασικά στοιχεία της διεθνούς πρακτικής που ακολουθείται για το σχεδιασμό μονοπάσσαλων θαλάσσιων ανεμογεννητριών, κυρίως μέσω αναφορών σε διεθνείς κανονισμούς και τεύχη με κατευθυντήριες οδηγίες, και αφετέρου να μελετηθεί σε επίπεδο προκαταρκτικού σχεδιασμού μια πρότυπη μονοπάσσαλη θαλάσσια ανεμογεννήτρια με δεδομένα που αφορούν τον ελλαδικό χώρο.

Στο πρώτο κεφάλαιο, καταγράφονται ιστορικά και κοινωνικοοικονομικά στοιχεία όσον αφορά την υπεράκτια αιολική ενέργεια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στους διάφορους τύπους θαλάσσιων ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται διεθνώς και στα εγγενή πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους, καταλήγοντας έτσι σε βασικά κριτήρια επιλογής του δομικού τους συστήματος. Περιγράφεται επίσης ο τρόπος λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας και γίνεται σύγκριση υπεράκτιας και χερσαίας αιολικής ενέργειας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφονται αναλυτικά η διαδικασία και οι βασικές αρχές σχεδιασμού θαλάσσιων ανεμογεννητριών, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα. Επίσης, αναφέρεται συνοπτικά ο τρόπος υπολογισμού των αεροδυναμικών και υδροδυναμικών φορτίων που καταπονούν τις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες, το οποίο αποτελεί ένα μεγάλο κεφάλαιο κατά τον σχεδιασμό τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η πορεία υπολογισμού της αντοχής των κατασκευαστικών μερών της ανεμογεννήτριας στην οριακή κατάσταση αστοχίας με την μέθοδο των τάσεων, όπως προβλέπεται στον Ευρωκώδικα 3.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφεται η συμπεριφορά του συστήματος πασσάλου-εδάφους και η πορεία υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας του.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται τελικά ο προκαταρκτικός σχεδιασμός μιας πρότυπης μονοπάσσαλης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας με βάση τις παραπάνω αναφορές, η οποία προσομοιώνεται με χρήση του ελεύθερου λογισμικού FAST από το εργαστήριο NREL των ΗΠΑ και του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

Στο έβδομο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

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



DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2014/29

Preliminary design of a monopile offshore wind turbine

Nikos I. Koukoulas

supervised by Charis J. Gantes

Abstract

In this dissertation it is first attempted to summarize the fundamental aspects of the international practice on the design of offshore monopile wind turbines as prescribed by international standards and guidelines, and then to present a case study for the design of an offshore wind turbine for Greek sea conditions.

In the first chapter some historical, social and financial data about offshore wind energy are reported.

In the second chapter, the different types of offshore wind turbines and their fundamental parts are presented, with reference to their advantages and disadvantages, in order to outline selection criteria for each structural type. Also, the wind turbines' function is described and a comparison between offshore and onshore wind energy is carried out.

In the third chapter, the basic principles and methodology of offshore wind turbines' design are described, according to international standards. Moreover, the calculation of wind and wave loads acting on offshore wind turbines is briefly presented.

In the fourth chapter, the methodology for calculation of strength and stability capacity of structural members is determined in the ultimate limit state as defined in Eurocode 3.

In the fifth chapter, pile-soil interaction is discussed and the steps for calculating the capacity of the turbine's foundation are described.

In the sixth chapter, the preliminary design of a monopile offshore wind turbine is carried out based on the above. The structure is modeled in public domain software FAST provided by NREL Laboratory in the United States, and in finite element software ADINA.

In the seventh chapter the conclusions of this thesis are briefly outlined.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ιστορική εξέλιξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων.....	2
2	Τεχνικά χαρακτηριστικά υπεράκτιων ανεμογεννητριών	7
2.1	Τύποι ανεμογεννητριών	7
2.2	Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας και τρόπος λειτουργίας της.....	7
2.3	Σύγκριση υπεράκτιας και ενδοχώριας αιολικής ενέργειας.....	8
2.4	Είδη θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών	10
2.4.1	Θεμελιωμένα Συστήματα.....	10
2.4.2	Πλωτά Συστήματα.....	10
2.4.3	Μονοπάσσαλο Σύστημα	11
3	Διαδικασία Σχεδιασμού Ανεμογεννητριών	15
3.1	Εισαγωγή	15
3.2	Αρχές Σχεδιασμού	15
3.2.1	Γενικές αρχές ανάλυσης και σχεδιασμού της κατασκευής.....	15
3.2.2	Οριακές καταστάσεις	17
3.2.3	Δράσεις.....	17
3.2.4	Κλάσεις ανεμογεννητριών	19
3.2.5	Καταστάσεις σχεδιασμού και συνδυασμοί φορτίσεων	19
3.3	Φορτία.....	22
3.3.1	Φορτία ανέμου.....	22
3.3.2	Κανονικές συνθήκες ανέμου	23
3.3.3	Ακραίες συνθήκες ανέμου	23
3.3.4	Φορτία θαλασσίων κυμάτων	26
3.3.5	Κανονικές Συνθήκες Θάλασσας	27
3.3.6	Ακραίες Συνθήκες Θάλασσας	27
4	Έλεγχος διατομής και μέλους στην οριακή κατάσταση αστοχίας	31
4.1	Χαρακτηριστικά χάλυβα	31
4.2	Κατάταξη διατομών.....	32
4.3	Μέθοδος των τάσεων για κελύφη	33
4.3.1	Αντοχή έναντι λυγισμού.....	33
4.3.2	Κυλινδρικά μέλη σταθερού πάχους.....	34
4.3.3	Κυλινδρικά μέλη μεταβλητού πάχους.....	37

4.3.4	Έλεγχος σε λυγισμό	39
5	Θεμελίωση Πασσάλου	41
5.1	Γενικά στοιχεία	41
5.2	Τρόποι εγκατάστασης.....	42
5.3	Χαλύβδινοι πάσσαλοι.....	43
5.3.1	Φέρουσα ικανότητα διατομής χαλύβδινου πασσάλου	43
5.4	Αντίδραση του εδάφους	44
5.5	Φέρουσα ικανότητα – Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση	44
5.5.1	Συνεκτικά εδάφη - Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση	46
5.5.2	Μη-Συνεκτικά εδάφη – Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση	47
5.6	Φέρουσα ικανότητα – Αντοχή σε πλευρική φόρτιση	48
5.6.1	Συνεκτικά εδάφη - Αντοχή σε οριζόντια φόρτιση	50
5.6.2	Μη συνεκτικά εδάφη - Αντοχή σε οριζόντια φόρτιση.....	52
5.7	Κριτήρια σχεδιασμού πασσάλου	54
5.8	Βιβλιογραφικές αναφορές εφαρμογής της μεθόδου “p-y” για πασσάλους μεγάλης διαμέτρου.....	55
6	Εφαρμογή.....	57
6.1	Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας	57
6.2	Προσομοίωση ανεμογεννήτριας.....	59
6.3	Έλεγχοι επάρκειας διατομής και μέλους με την μέθοδο των τάσεων	63
6.3.1	Φέρουσα ικανότητα πύργου	63
6.3.2	Φέρουσα ικανότητα πασσάλου	82
6.4	Προσομοίωση εδάφους	83
6.5	Υπολογισμός ισοδύναμου τμήματος	90
6.6	Αποτελέσματα ισοδύναμου φορέα	92
7	Συμπεράσματα.....	103

1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες η παγκόσμια διεθνής κοινότητα έχει ξεκινήσει μια συντονισμένη προσπάθεια για τον περιορισμό της παραγωγής ενέργειας με συμβατικούς τρόπους (ορυκτά καύσιμα) εξαιτίας του αυξανόμενου κόστους και της ρύπανσης που δημιουργούν στο περιβάλλον. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διαρκή ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), η οποία αποτυπώνεται στο Σχήμα 1.2.

Στο πλαίσιο αυτό η αιολική ενέργεια παρουσιάζει ταχύτερη ανάπτυξη καθώς αποτελεί μια ήπια, καθαρή και αποδοτική μορφή ενέργειας. Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται ότι η εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ευρωπαϊκή Ένωση πενταπλασιάστηκε στο διάστημα 2000-2013. Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται χιλιάδες χρόνια από τους ανθρώπους για διάφορους σκοπούς όπως η άλεση σιτηρών και η μεταφορά μέσω ιστιοφόρων πλοίων. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας άρχισε να αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την κατασκευή ανεμογεννητριών. Αυτό επιτυγχάνεται με την κίνηση του δρομέα της λόγω της ροής του ανέμου και την μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική με την βοήθεια κατάλληλου μηχανολογικού εξοπλισμού. Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε onshore (ανεμογεννήτριες ξηράς) και offshore (υπεράκτιες) και η δυναμικότητά τους από μερικά kW τα πρώτα χρόνια έχουν φθάσει στα μερικά MW και αναμένεται τα επόμενα χρόνια να αυξηθεί περαιτέρω.

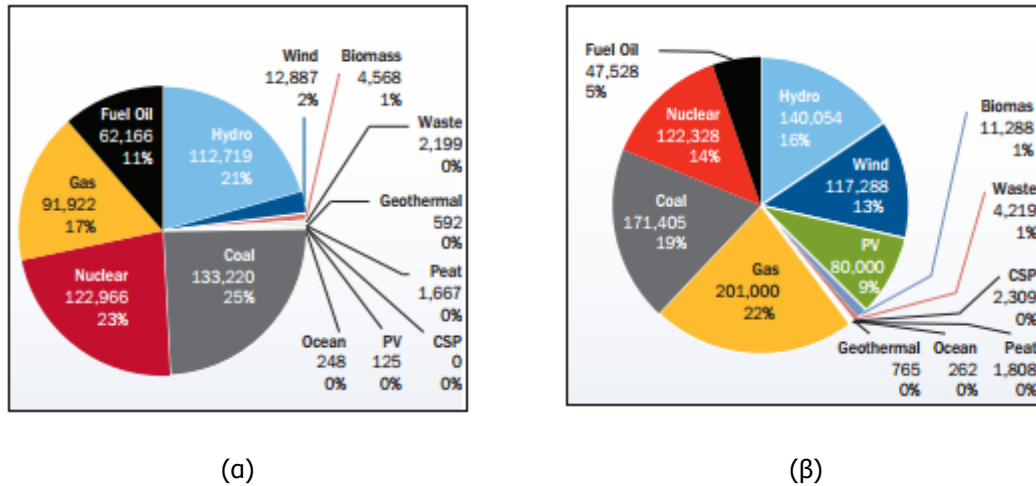


(α)



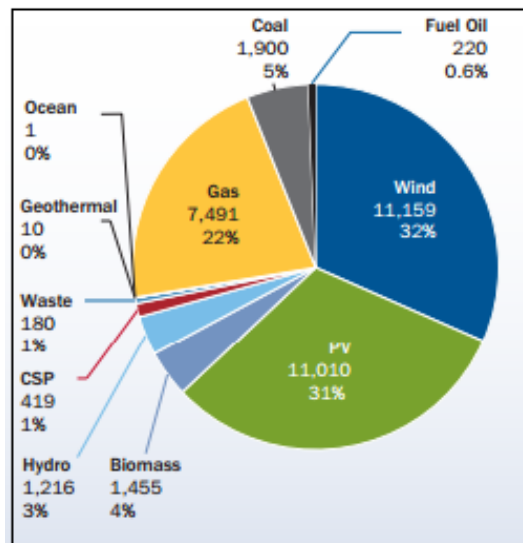
(β)

Σχήμα 1.1: Χρήσεις αιολικής ενέργειας (α) ανεμόμυλος [1.1] , (β) υπεράκτιο αιολικό πάρκο [1.2].



Σχήμα 1.2: Κατανομή της ενεργειακής ισχύς στην Ευρωπαϊκή Ένωση (α) το 2000 , (β) το 2013[1.3].

Όπως φαίνεται από τα στατιστικά στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας (Σχήμα 1.3), το 2013 στην Ευρωπαϊκή Ένωση εγκαταστάθηκαν 35 GW παραγωγικής δυνατότητας εκ των οποίων το μεγαλύτερο ποσοστό (32%) προέρχεται από την αιολική ενέργεια. Το 14% αυτής προέρχεται από ανεμογεννήτριες εγκατεστημένες στη θάλασσα, ποσοστό ρεκόρ στην εξέλιξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων.



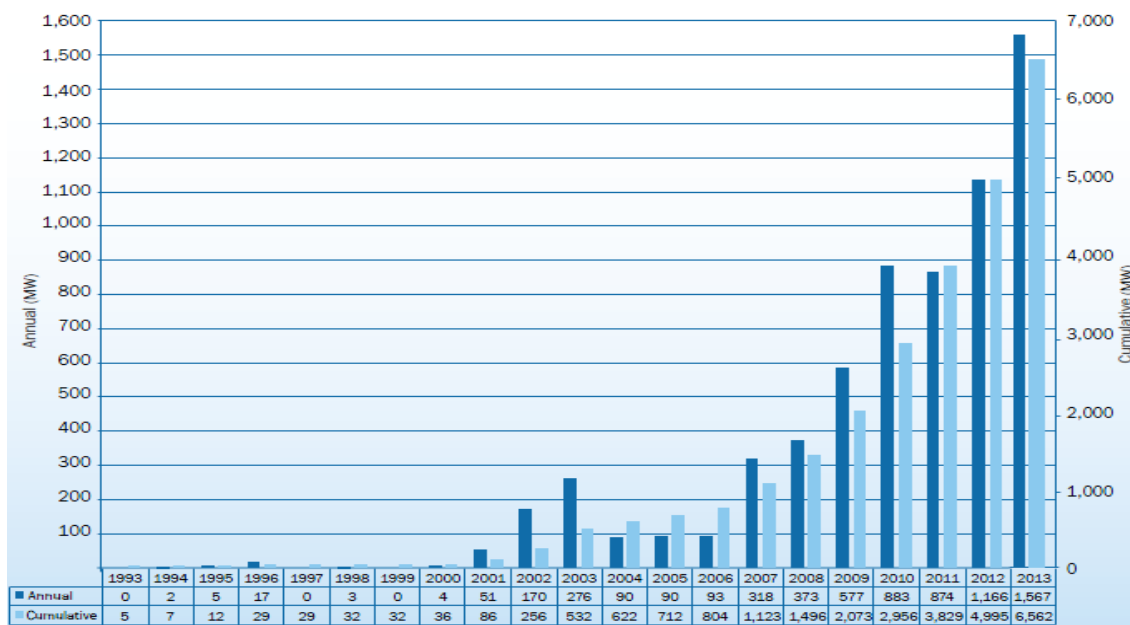
Σχήμα 1.3: Κατανομή της νέας εγκατεστημένης ενεργειακής ισχύς στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2013 [1.3].

1.1 Ιστορική εξέλιξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια που παράγεται από αιολικά πάρκα τοποθετημένα στη θάλασσα μετρά σχεδόν 25 χρόνια. Η Ευρώπη αποτελεί πρωτοπόρο στο συγκεκριμένο τομέα και πιο συγκεκριμένα το 1991 στην Δανία κατασκευάστηκε το πρώτο παράκτιο αιολικό πάρκο. Τα χρόνια που ακολούθησαν σημειώθηκε ραγδαία ανάπτυξη της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς φθάνοντας στο τέλος του 2013 τα 6,562 MW. Στα μέσα του 2013 κατασκευάστηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο στο κόσμο συνολικής ισχύς 630 MW. Σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας το 2013 στο Ηνωμένο Βασίλειο ήταν εγκατεστημένο το 56% της συνολικής αιολικής ενέργειας (3,6 GW) και ακολουθεί η Δανία (1,2 GW), το Βέλγιο (571 MW), η Γερμανία (520 MW) και η Ολλανδία (247

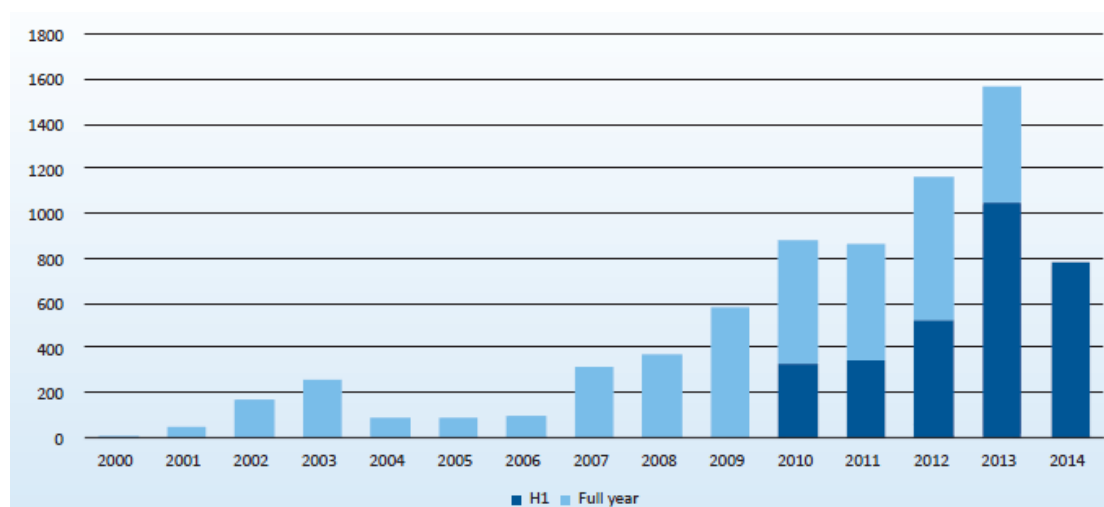
MW) [1.1]. Ο παραπάνω οργανισμός εκτιμά ότι θα έχουν εγκατασταθεί 40 GW έως το 2020 και 150 GW έως το τέλος του 2050.

Ήδη στο πρώτο εξάμηνο του 2014 συνδέθηκαν 224 υπεράκτιες ανεμογεννήτριες σε 17 νέα αιολικά πάρκα συνολικής παραγωγικής ικανότητας 781 MW, ικανότητα μειωμένη κατά 25% σε σχέση με το αντίστοιχο διάστημα του 2013 [1.3].



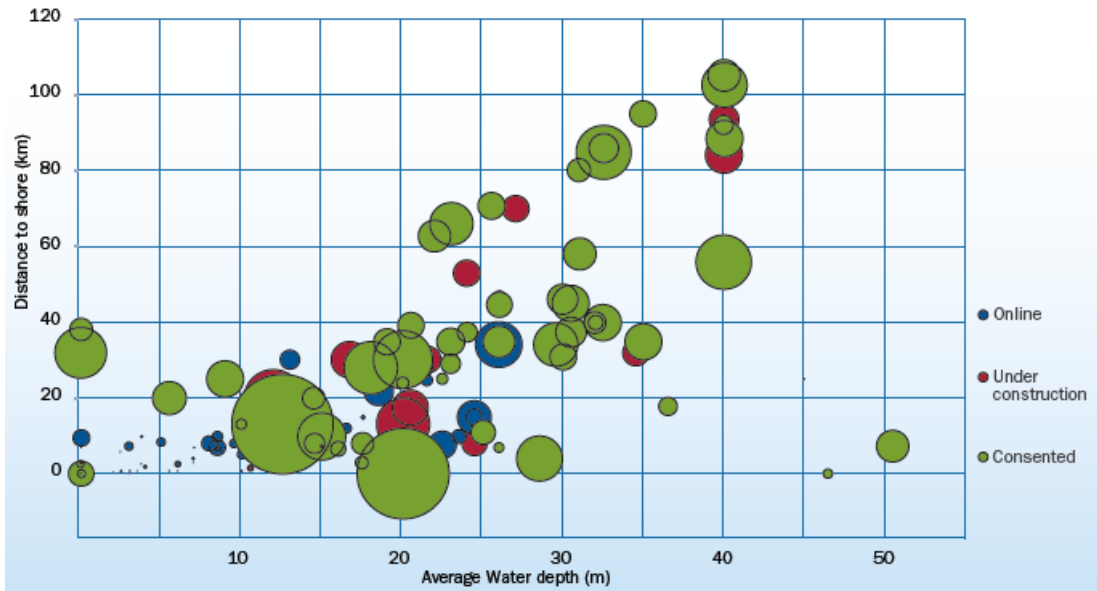
Country	BE	DE	DK	ES	FI	IE	NL	NO	PT	SE	UK	Total
No. of farms	5	13	12	1	2	1	4	1	1	6	23	69
No. of turbines	135	116	513	1	9	7	124	1	1	91	1,082	2,080
Capacity installed (MW)	571	520	1,271	5	26	25	247	2	2	212	3,681	6,562

Σχήμα 1.4: Στον αριστερό άξονα (στήλες με μπλε χρώμα) είναι η ετήσια εγκατεστημένη ισχύς (MW) των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και στον δεξιό (στήλες με γαλάζιο χρώμα) η συνολική εγκατεστημένη ισχύς (MW) μέχρι το 2013. Στον από κάτω πίνακα φαίνεται ο αριθμός των αιολικών πάρκων, ο αριθμός των ανεμογεννητριών και η συνολική ισχύς (MW) που είχε εγκατασταθεί σε κάθε χώρα [1.3].



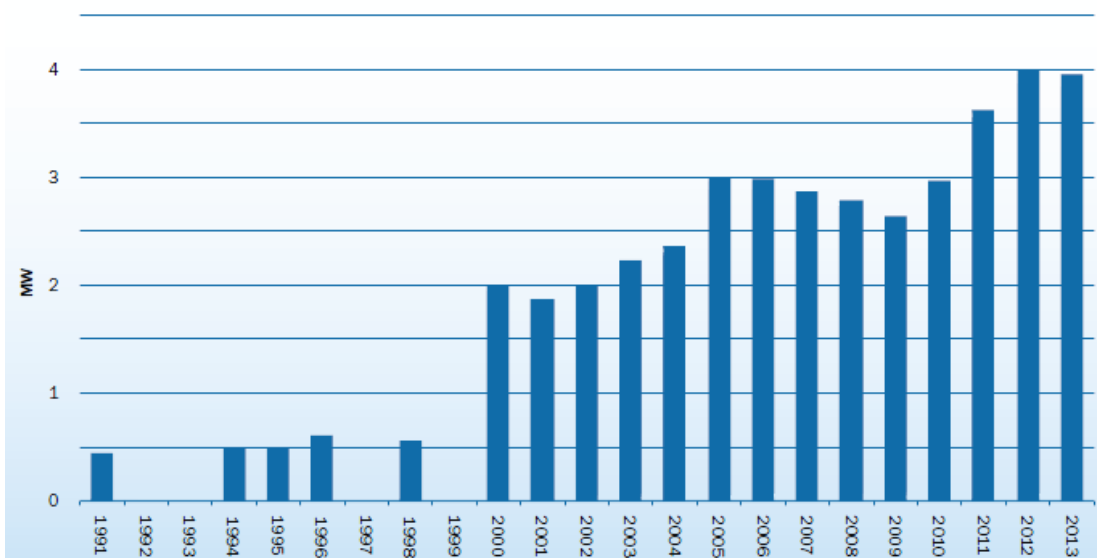
Σχήμα 1.5: Ετήσια εγκατεστημένη δυναμικότητα παράκτιας αιολικής ενέργειας (MW) στην Ευρώπη [1.4].

Αυξητική τάση παρουσιάζουν επίσης η απόσταση από την ακτή και το βάθος της θάλασσας στα οποία τοποθετούνται τα αιολικά πάρκα. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Αιολικής Ενέργειας το 2012 το μέσο βάθος των εγκατεστημένων αιολικών πάρκων ήταν 22 m και η απόσταση από την ακτή 29 km. Προβλέπεται στο μέλλον τα αιολικά πάρκα να εγκαθίστανται σε βάθη έως 215 m και μέχρι 200 km από την ακτή. Σε ανάλυση υφιστάμενων και μελλοντικών πάρκων αποτυπώνεται η παραπάνω τάση (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6: Στον κατακόρυφο άξονα είναι η απόσταση (km) από την ακτή και στον οριζόντιο άξονα το μέσο βάθος της θάλασσας (m). Με μπλε συμβολίζονται τα υφιστάμενα αιολικά πάρκα, με κόκκινο τα υπό κατασκευή και με πράσινο τα μελλοντικά[1.5].

Από το 1991 το μέσο μέγεθος των υπεράκτιων ανεμογεννητριών έχει αυξηθεί σημαντικά. Το 2013 η μέση δυναμικότητα τους ανήλθε στα 3,9 MW, τιμή που εκτιμάται ότι θα παραμείνει σταθερή και το 2014.



Σχήμα 1.7: Μέση παραγωγική δυναμικότητα εγκατεστημένων υπεράκτιων ανεμογεννητριών[1.5].

Βιβλιογραφία

[1.1] <http://www.taxidologio.gr/mykonos-todo-anemomyloi.html>

[1.2] <http://www.solarmarket.gr>

[1.3] Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας (E.W.E.A): 2013 European statistics.

Διαθέσιμα στον ιστότοπο:

http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA_Annual_Statistics_2013.pdf

[1.4] Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας (E.W.E.A): The European offshore wind industry key trends and statistics 1st half 2014 Διαθέσιμα στον ιστότοπο:

http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/European_offshore_statistics_1st-half_2014.pdf.

[1.5] Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας (E.W.E.A): The European offshore wind industry key trends and statistics 1st half 2012 Διαθέσιμα στον ιστότοπο:

http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/European_offshore_statistics_2012.pdf.

2 Τεχνικά χαρακτηριστικά υπεράκτιων ανεμογεννητριών

2.1 Τύποι ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σύμφωνα με τη διεύθυνση των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου στις παρακάτω κατηγορίες:

- Οριζοντίου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου (Σχήμα 2.1 α)).
- Οριζοντίου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης αλλά κάθετος στη κατεύθυνση του ανέμου.
- Κατακόρυφου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι κατακόρυφος και κάθετος στη κατεύθυνση του ανέμου (Σχήμα 2.1 β)).



Σχήμα 2.1: Τύποι ανεμογεννητριών α) οριζοντίου άξονα [2.1], β) κατακόρυφου άξονα [2.2]

2.2 Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας και τρόπος λειτουργίας της

Οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες είναι αποκλειστικά οριζοντίου άξονα και έχουν συνήθως τρία πτερύγια. Τα κύρια μέρη μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

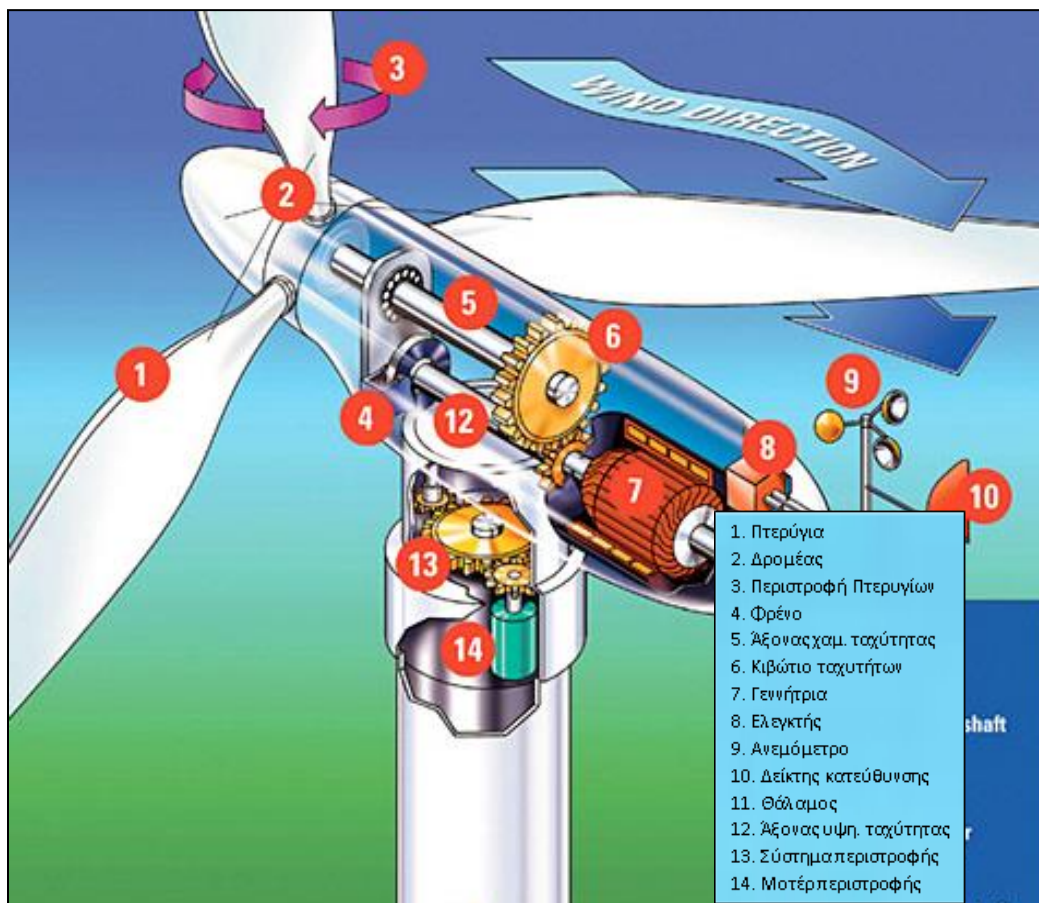
- Η πρώτη κατηγορία αφορά τα κύρια μηχανολογικά μέρη της ανεμογεννήτριας (RNA), τα οποία είναι συγκεντρωμένα κυρίως στην άτρακτο (nacelle) και περιλαμβάνουν την ηλεκτρική γεννήτρια, τα ηλεκτρικά κυκλώματα, το σύστημα ελέγχου και το σύστημα

περιστροφής-ευθυγράμμισης των πτερυγίων, το κιβώτιο ταχυτήτων και το σύστημα πέδησης.

- Η δεύτερη κατηγορία αφορά τα κατασκευαστικά μέρη της ανεμογεννήτριας, όπως είναι ο δρομέας, τα πτερύγια, ο πύργος, το τμήμα μετάβασης, ο φορέας στήριξης και η θεμελίωση της ανεμογεννήτριας.

Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας βασίζεται στην περιστροφή των πτερυγίων της εξαιτίας της ροής του αέρα και αποσκοπεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας στηρίζονται πάνω στο δρομέα, ο οποίος περιστρέφεται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα (άξονας χαμηλής ταχύτητας). Με τον τρόπο αυτό η αιολική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια χαμηλής ταχύτητας. Στη συνέχεια ο άξονας χαμηλής ταχύτητας συνδέεται με το κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο αυξάνει στην στροφική ταχύτητα της κινητικής ενέργειας και στη συνέχεια συνδέεται μέσω του άξονα υψηλής ταχύτητας με την ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία μετατρέπει την κινητική ενέργεια του άξονα υψηλής ταχύτητας σε ηλεκτρική με τη βοήθεια μαγνητικού πεδίου.

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες αρχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για μέση ταχύτητα ανέμου 3-4 m/s, μεγιστοποιούν την απόδοσή τους για ταχύτητα ανέμου 15 m/s, ενώ παύουν την λειτουργία τους για ταχύτητες ανέμου 25 m/s και άνω.

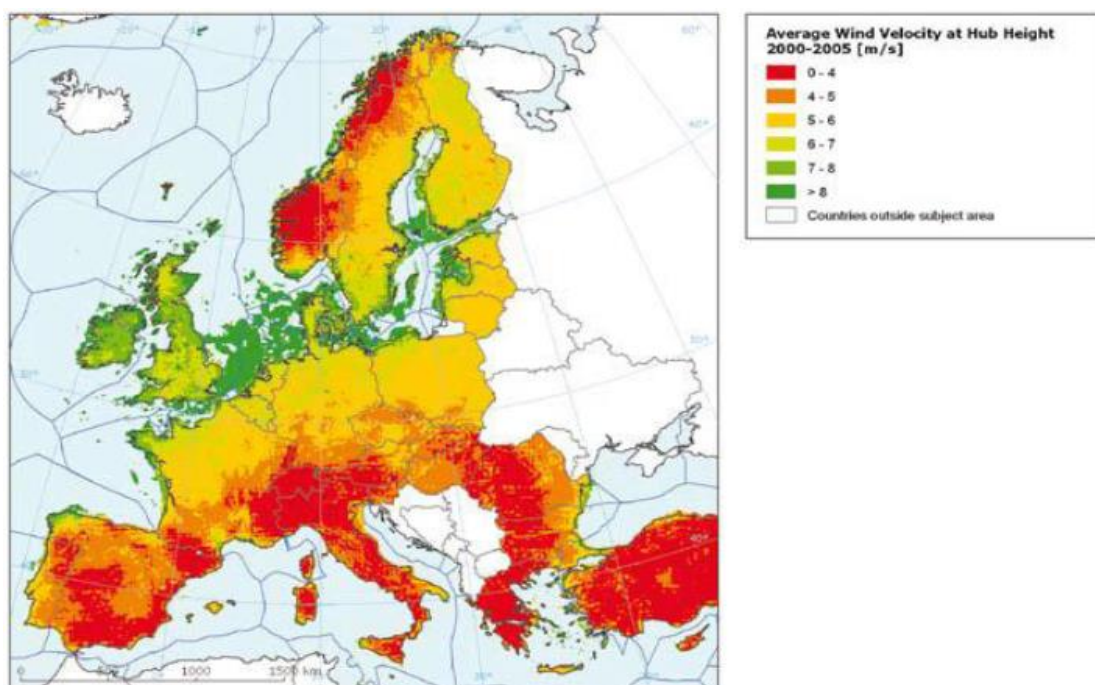


Σχήμα 2.2: Μηχανολογικά μέλη ανεμογεννήτριας [2.3].

2.3 Σύγκριση υπεράκτιας και ενδοχώριας αιολικής ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια η υπεράκτιας ανεμογεννήτριες κερδίζουν διαρκώς έδαφος έναντι των ανεμογεννητριών ξηράς εξαιτίας των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους.

Πρώτον, στην θαλάσσια επικράτεια υπάρχουν απεριόριστες ελεύθερες εκτάσεις για εκμετάλλευση ενώ στην στεριά είναι αισθητά περιορισμένες ειδικότερα κοντά στα μεγάλα αστικά κέντρα όπου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυξημένη. Δεύτερο σημαντικό πλεονέκτημα των θαλάσσιων ανεμογεννητριών είναι οι ισχυρότεροι άνεμοι που επικρατούν στην ανοιχτή θάλασσα. Αντίθετα στις ηπειρωτικές περιοχές το πεδίο ροής του ανέμου επηρεάζεται σημαντικά από το ανάγλυφο της περιοχής. Η ύπαρξη βουνών ή κτιρίων μειώνει σημαντικά την μέση ταχύτητα του ανέμου και μεταβάλλει διαρκώς την ροή του, περιορίζοντας έτσι την αποδοτικότητα της επένδυσης. Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται η μέση ταχύτητα ανέμου για την περίοδο 2000-2005 για το σύνολο των χωρών της Ευρώπης. Είναι εμφανές ότι οι θαλάσσιες περιοχές έχουν υψηλή μέση ταχύτητα (>8 m/s) σε αντίθεση με τις ηπειρωτικές όπου η μέση ταχύτητα είναι περιορισμένη (4-5 m/s). Επίσης η εγκατάσταση μακριά από την ακτή εξαλείφει προβλήματα αισθητικής και όχλησης λόγω θορύβου αστικών περιοχών γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη ανεμογεννητριών αυξημένης αποδοτικότητας και μειωμένου κόστους. Τέλος, εφόσον η εγκατάσταση και η μεταφορά γίνονται στη θάλασσα δεν τίθενται περιορισμοί μεγέθους των ανεμογεννητριών για την διέλευση από δρόμους όπως συμβαίνει με τις χερσαίες.



Σχήμα 2.3: Χάρτης απεικόνισης της μέσης ταχύτητας του ανέμου το διάστημα 2000-2005 στην Ευρώπη στο ύψος του άξονα (80 m στην ξηρά και 120 m στη θάλασσα) [2.4].

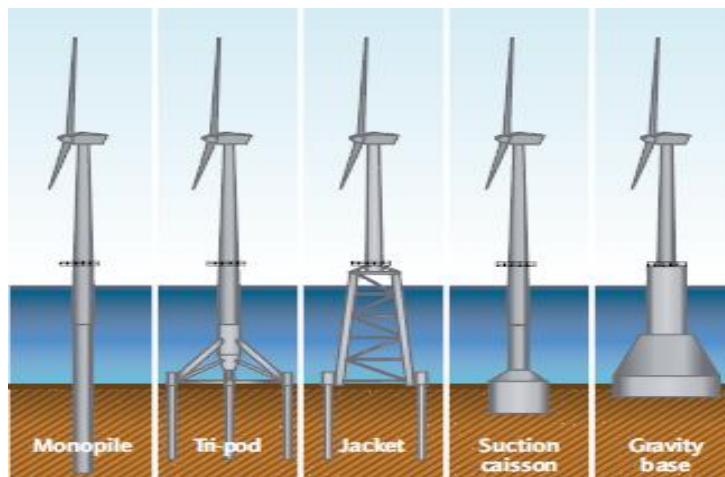
Στον αντίποδα οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες έχουν σημαντικά υψηλότερο κόστος (2 με 3 φορές) σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες στη στεριά. Αυτό μερικώς οφείλεται στην δομή της εγκατάστασης, η οποία χαρακτηρίζεται καθοριστικά από το σύστημα θεμελίωσης της το οποίο αυξάνει σημαντικά το κόστος της επένδυσης. Πρέπει να ληφθούν ακόμα υπόψη οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες που επικρατούν στις υπεράκτιες περιοχές οι οποίες ασκούν σημαντικές δράσεις στην κατασκευή όπως τα φορτία κυματισμού, φορτία θαλασσιών ρευμάτων και η σημαντική διάβρωση λόγω του αλμυρού νερού. Επιπλέον η μεταφορά και η συναρμολόγηση γίνεται με πλωτά μέσα, τα οποία αυξάνουν σημαντικά το κόστος. Επίσης το κόστος συντήρησης είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με τις χερσαίες. Μια απλή βλάβη η οποία είναι επισκευάσιμη σε λίγες ώρες στην στεριά, η αποκατάστασή της μπορεί να γίνει μια χρονοβόρα διαδικασία, για μια θαλάσσια ανεμογεννήτρια, η οποία εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες.

2.4 Είδη θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Το είδος θεμελίωσης και η μορφή του φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας αποτελεί κρίσιμη επιλογή για το σύνολο της κατασκευής καθώς είναι καθοριστική στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους της επένδυσης. Υπάρχουν δύο βασικά είδη υποστήριξης των θαλάσσιων ανεμογεννητριών: τα θεμελιωμένα και τα πλωτά συστήματα. Τα κριτήρια επιλογής σχετίζονται με το βάθος της θάλασσας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την διαθέσιμη τεχνολογία.

2.4.1 Θεμελιωμένα Συστήματα

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι τα σταθερά συστήματα και η επιλογή τους εξαρτάται από το βάθος της θάλασσας. Για ρηχά νερά (έως 15m) προτιμάται συνήθως θεμελιώσεις βαρύτητας οι οποίες κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα (gravity base) (Σχήμα 2.4,(ε)). Για μεσαία βάθη (15-50 m) χρησιμοποιούνται κυρίως τα εξής: μονοπάσσαλος (monopile) (Σχήμα 2.4,(α)), τρίποδο (tripod) (Σχήμα 2.4,(β)), δικτυωτός πύργος (jacket) (Σχήμα 2.4,(γ)).



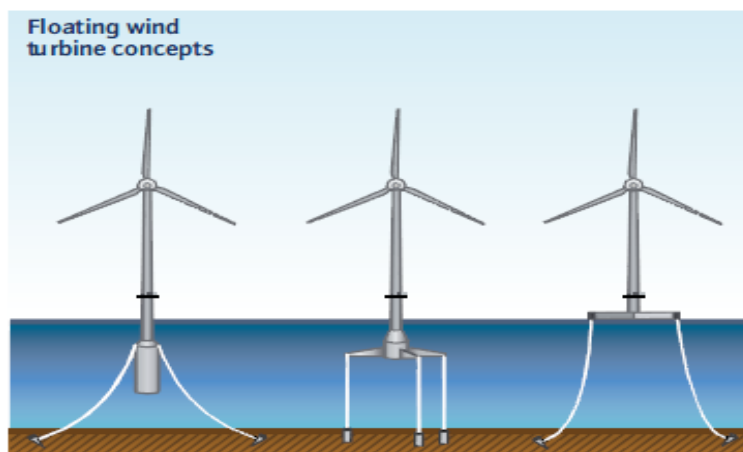
Σχήμα 2.4: Είδη θεμελιώσεων υπεράκτιων ανεμογεννητριών [2.5].

2.4.2 Πλωτά Συστήματα

Μέχρι σήμερα τα περισσότερα εγκατεστημένα υπεράκτια αιολικά πάρκα έχουν κατασκευασθεί με σταθερά συστήματα. Παρόλα αυτά στις περισσότερες χώρες οι διαθέσιμες περιοχές για την κατασκευή θαλάσσιων ανεμογεννητριών έχουν μεγάλα βάθη θάλασσας, γεγονός που κάνει τα σταθερά συστήματα οικονομικά ασύμφορα. Επομένως τα επόμενα χρόνια αναμένεται σημαντική ανάπτυξη των πλωτών συστημάτων, ειδικότερα για βάθη θάλασσας άνω των 50 μέτρων εκτιμάται ότι θα αποτελούν την οικονομικότερη λύση.

Τα πλωτά συστήματα (floating structure) έχουν μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα όπως μεγαλύτερη ευελιξία κατά την κατασκευή και εγκατάστασή τους καθώς επίσης και την ικανότητα να μεταβιβάζουν τεράστια καμπτικά φορτία στο νερό. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι πλωτών συστημάτων:

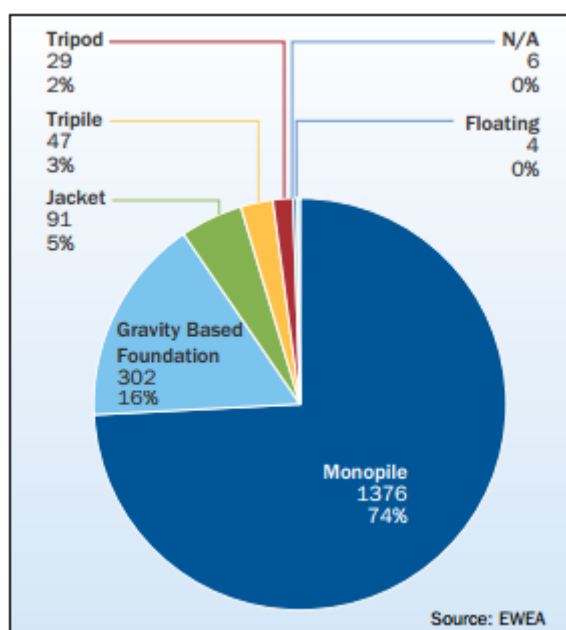
- σύστημα τύπου σημαντήρα (spar) (Σχήμα 2.5,α).
- σύστημα με σκέλη υπό ένταση (tensioned-leg platform TLP) (Σχήμα 2.5,β).
- σύστημα τύπου φορηγίδας (floating jacket) (Σχήμα 2.5,γ).



Σχήμα 2.5: Πλωτά συστήματα [2.5].

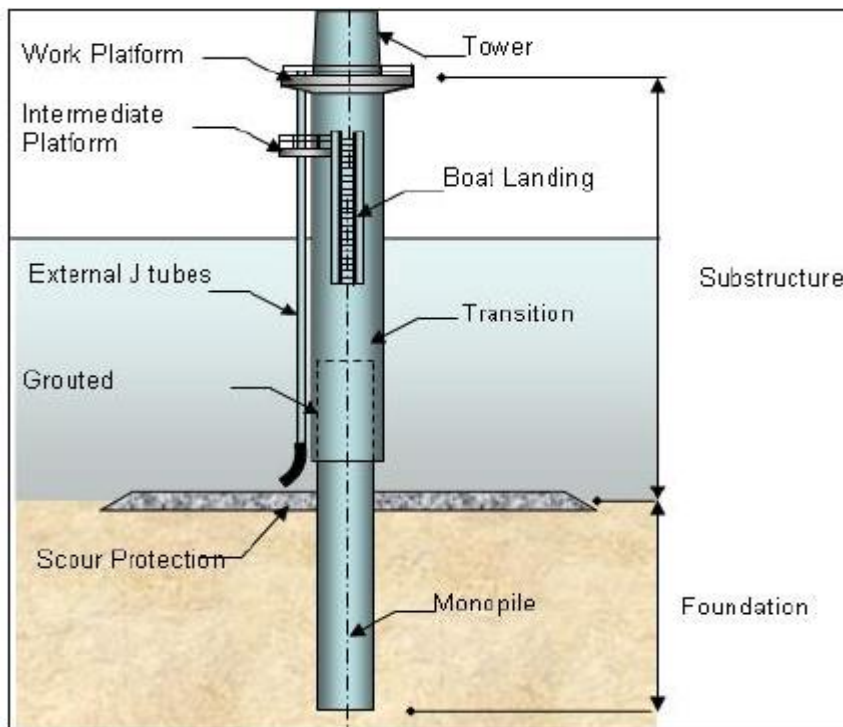
2.4.3 Μονοπάσσαλο Σύστημα

Ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι το μονοπάσσαλο σύστημα το οποίο αποτελείται από έναν μεταλλικό πάσσαλο κοίλης κυκλικής διατομής ο οποίος εμπηγνύεται με δόνηση ή υδραυλικό σφυρί μέσα στο έδαφος. Η διάμετρος, το πάχος και το μήκος έμπηξης του πασσάλου καθορίζονται από το βάθος της θάλασσας, τα όρια αντοχής και λειτουργικότητας της ανεμογεννήτριας. Η συχνή χρήση του εν λόγω συστήματος οφείλεται κυρίως στην απλότητα του σχεδιασμού και της κατασκευής ενός τέτοιου συστήματος καθώς και στην σημαντική τεχνογνωσία και εμπειρία που υπάρχει παγκοσμίως πάνω σε τέτοιου είδους συστήματα. Σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας (E.W.E.A), το 74% του συνόλου των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών μέχρι το 2012 θεμελιώθηκαν με μονοπάσσαλο (Σχήμα 2.6). Αποτελεί ιδανικό τρόπο θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών για βάθη έως 25 μέτρα. Αντίθετα σε μεγαλύτερα βάθη η κατασκευή γίνεται πιο ασταθής εξαιτίας των σημαντικών υδροδυναμικών φορτίων που της ασκούνται και επομένως προτιμάται κάποιο άλλο σύστημα θεμελίωσης.



Σχήμα 2.6: Καταμερισμός του τρόπου θεμελίωσης των εγκατεστημένων υπεράκτιων ανεμογεννητριών έως το 2012 [2.6].

Το μονοπάσσαλο σύστημα (Σχήμα 2.7) είναι το μοναδικό στο οποίο ο πάσσαλος αποτελεί ταυτόχρονα την θεμελίωση και τον φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας. Όπως προαναφέρθηκε ο πάσσαλος εμπηγνύεται στο έδαφος με την χρήση υδραυλικής σφύρας (driven piles) η οποία ασκεί σημαντικό θλιπτικό φορτίο στην κεφαλή του πασσάλου, τέτοιο ώστε να υπερνικήσει την τριβή που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη ύπαρξης ενός τμήματος μετάβασης (transition piece) το οποίο τοποθετείται στην κορυφή του πασσάλου και εξασφαλίζει τη σύνδεση μεταξύ του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας χωρίς απόκλιση από την κατακόρυφο. Η σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται με την ύπαρξη φλάντζας στην κορυφή του κομματιού μετάβασης και την χρήση κοχλιών.



Σχήμα 2.7: Μονοπάσσαλο σύστημα [2.7].

Από την άλλη μεριά το κομμάτι μετάβασης αποτελεί το πιο αδύναμο τμήμα της κατασκευής αφού συνδέεται με τον πάσσαλο με τσιμέντο ή ειδικά ενέματα. Τα παραπάνω υλικά πλήρωσης πρέπει να εξασφαλίζουν πολύ ισχυρή σύνδεση μεταξύ των μελών ώστε τα φορτία να μεταφέρονται από τον πύργο στο κομμάτι μετάβασης και από εκεί στον πάσσαλο και στη συνέχεια στο έδαφος. Εξαιτίας της δυναμικής και ανακυκλιζόμενης φύσης των φορτίων στα οποία υπόκειται η κατασκευή τα εν λόγω ενέματα ενδέχεται να χάσουν μέρος της αντοχής τους. Επομένως απαιτείται συστηματικός έλεγχος και αντικατάσταση τους όταν χρειασθεί.

Βιβλιογραφία

- [2.1] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο:
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Off-shore_Wind_Farm_Turbine.jpg
- [2.2] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο: <http://www.top-alternative-energy-sources.com/vertical-axis-wind-turbine.html>
- [2.3] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο:
<http://www.alliantenergykids.com/EnergyandTheEnvironment/RenewableEnergy/022397>
- [2.4] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο:
<http://www.eea.europa.eu/publications/europes-onshore-and-offshore-wind-energy-potential>
- [2.5] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο:
http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf
- [2.6] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο:
http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Deep_Water.pdf
- [2.7] Εικόνα στο διαδίκτυο. Διαθέσιμη στον ιστότοπο:
<http://studentaccess.emporia.edu/~lgerber1/monopile.jpg>

3 Διαδικασία Σχεδιασμού Ανεμογεννητριών

3.1 Εισαγωγή

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες αποτελούν σύνθετες κατασκευές με ιδιαίτερες λειτουργικές απαιτήσεις οι οποίες υπόκεινται σε δυναμικά και ανακυκλιζόμενα φορτία. Επομένως ο σχεδιασμός και η μελέτη τους αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί τη σύμπραξη μηχανικών διαφόρων ειδικοτήτων για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων. Εξαιτίας της ανάπτυξης της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, σε συνδυασμό με την γνώση και την εμπειρία πάνω σε θαλάσσιες κατασκευές από τον τομέα της εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι κανονισμοί και τεύχη με κατευθυντήριες οδηγίες για το σχεδιασμό θαλάσσιων ανεμογεννητριών. Οι σημαντικότεροι αυτών είναι ο DNV-OS-J101 [3.1], Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines [3.2], Petroleum and natural gas industries-Fixed steel offshore structures [3.3], IEC 61400-3 Wind turbines-Part 3: Design requirements for offshore wind turbines [3.4]. Ταυτόχρονα στα πλαίσια μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας στην οποία εξετάζονται θαλάσσιες ανεμογεννήτριες από χάλυβα, θεμελιωμένες σε φορέα στήριξης μορφής μονοπασάλου, σημαντικό κανονιστικό πλαίσιο αποτελεί ο Ευρωκώδικας 3 (σχεδιασμός μεταλλικών κατασκευών) και ειδικότερα το μέρος 1-6 που αναφέρεται στον σχεδιασμό κελυφωτών κατασκευών [3.5].

3.2 Αρχές Σχεδιασμού

Σύμφωνα με τους κανονισμούς DNV-OS-J101 και EN 61400-3 περιγράφεται στη συνέχεια η πορεία σχεδιασμού υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

3.2.1 Γενικές αρχές ανάλυσης και σχεδιασμού της κατασκευής

Σύμφωνα με το πρότυπο DNV-OS-J101 ο σχεδιασμός της κατασκευής θα πρέπει να αποσκοπεί:

- στην αντοχή των φορτίων που ασκούνται στην κατασκευή σε όλες τις φάσεις της ζωής της.
- στην εξασφάλιση ικανοποιητικής ασφάλειας της κατασκευής, του περιβάλλοντος και του προσωπικού.

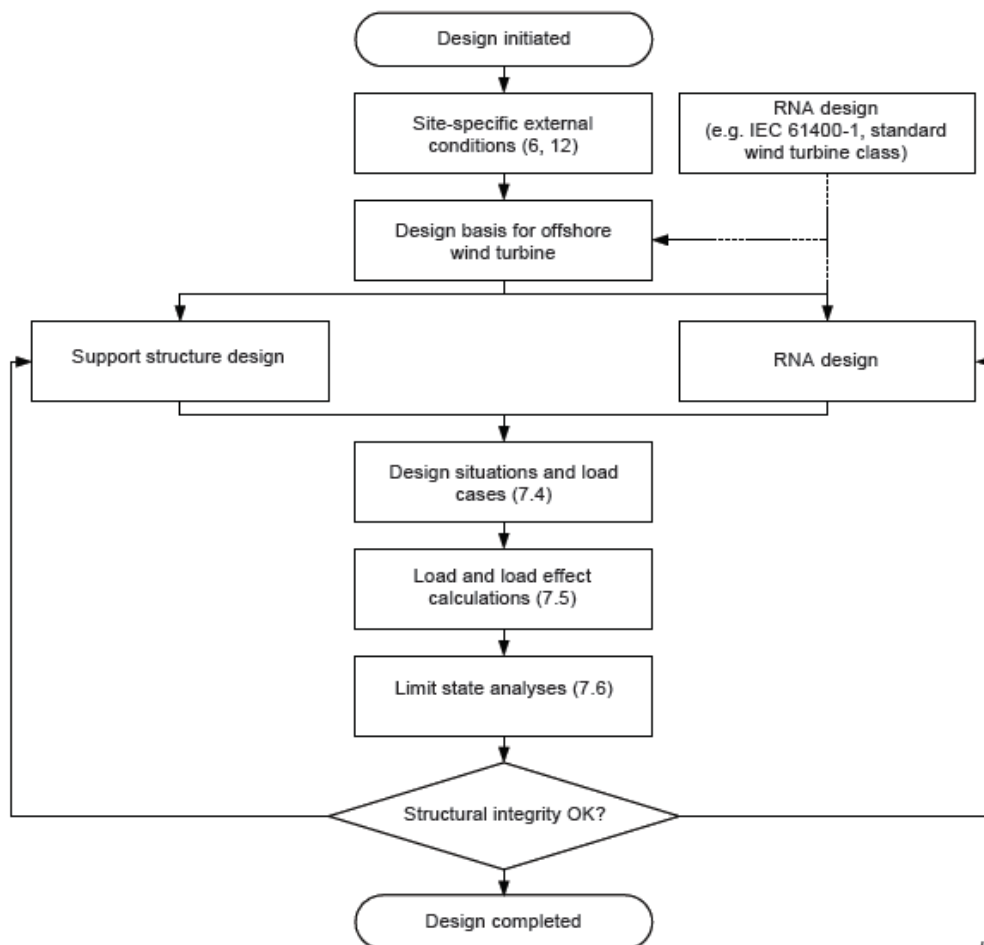
- στην διασφάλιση επαρκούς ανθεκτικότητας έναντι της φθοράς κατά την διάρκεια της ζωής της.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων προτείνονται οι παρακάτω μέθοδοι σχεδιασμού:

- μέθοδος της επαλληλίας (γραμμικός συνδυασμός των φορτίων) με χρήση συντελεστών ασφαλείας,
- σχεδιασμός με πλήρη προσομοίωση της κατασκευής στην οποία τα φορτία εφαρμόζονται συγχρόνως. Γίνεται χρήση συντελεστών ασφαλείας.
- σχεδιασμός βασισμένος σε πειραματικά αποτελέσματα.
- στοχαστικός σχεδιασμός.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η πορεία σχεδιασμού μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Σύμφωνα με αυτό, αρχικά είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των τοπικών περιβαλλοντικών παραμέτρων (site-specific) καθώς επίσης και των τοπογραφικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών της περιοχής που προβλέπεται να ανεγερθεί το αιολικό πάρκο. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα από την περιοχή μελέτης σε συνδυασμό με τα κανονιστικά πλαίσια και τις προδιαγραφές που αναφέρθηκαν, σχεδιάζονται τα κατασκευαστικά μέρη της ανεμογεννήτριας (πύργος, φορέας στήριξης, θεμελίωση) καθώς και ο βασικός μηχανολογικός εξοπλισμός (RNA).

Στη συνέχεια καθορίζονται οι σχεδιαστικές καταστάσεις και οι συνδυασμοί φόρτισης της ανεμογεννήτριας, προσδιορίζονται τα φορτία και η επίδραση τους για κάθε συνδυασμό και γίνεται έλεγχος επάρκειας της ανεμογεννήτριας για τις διάφορες οριακές καταστάσεις.



IEC 002/09

Σχήμα 3.1: Διαδικασία σχεδιασμού μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας [3.4].

Για την επίτευξη της ασφάλειας και γενικότερα των παραπάνω στόχων σχεδιασμού οι κανονισμοί εισάγουν κατηγορίες ασφαλείας (safety classes) οι οποίες καθορίζονται από τις αναμενόμενες συνέπειες τυχών αστοχιών της κατασκευής. Το ελάχιστο επίπεδο ασφαλείας που ορίζει κάθε κατηγορία είναι το ίδιο ανεξάρτητα της μεθοδολογίας σχεδιασμού που ακολουθείται. Το ελάχιστο αυτό όριο ορίζεται ως η πιθανότητα αστοχίας σε ετήσια βάση. Για θαλάσσιες ανεμογεννήτριες ο DNV-OS-J101 ορίζει τρεις κατηγορίες ασφαλείας. Η χαμηλότερη κατηγορία εφαρμόζεται σε κατασκευές στις οποίες οι τυχούσες αστοχίες έχουν μικρή πιθανότητα να προκαλέσουν τραυματισμό του προσωπικού, μόλυνση του περιβάλλοντος και οικονομικές ζημιές ενώ οι πιθανότητες θανατηφόρου ατυχήματος είναι μηδαμινές. Η κανονική κατηγορία υιοθετείται σε κατασκευές των οποίων οι αστοχίες έχουν κάποια πιθανότητα να προκαλέσουν τραυματισμούς και μόλυνση του περιβάλλοντος αλλά οι οικονομικές συνέπειες αναμένονται σημαντικές. Τέλος η υψηλή κλάση ασφαλείας αφορά κατασκευές των οποίων οι ενδεχόμενες αστοχίες είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν σοβαρούς τραυματισμούς ακόμα και θανάτους και ταυτόχρονα τεράστια οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα.

Ο σχεδιασμός των υπεράκτιων ανεμογεννητριών γίνεται συνήθως με τις προδιαγραφές της κανονικής κατηγορίας ασφαλείας (normal safety class) η οποία ορίζει αποδεκτή ετήσια πιθανότητα αστοχίας 10^{-4} . Η πιθανότητα αυτή ορίζεται για ανεμογεννήτριες που λειτουργούν χωρίς προσωπικό και ο σχεδιασμός τους γίνεται έτσι ώστε να παρουσιάζουν όλκιμες μορφές αστοχίας.

3.2.2 Οριακές καταστάσεις

Οι κανονισμοί ορίζουν συγκεκριμένα όρια τα οποία αν ξεπεραστούν παύουν να εξασφαλίζονται οι σχεδιαστικές απαιτήσεις. Ορίζονται επομένως οι παρακάτω οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας, οι οποίες πρέπει να ελέγχονται, σύμφωνα με τον DNV-OS-J101 [3.2]:

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

3.2.3 Δράσεις

Θεμελιώδης διαδικασία για τον άρτιο σχεδιασμό της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι ο προσδιορισμός των διαφόρων φορτίων που καταπονούν την κατασκευή. Τα φορτία αυτά κατατάσσονται σε δράσεις, οι οποίες διακρίνονται στις εξής κατηγορίες σύμφωνα με τους DNV-OS-J101 και IEC 61400-3 [3.4]:

Μόνιμες δράσεις (G)

Αφορά τα φορτία των οποίων το μέγεθος, η διεύθυνση και το σημείο εφαρμογής παραμένουν σταθερά κατά την διάρκεια ζωής της κατασκευής.

- το ίδιο βάρος της κατασκευής
- το βάρος τυχόν υλικών πλήρωσης και των μηχανολογικών εγκαταστάσεων που υφίστανται μόνιμα στην κατασκευή
- υδροστατικές πιέσεις

Μεταβλητές δράσεις (Q)

Αφορά τα φορτία που προκύπτουν σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και εγκατάστασης των οποίων το μέγεθος, η διεύθυνση και το σημείο εφαρμογής μπορούν να μεταβληθούν κατά την διάρκεια ζωής της κατασκευής.

- φορτία ανθρωποσυντονισμού (προσωπικό εγκατάστασης)
- φορτία ενεργοποίησης μηχανισμών ανεμογεννήτριας (actuation loads)
- φορτία γερανού κατά την εγκατάσταση
- φορτία προσέγγισης πλοίων
- το βάρος τυχόν υλικών πλήρωσης και των μηχανολογικών εγκαταστάσεων που δεν υφίστανται μόνιμα στην κατασκευή

Τυχηματικές δράσεις (A)

Αφορά τα φορτία που προκύπτουν σε μη φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας ή σε τεχνικές αστοχίες.

- πρόσκρουση πλοίου
- πυρκαγιά
- έκρηξη

Περιβαλλοντικές δράσεις (E)

Αφορά τα φορτία των οποίων το μέγεθος, η διεύθυνση και το σημείο εφαρμογής μπορούν να μεταβληθούν κατά την διάρκεια ζωής της κατασκευής

- άνεμος
- υδροδυναμικά φορτία κυματισμών και θαλασσίων ρευμάτων
- σεισμός
- πάγος-χιόνι
- υποσκαφή θεμελίωσης
- διάβρωση (marine growth)
- παλίρροια

Από την παραπάνω κατηγοριοποίηση των δράσεων προκύπτει ότι οι τιμές των φορτίων που ανήκουν σε μόνιμες, μεταβλητές ή τυχηματικές δράσεις μπορούν να καθοριστούν βάσει προδιαγραφών, ανεξάρτητα από τις τοπικές συνθήκες που ισχύουν στην προβλεπόμενη θέση ανέγερσης της ανεμογεννήτριας.

Αντίθετα, οι τιμές των φορτίων που ανήκουν σε περιβαλλοντικές δράσεις δεν μπορούν να καθοριστούν παρά μόνο κατόπιν της εκτίμησης των περιβαλλοντικών συνθηκών που ισχύουν στην περιοχή της προβλεπόμενης θέσης ανέγερσης αιολικού πάρκου. Συνεπώς καθίσταται κρίσιμος, για τον σχεδιασμό υπεράκτιων ανεμογεννητριών, ο καθορισμός όλων εκείνων των τοπικών περιβαλλοντικών παραμέτρων (site-specific parameters) που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της τιμής των φορτίων περιβαλλοντικών δράσεων.

Το σύνολο των απαιτούμενων αυτών τοπικών παραμέτρων μαζί με την γεωλογική-γεωτεχνική έρευνα, συνιστούν την βάση δεδομένων (metocean database) που πρέπει να συνοδεύει το εκάστοτε υπεράκτιο τεχνικό έργο. Αυτή η βάση δεδομένων αποτελεί την πιο έγκυρη και αξιόπιστη βάση σχεδιασμού της εξεταζόμενης περιοχής.

Στα πρότυπα IEC 61400-1 και IEC 61400-3, περιγράφονται οι αρχές βάσει των οποίων θα γίνουν οι επί τόπου μετρήσεις, η απαιτούμενη διάρκειά τους, η αξιολόγησή τους ή ο έμμεσος καθορισμός κάποιων από αυτών, μέσω παραδοχών και αριθμητικών προσομοιώσεων.

3.2.4 Κλάσεις ανεμογεννητριών

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

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

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

Σχήμα 3.2: Κλάσεις ανεμογεννητριών [3.4].

όπου:

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

I_{ref} αναμενόμενη τιμή της έντασης τυρβώδους ροής για ταχύτητα 15m/s

3.2.5 Καταστάσεις σχεδιασμού και συνδυασμοί φορτίσεων

Όπως προαναφέρθηκε μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια υφίσταται την επίδραση πολλών ειδών φόρτισης κατά την διάρκεια της ζωής της. Επομένως είναι ανάγκη να καταγραφούν και να ελεγχθούν οι απαιτούμενοι συνδυασμοί φόρτισης (load cases) για όλες τις οριακές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να υπάρξει μια ανεμογεννήτρια.

Σχεδιαστικές Καταστάσεις	Συνθήκες Ανέμου	Άλλες συνθήκες	Τύπος ανάλυσης	Συντελεστές ασφαλείας
1) Παραγωγή ενέργειας	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Για ακραίες συνθήκες	U	N
	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	-
	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
	ECD $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
	EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
2) Παραγωγή ενέργειας με εμφάνιση σφάλματος	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Σύστημα ελέγχου εκτός λειτουργίας ή απώλεια ηλ.δικτύου	U	N
	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Σύστημα προστασίας εκτός λειτουργίας ή ελάττωμα ηλεκτρικού συστήματος	U	A
	EOG $V_{hub} = V_t \pm 2 \text{ m/s}$ και V_{out}	Εσωτερικό ή εξωτερικό ηλεκτρικό ελάττωμα	U	A
	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Σύστημα προστασίας, ελέγχου εκτός λειτουργίας ή ελάττωμα ηλεκτρικού συστήματος	F	-
3) Εκκίνηση	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	-
	EOG $V_{hub} = V_t \pm 2 \text{ m/s}$ και V_{out}		U	N
	EDC $V_{hub} = V_{in}, V_t \pm 2 \text{ m/s}$ και V_{out}		U	N
4) Κανονική παύση λειτουργίας	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	-
	EOG $V_{hub} = V_t \pm 2 \text{ m/s}$ και V_{out}		U	N
5) Επείγουσα παύση λειτουργίας	NTM $V_{hub} = V_t \pm 2 \text{ m/s}$ και V_{out}		U	N
6) Αναμονής	EWM με περίοδο επαναφοράς 50 έτη		U	N
	EWM με περίοδο επαναφοράς 50 έτη	Απώλεια σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο	U	A
	EWM με περίοδο επαναφοράς 1 έτος		U	N
	NTM $V_{hub} < 0.7 V_{ref}$		F	-
7) Αναμονής με ταυτόχρονη εμφάνιση σφάλματος	EWM με περίοδο επαναφοράς 1 έτος		U	A
8) Μεταφοράς, ανέγερσης, συντήρησης και επισκευής	NTM V_{maint} , καθορίζεται από τον κατασκευαστή		U	T
	EWM με περίοδο επαναφοράς 1 έτος		U	A

Σχήμα 3.3: Συνδυασμοί φόρτισης [3.4].

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

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

Αν υπάρχει συσχέτιση ακραίων περιβαλλοντικών συνθηκών οι οποίες οδηγούν σε εμφάνιση σφάλματος σε περίοδο κανονικής λειτουργίας, θα πρέπει να γίνεται ένας ρεαλιστικός συνδυασμός τους.

Για κάθε κατάσταση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να θεωρούνται διάφοροι συνδυασμοί φόρτισης. Στο Σχήμα 3.3 καταγράφονται οι ελάχιστοι συνδυασμοί φόρτισης που πρέπει να ληφθούν υπόψη σύμφωνα με τον κανονισμό IEC 61400-1. Σε κάθε συνδυασμό φόρτισης περιγράφεται η κατάσταση λειτουργίας, οι συνθήκες ανέμου και άλλες εξωτερικές συνθήκες καθώς επίσης και η φάση στην οποία βρίσκεται η διαδικασία παραγωγής ενέργειας.

Για κάθε συνδυασμό φόρτισης που ορίζεται στο Σχήμα 3.3, ορίζεται η κατάλληλη ανάλυση που πρέπει να γίνει με U και F. Το F αναφέρεται σε ανάλυση φορτίων κόπωσης (fatigue), η οποία καθορίζει την αντοχή της κατασκευής έναντι κόπωσης. Το U αναφέρεται σε ανάλυση οριακών φορτίων αντοχής (ultimate), στην οποία πρέπει να εξετασθούν η αντοχή των υλικών της κατασκευής καθώς και η ευστάθεια της.

Η ανάλυση τύπου U κατηγοριοποιείται σε κανονικές (normal, N), μη κανονικές (abnormal, A), μεταφοράς (transport, T) και ανέγερσης (erection) καταστάσεις λειτουργίας. Οι κανονικές καταστάσεις λειτουργίας αναμένονται να προκύψουν με μεγάλη συχνότητα κατά την διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και κατά την διάρκεια τους θεωρείται ότι η ανεμογεννήτρια λειτουργεί άρτια ή με κάποιες ανεπαίσθητες βλάβες. Οι μη κανονικές καταστάσεις λειτουργίας έχουν μικρότερη πιθανότητα να προκύψουν και αναφέρονται σε καταστάσεις με σοβαρές βλάβες στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας οι οποίες απαιτούν την ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας της. Οι N,A,T καταστάσεις λειτουργίας συνδέονται με τους αντίστοιχους συντελεστές ασφαλείας όπως ορίζονται στο Σχήμα 3.4.

Unfavourable loads			Favourable ⁹ loads
Type of design situation (see Table 2)			
Normal (N)	Abnormal (A)	Transport and erection (T)	All design situations
1,35*	1,1	1,5	0,9

* For design load case DLC 1.1, given that loads are determined using statistical load extrapolation at prescribed wind speeds between V_{in} and V_{out} , the partial load factor for normal design situations shall be $\gamma_f = 1,25$.

If for normal design situations the characteristic value of the load response $F_{gravity}$ due to gravity can be calculated for the design situation in question, and gravity is an unfavourable load, the partial load factor for combined loading from gravity and other sources may have the value

$$\gamma_f = 1,1 + \varphi \zeta^2$$

$$\varphi = \begin{cases} 0,15 & \text{for DLC1.1} \\ 0,25 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\zeta = \begin{cases} 1 - \frac{|F_{gravity}|}{|F_k|}; & |F_{gravity}| \leq |F_k| \\ 1; & |F_{gravity}| > |F_k| \end{cases}$$

Σχήμα 3.4: Συντελεστές ασφαλείας [3.6].

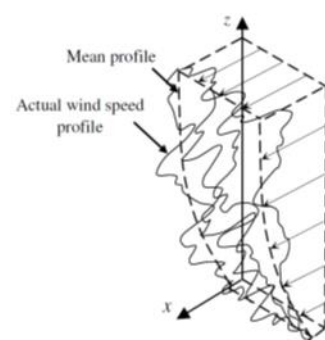
3.3 Φορτία

3.3.1 Φορτία ανέμου

Για τα φορτία ανέμου υπεράκτιων ανεμογεννητριών μπορούν να εφαρμοστούν οι προβλέψεις του προτύπου IEC 61400-3 [3.4], με κατάλληλες τροποποιήσεις.

Οι συνθήκες πνοής ανέμου που θεωρούνται για τον υπολογισμό των φορτίων επί της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, διακρίνονται σε κανονικές συνθήκες (normal wind conditions) οι οποίες προκύπτουν με μεγάλη συχνότητα κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας και σε ακραίες συνθήκες (extreme wind conditions).

Στις περισσότερες περιπτώσεις το τελικό προφίλ ταχύτητας ανέμου προκύπτει από μια επαλληλία ενός μέσου-κανονικού προφίλ και ενός μοντέλου τυρβώδους ροής ή ενός προφίλ ριπής ανέμου, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 3.5: Επαλληλία κανονικού και τυρβώδους προφίλ ανέμου.

Τα μοντέλα τυρβώδους ροής που μπορεί να χρησιμοποιηθούν, αναφέρονται στο Παράρτημα Β, του προτύπου IEC 61400-1. Προτείνεται η χρήση του μοντέλου του Mann.

3.3.2 Κανονικές συνθήκες ανέμου

Προφίλ κανονικής ροής ανέμου (Normal Wind Profile – NWP)

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

$$V(z) = V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{\alpha} \quad (3-1)$$

όπου:

α 0.20

V_{hub} ανάλογα με την κλάση της ανεμογεννήτριας.

Κανονικό μοντέλο τυρβώδους ροής (Normal Turbulence Model – NTM)

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

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

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

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

όπου:

b 5.6 m/s

3.3.3 Ακραίες συνθήκες ανέμου

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

Μοντέλο ακραίας ταχύτητας ανέμου (Extreme Wind Model – EWM)

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

Σταθερό μοντέλο ακραίας ταχύτητας ανέμου EWM-steady:

$$V_{e50}(z) = 1.4 V_{ref} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.11} \quad (3-2)$$

$$V_{e1}(z) = 0.8 V_{e50}(z) \quad (3-3)$$

όπου:

V_{e50} ακραία ταχύτητα ανέμου με περίοδο επαναφοράς 50 έτη

V_{e1} ακραία ταχύτητα ανέμου με περίοδο επαναφοράς 1 έτος

z ύψος πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

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

Τυρβώδες μοντέλο ακραίας ταχύτητας ανέμου EWM-turbulent:

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

$$V_{50}(z) = V_{ref} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.11} \quad (3-4)$$

$$V_1(z) = 0.8V_{50}(z) \quad (3-5)$$

$$\sigma_1 = 0.11V_{hub} \quad (3-6)$$

Μοντέλο ακραίας ριπής ανέμου (Extreme Operating Gust - EOG):

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

$$V_{gust} = \text{Min} \left\{ 1.35(V_{e1} - V_{hub}); 3.3 \left(\frac{\sigma_1}{1 + 0.1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right)} \right) \right\} \quad (3-7)$$

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75V_{hub} + b) \quad (3-8)$$

όπου:

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7z, & z \leq 60m \\ 42m, & z > 60m \end{cases} \quad (3-9)$$

D διάμετρος του ρότορα

Το τελικό προφίλ ταχύτητας ανέμου για ακραία ριπή ανέμου (EOG) είναι :

$$V(z, t) = \begin{cases} V(z) - 0.3V_{gust} \sin\left(\frac{3\pi t}{T}\right) \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right), & 0 \leq t \leq T \\ V(z), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-10)$$

όπου:

Tα 10.5s

V(z) σύμφωνα με κανονικό προφίλ ανέμου [NWP]

Μοντέλο ακραίας τυρβώδους ροής ανέμου (Extreme Turbulence Model - ETM):

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

$$[ETM] = [NWP] + [TM_{Mann}(\sigma_1)] \quad (3-11)$$

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

$$\sigma_1 = cI_{ref} \left[0.072 \left(\frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \left(\frac{V_{hub}}{c} - 4 \right) + 10 \right], c=2m/s \quad (3-12)$$

Ακραία αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου (Extreme Direction Change - EDC):

Η τιμή της γωνίας ακραίας αλλαγής κατεύθυνσης του ανέμου, ο οποίος λαμβάνεται υπόψη με το προφίλ κανονικής ροής ανέμου [NWP], υπολογίζεται ως εξής:

$$\theta_e = \pm 4 \arctan \left(\frac{\sigma_1}{V_{hub} \left(1 + 0.1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right) \right)} \right) \quad (3-13)$$

όπου:

σ_1 από τη σχέση

θ_e στο διάστημα $[-180^0, 180^0]$

Λ_1 από τη σχέση

D η διάμετρος του ρότορα

Η μεταβολή της γωνίας σε συνάρτηση με τον χρόνο, δίνεται από τη σχέση:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \pm 0.5\theta_e \left(1 - \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right) \right), & 0 \leq t \leq T \\ \theta_e, & t > T \end{cases} \quad (3-14)$$

όπου $T = 6s$: η διάρκεια αλλαγής κατεύθυνσης

Ακραία κατάσταση ταυτόχρονης ριπής και απότομης αλλαγής κατεύθυνσης ανέμου (Extreme coherent gust with direction change - ECD):

Το μέγεθος της ριπής του ανέμου σε αυτή την σύνθετη ακραία κατάσταση είναι $V_{cg}=15$ m/s και η κατανομή της καθ' ύψος ταχύτητας του ανέμου, στο χρόνο δίνεται από τη σχέση :

$$V(z,t) = \begin{cases} V(z), & t < 0 \\ V(z) + 0.5V_{cg} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right) \right), & 0 \leq t \leq T \\ V(z) + V_{cg}, & t > T \end{cases} \quad (3-15)$$

όπου $T=10$ s : το χρονικό διάστημα στο οποίο πραγματοποιείται η αύξηση της ταχύτητας ανέμου και $V(z)$ σύμφωνα με κανονικό προφίλ ανέμου [NWP].

Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου θεωρείται ότι γίνεται συγχρόνως με μια αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου η οποία είναι:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \pm 0.5\theta_{cg}(1 - \cos(\frac{\pi t}{T})), & 0 \leq t \leq T \\ \pm\theta_{cg}, & t > T \end{cases} \quad (3-16)$$

όπου η τιμή θ_{cg} λαμβάνεται:

$$\theta_{cg}(V_{hub}) = \begin{cases} 180^\circ, & \text{for } V_{hub} < 4 \text{ m/s} \\ \left(\frac{720}{V_{hub}}\right)^\circ, & \text{for } 4 < V_{hub} < V_{ref} \end{cases} \quad (3-17)$$

Απότομη χρονική μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου (Extreme Wind Shear - EWS):

Η μεταβολή του προφίλ της ταχύτητας του ανέμου στο χρόνο δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

Κατακόρυφο επίπεδο :

$$V(z, t) = \begin{cases} V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha \pm \left(\frac{z - z_{hub}}{D}\right) (2.5 + 0.2\beta\sigma_1 \left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)^{1/4}) (1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)) , & 0 \leq t \leq T \\ V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha , & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-18)$$

Οριζόντιο επίπεδο :

$$V(y, z, t) = \begin{cases} V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha \pm \left(\frac{y}{D}\right) (2.5 + 0.2\beta\sigma_1 \left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)^{1/4}) (1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)) , & 0 \leq t \leq T \\ V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha , & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-19)$$

όπου:

α 0.2

β 6.4

T 12 s

$\sigma_1 = I_{ref}(0.75V_{hub} + b)$, $b=5.6$ m/s

$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7z , & z \leq 60\text{m} \\ 42\text{m} , & z \geq 60\text{m} \end{cases}$,

D διάμετρος του ρότορα

Οι παραπάνω μεταβολές σε κατακόρυφο και οριζόντιο επίπεδο, δεν λαμβάνονται υπόψη ταυτόχρονα.

3.3.4 Φορτία θαλασσιών κυμάτων

Για την εκτίμηση των φορτίων σχεδιασμού υπεράκτιων κατασκευών καθορίζονται χαρακτηριστικές καταστάσεις που μπορεί να επικρατούν, κάτω από διαφορετικές συνθήκες, στο θαλάσσιο περιβάλλον. Παρακάτω παρουσιάζονται οι συνθήκες αυτές, οι οποίες αντιστοιχούν σε

διαφορετικές καταστάσεις κυματικής φόρτισης, συμπεριλαμβανομένων και των ακραίων, και θα χρησιμοποιηθούν στους συνδυασμούς φορτίσεων. Οι παράμετροι σχεδιασμού με βάση τις συνθήκες κατάστασης θάλασσας (design sea state) μπορούν να περιγραφούν μέσω του φάσματος του κυματισμού, S_{η} , μαζί με το χαρακτηριστικό ύψος του κύματος, H_s , την περίοδο της μέγιστης τιμής (κορυφής) του φάσματος, T_p , καθώς και τη μέση κατεύθυνση δράσης του κυματισμού, θ_{wm} .

3.3.5 Κανονικές Συνθήκες Θάλασσας

Κανονική (Συνήθης) Κατάσταση Θάλασσας (Normal Sea State - NSS):

Περιγράφεται από ένα χαρακτηριστικό ύψος κύματος, την περίοδο κορυφής και την κατεύθυνση του κυματισμού και σχετίζεται με την ταυτόχρονη μέση ταχύτητα του ανέμου. Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος, $H_{s,NSS}$, που χαρακτηρίζει την κανονική κατάσταση της θάλασσας, ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος εξαρτώμενο από την ταυτόχρονη μέση ταχύτητα ανέμου που πνέει στην περιοχή. Η κανονική κατάσταση θάλασσας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των οριακών φορτίων ελέγχου αντοχής, καθώς και των φορτίων ελέγχου κόπωσης. Ειδικότερα, για τον υπολογισμό των φορτίων ελέγχου κόπωσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη μια σειρά κανονικών συνθηκών θάλασσας, που συνδέονται με διαφορετικές μέσες ταχύτητες του ανέμου που πνέουν στην υπο μελέτη περιοχή. Επιπλέον, θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι το πλήθος και η ανάλυση αυτών των κανονικών συνθηκών είναι επαρκείς για να προβλέψουν τις επιπτώσεις από τα φορτία ελέγχου κόπωσης και αντιπροσωπεύουν πλήρως την μακροπρόθεσμη κατανομή των θαλασσιών παραμέτρων της βάσης περιβαλλοντικών δεδομένων (metocean database). Για κάθε χαρακτηριστικό ύψος κύματος θα πρέπει να θεωρηθεί το κατάλληλο εύρος των περιόδων κορυφής, T_p . Για τις ανάγκες του σχεδιασμού οι υπολογισμοί θα πρέπει να βασίζονται στις τιμές της περιόδου κορυφής που δίδουν ως αποτέλεσμα τα υψηλότερα φορτία ή τις δυσμενέστερες επιπτώσεις φόρτισης στην κατασκευή.

Το Κανονικό Ύψος Κύματος (Normal Wave Height - NWH) ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος εξαρτώμενο από την ταυτόχρονη μέση ταχύτητα του ανέμου, δηλαδή $H_{NWH} = H_{s,NSS}$. Θεωρείται ότι το εύρος των περιόδων του κύματος T είναι ανάλογο με το κανονικό ύψος κύματος. Για τις ανάγκες του σχεδιασμού οι υπολογισμοί θα πρέπει να βασίζονται στις τιμές της περιόδου του κυματισμού μέσα στο εύρος των τιμών που δίδουν ως αποτέλεσμα τα υψηλότερα (μεγαλύτερα) φορτία ή τις δυσμενέστερες επιπτώσεις φόρτισης στην κατασκευή. Ειδικότερα, για την περίπτωση κυμάτων στα βαθιά, η περίοδος κύματος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί με το κανονικό ύψος κύματος, H_{NWH} , θα πρέπει να θεωρηθεί εντός του εύρους τιμών που δίδονται από την παρακάτω έκφραση:

$$11.1\sqrt{H_{s,NSS}(U_{10})/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_{s,NSS}(U_{10})/g} \quad (3-20)$$

3.3.6 Ακραίες Συνθήκες Θάλασσας

Δριμεία Κατάσταση Θάλασσας (Severe Sea State - SSS):

Περιγράφεται από ένα χαρακτηριστικό ύψος κύματος, την περίοδο κορυφής και την κατεύθυνση του κύματος και σχετίζεται με την ταυτόχρονη μέση ταχύτητα του ανέμου. Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος της δριμείας κατάστασης θάλασσας, $H_{s,SSS}$, ορίζεται μέσω της προεκβολής (extrapolation) των κατάλληλων περιβαλλοντικών δεδομένων για την συγκεκριμένη περιοχή (site-specific metocean data), έτσι ώστε η επίδραση του φορτίου από το συνδυασμό του χαρακτηριστικού ύψους κύματος $H_{s,SSS}$ και της μέσης ταχύτητας του ανέμου, U_{10} , να έχει περίοδο επαναφοράς τα 50 έτη. Το μοντέλο SSS χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις κανονικές συνθήκες

ανέμου για τον υπολογισμό της οριακής φόρτισης (ultimate loading) μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας κατά την παραγωγή ενέργειας. Το μοντέλο SSS χρησιμοποιείται για να συνδέσει μια δριμεία κατάσταση θαλάσσης με κάθε μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου για το εύρος τιμών που αντιστοιχεί στην παραγωγή ενέργειας. Για όλες τις μέσες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, U_{10} , κατά την παραγωγή ενέργειας, η μη-συσχετισμένη ακραία τιμή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος, $H_{S,50-yr}$, με περίοδο επαναφοράς τα 50 έτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια συντηρητική εκτίμηση του $H_{S,SSS(U_{10})}$. Το εύρος των περιόδων κορυφής, T_p , με τιμές κατάλληλες για κάθε χαρακτηριστικό ύψος κύματος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό. Για τις ανάγκες του σχεδιασμού οι υπολογισμοί θα πρέπει να βασίζονται στις τιμές των περιόδων κορυφής του κυματισμού που δίδουν ως αποτέλεσμα τα υψηλότερα φορτία ή τις δυσμενέστερες επιπτώσεις φόρτισης στην κατασκευή.

Το Δριμύ Ύψος Κύματος (Severe Wave Height - SWH), H_{SWH} , συνδέεται με την ταυτόχρονη μέση ταχύτητα του ανέμου και ορίζεται μέσω προεκβολής των κατάλληλων περιβαλλοντικών δεδομένων (*meteocean data*), έτσι ώστε η επίδραση του φορτίου από το συνδυασμό του ύψους κύματος H_{SWH} και της μέσης ταχύτητας, U_{10} , του ανέμου - μετρημένη σε ύψος 10 m από τη θάλασσα, να έχει περίοδο επαναφοράς τα 50 έτη. Το μοντέλο SWH χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις κανονικές συνθήκες ανέμου για τον υπολογισμό της οριακής φόρτισης μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας κατά την παραγωγή ενέργειας. Το μοντέλο SWH χρησιμοποιείται για να συνδέσει ένα δριμύ ύψος κύματος με κάθε μέση ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή τιμών που αντιστοιχεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για όλες τις τιμές της μέσης ταχύτητας του ανέμου, U_{10} , κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η μη-συσχετισμένη τιμή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος, H_{50-yr} , με περίοδο επαναφοράς τα 50 έτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια συντηρητική εκτίμηση για το ύψος κύματος $H_{SWH}(U_{10})$. Το εύρος των περιόδων του κύματος, T , με τιμές κατάλληλες για κάθε δριμύ ύψος κύματος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό. Για τις ανάγκες του σχεδιασμού οι υπολογισμοί θα πρέπει να βασίζονται στις τιμές των περιόδων του κυματισμού στο εύρος τιμών που δίδουν ως αποτέλεσμα τα υψηλότερα φορτία ή τις δυσμενέστερες επιπτώσεις φόρτισης στην κατασκευή. Ειδικότερα, για την περίπτωση κυμάτων στα βαθιά, η περίοδος κύματος, T , που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί με βάση το δριμύ ύψος κύματος, H_{SWH} , θα πρέπει να θεωρηθεί εντός του εύρους τιμών που δίδονται από την παρακάτω έκφραση:

$$11.1\sqrt{H_{S,SSS}(U_{10})/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_{S,SSS}(U_{10})/g} \quad (3-21)$$

Ακραία Κατάσταση Θάλασσας (Extreme Sea State - ESS):

Χαρακτηρίζεται από ένα χαρακτηριστικό ύψος κύματος, την περίοδο κορυφής, καθώς και την κατεύθυνση δράσης του κυματισμού. Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος, $H_{S,ESS}$, εκφράζει το μη-συσχετισμένο μέγιστο χαρακτηριστικό ύψος κύματος με μία καθορισμένη περίοδο επαναφοράς, η οποία καθορίζεται από την κατανομή του μεγίστου ετήσιου χαρακτηριστικού ύψους κύματος. Η ακραία κατάσταση θάλασσας χρησιμοποιείται για περιόδους επαναφοράς ενός (1) και πενήντα (50) ετών, και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά ύψη κύματος συμβολίζονται με $H_{S,1-yr}$ και $H_{S,50-yr}$ αντίστοιχα. Με τιμές κατάλληλες για κάθε ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά ύψη κύματος προκύπτει το εύρος των περιόδων κορυφής, T_p . Για τις ανάγκες του σχεδιασμού οι υπολογισμοί θα πρέπει να βασίζονται στις τιμές της περιόδου κορυφής του κυματισμού που δίδουν ως αποτέλεσμα τα υψηλότερα φορτία ή τις δυσμενέστερες επιπτώσεις φόρτισης στην κατασκευή.

Το Ακραίο Ύψος Κύματος (Extreme Wave Height - EWH), H_{EWH} , είναι το ύψος κύματος με μία συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς. Μπορεί να καθοριστεί από την κατανομή του μεγίστου ετήσιου ύψους των κυμάτων. Στα βαθιά ύδατα, μπορεί να εκτιμηθεί με βάση το χαρακτηριστικό

ύψος κύματος $H_{S,ESS}$ για την αντίστοιχη περίοδο επαναφοράς. Το ακραίο ύψος κύματος χρησιμοποιείται για περιόδους επαναφοράς ενός (1) και πενήντα (50) ετών, και τα αντίστοιχα ύψη κύματος συμβολίζονται με H_{1-yr} και H_{50-yr} , αντίστοιχα. Το εύρος τιμών των περιόδων του κύματος, T , θα λαμβάνεται όπως για το δριμύ ύψος κύματος. Για τις ανάγκες του σχεδιασμού οι υπολογισμοί θα πρέπει να βασίζονται στις τιμές της περιόδου του κυματισμού στο εύρος τιμών που δίδουν ως αποτέλεσμα τα υψηλότερα φορτία ή τις δυσμενέστερες επιπτώσεις φόρτισης στην κατασκευή. Ειδικότερα, για την περίπτωση κυμάτων στα βαθιά, η περίοδος κύματος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί με το ακραίο ύψος κύματος, H_{EWH} , θα πρέπει να θεωρηθεί εντός του εύρους τιμών που δίδονται από την παρακάτω έκφραση:

$$11.1\sqrt{H_{S,ESS}(U_{10})/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_{S,ESS}(U_{10})/g} \quad (3-22)$$

Θεωρώντας ότι τα ύψη κύματος ακολουθούν την κατανομή Rayleigh, μπορεί να θεωρηθεί ότι:

$$H_{50-yr} = 1.86H_{S50} \quad (3-23)$$

$$H_{1-yr} = 1.86H_{S1} \quad (3-24)$$

Όπου τα χαρακτηριστικά ύψη κύματος H_{S50} και H_{S1} είναι οι τιμές για περίοδο αναφοράς 3 ωρών.

Το Μειωμένο Ύψος Κύματος (Reduced Wave Height - RWH), H_{RWH} , εκφράζει ένα ύψος κύματος που θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την ακραία ταχύτητα του ανέμου (Extreme Wind Speed - EWS) για τον καθορισμό ενός ακραίου συμβάντος με μια καθορισμένη περίοδο επαναφοράς. Το μειωμένο ύψος κύματος μπορεί να εκφράζεται ως κλάσμα του ακραίου ύψους κύματος, $H_{RWH} = \psi H_{EWH}$, με $\psi < 1$. Το μειωμένο ύψος κυμάτων χρησιμοποιείται για τον καθορισμό συμβάντων με περιόδους επαναφοράς ενός (1) και πενήντα (50) ετών, και τα αντίστοιχα μειωμένα ύψη κύματος συμβολίζονται $H_{Red,1-yr}$ και $H_{Red,50-yr}$, αντίστοιχα. Αξίζει να αναφερθεί ότι για πρακτικές εφαρμογές, σε υπεράκτιες κατασκευές, εφαρμόζεται $\psi = H_{5-yr}/H_{50-yr}$, όπου και H_{5-yr} και H_{50-yr} δηλώνουν τα ύψη κύματος με περιόδους επαναφοράς 5 και 50 έτη, αντίστοιχα. Τέλος, καθώς κινούμαστε από τα βαθιά προς τα ρηχά η τιμή του ψ λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές.

Θεωρώντας ότι τα ύψη κύματος ακολουθούν την κατανομή Rayleigh, μπορεί να θεωρηθεί ότι:

$$H_{Red,50-yr} = 1.3H_{S50} \quad (3-25)$$

$$H_{Red,1-yr} = 1.3H_{S1} \quad (3-26)$$

Όπου τα χαρακτηριστικά ύψη κύματος H_{S50} και H_{S1} είναι οι τιμές για περίοδο αναφοράς 3 ωρών.

Σημειώνεται, ότι η περίοδος του κυματισμού που αναφέρεται στα χαρακτηριστικά ύψη κύματος, τα οποία παρουσιάστηκαν στις (3.20), (3.21), (3.22) και (3.23), εμφανίζει ένα κατώτατο όριο που προκύπτει από τις θεωρήσεις σχετικά με την θραύση του κύματος, με τιμές της περιόδου:

$$T > \sqrt{34.5 \frac{d}{g} \tanh^{-1} \left(\frac{H}{0.78d} \right)} \quad (3-27)$$

όπου, H το ύψος κύματος, d το βάθος του νερού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Βιβλιογραφία

- [3.1] Recommended Practice for Planning OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-J101 , Design of Offshore Wind Turbine Structures, January 2013
- [3.2] Recommended Practice for Planning OFFSHORE STANDARD, Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, July 2010
- [3.3] Recommended Practice for Planning: British Standards, ISO 19902, Petroleum and natural gas industries-Fixed steel offshore structures, December 2007
- [3.4] Recommended Practice for Planning: British Standards, IEC-61400-3, Design requirements for offshore wind turbines April 2009
- [3.4] Recommended Practice for Planning: International Standards, IEC-61400-1, Design requirements for wind turbines, 3rd edition,2005
- [3.5] EUROPEAN STANDARD, Eurocode 3 – Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures.

4 Έλεγχος διατομής και μέλους στην οριακή κατάσταση αστοχίας

Στην παρούσα παράγραφο αναπτύσσεται η μεθοδολογία ελέγχου αντοχής των διατομών και ευστάθεια των μελών της ανεμογεννήτριας, σύμφωνα με τον EN 1993-1-6. Σε ένα μονοπάσσαλο σύστημα απαιτείται έλεγχος φέρουσας ικανότητας πασσάλου και πύργου. Ο πάσσαλος έχει κυλινδρική μορφή με κοίλη κυκλική διατομή σταθερής διαμέτρου και σταθερού πάχους. Από την άλλη πλευρά ο πύργος έχει κουλουροκωνική μορφή με κοίλη κυκλική διατομή μεταβλητής διαμέτρου και μεταβλητού πάχους. Ο έλεγχος γίνεται στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου και του πύργου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι απαιτούμενοι έλεγχοι γίνονται με την μέθοδο των τάσεων.

4.1 Χαρακτηριστικά χάλυβα

Σύμφωνα με τους κανονισμούς DNV-OS-J101 και DNV-OS-B101 γίνεται κατηγοριοποίηση των μελών από χάλυβα της ανεμογεννήτριας (structural category) ως προς τις απαιτούμενες προδιαγραφές χάλυβα που πρέπει να τηρούνται ώστε να εξασφαλισθεί η επάρκεια του υλικού έναντι φαινομένων ψαθυρής θραύσης και κόπωσης. Τα μέλη της κατασκευής κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις αναμενόμενες συνέπειες που θα επέλθουν στην αντοχή της κατασκευής σε μια ενδεχόμενη αστοχία τους. Ορίζονται οι παρακάτω κατασκευαστικές κατηγορίες για την επιλογή των κατάλληλων χαρακτηριστικών του δομικού χάλυβα [4.1]:

- Ειδική κατηγορία (Special): Αφορά τα μέλη της κατασκευής των οποίων η αστοχία θα επιφέρει σημαντικές συνέπειες και επιπλέον υπόκεινται σε τάσεις οι οποίες αυξάνουν τις πιθανότητες ψαθυρής αστοχίας.
- Βασική κατηγορία (Primary): Αφορά τα μέλη της κατασκευής των οποίων η αστοχία θα επιφέρει σημαντικές συνέπειες.
- Δευτερεύουσα κατηγορία (Secondary): Αφορά τα μέλη της κατασκευής των οποίων η αστοχία δεν επιφέρει σημαντικές συνέπειες.

Οι ποιότητες χάλυβα που χρησιμοποιούνται σε αυτό τον τύπο κατασκευών χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [4.1]:

- Χάλυβες συνηθισμένης αντοχής (Normal strength steel, NS)
- Χάλυβες υψηλής αντοχής (High strength steel, HS)
- Χάλυβες πολύ υψηλής αντοχής (Extreme high strength steel, EHS)

Κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες χάλυβα:

- Χάλυβες συνηθισμένης συγκολλησιμότητας
- Χάλυβες αυξημένης συγκολλησιμότητας

Τα μονοπάσσαλα συστήματα σύμφωνα με τον κανονισμό DNV-OS-J101 εντάσσονται στη βασική κατηγορία, ενώ οι συνδέσεις τους στην ειδική. Επιλέγονται χάλυβες υψηλής αντοχής (HS) των οποίων η χαρακτηριστική τάση διαρροής (f_{yk}) κυμαίνεται μεταξύ 265 MPa και 355 MPa. Συγκεκριμένα η χαρακτηριστική τάση διαρροής (f_{yk}) ανάλογα με το πάχος των ελασμάτων συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα:

t (mm)	f_{yk} (Mpa)	f_{yk} (Mpa)	f_{yk} (Mpa)
$t \leq 25\text{mm}$	265	315	355
$25\text{mm} < t \leq 50\text{mm}$	245	295	335
$50\text{mm} < t \leq 75\text{mm}$	230	280	320
$75\text{mm} < t \leq 100\text{mm}$	220	270	310

Σχήμα 4.1: Χαρακτηριστικές τάσεις διαρροής χάλυβα ανάλογα με το πάχος των ελασμάτων [4.1].

4.2 Κατάταξη διατομών

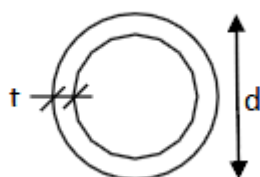
Η κατάταξη των διατομών σε κατηγορίες αποσκοπεί στην επιλογή της κατάλληλης μεθόδου υπολογισμού της αντοχής των διατομών της κατασκευής ώστε να αναγνωρισθεί η έκταση στην οποία η αντοχή και η στροφική ικανότητα των διατομών περιορίζεται από την ανάπτυξη φαινομένων τοπικού λυγισμού. Με βάση τα παραπάνω οι διατομές κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες [4.2]:

- Κατηγορία 1: Αφορά τις διατομές που έχουν την απαιτούμενη στροφική ικανότητα για τον σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης χωρίς μείωση της αντοχής τους.
- Κατηγορία 2: Αφορά τις διατομές που μπορούν να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχή τους, αλλά έχουν περιορισμένη στροφική ικανότητα.
- Κατηγορία 3: Αφορά τις διατομές των οποίων η ακραία θλιβόμενη ίνα φτάνει το όριο διαρροής, αλλά ο τοπικός λυγισμός εμποδίζει την ανάπτυξη της πλαστικής ροπής αντοχής.
- Κατηγορία 4: Αφορά τις διατομές όπου ο τοπικός λυγισμός προηγείται της ανάπτυξης τάσης διαρροής σε οποιοδήποτε σημείο τους.

Η κατάταξη γίνεται με βάση το λόγο πάτους προς πάχος d/t καθενός από τα θλιβόμενα στοιχεία της διατομής λόγω θλίψης ή/και κάμψης. Δηλαδή εξαρτάται τόσο από την γεωμετρία, όσο και από τον τύπο φόρτισης που επιβάλλεται στη διατομή.

Οι διατομές του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι κοίλες κυκλικές που υπόκεινται σε σύγχρονη θλίψη και κάμψη. Όπως θα φανεί στα επόμενα οι διατομές μιας ανεμογεννήτριας λόγω της γεωμετρίας τους, ελέγχονται συνήθως με τις διατάξεις του EN 1993-1-6 που αναφέρεται στην αντοχή κελυφωτών στοιχείων.

Για την περίπτωση των σωληνωτών διατομών, η κατάταξη τους γίνεται με βάση τον παρακάτω πίνακα:



Πίνακας 4-1: Κατάταξη διατομής ανάλογα με την ποιότητα χάλυβα και το πάχος της διατομής [4.2]

Κατηγορία	Διατομές σε κάμψη και/ή θλίψη
1	$d / t \leq 50\varepsilon^2$
2	$d / t \leq 70\varepsilon^2$
3	$d / t \leq 90\varepsilon^2$ Σημείωση: Για $d / t > 90\varepsilon^2$ βλέπε EN 1993-1-6.

$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$$

όπου:

f_y είναι το όριο διαρροής του χάλυβα

4.3 Μέθοδος των τάσεων για κελύφη

Αρχικά προσδιορίζονται μέσω γραμμικής ελαστικής ανάλυσης (LA) οι τιμές σχεδιασμού των αξονικών, περιφερειακών ορθών τάσεων καθώς και των διατμητικών στο υπό μελέτη μέλος της κατασκευής. Κατά την γραμμική ελαστική ανάλυση ασκούνται οι χαρακτηριστικές τιμές των φορτίων αυξημένες κατάλληλα με τους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ . Στην περίπτωση αξονοσυμμετρικών συνθηκών φόρτισης και στήριξης του μέλους, μπορούν να προσδιορισθούν από την μεμβρανική θεωρία.

Οι χαρακτηριστικές τιμές των μεμβρανικών τάσεων θα πρέπει να λαμβάνονται ίσες με την μέγιστη τιμή κάθε τάσης, εκτός αν προβλέπεται κάτι διαφορετικό από τις διατάξεις του EN 1993-1-6 [4.3].

4.3.1 Αντοχή έναντι λυγισμού

Οι τάσεις αντοχής έναντι λυγισμού είναι οι ακόλουθες:

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} \quad (4-1)$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \sigma_{\theta,Rk} / \gamma_{M1} \quad (4-2)$$

$$T_{x\theta,Rd} = T_{x\theta,Rk} / \gamma_{M1} \quad (4-3)$$

όπου $\sigma_{x,Rd}$, $\sigma_{\theta,Rd}$, $T_{x\theta,Rd}$ οι αντοχές σχεδιασμού έναντι λυγισμού για αξονική, περιφερειακή θλίψη και διάτμηση αντίστοιχα, ενώ όπου $\sigma_{x,Rk}$, $\sigma_{\theta,Rk}$, $T_{x\theta,Rk}$ οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχής έναντι λυγισμού για αξονική, περιφερειακή θλίψη και διάτμηση. Ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας γ_{M1} υποδεικνύεται να λαμβάνεται από τα εθνικά παραρτήματα. Αν δεν υπάρχει σχετική υπόδειξη συνιστάται ως ελάχιστη τιμή του $\gamma_{M1}=1.1$.

Οι χαρακτηριστικές τάσεις λυγισμού υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας την χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής f_{yk} με τον κατάλληλο μειωτικό συντελεστή για λυγισμό χ_i :

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_{yk} \quad (4-4)$$

$$\sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} f_{yk} \quad (4-5)$$

$$T_{x\theta,Rk} = \chi_T f_{yk} / \sqrt{3} \quad (4-6)$$

όπου χ_x , χ_θ , χ_T οι μειωτικοί συντελεστές λυγισμού για αξονική, περιφερειακή θλίψη και διάτμηση αντίστοιχα, οι οποίοι υπολογίζονται ως συνάρτηση της ανηγμένης λυγηρότητας λ του κελύφους από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\chi = 1, \lambda \leq \lambda_0 \quad (4-7)$$

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0} \right)^n, \lambda_0 < \lambda < \lambda_p \quad (4-8)$$

$$\chi = \frac{a}{\lambda^2}, \lambda_p \leq \lambda \quad (4-9)$$

όπου

a : είναι ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών

β : είναι συντελεστής εύρους πλαστικής περιοχής

n : είναι ο εκθέτης αλληλεπίδρασης

λ_0 : είναι η ανώτατη ανηγμένη λυγηρότητα της πλαστικής ζώνης

Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων πρέπει να λαμβάνονται από το παράρτημα D του EC3.

Η τιμή της ανηγμένης πλαστικής λυγηρότητας πρέπει να λαμβάνεται ως:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{a}{1-\beta}} \quad (4-10)$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα λ δίνεται από τις σχέσεις:

$$\lambda_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}}, \lambda_\theta = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta,Rcr}}}, \lambda_T = \sqrt{\frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{T_{x\theta,Rcr}}} \quad (4-11)$$

όπου λ_x , λ_θ , λ_T η ανηγμένη λυγηρότητα λ για αξονική, περιφερειακή θλίψη και διάτμηση αντίστοιχα.

4.3.2 Κυλινδρικά μέλη σταθερού πάχους

Ο προσδιορισμός της ελαστικής κρίσιμης τάσης λυγισμού περιγράφεται παρακάτω:

Αρχικά απαιτείται ο προσδιορισμός της αδιάστατης παραμέτρου μήκους ω , του υπό εξέταση κελυφωτού τμήματος από τη σχέση:

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}} \quad (4-12)$$

όπου l , r , t το μήκος, η ακτίνα και το πάχος του τμήματος αντίστοιχα.

Ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού

Η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0.605EC_x \frac{t}{r} \quad (4-13)$$

όπου

$$C_x = \begin{cases} 1.36 - \frac{1.83}{\omega} + \frac{2.07}{\omega^2} & , \omega \leq 1.7 \\ 1.0 & , 1.7 \leq \omega \leq 0.5 \frac{r}{t} \\ \max \left(0.6 , 1 + \frac{0.2}{C_{xb}} \left[1 - 2\omega \frac{t}{r} \right] \right) & , \omega > 0.5 \frac{r}{t} \end{cases} \quad (4-14)$$

όπου C_{xb} παράμετρος που εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες .

Για την περίπτωση μακρών κελυφών τα οποία ικανοποιούν τις εξής προϋποθέσεις:

$$\frac{r}{t} \leq 150 , \omega \leq 6 \left(\frac{r}{t} \right) \text{ και } 500 \leq \frac{E}{f_{yk}} \leq 1000 \quad (4-15)$$

ο παράγοντας C_x υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$C_x = C_{x,N} \left(\frac{\sigma_{xE,N}}{\sigma_{xE}} \right) + \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}} \right) \quad (4-16)$$

όπου σ_{xE} είναι η τιμή σχεδιασμού της αξονικής τάσης $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{xE,N}$ η συνιστώσα της αξονικής τάσης που οφείλεται στην αξονική θλίψη, ενώ $\sigma_{xE,M}$ η συνιστώσα της αξονικής τάσης που προέρχεται από καθολική κάμψη.

Όταν ικανοποιούνται οι συνθήκες (2-15), η ανώτατη ανηγμένη λυγηρότητα της πλαστικής περιοχής λ_{x0} λαμβάνεται από τη σχέση:

$$\lambda_{x0} = 0.20 + 0.10 \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}} \right) \quad (4-17)$$

Ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών στην περίπτωση της θλιπτικής αξονικής τάσης ορίζεται ως:

$$\alpha_x = \frac{0.62}{1 + 1.91 (\Delta w_k / t)^{1.44}} \quad (4-18)$$

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \quad (4-19)$$

όπου το Δw_k είναι το χαρακτηριστικό εύρος ατελειών το οποίο εξαρτάται από την παράμετρο Q η οποία καθορίζεται από την ποιότητα κατασκευής και λαμβάνει τιμές 40, 25, 16 για τις κατασκευαστικές κατηγορίες A, B, C αντίστοιχα.

Οι υπόλοιποι συντελεστές για αξονικά ή καμπτικά φορτιζόμενα κελύφη λαμβάνονται $\lambda_{x0} = 0.2$, $\beta = 0.6$ και $n = 1.0$.

Μέλη τα οποία ικανοποιούν την παρακάτω συνθήκη δεν είναι απαραίτητο να ελέγχονται έναντι αξονικού λυγισμού:

$$\frac{r}{t} \leq 0.03 \frac{E}{f_{yk}} \quad (4-20)$$

Ελαστική περιφερειακή κρίσιμη τάση λυγισμού

Η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού για περιφερειακή θλίψη δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{\theta,Rk} = \begin{cases} 0.92E \left(\frac{C_{\theta s}}{\omega} \right) \frac{t}{r} & , \frac{\omega}{C_{\theta}} < 20 \\ 0.92E \left(\frac{C_{\theta}}{\omega} \right) \frac{t}{r} & , 20 \leq \frac{\omega}{C_{\theta}} \leq 1.63 \frac{r}{t} \\ E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left[0.275 + 2.03 \left(\frac{C_{\theta} r}{\omega t} \right)^4 \right] & , \frac{\omega}{C_{\theta}} > 1.63 \frac{r}{t} \end{cases} \quad (4-21)$$

Οι παράμετροι C_{θ} , $C_{\theta s}$ εξαρτώνται από τις συνοριακές συνθήκες του κελύφους.

Ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών a_{θ} στην περίπτωση της θλιπτικής περιφερειακής τάσης ορίζεται ως συνάρτηση της ποιότητας κατασκευής σύμφωνα με τον Πίνακα 2.6 :

Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	a_{θ}
Κλάση A	Εξαιρετική	0.75
Κλάση B	Υψηλή	0.65
Κλάση C	Κανονική	0.50

Σχήμα 4.2: Συντελεστής a_{θ} συναρτήσει της ποιότητας κατασκευής [4.3].

Οι υπόλοιπες παράμετροι λυγισμού λαμβάνονται $\lambda_{\theta 0} = 0.4$, $\beta = 0.6$, $n = 1.0$.

Δεν απαιτείται έλεγχος έναντι περιφερειακού λυγισμού για μέλη που ικανοποιούν την παρακάτω συνθήκη:

$$\frac{r}{t} \leq 0.21 \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} \quad (4-22)$$

Ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού

Η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού για διάτμηση δίνεται από τη σχέση:

$$T_{x\theta,Rcr} = 0.75 E C_T \sqrt{\frac{1}{\omega}} \left(\frac{t}{r} \right) \quad (4-23)$$

όπου

$$C_T = \begin{cases} \sqrt{1 + \frac{43}{\omega^3}} & , \omega \leq 10 \\ 1.0 & , 10 \leq \omega \leq 8.7 \frac{r}{t} \\ \frac{1}{3} \sqrt{\omega \frac{r}{t}} & , \omega > 8.7 \frac{r}{t} \end{cases} \quad (4-24)$$

Ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών a_T στην περίπτωση της διατμητικής τάσης ορίζεται ως συνάρτηση της ποιότητας κατασκευής σύμφωνα με τον Πίνακα 2.6. Οι υπόλοιπες παράμετροι λυγισμού λαμβάνονται $\lambda_{T0} = 0.4$, $\beta = 0.6$, $n = 1.0$.

Δεν απαιτείται έλεγχος έναντι διατμητικού λυγισμού για μέλη που ικανοποιούν την παρακάτω συνθήκη:

$$\frac{r}{t} \leq 0.16 \left[\frac{E}{f_{yk}} \right]^{0.67} \quad (4-25)$$

4.3.3 Κυλινδρικά μέλη μεταβλητού πάχους

4.3.3.1 Ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού

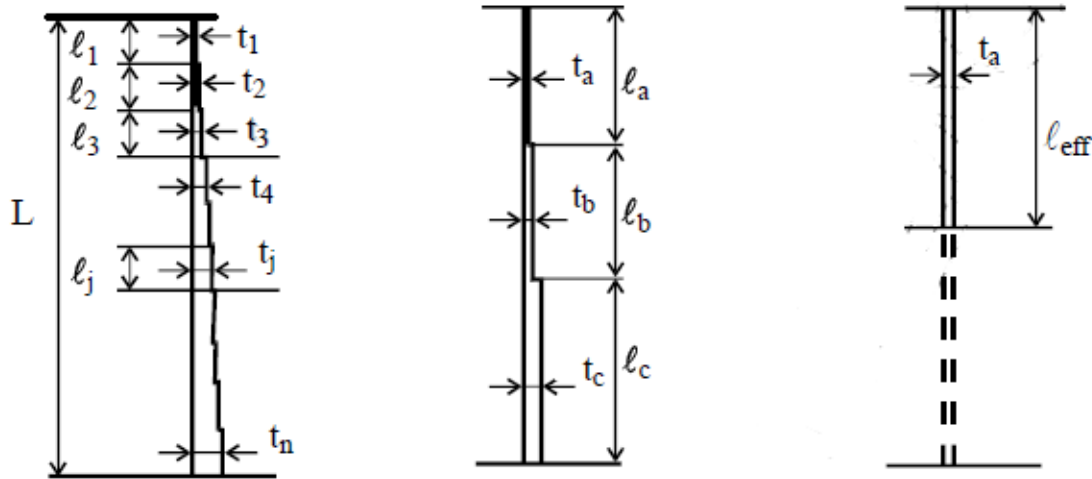
Για κυλινδρικά μέλη μεταβλητού πάχους η ελαστική αξονική κρίσιμη τάση κάθε τμήματος j υπολογίζεται εφαρμόζοντας την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για μέλη ενιαίου πάχους, θεωρώντας ισοδύναμο κύλινδρο μήκους $l = L$ και ενιαίου πάχους $t = t_j$. Όταν ο ισοδύναμος κύλινδρος ικανοποιεί τις συνθήκες () μακρών κυλίνδρων, ο συντελεστής C_{xb} πρέπει συντηρητικά να λαμβάνεται ίσος με 1.

Ελαστική περιφερειακή κρίσιμη τάση λυγισμού

Στην περίπτωση που το εξεταζόμενο μέλος είναι κύλινδρος ο οποίος αποτελείται από τμήματα διαφορετικού πάχους ελασμάτων t_i , θα πρέπει να αντικαθίσταται με έναν ισοδύναμο κύλινδρο (equivalent cylinder) τριών τμημάτων a , b και c (). Το μήκος l_a του πάνω τμήματος a πρέπει να φθάνει έως το τμήμα του αρχικού κυλίνδρου το οποίο έχει πάχος 1,5 φορές μεγαλύτερο του ελάχιστου πάχους του αρχικού κυλίνδρου αλλά να μην ξεπερνά το μισό αρχικό μήκος. Τα μήκη των τμημάτων b , c ορίζονται ως εξής:

$$l_b = l_a \text{ και } l_c = L - 2l_a , l_a \leq \frac{L}{3} \quad (4-26)$$

$$l_b = l_c = 0.5(L - l_a) , \frac{L}{3} < l_a \leq \frac{L}{2} \quad (4-27)$$



Σχήμα 4.3: Μετατροπή κυλίνδρου μεταβλητού πάχους σε ισοδύναμο κύλινδρο ενιαίου πάχους [4.3].

Τα πάχη των τριών τμημάτων t_a , t_b , t_c υπολογίζονται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος του πάχους των τμημάτων j του αρχικού κυλίνδρου που βρίσκονται στα αντίστοιχα μήκη l_a , l_b , l_c :

$$t_a = \frac{1}{l_a} \sum_a l_j t_j \quad (4-28)$$

$$t_b = \frac{1}{l_b} \sum_b l_j t_j \quad (4-29)$$

$$t_c = \frac{1}{l_c} \sum_c l_j t_j \quad (4-30)$$

Ο κύλινδρος των τριών τμημάτων a , b και c αντικαθίσταται με έναν ισοδύναμο κύλινδρο μήκους $l_{\text{eff}} = l_a / \kappa$ και ενιαίου πάχους $t = t_a$, όπου κ αδιάστατος παράγοντας που προσδιορίζεται από το σχήμα.

Για κάθε τμήμα j υπολογίζεται η αδιάστατη παράμετρος μήκους ω_j , σύμφωνα με την οποία χαρακτηρίζεται το μήκος του τμήματος :

$$\omega_j = \frac{l_j}{\sqrt{t_j}} \quad (4-31)$$

Για μικρού ή μεσαίου μήκους τμήματα j του αρχικού κυλίνδρου, η ελαστική περιφερειακή κρίσιμη τάση λυγισμού προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{\theta, \text{Rcr}, j} = \left(\frac{t_a}{t_j} \right) \sigma_{\theta, \text{Rcr}, \text{eff}} \quad (4-32)$$

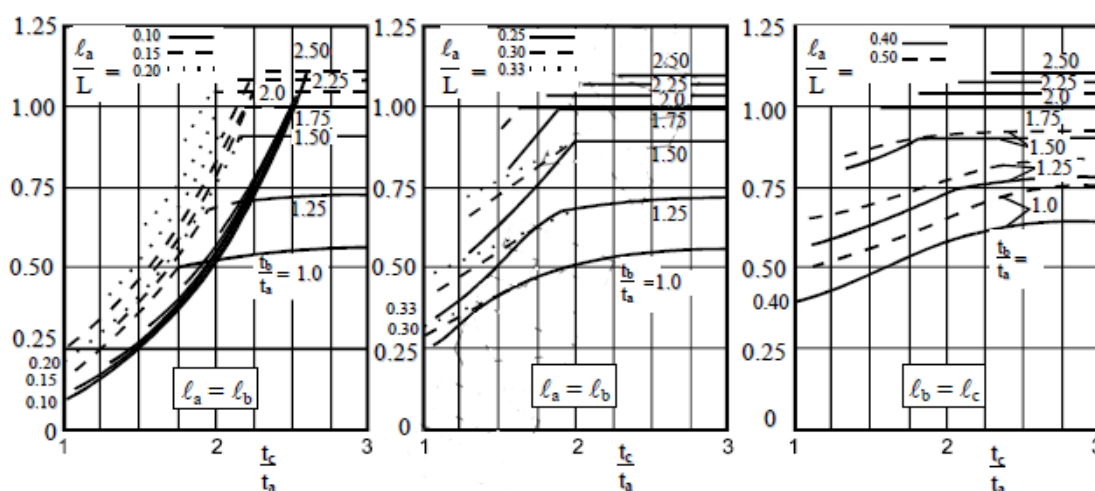
όπου $\sigma_{\theta, \text{Rcr}, \text{eff}}$ είναι ελαστική περιφερειακή κρίσιμη τάση λυγισμού του ισοδύναμου κυλίνδρου μήκους l_{eff} η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την παράγραφο 4.3.2.

Για μακριά τμήματα που ικανοποιούν την παρακάτω συνθήκη:

$$\omega_j > 1.63 \frac{r}{t_j} \quad (4-33)$$

η ελαστική περιφερειακή κρίσιμη τάση λυγισμού του τμήματος j πρέπει να λαμβάνεται από τη 4-34:

$$\sigma_{\theta,Rcr,j} = E \left(\frac{t_j}{r} \right)^2 \left[0.275 + 2.03 \left(\frac{1}{\omega_j} \frac{r}{t_j} \right)^4 \right] \quad (4-34)$$



Σχήμα 4.4: Αδιάστατος παράγοντας κ για τον προσδιορισμό του λ_{eff} [4.3]

Ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού

Η ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού κυλίνδρου μεταβλητού πάχους υπολογίζεται σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο για τον υπολογισμό της ελαστικής περιφερειακής κρίσιμης τάσης λυγισμού, αντικαθιστώντας τις εκφράσεις της περιφερειακής θλίψης με τις αντίστοιχες της διάτμησης όπως διατυπώθηκαν στην παράγραφο 4.3.2.

4.3.4 Έλεγχος σε λυγισμό

Ανάλογα με την φόρτιση και το καθεστώς των τάσεων, θα πρέπει να πραγματοποιούνται ένας ή περισσότεροι έλεγχοι των κρίσιμων τιμών των μεμονωμένων μεμβρανικών τάσεων:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (4-35)$$

$$\sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} \quad (4-36)$$

$$T_{x\theta,Ed} \leq T_{x\theta,Rd} \quad (4-37)$$

Αν συνυπάρχουν παραπάνω από μια από τις μεμβρανικές τάσεις στην υπό μελέτη φόρτιση, θα πρέπει να γίνεται έλεγχος αλληλεπίδρασης τους με την ακόλουθη σχέση:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} + \left(\frac{T_{x\theta,Ed}}{T_{x\theta,Rd}} \right)^{k_T} \leq 1 \quad (4-38)$$

όπου $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$, $T_{x\theta,Ed}$ είναι το σύνολο των τάσεων που αλληλεπιδρούν. Οι τάσεις σχεδιασμού $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$, $T_{x\theta,Ed}$ υπολογίζονται με δύο τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο, στη σχέση αλληλεπίδρασης χρησιμοποιούνται το σύνολο των τάσεων που αναπτύσσονται στο υπό εξέταση σημείο του κελύφους. Σύμφωνα με τον δεύτερο τρόπο, η σχέση αλληλεπίδρασης εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας τις μέγιστες τιμές των μεμβρανικών τάσεων ανεξάρτητα από το που αυτές εμφανίζονται, παραδοχή σαφώς συντηρητική.

Όταν η $\sigma_{x,Ed}$ ή $\sigma_{\theta,Ed}$ είναι εφελκυστικές, οι τιμές τους πρέπει να λαμβάνονται ίσες με μηδέν στη σχέση αλληλεπίδρασης.

Οι εκθέτες αλληλεπίδρασης λυγισμού k_x , k_θ , k_T που υπεισέρχονται στη σχέση (4-38) πρέπει να λαμβάνονται από το Παράρτημα D ως εξής:

$$k_x = 1.25 + 0.75 \chi_x \quad (4-39)$$

$$k_\theta = 1.25 + 0.75 \chi_\theta \quad (4-40)$$

$$k_T = 1.75 + 0.25 \chi_T \quad (4-41)$$

Βιβλιογραφία

- [4.1] Recommended Practice for Planning OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-J101 , Design of Offshore Wind Turbine Structures, January 2013,
- [4.2] Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι, Ιωαννίδης Γ. «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα»
- [4.3] EUROPEAN STANDARD, Eurocode 3 – Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures

5 Θεμελίωση Πασσάλου

5.1 Γενικά στοιχεία

Οι πάσσαλοι αποτελούν τον συνηθέστερο τρόπο βαθιάς θεμελίωσης και προτιμώνται έναντι των επιφανειακών τρόπων θεμελίωσης για την κατασκευή υπεράκτιων κατασκευών καθώς το τυπικό εδαφικό προφίλ του πυθμένα της θάλασσας συνίσταται από μια στρώση πολύ μαλακού εδάφους στην επιφάνεια, η οποία δίνει πολύ μικρή εδαφική πλευρική αντίσταση ενώ τα φορτία μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι κατά βάση πλευρικά καθώς επίσης είναι επιρρεπής σε φαινόμενα υδραυλικής υποσκαφής. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οι πάσσαλοι ώστε να μεταβιβάζονται τα στατικά, ανακυκλιζόμενα και παροδικά φορτία της κατασκευής με ασφάλεια σε μεγαλύτερα βάθη όπου το έδαφος έχει μεγαλύτερη αντοχή καθώς και να ελέγχονται οι παραμορφώσεις (καθιζήσεις ή πλευρικές μετατοπίσεις) και οι στροφές της ανωδομής (πύργος).

Στις περιπτώσεις υπεράκτιων ανεμογεννητριών θεμελιωμένες σε μονοπάσσαλο σύστημα συνήθως χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι πάσσαλοι κοίλης κυκλικής διατομής των οποίων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά έχουν ως εξής:

- Διάμετρος D που κυμαίνεται μεταξύ 3 m έως 6 m
- Μήκος έμπηξης πασσάλου L μεταξύ 20 m και 50 m
- Λόγος διαμέτρου προς πάχος τοιχωμάτων D/t από 25 έως 120

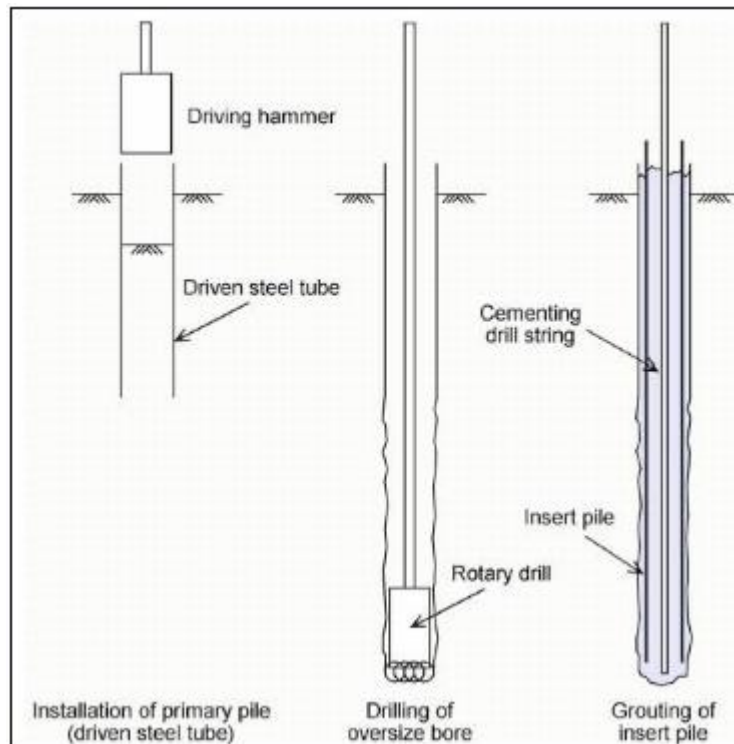


Σχήμα 5.1: Χαλύβδινος πάσσαλος πριν την εγκατάσταση (α), εγκατεστημένος (β) [5.1].

5.2 Τρόποι εγκατάστασης

Η επιλογή του τρόπου εγκατάστασης εξαρτάται από τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες και από τον διαθέσιμο μηχανολογικό εξοπλισμό. Οι τρόποι εγκατάστασης που αναφέρονται στον ISO 19902 είναι:

- Έμψη πάσσαλων μέσω ειδικών σφυριών (driven piles)
- Μέσω εκσκαφής και ενίσχυσης (drilled and grouted piles)
- Έμψη πάσσαλων μέσω ειδικών δονητικών σφυριών (vibro-driven piles)



Σχήμα 5.2: Τρόποι εγκατάστασης πασσάλων α) με έμψη β) με εκσκαφή και ενίσχυση [5.2].

Στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες συνήθως χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι έμψηγόμενοι πάσσαλοι, οι οποίοι τοποθετούνται στην προκαθορισμένη θέση τους μέσω ειδικών ατμοκίνητων ή βενζινοκίνητων ή υδραυλικών σφυριών.

Κατά την διαδικασία έμψης το σφυρί ασκεί τεράστιο θλιπτικό φορτίο στην κορυφή του πάσσαλου μέσω κρούσης ώστε να τον "σπρώξει" στην θέση του. Οι γεωμετρικές διαστάσεις (διάμετρος και πάχος τοιχώματος) του πασσάλου πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να μπορεί να αναλάβει τα σημαντικά αξονικά και καμπικά φορτία κατά τη φάση της εγκατάστασής του. Η διαδικασία έμψης χρειάζεται επιμελής επιτήρηση από τον χειριστή του μηχανήματος ώστε να αποφεύγεται η απόκλιση του πασσάλου από την κατακόρυφο.



Σχήμα 5.3: Ειδικό σφυρί έμπηξης.

5.3 Χαλύβδινοι πάσσαλοι

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας μελετάται μονοπάσσαλο σύστημα θεωρώντας εμπηγνύομενο χαλύβδινο πάσσαλο κοίλης κυκλικής διατομής, ανοιχτής στην αιχμή του. Οι χαλύβδινοι πάσσαλοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή θαλάσσιων ανεμογεννητριών λόγω της σημαντικής αντοχής τους σε θλίψη, κάμψη και λυγισμό. Έχουν επίσης σημαντική δυνατότητα μεταφοράς μεγάλων θλιπτικών φορτίων σε υγιείς εδαφικές στρώσεις που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, αφού μπορούν να κατασκευασθούν σε μεγάλα μήκη. Οι χαλύβδινοι πάσσαλοι αποτελούν ίσως το αρτιότερο είδος θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών καθώς δεν επηρεάζονται από τα υπόγεια ύδατα, επανεμπηγνύονται σε περίπτωση ανύψωσης τους και είναι κατάλληλοι για τις περιπτώσεις όπου σχετικώς μεγάλου πάχους μαλακές αποθέσεις υπέρκεινται της βάσεως εδράσεως. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα των χαλύβδινων πασσάλων, είναι η δραστική μείωση των καθιζήσεων της κατασκευής εξαιτίας της σημαντικής πλευρικής τριβής που αναπτύσσεται κατά μήκος του. Μειονέκτημα τους αποτελεί το αυξημένο κόστος τους ανά μέτρο μήκους καθώς και η αυξανόμενη δυσκολία έμπηξης τους όσο μεγαλώνουν τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά.

5.3.1 Φέρουσα ικανότητα διατομής χαλύβδινου πασσάλου

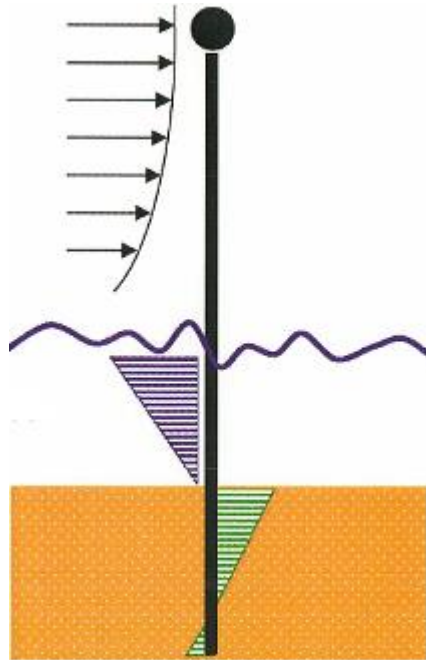
Η στατική επάρκεια της διατομής και του μέλους του πασσάλου υπολογίζεται σύμφωνα με τις διατάξεις για χαλύβδινα κυλινδρικά μέλη του EC3-Μέρος 1.6, όπως αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Η εντατική κατάσταση του πασσάλου σύμφωνα με τον κανονισμό ISO 19902 πρέπει να υπολογίζεται μέσω μη γραμμικής ανάλυσης πασσάλου-εδάφους, για τους απαιτούμενους συνδυασμούς φόρτισης οι οποίοι διατυπώθηκαν στο Κεφάλαιο 3.2.5. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στους συνδυασμούς φόρτισης που αφορούν το στάδιο εγκατάστασης, εφόσον όπως αναφέρθηκε το ειδικό σφυρί ασκεί τεράστια θλιπτικά φορτία κατά την εγκατάσταση του πασσάλου τα οποία, μπορεί να αποδειχθούν κρίσιμα.

Οι χαλύβδινοι πάσσαλοι πρέπει επίσης να σχεδιάζονται ώστε να έχουν επαρκή αντοχή και ανθεκτικότητα σε διάβρωση κατά την διάρκεια ζωής τους. Τόσο το τμήμα του πασσάλου που

βρίσκεται πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, όσο το τμήμα που βρίσκεται σε διαβρωμένα εδαφικά στρώματα θα πρέπει να προστατεύονται έναντι διάβρωσης.

5.4 Αντίδραση του εδάφους

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες θεμελιωμένες σε μονοπάσσαλο δέχονται σημαντικά πλευρικά φορτία εκατομμυρίων κύκλων φόρτισης όπως τα φορτία ανέμου, κυματισμών ή παλίρροιας τα οποία μεταβιβάζονται στο έδαφος μέσω του πασσάλου. Τα επιβαλλόμενα αυτά φορτία πρέπει να βρίσκονται σε ισορροπία με την αντίδραση του εδάφους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4:



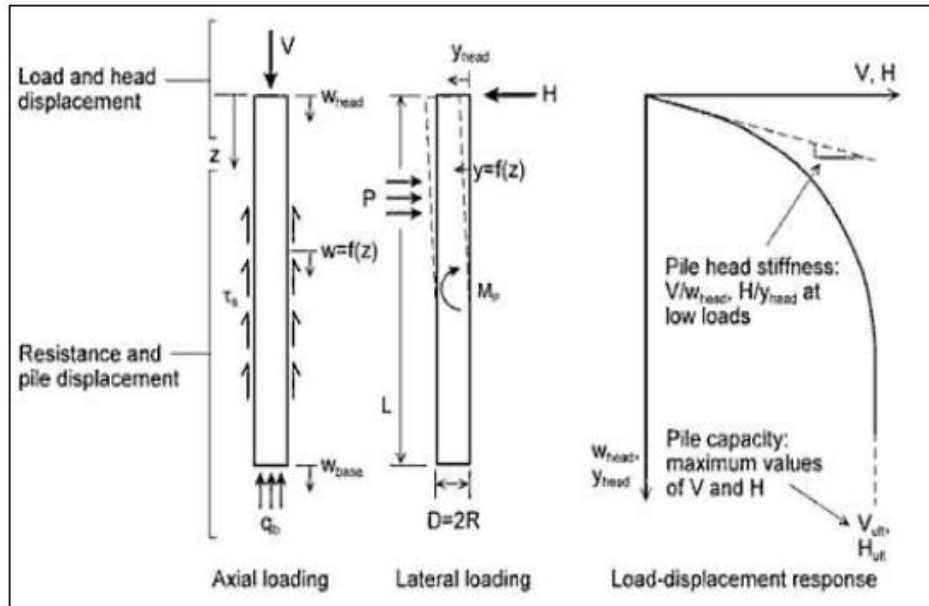
Σχήμα 5.4: Ισορροπία δυνάμεων σε μια θαλάσσια ανεμογεννήτρια [5.1].

Καθώς ο πάσσαλος βρίσκεται στην παραπάνω εντατική κατάσταση ξεκινά να περιστρέφεται και να μετατοπίζεται πλευρικά, με αποτέλεσμα το έδαφος να προβάλλει αντίσταση. Στα πρώτα μέτρα κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας το έδαφος πλαστικοποιείται, φαινόμενο που ατονεί με την αύξηση του βάθους μέχρις ότου οι παραμορφώσεις να γίνουν ελαστικές, καθώς το έδαφος γίνεται πιο δύσκαμπτο και μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη πλευρική στήριξη στον πάσσαλο. Τα κατακόρυφα φορτία της ανωδομής μεταβιβάζονται από τον πάσσαλο στο έδαφος μέσω της τριβής που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους καθώς και της αντίστασης της αιχμής του [5.1].

5.5 Φέρουσα ικανότητα – Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση

Η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου υπό κατακόρυφη θλιπτική φόρτιση ορίζεται ως το φορτίο που οδηγεί σε διατμητική αστοχία – θραύση το έδαφος θεμελίωσης. Στις περιπτώσεις όπου η αστοχία δεν εκδηλώνεται έστω και κατά προσέγγιση με την θεωρητική μορφή συγκεκριμένου μηχανισμού αλλά με την ανάπτυξη υπερβολικών καθιζήσεων, το οριακό φορτίο πλέον ορίζεται ως συνάρτηση της μέγιστης επιτρεπτής καθίζησης της ανωδομής [5.3]. Στην περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών η φέρουσα ικανότητα σε κατακόρυφη φόρτιση συνήθως δεν αποτελεί κρίσιμη, εξαιτίας της πλευρικής φύσης της πλειοψηφίας των φορτίων που δέχεται. Επομένως η πλευρική αντοχή του πασσάλου συνήθως καθορίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά

του. Ο μηχανισμός ανάληψης των φορτίων είναι διαφορετικός για αξονική και πλευρική φόρτιση, ωστόσο οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης είναι ίδιας μορφής (Σχήμα 5.5):



Σχήμα 5.5: Μηχανισμός ανάληψης α) κατακόρυφων, β) οριζόντιων φορτίσεων από πασσάλους και καμπύλες φορτίου-μετατόπισης [3.2].

Η φέρουσα ικανότητα ενός μεμονωμένου πασσάλου ο οποίος υποβάλλεται σε αξονική θλιπτική κατακόρυφη φόρτιση δίνεται από τη σχέση [5.2]:

$$Q_u = \Sigma Q_{su} + Q_{pu} - W_p \quad (5-1)$$

όπου:

Q_u είναι το οριακό κατακόρυφο φορτίο του πασσάλου

ΣQ_{su} είναι το άθροισμα της οριακής αντίστασης πλευρικής τριβής του πασσάλου για τις διάφορες εδαφικές στρώσεις

Q_{pu} είναι η οριακή αντίσταση αιχμής του πασσάλου

W_p είναι το ίδιο βάρος του πασσάλου

Η οριακή αντίσταση πλευρικής τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$\sum_1^i Q_{su} = \pi D \int_0^L f_{sui} dz \quad (5-2)$$

όπου:

D είναι η διάμετρος του πασσάλου

L είναι το μήκος του πασσάλου

f_{sui} είναι η οριακή πλευρική τριβή της i-στης εδαφικής στρώσης

dz είναι το πάχος της i-στης εδαφικής στρώσης

Η οριακή αντίσταση αιχμής του πασσάλου δίνεται από τη σχέση:

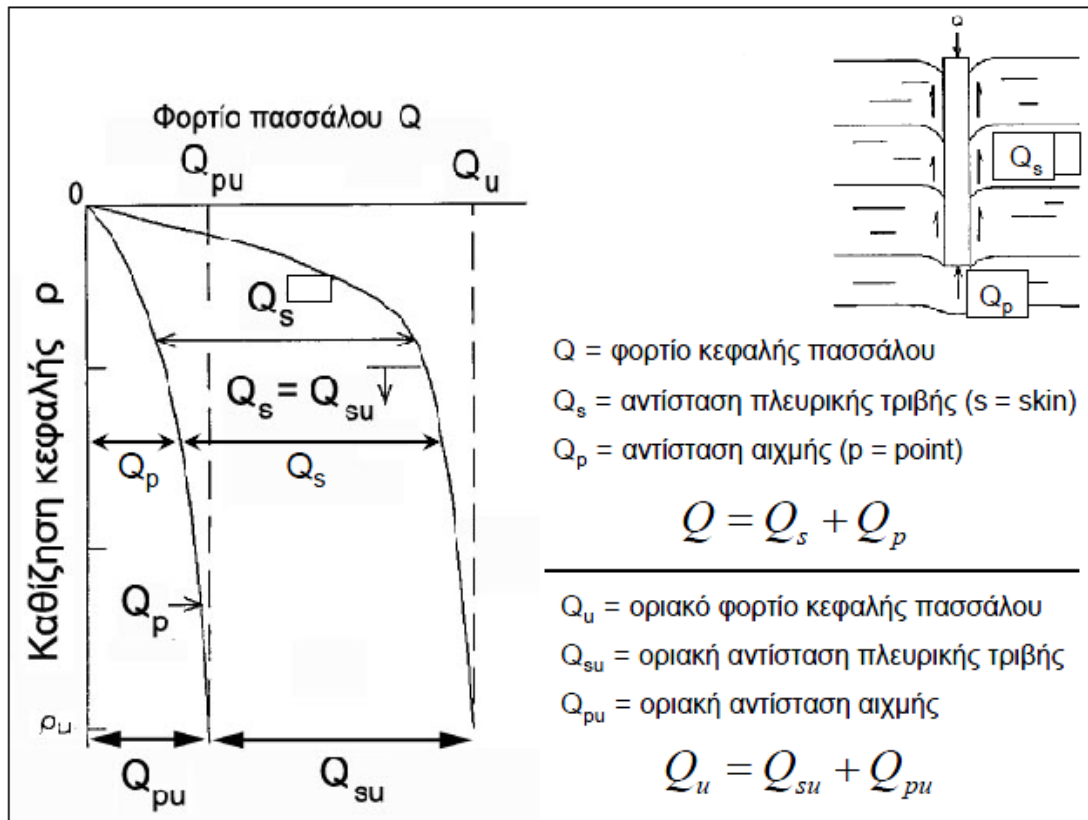
$$Q_{pu} = A_p q_{pu} \quad (5-3)$$

όπου:

A_p είναι το εμβαδόν της αιχμής του πασσάλου

q_{pu} είναι η οριακή μοναδιαία αντίσταση της αιχμής του πασσάλου

Ο μηχανισμός ανάληψης των κατακόρυφων θλιπτικών φορτίσεων φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.6):



Σχήμα 5.6: Μορφή καμπύλης αξονικής δύναμης-καθίζησης στην κεφαλή του πασσάλου [5.2].

5.5.1 Συνεκτικά εδάφη - Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση

Ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου σε κατακόρυφη φόρτιση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι το εδαφικό προφίλ της περιοχής εγκατάστασης του πασσάλου, δηλαδή από τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους όπως είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του και η κοκκομετρική διαβάθμιση του, από την ποιότητα της γεωτεχνικής έρευνας για τον προσδιορισμό του εδαφικού προφίλ καθώς επίσης και από τον τύπο του πασσάλου και την μέθοδο έμπηξης του. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή οδηγίες του DNV NO.30.4 τα εδάφη χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- συνεκτικά εδάφη (αργιλοκοί σχηματισμοί)
- μη συνεκτικά εδάφη (αμμώδης σχηματισμοί)

Για πασσάλους εμπυγνήμενοι σε συνεκτικά εδάφη, προτείνεται ο υπολογισμός της οριακής πλευρικής τριβής f_{su} με τους παρακάτω μεθόδους:

- μέθοδος συνολικών τάσεων (α -method)
- μέθοδος ενεργών τάσεων (β -method)
- μέθοδος συνδυασμού συνολικών και ενεργών τάσεων (λ -method)

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας καταγράφεται η πρώτη μέθοδος (α-method), σύμφωνα με την οποία η πλευρική τριβή f_{si} πασσάλου και της i -οστής εδαφικής στρώσης προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$f_{si} = \alpha c_u \quad (5-4)$$

όπου:

α είναι εμπειρικός συντελεστής πρόσφυσης που συσχετίζεται με το c_u και είναι μικρότερος ή ίσος με 1, ενώ μειώνεται καθώς το c_u αυξάνεται με το βάθος

c_u είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους

Ο πολλαπλασιαστής α δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\alpha = \begin{cases} 0.5\psi^{-0.5}, & \psi \leq 1.0 \\ 0.5\psi^{-0.25}, & \psi > 1.0 \end{cases} \quad (5-5)$$

όπου:

$$\psi = c_u / p_0' \quad (5-6)$$

p_0' είναι η κατακόρυφη ενεργός τάση

Ο κανονισμός DNV NO.30.4 αναφέρει ότι σε αμμώδη εδάφη, η αναπτυσσόμενη πλευρική τριβή πασσάλου-εδάφους πρέπει να θεωρείται ισοδύναμη τόσο για θλιπτική κατακόρυφη φόρτιση όσο για εφελκυστική κατακόρυφη φόρτιση.

Όσο αναφορά πασσάλους των οποίων η αιχμή βρίσκεται σε αργιλικά εδάφη (συνεκτικά), η αντίσταση της αιχμής τους πρέπει να υπολογίζεται σε αστράγγιστες συνθήκες ($c = c_u$ και $\phi = 0$) οι οποίες είναι δυσμενέστερες [5.4]. Επομένως η αντίσταση της αιχμής πασσάλου σε συνεκτικό έδαφος δίνεται από τη σχέση [5.5]:

$$q_{pu} = 9c_u \quad (5-7)$$

όπου:

c_u είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους στην περιοχή της αιχμής του πασσάλου

5.5.2 Μη-Συνεκτικά εδάφη – Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση

Στα μη-συνεκτικά εδάφη (αμμώδη), εξαιτίας της μεγάλης διαπερατότητας τους, η υπερπίεση των πόρων που αναπτύσσεται κατά την φόρτιση του πασσάλου εκτονώνεται άμεσα. Για τον λόγο αυτόν, ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου γίνεται θεωρώντας στραγγισμένες συνθήκες [5.4].

Για πασσάλους θεωρούμενους σε αμμώδη εδάφη, προτείνεται ο υπολογισμός της πλευρικής τριβής f_s πασσάλου-εδάφους από την παρακάτω σχέση [5.5]:

$$f_s = K \tan \delta p_0' \quad (5-8)$$

όπου:

K είναι ο συντελεστής ωθήσεων. Προτείνεται:

$K = 1.0$ για πασσάλους με φραγμένη αιχμή

$K = 0.8$ για πασσάλους με ανοιχτή αιχμή

δ είναι η γωνία τριβής πασσάλου-εδάφους

ρ_0' είναι η κατακόρυφη ενεργός τάση

Επίσης η αντίσταση της αιχμής του δίνεται από τη σχέση:

$$q_p = \rho_0' N_q \quad (5-9)$$

όπου:

N_q είναι ο συντελεστής φέρουσας ικανότητας

ρ_0' είναι η κατακόρυφη ενεργός τάση

Οι παράμετροι σχεδιασμού για αμμώδη εδάφη δίνονται στον Πίνακα 5-1. Η γωνία τριβής δ και ο συντελεστής φέρουσας ικανότητας N_q όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα προσδιορίζονται ανάλογα με την πυκνότητα και την κοκκομετρία του εδάφους. Στον ίδιο πίνακα δίνονται οι προτεινόμενες οριακές τιμές της πλευρικής τριβής και της αντίστασης της αιχμής ($\max f_s$ και $\max q_p$ αντίστοιχα).

Πίνακας 5-1: Παράμετροι σχεδιασμού εμπυγνηόμενων πασσάλων για μη-συνεκτικά εδάφη [5.4].

Πυκνότητα	Έδαφος	δ (°)	$\max f_s$ (kPa)	N_q	$\max q_p$ (MPa)
Πολύ χαλαρό Χαλαρή Μέσης πυκνότητας	Άμμος Αμμοιλύς Ιλύς	15	48	8	1.9
Χαλαρή Μέσης πυκνότητας Πυκνό	Άμμος Αμμοιλύς Ιλύς	20	67	12	2.9
Μέσης πυκνότητας Πυκνό	Άμμος Αμμοιλύς	25	81	20	4.8
Πυκνό Πολύ πυκνό	Άμμος Αμμοιλύς	30	96	40	9.6
Πυκνό Πολύ πυκνό	Χαλίκια Άμμος	35	115	50	12

5.6 Φέρουσα ικανότητα – Αντοχή σε πλευρική φόρτιση

Στην περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, οι πλευρικές φορτίσεις (φορτία ανέμου, κυματισμών, παλίρροιας) κυριαρχούν στην καταπόνηση της κατασκευής και η επίδραση τους στον πάσσαλο είναι συνήθως κρίσιμη για το σχεδιασμό του. Όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 5.4, ως συνέπεια των κυρίαρχων πλευρικών φορτίσεων ο πάσσαλος περιστρέφεται περί την κατακόρυφο και μετατοπίζεται πλευρικά, ενεργοποιώντας τόσο την αντοχή του παρακείμενου εδάφους όσο και την αντοχή του ως φέροντος στοιχείου. Υπόκεινται επομένως σε σύγχρονη κάμψη και διάτμηση. Ο έλεγχος λοιπόν της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου σε πλευρική φόρτιση θα πρέπει να περιλαμβάνει:

- Έλεγχο της φέρουσας ικανότητας του παρακείμενου εδάφους
- Έλεγχο της αντοχής του πασσάλου ως φέροντος στοιχείου

- Έλεγχο των αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων και στροφών του πασσάλου στις καταστάσεις λειτουργικότητας και αστοχίας

Η συμπεριφορά των πασσάλων σε οριζόντιες φορτίσεις εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν ταυτόχρονα και τον μηχανισμό αστοχίας τους. Τέτοιοι παράγοντες είναι η δυσκαμψία των πασσάλων σε σχέση με τη δυσκαμψία του εδάφους θεμελίωσης (ένα μέτρο σχετικής δυσκαμψίας είναι ο λόγος L/D), η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων και η αντοχή του εδάφους καθώς και μετακινησιακό καθεστώς της κορυφής του πασσάλου (ελεύθερη ή δεσμευμένη). Με βάση τα παραπάνω, οι πάσσαλοι διακρίνονται σε άκαμπτους (κοντούς) και εύκαμπτους (μακροί). Η πρώτη κατηγορία πασσάλων όταν καταπονείται σε οριζόντια φόρτιση, περιστρέφεται γύρω από ένα σημείο περιστροφής εντός του εδάφους και η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητάς τους περιορίζεται πρωτίστως από την αντοχή του παρακείμενου εδάφους. Από την άλλη, η φέρουσα ικανότητα ενός συστήματος μακρού (εύκαμπτου) πάσσαλου – εδάφους συνδέεται κυρίως με την κάμψη του πασσάλου λόγω καμπτικών ροών προερχόμενων από της οριζόντιες φορτίσεις [5.3].

Η αντίδραση του εδάφους στην παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου, λόγω οριζόντιων φορτίσεων, μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους οι κυριότεροι των οποίων είναι:

Δείκτης εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση, k_h

- Το μέτρο ελαστικότητας Young
- Καμπύλες πιέσεων – υποχωρήσεων $p-y$

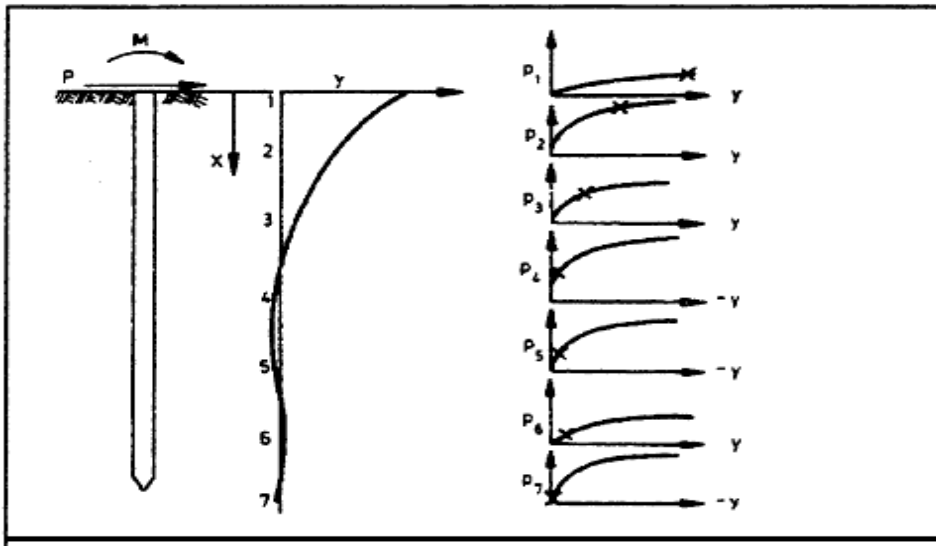
Σύμφωνα με τα κατευθυντήρια πλαίσια DNV CLASSIFICATION NOTES NO.30.4 και ISO-19902 [5.6], η ανάλυση πλευρικά φορτισμένων πασσάλων γίνεται συνήθως με την μέθοδο $p-y$, η οποία αναπτύχθηκε από τον Αμερικάνικο Οργανισμό Πετρελαίου (API). Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο προσδιορίζονται καμπύλες φορτίου-μετακινήσεων ($p-y$), οι οποίες προσομοιώνουν την αναπτυσσόμενη αντίδραση του παρακείμενου εδάφους για κάθε στάθμη πλευρικής μετακίνησης του πασσάλου. Οι καμπύλες αυτές υπολογίζονται με μη-γραμμικές σχέσεις και εξαρτώνται από το βάθος. Για την προσομοίωση, ο πάσσαλος χωρίζεται σε τμήματα κατά μήκος του, το καθένα από τα οποία συνδέεται με ένα μη-γραμμικό ελατήριο ανά διεύθυνση. Για καθένα από τα ελατήρια κατασκευάζεται μια καμπύλη $p-y$ από την οποία προκύπτει η αντίδραση (p) του εδάφους σε κάθε στάθμη, που προέρχεται από την αντίστοιχη μετατόπιση (y) του πασσάλου για την ίδια στάθμη. Το σύνολο των τετμημένων των καμπυλών $p-y$ σε κάθε στάθμη, δίνει την μορφή της συνολικής μετατόπισης του πασσάλου κατά μήκος του (Σχήμα 5.7).

Οι μετατοπίσεις και οι τάσεις του πασσάλου σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος του και για οποιαδήποτε φόρτιση στην κεφαλή του, προκύπτουν από την επίλυση των παρακάτω διαφορικών εξισώσεων [5-10]:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^2} + Q_A \frac{d^2 y}{dx^2} - p(y) + q = 0$$

$$EI \frac{d^3 y}{dx^3} + Q_A \frac{dy}{dx} = Q_L \text{ και } EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M$$
(5-10)

όπου x είναι η θέση κατά μήκος του πασσάλου, y η πλευρική μετατόπιση του πασσάλου, Q_A η αξονική δύναμη του πασσάλου, Q_L η τέμνουσα δύναμη του πασσάλου, $p(y)$ η αντίδραση του εδάφους, q καταναμημένο φορτίο κατά μήκος του πασσάλου και M η καμπτική ροπή του πασσάλου, όλα συναρτήσεσι του x .



Σχήμα 5.7: Ανάλυση πασσάλου με καμπύλες p-y. α) εντατική κατάσταση, β) παραμόρφωση πασσάλου και γ) καμπύλες p-y [5.5].

Ο προσδιορισμός των καμπυλών πιέσεων-υποχωρήσεων (p-y) και κατά συνέπεια η δυσκαμψία των μη-γραμμικών ελατηρίων, εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- τον τύπο του εδάφους
- την διατμητική αντοχή του εδάφους
- την παραμορφωσιμότητα του εδάφους
- το είδος της φόρτισης του πασσάλου
- τη διάμετρο του πασσάλου
- το βάθος των ελατηρίων

5.6.1 Συνεκτικά εδάφη - Αντοχή σε οριζόντια φόρτιση

Για την κατασκευή καμπυλών p-y σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη, ο DNV-OS-J101 προτείνει την παρακάτω μεθοδολογία [5.7]:

Για στατική φόρτιση, οι καμπύλες p-y υπολογίζονται από τη σχέση:

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c} \right)^{1/3} & , y \leq 8y_c \\ p_u & , y > 8y_c \end{cases} \quad (5-11)$$

Για ανακυκλιζόμενη φόρτιση και $X > X_R$, οι καμπύλες p-y υπολογίζονται από τη σχέση :

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c} \right)^{1/3} & , y \leq 3y_c \\ 0.72p_u & , y > 3y_c \end{cases} \quad (5-12)$$

Για ανακυκλιζόμενη φόρτιση και $X \leq X_R$, οι καμπύλες p-y υπολογίζονται από τη σχέση :

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c} \right)^{1/3} & , y \leq 3y_c \\ 0.72p_u \left(1 - \left(1 - \frac{X}{X_R} \right) \frac{y-3y_c}{12y_c} \right) & , 3y_c < y \leq 15y_c \\ 0.72p_u \frac{X}{X_R} & , y > 15y_c \end{cases} \quad (5-13)$$

όπου:

p είναι πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους που ασκείται στον πάσσαλο

y είναι η πλευρική μετατόπιση του πασσάλου

p_u είναι το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου

X είναι το βάθος κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας

X_R είναι το βάθος κάτω από το οποίο η τιμή της παράστασης $[(3c_u + \gamma'X)D + Jc_uD]$ υπερβαίνει την τιμή $9c_uD$

y_c ισούται με $y_c = 2.5\varepsilon_c D$

ε_c είναι η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο 50% της τάσης αστοχίας η οποία καθορίζεται από δοκιμή τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Η οριακή πλευρική αντοχή του εδάφους (p_u) διαφέρει ανάλογα με την απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους. Έτσι η μέγιστη πλευρική αντοχή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p_u = \begin{cases} (3c_u + \gamma'X)D + Jc_uX & , 0 < X \leq X_R \\ 9c_uD & , X > X_R \end{cases} \quad (5-14)$$

όπου:

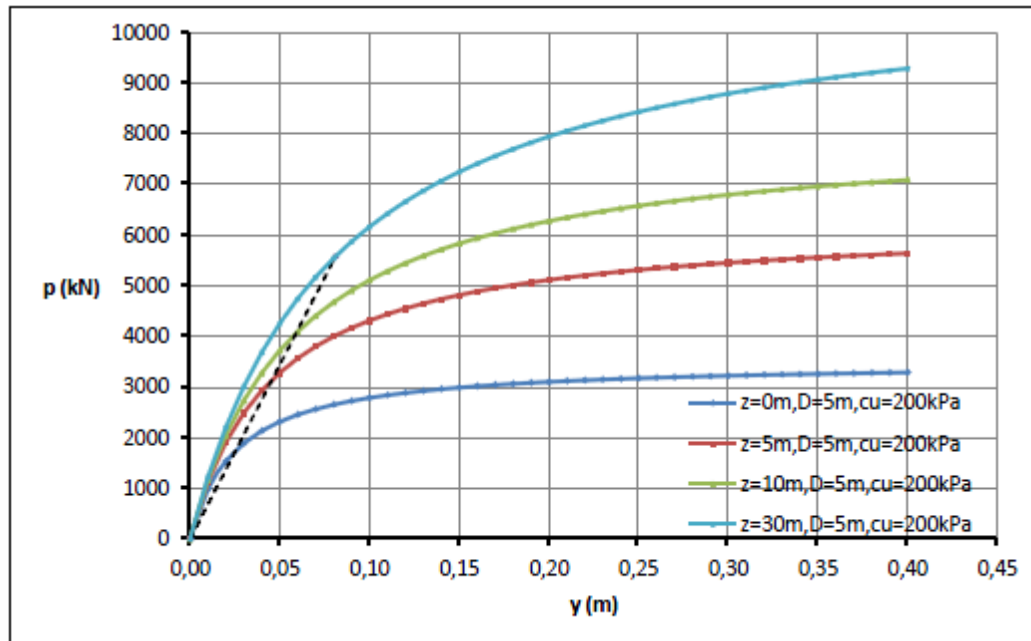
D είναι η διάμετρος του πασσάλου

c_u είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους

γ' είναι το ενεργό βάρος του εδάφους

J είναι αδιάστατη σταθερά που κυμαίνεται μεταξύ 0.25 και 0.5. Για μαλακά κανονικά στερεοποιημένα εδάφη προτείνεται να παίρνει την τιμή 0.5.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.8) φαίνονται καμπύλες p - y για πάσσαλο διαμέτρου $D = 5m$, θεμελιωμένου σε αργιλικό έδαφος σε διάφορα βάθη. Η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού φορτίου p_u αντιπροσωπεύει την δυσκαμψία των εδαφικών ελατηρίων. Από το σχήμα είναι εμφανές ότι η δυσκαμψία των μη-γραμμικών ελατηρίων αυξάνει με το βάθος.



Σχήμα 5.8: Καμπύλες πιέσεων-υποχωρήσεων p - γ για διάφορα βάθη.

5.6.2 Μη συνεκτικά εδάφη - Αντοχή σε οριζόντια φόρτιση

Για πασσάλους θεμελιωμένους σε μη-συνεκτικά εδάφη (αμμώδη), η σχέση μεταξύ της πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και της αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλες p - γ), δίνεται από την παρακάτω υπερβολική εξίσωση [5.7]:

$$p = A p_u \tanh\left(\frac{kX}{A p_u} \gamma\right) \quad (5-15)$$

όπου:

p είναι πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους που ασκείται στον πάσσαλο

γ είναι η πλευρική μετατόπιση του πασσάλου

k είναι η σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση

p_u είναι το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου

X είναι το βάθος κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας

A είναι αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τις συνθήκες φόρτισης και δίνεται από τη σχέση:

$$A = \begin{cases} 0.9 & , \text{ για ανακυκλιζόμενη φόρτιση} \\ \left(3 - 0.8 \frac{X}{D}\right) \geq 0.9 & , \text{ για στατική φόρτιση} \end{cases} \quad (5-16)$$

Η μέγιστη πλευρική αντοχή της άμμου (p_u) ανά μέτρο μήκους πασσάλου εξαρτάται από το βάθος κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Για ένα συγκεκριμένο βάθος η μέγιστη πλευρική φέρουσα ικανότητα ορίζεται από της παρακάτω εξίσωση [5.7]:

$$p_u = \begin{cases} (C_1X + C_2D)\gamma'X & , 0 < X \leq X_R \\ C_3D\gamma'X & , X > X_R \end{cases} \quad (5-17)$$

όπου:

p_u είναι το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου

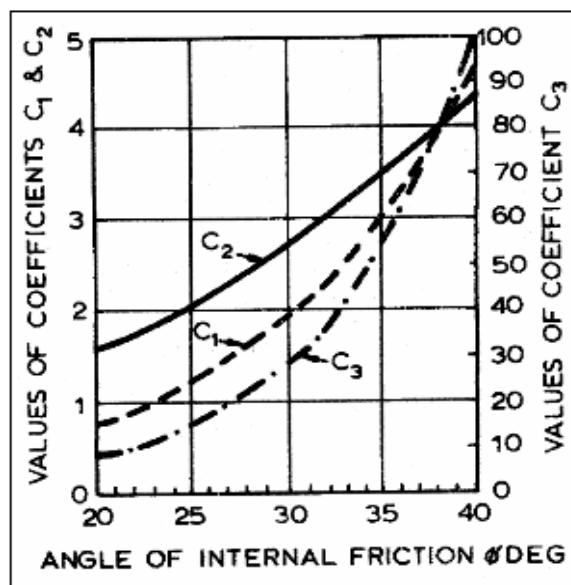
X είναι το βάθος κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας

D είναι η διάμετρος του πασσάλου

X_R είναι το βάθος κάτω από το οποίο η τιμή της παράστασης $(C_1X + C_2D)\gamma'X$ υπερβαίνει την τιμή $C_3D\gamma'X$

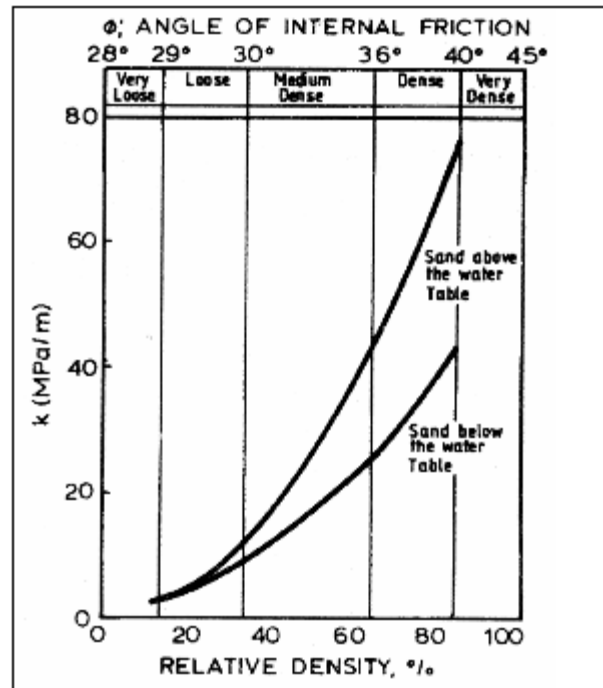
C_1, C_2, C_3 είναι συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται από την γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους

Οι συντελεστές C_1, C_2, C_3 οι οποίοι εξαρτώνται από την γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους ϕ° , προκύπτουν από το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.9).



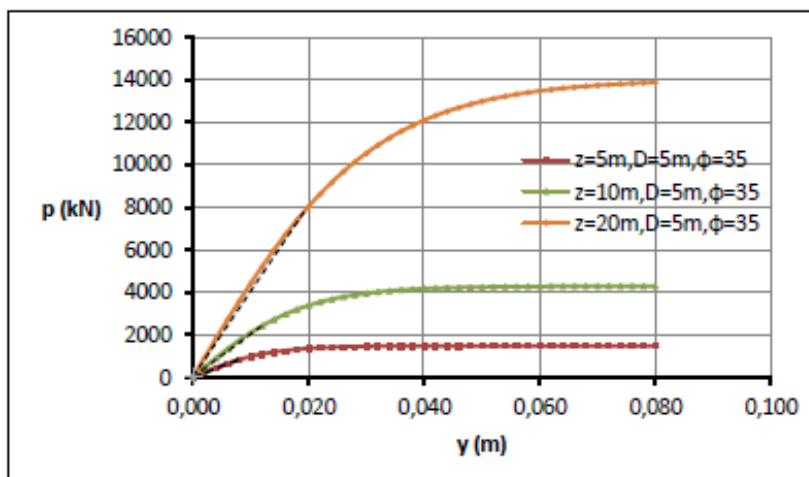
Σχήμα 5.9: Συντελεστές C_1, C_2, C_3 συναρτήσει της εσωτερικής γωνίας τριβής ϕ° [5.7].

Η σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση (k) εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα του εδάφους και λαμβάνεται από το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.10):



Σχήμα 5.10: Σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας του εδάφους [5.10].

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.11) φαίνονται καμπύλες πίεσης-υποχώρησης p - γ για πάσσαλο διαμέτρου $D = 5\text{ m}$, θεμελιωμένου σε αμμώδες έδαφος σε διάφορα βάθη. Όπως αναφέρθηκε προηγούμενος, η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού φορτίου p_u αντιπροσωπεύει την δυσκαμψία των εδαφικών ελατηρίων. Από το σχήμα είναι εμφανές ότι η δυσκαμψία των μη-γραμμικών ελατηρίων σε μη-συνεκτικά εδάφη αυξάνει με το βάθος.



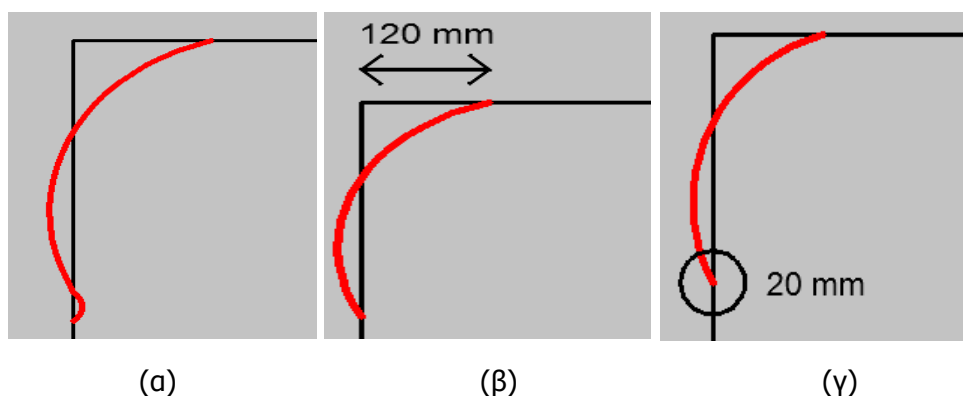
Σχήμα 5.11: Καμπύλες πιέσεων-υποχωρήσεων p - γ για διάφορα βάθη.

5.7 Κριτήρια σχεδιασμού πασσάλου

Μέσα από την πολύχρονη διεθνή εμπειρία στην μελέτη και το σχεδιασμό πασσάλων υπεράκτιων ανεμογεννητριών, έχουν διατυπωθεί τρία εμπειρικά κριτήρια για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών (διάμετρος και μήκος έμπηξης), ώστε να εξασφαλισθούν η επαρκής πλευρική αντοχή του συστήματος πασσάλου-εδάφους καθώς επίσης και η μη υπέρβαση

των ανώτερων επιτρεπτών παραμορφώσεων του πασσάλου σε καταστάσεις λειτουργικότητας []. Τα κριτήρια διατυπώνονται ως εξής:

- Κριτήριο κατακόρυφης εφραπτομένης του παραμορφωμένου πασσάλου ή κριτήριο μηδενικής παραμόρφωσης της αιχμής του (zero-toe-kick criterion), Σχήμα 5.12 (α).
- Η πλευρική παραμόρφωση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα να μην υπερβαίνει τα 120 mm, Σχήμα 5.12 (β).
- Η πλευρική παραμόρφωση της αιχμής του πασσάλου να μην υπερβαίνει τα 20 mm, Σχήμα 5.12 (γ).



Σχήμα 5.12: Εμπειρικά κριτήρια σχεδιασμού πασσάλου θαλάσσιας ανεμογεννήτριας

Τα όρια που τίθενται για τις πλευρικές παραμορφώσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα και της αιχμής του είναι προσεγγιστικά και καθορίζονται κατά περίπτωση ανάλογα με τις απαιτήσεις που θέτει ο κατασκευαστής της ανεμογεννήτριας, για την εύρυθμη λειτουργία της σε καταστάσεις λειτουργικότητας. Παρ' όλα αυτά, η διεθνής εμπειρία από υφιστάμενους πασσάλους υπεράκτιων ανεμογεννητριών, δείχνει ότι τα όρια που διατυπώθηκαν παραπάνω θεωρούνται ασφαλή για τις παραμορφώσεις στην Ο.Κ.Α [5.9].

Το κριτήριο κατακόρυφης εφραπτομένης, όπως τίθεται στον κανονισμό g1, απαιτεί ο πάσσαλος να έχει τουλάχιστον δύο σημεία μηδενισμού των πλευρικών παραμορφώσεων του, κατά μήκος του. Όταν επιτυγχάνεται το παραπάνω κριτήριο, εξασφαλίζεται ότι η αιχμή του πασσάλου έχει εξαιρετικά μικρή παραμόρφωση.

Επίσης το παραπάνω κριτήριο, εξασφαλίζει ότι ο πάσσαλος συμπεριφέρεται ως εύκαμπτος, γεγονός που σημαίνει ότι ο περιορισμός των πλευρικών μετατοπίσεων της αιχμής του θα σημάνει περιορισμό των συνολικών παραμορφώσεων του και ιδιαίτερα στη στάθμη του πυθμένα.

5.8 Βιβλιογραφικές αναφορές εφαρμογής της μεθόδου "p-y" για πασσάλους μεγάλης διαμέτρου

Στις προηγούμενες παραγράφους αναπτύχθηκε η απλουστευτική μέθοδος (καμπύλες πιέσεων-υποχωρήσεων "p-y") εκτίμησης της πλευρικής φέρουσας ικανότητας πασσάλων θαλάσσιων ανεμογεννητριών, όπως προτείνεται από τους διάφορους κανονισμούς. Η εν λόγω μέθοδος αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε με επιτυχία τις προηγούμενες δεκαετίες για το σχεδιασμό της θεμελίωσης θαλάσσιων πλατφόρμων εξόρυξης πετρελαίου και στη συνέχεια υιοθετήθηκε και για το σχεδιασμό της θεμελίωσης θαλάσσιων ανεμογεννητριών. Παρά την ευρεία εφαρμογή της μεθόδου στο σχεδιασμό υπεράκτιων ανεμογεννητριών, εκφράζονται σημαντικές ενστάσεις στη διεθνή βιβλιογραφία για την καταλληλότητα της μεθόδου στο συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής.

Πιο συγκεκριμένα, οι εξισώσεις πιέσεων-υποχωρήσεων της μεθόδου αναπτύχθηκαν βασισμένες κατά κύριο λόγο στο ερευνητικό έργο των Reese και Cox (Reese et al. 1974). Οι συγκεκριμένοι

ερευνητές έκαναν πειράματα με εύκαμπτους χαλύβδινους πασσάλους μήκους 21m και διαμέτρου 0.61m σε διάφορες εντατικές καταστάσεις, βάσει των οποίων πρόεκυψαν οι εξισώσεις της μεθόδου οι οποίες επαληθεύτηκαν για πασσάλους διαμέτρου έως 2m. Όμως η εφαρμογή της μεθόδου σε πασσάλους υπεράκτιων ανεμογεννητριών οι οποίες έχουν μεγαλύτερες διαμέτρους, οδηγεί σε υπερεκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους [5.8] και κυρίως υπερεκτίμηση της εδαφικής δυσκαμψίας σε μεγάλα βάθη [5.1]. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος υποεκτιμά της αναπτυσσόμενες πλευρικές παραμορφώσεις του πασσάλου.

Επίσης, οι πάσσαλοι θαλάσσιων ανεμογεννητριών έχουν λόγο μήκους (L) προς διάμετρο (D) (L/D) σχετικά μικρό γεγονός που υποδεικνύει ότι είναι άκαμπτοι, με διαφορετικό μηχανισμό αστοχίας από ότι οι εύκαμπτοι, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της μεθόδου p-y [5.1].

Ένα επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό των πασσάλων θαλάσσιων ανεμογεννητριών, είναι η ανακυκλιζόμενη φύση των φορτίων που τον καταπονούν κατά τη διάρκεια της ζωής του, τα οποία μπορούν να έχουν εκατομμύρια κύκλους φόρτισης. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης δεν λαμβάνεται υπόψη στη μέθοδο p-y, γεγονός που την καθιστά ακατάλληλη για τον υπολογισμό των αναμενόμενων μόνιμων παραμορφώσεων του συστήματος πασσάλου-εδάφους. Παρ' όλα αυτά, στην μέθοδο προτείνεται ο συντελεστής A να παίρνει την τιμή 0.9 για ανακυκλιζόμενη φόρτιση, η οποία πρόεκυψε από πειραματικά δεδομένα και είναι επαρκής για περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης (μέχρι 200 κύκλοι) [5.8,5.9].

Βιβλιογραφία

- [5.1] Delft University, Leon Bekken, «Lateral behavior of large diameter offshore monopole foundations for wind turbines, Thesis report»
- [5.2] Μ. Καββαδάς, «Θεμελιώσεις με πασσάλους»
- [5.3] Α. Αναγνωστόπουλος, Β. Παπαδόπουλος, «Θεμελιώσεις με πασσάλους»
- [5.4] Κ. Γεωργιάδης, Μ. Γεωργιάδης, «Στοιχεία εδαφομηχανικής» , σελ.404
- [5.5] CLASSIFICATION NOTES NO.30.4, DNV , Foundations, February 1991
- [5.6] INTERNATIONAL STANDARD, ISO 19902, Petroleum and natural gas industries – Fixed steel offshore structures, December 2007
- [5.7] OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-J101 , Design of Offshore Wind Turbine Structures, January 2013, σελ.190
- [5.8] Μ. Achmus, K. Abdel-Rahman, Yu-Shu Kuo, "Design of monopole foundations for offshore wind energy converters", Paper
- [5.9] Wystan Carswell, Sanjay Raja Arwade, Don J. DeGroot, Matthew A. Lackner, "Soil–structure reliability of offshore wind turbine monopile foundations"

6 Εφαρμογή

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε καταγραφή των βασικών κανονιστικών κατευθύνσεων και της διεθνούς πρακτικής και εμπειρίας στο σχεδιασμό των κατασκευαστικών μέρων υπεράκτιων ανεμογεννητριών θεμελιωμένων σε μονοπάσσαλο σύστημα. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η προκαταρκτική μελέτη μιας συγκεκριμένης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας (case study), βασισμένη στο θεωρητικό υπόβαθρο και τις αρχές που αναφέρονται στα προηγούμενα.

6.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετάται ανεμογεννήτρια τύπου NREL 5-MW baseline wind turbine, η οποία αναπτύχθηκε από το εργαστήριο NREL. Το εργαστήριο Natural Renewable Energy Laboratory (NREL) αποτελεί μέρος του υπουργείου ενέργειας των Η.Π.Α και δραστηριοποιείται πάνω από 37 χρόνια με την μελέτη και την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας απεικονίζονται παρακάτω (Πίνακας 6-1):

Πίνακας 6-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας τύπου NREL 5-MW.

Rating	5 MW
Rotor orientation, configuration	Upwind, 3 blades
Control	Variable speed, collective pitch
Drivetrain	High speed, multiple-stage gearbox
Rotor, hub diameter	126 m, 3 m
Hub height	90 m
Cut-in, rated, cut-out wind speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-in, rated rotor speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
Rated tip speed	80 m/s
Overhang, shaft tilt, precone	5 m, 5°, 2.5°
Rotor mass	110,000 kg
Nacelle mass	240,000 kg
Tower mass	347,500 kg
Coordinate location of overall center of mass (CM)	(-0.2 m, 0.0 m, 64.0 m)

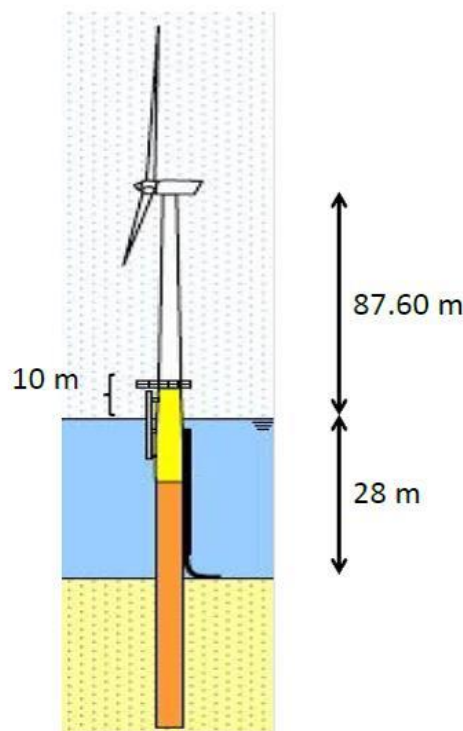
Ο πύργος της ανεμογεννήτριας έχει κουλουροκωνική μορφή και αποτελείται από χαλύβδινες κοίλες κυκλικές διατομές, με αρχική διάμετρο στη βάση του 6 m και πάχος τοιχώματος 0.027 m

και τελική διάμετρο 3.87 m και πάχος 0.019 m αντίστοιχα. Η διάμετρος και το πάχος του πύργου μειώνονται γραμμικά από τη βάση καθ' ύψος. Επίσης για κατασκευαστικούς λόγους, ο πύργος θεωρείται ότι αποτελείται από τμήματα μήκους 3 m σταθερού πάχους, έκαστου. Τα τελευταία τμήμα λαμβάνεται ως κύλινδρος σταθερής διαμέτρου και σταθερού πάχους, 3.87 m και 0.019 m αντίστοιχα. Ο πύργος έχει συνολικό μήκος 77.6 m και ενώνεται με τον φορέα στήριξης 10 m πάνω από την μέση στάθμη της θάλασσας (Μ.Σ.Θ). Ο φορέας στήριξης έχει κυλινδρική μορφή με κοίλη κυκλική διατομή διαμέτρου 6 m και πάχος 0.06 m και το μήκος του ορίζεται από τον πυθμένα της θάλασσας έως την αρχή του πύργου. Τα ίδια χαρακτηριστικά έχει και ο πάσσαλος, ο οποίος θεωρείται συνέχεια του μέσα στο έδαφος, του οποίου το μήκος καθορίζεται από την ανάλυση που έπεται στη συνέχεια. Τέλος στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η Μ.Σ.Θ θεωρείται 28 m από τον πυθμένα της θάλασσας.

Στον Πίνακα 6-2 απεικονίζονται οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα που θεωρήθηκαν για την ανάλυση, ενώ στον Πίνακα 6-3 φαίνονται οι γεωμετρικές και οι μηχανικές ιδιότητες για κάθε τμήμα του πύργου.

Πίνακας 6-2: Χαρακτηριστικά χάλυβα.

E	Pa	210×10^9	Μέτρο Ελαστικότητας χάλυβα
G	Pa	80.8×10^9	Μέτρο Διάτμησης χάλυβα
ρ	Kg/m ³	8500	Ειδική πυκνότητα χάλυβα



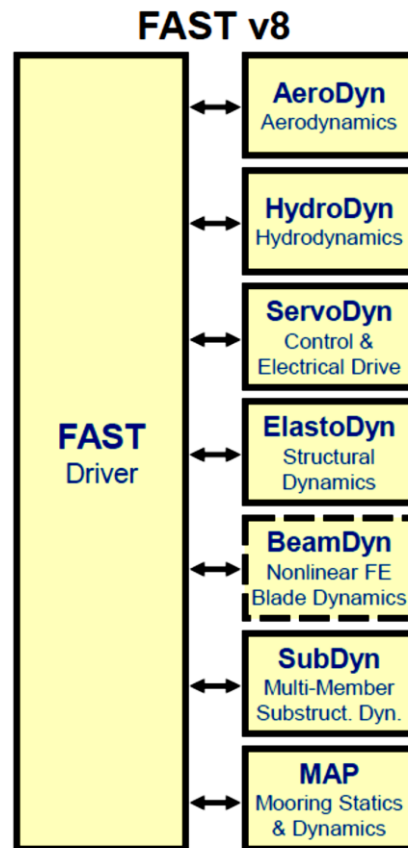
Πίνακας 6-3: Χαρακτηριστικά πύργου.

Τμήμα	Ύψος από τον πυθμένα	L (m)	D _{αρχής} (m)	D _{τέλους} (m)	t _{αρχής} (m)	t _{τέλους} (m)	EI (Nm ²)
1	38	3	6.00	5.91	0.027	0.027	4.58E+11
2	41	3	5.91	5.83	0.027	0.027	4.36E+11
3	44	3	5.83	5.74	0.026	0.026	4.07E+11
4	47	3	5.74	5.66	0.026	0.026	3.85E+11
5	50	3	5.66	5.57	0.026	0.026	3.67E+11
6	53	3	5.57	5.49	0.025	0.025	3.42E+11
7	56	3	5.49	5.40	0.025	0.025	3.22E+11
8	59	3	5.40	5.31	0.025	0.025	3.07E+11
9	62	3	5.31	5.23	0.024	0.024	2.85E+11
10	65	3	5.23	5.14	0.024	0.024	2.68E+11
11	68	3	5.14	5.06	0.024	0.024	2.54E+11
12	71	3	5.06	4.97	0.023	0.023	2.36E+11
13	74	3	4.97	4.89	0.023	0.023	2.21E+11
14	77	3	4.89	4.80	0.023	0.023	2.09E+11
15	80	3	4.80	4.72	0.022	0.022	1.93E+11
16	83	3	4.72	4.63	0.022	0.022	1.80E+11
17	86	3	4.63	4.54	0.022	0.022	1.68E+11
18	89	3	4.54	4.46	0.022	0.022	1.59E+11
19	92	3	4.46	4.37	0.021	0.021	1.45E+11
20	95	3	4.37	4.29	0.021	0.021	1.35E+11
21	98	3	4.29	4.20	0.021	0.021	1.27E+11
22	101	3	4.20	4.12	0.020	0.020	1.16E+11
23	104	3	4.12	4.03	0.020	0.020	1.07E+11
24	107	3	4.03	3.94	0.020	0.020	1.00E+11
25	110	2.6	3.94	3.87	0.019	0.019	9.14E+10
26	112.6	3	3.87	3.87	0.019	0.019	8.82E+10
27	115.6	3	3.87	3.87	0.019	0.019	8.82E+10

6.2 Προσομοίωση ανεμογεννήτριας

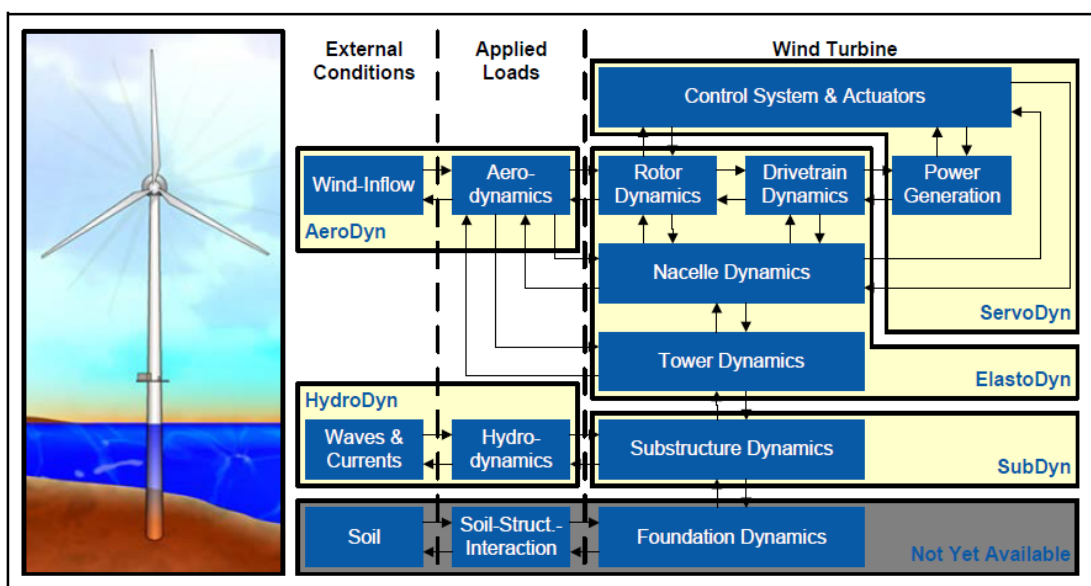
Για την προσομοίωση της απόκρισης των ανεμογεννητριών έχουν δημιουργηθεί από πολλές εταιρίες εξειδικευμένα λογισμικά. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τα εξελιγμένα μοντέλα προσομοίωσης ανεμογεννητριών που προτείνονται από το εργαστήριο Natural Renewable Energy Laboratory (NREL) και το κέντρο Natural Wind Technology Center (NTWC) των ΗΠΑ, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Το λογισμικό FAST [6.1] προσομοιώνει πλήρως την συζευγμένη αέρο- υδρο ελαστική απόκριση μιας θαλάσσιας ανεμογεννήτριας εκτελώντας επιμέρους κωδικές (AeroDyn, HydroDyn, κτλ.) οι οποίοι ανταλλάσσουν δεδομένα εισόδου – εξόδου ώστε το FAST να εξάγει ένα τελικό αρχείο εξόδου με αποτελέσματα για τα φορτία ανέμου, τα φορτία κυμάτων, εντατικά μεγέθη για τα δομικά μέλη, αντιδράσεις, μετακινήσεις και πολλά άλλα.

Για την τελευταία έκδοση του FAST v.8.03.02b-bjj, η δομή του, με όλους τους επιμέρους κώδικες που χρησιμοποιεί φαίνεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Η δομή του FAST.

Το κάθε ένα από τα επιμέρους προγράμματα AeroDyn, HydroDyn, ServoDyn, ElastoDyn, SubDyn, MAP ελέγχει μια διαφορετική πτυχή της συμπεριφοράς μιας θαλάσσιας ανεμογεννήτριας όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Θεμελιωμένη ανεμογεννήτρια.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι αναλύσεις πραγματοποιηθήκαν θεωρώντας ότι η θαλάσσια ανεμογεννήτρια αποτελείται απλουστευτικά από τα εξής μέρη:

- από την άτρακτο η οποία περιλαμβάνει το σύνολο του μηχανολογικού εξοπλισμού
- τα πτερύγια
- τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας (πύργος)
- τον φορέα στήριξης
- τον πάσσαλο

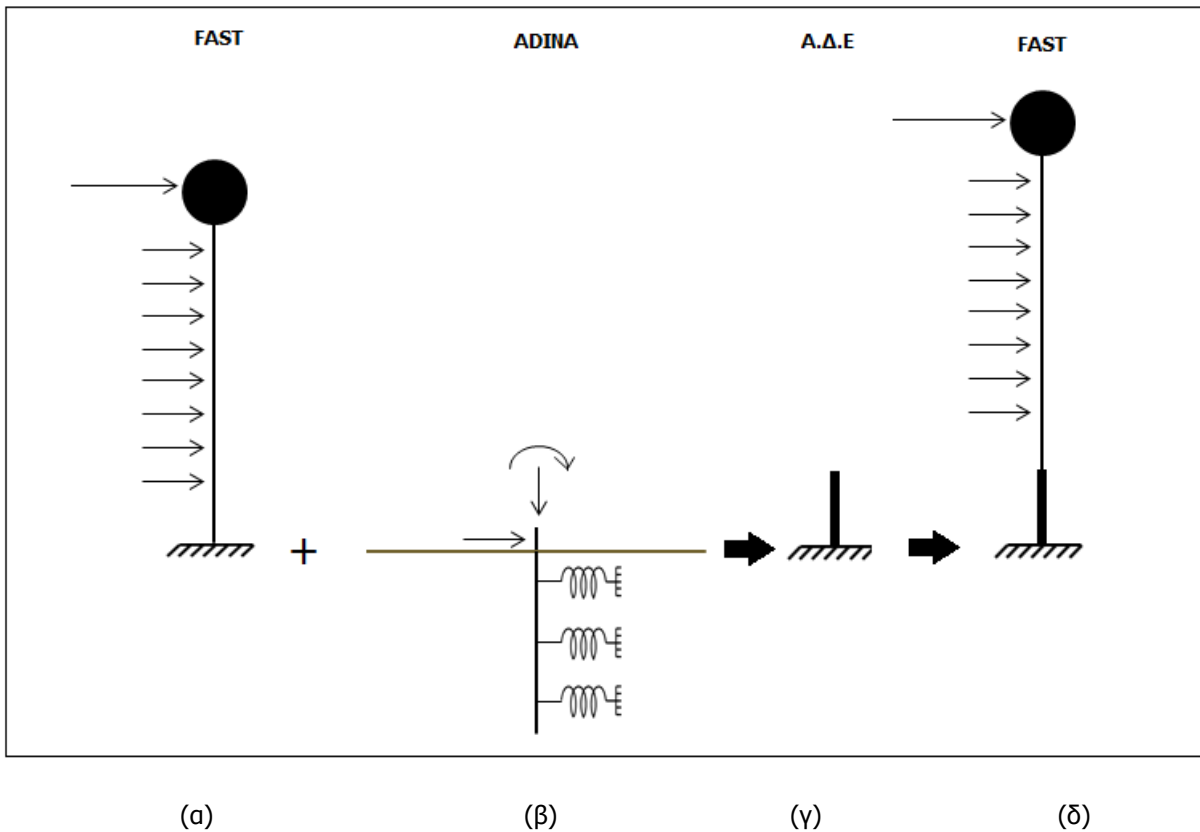
Ο φορέας στήριξης είναι το τμήμα που ενώνει τον πύργο με τον πάσσαλο και έχει την ίδια διάμετρο και το ίδιο πάχος με τον πάσσαλο. Δε λαμβάνονται υπόψη η ύπαρξη τμήματος μετάβασης όπως επίσης και η συμπεριφορά των συνδέσεων μεταξύ των μελών.

Στο λογισμικό FAST είναι εφικτή η πλήρης προσομοίωση της ανεμογεννήτριας (ύψος ρότορα, μήκος, γεωμετρία και αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων, σύστημα ελέγχου), του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς και το τμήμα του πασσάλου έως στη στάθμη του πυθμένα της θάλασσας (φορέας στήριξης). Ο πάσσαλος δεν είναι δυνατό να προσομοιωθεί στην παρούσα έκδοση του FAST. Επομένως η ανάλυση και ο σχεδιασμός του εμπηγνύομενου τμήματος του πασσάλου γίνεται με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis).

Εφόσον δεν είναι εφικτή η προσομοίωση του εδάφους και της επίδρασης του στην κατασκευή με το FAST, ακολουθείται διαδικασία υπολογισμού ενός ισοδύναμου τμήματος το οποίο εισάγεται στο FAST και παριστάνει τη συμπεριφορά του τμήματος του πασσάλου που βρίσκεται κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Δηλαδή το εμπηγνύομενο τμήμα του πασσάλου προσομοιώνεται έμμεσα στο FAST, με την βοήθεια μιας διαδικασίας με συγκεκριμένη αλληλουχία βημάτων που περιγράφεται στη συνέχεια.

Αρχικά πραγματοποιείται ανάλυση στο FAST εισάγοντας στα υποπρογράμματα τις απαραίτητες παραμέτρους για το τμήματα της κατασκευής που είναι δυνατό να προσομοιωθούν (ανεμογεννήτρια-πύργος-φορέας στήριξης). Από αυτήν εξάγονται οι χρονοϊστορίες των εντατικών μεγεθών του φορέα στήριξης στη στάθμη του πυθμένα της θάλασσας. Τα εν λόγω εντατικά μεγέθη, λόγω συνέχειας του πραγματικού φορέα, μεταβιβάζονται στην κορυφή του πασσάλου. Επομένως η διαστασιολόγηση του πασσάλου και η μελέτη της συμπεριφορά του, γίνεται σύμφωνα με τα όσα διατυπώνονται στο Κεφάλαιο 5 ασκώντας στη κορυφή του πασσάλου τα παραπάνω εντατικά μεγέθη.

Για την δεδομένη εντατική κατάσταση, τα συγκεκριμένα εδαφικά χαρακτηριστικά και γεωμετρία του πασσάλου, από την ανάλυση στο ADINA προκύπτει μια συγκεκριμένη οριζόντια μετατόπιση και στροφή της κεφαλής του πασσάλου. Στη πραγματικότητα ο φορέας είναι ενιαίος, άρα η μετακίνηση και η στροφή του πασσάλου στη στάθμη της κεφαλής του επιβάλλει αντίστοιχη παραμόρφωση στο ανώτερο τμήμα της κατασκευής. Με βάση την παραπάνω διαπίστωση, υπολογίζεται ισοδύναμο πρόβολος καμπτικής δυσκαμψίας $(EI)_{\sigma}$ και μήκους L_{σ} , για τον οποίο ασκώντας στο ελεύθερο άκρο του τα εντατικά μεγέθη που καταπονούν τον πάσσαλο στην κορυφή του, παρουσιάζει μετακίνηση και στροφή ίσες με αυτές του πασσάλου. Το ισοδύναμο τμήμα προστίθεται στο FAST και πραγματοποιούνται αναλύσεις των οποίων τα αποτελέσματα συγκρίνονται στη συνέχεια με τις αρχικές που έγιναν για τον αρχικό φορέα. Ο ισοδύναμος πρόβολος υπολογίζεται με εφαρμογή της Α.Δ.Ε (Αρχή Δυνατών Έργων).



Σχήμα 6.3: Σχηματική παρουσίαση της πορείας ανάλυσης της ανεμογεννήτριας (α) αρχική προσομοίωση πύργου και φορέα στήριξης στο FAST, (β) προσομοίωση πασσάλου στο ADINA, (γ) υπολογισμός ισοδύναμου τμήματος από A.Δ.E, (δ) προσομοίωση στο FAST με την προσθήκη του ισοδύναμου τμήματος.

Η επίδραση του ανέμου στην ανεμογεννήτρια υπολογίζεται και εισάγεται στο FAST με τη βοήθεια του υποπρογράμματος TurbSim. Τα δεδομένα εισόδου του εν λόγω προγράμματος καθορίστηκαν σύμφωνα με τα όσα προβλέπονται στα πρότυπα IEC 61400-1 και IEC 61400-3 και περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξετάζεται ο συνδυασμός φόρτισης 1.1, όπως ορίζεται στον Πίνακα . Δηλαδή γίνεται έλεγχος της ανεμογεννήτριας στην οριακή κατάσταση αστοχίας, σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας της. Για τον εν λόγω συνδυασμό φόρτισης, θεωρούνται επίσης κανονικό μοντέλο τυρβώδους ροής (Normal Turbulence Model) και ταχύτητα πνοής ανέμου στο ύψος του άξονα ίση με την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή ($V_{hub}=V_{out}=25\text{m/s}$).

Οι χρονοσειρές της ταχύτητας του ανέμου παράγονται σύμφωνα με το φάσμα συχνοτήτων τύπου Kaimal, με βήμα (time step) 0.05sec και συνολική διάρκεια 300sec. Επίσης για κανονικές συνθήκες ανέμου, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-3 το κανονικό μοντέλο τυρβώδους ροής προκύπτει από την σύνθεση ενός προφίλ κανονικής ροής ανέμου και ενός μοντέλου τυρβώδους ροής:

$$[NTM] = [NWP] + [TM(\sigma_1)] \quad (6-1)$$

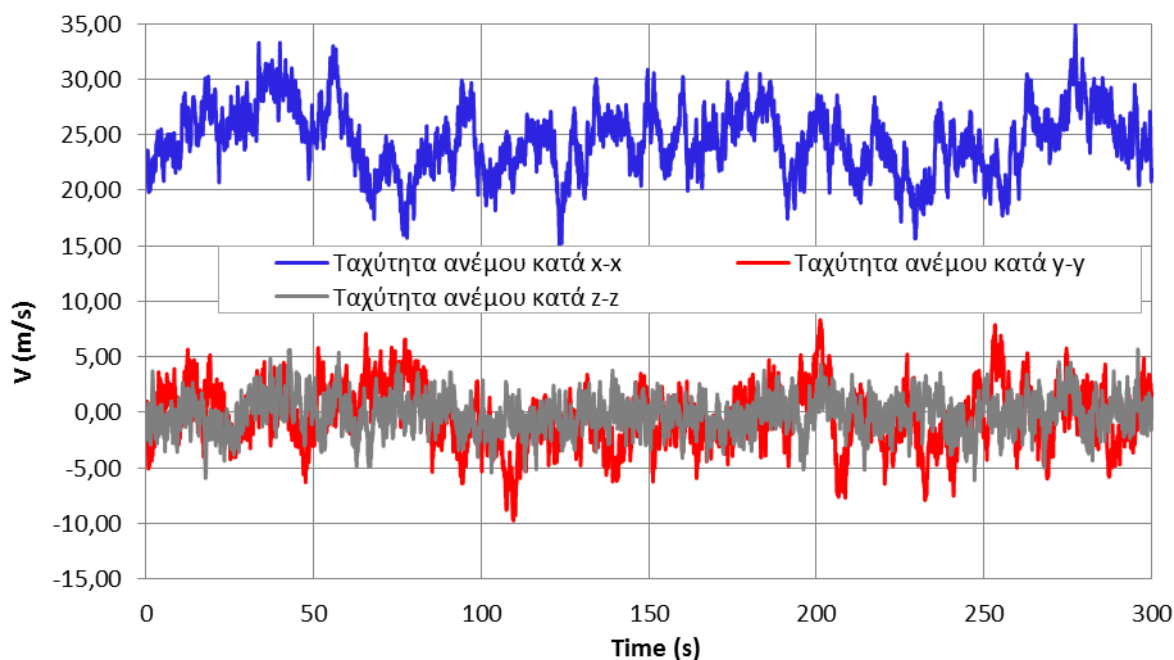
όπου το προφίλ της μέσης ταχύτητας κανονικής ροής ανέμου (Normal Wind Profile – NWP) καθ' ύψος, πάνω από το επίπεδο της θάλασσας δίνεται από τη σχέση:

$$V(z) = V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^a \quad (6-2)$$

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

$$\sigma_1 = I_{ref} (0.75 V_{hub} + b) \quad (6-3)$$

Τέλος επιλέχθηκε ένταση τύρβης τύπου Β, $I_{ref}=0.14$.



Σχήμα 6.4: Χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου.

6.3 Έλεγχοι επάρκειας διατομής και μέλους με την μέθοδο των τάσεων

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται οι έλεγχοι φέρουσας ικανότητας των διατομών και των μελών του πύργου και του πασσάλου της ανεμογεννήτριας σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 1993-1-6 όπως αναπτύχθηκαν στο 1^ο Κεφάλαιο.

6.3.1 Φέρουσα ικανότητα πύργου

Από το αρχείο εξόδου του λογισμικού FAST προκύπτουν οι χρονοϊστορίες των εντατικών μεγεθών των δομικών στοιχείων του πύργου της ανεμογεννήτριας, σε διάφορες θέσεις καθ' ύψος του. Πιο συγκεκριμένα για το τυπικό πεντάλεπτο (300 sec) που προσομοιώθηκε προκύπτουν για κάθε χρονική στιγμή, σε κάθε θέση, μια δύναμη και μια ροπή ανά διεύθυνση (F_x , F_y , F_z και M_x , M_y , M_z αντίστοιχα). Δηλαδή σε κάθε θέση, η εντατική της κατάσταση ορίζεται από τα παραπάνω έξι εντατικά μεγέθη.

Σύμφωνα με τον EN 1993-1-6 ο έλεγχος επάρκειας διατομής και μέλους σε κάθε θέση, πρέπει να γίνεται με τις τάσεις που προκύπτουν από τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης των έξι εντατικών μεγεθών που υπάρχουν ταυτόχρονα στη συγκεκριμένη θέση. Εναλλακτικά, οι έλεγχοι μπορούν να πραγματοποιηθούν λαμβάνοντας τις μέγιστες τιμές καθ' ενός από τα εντατικά μεγέθη ανεξάρτητα από το πότε αυτά εμφανίζονται, παραδοχή σαφώς συντηρητική.

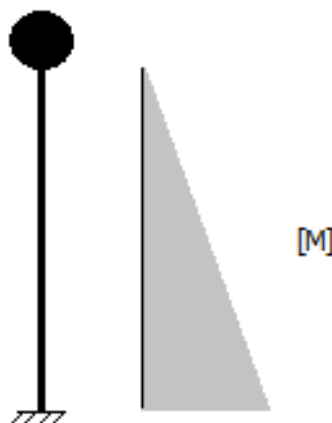
Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, σε κάθε υπό εξέταση σημείο του πύργου θεωρούνται έξι συνδυασμοί φορτίσεων, ένας για κάθε μέγιστο που παρουσιάζει καθένα από τα εντατικά μεγέθη. Στη συνέχεια την χρονική στιγμή που προκύπτει το μέγιστο ενός εντατικού μεγέθους, η τιμή του συνδυάζεται με τις τιμές των υπόλοιπων εντατικών μεγεθών που καταπονούν το σημείο την ίδια χρονική στιγμή. Για παράδειγμα όταν η ροπή M_y παρουσιάζει μέγιστο, καταγράφονται οι τιμές των υπόλοιπων εντατικών μεγεθών (F_x , F_y , F_z , M_x , M_z) κ.ο.κ για τα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη. Για τον δυσμενέστερο από τους έξι παραπάνω συνδυασμούς υπολογίζονται οι τάσεις και εφαρμόζεται η διαδικασία ελέγχου με την μέθοδο των τάσεων.

Για κάθε θέση προκύπτει ένας πίνακας τις παρακάτω μορφής:

Πίνακας 6-4: Θεωρούμενοι συνδυασμοί εντατικών μεγεθών

Συνδυασμός Φορτίσεων						
	M_x(KNm)	M_y(KNm)	M_z(KNm)	F_x(KN)	F_y(KN)	F_z(KN)
max M_x						
max M_y						
max M_z						
max F_x						
max F_y						
max F_z						

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, στην έκδοση του λογισμικού FAST με την οποία έγιναν οι αναλύσεις δεν είναι δυνατή η προσομοίωση του εδάφους θεμελίωσης και κατ' επέκταση του τμήματος του πασσάλου της ανεμογεννήτριας, που εμπηγνύεται στο έδαφος. Επομένως στην προσομοίωση της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας με το FAST, εισάγεται το μήκος του πύργου ο οποίος συνδέεται με το πάσσαλο έως τη στάθμη του πυθμένα της θάλασσας όπου, πακτώνεται, δημιουργώντας ένα στατικό προσομοίωμα προβόλου. Είναι προφανές ότι η θέση της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πύργου είναι στη βάση του, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων του FAST.



Σχήμα 6.5: Στατικό προσομοίωμα και διάγραμμα ροπών φορέα στήριξης ανεμογεννήτριας.

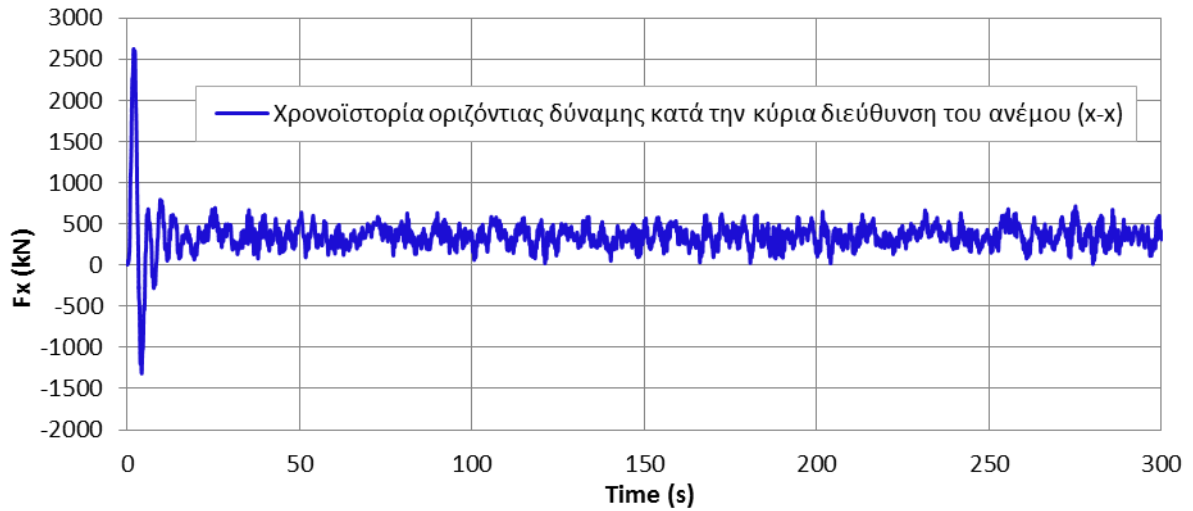
Παρακάτω παρουσιάζονται οι έλεγχοι επάρκειας της διατομής και του μέλους στη θέση αυτή:

Από το FAST προκύπτουν οι παρακάτω χρονοϊστορίες των έξι εντατικών μεγεθών στη βάση του πύργου (Σχήμα 6.6-Σχήμα 6.11), καθώς επίσης και η χρονοϊστορία της οριζόντιας μετακίνησης κατά τον άξονα x-x της κορυφής του πύργου (Σχήμα 6.12), όπου:

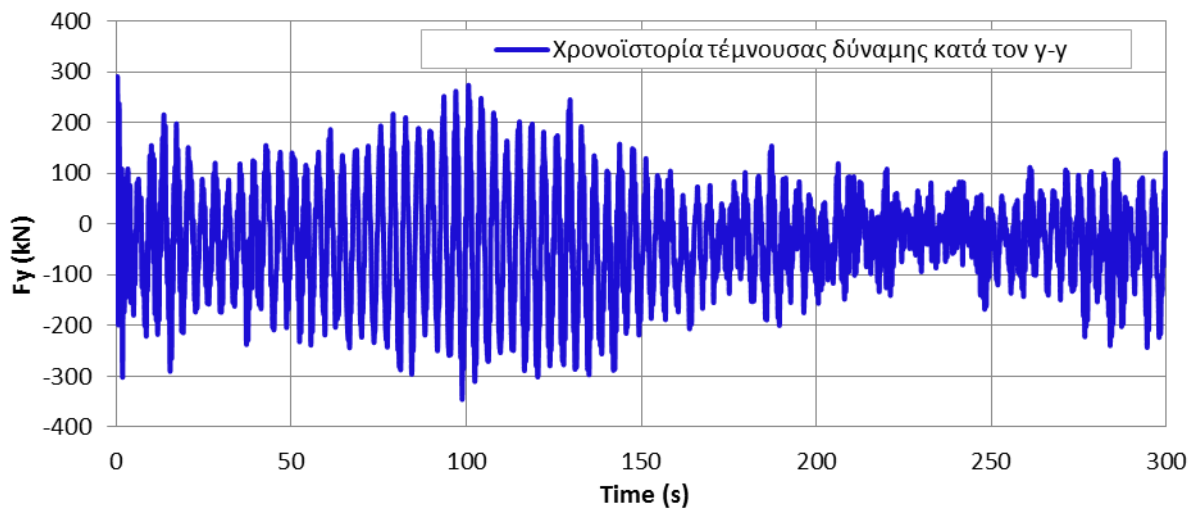
x-x ο άξονας κατά τη κύρια διεύθυνση πνοής του ανέμου.

γ-γ ο άξονας που είναι κάθετος στον x-x στο οριζόντιο επίπεδο.

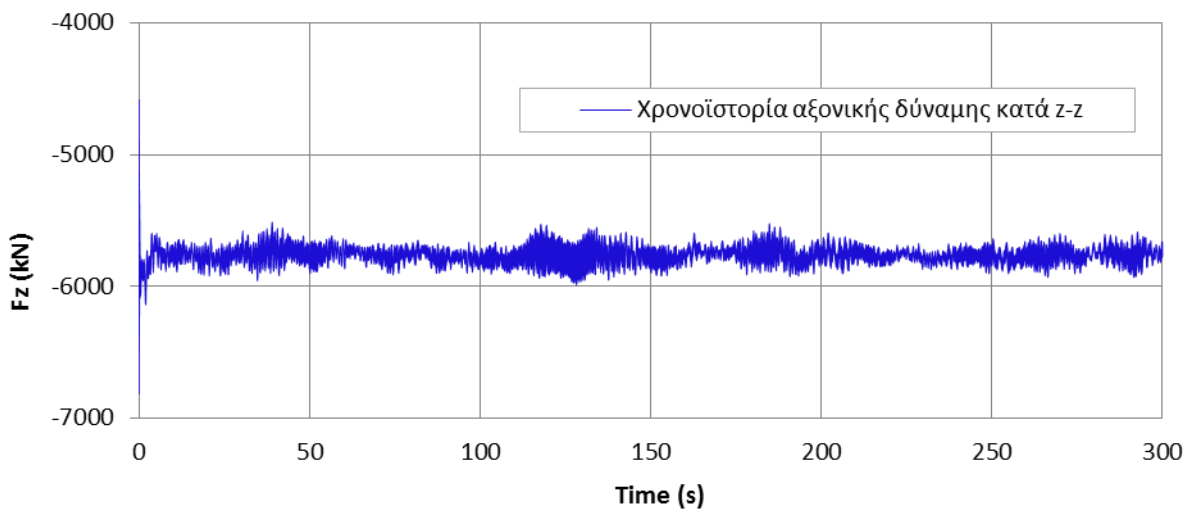
z-z ο άξονας κατά την διεύθυνση του πύργου (κατακόρυφος).



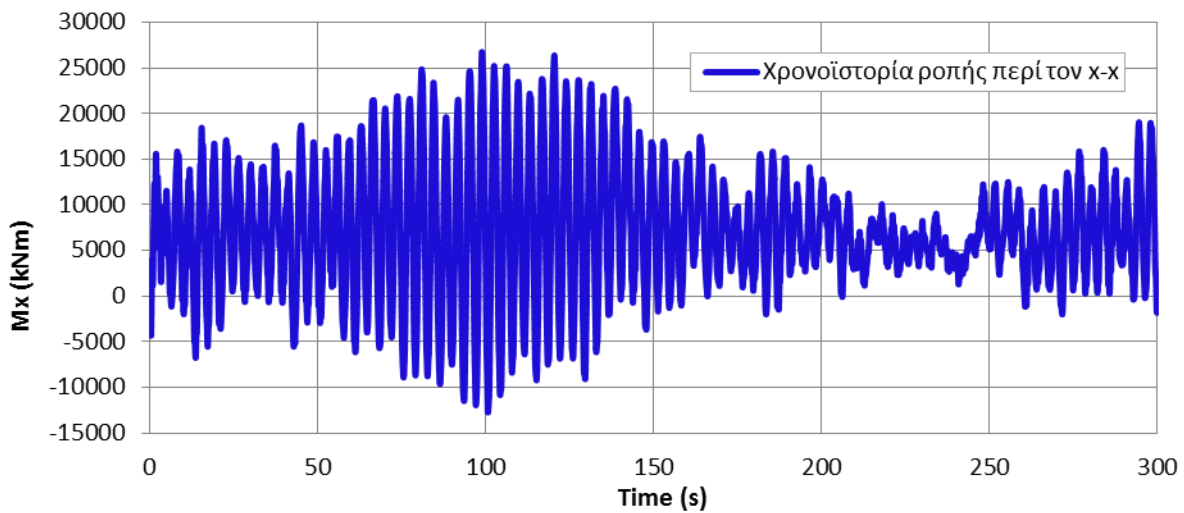
Σχήμα 6.6: Χρονοϊστορία τέμνουσας δύναμης κατά τον άξονα x-x στη βάση του πύργου.



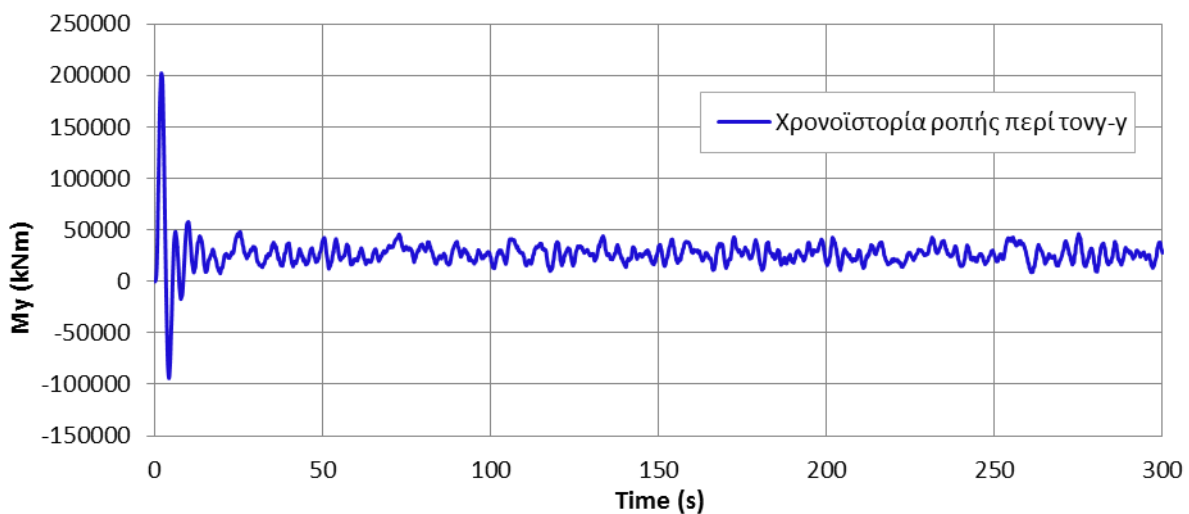
Σχήμα 6.7: Χρονοϊστορία τέμνουσας δύναμης κατά τον άξονα γ-γ στη βάση του πύργου.



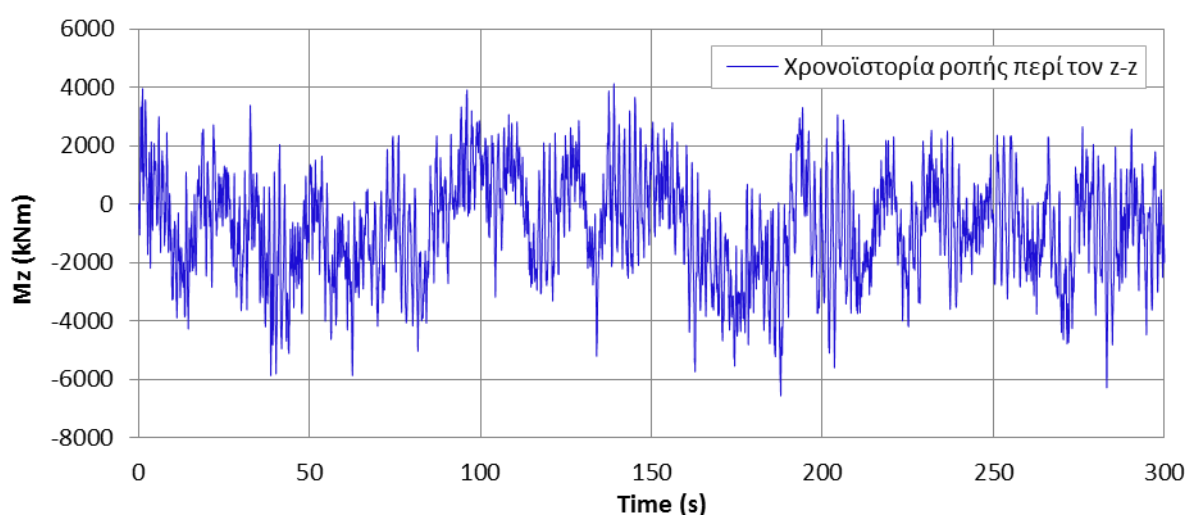
Σχήμα 6.8: Χρονοϊστορία αξονικής δύναμης κατά τον άξονα z-z στη βάση του πύργου.



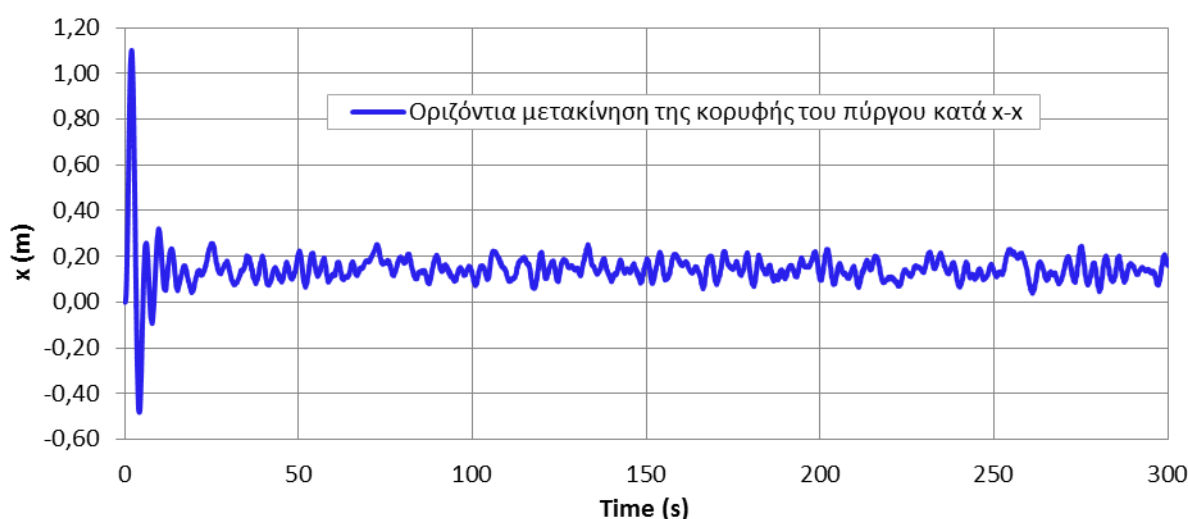
Σχήμα 6.9: Χρονοϊστορία καμπτικής ροπής περί τον x-x άξονα στη βάση του πύργου.



Σχήμα 6.10: Χρονοϊστορία καμπτικής ροπής περί τον y-y άξονα στη βάση του πύργου.



Σχήμα 6.11: Χρονοϊστορία στρεπτικής ροπής περι τον z-z άξονα στη βάση του πύργου



Σχήμα 6.12: Χρονοϊστορία οριζόντιας μετακίνησης κατά x-x της κορυφής του πύργου.

Από τις παραπάνω χρονοϊστορίες προκύπτει ότι η τέμνουσα βάσης του πύργου κατά x-x, παρουσιάζει μεγαλύτερη μέση τιμή από την αντίστοιχη τέμνουσα κατά τον άξονα y-y. Το ίδιο ισχύει και για τις ακραίες τιμές των δύο εντατικών μεγεθών. Η παραπάνω διαπίστωση είναι λογική, καθώς ο άξονας x-x ταυτίζεται με την διεύθυνση πνοής του ανέμου, η οποία παραμένει σταθερή με τον χρόνο αφού η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου με την ανεμογεννήτρια λαμβάνεται ίση με μηδέν κατά την ανάλυση. Η χρονοϊστορία της αξονικής δύναμης κατά τον άξονα z-z παρατηρούμε ότι παρουσιάζει περιορισμένες διακυμάνσεις και είναι αρνητική σε καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης, στοιχεία αναμενόμενα, εφόσον πρόκειται για την δύναμη που οφείλεται κυρίως στο ίδιο βάρος της κατασκευής το οποίο παραμένει σταθερό με το χρόνο και προκαλεί θλιπτική καταπόνηση στη βάση του πύργου.

Αντίστοιχα με τις τέμνουσες και αξονική δυνάμεις, η χρονοϊστορία καμπτικής ροπής περι τον άξονα y-y παρουσιάζει μεγαλύτερες μέσες και ακραίες τιμές σε σχέση με την αντίστοιχη της ροπής περι τον x-x. Από την χρονοϊστορία της στρεπτικής ροπής περι τον άξονα z-z, παρατηρούμε ότι παρουσιάζει τιμές μια τάξη μεγέθους κάτω, σε σχέση με αυτές των καμπτικών.

Παρατηρώντας τις χρονοϊστορίες των φορτίων F_x και M_y , δηλαδή των εντατικών μεγεθών που σχετίζονται με την κύρια διεύθυνση πνοής του ανέμου, προκύπτει ότι στα πρώτα 10

δευτερόλεπτα της ανάλυσης παρουσιάζονται σημαντικά μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με τους μέσες τιμές τους. Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές, τα πρώτα 10 δευτερόλεπτα της ανάλυσης αμελούνται, ώστε να εξαλειφθούν οι παροδικές συνθήκες που δημιουργούνται κατά την εκκίνηση της ανεμογεννήτριας (eliminate start-up transients)[].

Παρ' όλα αυτά, αρχικά οι έλεγχοι επάρκειας των διατομών του πύργου γίνονται λαμβάνοντας υπόψη τους ακραίες αυτές τιμές, με συνέπεια να είναι αρκετά συντηρητικοί.

Κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας των χρονοϊστοριών αυτών, προέκυψαν οι παρακάτω συνδυασμοί φορτίσεων (Πίνακας 6-5) σύμφωνα με τη διαδικασία που διατυπώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο:

Πίνακας 6-5: Συνδυασμοί φορτίσεων στη βάση του πύργου.

Συνδυασμός		M_x (KNm)	M_y (KNm)	M_z (KNm)	F_x (KN)	F_y (KN)	F_z (KN)
1	maxM _x	26750	27910	2019	385.8	-340	-5808
2	maxM _y	13810	202600	2238	2555	-141	-6104
3	maxM _z	4404	19250	-6556	302.1	-52	-5672
4	maxF _x	15460	200800	1163	2631	-287	-6014
5	maxF _y	26570	27780	2190	400.4	-346	-5773
6	maxF _z	2	-8	0	7	1	-6813

Όπου F_z η δύναμη κατά τη διεύθυνση του άξονα του πύργου και F_x, F_y οι εγκάρσιες στον άξονα του πύργου δυνάμεις. Αντίστοιχα οι ροπές M_x, M_y προκαλούν καμπτική ένταση στον πύργο, ενώ η M_z στρεπτική.

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας αποτελείται από τμήματα κωνικής μορφής ύψους τριών μέτρων, μειούμενης διαμέτρου καθ' ύψος και σταθερού πάχους. Για κωνικά κελυφωτά στοιχεία, στο Παράρτημα Δ του EN 1993-1-6 προτείνεται η αντιμετώπιση τους ως έναν ισοδύναμο κύλινδρο με γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$l_e = L \quad (6-4)$$

$$r_e = \frac{r_1 + r_2}{2 \cos \beta} \quad (6-5)$$

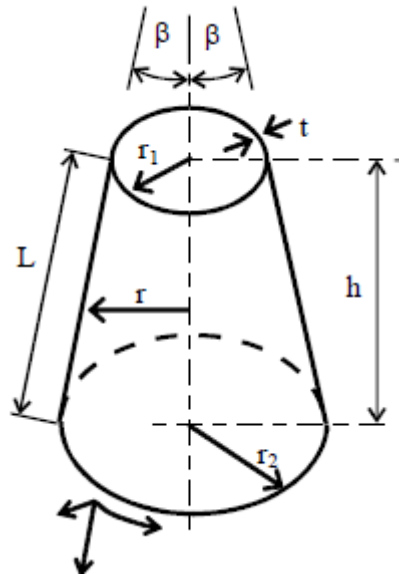
όπου:

l_e μήκος ισοδύναμου κυλίνδρου

r_e ακτίνα μέσης επιφάνειας ισοδύναμου κυλίνδρου

β γωνία του κωνικού στοιχείου που φαίνεται στο Σχήμα 6.13

L μήκος του κωνικού στοιχείου που φαίνεται στο Σχήμα 6.13



Σχήμα 6.13: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κωνικού στοιχείου [6.2].

Το υπό εξέταση τμήμα του πύργου έχει ύψος $h = 3\text{m}$, αρχική διάμετρο $D_{\text{αρχ}} = 6\text{m}$, σταθερό πάχος $t = 0.027\text{m}$ και διάμετρο τέλους $D_{\text{τελ}} = 5.91\text{m}$. Επομένως υπολογίζονται:

$$r_1 = \frac{D_{\text{αρχ}}}{2} - \frac{t_{\text{αρχ}}}{2} \quad (6-6)$$

$$r_2 = \frac{D_{\text{τελ}}}{2} - \frac{t_{\text{τελ}}}{2} \quad (6-7)$$

$$\cos\beta = 0.9998 \approx 1 \quad (6-8)$$

τελικά από τις σχέσεις (5-19) και (5-20) προκύπτει ισοδύναμος κύλινδρος μήκους $l_e = 3\text{m}$ και ακτίνας $r_e = 2.97\text{m}$.

Για τα εντατικά μεγέθη του Πίνακα 6-5, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τάσεις σχεδιασμού σύμφωνα με το Παράρτημα Α του EN 1993-1-6:

- Ορθές τάσεις λόγω της αξονικής δύναμης F_z

$$\sigma_{x\epsilon,N} = -\frac{F_z}{2\pi r_e t} \quad (6-9)$$

- Ορθές τάσεις λόγω διαξονικής κάμψης περί τους x και y

$$\sigma_{x\epsilon,M} = \pm \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi r_e^2 t} \quad (6-10)$$

- Διατμητικές τάσεις λόγω στρεπτικής ροπής M_z

$$\tau_{x\theta,ED} = \frac{M_z}{2\pi r_e^2 t} \quad (6-11)$$

- Διατμητικές τάσεις λόγω τεμνουσών δυνάμεων F_x και F_y

$$T_{x\theta,ED} = \pm \frac{\sqrt{F_X^2 + F_Y^2}}{\pi r_e t} \quad (6-12)$$

Συγκεντρωτικά οι υπολογισμένες τάσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6-6):

Πίνακας 6-6: Ορθές και διατμητικές τάσεις σχεδιασμού για τους έξι συνδυασμούς φορτίσεων.

$\sigma_{xE,N}$ (kPa)	$\sigma_{xE,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,ED}$ (kPa)	$T_{x\theta,ED}$ (kPa)
-11527	51669	-63196	3392
-12115	271406	-283521	11653
-11257	26393	-37650	-3164
-11936	269166	-281102	11283
-11458	51377	-62834	3563
-13522	10	-13532	29

Από τον Πίνακα 6-6 φαίνεται ότι ο δυσμενέστερος συνδυασμός αναπτυσσόμενων τάσεων $\sigma_{x,ED}$ και $T_{x\theta,ED}$ προκύπτει για το δεύτερο συνδυασμό, δηλαδή κατά τη χρονική στιγμή που η ροπή M_Y παρουσιάζει μέγιστο. Επομένως οι έλεγχοι πραγματοποιούνται για τη συγκεκριμένη εντατική κατάσταση.

Με την θεώρηση των κωνικών τμημάτων του πύργου ως ισοδύναμα κυλινδρικά, ο πύργος τελικά αποτελείται από κυλινδρικά στοιχεία των οποίων τα πάχη μειώνονται καθ' ύψος. Στην περίπτωση αυτή, οι ελαστικές κρίσιμες τάσεις λυγισμού υπολογίζονται σύμφωνα με την ενότητα 4.3.3.

Ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού

Η ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού υπολογίζεται θεωρώντας ένα νέο ισοδύναμο κύλινδρο μήκους $l = L$ και ενιαίου πάχους $t = t_j$, όπου:

L το συνολικό μήκος του πύργου

t_j το πάχος του υπό εξέταση στοιχείου

Η αδιάστατη παράμετρος μήκους του κελύφους ω είναι ίση με:

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}} = \frac{77.6}{\sqrt{2.97 \times 0.027}} = 274.032 \quad (6-13)$$

Εφόσον ικανοποιούνται οι συνθήκες μακρών κελυφών:

$$\frac{r}{t} \leq 150, \omega \leq 6 \left(\frac{r}{t} \right) \text{ και } 500 \leq \frac{E}{f_{yk}} \leq 1000 \quad (6-14)$$

ο συντελεστές C_x και η ανώτατη ανηγμένη λυγηρότητα της πλαστικής περιοχής λ_0 υπολογίζονται ως εξής:

$$C_x = C_{x,N} \left(\frac{\sigma_{xE,N}}{\sigma_{xE}} \right) + \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}} \right) = 0.735 \left(\frac{-12115}{-283521} \right) + \left(\frac{-271406}{-283521} \right) = 0.989 \quad (6-15)$$

$$\lambda_{x0} = 0.20 + 0.10 \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}} \right) = 0.20 + 0.10 \left(\frac{-271406}{-283521} \right) = 0.296 \quad (6-16)$$

όπου:

$$C_{x,N} = \max \left(0.6, 1 + \frac{0.2}{C_{xb}} \left[1 - 2\omega \frac{t}{r} \right] \right) = 0.735 \quad (6-17)$$

Επομένως η ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού υπολογίζεται από τη σχέση (4-13):

$$\sigma_{x,Rcr} = 0.605 E C_x \frac{t}{r} = 0.605 \times 210 \times 10^6 \times 0.989 \frac{0.027}{2.97} = 1141897 \quad (6-18)$$

Θεωρώντας ποιότητα κατασκευής B (high), η παράμετρος Q λαμβάνει τιμή 25. Άρα ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών που υπολογίζεται από τη σχέση (4-18) λαμβάνει τιμή ίση με:

$$\alpha_x = \frac{0.62}{1 + 1.91 (\Delta w_k / t)^{1.44}} = \frac{0.62}{1 + 1.91 (0.0113 / 0.027)^{1.44}} = 0.4 \quad (6-19)$$

όπου:

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{1}{25} \times \sqrt{\frac{2.97}{0.027}} = 0.01133 \quad (6-20)$$

Οι υπόλοιπες παράμετροι λυγισμού είναι:

$$\beta = 0.6$$

$$n = 1.0$$

Η τιμή της ανηγμένης πλαστικής λυγηρότητας λαμβάνεται ως:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0.4}{1-0.6}} = 1.0 \quad (6-21)$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα λ_x για αξονική θλίψη δίνεται από τη σχέση (4-11):

$$\lambda_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} = \sqrt{\frac{355000}{1141897}} = 0.558 \quad (6-22)$$

Ο χ_x μειωτικός συντελεστής λυγισμού για αξονική θλίψη δίνεται από τη σχέση (4-8):

$$\chi_x = 0.777 \quad (6-23)$$

Η χαρακτηριστική τάση λυγισμού υπολογίζεται από τη σχέση (4-4) και είναι ίση με:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_{yk} = 0.777 \times 355000 = 275925 \text{ kPa} \quad (6-24)$$

Η αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού για αξονική θλίψη είναι ίση με:

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} = 275925 / 1.1 = 250841 \quad (6-25)$$

Ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού

Σύμφωνα με τα όσα διατυπώθηκαν στην ενότητα 4.3.3, η ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού κυλινδρικού μέλους το οποίο αποτελείται από τμήματα διαφορετικού πάχους υπολογίζεται με την με την μετατροπή του αρχικού κυλίνδρου σε έναν ισοδύναμο κύλινδρο τριών τμημάτων (a,b,c), που στην προκειμένη περίπτωση έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

$$l_a = \frac{L}{2} = 38.8 \text{ m} \quad (6-26)$$

$$l_b = l_c = 0.5(L-l_a) = \frac{L}{4} = 19.4 \text{ m} \quad (6-27)$$

$$t_a = \frac{1}{l_a} \sum_a l_j t_j = 0.021 \text{ m} \quad (6-28)$$

$$t_b = \frac{1}{l_b} \sum_b l_j t_j = 0.024 \text{ m} \quad (6-29)$$

$$t_c = \frac{1}{l_c} \sum_c l_j t_j = 0.026 \text{ m} \quad (6-30)$$

όπου:

l_a μήκος πάνω τμήματος ισοδύναμου κυλίνδρου (Σχήμα 4.3)

l_b μήκος μεσαίου τμήματος ισοδύναμου κυλίνδρου (Σχήμα 4.3)

l_c μήκος κάτω τμήματος ισοδύναμου κυλίνδρου (Σχήμα 4.3)

t_a πάχος του τμήματος a (Σχήμα 4.3)

t_b πάχος του τμήματος b (Σχήμα 4.3)

t_c πάχος του τμήματος c (Σχήμα 4.3)

Ο κύλινδρος των τριών τμημάτων a , b και c αντικαθίσταται με έναν ισοδύναμο κυλίνδρου μήκους $l_{eff} = l_a / \kappa = 64.67 \text{ m}$ και ενιαίου πάχους $t = t_a = 0.021 \text{ m}$, όπου $\kappa = 0.6$ αδιάστατος συντελεστής που προκύπτει από το Σχήμα 4.4.

Από τη σχέση 4-12 υπολογίζεται η αδιάστατη παράμετρος μήκους ω_j του κυλινδρικού τμήματος j του αρχικού κυλίνδρου, η οποία είναι ίση με:

$$\omega_j = \frac{l}{\sqrt{rt}} = \frac{3}{\sqrt{2.97 \times 0.027}} = 10.59 \quad (6-31)$$

Εφόσον ικανοποιείται η συνθήκη $10 \leq \omega_j \leq 8.7 \frac{r}{t}$ το τμήμα j χαρακτηρίζεται ως μεσαίου μήκους και η ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού του υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (5-47):

$$T_{x\theta,Rcr,j} = \left(\frac{t_a}{t_j} \right) T_{x\theta,Rcr,eff} \quad (6-32)$$

όπου $T_{x\theta,Rcr,eff}$ η ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού του ισοδύναμου κυλίνδρου. Η αδιάστατη παράμετρος μήκους του ισοδύναμου κελύφους ω_{eff} είναι ίση με:

$$\omega_{eff} = \frac{l_{eff}}{\sqrt{rt}} = \frac{64.67}{\sqrt{2.97 \times 0.021}} = 258.936 \quad (6-33)$$

Ο ισοδύναμος κύλινδρος χαρακτηρίζεται μεσαίου μήκους αφού ικανοποιείται η συνθήκη $10 \leq \omega_{eff} \leq 8.7 \frac{r}{t}$, επομένως ο συντελεστής C_T λαμβάνεται ίσος με 1.

Από τον Πίνακα Σχήμα 4.2 για υψηλή ποιότητα κατασκευής ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών a_T λαμβάνεται ίσος με 0.65.

Οι υπόλοιποι παράμετροι λυγισμού είναι οι εξής:

$$\lambda_{T0} = 0.4$$

$$\beta = 0.6$$

$$n = 1.0$$

Η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού για διάτμηση λαμβάνει την τιμή:

$$T_{x\theta,Rcr,eff} = 0.75 E C_T \sqrt{\frac{1}{\omega_{eff}}} \left(\frac{t}{r} \right) = 69207 \text{ kPa} \quad (6-34)$$

Επομένως από τη σχέση (5-47) η ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού του τμήματος j ισούται με:

$$T_{x\theta,Rcr,j} = \left(\frac{t_a}{t_j} \right) T_{x\theta,Rcr,eff} = \left(\frac{0.021}{0.027} \right) \times 69207 = 53827 \quad (6-35)$$

Οι παράμετροι a_T, β, n του κυλινδρικού τμήματος j παίρνουν τις ίδιες τιμές με παραπάνω

Η τιμή της ανηγμένης πλαστικής λυγηρότητας του τμήματος j λαμβάνεται ως:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{a}{1-\beta}} = 1.275 \quad (6-36)$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα λ_T για διάτμηση του τμήματος j δίνεται από τη σχέση (4-11):

$$\lambda_T = \sqrt{\frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{T_{x\theta,Rcr,j}}} = 1.951 \quad (6-37)$$

Ο χ_T μειωτικός συντελεστής λυγισμού για διάτμηση δίνεται από τη σχέση (4-9):

$$\chi_T = 0.171 \quad (6-38)$$

Η χαρακτηριστική τάση λυγισμού υπολογίζεται από τη σχέση (4-6) και είναι ίση με:

$$T_{x\theta,Rk} = \chi_T f_{yk} / \sqrt{3} = 34988 \text{ kPa} \quad (6-39)$$

Η αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού για διάτμηση είναι ίση με:

$$T_{x\theta,Rd} = T_{x\theta,Rk} / \gamma_{M1} = 31807 \text{ kPa} \quad (6-40)$$

Έλεγχος αντοχής έναντι λυγισμού

Σύμφωνα με την παράγραφο 4.3.4 απαιτούνται μεμονωμένοι έλεγχοι των τιμών των μεμβρανικών τάσεων, καθώς και έλεγχος αλληλεπίδρασης τους. Επομένως, η διατομή του πύργου θεωρείται επαρκής αν ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι παρακάτω συνθήκες:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (6-41)$$

$$T_{x\theta,Ed} \leq T_{x\theta,Rd} \quad (6-42)$$

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} + \left(\frac{T_{x\theta,Ed}}{T_{x\theta,Rd}} \right)^{k_t} \leq 1 \quad (6-43)$$

Οι εκθέτες αλληλεπίδρασης που υπεισέρχονται στη σχέση 5-58 υπολογίζονται από τις σχέσεις 4-39 και 4-41 και είναι ίσοι με:

$$k_x = 1.25 + 0.75 \chi_x = 1.25 + 0.75 \times 0.777 = 1.83 \quad (6-44)$$

$$k_t = 1.75 + 0.25 \chi_t = 1.75 + 0.25 \times 0.171 = 1.79 \quad (6-45)$$

Από τη σχέση 6-40 προκύπτει:

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} = 1.13 \quad (6-46)$$

$$\frac{T_{x\theta,Ed}}{T_{x\theta,Rd}} = 0.37 \quad (6-47)$$

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} + \left(\frac{T_{x\theta,Ed}}{T_{x\theta,Rd}} \right)^{k_t} = 1.42 \quad (6-48)$$

Παρατηρούμε ότι σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 1993-1-6 η διατομή του πύργου δεν επαρκεί έναντι λυγισμού σε αξονική θλίψη και σε αλληλεπίδραση αξονικής θλίψης και διάτμησης. Αντίθετα, ο έλεγχος έναντι λυγισμού από διάτμηση ικανοποιείται.

Για να ικανοποιούνται επομένως οι παραπάνω έλεγχοι (6-38 έως 6-40), απαιτείται αύξηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής στη βάση του πύργου, η οποία θα γίνει σε όλα τα τμήματα του πύργου καθ' ύψος.

Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία υπολογισμού της αντοχής έναντι λυγισμού, καταλήγουμε ότι το πάχος της διατομής στη βάση του πύργου πρέπει να γίνει 0,033m, δηλαδή να αυξηθεί περίπου κατά 22%.

Σε προηγούμενη παράγραφο, επισημάνθηκαν οι βιβλιογραφικές αναφορές σύμφωνα με τις οποίες τα πρώτα 10 δευτερόλεπτα της ανάλυσης αμελούνται. Ακολουθώντας την παραπάνω πρακτική, προκύπτουν οι παρακάτω συνδυασμοί φόρτισης με τους οποίους γίνεται ο έλεγχος επάρκειας της διατομής στη βάση του πύργου:

Συνδυασμός		M_x (KNm)	M_y (KNm)	M_z (KNm)	F_x (KN)	F_y (KN)	F_z (KN)
1	maxM _x	26750	27910	2019	386	-341	-5808
2	maxM _y	-1865	57430	-3136	763	147	-5814
3	maxM _z	4404	19250	-6556	302	-52	-5672
4	maxF _x	-1865	57430	-3136	763	147	-5814
5	maxF _y	26570	27780	2190	400	-346	-5773
6	maxF _z	15760	29650	863	402	-212	-5987

Οι αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις που προκύπτουν από τον παραπάνω συνδυασμό:

σ_{xε,N} (kPa)	σ_{xε,M} (kPa)	σ_{x,ED} (kPa)	T_{xθ,ED} (kPa)
-11464	51099	-62563	3366
-11475	75950	-87426	996
-11195	26102	-37297	-3123
-11475	75950	-87426	996
-11395	50811	-62205	3535
-11817	44383	-56200	2365

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι ο δυσμενέστερος συνδυασμός είναι ο 2^{ος} για τον οποίο οι έλεγχοι αντοχής έναντι λυγισμού είναι οι ακόλουθοι:

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} = 0.35 \quad (6-49)$$

$$\frac{T_{x\theta,Ed}}{T_{x\theta,Rd}} = 0.03 \quad (6-50)$$

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} + \left(\frac{T_{x\theta,Ed}}{T_{x\theta,Rd}} \right)^{k_t} = 0.152 \quad (6-51)$$

Από τις σχέσεις 6-49 έως 6-51 φαίνεται ότι αμελώντας τα πρώτα δευτερόλεπτα της ανάλυσης, η γεωμετρία του πύργου ικανοποιεί τους ελέγχους αντοχής.

Η παραπάνω αναλυτική διαδικασία ελέγχου επάρκειας της διατομής του πύργου στη βάση του, εφαρμόζεται σε συγκεκριμένα σημεία καθ' ύψος του, αμελώντας τα πρώτα δευτερόλεπτα της ανάλυσης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε υπό εξέταση σημείο παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω:

Σημείο	-	1	2	3	4	5
Απόσταση από τη βάση του πύργου	m	7.45	15.29	23.12	30.96	38.8
Απόσταση από τον πυθμένα της θάλασσας	m	42.45	50.29	58.12	65.96	73.8
Διάμετρος διατομής	m	5.79	5.56	5.34	5.11	4.90
Πάχος τοιχώματος διατομής	m	0.026	0.025	0.025	0.024	0.023
Σημείο	-	6	7	8	9	10
Απόσταση από τη βάση του πύργου	m	46.64	54.48	62.32	70.15	77.6
Απόσταση από τον πυθμένα της θάλασσας	m	81.64	89.48	97.32	105.15	112.6
Διάμετρος διατομής	m	4.67	4.45	4.22	4.00	3.87
Πάχος τοιχώματος διατομής	m	0.022	0.021	0.021	0.020	0.019

Συνδυασμοί φορτίσεων για το σημείο 1:

		Mx(KNm)	My(KNm)	Mz(KNm)	Fx(KN)	Fy(KN)	Fz(KN)
1	maxMx	24260	25150	2013	371	-329	-5449
2	maxMy	-813	51760	-3136	759	134	-5505
3	maxMz	4036	17040	-6556	292	-47	-5365
4	maxFx	-813	51760	-3136	759	135	-5505
5	maxFy	24110	24910	2122	384	-338	-5505
6	maxFz	14220	26660	864	402	-202	-5675

Αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις για τους παραπάνω συνδυασμούς:

$\sigma_{x,E,N}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,D}$ (kPa)	$\tau_{x\theta,E,D}$ (kPa)
-11580	51567	-63147	3596
-11699	76392	-88091	963
-11402	25842	-37244	-3579
-11699	76392	-88091	963
-11699	51158	-62858	3741
-12061	44589	-56649	2549

Συνδυασμοί φορτίσεων για το σημείο 2:

		Mx(KNm)	My(KNm)	Mz(KNm)	Fx(KN)	Fy(KN)	Fz(KN)
1	maxMx	22050	22750	2754	321	-264	-5149
2	maxMy	189	45840	-3136	750	119	-5201
3	maxMz	3704	14810	-6556	275	-39	-5063
4	maxFx	189	45840	-3136	750	119,8	-5201
5	maxFy	21530	22000	2089	369	-329	-5215
6	maxFz	12680	23510	864	400	-190	-5367

Αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις για τους παραπάνω συνδυασμούς:

$\sigma_{x,E,N}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,D}$ (kPa)	$\tau_{x0,E,D}$ (kPa)
-11839	52623	-64462	4199
-11959	76139	-88098	890
-11642	25356	-36998	-4168
-11959	76139	-88098	890
-11991	51128	-63119	4010
-12341	44367	-56707	2755

Συνδυασμοί φορτίσεων για το σημείο 3:

		Mx(KNm)	My(KNm)	Mz(KNm)	Fx(KN)	Fy(KN)	Fz(KN)
1	maxMx	19990	20340	2658	317,2	-267	-4849
2	maxMy	1063	40010	-3136	738,6	102	-4918
3	maxMz	3442	12730	-6556	254,7	-28	-4782
4	maxFx	1063	40010	-3136	738,6	102	-4918
5	maxFy	19030	19220	2060	354,3	-316	-4938
6	maxFz	11240	20390	864	397	-175	-5079

Αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις για τους παραπάνω συνδυασμούς:

$\sigma_{x,E,N}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,D}$ (kPa)	$\tau_{x0,E,D}$ (kPa)
-11624	51487	-63111	4388
-11790	72258	-84048	744
-11464	23808	-35271	-4689
-11790	72258	-84048	744
-11837	48830	-60668	4138
-12175	42034	-54210	2861

Συνδυασμοί φορτίσεων για το σημείο 4:

		Mx(KNm)	My(KNm)	Mz(KNm)	Fx(KN)	Fy(KN)	Fz(KN)
1	maxMx	17880	17890	2572	319	-273	-4616
2	maxMy	1799	34280	-3136	723	84	-4654
3	maxMz	3263	10820	-6556	231	-17	-4520
4	maxFx	1852	34220	-2927	725	85	-4585
5	maxFy	16630	16550	2036	340	-303	-4669
6	maxFz	9930	17300	864	390	-159	-4813

Αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις για τους παραπάνω συνδυασμούς:

$\sigma_{x,E,N}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,ED}$ (kPa)	$\tau_{x\theta,ED}$ (kPa)
-12027	51785	-63812	4825
-12126	70282	-82408	583
-11777	23138	-34915	-5500
-11946	70165	-82111	809
-12165	48036	-60201	4460
-12540	40840	-53381	3083

Συνδυασμοί φορτίσεων για το σημείο 5:

		Mx (KNm)	My (KNm)	Mz (KNm)	Fx (KN)	Fy (KN)	Fz (KN)
1	maxMx	15730	15360	2436	324	-277	-4405
2	maxMy	2389	28670	-3136	706	65	-4410
3	maxMz	3166	9104	-6556	206	-7	-4278
4	maxFx	2450	28590	-2927	711	66	-4344
5	maxFy	14770	15580	492	375	-288	-4302
6	maxFz	8737	14270	863	383	-144	-4565

Αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις για τους παραπάνω συνδυασμούς:

$\sigma_{x,E,N}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,ED}$ (kPa)	$\tau_{x\theta,ED}$ (kPa)
-12512	51268	-63780	5267
-12526	67087	-79613	372
-12151	22477	-34628	-6471
-12339	66913	-79252	648
-12220	50062	-62281	3261
-12967	39018	-51984	3334

Συνδυασμοί φορτίσεων για το σημείο 6:

		Mx (KNm)	My (KNm)	Mz (KNm)	Fx (KN)	Fy (KN)	Fz (KN)
1	maxMx	13540	12800	2358	324	-281	-4167
2	maxMy	2837	23210	-3136	687	48	-4184
3	maxMz	3151	7582	-6556	181	2	-4054
4	maxFx	2710	22780	-2566	697	56	-4179
5	maxFy	13430	12810	2695	321	-285	-4127
6	maxFz	7666	11290	863	375	-128	-4336

Αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις για τους παραπάνω συνδυασμούς:

$\sigma_{x,E,N}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,ED}$ (kPa)	$T_{x\theta,ED}$ (kPa)
-12969	49896	-62865	5829
-13022	62617	-75639	92
-12617	21987	-34605	-7646
-13006	61433	-74439	919
-12844	49701	-62545	6284
-13495	36544	-50039	3628

Συνδυασμοί φορτίσεων για το σημείο 7:

		Mx (KNm)	My (KNm)	Mz (KNm)	Fx (KN)	Fy (KN)	Fz (KN)
1	maxMx	11320	10260	2327	321	-284	-3949
2	maxMy	3162	17890	-3136	668	34	-3976
3	maxMz	3212	6245	-6556	159	12	-3847
4	maxFx	3047	17290	-2583	684	49	-3930
5	maxFy	11230	10310	2616	321	-287	-3933
6	maxFz	6709	8383	863	367	-115	-4126

Αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις για τους παραπάνω συνδυασμούς:

$\sigma_{x,E,N}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,ED}$ (kPa)	$T_{x\theta,ED}$ (kPa)
-13528	47313	-60842	6543
-13621	56262	-69883	-269
-13179	21748	-34927	-9053
-13463	54370	-67833	705
-13473	47212	-60685	7007
-14134	33252	-47386	3976

Συνδυασμοί φορτίσεων για το σημείο 8:

		Mx (KNm)	My (KNm)	Mz (KNm)	Fx (KN)	Fy (KN)	Fz (KN)
1	maxMx	9238	7668	1588	388	-265	-3806
2	maxMy	2534	13480	-1535	484	70	-3776
3	maxMz	3343	5065	-6556	141	20	-3658
4	maxFx	3380	11930	-2608	671	42	-3727
5	maxFy	8994	7802	2572	319	-286	-3757
6	maxFz	5845	5533	862,9	359	-105	-3932

Αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις για τους παραπάνω συνδυασμούς:

$\sigma_{x,E,N}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,ED}$ (kPa)	$T_{x\theta,ED}$ (kPa)
-13737	41274	-55011	6125
-13629	47154	-60783	893
-13203	20863	-34066	-10240
-13452	42628	-56080	377
-13560	40932	-54493	7518
-14192	27669	-41861	4187

Συνδυασμοί φορτίσεων για το σημείο 9:

		Mx(KNm)	My(KNm)	Mz(KNm)	Fx(KN)	Fy(KN)	Fz(KN)
1	maxMx	7164	4684	1588	373	-263	-3631
2	maxMy	3009	9795	-1712	435	95	-3636
3	maxMz	3524	4018	-6556	126	24	-3484
4	maxFx	3682	6716	-2608	656	35	-3555
5	maxFy	6794	5331	2481	311	-282	-3606
6	maxFz	5043	2752	863	350	-99	-3756

Αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις για τους παραπάνω συνδυασμούς:

$\sigma_{x,E,N}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,ED}$ (kPa)	$T_{x\theta,ED}$ (kPa)
-14537	34480	-49017	6857
-14557	41277	-55834	119
-13948	21529	-35477	-12174
-14232	30853	-45086	10
-14437	34788	-49225	8363
-15037	23143	-38180	4654

Συνδυασμοί φορτίσεων για το σημείο 10:

		Mx(KNm)	My(KNm)	Mz(KNm)	Fx(KN)	Fy(KN)	Fz(KN)
1	maxMx	5564	164	1857	399,6	-197,7	-3523
2	maxMy	4380	7231	-1623	210,7	-182,4	-3423
3	maxMz	3718	3111	-6556	118,3	26,63	-3334
4	maxFx	3928	1897	-2607	637,5	31,01	-3407
5	maxFy	4739	3072	2395	300,7	-277,4	-3456
6	maxFz	4319	173,5	863,2	342,2	-95,84	-3602

Αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις για τους παραπάνω συνδυασμούς:

$\sigma_{x,E,N}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,ED}$ (kPa)	$T_{x\theta,ED}$ (kPa)
-15326	25153	-40479	8075
-14891	38201	-53092	-1242
-14504	21906	-36410	-13757
-14822	19711	-34532	-337
-15035	25520	-40554	8971
-15670	19532	-35202	5042

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρούμε ότι ο 2^{ος} συνδυασμός φόρτισης είναι κρίσιμος για όλα τα σημεία του πύργου. Επομένως οι έλεγχοι επάρκειας για κάθε σημείο γίνονται για τον εν λόγω συνδυασμό. Στους Πίνακας 6-7 και Πίνακας 6-8 φαίνονται οι παράμετροι και οι έλεγχοι αντοχής για κάθε σημείο.

Πίνακας 6-7: Έλεγχοι αντοχής του πύργου καθ' ύψος.

Σημείο	1	2	3	4	5
$\sigma_{x,Rcr}$	1105026	1102281	1143797	1140194	1134187
χ_x	0.764	0.764	0.774	0.773	0.771
$\sigma_{x,Rk}$	271380	271120	274733	274369	273764
$\sigma_{x,RD}$	246709	246473	249757	249427	248876
$\sigma_{x,ED}/\sigma_{x,RD}$	0.36	0.36	0.34	0.33	0.32
$T_{x\theta,Rcr}$	57161	61242	63186	67958	73290
χ_T	0.181	0.194	0.200	0.216	0.232
$T_{x\theta,Rk}$	37155	39808	41071	44173	47638
$T_{x\theta,RD}$	33777	36189	37337	40157	43307
$T_{x\theta,ED}/T_{x\theta,RD}$	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01
k_x	1.82	1.82	1.83	1.83	1.83
k_T	1.79	1.80	1.80	1.81	1.81
$(\sigma_{x,ED}/\sigma_{x,RD})^{k_x} +$ $(T_{x\theta,ED}/T_{x\theta,RD})^{k_T}$	0.155	0.155	0.137	0.132	0.125

Πίνακας 6-8: Έλεγχοι αντοχής του πύργου καθ' ύψος

Σημείο	6	7	8	9	10
$\sigma_{x,Rcr}$	1126640	1114551	1156674	1145052	1113023
χ_x	0.769	0.765	0.774	0.771	0.762
$\sigma_{x,Rk}$	272978	271718	274941	273558	270650
$\sigma_{x,RD}$	248162	247017	249946	248689	246045
$\sigma_{x,ED}/\sigma_{x,RD}$	0.30	0.28	0.24	0.22	0.22
$T_{x\theta,Rcr}$	79379	86313	89760	98225	105911
χ_T	0.252	0.274	0.285	0.312	0.336
$T_{x\theta,Rk}$	51596	56103	58344	63847	68842
$T_{x\theta,RD}$	46906	51003	53040	58042	62584
$T_{x\theta,ED}/T_{x\theta,RD}$	0.001	0.01	0.02	0.002	0.02
k_x	1.83	1.82	1.83	1.83	1.82
k_T	1.81	1.82	1.82	1.83	1.83
$(\sigma_{x,ED}/\sigma_{x,RD})^{k_x} + (T_{x\theta,ED}/T_{x\theta,RD})^{k_T}$	0.114	0.100	0.076	0.065	0.062

6.3.2 Φέρουσα ικανότητα πασσάλου

Οι έλεγχοι αντοχής της διατομής και ευστάθειας του πύργου πραγματοποιούνται στη στάθμη του πυθμένα της θάλασσας, όπου ο πύργος αναπτύσσει την μέγιστη εντατική καταπόνηση (θέση πάκτωσης). Παρακάτω παρουσιάζονται οι έλεγχοι επάρκειας του πασσάλου, με την διαδικασία που ακολουθείται στο κεφάλαιο 6.3.1:

Συνδυασμοί φορτίσεων για τη θέση μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου:

		Mx(KNm)	My(KNm)	Mz(KNm)	Fx(KN)	Fy(KN)	Fz(KN)
1	maxMx	-30120	-31780	-2034	-376	367	8632
2	maxMy	-16420	-228000	-2000	-2555	236	8856
3	maxMz	-4925	-22280	6559	-301	81	8478
4	maxFx	-18510	-226300	-1066	-2674	364	8774
5	maxFy	-29710	-31730	-2303	-412	384	8573
6	maxFz	0	-13	-1	1	0	9506

Αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις για τους παραπάνω συνδυασμούς

$\sigma_{x,E,N}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,ED}$ (kPa)	$T_{x\theta,ED}$ (kPa)
7709	26334	-18625	327
7910	137481	-129572	3982
7572	13723	-6151	2529
7836	136558	-128722	4500
7657	26143	-18486	314
8490	8	8482	2

Παρατηρούμε ότι ο 2^{ος} συνδυασμός φόρτισης είναι κρίσιμος. Οι παράμετροι λυγισμού και οι απαιτούμενοι έλεγχοι για τον εν λόγω συνδυασμό φαίνονται στη συνέχεια:

Πίνακας 6-9: Αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού του πασσάλου

$\sigma_{x,Rcr}$	2594212	$T_{x\theta,Rcr}$	335359
χ_x	0.951	χ_T	1.000
$\sigma_{x,Rk}$	337631	$T_{x\theta,Rk}$	217984
$\sigma_{x,RD}$	306937	$T_{x\theta,RD}$	198167

Πίνακας 6-10: Έλεγχοι επάρκειας πασσάλου

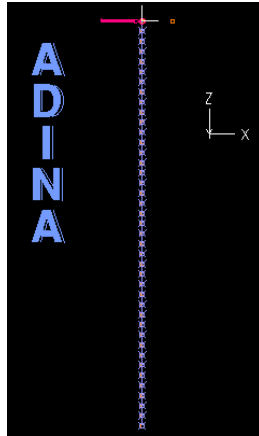
k_x	1.963
k_T	2.016
$\sigma_{x,ED}/\sigma_{x,RD}$	0.42
$T_{x\theta,ED}/T_{x\theta,RD}$	0.02
$(\sigma_{x,ED}/\sigma_{x,RD})^{k_x} + (T_{x\theta,ED}/T_{x\theta,RD})^{k_T}$	0.18

Από το Πίνακα 6-10 φαίνεται ότι ικανοποιούνται οι μεμονωμένοι έλεγχοι επάρκειας των αναπτυσσόμενων ορθών και διατμητικών τάσεων του πασσάλου καθώς και ο έλεγχος αλληλεπίδρασης τους. Επομένως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του πασσάλου, επαρκούν.

6.4 Προσομοίωση εδάφους

Η επίδραση του εδάφους στο πρόγραμμα ADINA, προσομοιώνεται με την εισαγωγή μη γραμμικών ελατηρίων κατά μήκος του πασσάλου, τα οποία υπολογίζονται με την διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 5.6. Τοποθετείται ένα μη γραμμικό ελατήριο ανά διεύθυνση (οριζόντια) ανά μέτρο μήκους του πασσάλου του οποίου η δυσκαμψία εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πασσάλου καθώς και το βάθος στο οποίο βρίσκεται.

Αντίθετα δεν τοποθετούνται ελατήρια κατά την διεύθυνση του άξονα του πασσάλου (κατακόρυφα), αφού η πλευρική τριβή που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους είναι εξαιρετικά μεγάλη ώστε η καθίζηση της αιχμής του να είναι αμελητέα (η αιχμή του πασσάλου δεσμεύεται με άρθρωση).



Σχήμα 6.14: Προσομοίωση μη γραμμικών ελατηρίων στο ADINA.

Στα πλαίσια της εργασίας, θεωρείται απλουστευτικά ενιαίο εδαφικό προφίλ απείρου μήκους για όλο το μήκος έμπηξης του πασσάλου, παρ' ότι μια τέτοια παραδοχή δεν απαντάται στη φύση. Επίσης στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, θεωρείται ότι το ενιαίο εδαφικό προφίλ της περιοχής θεμελίωσης αποτελείται από αμμόδη (μη-συνεκτικούς) εδαφικούς σχηματισμούς, των οποίων οι ιδιότητες φαίνονται στον Πίνακα.

Στις αναλύσεις που γίνονται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, υπολογίζεται για κάθε ελατήριο η καμπύλη πλευρικού φορτίου ανά μέτρο μήκους που ασκείται στον πάσσαλο και πλευρικής μετατόπισης πασσάλου (καμπύλη $p-y$) για τα χαρακτηριστικά του εδάφους, του πασσάλου και το αντίστοιχο βάθος του ελατηρίου, με την βοήθεια των σχέσεων 5-15 έως 5-17. Έχοντας εισάγει τις καμπύλες $p-y$ για κάθε ελατήριο, το πρόγραμμα υπολογίζει αυτόματα την δυσκαμψία κάθε ελατηρίου για κάθε μετατόπιση του πασσάλου.

Παρακάτω παρουσιάζεται η πορεία υπολογισμού των καμπυλών $p-y$ για κάθε ελατήριο που ακολουθείται για μη συνεκτικά εδάφη, με τελικό σκοπό την εισαγωγή τους ως δεδομένο στο πρόγραμμα ADINA ώστε να προσδιορισθούν οι δυσκαμψίες τους:

Για γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=35^0$ από το Σχήμα 5.9 προκύπτουν οι συντελεστές $C_1 = 3.0$, $C_2 = 3.5$, $C_3 = 55$. Αντίστοιχα από το Σχήμα 5.10, η σταθερά του δείκτη εδάφους στην οριζόντια διεύθυνση προκύπτει $k_h = 22802$.

Όπως έχει αναλυθεί η ανεμογεννήτρια και κατ' επέκταση η θεμελίωση της υπόκειται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, επομένως ο συντελεστής A από τη σχέση 5-16 λαμβάνεται ίσος με 0.9.

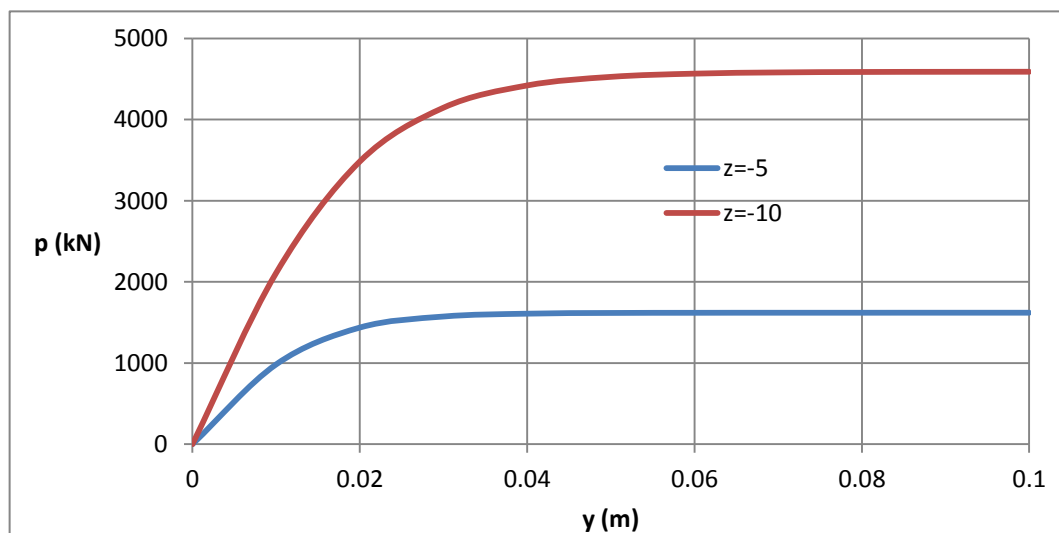
Το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου δίνεται από τη σχέση 5-17 και υπολογίζεται για κάθε ελατήριο. Τέλος από τη σχέση 5-15, για κάθε ελατήριο προκύπτουν οι καμπύλες $p-y$ οι οποίες τελικά καθορίζουν και την δυσκαμψία του.

Τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 6-11:

Πίνακας 6-11: Χαρακτηριστικά υπολογισμού δυσκαμψίας εδαφικών ελατηρίων.

φ	$^{\circ}$	35	Γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
C_1	-	3.0	Συντελεστής που εξαρτάται από την γωνία εσωτερικής τριβής
C_2	-	3.5	Συντελεστής που εξαρτάται από την γωνία εσωτερικής τριβής
C_3	-	55	Συντελεστής που εξαρτάται από την γωνία εσωτερικής τριβής
γ	kN/m^3	10	Ενεργό βάρος εδάφους
z	m		Βάθος από τον πυθμένα της θάλασσας
A	-	0.9	Συντελεστής που εξαρτάται από το είδος φόρτισης
k	kN/m^3	22802	Σταθερά του δείκτη εδάφους στην οριζόντια διεύθυνση
ρ_u	kN/m		Μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου
ρ	kN/m		Πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου

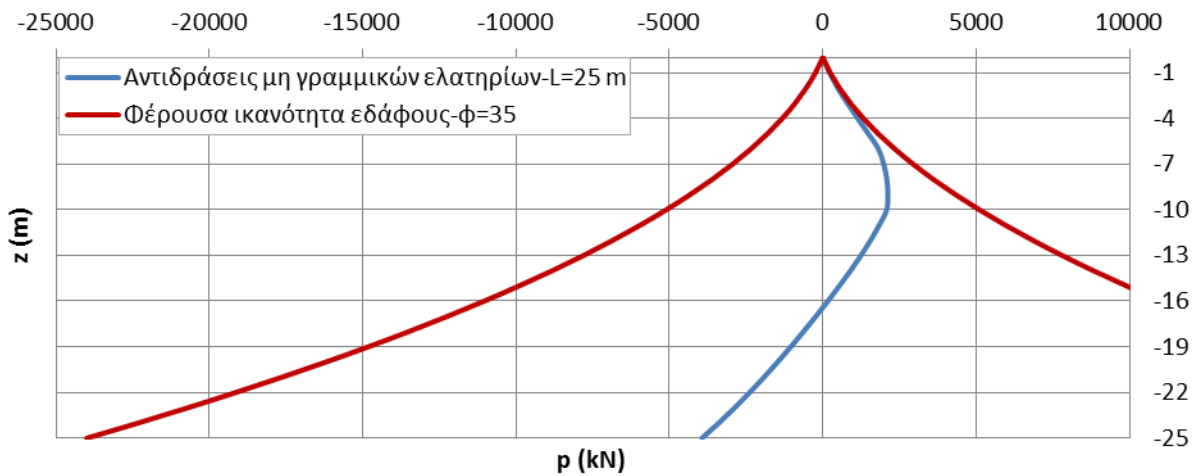
Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι καμπύλες πλευρικού φορτίου επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του ρ - γ για διάφορα βάθη κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, όπως υπολογίσθηκαν με την διαδικασία που αναπτύχθηκε παραπάνω.

**Σχήμα 6.15:** Καμπύλες ρ - γ για διάφορα βάθη κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας

Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφού εισήχθησαν οι δυσκαμψίες των ελατηρίων (μέσω των καμπυλών ρ - γ) στο ADINA, ασκήθηκαν μια συγκεντρωμένη οριζόντια δύναμη κατά την κύρια διεύθυνση του ανέμου και μια ροπή στην κεφαλή του πασσάλου (στη στάθμη του πυθμένα της θάλασσας). Οι τιμές των φορτίων που επιβλήθηκαν (βλέπε σχήμα) προκύπτουν, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, από το FAST και αποτελούν τα εντατικά μεγέθη της βάσης του φορέα στήριξης. Αρχικά επιλέχθηκε μήκος έμπηξης πασσάλου 25 m και τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω.

Στο Σχήμα 6.16 απεικονίζεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους καθώς και οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του εδάφους του πυθμένα

μέσα στον οποίο θεμελιώνεται η θαλάσσια ανεμογεννήτρια (στο υψόμετρο $z=0\text{m}$ βρίσκεται ο πυθμένας της θάλασσας).

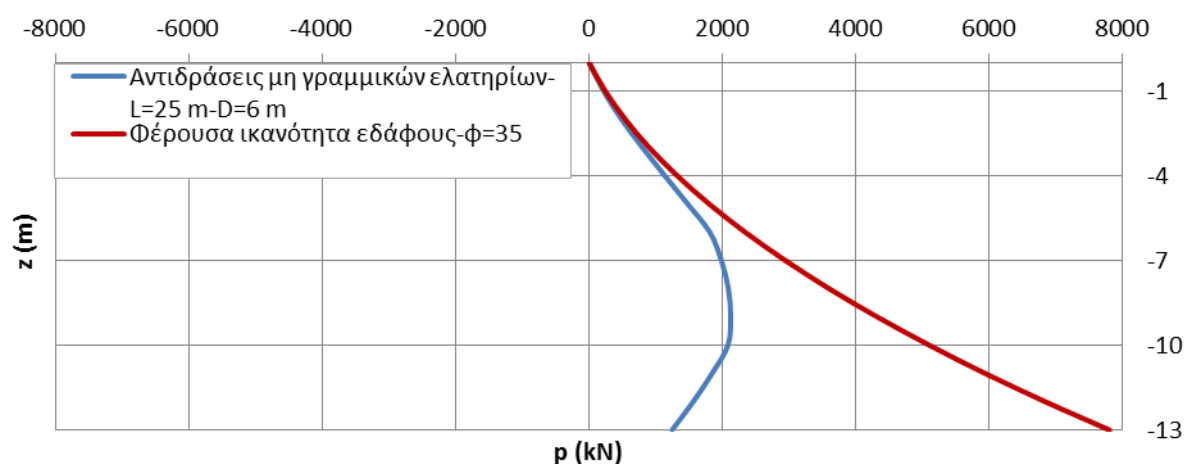


Σχήμα 6.16: Φέρουσα ικανότητα εδάφους και αντιδράσεις μη γραμμικών ελατηρίων- $L=25\text{m}$

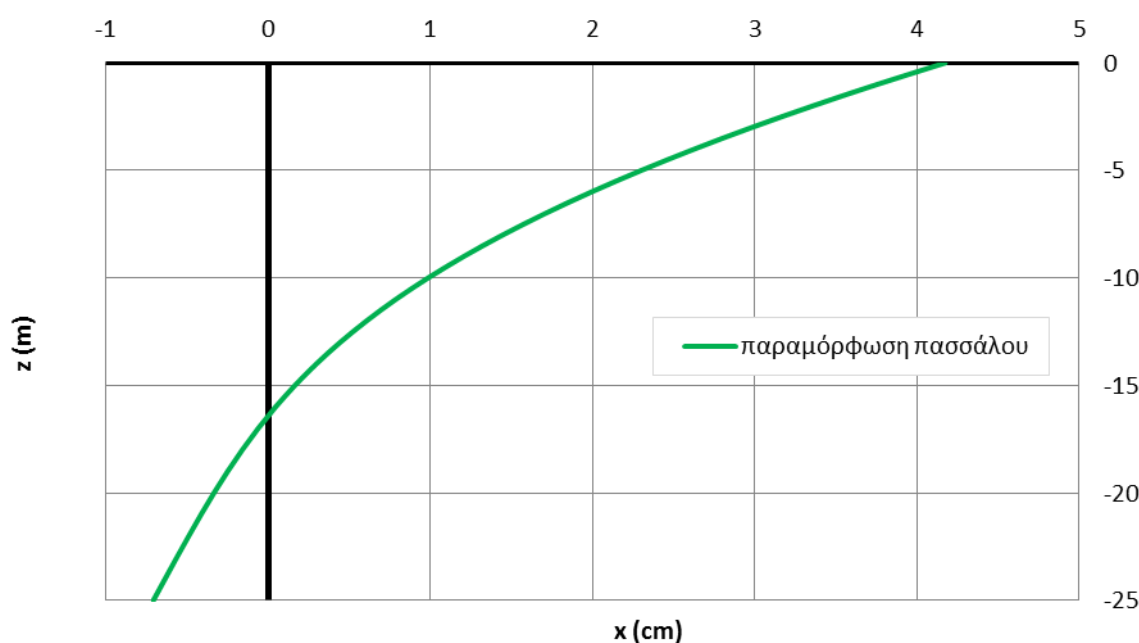
Από το Σχήμα 6.16 προκύπτει πως στα πρώτα 3.5m θεμελίωσης του πασσάλου εξαντλείται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους μιας και οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων ταυτίζονται με την καμπύλη που αντιπροσωπεύει τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται σε αυτή τη περιοχή (πρώτα 3.5m θεμελίωσης) μια πλαστική ζώνη μέσα στο έδαφος. Παρατηρούμε επίσης πως στο βάθος $z=-16\text{m}$ κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, η αντίδραση του ελατηρίου είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει λόγω της μηδενικής μετατόπισης του πασσάλου σε αυτό το σημείο από την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση. Μπορούμε δηλαδή να συμπεράνουμε πως 16m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας είναι το σημείο περιστροφής του πασσάλου μέσα στο έδαφος. Τέλος γίνεται αντιληπτό πως στο μέγιστο βάθος θεμελίωσης του πασσάλου οι αντιδράσεις των ελατηρίων δεν είναι μηδενικές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μη «σβήνει» η τέμνουσα δύναμη του πασσάλου στο μέγιστο βάθος έμπηξης, πράγμα που σημαίνει ότι τα 25m μήκος θεμελίωσης δεν επαρκούν και πρέπει αυτό το μήκος να αυξηθεί.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.17) αποτυπώνονται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους και οι αντιδράσεις των εδαφικών ελατηρίων στα πρώτα 13 m της θεμελίωσης, όπου είναι πιο εμφανής η πλαστικοποίηση του εδάφους στα πρώτα 3.5 μέτρα.

Στο Σχήμα 6.18 φαίνεται η παραμόρφωση του πασσάλου από τη στάθμη του πυθμένα της θάλασσας ($z=0\text{m}$) έως την αιχμή του ($z=-25\text{m}$).



Σχήμα 6.17: Φέρουσα ικανότητα εδάφους και αντιδράσεις μη γραμμικών ελατηρίων-L=25m

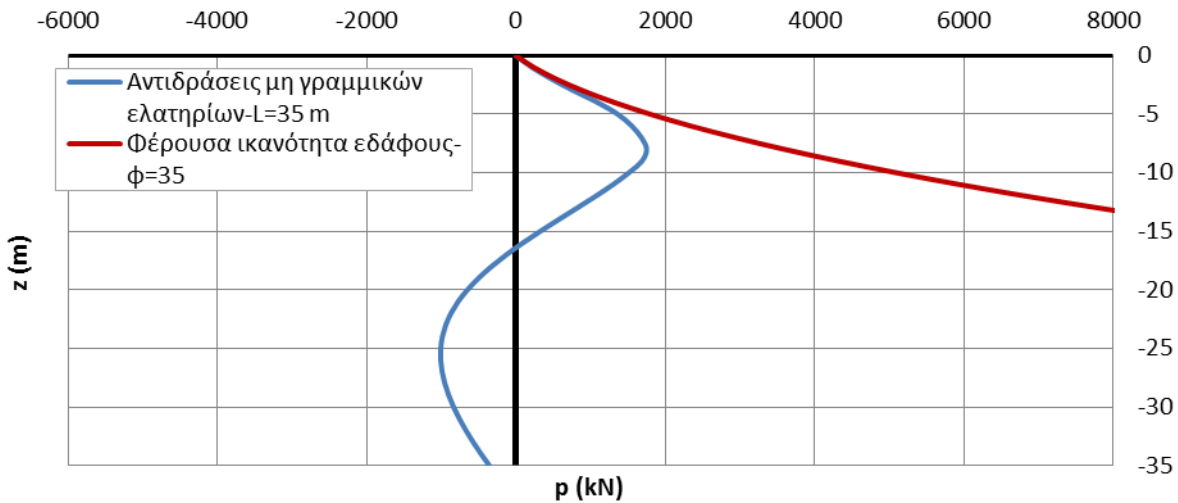


Σχήμα 6.18: Παραμόρφωση πασσάλου.

Στο Σχήμα 6.18 φαίνεται ότι η οριζόντια μετατόπιση της κεφαλής του πασσάλου (στάθμη $z=0\text{m}$) είναι ίση με 4.17cm , ενώ η αντίστοιχη της αιχμής του σε βάθος $z=-25\text{m}$ είναι 0.71cm . Επιβεβαιώνεται επίσης, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, ότι σε βάθος περίπου $z=-16\text{m}$ ο πάσσαλος έχει μηδενική μετατόπιση και το σημείο αυτό είναι σημείο περιστροφής του.

Σημειώνεται επίσης ότι ικανοποιούνται μόνο δύο από τα τρία εμπειρικά κριτήρια σχεδιασμού που διατυπώθηκαν στο Κεφάλαιο 5.7. Ειδικότερα, ενώ καλύπτονται οι περιορισμοί που αφορούν τις μέγιστες επιτρεπόμενες μετακινήσεις της κεφαλής ($\delta_{\text{κεφ}} \leq 12\text{cm}$) και της αιχμής ($\delta_{\text{αιχμ}} \leq 2\text{cm}$) του πασσάλου, δεν ικανοποιείται το κριτήριο κατακόρυφης εφάπτομένης που εξασφαλίζει την εύκαμπτη συμπεριφορά του πασσάλου. Επίσης, από το Σχήμα 6.18 είναι προφανές ότι οι μετατοπίσεις του πασσάλου στα τελευταία μέτρα δεν "σβήνουν". Από τα παραπάνω στοιχεία προκύπτει ότι τα 25m που επιλέχθηκαν αρχικά είναι ανεπαρκή και επομένως το μήκος έμπηξης του πασσάλου πρέπει να αυξηθεί.

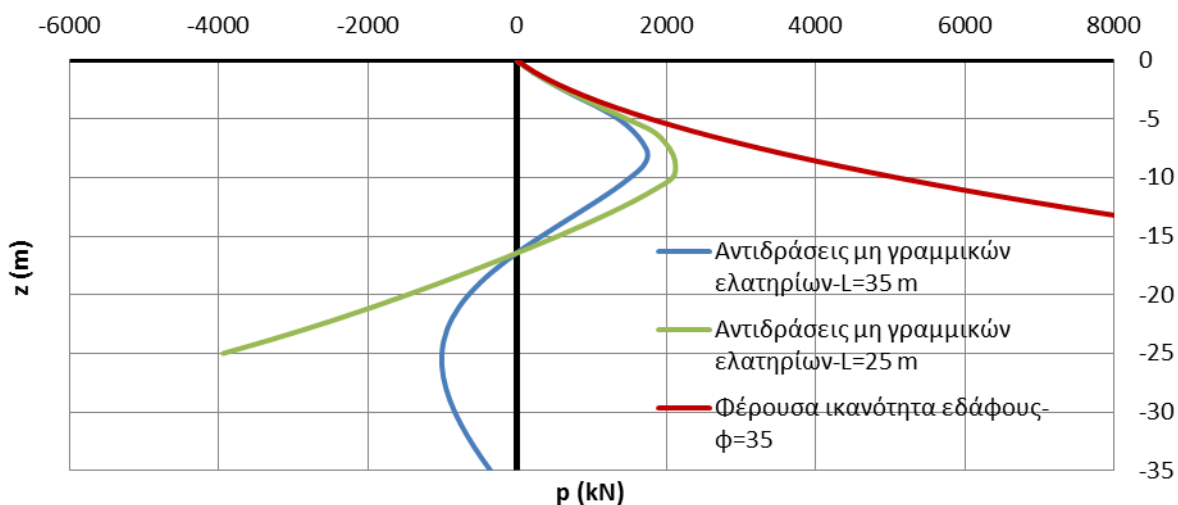
Επομένως σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, αυξάνεται το μήκος έμπηξης του πασσάλου στα 35m. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για πάσσαλο 35m παραθέτονται στη συνέχεια:



Σχήμα 6.19: Φέρουσα ικανότητα εδάφους και αντιδράσεις μη γραμμικών ελατηρίων- $L=35$ m.

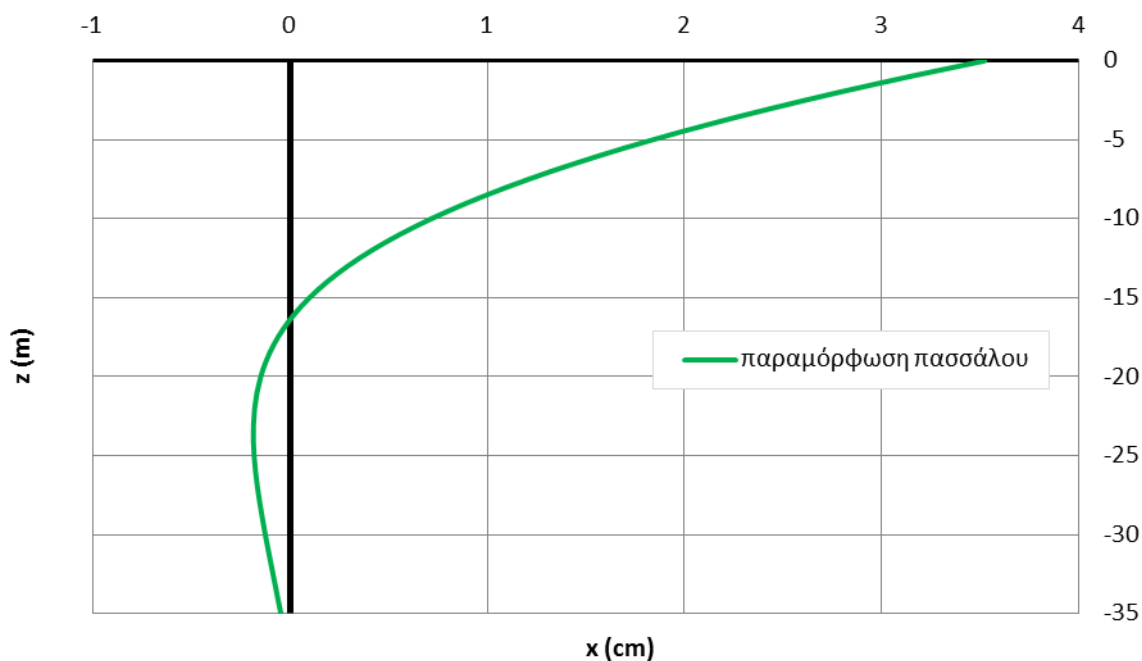
Στο Σχήμα 6.19 φαίνεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους καθώς και οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων για πάσσαλο μήκους 35m. Παρατηρούμε ότι στα πρώτα 3.5m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, το έδαφος φθάνει στην οριακή αντοχή του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται σε αυτή την περιοχή μια πλαστική ζώνη μέσα στο έδαφος.

Από το **Error! Reference source not found.**, όπου αποτυπώνονται οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων για μήκη 25m και 35m, προκύπτει ότι η αύξηση του μήκους έμπηξης οδηγεί σε μικρότερες αντιδράσεις στα μεγαλύτερα βάθη της θεμελίωσης. Επίσης, παρατηρείται ότι στη στάθμη $z=-16$ m ο πάσσαλος παρουσιάζει σημείο περιστροφής του, ανεξάρτητα από το μήκος του. Επιπλέον φαίνεται ότι όσο αυξάνει το μήκος έμπηξης, ο πάσσαλος γίνεται πιο εύκαμπτος, παρουσιάζοντας σε μεγαλύτερα βάθη και άλλα σημεία μηδενισμού των αντιδράσεων. Αυτό συμβαίνει διότι στα μεγαλύτερα βάθη το έδαφος γίνεται ακόμη πιο δύσκαμπτο και περιορίζει πολύ την μετατόπιση του πασσάλου επιβάλλοντας ουσιαστικά συνθήκες πάκτωσης στη περιοχή αυτή



Σχήμα 6.20: Φέρουσα ικανότητα εδάφους και αντιδράσεις μη γραμμικών ελατηρίων- $L=25$ m- $L=35$ m.

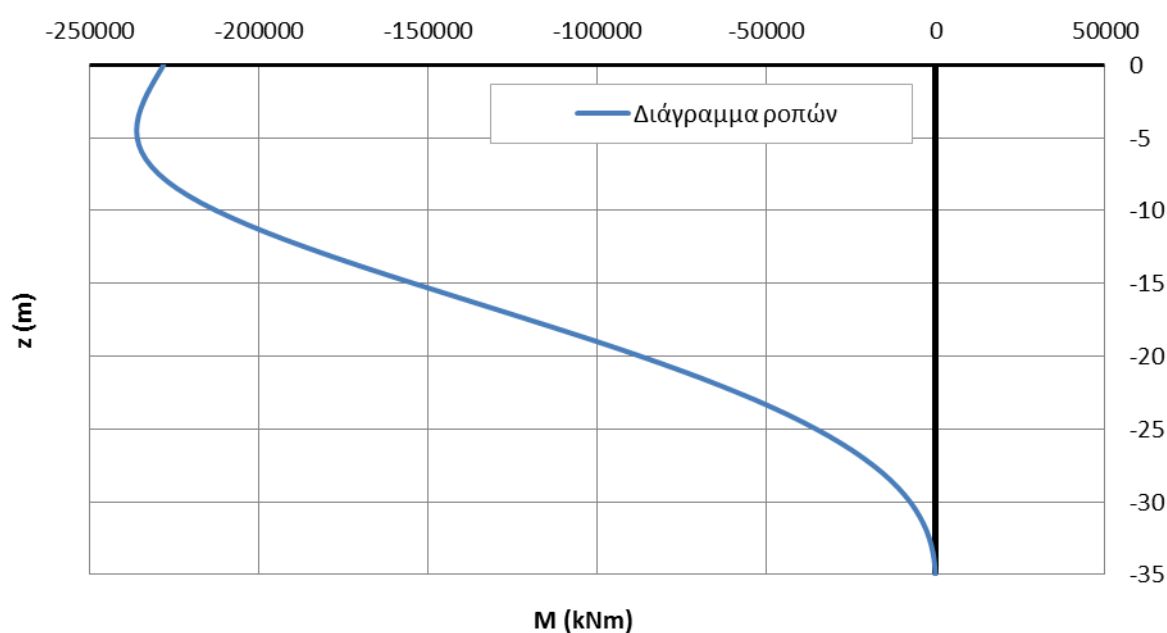
Στο Σχήμα 6.21 φαίνεται η παραμορφωμένη εικόνα του πασσάλου με μήκος 35m, απ' όπου προκύπτει ότι η οριζόντια μετατόπιση της κεφαλής του είναι ίση με 3.52cm, μειωμένη περίπου κατά 15% σε σχέση με τον πάσσαλο μήκους 25m. Αντίστοιχα, η αιχμή του παρουσιάζει σχεδόν μηδενική μετατόπιση (0.045cm).



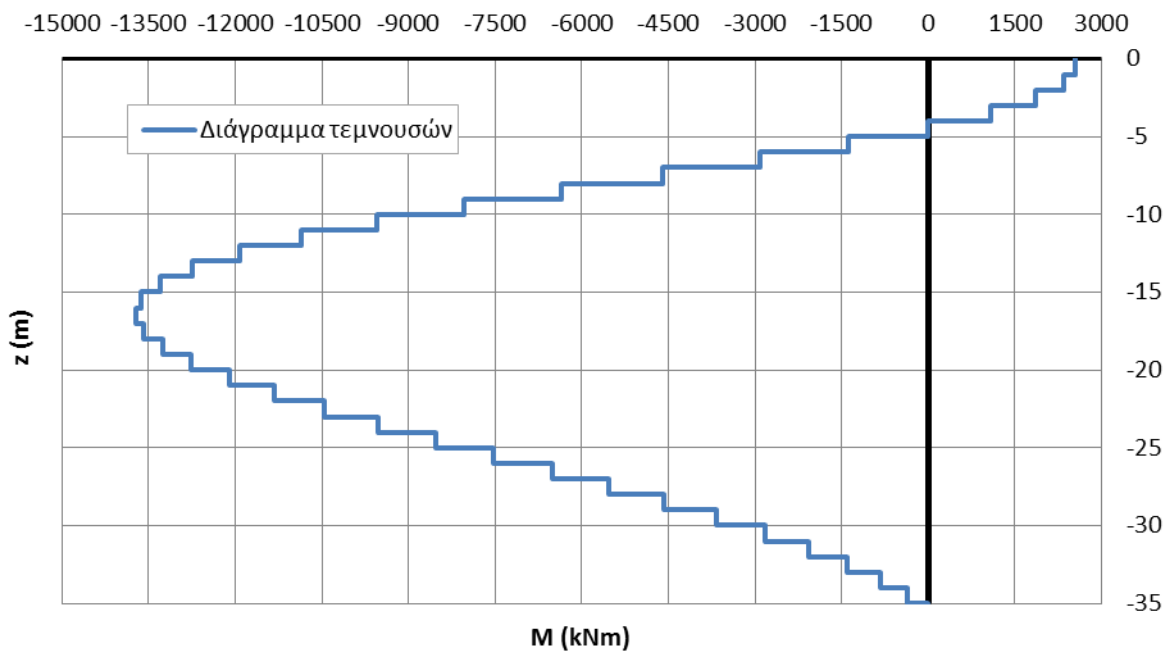
Σχήμα 6.21: Παραμόρφωση πασσάλου-L=35m

Από τα διάγραμμα αντιδράσεων και την παραμορφωμένη κατάσταση του πασσάλου οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι ο πάσσαλος με 35m μήκος έμπηξης ικανοποιεί τα κριτήρια σχεδιασμού.

Στη συνέχεια αποτυπώνονται τα διαγράμματα ροπών και τεμνουσών που αναπτύσσονται κατά μήκος του πασσάλου.



Σχήμα 6.22: Διάγραμμα ροπών κατά μήκος του πασσάλου.



Σχήμα 6.23: Διάγραμμα τεμνουσών κατά μήκος του πασσάλου.

Από το διάγραμμα των ροπών (Σχήμα 6.22) προκύπτει ότι η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή κατά μήκος του πασσάλου, προκύπτει 4m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας και είναι ίση με 235841.0kNm.

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.23) προκύπτει πως 16m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας ($z=-16.0\text{m}$) αναπτύσσεται η μέγιστη τέμνουσα κατά μήκος του πασσάλου. Το πλάτος του "πηδήματος" του διαγράμματος των τεμνουσών που γίνεται ανά ένα μέτρο ισούται με την αντίδραση του μη-γραμμικού ελατηρίου που υπάρχει στο αντίστοιχο υψόμετρο. Όπως είναι προφανές 16m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας του πλάτος του "πηδήματος" είναι ουσιαστικά μηδενικό που σημαίνει ότι η αντίδραση του ελατηρίου σε αυτό το υψόμετρο είναι μηδενική. Σαν αποτέλεσμα και η μετακίνηση του πασσάλου σε αυτό το σημείο είναι μηδενική. Επαληθεύεται λοιπόν, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πως 16m κάτω από το πυθμένα είναι το σημείο περιστροφής του πασσάλου. Τέλος, προκύπτει ότι για 35m μήκος έμπηξης του πασσάλου οι αντιδράσεις των ελατηρίων είναι πιο μικρές (μικρότερα «άλματα») κοντά στην αιχμή του πασσάλου με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται σε αυτή τη περιοχή μικρότερες τέμνουσες δυνάμεις και ουσιαστικά να γίνεται μια ομαλή απομείωση των εντατικών μεγεθών στην άκρη του πασσάλου.

6.5 Υπολογισμός ισοδύναμου τμήματος

Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, για την συγκεκριμένη φόρτιση και τα δεδομένα εδαφικά χαρακτηριστικά, προέκυψε πάσσαλος μήκους 35m, διαμέτρου 6m και πάχους 0.060m. Επίσης, για τον εν λόγω πάσσαλο προκύπτει οριζόντια μετατόπιση της κεφαλής του $\delta=3.52\text{cm}$ και στροφή περί τον άξονα $y-y$, $\varphi=3.925 \times 10^{-3}$ rad.

Για τον πάσσαλο με τα παραπάνω χαρακτηριστικά υπολογίζεται ένα ισοδύναμο τμήμα, το οποίο εισάγεται στις αναλύσεις που γίνονται με το πρόγραμμα FAST και προσομοιώνει την επιρροή του πασσάλου και του εδάφους θεμελίωσης στον φορέα στήριξης και τον πύργο της ανεμογεννήτριας. Ο προσδιορισμός του γίνεται με την Αρχή Δυνατών Έργων και περιγράφεται στη συνέχεια.

Η αρχή των δυνατών έργων επιτρέπει τον καθορισμό οποιουδήποτε παραμορφωσιακού μεγέθους σε ένα φορέα κάτω από μια δεδομένη φόρτιση, υπό την προϋπόθεση να έχει καθοριστεί προηγουμένως το διάγραμμα των καμπτικών ροπών για τη φόρτιση αυτή [6.3].

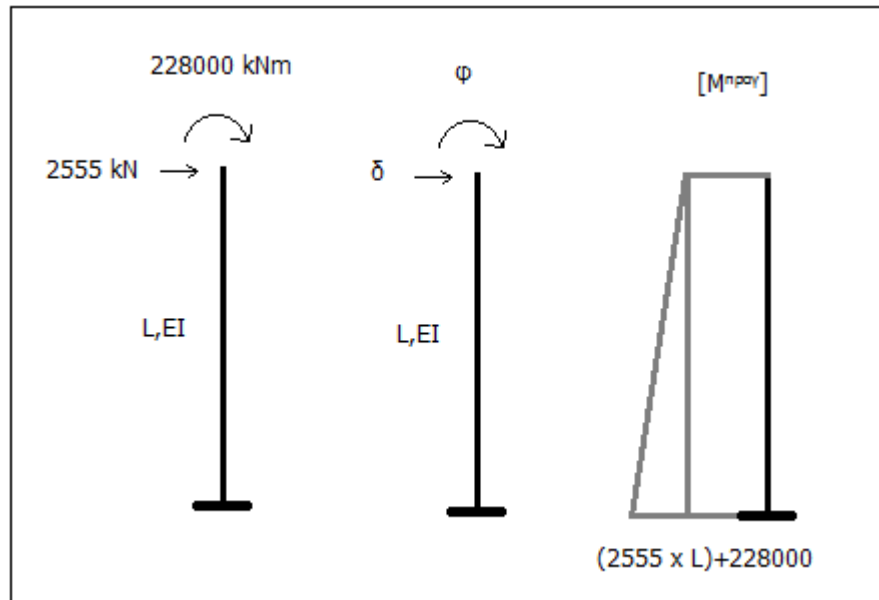
Με δεδομένα την μετατόπιση δ , τη στροφή φ και τα φορτία που ασκούνται στην κεφαλή του πασσάλου, αναζητούμε τα χαρακτηριστικά (L , EI) ενός ισοδύναμου προβόλου για τον οποίο ασκώντας τα παραπάνω εντατικά μεγέθη, αναπτύσσει στο ελεύθερο άκρο του τα αντίστοιχα παραμορφωσιακά μεγέθη (δ, φ).

Από την Α.Δ.Ε προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις (6-43,6-44):

$$1 \times \varphi = \int M_1^{\delta_{\text{δυν}}} \times \frac{M^{\text{πραγ}}}{EI} ds \Rightarrow \varphi = \frac{1}{2EI} L [228000 + (228000 + 2555L)] \quad (6-52)$$

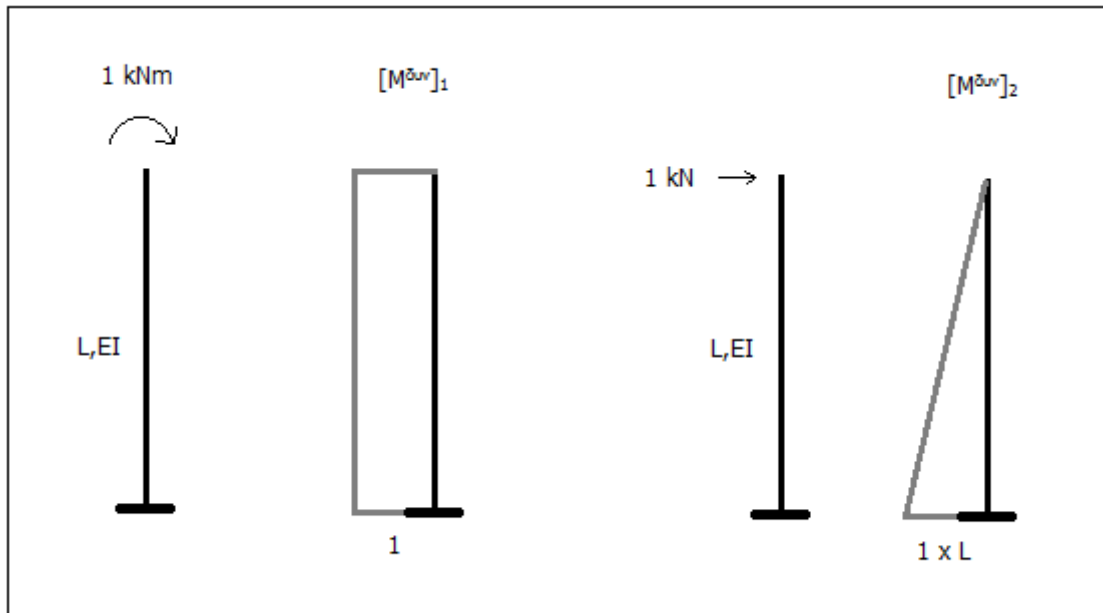
$$1 \times \delta = \int M_2^{\delta_{\text{δυν}}} \times \frac{M^{\text{πραγ}}}{EI} ds \Rightarrow \delta = \frac{1}{6EI} L^2 [228000 + 2(228000 + 2555L)] \quad (6-53)$$

απ' όπου οι άγνωστοι είναι οι L, EI του ισοδύναμου τμήματος.



Σχήμα 6.24: Α.Δ.Ε-Πραγματική φόρτιση

Από την επίλυση του συστήματος προκύπτουν μήκος ισοδύναμου τμήματος $L_{\text{ισ}}=17.43\text{m}$ και $EI_{\text{ισ}}=1110.9 \times 10^6 \text{ kNm}^2$



Σχήμα 6.25: Α.Δ.Ε-Δυνατές φορτίσεις

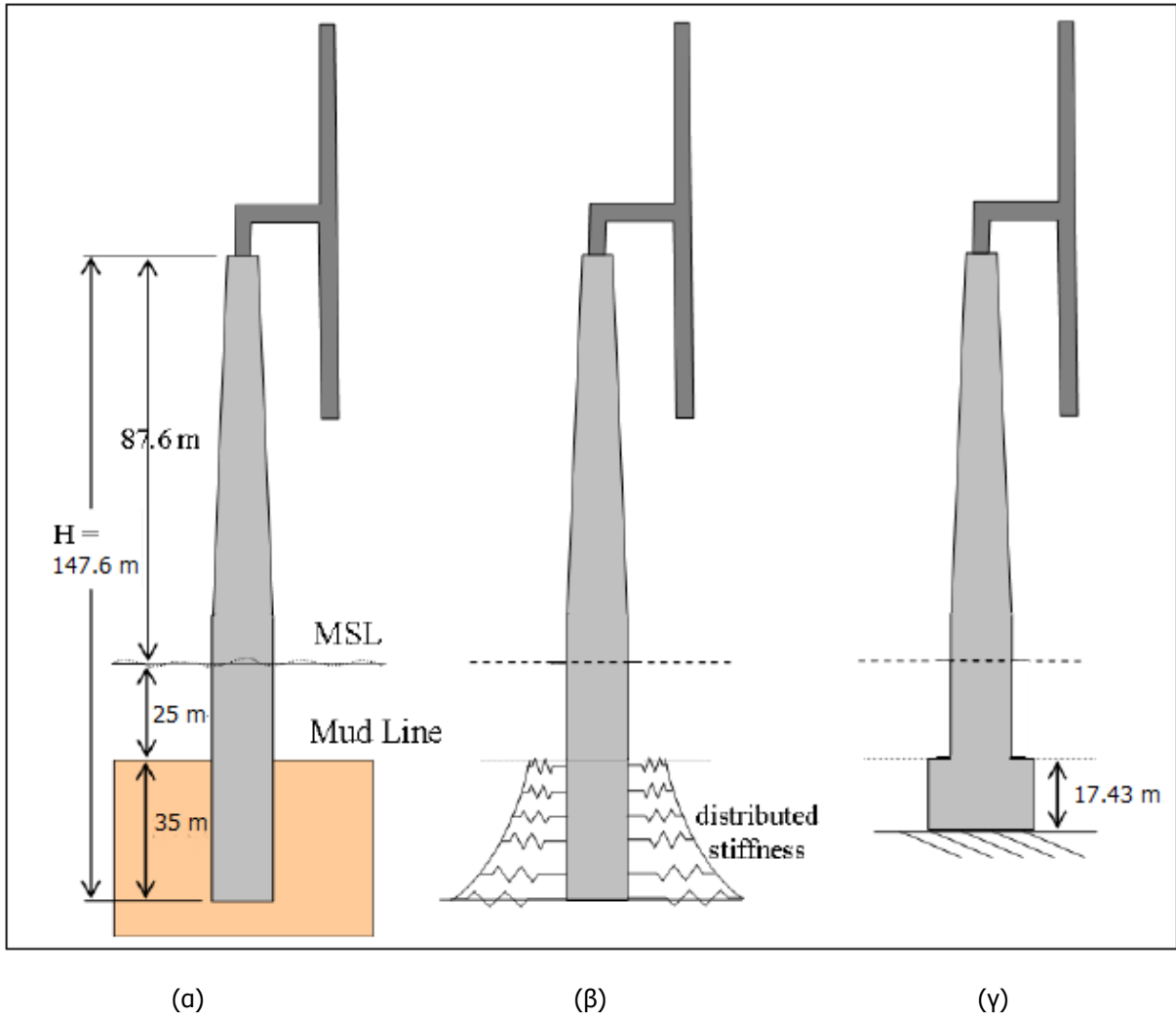
Για $E=210000000\text{kPa}$ προκύπτει ροπή αδρανείας της διατομής $I=5.29\text{m}^4$ για την οποία επιλέγοντας διάμετρο 6.0m , προκύπτει πάχος 0.066m . Τα χαρακτηριστικά του ισοδύναμου προβόλου φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6-12: Χαρακτηριστικά ισοδύναμου τμήματος.

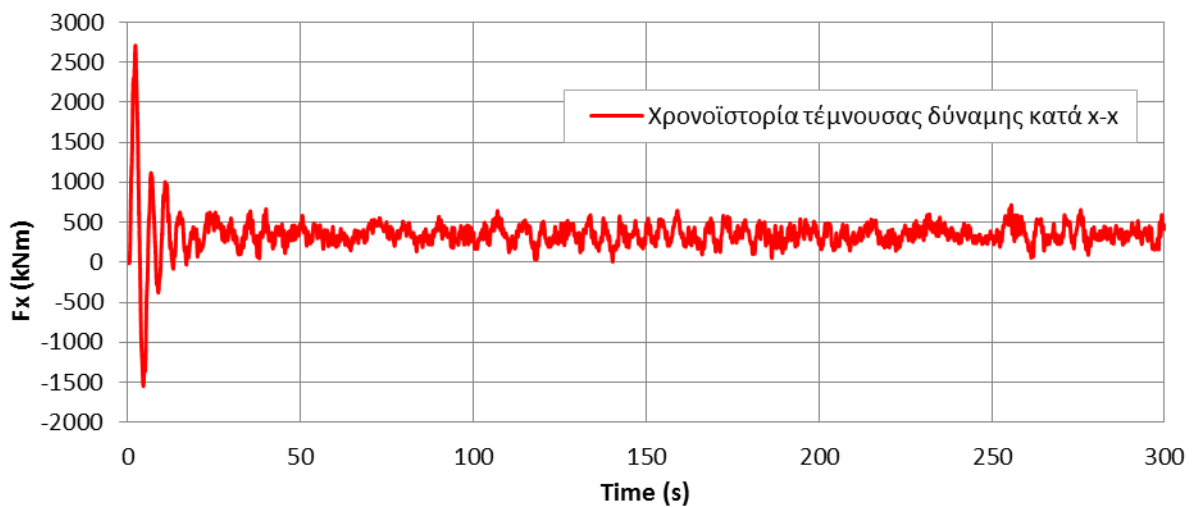
L_{σ}	m	17.43	Μήκος ισοδύναμου τμήματος
I_{σ}	m^4	5.29	Ροπή αδρανείας ισοδύναμου τμήματος
D_{σ}	m	6	Διάμετρος διατομής ισοδύναμου τμήματος
t_{σ}	m	0.066	Πάχος διατομής ισοδύναμου τμήματος

6.6 Αποτελέσματα ισοδύναμου φορέα

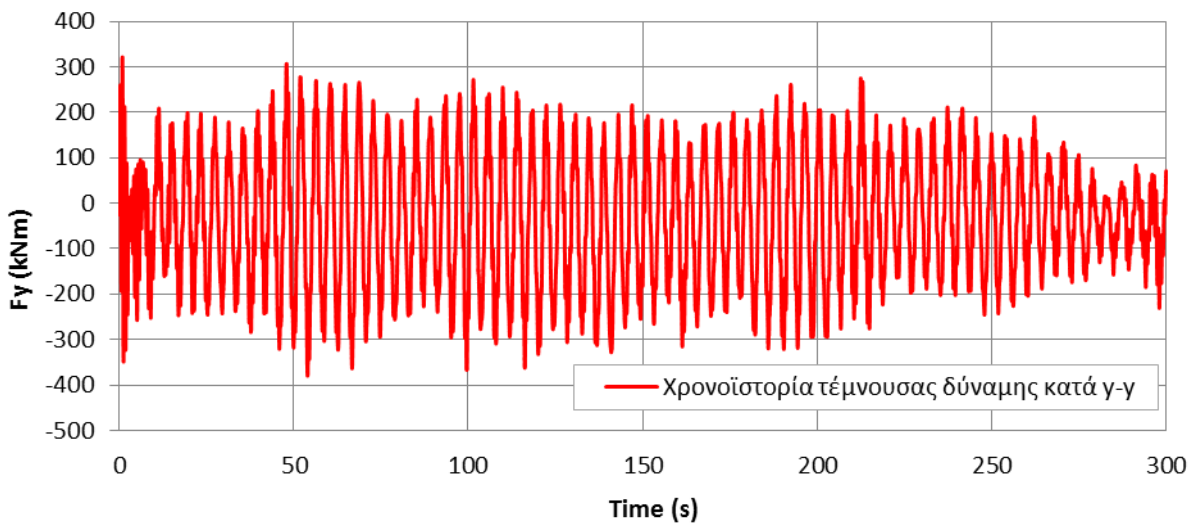
Το ισοδύναμο τμήμα που υπολογίστηκε με τη διαδικασία που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες, προστίθενται στον αρχικό φορέα δημιουργώντας ένα νέο φορέα, η γεωμετρία του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 6.26 (γ). Για τον ισοδύναμο αυτόν φορέα γίνονται αναλύσεις στο FAST, ώστε να εξετασθεί ο βαθμός επιρροής του συστήματος εδάφους-πασσάλου, στα εντατικά μεγέθη και τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις του πύργου και κατ' επέκταση στους ελέγχους επάρκειας της αντοχής του πύργου στην Ο.Κ.Α. Στη συνέχεια απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών στη βάση του πύργου, όπως προκύπτουν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον ισοδύναμο φορέα.



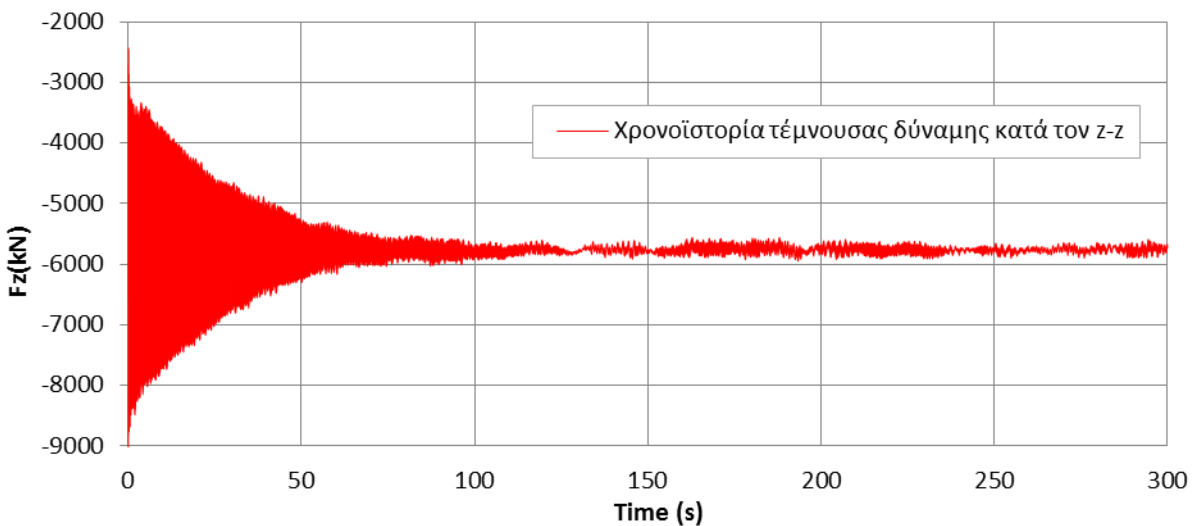
Σχήμα 6.26: Πορεία ανάλυσης: (α) Πραγματικός φορέας, (β) Ανάλυση αρχικού φορέα στο FAST και στο ADINA, (γ) Ανάλυση ισοδύναμου φορέα στο FAST[6.4].



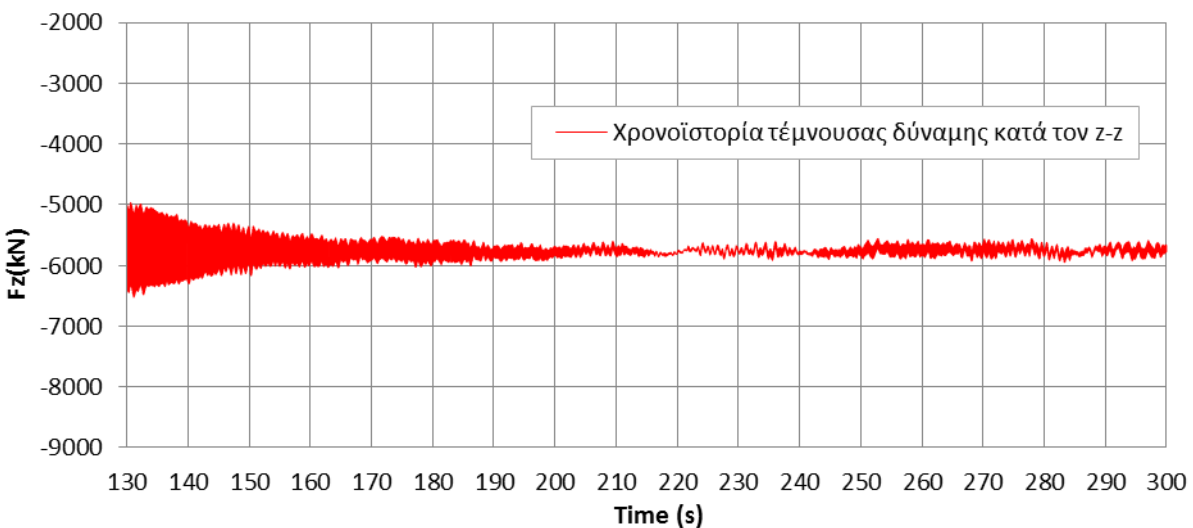
Σχήμα 6.27: Ισοδύναμος φορέας-Χρονοϊστορία τέμνουσας δύναμης κατά τον άξονα x-x στη βάση του πύργου.



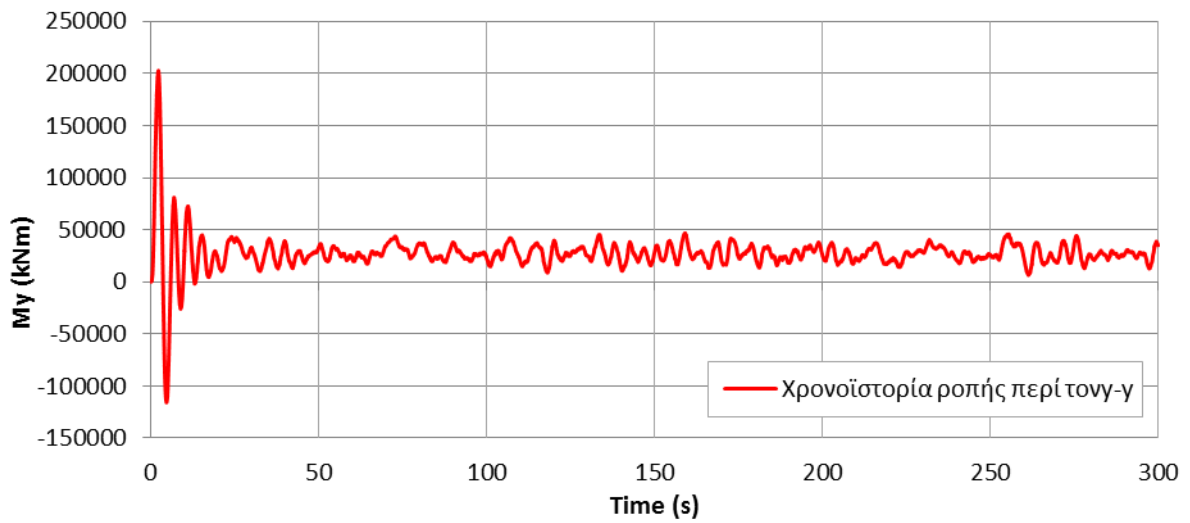
Σχήμα 6.28: Ισοδύναμος φορέας-Χρονοϊστορία τέμνουσας δύναμης κατά τον άξονα γ-γ στη βάση του πύργου.



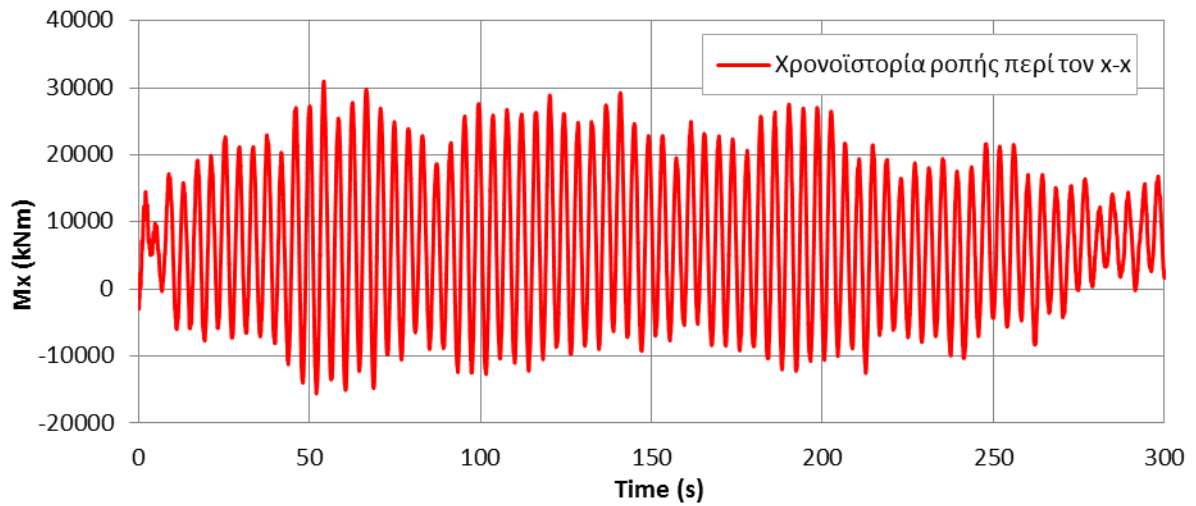
Σχήμα 6.29: Ισοδύναμος φορέας-Χρονοϊστορία αξονικής δύναμης κατά τον άξονα z-z στη βάση του πύργου.



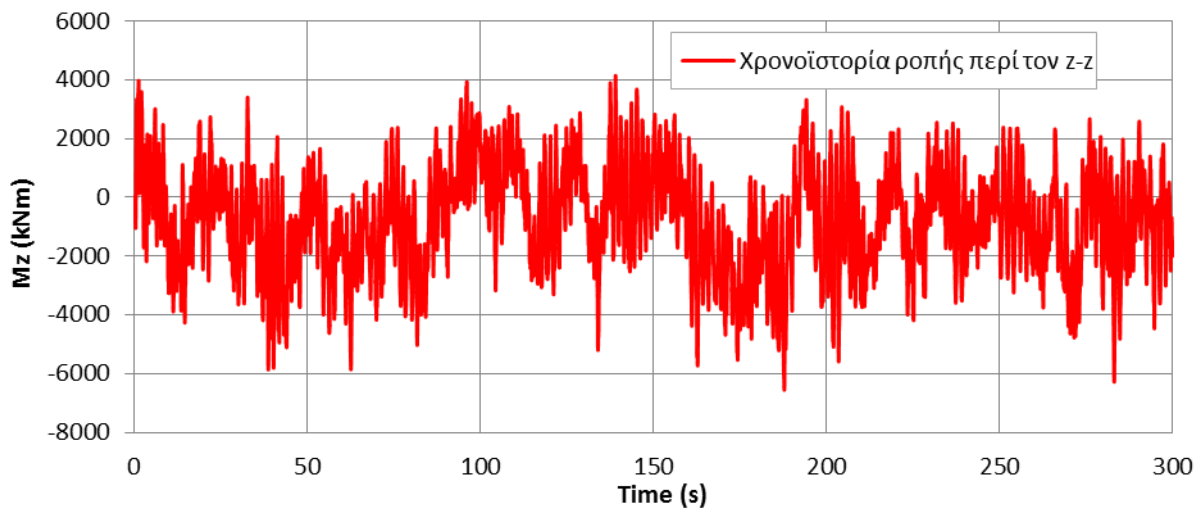
Σχήμα 6.30: Ισοδύναμος φορέας-Χρονοϊστορία αξονικής δύναμης κατά τον άξονα z-z στη βάση του πύργου στο διάστημα 130-300s.



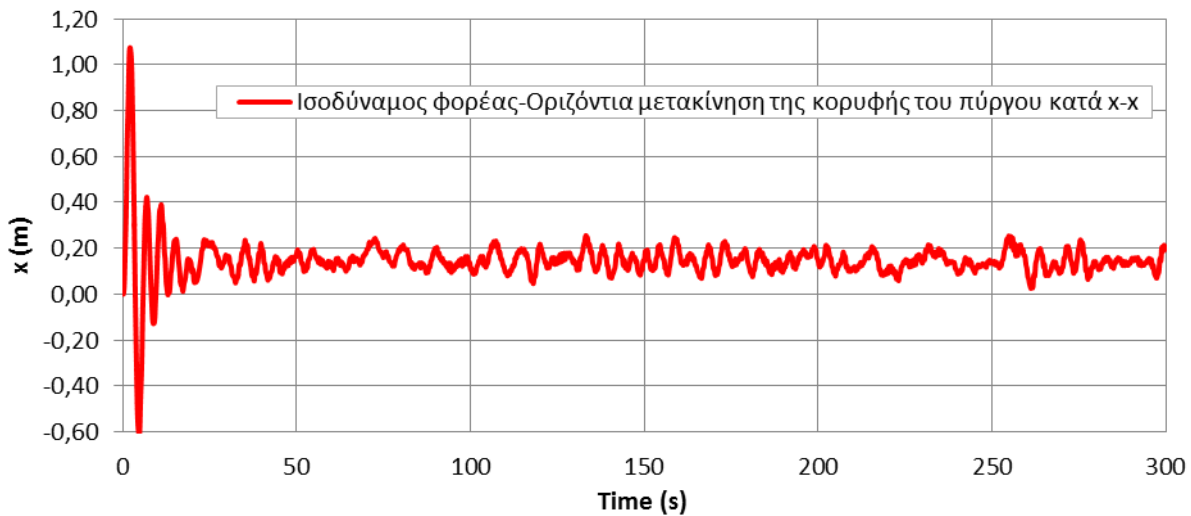
Σχήμα 6.31: Ισοδύναμος φορέας-Χρονοϊστορία καμπτικής ροπής περί τον άξονα γ-γ στη βάση του πύργου.



Σχήμα 6.32: Ισοδύναμος φορέας-Χρονοϊστορία καμπτικής ροπής περί τον x-x άξονα στη βάση του πύργου.



Σχήμα 6.33: Ισοδύναμος φορέας-Χρονοϊστορία στρεπτικής ροπής περί τον z-z άξονα στη βάση του πύργου

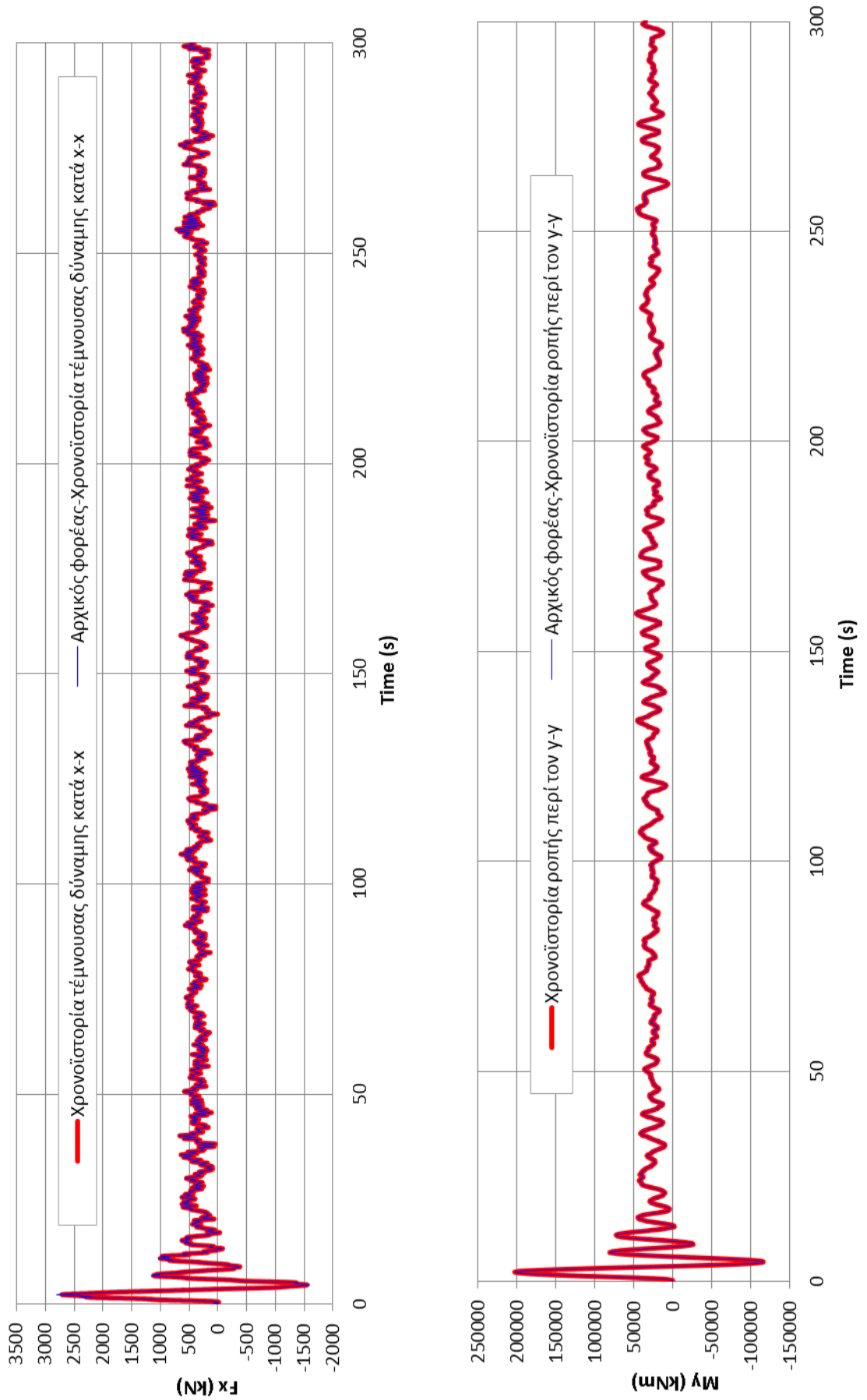


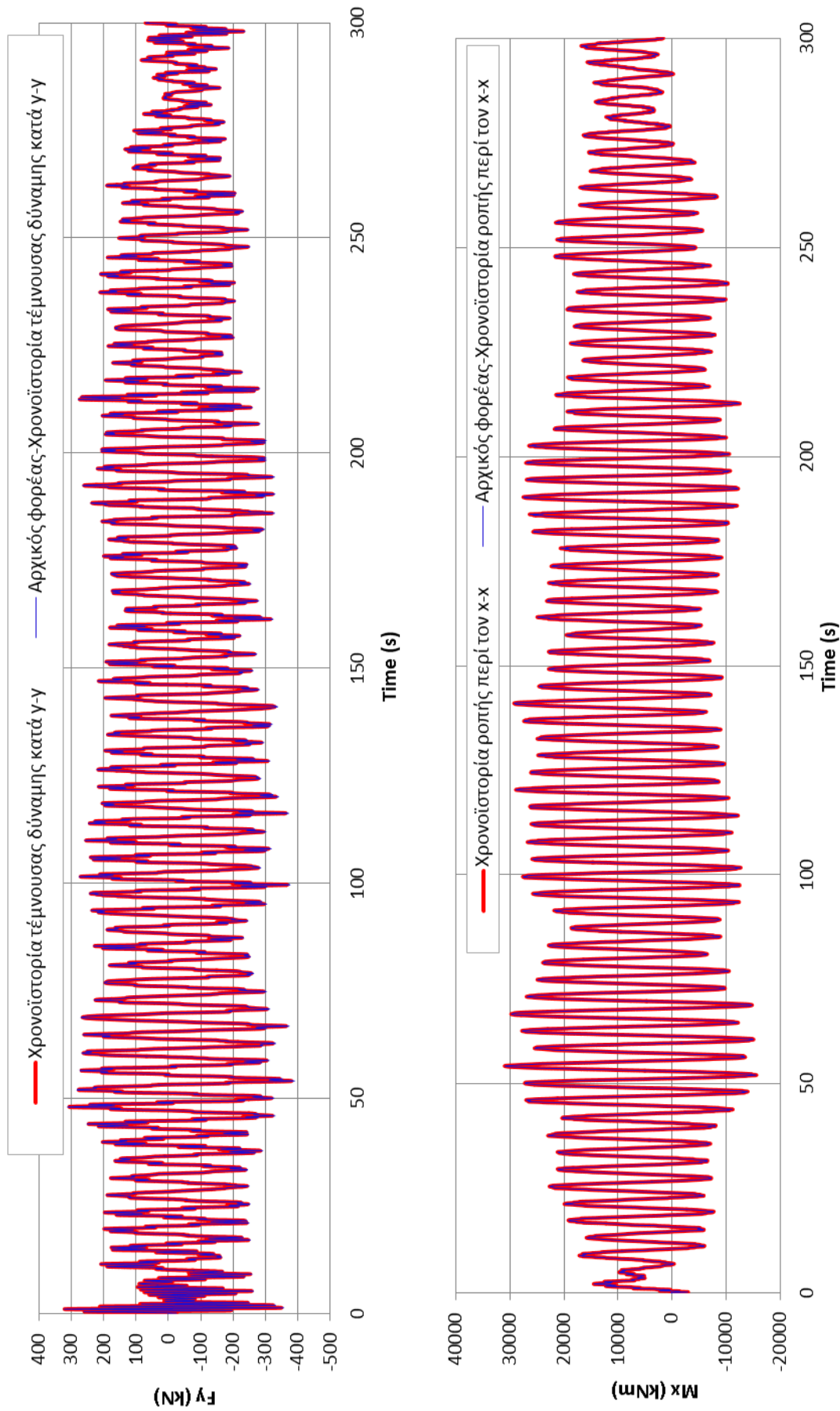
Σχήμα 6.34: Χρονοϊστορία μετακίνησης της κορυφής του πύργου κατά x-x.

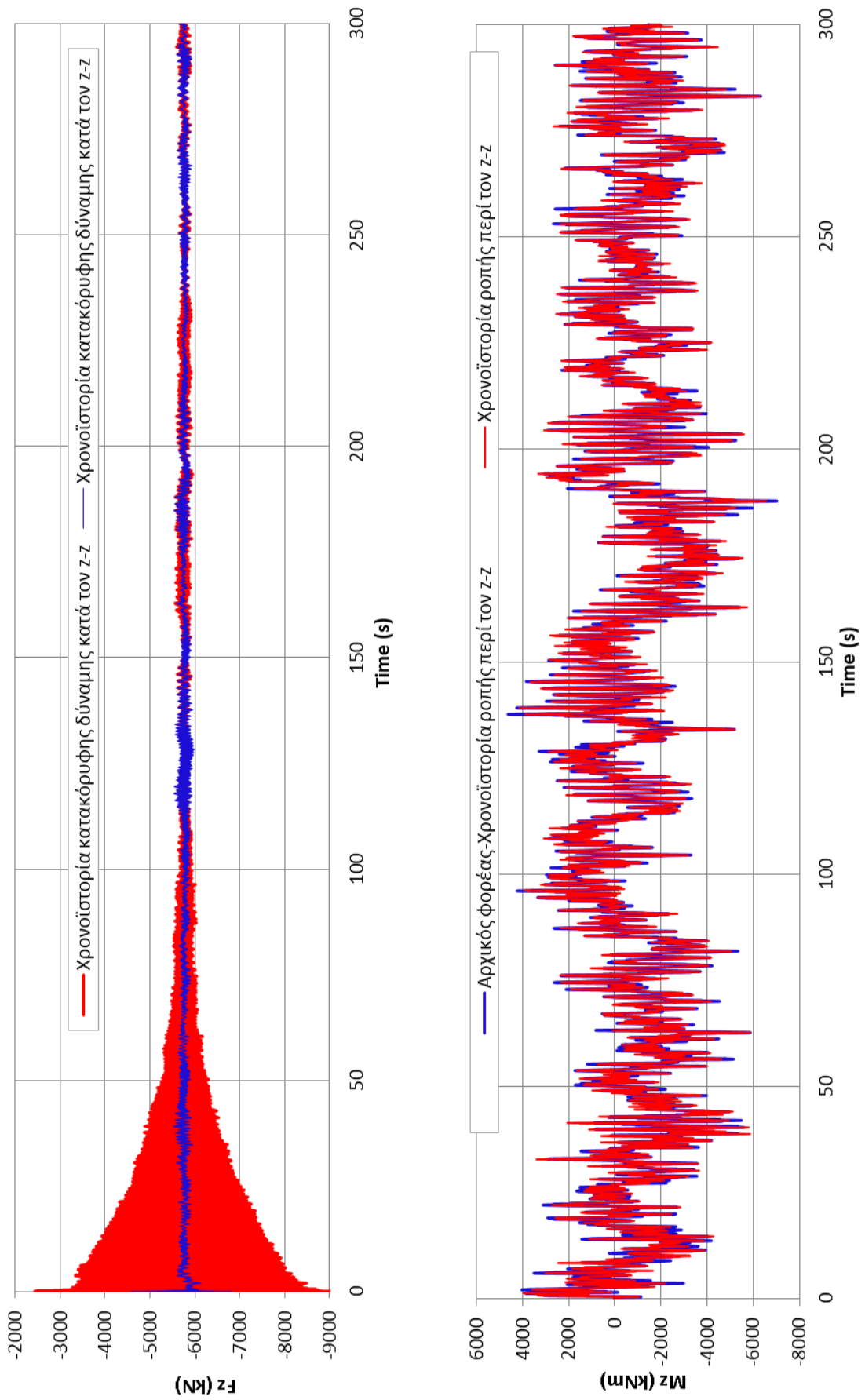
Από τις παραπάνω χρονοϊστορίες εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από τον ισοδύναμο φορέα, παρατηρούμε την ύπαρξη ακραίων τιμών στα πρώτα 10 δευτερόλεπτα των χρονοϊστοριών των εντατικών μεγεθών F_x και M_y , όπως ακριβώς παρατηρήθηκαν στις αντίστοιχες χρονοϊστορίες του τον αρχικό φορέα.

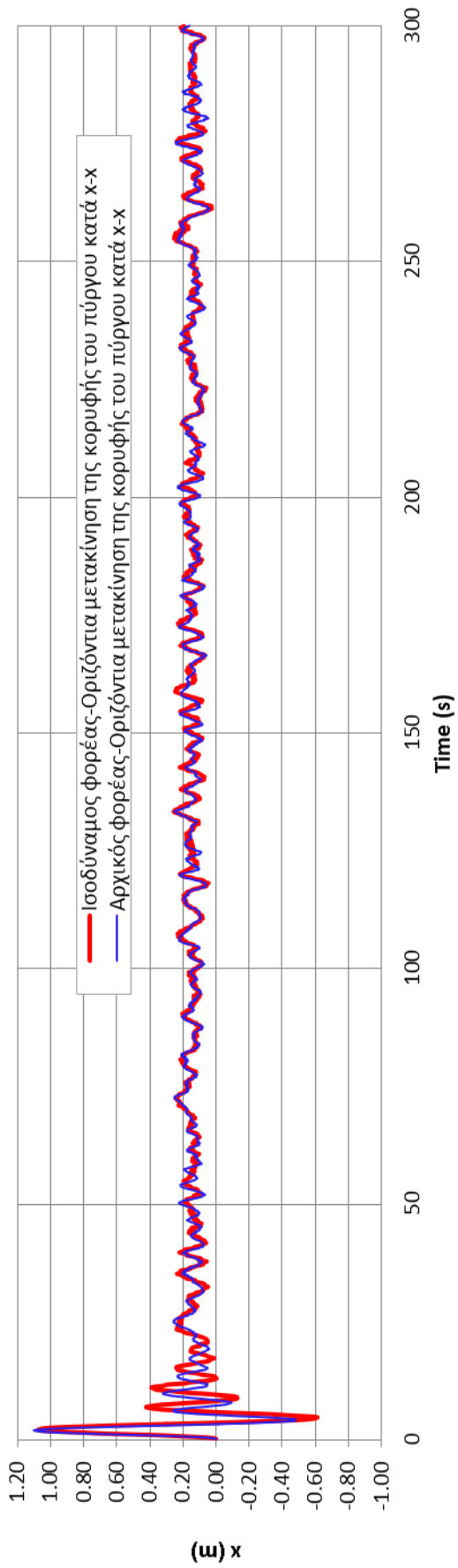
Επιπλέον, η χρονοϊστορία της αξονικής δύναμης F_z , η οποία αντανακλά την δύναμη που εντίνει τον πύργο λόγω του ίδιου βάρους του, δεν έχει την αναμενόμενη μορφή καθώς τα πρώτα περίπου 120 δευτερόλεπτα της ανάλυσης παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Όμως οι διακυμάνσεις αυτές δεν προκύπτουν με λογική συνέπεια, αφού το ίδιο βάρος του πύργου είναι σταθερό με το χρόνο. Η μορφή αυτή του διαγράμματος, ίσως οφείλεται σε αριθμητική αστάθεια που παρουσιάζει στο σημείο αυτό το λογισμικό FAST.

Αντίθετα όμως αν εξαιρέσουμε τα πρώτα δευτερόλεπτα της ανάλυσης, παρατηρούμε ότι η χρονοϊστορία της αξονικής F_z έχει μια πιο «λογική» μορφή, δηλαδή οι διακυμάνσεις αποκτούν πολύ μικρό εύρος και η τιμή της F_z είναι σχεδόν σταθερή (Σχήμα 6.30).









Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των ιστοριών των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών στη βάση του πύργου, που προκύπτουν από τον αρχικό και τον ισοδύναμο φορέα. Παρατηρώντας τα διαγράμματα, προκύπτει εξαιρετική ομοιομορφία των αντίστοιχων ιστοριών κάθε εντατικού μεγέθους για τους δύο φορείς. Εξαιρέση αποτελεί η ιστορία της αξονικής δύναμης F_z , εξαιτίας της ιδιομορφίας που παρουσιάζει η αντίστοιχη του ισοδύναμου φορέα για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Συγκρίνοντας τα μέγιστα των απόλυτων τιμών κάθε αναπτυσσόμενου εντατικού μεγέθους, προκύπτει αύξηση για όλα τα εντατικά μεγέθη του ισοδύναμου φορέα, η οποία φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6-13):

Πίνακας 6-13: Σύγκριση εντατικών μεγεθών-Αρχικός φορέας-Ισοδύναμος φορέας.

		Αρχικός φορέας	Ισοδύναμος φορέας	Ποσοστιαία μεταβολή
maxMx	kNm	26750	30970	+15.8%
maxMy	kNm	202600	202800	+0.01%
maxMz	kNm	-6556	-7016	+7.0%
maxFx	kN	2631	2804	+6.6%
maxFy	kN	-345.6	-390.1	+12.9%
maxFz	kN	-6813	-9443	+38.6%

Παρατηρούμε όμως ότι το κρίσιμότερο εντατικό μέγεθος, η καμπτική ροπή περί τον άξονα $\gamma-\gamma$ (M_y), παραμένει σταθερή. Επομένως η προσθήκη του ισοδύναμου τμήματος, δεν αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τους ελέγχους επάρκειας της αντοχής του πύργου.

Αντίστοιχα συγκρίνοντας τις ιστορίες μετακίνησης στην κορυφή του πύργου κατά τον άξονα $x-x$ για τους δύο φορείς, παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραμόρφωση κατά αυτήν την έννοια είναι ίδια και για τα δύο μοντέλα. Η διαπίστωση αυτή μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για την συγκεκριμένη εφαρμογή το ισοδύναμο τμήμα που προστέθηκε, δηλαδή το τμήμα που προσομοιώνει το σύστημα πασσάλου-εδάφους, είναι αρκετά δύσκαμπτο, δημιουργώντας συνθήκες πάκτωσης στη στάθμη του πυθμένα της θάλασσας.

Αμελώντας τα πρώτα 10 δευτερόλεπτα της ανάλυσης, προκύπτουν οι παρακάτω συνδυασμοί φόρτισης με τους οποίους γίνεται ο έλεγχος επάρκειας της διατομής στη βάση του πύργου:

Συνδυασμός		M_x (KNm)	M_y (KNm)	M_z (KNm)	F_x (KN)	F_y (KN)	F_z (KN)
1	maxMx	30970	34300	-1355	422	-316	-6113
2	maxMy	-4755	72730	-1817	979	125	-7716
3	maxMz	-7760	22560	-7016	214	170	-5704
4	maxFx	-4002	71530	-590	1	188	-7640
5	maxFy	29000	33400	-378	479	-390	-6074
6	maxFz	-5820	72290	-2	934	78	-7736

Οι αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις που προκύπτουν από τον παραπάνω συνδυασμό:

$\sigma_{x,E,N}$ (kPa)	$\sigma_{x,E,M}$ (kPa)	$\sigma_{x,ED}$ (kPa)	$\tau_{x\theta,ED}$ (kPa)
-12066	61084	-73149	1186
-15230	96339	-111568	2695
-11258	31534	-42793	-3557
-15080	94695	-109775	3770
-11989	58467	-70455	2187
-15269	95861	-111130	2308

Για τον δυσμενέστερο από τους παραπάνω συνδυασμό φόρτισης, οι έλεγχοι επάρκειας της διατομής στη βάση του πύργου είναι οι ακόλουθοι:

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} = 0.45 \quad (6-54)$$

$$\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} = 0.09 \quad (6-55)$$

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_t} = 0.247 \quad (6-56)$$

Παρατηρούμε ότι με την προσθήκη του ισοδύναμου τμήματος εξακολουθούν να ικανοποιούνται οι έλεγχοι επάρκειας της αντοχής του πύργου. Παρ' όλα αυτά, από τις σχέσεις 6-54 και 6-55 προκύπτει ότι η προσθήκη του ισοδύναμου τμήματος προκαλεί αύξηση των αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων ($\sigma_{x,Ed}$), οι οποίες πλέον φθάνουν στο 45% της αντοχής έναντι λυγισμού λόγω θλίψης, από 35% που ήταν για τον αρχικό φορέα. Αντίστοιχα από τη σχέση 6-55, προκύπτει ότι οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις ($\tau_{x\theta,Rd}$) του ισοδύναμου φορέα φθάνουν στο 9% της αντοχής έναντι λυγισμού λόγω διάτμησης, από 3% για τον αρχικό φορέα. Επίσης από τη σχέση αλληλεπίδρασης 6-56, προκύπτει ότι για τον ισοδύναμο φορέα φθάνει στο 24.7% της οριακής τιμής της, έναντι 15.2% που ήταν αρχικά.

Βιβλιογραφία

- [6.1] Α. Αναγνωστόπουλος, Β. Παπαδόπουλος, «Θεμελιώσεις με πασσάλους»
- [6.2] EUROPEAN STANDARD, Eurocode 3 – Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures
- [6.3] Σταυρίδης Λ. «Στατική των δομικών φορέων»
- [6.4] Gunjit B. Overview of BModes, Natural Renewable Energy Laboratory (NREL)

7 Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διπλωματική εργασία επισημαίνονται στη συνέχεια:

Όσον αφορά τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες:

- Η αιολική ενέργεια και ειδικότερα η υπεράκτια αποτελούν αιχμή στην παγκόσμια προσπάθεια που διεξάγεται για την απεξάρτηση των σύγχρονων κοινωνιών από τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας (ορυκτά καύσιμα).
- Η παραγωγική δυναμικότητα, η απόσταση από την ακτή και το βάθος εγκατάστασης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών διαρκώς αυξάνονται.
- Υπάρχουν διάφορα είδη φορέων στήριξης θαλάσσιων ανεμογεννητριών, η επιλογή των οποίων εξαρτάται κυρίως από το βάθος της θάλασσας στην περιοχή εγκατάστασης. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος στήριξης είναι με μονοπάσσαλο σύστημα με ποσοστό 75%
- Υπερτερούν έναντι των ενδοχώριων καθώς οι θαλάσσιες περιοχές προσφέρουν κατά κανόνα υψηλότερο αιολικό δυναμικό. Επίσης εξαλείφονται θέματα χωροθέτησης, αισθητικής και ακουστικής όχλησης.
- Υστερούν έναντι των χερσαίων ανεμογεννητριών καθώς έχουν υψηλότερο βαθμό δυσκολίας και κόστος κατασκευής και συντήρησης, καθώς και μεταφοράς του παραγόμενου ρεύματος στην περιοχή κατανάλωσης του.

Όσον αφορά το κανονιστικό πλαίσιο περί θαλάσσιων ανεμογεννητριών:

- Παρ' ότι οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες αποτελούν σχετικά πρόσφατο κατασκευαστικό κλάδο, έχουν αναπτυχθεί αρκετοί κανονισμοί, πλαίσια και τεύχη κατευθυντήριων οδηγιών για το σχεδιασμό τους, βασισμένα κυρίως στη σημαντική εμπειρία από τις υπεράκτιες πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου.

Όσον αφορά τη διαδικασία σχεδιασμού:

- Αρχικά προσδιορίζονται οι τοπικές περιβαλλοντικές, τοπογραφικές και γεωλογικές συνθήκες. Με βάση τα παραπάνω σχεδιάζονται τα χαρακτηριστικά των κατασκευαστικών μερών της ανεμογεννήτριας και επιλέγεται ο μηχανολογικός εξοπλισμός της.

Στη συνέχεια καθορίζονται οι καταστάσεις σχεδιασμού και οι συνδυασμοί φόρτισης της ανεμογεννήτριας, προσδιορίζονται τα φορτία και η επίδραση τους για κάθε συνδυασμό και γίνεται έλεγχος επάρκειας των χαρακτηριστικών της ανεμογεννήτριας που επιλέχθηκαν αρχικά για τις διάφορες οριακές καταστάσεις

- Η ανεμογεννήτρια πρέπει να ελέγχεται σε οριακές καταστάσεις αστοχίας, λειτουργικότητας, κόπωσης και τυχηματικής φόρτισης.

Όσον αφορά τα αεροδυναμικά φορτία της κατασκευής:

- Οι συνθήκες πνοής ανέμου που θεωρούνται για τον υπολογισμό των φορτίων επί της ανεμογεννήτριας, διακρίνονται σε κανονικές (normal wind conditions) και σε ακραίες συνθήκες (extreme wind conditions).
- Το τελικό προφίλ ταχύτητας ανέμου προκύπτει από μια επαλληλία ενός μέσου-κανονικού προφίλ και ενός μοντέλου τυρβώδους ροής.

Όσον αφορά τα φορτία θαλασσιών κυμάτων επί της κατασκευής:

- Για την εκτίμηση των φορτίων σχεδιασμού επί της ανεμογεννήτριας θεωρούνται διαφορετικές καταστάσεις κυματικής φόρτισης, οι οποίες διακρίνονται σε κανονικές (Normal Sea State) και ακραίες (Severe Sea State). Οι παράμετροι σχεδιασμού με βάση τις συνθήκες κατάστασης θάλασσας (design sea state) καθορίζονται από το φάσμα του κυματισμού (S_n), το χαρακτηριστικό ύψος του κύματος (H_s), την περίοδο της μέγιστης τιμής (κορυφής) του φάσματος (T_p), καθώς και τη μέση κατεύθυνση δράσης του κυματισμού, θ_{wm} .

Όσον αφορά τους ελέγχους επάρκειας της κατασκευής στην Ο.Κ.Α:

- Γίνονται με βάση τις διατάξεις του EN 1993-1-6 ο οποίος αναφέρεται σε κελύφη, θεωρώντας χάλυβα με χαρακτηριστική τάση διαρροής (f_{yk}) που κυμαίνεται μεταξύ 265 MPa και 355 MPa.
- Απαιτούνται ξεχωριστοί έλεγχοι για τον πύργο και τον πάσσαλο της ανεμογεννήτριας.
- Γίνονται για ρεαλιστικούς συνδυασμούς φόρτισης, θεωρώντας κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας.
- Ο προσδιορισμός της αντοχής έναντι λυγισμού της κατασκευής εξαρτάται από το σχήμα, τη γεωμετρία, τις συνοριακές συνθήκες, τις αρχικές ατέλειες και την ποιότητα των κελυφωτών μελών της, καθώς και από χαρακτηριστική τάση διαρροής του χάλυβα.
- Οι έλεγχοι υπέρβασης της αντοχής εξαρτώνται από το είδος των αναπτυσσόμενων τάσεων επί της κατασκευής, πρέπει να γίνονται μεμονωμένα για κάθε είδος και συνολικά, εξετάζοντας την αλληλεπίδραση τους.

Όσον αφορά τη θεμελίωση του πασσάλου:

- Οι χαλύβδινοι πάσσαλοι είναι ο συνηθέστερος τρόπος θεμελίωσης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας λόγω της δυνατότητας τους να αναπτύσσουν μεγάλη πλευρική τριβή και της ανθεκτικότητας τους έναντι θλίψης, κάμψης και λυγισμού.
- Η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου διακρίνεται σε κατακόρυφη και πλευρική, ο υπολογισμός της εξαρτάται από το είδος του εδάφους στην περιοχή θεμελίωσης, το οποίο διακρίνεται σε συνεκτικό και μη-συνεκτικό.
- Στην περίπτωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών, η πλευρική φέρουσα ικανότητα αναδεικνύεται σε κρίσιμη εξαιτίας της φύσης των επιβαλλόμενων φορτίων και της γεωμετρίας της κατασκευής.
- Η ανάλυση πλευρικά φορτισμένων πασσάλων γίνεται με τη χρήση μη-γραμμικών ελατηρίων. Η δυσκαμψία των ελατηρίων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πασσάλου, από τις ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων καθώς και από το βάθος των ελατηρίων.
- Στη περίπτωση χρήσης μη-γραμμικών ελατηρίων υπολογίζεται για κάθε ελατήριο η καμπύλη πλευρικού φορτίου ανά μέτρο μήκους που ασκείται στον πάσσαλο και πλευρικής

μετατόπισης πασσάλου (καμπύλη $p-y$) για τα χαρακτηριστικά του εδάφους, το αντίστοιχο βάθος του ελατηρίου και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του πασσάλου.

- Κατά τον σχεδιασμό του πασσάλου πρέπει η αναπτυσσόμενη πλευρική μετατόπιση της κεφαλής του να μην υπερβαίνει τα 10cm, και η αντίστοιχη της αιχμής του τα 2cm.
- Διαπιστώνεται ότι η προσομοίωση του εδάφους με μη γραμμικά ελατήρια, η δυσκαμψία των οποίων υπολογίζεται με τις ως τώρα γνωστές σχέσεις $p-y$, αδυνατεί να περιγράψει με ορθό τρόπο την αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους για πασσάλους με διάμετρο μεγαλύτερη από 2m, που φορτίζονται σε μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης.

Όσον αφορά τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν:

- Το λογισμικό FAST προσομοιώνει πλήρως την συζευγμένη αέρο- υδρο ελαστική απόκριση της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας αλλά η προσομοίωση του εδάφους και η μελέτη του πασσάλου γίνεται σε άλλο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (ADINA).
- Στις χρονοϊστορίες των εντατικών μεγεθών του πύργου της ανεμογεννήτριας που σχετίζονται με την κύρια διεύθυνση πνοής του ανέμου, προκύπτουν ακραίες τιμές στα πρώτα δευτερόλεπτα της ανάλυσης
- Τα πρώτα 10 δευτερόλεπτα της ανάλυσης κρίνεται σκόπιμο να αμελούνται, ώστε να εξαλείφονται οι παροδικές συνθήκες που δημιουργούνται κατά την εκκίνηση της ανεμογεννήτριας. Αν ληφθούν όμως υπόψη, απαιτείται αύξηση του πάχους των ελασμάτων του πύργου κατά 22%.
- Ο δυσμενέστερος συνδυασμός φόρτισης για τον έλεγχο επάρκειας του πύργου, προκύπτει όταν η καμπτική ροπή περί τον εγκάρσιο, στην διεύθυνση του ανέμου, άξονα, παρουσιάζει μέγιστο.
- Στην οριακή κατάσταση αστοχίας δημιουργείται μια πλαστική ζώνη του εδάφους στο ανώτερο τμήμα του πασσάλου (στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν το μήκος αυτής της πλαστικής ζώνης περιλάμβανε τα τέσσερα πρώτα μέτρα του πασσάλου).
- Όσο μεταβάλλεται το μήκος έμπηξης του πασσάλου:
 1. Όσο αυξάνεται το μήκος του πασσάλου τόσο μειώνονται οι πλευρικές μετακινήσεις της κεφαλής και της αιχμής του πασσάλου. Αυτό συμβαίνει μέχρι ένα συγκεκριμένο μήκος έμπηξης, πέραν του οποίου οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση του μήκους, δεν επιφέρει αλλαγές στις μετατοπίσεις του.
 2. Υπάρχει ένα σημείο σε συγκεκριμένο βάθος κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, ανεξάρτητα από το μήκος του πασσάλου, όπου οι μετακινήσεις του είναι μηδενικές. Αποτελεί το σημείο περιστροφής του πασσάλου (στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν το σημείο αυτό προκύπτει στη στάθμη $z=-16m$).
 3. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος έμπηξης του πασσάλου τόσο μικρότερες είναι οι μετατοπίσεις του πασσάλου και άρα τόσο μικρότερες οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων κατά μήκος του πασσάλου.
 4. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του πασσάλου τόσο πιο εύκαμπτη συμπεριφορά παρουσιάζει.
 5. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος έμπηξης του πασσάλου τόσο μικρότερες τέμνουσες και ροπές αναπτύσσονται κοντά στην αιχμή του. Επίσης τόσο πιο ομαλή μορφή έχουν τα αντίστοιχα διαγράμματα.
 6. Όσο πιο μικρό είναι το μήκος έμπηξης του πασσάλου τόσο πιο απότομα σβήνουν τα διαγράμματα τεμνουσών και ροπών στα τελευταία μέτρα του πασσάλου.
- Προτείνεται η προσομοίωση της επιρροής του πασσάλου στις αναλύσεις του πύργου με το FAST, με τον υπολογισμό ισοδύναμου ως προς τη δυσκαμψία τμήματος χωρίς πλευρική αντίσταση και την ανάλυση ενός αντίστοιχου ισοδύναμου φορέα.
- Όσον αφορά τον ισοδύναμο φορέα:

1. Προκύπτουν χρονοϊστορίες εντατικών μεγεθών με εξαιρετική ομοιότητα με τις αντίστοιχες του αρχικού φορέα.
 2. Οι μέγιστες τιμές των εντατικών μεγεθών παρουσιάζουν μικρή αύξηση, εκτός από αυτήν της καμπτικής ροπής περί τον εγκάρσιο, στην διεύθυνση του ανέμου, άξονα η οποία παραμένει ίδια.
 3. Η χρονοϊστορία της οριζόντιας μετακίνησης της κορυφής του πύργου κατά την διεύθυνση του ανέμου είναι όμοια με την αντίστοιχη του αρχικού φορέα, και η μέγιστη τιμή της παραμένει σχεδόν αμετάβλητη.
- Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, η προσθήκη ισοδύναμου τμήματος δεν επηρεάζει τους ελέγχους αντοχής του πύργου της ανεμογεννήτριας και δεν προκαλεί πρόσθετα βέλη στην κατασκευή.