

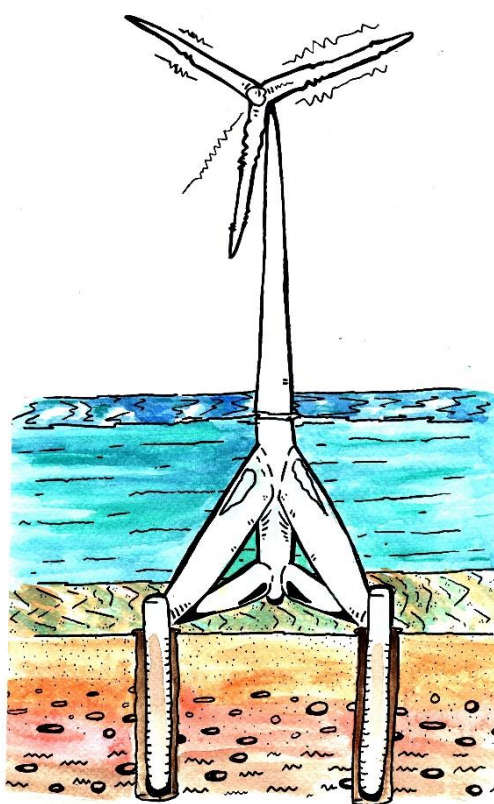


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Προκαταρκτικός Σχεδιασμός Τρίποδης Θαλάσσιας Ανεμογεννήτριας



Διπλωματική Εργασία
Δημοσθένη Μπάρμπα

ΕΜΚ ΔΕ 2015 17

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Αθήνα, Ιούλιος 2015

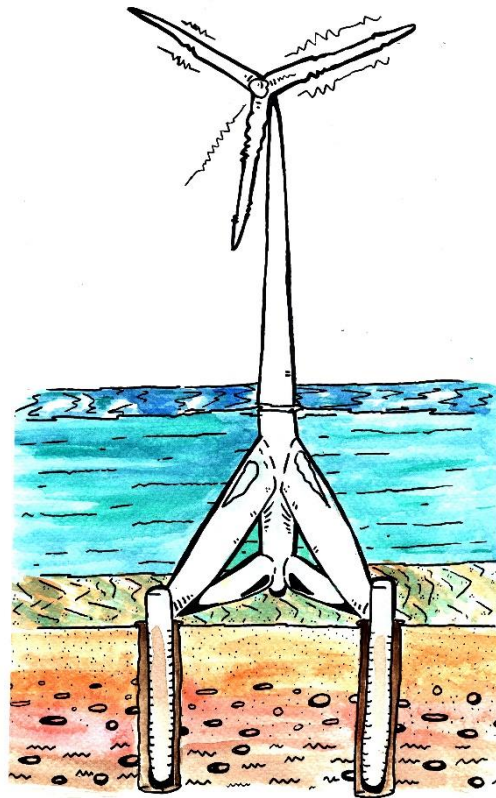


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Προκαταρκτικός Σχεδιασμός Τρίποδης Θαλάσσιας Ανεμογεννήτριας



Διπλωματική Εργασία
Δημοσθένη Μπάρμπα

ΕΜΚ ΔΕ 2015 17

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015

Copyright © Δημοσθένης Μπάρμπας, 2015
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Dimosthenis Barmpas, 2015
All Rights Reserved

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

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

Δημοσθένης Μπάρμπας (2015)
Προκαταρκτικός Σχεδιασμός Τρίποδης Θαλάσσιας Ανεμογεννήτριας
2015 17
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Δημοσθένης Μπάρμπας (2015)
Diploma Thesis EMK ΔΕ 2015 17
Preliminary Design of a Tripod-Type Offshore Wind Turbine
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τον καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ, που μου έδωσε τη δυνατότητα να συνεργαστώ μαζί του. Η συμβολή του στην εκπόνηση αυτή της διπλωματικής ήταν απαραίτητη και απολύτως σημαντική, δίνοντας λύσεις και καθοδηγώντας κάθε στιγμή που χρειαζόμουν τη βοήθειά του. Ο χαρακτήρας, οι άριτες επιστημονικές γνώσεις και η οξυδέρκεια του αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης και δημιουργίας.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά την πολιτικό μηχανικό Γεωργία Μαργαρίτη που ήταν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Η οργανωτικότητά της και η καλή της διάθεση έδωσαν ένα ήρεμο και ευχάριστο χαρακτήρα στην εκπόνηση και τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους φίλους μου και όλα τα άτομα που ήταν κοντά μου που με τροφοδοτούσαν με ενέργεια και ευχάριστες στιγμές καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2015 17

Προκαταρκτικός Σχεδιασμός Τρίποδης Θαλάσσιας Ανεμογεννήτριας Δημοσθένης Μπάρμπας

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την προκαταρκτική μελέτη σχεδιασμού μιας πρότυπης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας εδραζόμενη σε τρίποδο με δεδομένα που αφορούν τον ελλαδικό χώρο. Ταυτόχρονα παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της διεθνούς πρακτικής που ακολουθείται για το σχεδιασμό θαλάσσιων ανεμογεννητριών εδραζόμενων σε τρίποδο, κυρίως μέσω αναφορών σε διεθνείς κανονισμούς και τεύχη με κατευθυντήριες οδηγίες.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται κοινωνικοοικονομικά στοιχεία για την εξέλιξη και τη χρήση της αιολικής ενέργειας, με γνώμονα τόσο τις χερσαίες όσο και τις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους διάφορους τύπους θαλάσσιων ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως παραθέτοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε είδους. Επίσης αναλύεται το λειτουργικό σύστημα των ανεμογεννητριών, ενώ παράλληλα γίνεται σύγκριση υπεράκτιας και θαλάσσιας αιολικής ενέργειας.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι αρχές σχεδιασμού μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με βάση τους διεθνείς κανονισμούς. Ακόμη γίνεται αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας υπολογισμού των φορτίσεων για τις οποίες πρέπει να μελετηθεί η ανεμογεννήτρια.

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 αναλύεται η πορεία υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Επίσης γίνεται αναφορά στους τρόπους έμπηξης του πασσάλου αλλά και στη διαδικασία εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Ενώ τέλος γίνεται διερεύνηση για την επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των πασσάλων πάνω στην φέρουσα ικανότητα έναντι ολίσθησης.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο προκαταρκτικός σχεδιασμός μιας πρότυπης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας εδραζόμενη σε τρίποδο με βάση τις παραπάνω αναφορές, η οποία προσομοιώνεται με χρήση του ελεύθερου λογισμικού FAST από το εργαστήριο NREL των ΗΠΑ και των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων SAP2000 και ADINA.

Στο έβδομο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2015 17

Preliminary Design of a Tripod-Type Offshore Wind Turbine
Dimosthenis Barmpas

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.

The objective of this dissertation is on the one hand to summarize the fundamental aspects of the international practice on the design of offshore wind turbines based on a tripod as prescribed by international standards and guidelines, and on the other hand to present a case study for the design of an offshore wind turbine for Greek sea conditions.

In the first chapter some social and economical aspects about the evolution and the usage of wind energy and wind turbines in general are presented.

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 developed.

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. A description of the construction procedure, positioning and installation of the tripod, is also presented.

In the sixth chapter, the preliminary design of an offshore wind turbine based on a tripod is carried out according to the above. The structure is modelled in public domain software FAST provided by NREL Laboratory in the United States, and in finite element software SAP2000 and ADINA.

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

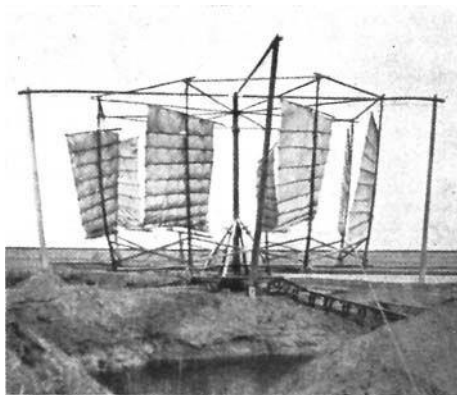
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Ανεμογεννήτριες.....	2
1.2	Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.....	3
2	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	7
2.1	Τύποι ανεμογεννητριών.....	7
2.2	Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας και τρόπος λειτουργίας.....	8
2.3	Σύγκριση υπεράκτιων και χερσαίων ανεμογεννητριών.....	9
2.4	Τύποι θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών.....	10
2.4.1	Θεμελιωμένα Συστήματα.....	10
2.4.2	Πλωτά Συστήματα.....	11
2.4.3	Τρίποδο Σύστημα Θεμελίωσης.....	12
3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	15
3.1	Εισαγωγή.....	15
3.2	Αρχές Σχεδιασμού.....	15
3.2.1	Γενικές Αρχές.....	15
3.2.2	Οριακές Καταστάσεις.....	17
3.2.3	Δράσεις.....	17
3.2.4	Κλάσεις Ανεμογεννητριών.....	18
3.2.5	Συνδυασμοί Φορτίσεων.....	19
3.3	Φορτία.....	25
3.3.1	Φορτία ανέμου.....	25
3.3.1.1	Κανονικές Συνθήκες Ανέμου.....	26
3.3.1.2	Ακραίες Συνθήκες Ανέμου.....	26
3.3.2	Φορτία θαλάσσιων κυμάτων.....	29
3.3.2.1	Κανονικές Συνθήκες Θάλασσας.....	29
3.3.2.2	Ακραίες Συνθήκες Θάλασσας.....	30
3.3.3	Φορτία ανεμογενών και παλιρροιακών θαλασσιών ρευμάτων.....	32
3.3.4	Θερμοκρασιακές μεταβολές.....	33
3.3.5	Χιόνι - Πάγος.....	33
3.3.6	Μεταβολές της επιφάνειας πυθμένα & υποσκαφές.....	33
3.3.7	Φορτία απορεύματος (wake loads).....	33
3.3.8	Σεισμικά φορτία.....	33
3.3.9	Περιβαλλοντικές φορτίσεις σχεδιασμού.....	34
4	ΈΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΚΑΙ ΜΈΛΟΥΣ ΣΤΗΝ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΊΑΣ.....	37
4.1	Εισαγωγή.....	37

4.2	Χαρακτηριστικά Χάλυβα	37
4.3	Κατάταξη Διατομών	38
4.4	Μέθοδος των τάσεων για κελύφη	39
4.4.1	Αντοχή έναντι λυγισμού.....	39
4.4.2	Κυλινδρικά Μέλη σταθερού πάχους.....	40
4.4.3	Έλεγχος σε λυγισμό.....	43
5	ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΠΑΣΣΑΛΟΥ	45
5.1	Εισαγωγή.....	45
5.2	Τρόποι εγκατάστασης	46
5.3	Χαλύβδινοι Πάσσαλοι	49
5.3.1	Φέρουσα Ικανότητα διατομής χαλύβδινου πασσάλου.....	49
5.4	Φέρουσα ικανότητα- Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση	49
5.4.1	Φέρουσα ικανότητα έναντι θλίψης.....	49
5.4.2	Φέρουσα ικανότητα έναντι εφελκυσμού- ολίσθησης	51
5.4.3	Συνεκτικά εδάφη - Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση	51
5.4.4	Μη-Συνεκτικά εδάφη – Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση.....	53
5.5	Φέρουσα ικανότητα – Αντοχή σε πλευρική φόρτιση.....	54
5.5.1	Συνεκτικά εδάφη - Αντοχή σε οριζόντια φόρτιση	55
5.5.2	Μη συνεκτικά εδάφη - Αντοχή σε οριζόντια φόρτιση.....	57
5.6	Διερεύνηση φέρουσας ικανότητας πασσάλου έναντι ολίσθησης σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.....	59
6	ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	63
6.1	Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας	63
6.2	Προσομοίωση Ανεμογεννήτριας.....	65
6.3	Υπολογισμός Φορτίων	67
6.3.1	Αεροδυναμικά Φορτία	67
6.3.2	Υδροδυναμικά φορτία	69
6.4	Προδιαστασιολόγηση	74
6.4.1	Προδιαστασιολόγηση φορέα στήριξης.....	74
6.4.2	Προσομοίωση του εδάφους.....	79
6.4.3	Διαστασιολόγηση πασσάλων	80
6.5	Τελικοί έλεγχοι ανωδομής και διαστασιολόγηση θεμελίωσης	81
6.5.1	Έλεγχος εδάφους	82
6.5.2	Έλεγχοι επάρκειας διατομής και μέλους με την μέθοδο των τάσεων.....	87
6.5.2.1	Έλεγχος Πυλώνων.....	87
6.5.2.2	Έλεγχος πασσάλων	91
6.6	Υπολογισμός Ισοδύναμου τμήματος.....	96
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	101

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνθρωπος προσπαθεί να εκμεταλλευτεί την αιολική ενέργεια πολλά χρόνια πριν την δημιουργία του πρώτου ανεμόμυλου και σίγουρα των ανεμογεννητριών. Πρώτοι οι Αιγύπτιοι κατά το 5000 π.Χ. εκμεταλλεύτηκαν τον άνεμο για την πλεύση των πρώτων ιστιοφόρων. Στη συνέχεια οι Κινέζοι κατασκεύασαν τους πρώτους ανεμόμυλους (Εικόνα 1.1) με σκοπό την άντληση νερού. Η χρήση των ανεμόμυλων εμφανίστηκε στην Ευρώπη κατά τον 11ο αιώνα και από εκεί και έπειτα η ανάπτυξη της ηπείρου συνδέεται άρρηκτα με την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.



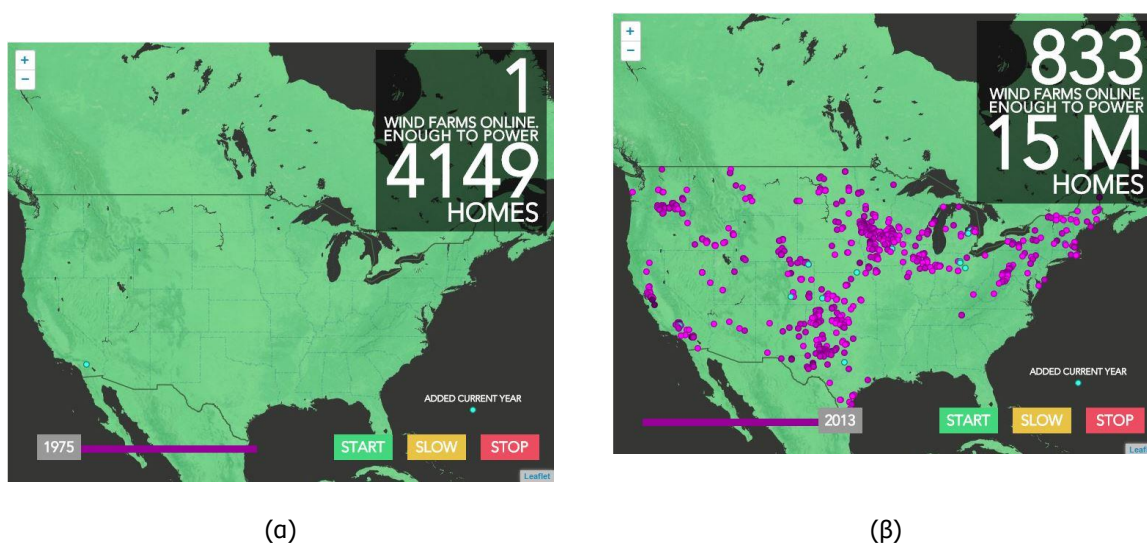
(α)



(β)

Εικόνα 1.1: α) Παλιός Κινέζικος ανεμόμυλος [1.1], β) Σύγχρονη ανεμογεννήτρια [1.2]

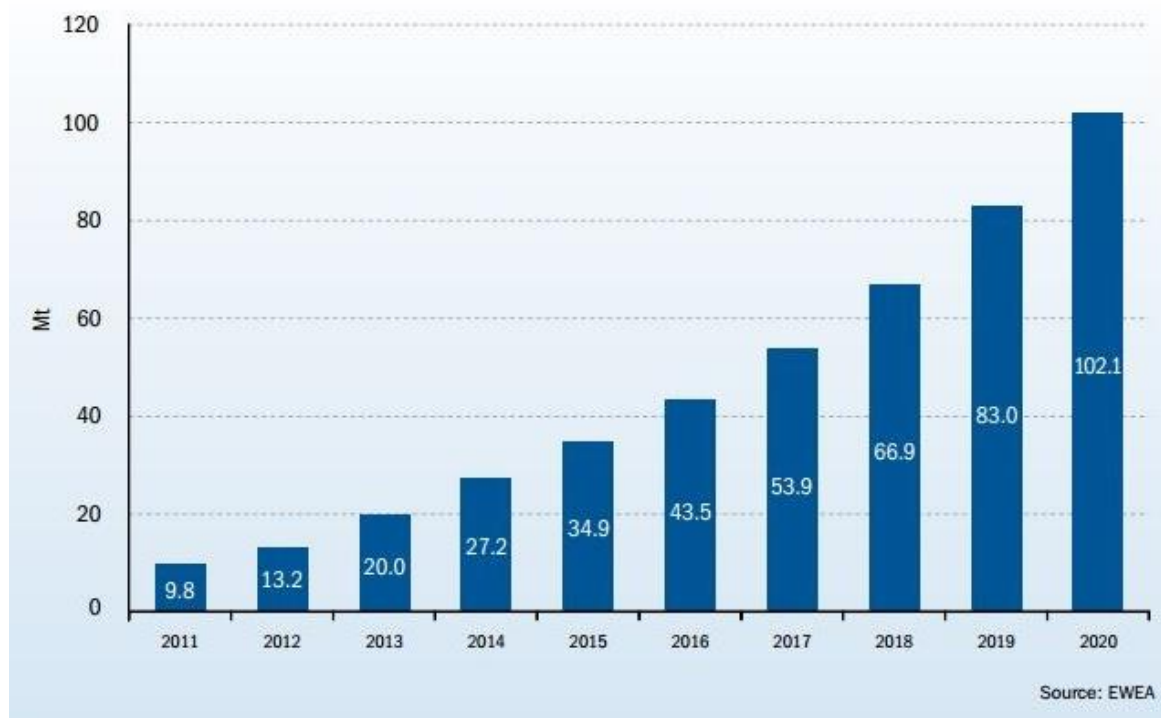
Στα τέλη του 19ου αιώνα στις Ην. Πολιτείες της Αμερικής κατασκευάστηκε η πρώτη ανεμογεννήτρια ενώ κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα συντάσσονται τα πρώτα αιολικά πάρκα. Οι ανεμογεννήτριες αποτέλεσαν μεγάλη εφεύρεση, διότι εκμεταλλεύτηκαν τον αέρα ο οποίος κινούσε την έλικα και μέσω κατάλληλου μηχανισμού μετέτρεπε την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική. Στη δεκαετία του 50 και μέχρι τη δεκαετία του 70 λόγω της πετρελαϊκής αφθονίας οι ανεμογεννήτριες παραγκωνίστηκαν. Τότε ήταν που η πολιτεία της Καλιφόρνια υποστήριξε τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας και έτσι οι ανεμογεννήτριες ξεκίνησαν μια σταθερά αυξανόμενη και παγκόσμια πορεία. (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2: α) Αιολικά πάρκα το 1975 στις Ην. Πολιτείες, β) Αιολικά πάρκα το 2013 στις Ην. Πολιτείες [1.3]

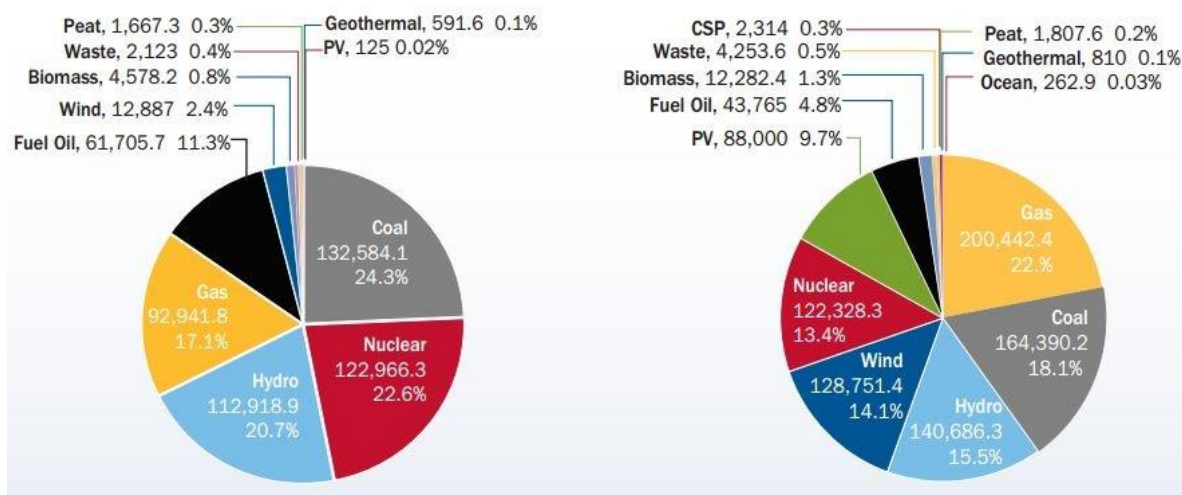
1.1 Ανεμογεννήτριες

Είναι πλέον εύκολο να αντιληφθούμε ότι η διεθνής κοινότητα υποστηρίζει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έναντι των συμβατικών (άνθρακας, πετρέλαιο, αέριο) με σκοπό τον περιορισμό τους. Με βασικό γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος και τη μείωση των εκπομπών το διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) οι σύγχρονες κοινωνίες στρέφουν το ενδιαφέρον τους σε "καθαρές" μορφές ενέργειας, όπως η αιολική (Σχήμα 1.1). Συγκεκριμένα μόνο οι υπερράκιες ανεμογεννήτριες κατάφεραν να μειώσουν την παραγωγή 9.8 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα, ενώ σύμφωνα με τις εκτιμήσεις το 2020 εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα θα μειωθεί κατά 102.1 εκατομμύρια τόνους.



Σχήμα 1.1: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που αποφεύχθηκαν χάρη στις υπερράκιες ανεμογεννήτριες. [1.4]

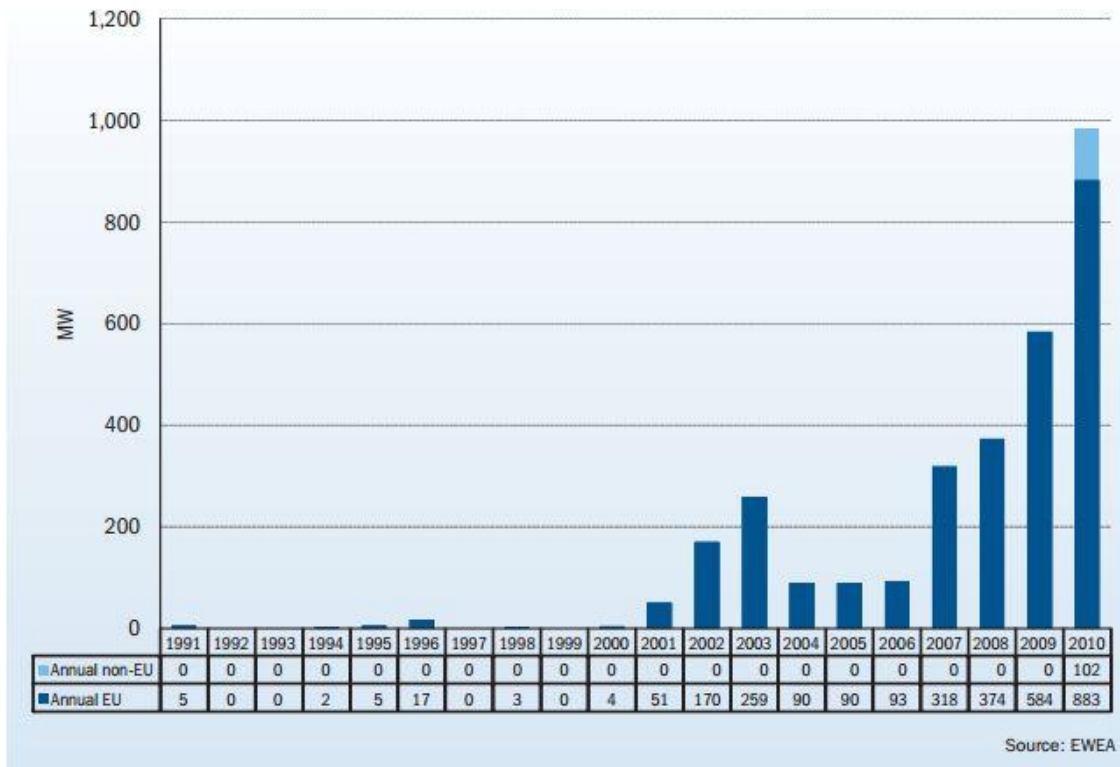
Η τάση αυτή υπέρ της αιολικής ενέργειας γίνεται εμφανής στα στατιστικά στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας όπου φαίνεται ξεκάθαρα η απότομη ανάπτυξη των αιολικών πάρκων και η συμβολή τους στην πανευρωπαϊκή παραγωγή ενέργειας (Σχήμα 1.2). Πιο συγκεκριμένα ενώ το 2000 η αιολική ενέργεια συνέβαλε μόνο στο 2.4% της παραγόμενης ενέργειας το 2014 φτάνει να είναι 4^η μεγαλύτερη με ποσοστό 14.1%.



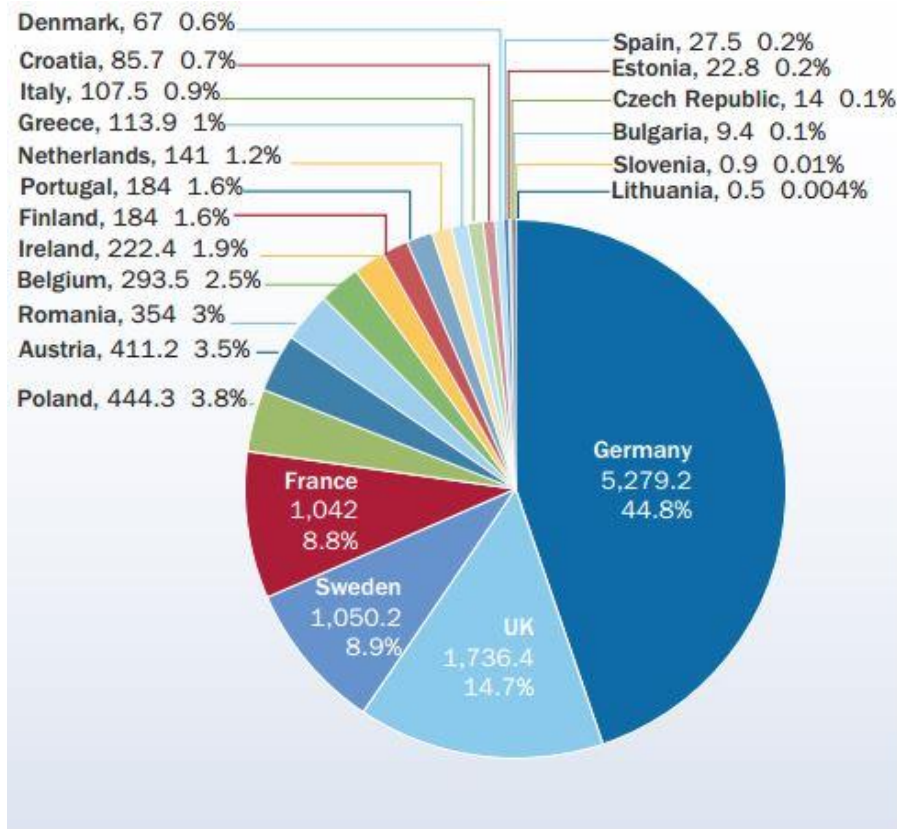
Σχήμα 1.2: α) Ποσοστό παραγωγής ενέργειας για κάθε μέσο στην Ευρώπη το 2000, β) Ποσοστό παραγωγής ενέργειας για κάθε μέσο στην Ευρώπη το 2014. [1.5]

1.2 Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα αποτελούνται από ανεμογεννήτριες τοποθετημένες στη θάλασσα. Το πρώτο παράκτιο αιολικό πάρκο δημιουργήθηκε στη Δανία το 1991 καθιστώντας την Ευρώπη πρωτοπόρο στον τομέα αυτό. Από εκεί και πέρα η υπεράκτια αιολική ενέργεια αρχίζει να εδραιώνεται σταθερά στην γηραιά ήπειρο, ενώ μετά το 2000 σημειώνεται ραγδαία ανάπτυξη της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος. Αναλυτικότερα, από το 1991 έως το 2000 η ετήσια εγκατεστημένη ισχύς παραμένει σε χαμηλά επίπεδα αλλά το 2003 ξεπερνάει τα 200MW ενώ το 2010 φτάνει σχεδόν στα 1000MW (Σχήμα 1.3). Σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας παρατηρούμε ότι το 2014 στη Γερμανία εγκαταστάθηκε το 44.8% (5279.2MW) της συνολικής ετήσιας υπεράκτιας ισχύος ακολουθούμενη από το Ην. Βασίλειο με 14.7% (1736.3MW), τη Σουηδία με 8.9% (1050MW) και τη Γαλλία με 8.8% (1042MW) (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.3: Ετήσια εγκατεστημένη ισχύς υπεράκτιων ανεμογεννητριών στην Ευρώπη. Με μπλε αναφέρεται στις χώρες εντός Ευρωπαϊκής Ένωσης με γαλάζιο στις ευρωπαϊκές χώρες εκτός Ευρωπαϊκής Ένωσης. [1.4]



Σχήμα 1.4: Εγκατεστημένες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες (σε MW) στην Ευρώπη για το έτος 2014. [1.5]

Βιβλιογραφία

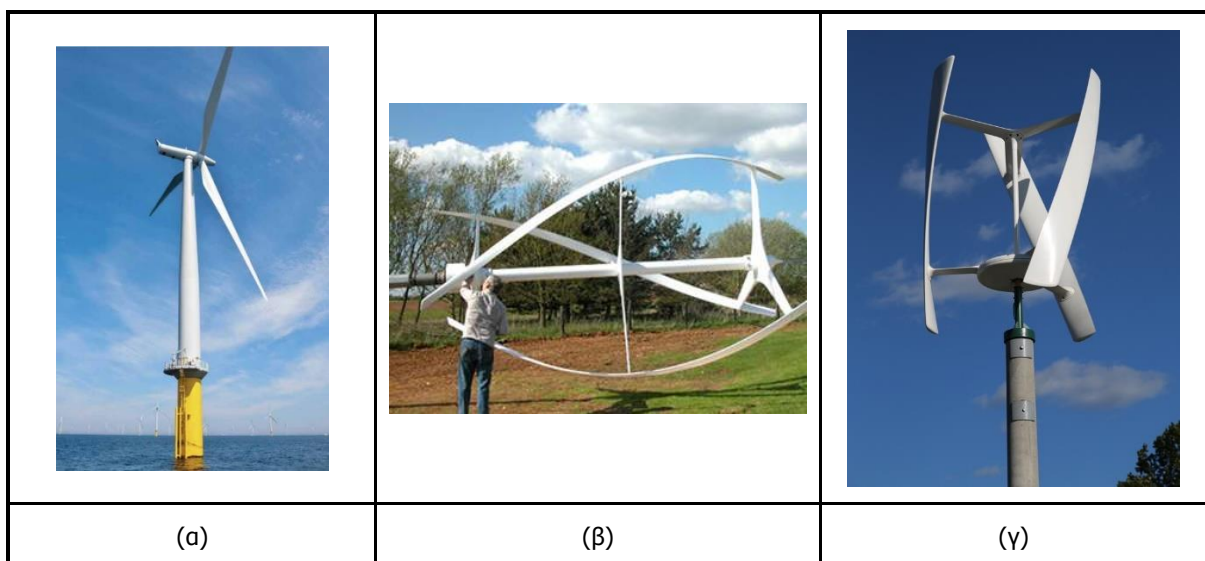
- [1.1] Google image: https://c1.staticflickr.com/1/18/23758958_d9bb3dbc0a.jpg
- [1.2] Google image: http://www.protectourcommunities.com/wp-content/uploads/2012/10/wind_turbine.jpg
- [1.3] Επίσημη σελίδα για την ενέργεια των Ην. Πολιτειών, Wind Farm Growth Through the Years: <http://energy.gov/articles/wind-farm-growth-through-years#buttn>
- [1.4] Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας (E.W.E.A): Wind in our Sails- The coming of Europe's offshore wind energy industry- 2011: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Offshore_Report.pdf
- [1.5] Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας (E.W.E.A): Wind in power 2014 European statistics: <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2014.pdf>

2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

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



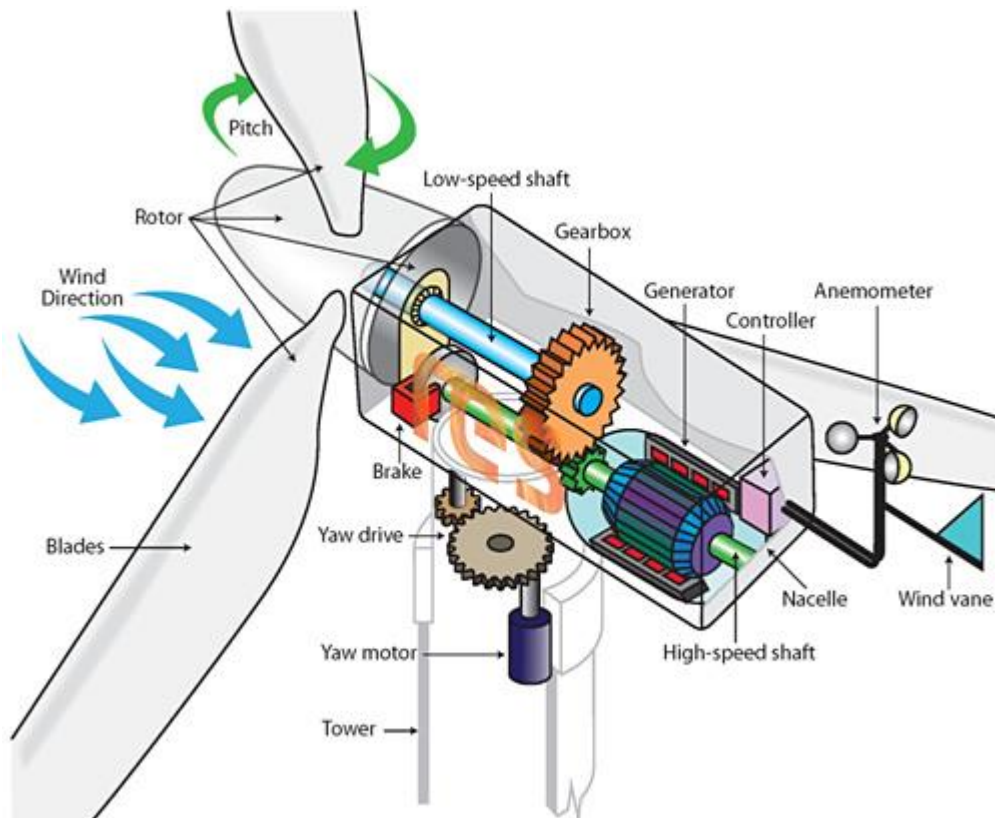
Εικόνα 2.1: Τύποι ανεμογεννητριών: α)οριζόντιου άξονα με περιστροφή παράλληλη στον άνεμο [2.1], β)οριζόντιου άξονα με περιστροφή κάθετη στον άνεμο [2.2], γ)κατακόρυφου άξονα [2.3].

2.2 Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας και τρόπος λειτουργίας

Όλες οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες είναι αποκλειστικά οριζόντιου άξονα ο οποίος βρίσκεται παράλληλα με την πνοή του ανέμου. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια αποτελείται από 2 κύριες ομάδες:

- 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 (Εικόνα 2.2).

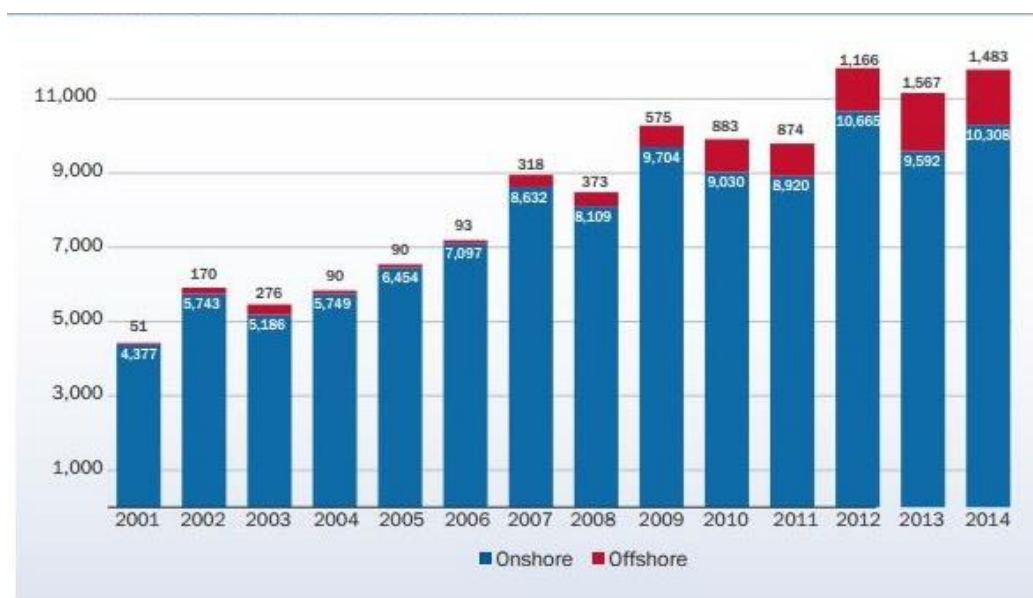


Εικόνα 2.2: Μηχανολογικά μέλη ανεμογεννήτριας. [2.4]

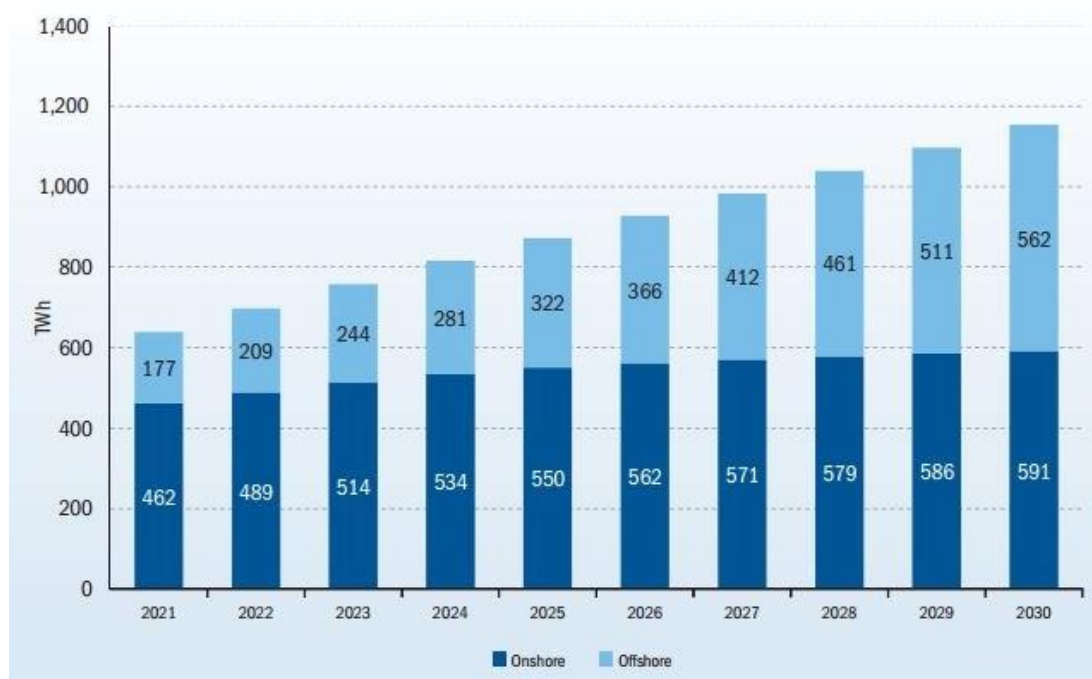
Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες αρχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για μέση ταχύτητα ανέμου 3-4m/s, μεγιστοποιούν την απόδοσή τους για ταχύτητα ανέμου 15m/s, ενώ παύουν την λειτουργία τους για ταχύτητες ανέμου 25m/s και άνω.

2.3 Σύγκριση υπεράκτιων και χερσαίων ανεμογεννητριών

Στη συγκεκριμένη όμως διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες και πιο συγκεκριμένα με ανεμογεννήτριες εδραζόμενες σε τρίποδο (space frame tripod). Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες ξεκίνησαν να κερδίζουν έδαφος τα τελευταία χρόνια σε σχέση με τις χερσαίες. Παρόλο που οι ετήσιες εγκαταστάσεις χερσαίων ανεμογεννητριών ξεπερνά κατά πολλού αυτές των υπεράκτιων (Σχήμα 2.1), η πανευρωπαϊκή κοινότητα σκοπεύει μέχρι το 2030 να έχει ένα δίκτυο υπεράκτιας παραγωγής ενέργειας τόσο αποδοτικό όσο το χερσαίο (Σχήμα 2.2). Οι λόγοι για τους οποίους άρχισαν να προτιμώνται τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι η εξέλιξη των ανεμογεννητριών με αποτέλεσμα την αποδοτική εκμετάλλευση των ισχυρότερων θαλάσσιων ανέμων. Είναι προφανές ότι οι ταχύτητες του ανέμου μειώνονται κατά πολύ λόγω του χερσαίου ανάγλυφου. Επίσης στην θάλασσα 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.



Σχήμα 2.1: Εγκατεστημένες χερσαίες(μπλε) και υπεράκτιες(κόκκινες) ανεμογεννήτριες ανά έτος στην Ευρώπη σε MW. [2.5]



Σχήμα 2.2: Πρόβλεψη για ετήσια παραγωγή ενέργειας υπεράκτιων(γαλάζιο) και χερσαίων αιολικών πάρκων(μπλε) [2.6]

Από την άλλη βέβαια, τα μειονεκτήματα των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι εξίσου σημαντικά με τα προτερήματα. Αρχικά το κόστος κατασκευής τους είναι δύο με τρεις φορές μεγαλύτερο από την αντίστοιχη χερσαία. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη μορφή της κατασκευής και ιδιαίτερα στον τρόπο θεμελίωσης. Επίσης οι συνθήκες κατασκευής και τα μέσα που απαιτούνται επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό και το κόστος αλλά και τη δυσκολία κατασκευής. Οι καιρικές συνθήκες δυσχεραίνουν την διαδικασία κατασκευής αλλά επιβαρύνουν και την ίδια την κατασκευή ασκώντας της φορτία όπως όπως τα φορτία κυματισμού και φορτία θαλασσιών. Επίσης η διάβρωση λόγω του θαλασσινού νερού είναι πολύ πιο έντονη σε σχέση με τις χερσαίες συνθήκες. 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.

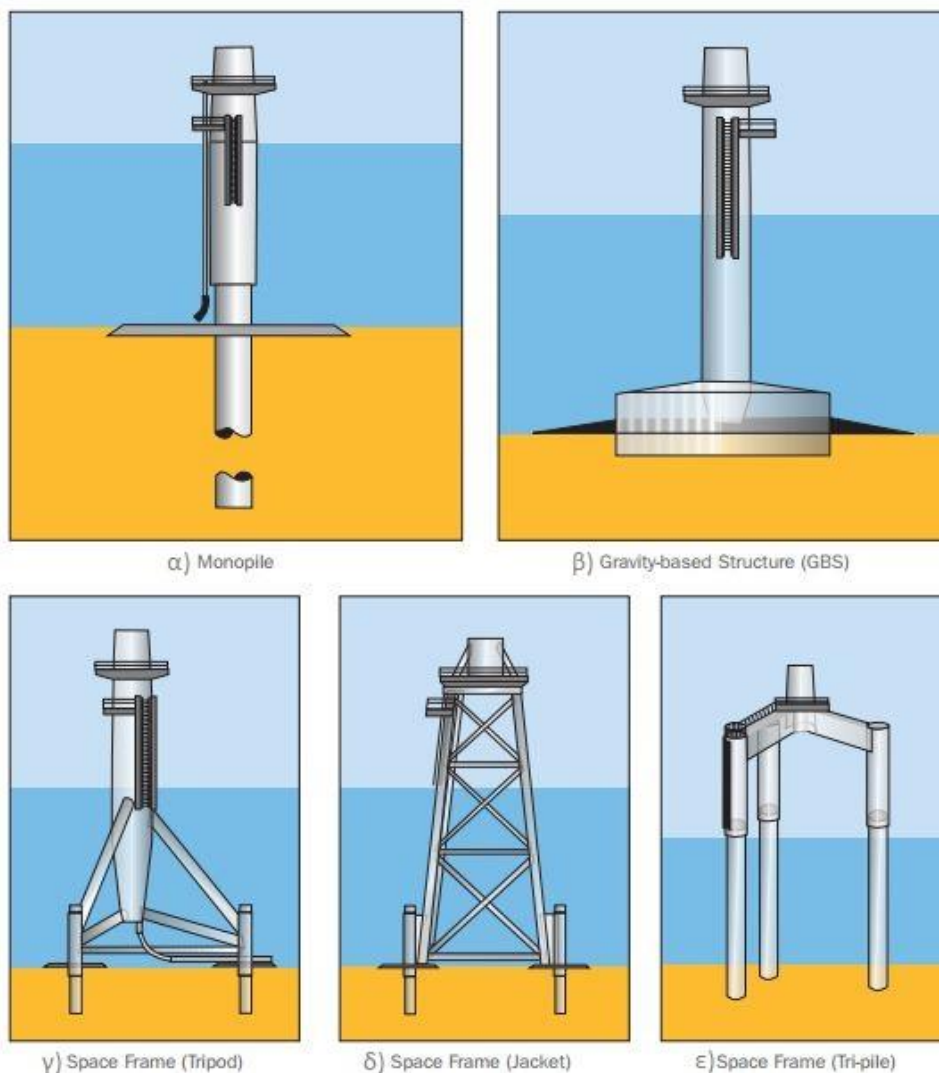
2.4 Τύποι θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Η επιλογή του τύπου της θεμελίωσης είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που θα χρειαστεί να αντιμετωπίσει ο μελετητής. Η επιλογή αυτή δεν εξαρτάται μόνο από τις γεωγραφικές συνθήκες και τοπογραφικά δεδομένα αλλά και από τα μέσα παραγωγής και την τεχνογνωσία. Τα είδη υποστήριξης θαλάσσιων ανεμογεννητριών θα μπορούσαμε να τα χωρίσουμε σε δύο κατηγορίες από τη μία τα θεμελιωμένα συστήματα και από την άλλη τα πλωτά συστήματα.

2.4.1 Θεμελιωμένα Συστήματα

Οι βασικότεροι τύποι έδρασης υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι α) με μονοπάσσαλο (monopile), β) με θεμελίωση βαρύτητας (gravity based structure), γ) με τρίποδο (space frame tripod), δ) με δικτύωμα (space frame jacket) ε) με τρεις πασσάλους (space frame tripole) (Εικόνα 2.3). Η πλειοψηφία των ανεμογεννητριών είναι εδρασμένες με μονοπάσσαλο, κυρίως επειδή είναι εύκολος στην μεταφορά και την εγκατάσταση σε σύγκριση με τις άλλες μορφές θεμελίωσης. Όμως κάθε τύπος έχει τα προτερήματα

και τα μειονεκτήματά του, οπότε θα ήταν αυθαίρετο να πούμε ότι ο μονοπάσσαλος είναι η βέλτιστη θεμελίωση.



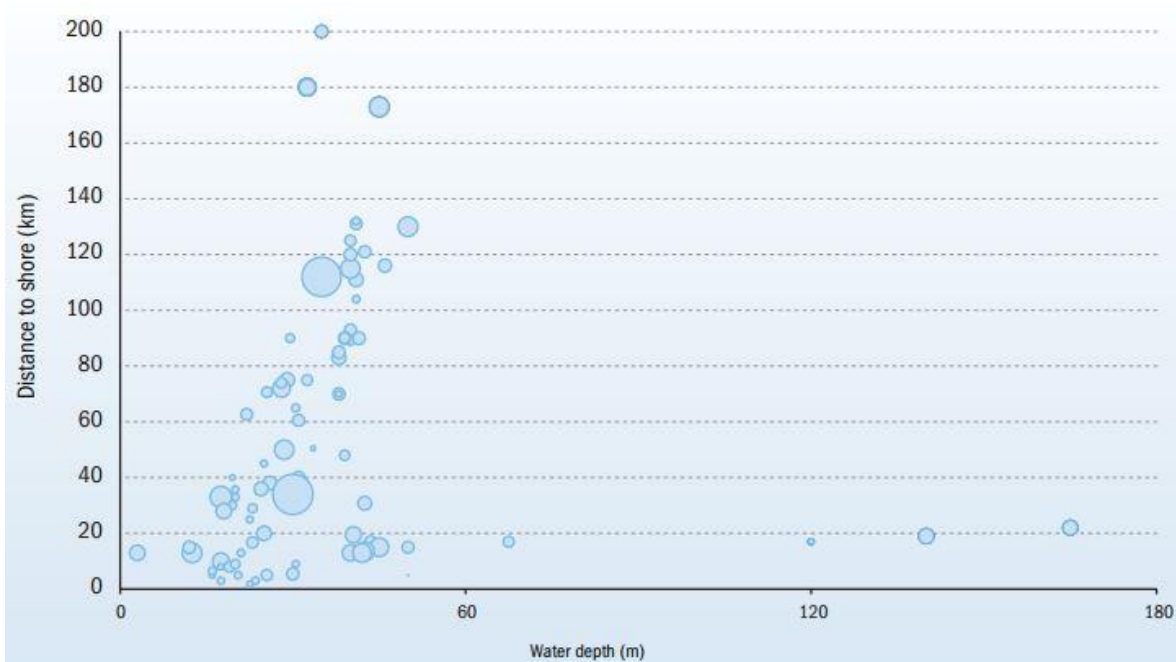
Εικόνα 2.3: Είδη θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών: α) με μονοπάσσαλο, β) με θεμελίωση βαρύτητας, γ) με τρίποδο, δ) με δικτύωμα ε) με τριπάσσαλο. [2.6]

2.4.2 Πλωτά Συστήματα

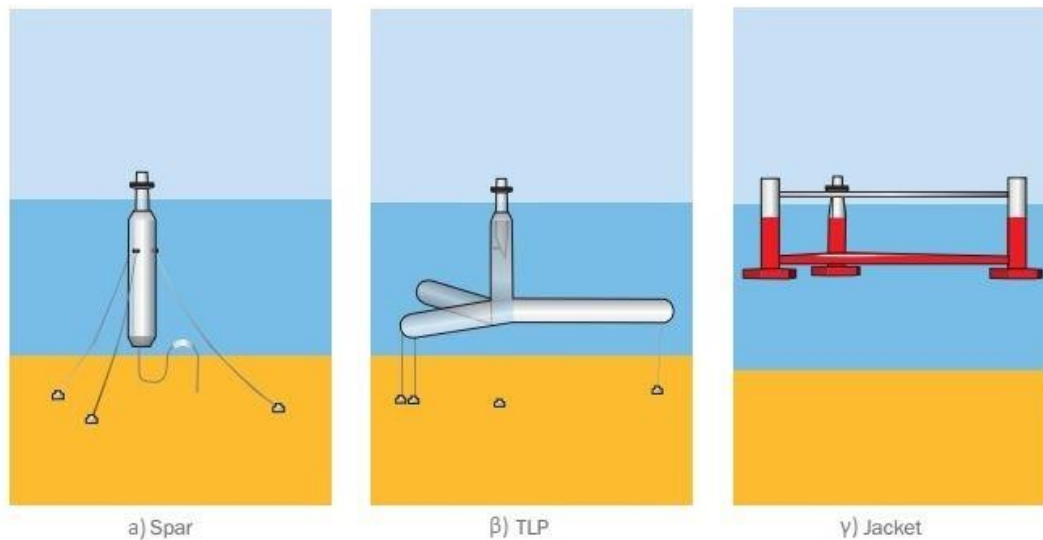
Οι κατασκευαστικές εταιρίες προσπαθούν συνεχώς να δημιουργήσουν αιολικά πάρκα όλο και πιο μακριά από την ακτή όπου τα νερά είναι πιο βαθιά. Η κίνηση αυτή παρατηρείται γιατί στις περισσότερες χώρες οι διαθέσιμες περιοχές μεγάλων υπεράκτιων πάρκων βρίσκονται μακριά από την ακτή (Σχήμα 2.3). Η κατασκευή όμως θαλάσσιων ανεμογεννητριών σε τέτοια απόσταση άρα και σε μεγάλα βάθη με σταθερά συστήματα είναι οικονομικά ασύμφορη. Γι' αυτό το σκοπό αναπτύχθηκαν τα πλωτά συστήματα, ειδικότερα για βάθη μεγαλύτερα των 50 μέτρων και εκτιμάτε 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 καμπικά φορτία στο νερό. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι πλωτών συστημάτων:

- σύστημα τύπου σημαντήρα (spar) (Εικόνα 2.4, α).
- σύστημα με σκέλη υπό ένταση (tensioned-leg platform TLP) (Εικόνα 2.4, β).

- σύστημα τύπου φορηγίδας (floating jacket) (Εικόνα 2.4, γ)



Σχήμα 2.3 Εγκατεστημένες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες σε σχέση με το βάθος έδρασης (οριζόντιος άξονας σε m) και την απόσταση από την ακτή (κατακόρυφος άξονας σε km). [2.6]

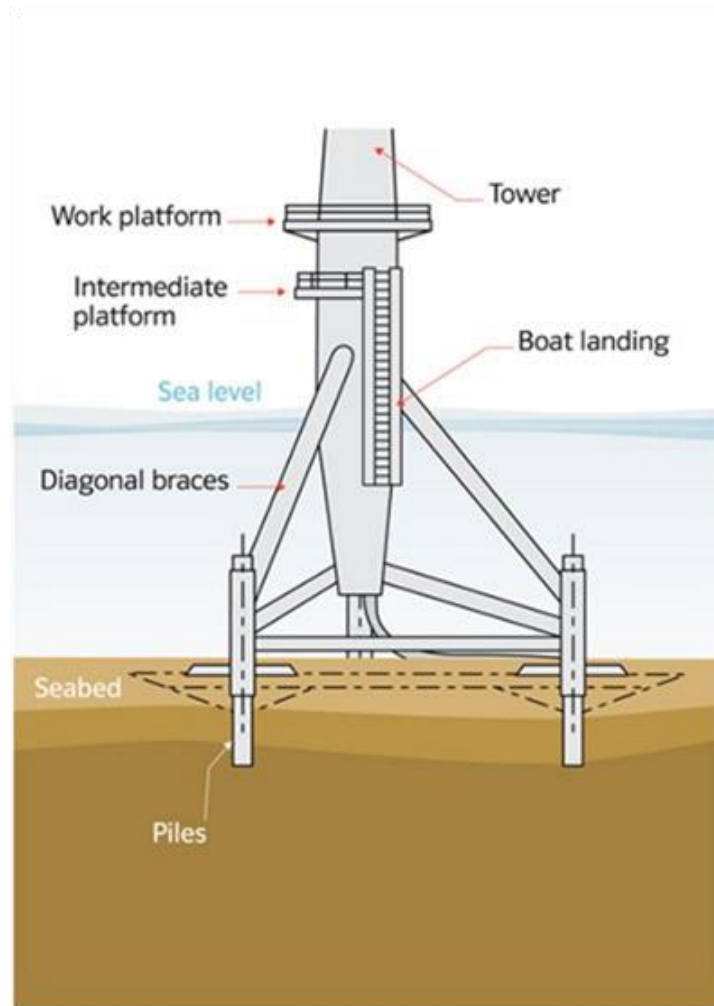


Εικόνα 2.4: Είδη στήριξης πλωτών ανεμογεννητριών: α) Spar, β) TLP, γ) Jacket. [2.6]

2.4.3 Τρίποδο Σύστημα Θεμελίωσης

Ο φορέας στήριξης μορφής τρίποδου (Εικόνα 2.5) αποτελείται από μια κεντρική κολώνα πάνω στη οποία στηρίζεται ο πύργος της ανεμογεννήτριας, διαγώνιους βραχίονες και τρία υποστηρικτικά στοιχεία (pile sleeves) τα οποία συνδέονται με τρεις εμπηγνυόμενους πασσάλους μέσω ειδικών ενεμάτων. Ο φορέας στήριξης μορφής τρίποδου παρέχει μεγάλη ακαμψία και σταθερότητα της κατασκευής έναντι ανατροπής. Αυτό τη καθιστά κατάλληλη επιλογή για μεγαλύτερα βάθη πυθμένα από την περίπτωση του φορέα

στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου. Η επιλογή της συγκεκριμένης δομής προτείνεται για βάθη από 20m έως 50m.



Εικόνα 2.5: Σύστημα θεμελίωσης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας με τρίποδο.[2.7]

Η πίεση που ασκεί το νερό στη κατασκευή είναι μικρότερη από τη περίπτωση του μεμονωμένου πασσάλου λόγω των μικρότερων διαμέτρων των μελών του τριπόδου, ωστόσο λόγω των περισσότερων μελών τις κατασκευής αυξάνεται και η επιφάνεια προσβολής της από τα κύματα. Σε σύγκριση όμως με το φορέα στήριξης μορφής δικτυώματος το τρίποδο είναι πιο ευάλωτο στα φορτία των κυμάτων λόγω των μεγαλύτερων διαμέτρων των χαλύβδινων σωλήνων. Επίσης η κύρια σύνδεση μεταξύ του τριπόδου και της κεντρικής κολώνας αποτελεί μια πρόκληση για τους μηχανικούς μιας και η συγκεκριμένη σύνδεση είναι επιρρεπής σε κόπωση και περίπλοκη στο σχεδιασμό. Η διάμετρος και το μήκος των εμπηγνυόμενων πασσάλων του τριπόδου είναι αρκετά μικρότερες από τα αντίστοιχα μεγέθη του φορέα στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου.[2.8]

Βιβλιογραφία

- [2.1] Google image: <http://www.seao2.com/vawt/images/quiet-revolution.jpg>
- [2.2] Google image: <http://www.seao2.com/vawt/images/quiet-revolution.jpg>
- [2.3] Google image: <http://www.seao2.com/vawt/images/quiet-revolution.jpg>
- [2.4] Google image: http://www.beaufortcourt.com/media/28342/res_wind_turbine.jpg
- [2.5] Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας (E.W.E.A): Wind in power 2014 European statistics: <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2014.pdf>
- [2.6] Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας (E.W.E.A.): Wind in out Sails-The coming of Europe's offshore wind energy industry-2011: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Offshore_Report.pdf
- [2.7] Google image: <http://www.4coffshore.com/windfarms/images/news/tripod1.png>
- [2.8] Μεταπτυχιακή εργασία-Ανδρέα Μπέντα ΕΜΠ-ΦΟΡΤΙΑ, ΑΝΑΛΥΣΗ, ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες αποτελούν ένα είδος κατασκευής που κατά τη διάρκεια της ζωής του λαμβάνει μέρος σε πολλών ειδών εντατικές καταστάσεις. Οι πολυμορφία των φορτίων (συγκεντρωμένα, κατανεμημένα, υδροστατικά κλπ.) όπως επίσης και επιρροή τους (ανακυκλιζόμενα, με μεγάλες μεταβολές) οδήγησαν στη σύνθεση κανονισμών και αρχών για την κατασκευή υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Η σύνθεση των κανονισμών αυτών βασίστηκε στη συλλογή πληροφοριών από άλλους κατασκευαστικούς τομείς όπως τις υπεράκτιες βιομηχανίες εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου. Οι σημαντικότεροι κανονισμοί 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 τριπόδου, 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

3.2.1 Γενικές Αρχές

Οι βρετανικοί κανονισμοί(IEC 61400) δημιούργησαν ένα διάγραμμα ροής για τον επιτυχή σχεδιασμό υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400 ο σχεδιασμός της κατασκευής θα πρέπει να αποσκοπεί:

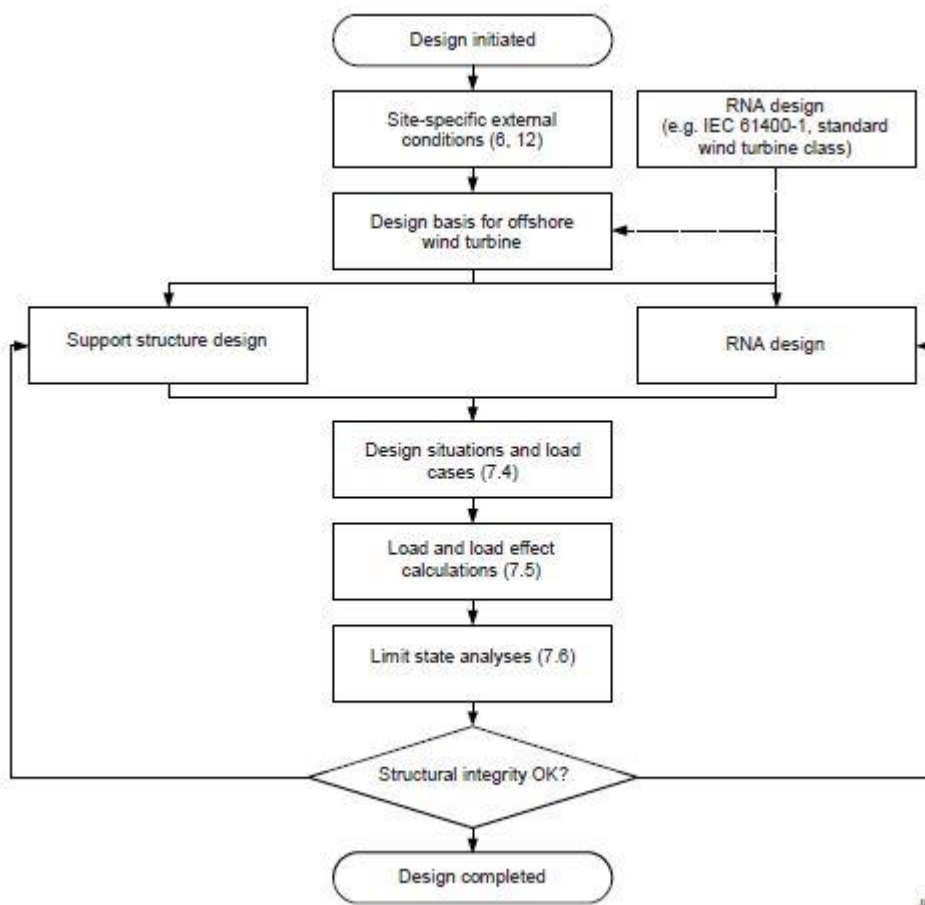
- στην αντοχή των φορτίων που ασκούνται στην κατασκευή σε όλες τις φάσεις της ζωής της.
- στην εξασφάλιση ικανοποιητικής ασφάλειας της κατασκευής, του περιβάλλοντος και του προσωπικού.
- στην διασφάλιση επαρκούς ανθεκτικότητας έναντι της φθοράς κατά την διάρκεια της ζωής της.

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 εμφανίζονται τα απαραίτητα βήματα για την κατασκευή μια υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Πιο αναλυτικά η πορεία ξεκινά με την μελέτη των περιβαλλοντικών συνθηκών και των ιδιομορφιών του χώρου στον οποίο θα εγκατασταθεί η ανεμογεννήτρια. Όπως επίσης τον έλεγχο των γεωλογικών συνθηκών και χαρακτηριστικών του εδάφους (site specific, external conditions). Στη συνέχεια και με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από την παραπάνω διαδικασία και τους εκάστοτε κανονισμούς σχεδιάζονται τα κατασκευαστικά μέρη της ανεμογεννήτριας (πυλώνας, φορέας στήριξης, θεμελίωση) καθώς και ο βασικός μηχανολογικός εξοπλισμός (RNA). Ενώ μετά καθορίζουμε τις συνθήκες φόρτισης, τους συνδυασμούς φορτίσεων και με βάση τα φορτία και ελέγχουμε για τις διάφορες εντατικές καταστάσεις . Οι συνηθέστερες είναι η Οριακή Κατάσταση Αστοχίας, Οριακή κατάσταση Λειτουργικότητας και Κόπωση.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής για το σχεδιασμό υπεράκτιας ανεμογεννήτριας [[3.4]

Η ασφάλεια της κατασκευής βεβαιώνεται με την κατηγοριοποίηση κάθε ανεμογεννήτριας σε διαφορετικές κλάσεις. Οι κλάσεις αυτές διαχωρίζονται με βάση το μέγεθος των συνεπειών σε περίπτωση αστοχίας της κατασκευής. Για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες υπάρχουν τρεις κλάσεις ασφάλειας (safety classes). Στην πρώτη κλάση (Low safety class) εντάσσονται οι κατασκευές όπου η αστοχία τους έχει λίγες πιθανότητες να προκαλέσει ανθρώπινους τραυματισμούς, περιβαλλοντική μόλυνση αλλά και μικρή οικονομική επίπτωση ενώ αμελητέες πιθανότητες για θάνατο ανθρώπου. Η δεύτερη κλάση (Normal safety class) αναφέρεται σε κατασκευές όπου η αστοχία τους έχει μέτριες πιθανότητες να προκαλέσει ανθρώπινο τραυματισμό, περιβαλλοντικές μόλυνσης και ελάχιστες κοινωνικές επιπτώσεις ενώ

ταυτόχρονα οι οικονομικές επιβαρύνσεις είναι σημαντικές. Τέλος η τρίτη κλάση (High safety class) αναφέρεται στις κατασκευές όπου η αστοχία τους έχει μεγάλες πιθανότητες να προκληθούν ανθρώπινοι θάνατοι τραυματισμοί, σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ή ακραίες κοινωνικές συνέπειες όπως και τεράστιες οικονομικές επιβαρύνσεις. Για το σχεδιασμό σε κάθε μια κλάση παρατηρούμε ότι οι συντελεστές ασφαλείας του υλικού παραμένουν ίδιοι για κάθε κατηγορία. Ενώ η διαφορά έγκειται στους συντελεστές ασφαλείας των φορτίων.

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

Οριακή κατάσταση ονομάζουμε τη συνθήκη πέραν της οποίας η κατασκευή δε θα ικανοποιεί τις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Οι παρακάτω συνθήκες θεωρούνται οριακές καταστάσεις με βάση τον κανονισμό DNV-OS-J101.

Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ultimate limit states (ULS))- αναφέρεται στο μέγιστο σχέση φορτίου και αντοχής Υπέρβασης της αντοχής όπως αστοχία μέλους, φαινόμενα λυγισμού, μετατροπή του φορέα σε μηχανισμό ή μεγάλων παραμορφώσεων.

Οριακή Κατάσταση Κοπώσεως (Fatigue limit states (FLS)) – αναφέρεται στη αστοχία λόγω ανακυκλιζόμενων φορτίων.

Τυχηματική Κατάσταση (Αστοχίας Accidental limit states (ALS))-αναφέρεται στη μέγιστη αντοχή για σπάνια τυχηματικά φορτία ή στην σταθερότητα της κατασκευής μετά από ατύχημα, για παράδειγμα πρόσκρουση πλοίου.

Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (Serviceability limit states (SLS)) - αναφέρεται σε κριτήρια ανοχής που ισχύουν σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας της κατασκευής όπως μέγιστες επιτρεπόμενες παραμορφώσεις και στροφές ή διαφορικές καθιζήσεις.

3.2.3 Δράσεις

Τα διάφορα φορτία που καταπονούν την κατασκευή υπεράκτιας ανεμογεννήτριας και που πρέπει να ληφθούν υπόψη στον σχεδιασμό, κατατάσσονται σε δράσεις, οι οποίες διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

Μόνιμες δράσεις [G]

- Το ίδιο βάρος όλων των δομικών στοιχείων (πρωτεύοντων και δευτερευόντων) που συνθέτουν την κατασκευή
- Το βάρος τυχόν υλικών πλήρωσης (π.χ. έρμα) ή μηχανολογικών εγκαταστάσεων που υφίστανται μόνιμα στην κατασκευή

Υδροστατικές πιέσεις

Μεταβλητές δράσεις [Q]

- Φορτία ανθρωποσυνωστισμού (π.χ. προσωπικό συντήρησης ανεμογεννήτριας)
- Το βάρος τυχόν υλικών πλήρωσης (π.χ. έρμα) ή μηχανολογικών εγκαταστάσεων που δεν υφίστανται μόνιμα στην κατασκευή
- Φορτία ενεργοποίησης μηχανισμών ανεμογεννήτριας (Actuation Loads)

Τυχηματικές δράσεις [A]

- Πρόσκρουση πλοίου
- Πυρκαγιά
- Έκρηξη

Περιβαλλοντικές δράσεις [E]

- Άνεμος (Wind)
- Κύματα (Waves)
- Θαλάσσια Ρεύματα (Currents)
- Πάγος - Χίονι (Snow - Ice)
- Θερμοκρασία (Temperature)
- Σεισμός (Earthquake)
- Μεταβολές της επιφάνειας του πυθμένα (Seabed movement)
- Υποσκαφή πυλώνων-θεμελίων (Scour)
- Θαλάσσιοι οργανισμοί (Marine growth)
- Φορτία απορρεύματος (Wake induced loads)
- Αλλά περιβαλλοντικά φορτία, όπως υγρασία, πλήγμα από κεραυνό, θερμοκρασία και πυκνότητα του θαλασσινού νερού

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 & 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 αυτές, μέσω παραδοχών και αριθμητικών προσομοιώσεων. Επίσης στο Παράρτημα Α του IEC 61400-3, δίνεται η λίστα όλων των κρίσιμων παραμέτρων για των σχεδιασμό υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

3.2.4 Κλάσεις Ανεμογεννητριών

Προκειμένου να διευκολυνθεί η μαζική παραγωγή ανεμογεννητριών και κυρίως των βασικών μηχανολογικών μερών δρομέα-ατράκτου (RNA) δημιουργήθηκαν κλάσεις διαχωρισμού. Οι κλάσεις αυτές κατηγοριοποιούν τις ανεμογεννήτριες με βάση την ταχύτητα του ανέμου και τις παραμέτρους στροβιλισμού. Έτσι μπορούμε να έχουμε μια εικόνα για τις απαιτήσεις της ανεμογεννήτριας που μελετάμε αλλά χωρίς να έχουμε λάβει υπόψιν τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Όσο αφορά τις χειρσαίες ανεμογεννήτριες οι κλάσεις είναι οι παρακάτω.

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			

Εικόνα 3.1: 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

Για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, καθοριστικό για τον σχεδιασμό είναι το συνδυασμένο φορτίο ανέμου-κυματισμών. Ως εκ τούτου η βάση σχεδιασμού πρέπει να είναι το σύνολο των τοπικών περιβαλλοντικών παραμέτρων (site-specific metocean database)⁷, που καθορίζουν τα φορτία ανέμου-κυμάτων-ρευμάτων.

Επιτρέπεται ωστόσο η υιοθέτηση της κατηγοριοποίησης του Πίνακα 1, και οι προβλέψεις του προτύπου IEC 61400-1 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση σχεδιασμού του συστήματος ρότορα-ατράκτου. Αυτό βασίζεται στην παραδοχή ότι ο άνεμος παραμένει η κρίσιμη δράση για τον σχεδιασμό του συστήματος ρότορα-ατράκτου και οι επιρροές από τους θαλάσσιους κυματισμούς-ρεύματα δεν είναι καθοριστικές για τον σχεδιασμό [RNA]. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι η παραπάνω παραδοχή ισχύει σε συνδυασμό με όλες τις υπόλοιπες τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες που θα καθοριστούν.

3.2.5 Συνδυασμοί Φορτίσεων

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι προφανές ότι μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της υφίσταται ένα μεγάλο πλήθος φορτίσεων. Εμείς καλούμαστε να μελετήσουμε ένα συνδυασμό από αυτές τις φορτίσεις (load cases) προκειμένου να διασφαλίσουμε τις απαιτήσεις του σχεδιασμού.

Πίνακας 3.1: Οι συνδυασμοί φορτίσεων για ανεμογεννήτρια εντός θαλάσσης [[3.4]

Σχεδιαστικές Καταστάσεις	DLC	Συνθήκες ανέμου	Συνθήκες Θάλασσας	Διεύθυνση ανέμου και κυματισμών	Άλλες Συνθήκες	Τύπος Αν/σης	Συντ/στές Ασφαλείας
1) Παραγωγή ενέργειας	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub}$ $< V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	COD, UNI	Για ακραίες συνθήκες	U	N (1,25)
	1.2	NTM $V_{in} < V_{hub}$ $< V_{out}$	NSS με δεσμευμένη πιθανότητα κατανομής H_s, T_p, V_{hub}	COD, MUL		F	-

Σχεδιαστικές Καταστάσεις	DLC	Συνθήκες ανέμου	Συνθήκες Θάλασσας	Διεύθυνση ανέμου και κυματισμών	Άλλες Συνθήκες	Τύπος Αν/σης	Συντ/στές Ασφαλείας
1) Παραγωγή ενέργειας	1.3	ETM $V_{in} < V_{hub}$ $< V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	COD, UNI		U	N
	1.4	ECD $V_{in} < V_{hub}$ $< V_{out}$	NSS (ή NWH) $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	MIS, με μεταβαλλόμεν η διεύθυνση ανέμου		U	N
	1.5	EWS $V_{in} < V_{hub}$ $< V_{out}$	NSS (ή NWH) $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	COD, UNI		U	N
	1.6a	NTM $V_{in} < V_{hub}$ $< V_{out}$	SSS $H_s = H_{s,SSS}$	COD, UNI		U	N
	1.6b	NTM $V_{in} < V_{hub}$ $< V_{out}$	SWH $H_s = H_{s,SWH}$	COD, UNI		U	N
2) Παραγωγή ενέργειας με εμφάνιση σφάλματος	2.1	NTM $V_{in} < V_{hub}$ $< V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	COD, UNI	Σύστημα ελέγχου εκτός λειτουργίας ή απώλεια δικτύου	U	N
	2.2	NTM $V_{in} < V_{hub}$ $< V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	COD, UNI	Σύστημα προστασίας εκτός λειτουργίας ή ηλεκτρική βλάβη	U	A
	2.3	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ and V_{out}	NSS (ή NWH) $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	COD, UNI	Εξωτερική ή εσωτερική ηλεκτρική βλάβη, συμπεριλαμβανομένου και έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου	U	A
	2.4	NTM $V_{in} < V_{hub}$ $< V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	COD, UNI	Σύστημα προστασίας εκτός λειτουργίας ή ηλεκτρική βλάβη συμπεριλαμβανομένου έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου	F	-
3) Εκκίνηση	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub}$ $< V_{out}$	NSS (ή NWH) $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	COD, UNI		F	-

Σχεδιαστικές Καταστάσεις	DLC	Συνθήκες ανέμου	Συνθήκες Θάλασσας	Διεύθυνση ανέμου και κυματισμών	Άλλες Συνθήκες	Τύπος Αν/σης	Συν/στές Ασφαλείας
3) Εκκίνηση	3.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2$ m/s and V_{out}	NSS (ή NWH) $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	COD, UNI		U	N
	3.3	EDC1 $V_{hub} = V_r \pm 2$ m/s and V_{out}	NSS (ή NWH) $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	MIS, με μεταβαλλόμενη διεύθυνση ανέμου		U	N
4) Κανονική πάυση λειτουργίας	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS (ή NWH) $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	COD, UNI		F	-
	4.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2$ m/s and V_{out}	NSS (ή NWH) $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	COD, UNI		U	N
5) Επείγουσα παύση λειτουργίας	5.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s/V_{hub}]$	COD, UNI		U	N
6) Αναμονή	6.1a	EWM μοντέλο τυρβώδους ροής ανέμου $V_{hub} = k_1 V_{ref}$	ESS $H_s = k_2 H_{s50}$	MIS, MUL		U	N
	6.1b	EWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{z_{hub}} = V_{e50}$	RWH $H = H_{red50}$	MIS, MUL		U	N
	6.1c	RWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{z_{hub}} = V_{red50}$	EWH $H = H_{50}$	MIS, MUL		U	N
	6.2a	EWM μοντέλο τυρβώδους ροής ανέμου $V_{hub} = k_1 V_{ref}$	ESS $H_s = k_2 H_{s50}$	MIS, MUL	Έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου	U	A
	6.2b	EWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{z_{hub}} = V_{e50}$	RWH $H = H =$	MIS, MUL	Έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου	U	A
	6.3a	EWM μοντέλο τυρβώδους ροής ανέμου $V_{hub} = k_1 V_1$	ESS $H_s = k_2 H_{s1}$	MIS, MUL	extreme yaw misalignment	U	N

Σχεδιαστικές Καταστάσεις	DLC	Συνθήκες ανέμου	Συνθήκες Θάλασσας	Διεύθυνση ανέμου και κυματισμών	Άλλες Συνθήκες	Τύπος Αν/σης	Συντ/στές Ασφαλείας	
6) Αναμονή	6.3 b	EWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{zhub}=V_{e1}$	RWH $H=H_{red1}$	MIS, MUL	extreme yaw misalignment	U	N	
	6.3 b	EWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{zhub}=V_{e1}$	RWH $H=H_{red1}$	MIS, MUL	extreme yaw misalignment	U	N	
	6.4	NTM $V_{hub} < 0.7V_{ref}$	NSS με δεσμευμένη πιθανότητα κατανομής H_s, T_p, V_{hub}	COD, MUL		F	-	
7)) Αναμονή με ταυτόχρονη εμφάνιση σφάλματος	7.1a	EWM μοντέλο τυρβώδους ροής ανέμου $V_{hub}=k_1V_{ref}$	ESS $H_s= k_2H_{s1}$	MIS, MUL		U	A	
	7.1 b	EWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{zhub}=V_{e50}$	RWH $H=H_{red1}$	MIS, MUL		U	A	
	7.1c	RWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{zhub}=V_{red50}$	EWH $H=H_1$	MIS, MUL		U	A	
	7.2	NTM $V_{hub} < 0.7V_{ref}$	NSS με δεσμευμένη πιθανότητα κατανομής H_s, T_p, V_{hub}	COD, MUL		F	-	
	8.1	Αναφέρεται από τον κατασκευαστή					U	A
	8.2a	EWM μοντέλο τυρβώδους ροής ανέμου $V_{hub}=k_1V_{ref}$	ESS $H_s= k_2H_{s1}$	COD, UNI			U	A
	8.2 b	EWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{zhub}=V_{e50}$	RWH $H=H_{red1}$	COD, UNI			U	A
8) Μεταφοράς, ανέγερσης, συντήρησης και επισκευής	8.2c	RWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{zhub}=V_{red50}$	EWH $H=H_1$	COD, UNI		U	A	

Πίνακας 3.2: Υπόμνημα του Πίνακα 3.1 [[3.4]

COD	Ίδιας διεύθυνσης
DLC	Φόρτιση σχεδιασμού
ECD	Ακραία πνοή ανέμου με μεταβαλλόμενη διεύθυνση
ECM	Μοντέλο ακραίων ρευμάτων
EDC	Ακραία αλλαγή διεύθυνσης
EOG	Ακραία πνοή ανέμου
ESS	Ακραία κατάσταση θάλασσας
EWH	Ακραίο ύψος κύματος
EWLR	Ακραίο εύρος μεταβολής της στάθμης της θάλασσας
EWM	Μοντέλο ανέμων ακραίας ταχύτητας
EWS	Ακραία μεταβολή του ανέμου
MIS	Ευθυγραμμισμένα
MSL	Μέση στάθμη της θάλασσας
MUL	Πολλών διευθύνσεων
NCM	Μοντέλο κανονικών ρευμάτων
NTM	Μοντέλο κανονικής τυρβώδους συμπεριφοράς
NWH	Κανονικό ύψος κύματος
NWLR	Κανονικό εύρος μεταβολής της στάθμης της θάλασσας
NWP	Μοντέλο ανέμου κανονικού προφίλ
NSS	Κανονική κατάσταση θάλασσας
RWH	Μειωμένο ύψος κύματος
RWM	Μοντέλο ανέμου μειωμένης ταχύτητας
SSS	Δριμύς κατάσταση θάλασσας
SWH	Δριμύ ύψος κύματος
UNI	Μονής διεύθυνσης
Vr	Ευαισθησία σε όλες τις ταχύτητες ανέμου
F	Κόπωση
U	Οριακή κατάσταση
N	Κανονική κατάσταση
A	Ανώμαλη κατάσταση
T	Μεταφορά και ανέγερση
*	Μερικός συντελεστής ασφαλείας κοπώσεως

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. Στον Πίνακα 3.1 καταγράφονται οι 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, συνθήκες θάλασσας, διεύθυνση ανέμου και κυματισμού και άλλες εξωτερικές συνθήκες καθώς επίσης και η φάση στην οποία βρίσκεται η διαδικασίας παραγωγής ενέργειας.

Για κάθε συνδυασμό φόρτισης που ορίζεται στον Πίνακα 3.1, 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 στην Εικόνα 3.2.

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

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

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

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

Εικόνα 3.2: Συντελεστές ασφάλειας για διάφορες μορφές της Οριακής Κατάστασης [[3.6]

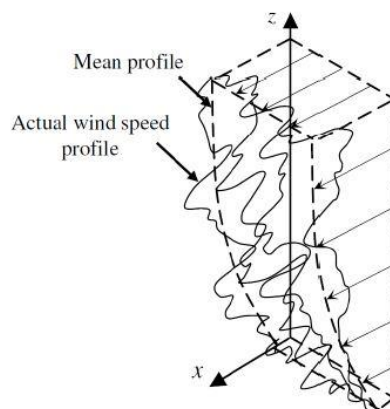
3.3 Φορτία

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:



Εικόνα 3.3: 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.

3.3.1.1 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 την σχέση:

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

όπου $\alpha = 0.14$ και

V_{hub} (ανάλογα με κλάση 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.

$$[NTM] = [NWP] + [TM_{Mann}(\sigma_1)] \quad (3-2)$$

με τιμή της τυπικής απόκλισης $\sigma_1 = I_{ref} (0.75V_{hub} + b)$

όπου $b = 5.6$ m/s και

I_{ref}, V_{hub} (ανάλογα με κλάση ανεμογεννήτριας).

3.3.1.2 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:

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

$$V_{e1}(z) = 0.8V_{e50}(z) \quad (3-4)$$

όπου V_{e50}, V_{e1} : ακραία ταχύτητα ανέμου με περίοδο επαναφοράς 50 έτη και 1 έτος αντίστοιχα, καθ' ύψος z πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

Θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη οριζόντια γωνία κατεύθυνσης ανέμου $\pm 15^\circ$

Τυρβώδες μοντέλο ακραίας ταχύτητας ανέμου EWM-turbulent:

Το μοντέλο [EWM-turbulent] προκύπτει από την σύνθεση ενός μοντέλου τυρβώδους ροής του Mann [TM_{Mann}(σ₁)] και προφίλ μέσης ταχύτητας ανέμου δεκαλέπτου με περίοδο επαναφοράς 50 έτη ή 1 έτος, εκθετικής μορφής σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$V_{50}(z) = V_{\text{ref}} \left(\frac{z}{z_{\text{hub}}} \right)^{0.11} \quad (3-5)$$

$$V_1(z) = 0.8V_{50}(z) \quad (3-6)$$

$$\sigma_1 = 0.11V_{\text{hub}} \quad (3-7)$$

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.

$$[\text{ETM}] = [\text{NWP}] + [\text{TM}_{\text{Mann}}(\sigma_1)] \quad (3-8)$$

$$\sigma_1 = cI_{\text{ref}} \left[0.072 \left(\frac{V_{\text{ave}}}{c} + 3 \right) \left(\frac{V_{\text{hub}}}{c} - 4 \right) + 10 \right], \quad (3-9)$$

με τιμή της τυπικής απόκλισης $c=2$ m/s

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:

$$V_{\text{gust}} = \text{Min} \left\{ 1.35(V_{e1} - V_{\text{hub}}) ; 3.3 \left(\frac{\sigma_1}{1 + 0.1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right)} \right) \right\} \quad (3-10)$$

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

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7z, & z \leq 60\text{m} \\ 42\text{m}, & z > 60\text{m} \end{cases} \quad (3-11)$$

D: διάμετρος του ρότορα

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

$$V(z, t) = \begin{cases} V(z) - 0.3V_{\text{gust}} \sin\left(\frac{3\pi t}{T}\right) \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right), & 0 \leq t \leq T \\ V(z), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-12)$$

όπου $T=10.5s$ και $V(z)$ σύμφωνα με κανονικό προφίλ ανέμου [NWP]

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

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

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

$$\text{όπου } \Lambda_1 = \begin{cases} 0.7z, & z \leq 60 \text{ m} \\ 42 \text{ m}, & z > 60 \text{ m} \end{cases}, D: \text{ διάμετρος του ρότορα και } -180^\circ \leq \theta_e \leq 180^\circ \quad (3-14)$$

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

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \pm 0.5\theta_e \left(1 - \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right) \right), & 0 \leq t \leq T \\ \theta_e, & t > T \end{cases} \quad (3-15)$$

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 $V_{cg}=15m/s$ και η κατανομή της καθ' ύψος ταχύτητας του ανέμου, στο χρόνο δίνεται από την σχέση :

$$V(z, t) = \begin{cases} V(z), & t < 0 \\ V(z) + 0.5V_{cg} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right) \right), & 0 \leq t \leq T \\ V(z) + V_{cg}, & t > T \end{cases} \quad (3-16)$$

όπου $T=10s$: 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 :

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \pm 0.5\theta_{cg} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right) \right), & 0 \leq t \leq T \\ \pm \theta_{cg}, & t > T \end{cases} \quad (3-17)$$

όπου η τιμή θ_{cg} λαμβάνεται:

$$\theta_{cg}(V_{hub}) = \begin{cases} 180^\circ, & \text{for } V_{hub} < 4 \text{ m/s} \\ \left(\frac{720}{V_{hub}}\right)^\circ, & \text{for } 4 < V_{hub} < V_{ref} \end{cases} \quad (3-18)$$

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:

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

Οριζόντιο επίπεδο :

$$V(y,z,t) = \begin{cases} V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha \pm \left(\frac{y}{D}\right) (2.5 + 0.2\beta\sigma_1 \left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)^{1/4}) (1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)), & 0 \leq t \leq T \\ V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-20)$$

όπου

$$\alpha = 0.2, \beta = 6.4, T = 12s$$

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

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

D: διάμετρος του ρότορα.

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

3.3.2 Φορτία θαλάσσιων 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 περιγράψουν μέσω του φάσματος του κυματισμού, S_n , 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} .

3.3.2.1 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 εξαρτώμενου 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 υπό 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 θαλασσίων 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 εξαρτώμενου 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:

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

3.3.2.2 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 (metocean data), έτσι ώστε η επίδραση του φορτίου από το συνδυασμό του ύψους κύματος H_{SWH} και της μέσης ταχύτητας, U_{10} , του ανέμου - μετρημένης 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:

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

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:

$$11.1\sqrt{H_{S,ESS}(U_{10})/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_{S,ESS}(U_{10})/g} \quad (3-23)$$

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

$$H_{50-yr} = 1.86H_{S50} \quad (3-24)$$

$$H_{1-yr} = 1.86H_{S1} \quad (3-25)$$

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:

$$H_{Red,50-yr} = 1.3H_{50} \quad (3-26)$$

$$H_{Red,1-yr} = 1.3H_{51} \quad (3-27)$$

όπου τα χαρακτηριστικά ύψη κύματος H_{50} και H_{51} είναι οι τιμές για περίοδο αναφοράς 3 ωρών.

Σημειώνεται, ότι η περίοδος του κυματισμού που αναφέρεται στα χαρακτηριστικά ύψη κύματος, τα οποία παρουσιάστηκαν στις (3-21), (3-22), (3-23) και (3-24), εμφανίζει ένα κατώτατο όριο που προκύπτει από τις θεωρήσεις σχετικά με την θραύση του κύματος, με τιμές της περιόδου:

$$T > \sqrt{34.5 \frac{d}{g} \tanh^{-1} \left(\frac{H}{0.78d} \right)} \quad (3-28)$$

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

3.3.3 Φορτία ανεμογενών και παλίρροιακών θαλασσιών ρευμάτων

Η επίδραση των ρευμάτων που προκαλούνται από τη δράση του ανέμου και της παλίρροιας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό και στη λειτουργία υπεράκτιων (*offshore*) κατασκευών. Ειδικότερα, η παρουσία ισχυρών ρευμάτων μπορεί να επηρεάσει την κατασκευή με βάση τα ακόλουθα (DNV-RP-C205, 2010):

(α) Τα ρεύματα μπορούν να προκαλέσουν εκτροπή και αργή μετακίνηση σε υπεράκτιες αγκυροβολημένες κατασκευές.

(β) Να προκαλέσουν ή να αυξήσουν τις ανωστικές δυνάμεις σε βυθισμένες κατασκευές.

(γ) Να οδηγήσουν σε ταλαντώσεις των λεπτών τμημάτων της κατασκευής και πρόκληση πεδίου δινών (στροβίλων) λόγω της παρουσίας κατασκευών μεγάλων διαστάσεων εντός του θαλασσιού ροϊκού πεδίου.

(δ) Η αλληλεπίδραση μεταξύ ισχυρών ρευμάτων και κυμάτων οδηγεί σε μεταβολές του ύψους και της περιόδου του κυματισμού.

(ε) Τέλος, τα θαλάσσια ρεύματα προκαλούν διάβρωση του πυθμένα, ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου οι κατασκευές συνδέονται απευθείας ή αγκυρώνονται στον πυθμένα.

Για πρακτικές εφαρμογές, τα ρεύματα που επιδρούν στις κατασκευές που εγκαθίστανται στο θαλάσσιο περιβάλλον, αν και κατά βάση μεταβάλλονται χωρικά και χρονικά, ωστόσο θεωρούνται ομοιόμορφα με σταθερή ταχύτητα και κατεύθυνση κατά την οριζόντια διεύθυνση και μεταβάλλονται μόνο κατά το βάθος. Τα ρεύματα, που συνήθως λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση παράκτιων και υπεράκτιων κατασκευών, είναι: (1) τα επιφανειακά ρεύματα που προκαλούνται από τη δράση του ανέμου (ανεμογενή), (2) τα υπο-επιφανειακά ρεύματα που προκαλούνται από τη δράση της παλίρροιας

(παλιρροιακά) και (3) τα παράκτια ρεύματα που προκαλούνται από τη θραύση των κυμάτων και αναπτύσσονται παράλληλα στην ακτογραμμή (κυματογενή) (BS EN 61400-3, 2009).

Οι πληροφορίες για την στατιστική κατανομή των ρευμάτων, με έμφαση στην κατανομή του πεδίου ταχύτητας κατά το βάθος, είναι συνήθως σποραδικές για τις περισσότερες περιοχές όπου πρόκειται να κατασκευαστούν υπεράκτιες ή παράκτιες κατασκευές. Στα πλαίσια της αρχικής εκτίμησης της καταλληλότητας της περιοχής ενδιαφέροντος προτείνεται, σε πρώτο στάδιο, η εκτίμηση των ρευμάτων μέσω μετρήσεων και στη συνέχεια η πραγματοποίηση αναλυτικότερων μετρήσεων εστιασμένων αφενός στην περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος και αφετέρου καθ' όλο το βάθος της υδάτινης στήλης. Στοιχεία για τις συνθήκες ρευμάτων δίνονται αναλυτικότερα στο ISO 19901-1 (2005).

3.3.4 Θερμοκρασιακές μεταβολές

Όπως και στην περίπτωση του ανέμου και των κυματισμών, διακρίνονται και για τις θερμοκρασιακές μεταβολές κανονικές και ακραίες καταστάσεις.

- Υπό κανονικές συνθήκες: Θερμοκρασία Περιβάλλοντος μεταξύ -10°C και $+40^{\circ}\text{C}$.
- Υπό ακραίες συνθήκες: Θερμοκρασία Περιβάλλοντος μεταξύ -20°C και $+50^{\circ}\text{C}$.

3.3.5 Χιόνι - Πάγος

Δεν προδιαγράφονται ελάχιστες απαιτούμενες τιμές φορτίων που σχετίζονται με ύπαρξη πάγου ή χιονιού στα διάφορα τμήματα της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.

Η ανάγκη ή μη του να συμπεριληφθούν στον σχεδιασμό, θα προκύψει κατόπιν της εκτίμησης των τοπικών περιβαλλοντικών παραμέτρων σύμφωνα με τις αντίστοιχες προβλέψεις του προτύπου IEC 61400-3.

Στο Παράρτημα E, του προτύπου IEC 61400-3 [[3.7], παρουσιάζεται μια μεθοδολογία σύμφωνα με την οποία θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν τα εν λόγω φορτία στον σχεδιασμό.

3.3.6 Μεταβολές της επιφάνειας πυθμένα & υποσκαφές

Αλλαγές της επιφάνειας του πυθμένα μπορεί να προκύψουν, κυρίως σε αμμώδη βυθό, από ρεύματα και κυματισμούς, δημιουργώντας αλλαγές στην μορφολογία του. Αυτό ενδέχεται να οδηγήσει σε συνολική ανύψωση ή υποβάθμιση του πυθμένα ή στην εναλλαγή ανύψωσης-υποβάθμισης.

Η τοπική υποσκαφή και διάβρωση του πυθμένα στην περιοχή των θεμελιώσεων, είναι μία περιβαλλοντική παράμετρος με ιδιαίτερη βαρύτητα που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην φάση σχεδιασμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υποσκαφή θεμελιώσεων μονοπάσσων υπεράκτιων ανεμογεννητριών ενδέχεται να είναι της τάξης του 1m με 2m [[3.8], με δυσμενείς επιρροές στο σύνολο του φορέα.

Η εκτίμηση των εν λόγω περιβαλλοντικών παραμέτρων πρέπει να γίνει σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στο IEC 61400-3 [[3.9].

3.3.7 Φορτία απορεύματος (wake loads)

Η επίδραση που έχει η λειτουργία άλλων υπεράκτιων ανεμογεννητριών στα ανάντη της εξεταζόμενης (εντός υπεράκτιου αιολικού πάρκου), μπορεί να ληφθεί υπόψη μέσω της χρήσης μιας δρώσας τιμής της έντασης τυρβώδους ροής I_{eff} .

Στον Παράρτημα D, του IEC61400-1, δίνεται η μεθοδολογία υπολογισμού της I_{eff} για συνδυασμούς κόπωσης και για συνδυασμούς αστοχίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο του παραπάνω παραρτήματος ισχύει για αποστάσεις μεταξύ ανεμογεννητριών, μεγαλύτερες από 3 διαμέτρους ρότορα.

3.3.8 Σεισμικά φορτία

Γενικά δεν προβλέπονται ελάχιστα σεισμικά φορτία για τον σχεδιασμό υπεράκτιων ανεμογεννητριών, επειδή πρόκειται για μία παράμετρο η οποία έχει αποκλειστικά τοπικό περιβαλλοντικό χαρακτήρα.

Τα σεισμικά φορτία πρέπει να ληφθούν υπόψη σύμφωνα με τον ισχύοντα στην περιοχή ανέγερσης αντισεισμικό κανονισμό και να συνδυάζονται με φορτία:

- (α) κανονικής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (normal operational load) ή
- (β) φορτία σε κατάσταση επείγουσας διακοπής (emergency shut down),
όποια είναι δυσμενέστερα.

3.3.9 Περιβαλλοντικές φορτίσεις σχεδιασμού

Προκειμένου να εξασφαλισθεί η ακεραιότητα της κατασκευής καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στον σχεδιασμό διάφορες φορτιστικές καταστάσεις της ανεμογεννήτριας σε σχέση με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, μέσω της υιοθέτησης περιβαλλοντικών φορτίσεων.

Η κάθε περιβαλλοντική φόρτιση, περιλαμβάνει έναν συγκεκριμένο συνδυασμό περιβαλλοντικών φορτίων, ο οποίος εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (παραγωγή ενέργειας, προγραμματισμένη ή επείγουσα διακοπή, διακοπή λόγω επισκευής κτλ.). Με αυτόν τον τρόπο περιγράφεται πιο ορθολογικά η συνύπαρξη των διάφορων περιβαλλοντικών συνιστωσών.

Τα περιβαλλοντικά φορτία που μπορεί να περιλαμβάνονται σε μια περιβαλλοντική φόρτιση είναι μόνο αυτά που η επιρροή τους μπορεί να είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό, όπως:

- Άνεμος
- Κυματισμοί
- Ρεύματα
- Στάθμη θάλασσας
- Πάγος

Άλλες περιβαλλοντικές δράσεις που ενδεχομένως συνυπάρχουν, αλλά η επιρροή τους θεωρείται αμελητέα, δεν συμμετέχουν στην περιβαλλοντική φόρτιση. Λαμβάνονται όμως υπόψη στην συνολική ανίσωση ασφαλείας κατά τον σχεδιασμό.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα φορτία ανέμου και κυματισμών, μιας περιβαλλοντικής φόρτισης σχεδιασμού, λαμβάνονται υπόψη είτε με την ίδια διεύθυνση (co-directional) ή με διαφορετική (misaligned).

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
- [3.5] Recommended Practice for Planning: International Standards, IEC-61400-1, Design requirements for wind turbines, 3rd edition,2005
- [3.6] EUROPEAN STANDARD, Eurocode 3 – Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures.
- [3.7] IEC 61400-3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines, p. 12.7 Assessment of sea ice
- [3.8] Proceedings of the ICE - Maritime Engineering, Volume 164, Issue 4, 01 December 2011, Sinking of armour layer around a cylinder exposed to a current
- [3.9] IEC 61400-3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines, p. 12.9 Assessment of seabed movement and scour

4 ΎΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΚΑΙ ΜΕΛΟΥΣ ΣΤΗΝ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παραθέσουμε τα τους βασικούς ελέγχους των μεταλλικών διατομών μια ανεμογεννήτριας και την ευστάθεια τους στην οριακή κατάσταση αστοχίας, σύμφωνα με τον EN 1993-1-6. Στην ανεμογεννήτρια εδραζόμενη σε τρίποδο θα ελέγξουμε τις κοίλες διατομές σταθερής διατομής και πάχους του πυλώνα, του υποστηρικτικού συστήματος αλλά και των πασσάλων. Ο έλεγχος γίνεται στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης. Ενώ στην παρούσα διπλωματική οι έλεγχοι γίνονται με τη μέθοδο των τάσεων.

4.2 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

Σύμφωνα με τον κανονισμό DNV-OS-J101 ο πυλώνας εντάσσεται στη βασική κατηγορία, ενώ οι συνδέσεις τους στην ειδική. Επιλέγονται χάλυβες υψηλής αντοχής (HS) των οποίων η χαρακτηριστική τάση διαρροής (f_{yk}) κυμαίνεται μεταξύ 265MPa και 355MPa. Συγκεκριμένα η χαρακτηριστική τάση διαρροής (f_{yk}) ανάλογα με το πάχος των ελασμάτων συνοψίζεται στον παρακάτω Πίνακας 4.1.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικές τάσεις διαρροής ελασμάτων χάλυβα σε σχέση με το πάχος τους. [4.1]

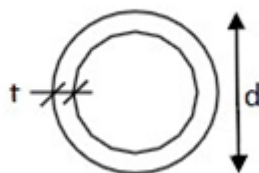
t [mm]	f_{yk} [Mpa]	f_{yk} [Mpa]	f_{yk} [Mpa]
$t \leq 25\text{mm}$	265	315	355
$25\text{mm} < t \leq 50\text{mm}$	245	295	335
$50\text{mm} < t \leq 75\text{mm}$	230	280	320
$75\text{mm} < t \leq 100\text{mm}$	220	270	310

4.3 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 στρωφική 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 στρωφική 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 στρωφική 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 (Εικόνα 4.1) 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 Πίνακας 4.2.



Εικόνα 4.1: Κοίλη κυκλική διατομή, με t: πάχος και d: διάμετρος

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

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

όπου: f_y είναι το όριο διαρροής του χάλυβα

4.4 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].

4.4.1 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 :

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

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

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

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:

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

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

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

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:

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

όπου λ_x , λ_{θ} , λ_T η ανηγμένη λυγηρότητα λ για αξονική, περιφερειακή θλίψη και διάτμηση αντίστοιχα.

4.4.2 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:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{rt}} \quad (4-12)$$

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:

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

όπου

$$C_x = \begin{cases} 1.36 - \frac{1.85}{\omega} + \frac{2.07}{\omega^2} & , \omega \leq 1.7 \\ 1.0 & , 1.7 \leq \omega \leq 0.5 \\ \max(0.6, 1 + \frac{0.2}{C_{xb}} \left[1 - 2\omega \frac{t}{r} \right]) & , \omega \geq 0.5 \frac{r}{t} \end{cases} \quad (4-14)$$

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 (4-15), η ανώτατη ανηγμένη λυγηρότητα της πλαστικής περιοχής λ_0 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:

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

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

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:

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

Ελαστική περιφερειακή κρίσιμη τάση λυγισμού

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

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

Οι παράμετροι C_{θ} , $C_{\theta s}$ εξαρτώνται από τις συντοριακές 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 4.3:

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

Ποιότητα Κατασκευής	Περιγραφή	a_{θ}
Κλάση A	Εξαιρετική	0.75
Κλάση B	Υψηλή	0.65
Κλάση Γ	Κανονική	0.50

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:

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

όπου

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

Ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών a_T στην περίπτωση της διατμητικής τάσης ορίζεται ως συνάρτηση της ποιότητας κατασκευής. 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:

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

4.4.3 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:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (4-26)$$

$$\sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} \quad (4-27)$$

$$T_{x\theta,Ed} \leq T_{x\theta,Rd} \quad (4-28)$$

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

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} \left(\frac{T_{x\theta,Ed}}{T_{x\theta,Rd}} \right)^{k_T} \leq 1 \quad (4-29)$$

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. Συμφώνα 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 (4-29) πρέπει να λαμβάνονται από το Παράρτημα D ως εξής:

$$k_x = 1.25 + 0.75x_x \quad (4-30)$$

$$k_{\theta} = 1.25 + 0.75x_{\theta} \quad (4-31)$$

$$k_T = 1.25 + 0.75x_T \quad (4-32)$$

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 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΠΑΣΣΑΛΟΥ

5.1 Εισαγωγή

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 τρίποδο σύστημα συνήθως χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι πάσσαλοι κοίλης κυκλικής διατομής των οποίων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά έχουν ως εξής:

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

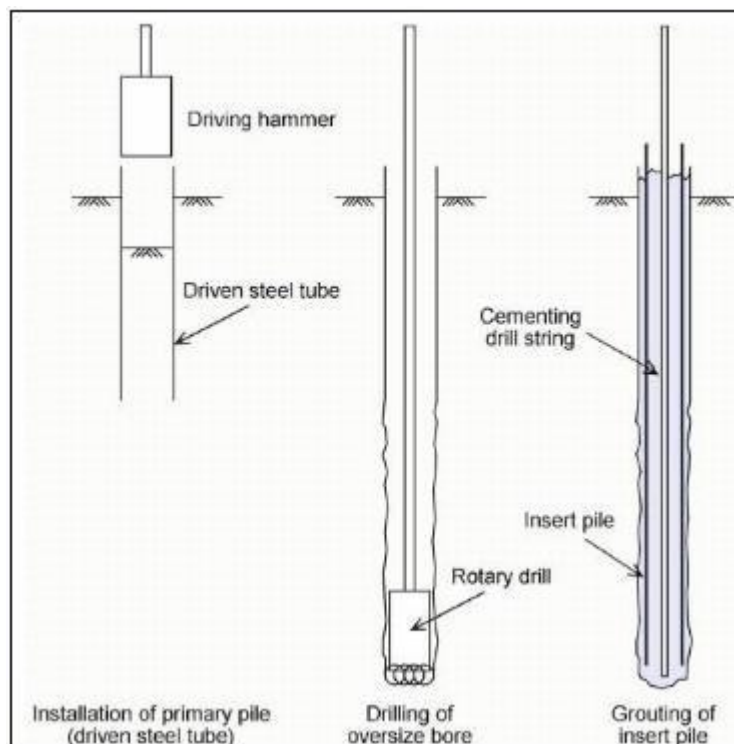


Εικόνα 5.1: Μεταφορά πασσάλων για την εγκατάστασή τους σε υπεράκτια κατασκευή.[5.1]

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:

- Έμμηξη πασσάλων μέσω ειδικών σφυριών (driven piles).
- Μέσω εκσκαφής και ενίσχυσης (drilled and grouted piles).
- Έμμηξη πασσάλων μέσω ειδικών δονητικών σφυριών (vibro-driven piles)



Εικόνα 5.2: Τρόποι έμμηξης πασσάλου: α) Με ειδικά σφυριά, β) Μέσω εκσκαφής και ενίσχυσης, γ) Με δονητικά σφυριά.

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

Κατά την διαδικασία έμπηξης 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 έμπηξης χρειάζεται επιμελής επιτήρηση από τον χειριστή του μηχανήματος ώστε να αποφεύγεται η απόκλιση του πασσάλου από την κατακόρυφο.



Εικόνα 5.3: Σφυρί έμπηξης πασσάλου.

Η διαδικασία που ακολουθείται κατά τη διαδικασία εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας εδραζόμενη σε τρίποδο παρουσιάζεται παρακάτω. Αρχικά το τμήμα της θεμελίωσης συναρμολογείται εξ ολοκλήρου σε εργοτάξια κοντά στην ακτή όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4.



Εικόνα 5.4: Παράκτιο εργοτάξιο συναρμολόγησης των μελών της ανεμογεννήτριας.

Στη συνέχεια με γερανούς τοποθετούνται πάνω κατάλληλα μεταφορικά πλοία. Τα πλοία αυτά μεταφέρουν τα τμήματα της ανεμογεννήτριας στη ακριβή τοποθεσία και με γερανούς τα εδράζουν στο προκαθορισμένο σημείο (Εικόνα 5.5). Αφού τοποθετήσουμε το τρίποδο ώστε να είναι απολύτως επίπεδο, τοποθετούμε τους πυλώνες στα δαχτυλίδια που βρίσκονται στη βάση του τριπόδου. Τέλος με τη χρήση δονητικών σφυριών(Εικόνα 5.3) η λειτουργία των οποίων παρουσιάστηκε παραπάνω εμπιγνύονται οι πάσσαλοι στο έδαφος μέχρι το κατάλληλο βάθος.



Εικόνα 5.5: Τοποθέτηση τριπόδου με πλωτά μέσα

5.3 Χαλύβδινοι Πάσσαλοι

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας μελετάται το τρίποδο σύστημα θεμελίωσης, το οποίο ουσιαστικά αποτελείται από τρεις πασσάλους. Οι πάσσαλοι ίδιας μορφής με αυτόν του μονοπάσσαλου συστήματος με τη διαφορά τους να έγκειται κυρίως στις διαστάσεις. Με άλλα λόγια οι πάσσαλοι του τρίποδου έχουν συνήθως μικρότερο μήκος μικρότερη διάμετρο και πάχος. 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 εντακτική 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.

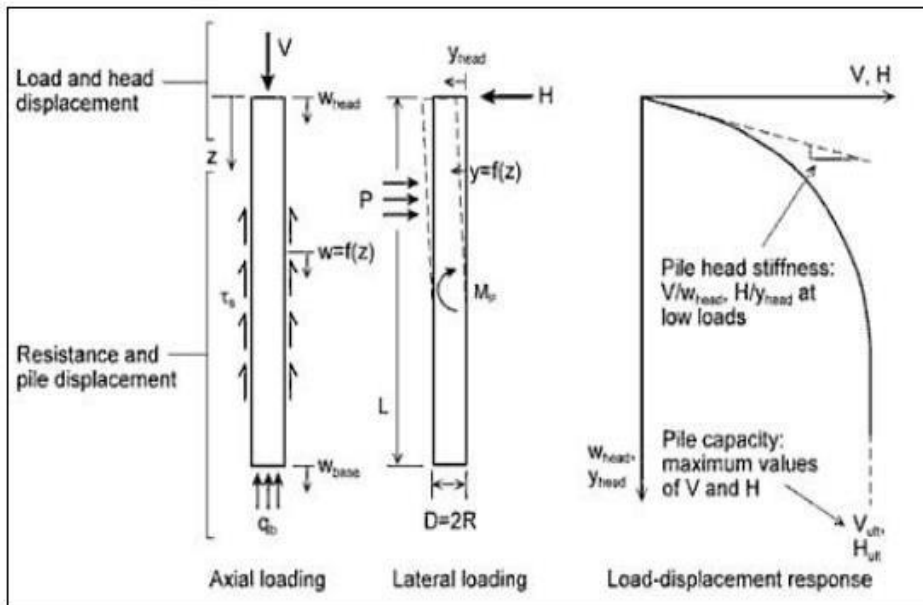
5.4 Φέρουσα ικανότητα- Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες εδραζόμενες σε τρίποδο μεταφέρουν τα φορτία μέσω των πασσάλων στο έδαφος. Λόγω της γεωμετρίας του τριπόδου οι πάσσαλοι καταπονούνται κυρίως αξονικά, αλλά και καμπικά. Το μεγαλύτερο όμως μέρος της κάμψης που εμφανίζεται στον πυλώνα λόγω των πλευρικών φορτίων μεταφέρεται στο έδαφος μέσω των πασσάλων με ζεύγη δυνάμεων. Έτσι σχεδόν πάντα κάποιοι πάσσαλοι θα εφελκύνονται και κάποιοι θα θλίζονται. Γι' αυτό το λόγο γίνεται έλεγχος έναντι θλίψης, δηλαδή να μη επέλθει διατμητική αστοχία, αλλά και έλεγχος σε εφελκυσμό και συγκεκριμένα έλεγχος έναντι ολίσθησης.

5.4.1 Φέρουσα ικανότητα έναντι θλίψης

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]. Ο μηχανισμός ανάληψης των φορτίων είναι διαφορετικός για

αξονική και πλευρική φόρτιση, ωστόσο οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης είναι ίδιας μορφής (Εικόνα 5.6):



Εικόνα 5.6: 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 (5-1):

$$Q_u = \Sigma Q_{su} + Q_{pu} - W_p \tag{5-1}$$

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:

$$\sum_1^i Q_{su} = nD \int_0^L f_{sui} dz \tag{5-2}$$

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:

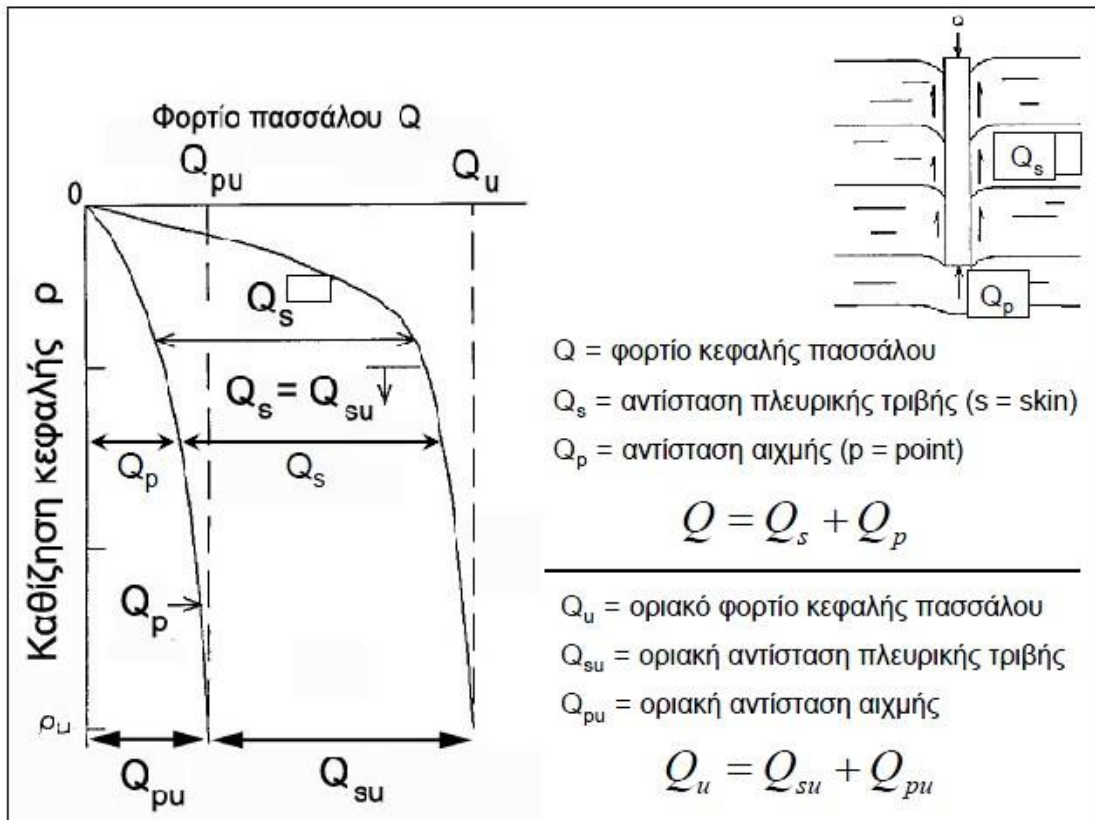
$$Q_{pu} = A_p q_{pu} \tag{5-3}$$

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 (Εικόνα 5.5):



Εικόνα 5.7: Μορφή καμπύλης αξονικής δύναμης-καθίζησης στην κεφαλή του πασσάλου [5.2].

5.4.2 Φέρουσα ικανότητα έναντι εφελκυσμού- ολίσθησης

Στην περίπτωση των εφελκυσόμενων πασσάλων θα πρέπει να γίνει έλεγχος έναντι ολίσθησης. Είναι βέβαιο ότι η φέρουσα ικανότητα έναντι ολίσθησης θα είναι πάντα κρίσιμη σε σχέση με τη αστοχία λόγω διαρροής. Η φέρουσα ικανότητα λόγω ολίσθησης είναι ουσιαστικά το άθροισμα οριακής αντίστασης πλευρικής τριβής και του ίδιου βάρους του πασσάλου.

$$\text{Φ.Ι. έναντι ολίσθησης} = \Sigma Q_{su} + W_p \quad (5-4)$$

όπου:

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

W_p είναι το ίδιο βάρος του πασσάλου

5.4.3 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 κατευθυντήριες οδηγίες του DNV NO.30.4 τα εδάφη χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- συνεκτικά εδάφη (αργιλικόι 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:

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

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:

$$\alpha = \begin{cases} 0.5\psi^{-0,5}, & \psi \leq 1 \\ 0.5\psi^{-0,25}, & \psi < 1 \end{cases} \quad (5-6)$$

όπου:

$$\psi = c_u / p_0' \quad (5-7)$$

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 (5.6):

$$q_{pu} = 9c_u \quad (5-8)$$

όπου:

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

5.4.4 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 (5-9):

$$f_s = K \tan \delta p_0' \quad (5-9)$$

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

p_0' είναι η κατακόρυφη ενεργός τάση

Επίσης η αντίσταση της αιχμής του δίνεται από τη σχέση:

$$q_p = p_0' N_q \quad (5-10)$$

όπου:

N_q είναι ο συντελεστής φέρουσας ικανότητας

p_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
Πυκνότητα	Έδαφος	δ (°)	$\max f_s$ [kPa]	N_q	$\max q_p$ [MPa]

5.5 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. Ως συνέπεια των κυρίαρχων πλευρικών φορτίσεων ο πάσσαλος 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) πασσάλου – εδάφους συνδέεται κυρίως με την κάμψη του πασσάλου λόγω καμπτικών ροπών 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

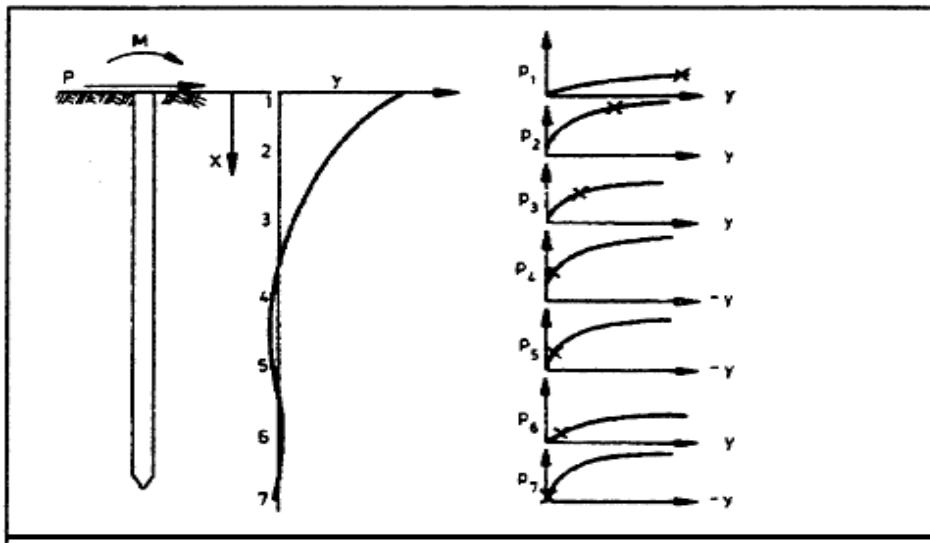
Σύμφωνα με τα κατευθυντήρια πλαίσια DNV CLASSIFICATION NOTES NO.30.4 και ISO-19902 [5.6], η ανάλυση πλευρικά φορτισμένων πασσάλων γίνεται συνήθως με την μέθοδο $p-y$, η οποία αναπτύχθηκε από τον Αμερικάνικο Οργανισμό Πετρελαίου (API). Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο προσδιορίζονται καμπύλες φορτίου-μετακινήσεων ($p-y$), 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 5.1).

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 (5-11):

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

$$EI \frac{d^3 y}{dx^3} + Q_A \frac{dy}{dx} = Q_L \text{ και } EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M \quad (5-11)$$

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 κατανεμημένο φορτίο κατά μήκος του πασσάλου και M η καμπτική ροπή του πασσάλου, όλα συναρτήσκει του x .



Σχήμα 5.1: 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

5.5.1 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]:

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c} \right)^{1/3} & , y \leq 8y_c \\ p_u & , y > 8y_c \end{cases} \quad (5-12)$$

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

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

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

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c} \right)^{1/3} & , y \leq 3y_c \\ 0.72p_u \left(1 - \left(1 - \frac{X}{X_R} \right) \frac{y - 3y_c}{12y_c} \right) & , 3y_c < y \leq 15y_c \\ 0.72p_u \frac{X}{X_R} & , y > 15y_c \end{cases} \quad (5-14)$$

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 $y_c = 2.5e_cD$

e_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:

$$p = \begin{cases} (3c_u + \gamma'X)D + Jc_u & , 0 < X \leq X_R \\ 9c_uD & , X > X_R \end{cases} \quad (5-15)$$

όπου:

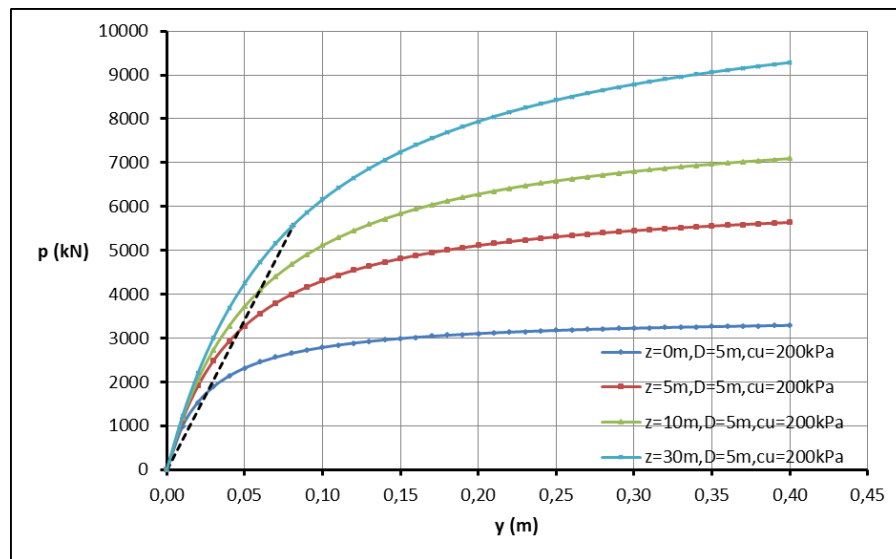
D είναι η διάμετρος του πασσάλου

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 5.2) 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 5.2: Καμπύλες πιέσεων-υποχωρήσεων p-y για διάφορα βάθη.

5.5.2 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/y), δίνεται από την παρακάτω υπερβολική εξίσωση [5.7]:

$$p = A p_u \tanh\left(\frac{kz}{A p_u} y\right) \quad (5-16)$$

όπου:

p είναι πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους που ασκείται στον πάσσαλο

y 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 ένας αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τις συνθήκες φόρτισης (στατική-δυναμική) και λαμβάνει την τιμή 0.9 για κυκλική φόρτιση.

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]:

$$p_u = \begin{cases} (C_1 X + C_2 D) \gamma' X, & 0 < X \leq X_R \\ C_3 D \gamma' X, & X > X_R \end{cases} \quad (5-17)$$

όπου:

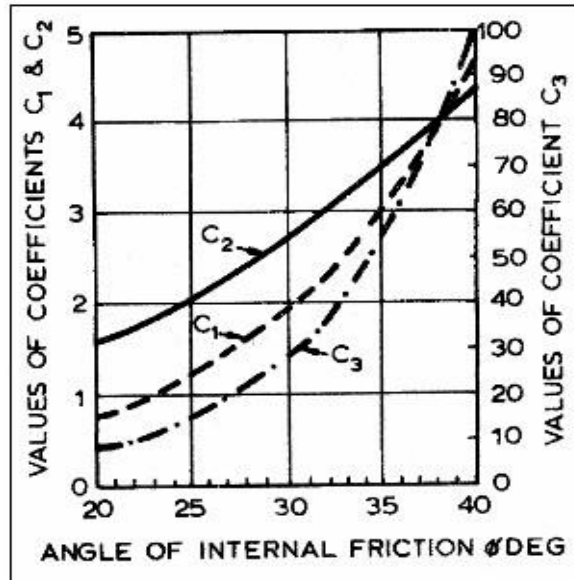
p_u είναι το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου

X είναι το βάθος κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας

D είναι η διάμετρος του πασσάλου

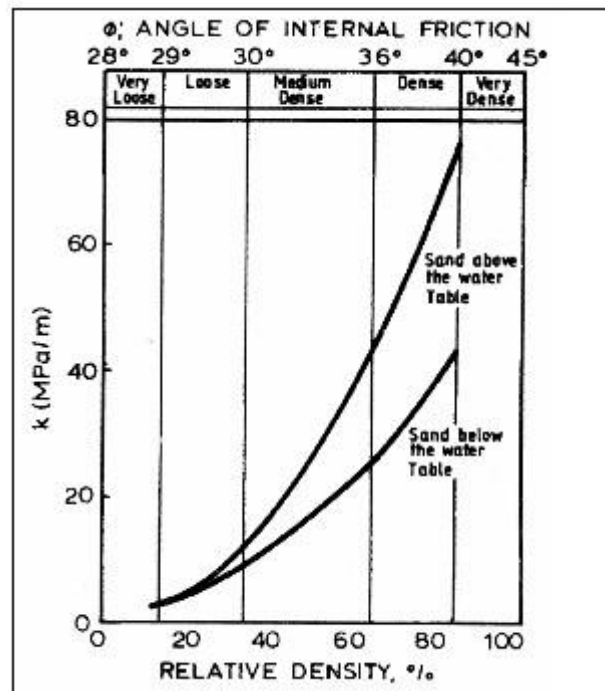
X_R είναι το βάθος κάτω από το οποίο η τιμή της παράστασης $(C_1X + C_2D) \gamma'X$ υπερβαίνει την τιμή $C_3D \gamma'X$

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 5.3).



Σχήμα 5.3: Συντελεστές C_1, C_2, C_3 συναρτήσει της εσωτερικής γωνίας τριβής ϕ° [5.7].

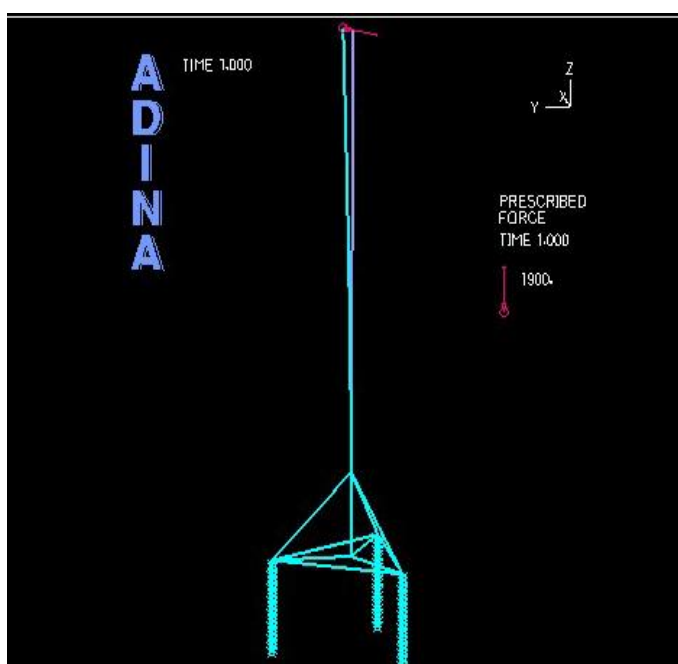
Η σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση (k) εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα του εδάφους και λαμβάνεται από το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.4):



Σχήμα 5.4: Σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση συναρτήσει της σχετικής πυκνότητα του εδάφους [5.9].

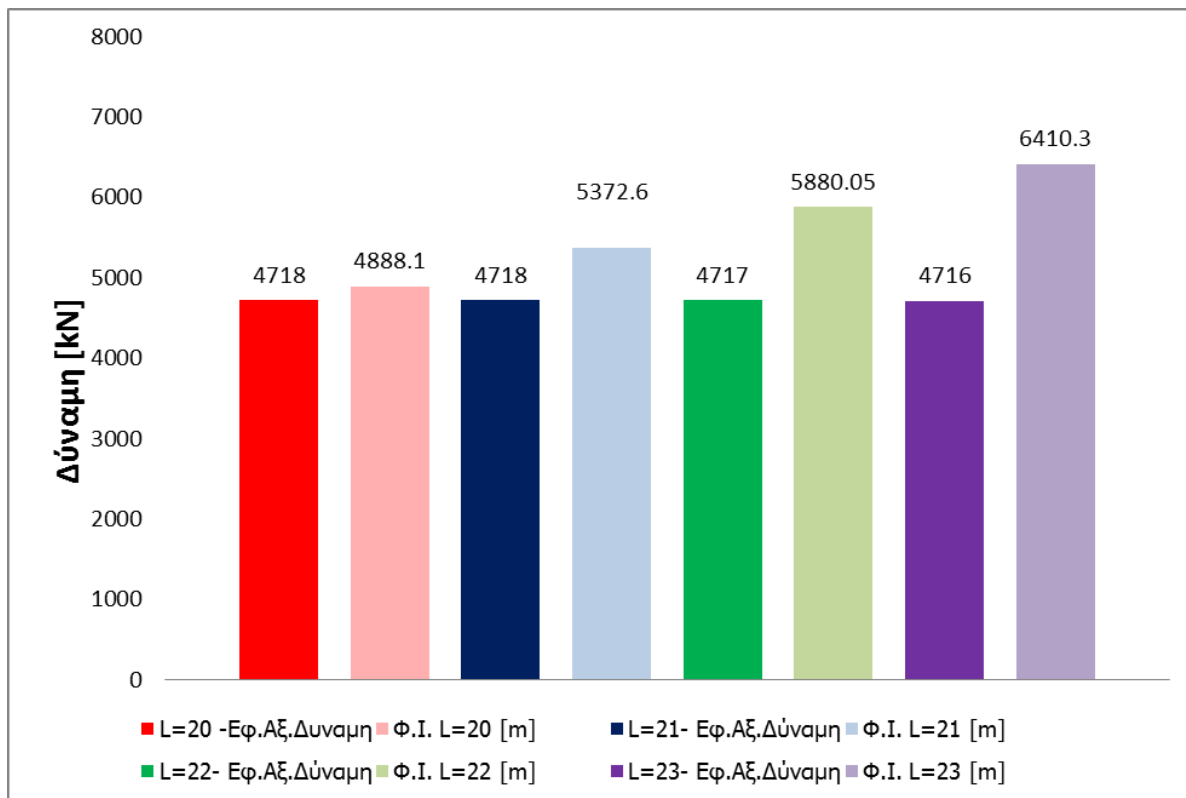
5.6 Διερεύνηση φέρουσας ικανότητας πασσάλου έναντι ολίσθησης σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Προκειμένου να αποκτήσουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα για τη συμπεριφορά των πασσάλων σε εφελκυσμό σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, εκτελέσαμε μια σειρά δοκιμών. Οι δοκιμές αυτές βασίστηκαν σε μια πρότυπη ανεμογεννήτρια που εδράζεται σε τρίποδο και η προσομοίωσή της έγινε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Ο τρόπος και η μορφή προσομοίωσης είναι ίδια με αυτή του μοντέλου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο **Error! Reference source not found.**, ενώ το μοντέλο φορτίζεται με οριζόντιο συγκεντρωμένο φορτίο στην κορυφή του πυλώνα(Εικόνα 5.8) Αυτό που θέλουμε να προσδιορίσουμε είναι το πόσο επηρεάζεται η φέρουσα ικανότητα των εφελκυσόμενων πασσάλων έναντι ολίσθησης όταν εμείς μεταβάλλουμε τη διάμετρο, το μήκος και την απόσταση μεταξύ των πασσάλων. Η επιλογή της διερεύνησης αυτής έγινε επειδή ο έλεγχος έναντι ολίσθησης παρουσιάζεται ως κρίσιμος. Ενώ η επιλογή των παραμέτρων έγινε με βάση τον τύπο της φέρουσας ικανότητας έναντι ολίσθησης που εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πασσάλου (5.4.2).



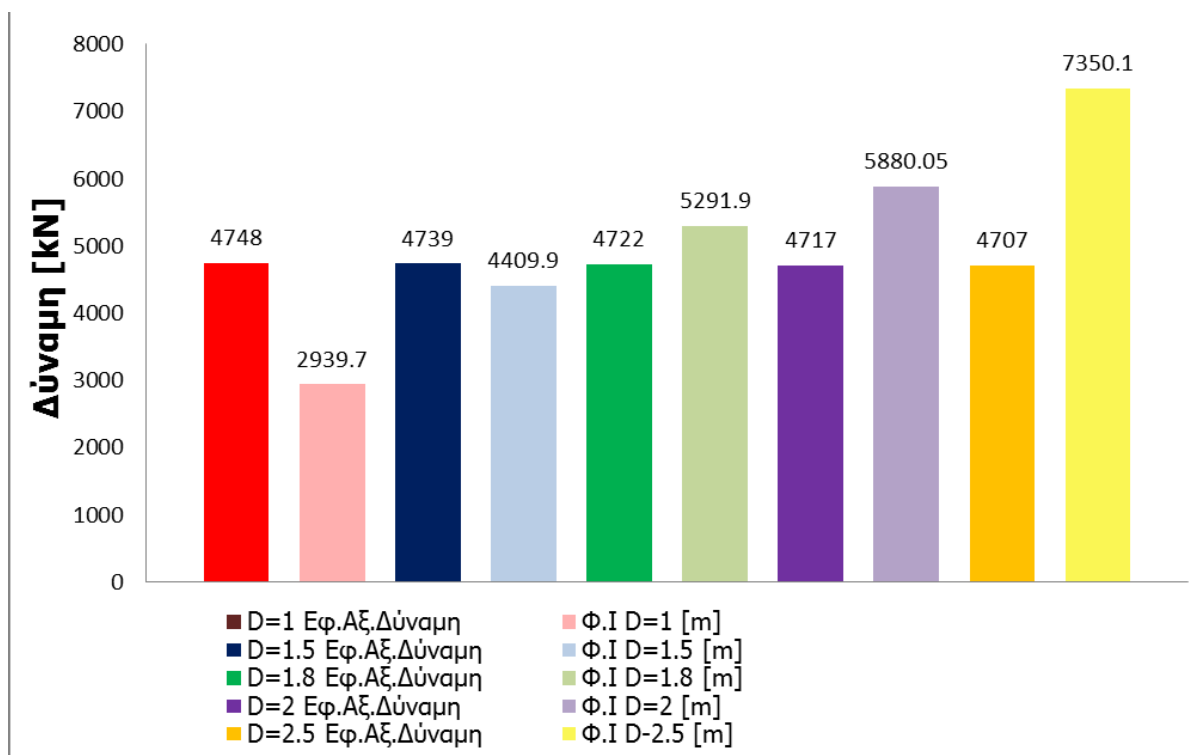
Εικόνα 5.8: Μοντέλο ελέγχου φέρουσα ικανότητας έναντι ολίσθησης

Αρχικά ελέγχουμε πασσάλους για σταθερή διάμετρο $D=2\text{m}$ και πάχος $t=0.02\text{m}$, ενώ κοιτάμε την επιρροή του μήκους έμπηξης L , τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 5.5. Παρατηρούμε ότι η φέρουσα ικανότητα αυξάνεται σχεδόν 9% για κάθε μέτρο που προστίθεται, ενώ η αξονική δύναμη παραμένει πρακτικά σταθερή παρά την αλλαγή της γεωμετρίας.



Σχήμα 5.5: Επιρροή του μήκους πασσάλου στην φέρουσα ικανότητα έναντι ολίσθησης

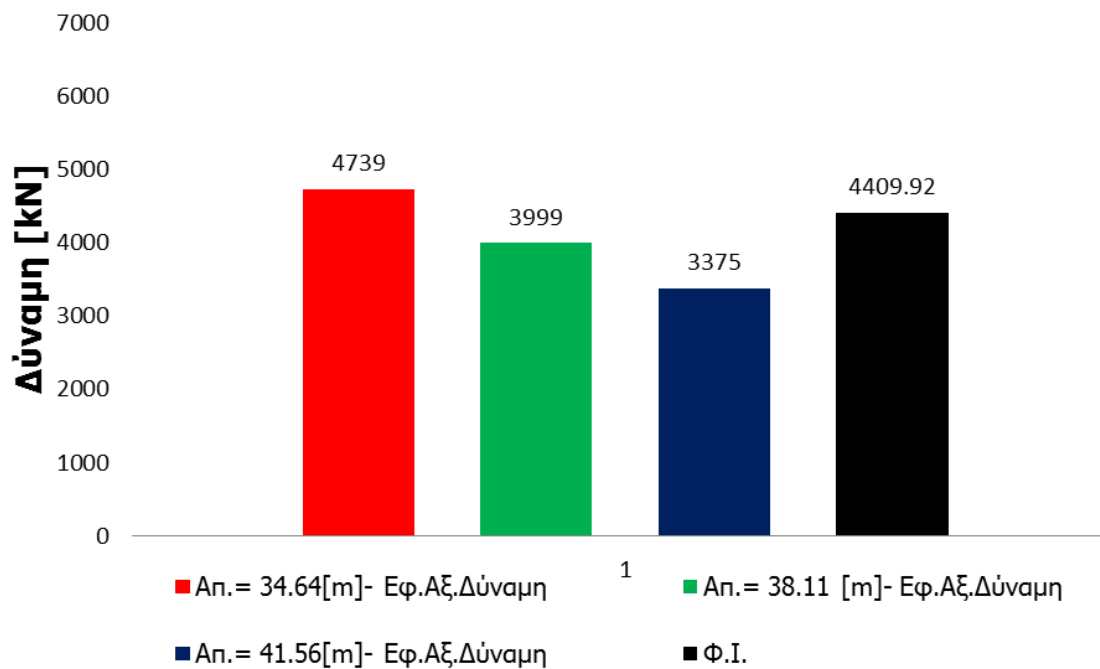
Στη συνέχεια εξετάζουμε την επιρροή της διαμέτρου σε ένα πάσσαλο με σταθερό μήκος $L=22\text{m}$ και πάχος $T=0.02\text{m}$, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.6. Παρατηρούμε ότι η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου είναι ανάλογη της διαμέτρου οπότε όταν αυξάνεται από $D=1\text{m}$ σε $D=1.5\text{m}$ η Φ.Ι. αυξάνεται 50% ενώ όταν αυξάνεται από $D=2\text{m}$ σε $D=2.5\text{m}$ η Φ.Ι. αυξάνεται 0.25%. Παράλληλα σημειώνουμε ότι ούτε η μεταβολή της διαμέτρου επηρεάζει την αξονική δύναμη.



Σχήμα 5.6: : Επιρροή της διαμέτρου του πασσάλου στην φέρουσα ικανότητα έναντι ολίσθησης

Στην τρίτη περίπτωση στοχεύσαμε στον τρόπο που μεταφέρει το τρίποδο την ένταση στο έδαφος (και κυρίως την κάμψη) δηλαδή με ζεύγη δυνάμεων. Υπό αυτό το σκεπτικό θεωρήσαμε ότι ένα αυξήσουμε την απόσταση μεταξύ των πασσάλων η φέρουσα ικανότητα έναντι ολίσθησης θα παραμείνει ίδια αλλά το αξονικό φορτίο των πασσάλων θα αλλάξει, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Ο πάσσαλος έχει μήκος $L=22\text{m}$, διάμετρο $D=1.5\text{m}$ και πάχος $t=0.02\text{m}$. Παρατηρούμε ότι για κάθε ένα μέτρο που αυξάνεται η διαγώνιος του τριπόδου η αξονική δύναμη στους πασσάλους παρουσιάζει σταθερή μείωση της τάξης του 15.6%. Βέβαια η αύξησή αυτή των αποστάσεων μπορεί να μειώνει την ένταση στους πασσάλους, αλλά δε ξέρουμε πως επιβαρύνεται το υπόλοιπο τρίποδο.

Τέλος η μεταβολή του πάχους είναι προφανές ότι δεν επηρεάζει τη φέρουσα ικανότητα έναντι ολίσθησης παραμόνο με την αύξηση του βάρους, του οποίου η συμβολή είναι αμελητέα.



Σχήμα 5.7: Επιρροή της απόστασης μεταξύ των πασσάλων στην αξονική δύναμη σε σύγκριση με την φέρουσα ικανότητα

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, Κ. Abdel-Rahman, Yu-Shu Kuo, "Design of monopole foundations for offshore wind energy converters", Paper
- [5.9] Wistan Carswell, Sanjay Raja Arwade, Don J. DeGroot, Matthew A. Lackner, "Soil–structure reliability of offshore wind turbine monopile foundations"

6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν οι κανονιστικές διατάξεις που προτείνονται από διεθνείς οργανισμούς για το σχεδιασμό των κατασκευαστικών μερών υπεράκτιων ανεμογεννητριών θεμελιωμένων σε τρίποδο σύστημα. Με βάση τα παραπάνω έγινε η προκαταρκτική μελέτη (case study) θαλάσσιας ανεμογεννήτριας που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

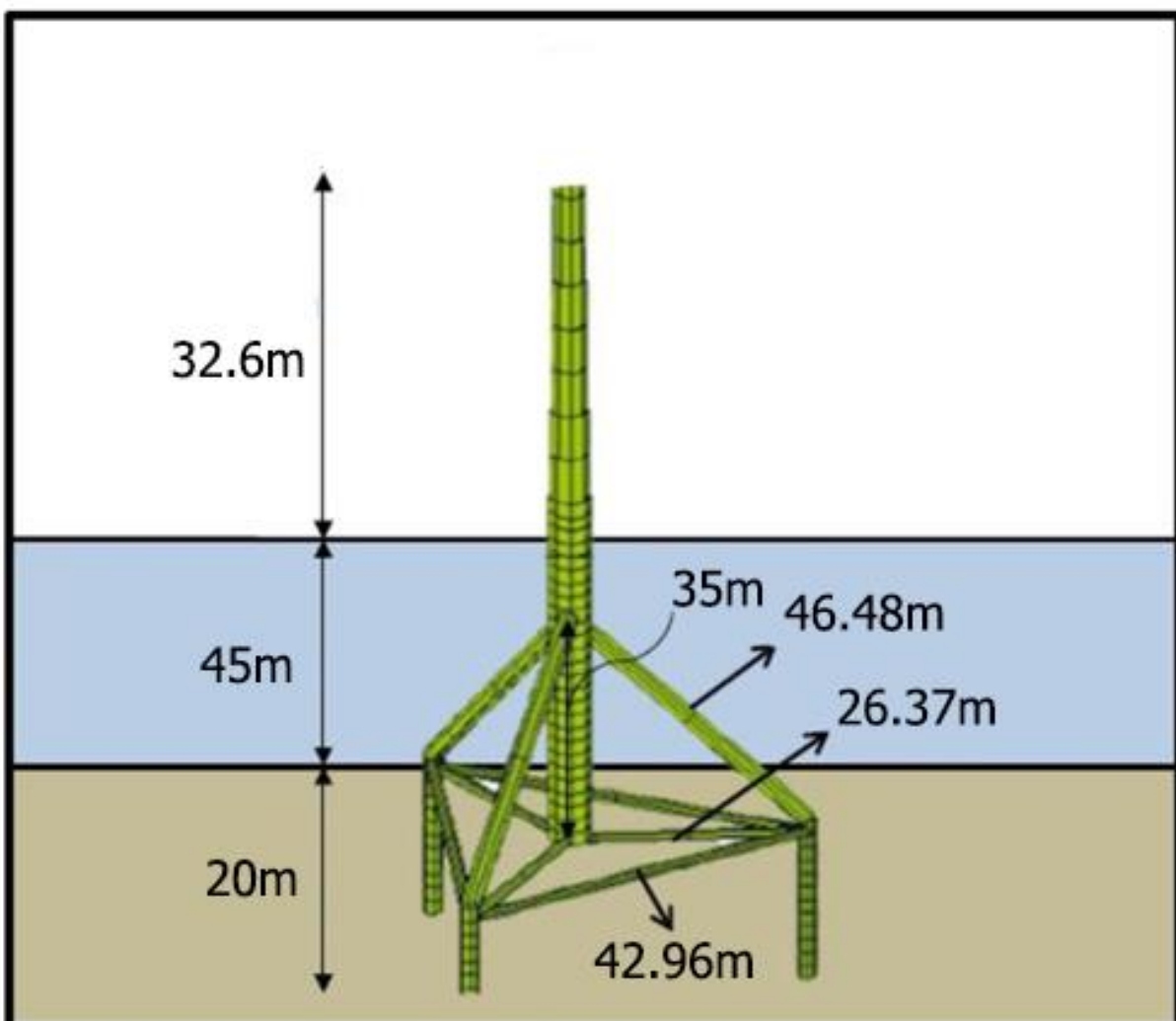
6.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας

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 (Εικόνα 6.1):

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)

Εικόνα 6.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας τύπου NREL 5-MW [6.1].

Η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που μελετήσαμε μας δόθηκαν από την πρότυπη ανεμογεννήτρια του λογισμικού FAST (NREL laboratory [6.1]). Επειδή το λογισμικό FAST δεν είναι ικανό να προσομοιώσει επαρκώς το έδαφος, μας δίνονται πληροφορίες μόνο για το κατασκευή πάνω από τον πυθμένα, δηλαδή παραλείπονται γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τους πασσάλους. Η ανεμογεννήτρια εδράζεται σε βάθος 45m και έχει συνολικό ύψος 88.6m (από το πυθμένα της θάλασσας). Τα δύο βασικά μέλη που την απαρτίζουν είναι (1) ο πυλώνας μήκους 77.6m που έχει κοίλη κυκλική διατομή σταθερού πάχους $t=0.05[m]$, διαμέτρου $D=5.70m$ όπου στα τελευταία 44m μέτρα η διατομή μειώνεται σταδιακά καταλήγοντας σε διατομή $D=4.00m$ και ίδιο πάχος. (2) Ο φορέας στήριξης αποτελείται από μέλη που έχουν κοίλες κυκλικές διατομές σταθερής διατομής και σταθερού πάχους, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα για την πρότυπη ανεμογεννήτρια παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η Μ.Σ.Θ. θεωρείται στα 45m από το πυθμένα της θάλασσας (Εικόνα 6.2).



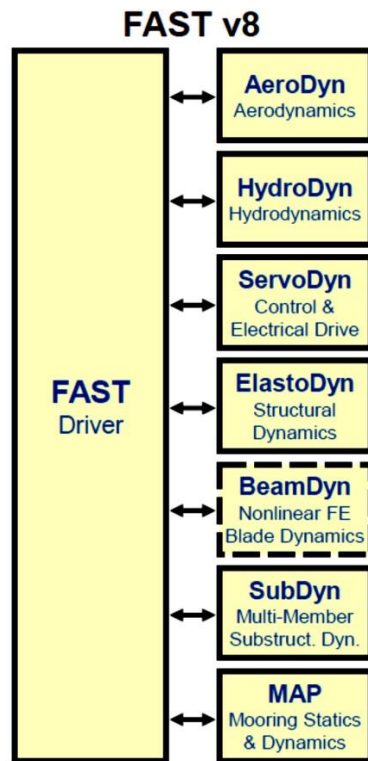
Εικόνα 6.2: Γεωμετρικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας

Πίνακας 6.1: Πίνακας γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των διατομών

Διατομές	Μέτρο του Young	Μέτρο Διάτμ. χάλυβα	Ειδ. πυκνότητα χάλυβα	Διάμετρος-D	Πάχος-t
	(N/m ²)	(N/m ²)	(kg/m ³)	(m)	(m)
1	2.10E+11	8.10E+10	7850	3.15	0.035
2	2.10E+11	8.10E+10	7850	3.15	0.045
3	2.10E+11	8.10E+10	7850	1.88	0.025
4	2.10E+11	8.10E+10	7850	2.48	0.035
5	2.10E+11	8.10E+10	7850	1.20	0.025
6	2.10E+11	8.10E+10	7850	3.14	0.05
7	2.10E+11	8.10E+10	7850	3.40	0.05
8-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	5.70	0.05
9	2.10E+11	8.10E+10	7850	3.69	0.05
10-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	3.98	0.05
11-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	4.26	0.05
12-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	4.55	0.05
13-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	4.84	0.05
14-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	5.13	0.05
15-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	5.41	0.05

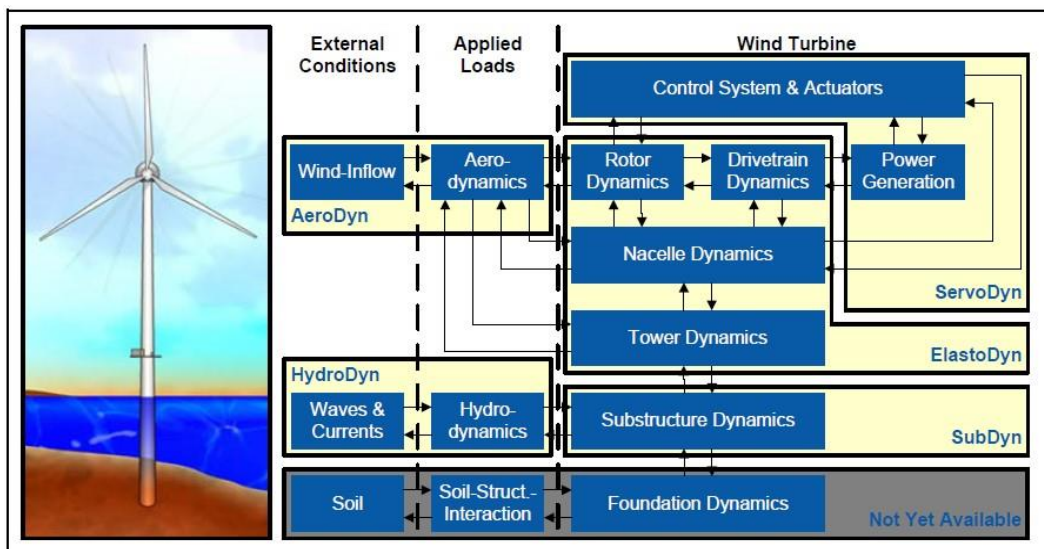
6.2 Προσομοίωση Ανεμογεννήτριας

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 κώδικες (AeroDyn, HydroDyn, κτλ.) οι οποίοι ανταλλάσσουν δεδομένα εισόδου – εξόδου ώστε το FAST να εξαγει 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
- τους πασσάλους

Φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας ονομάζουμε όλα τα δευτερεύοντα μέλη που συνδέονται με τον πυλώνα και μεταφέρουν τις εντάσεις στους πασσάλους.

Στο λογισμικό FAST είναι εφικτή η πλήρης προσομοίωση του πύργου της ανεμογεννήτριας (ύψος ρότορα, μήκος, γεωμετρία και αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων, σύστημα ελέγχου) καθώς και του φορέα στήριξης συμπεριλαμβανομένων των τμημάτων των πασσάλων που βρίσκονται πάνω από τον πυθμένα της θάλασσας. Οι πάσσαλοι δεν είναι δυνατό να προσομοιωθούν στην παρούσα έκδοση του FAST. Επομένως για την προσομοίωση και την διαστασιολόγηση του υπέργειου τμήματος αλλά και των πασσάλων απαιτήθηκε η χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα αρχικά χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SAP2000 και το ADINA9.0 (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.

6.3 Υπολογισμός Φορτίων

Ο υπολογισμός των φορτίων σχεδιασμού των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί τη συνεργασία τόσο των κατασκευαστών όσο και της ομάδας σχεδιασμού. Αναφορικά με τα φορτία ανέμου και κυμάτων υπάρχει μια βασική κατηγοριοποίηση σε Κανονικές (Normal) και σε Ακραίες (Extreme) συνθήκες. Η διαφοροποίηση των δύο κατηγοριών έγκειται στην περίοδο επαναφοράς των φαινομένων, για παράδειγμα για Κανονικές Συνθήκες η περίοδο επαναφοράς είναι 1 έτος ενώ για Ακραίες Συνθήκες είναι 50 έτη.

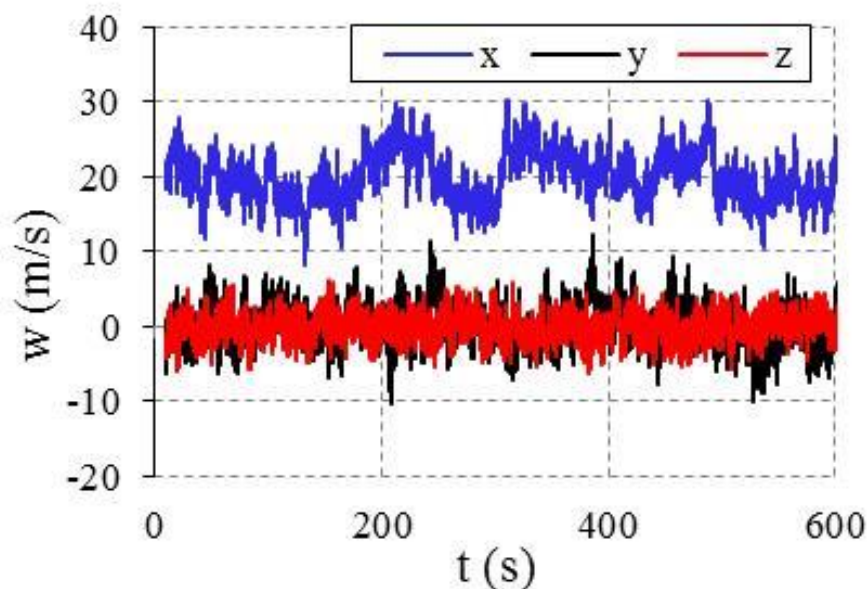
6.3.1 Αεροδυναμικά Φορτία

Προκειμένου να καλυφθεί κάθε πιθανή περίπτωση φόρτισης, οι Διεθνείς κανονισμοί συμπεριέλαβαν ένα μεγάλο αριθμό Φορτίων Σχεδιασμού (Design Load Cases), όπου κάθε φόρτιση περιλαμβάνει ένα συνδυασμό περιβαλλοντικών φορτίων που εξαρτώνται από τις λειτουργικές συνθήκες της ανεμογεννήτριας (κατά τη διάρκεια παραγωγής ενέργειας, κατά τη διάρκεια μια προγραμματισμένης ή μη διακοπής, κατά τη διάρκεια επιδιόρθωσης κ.τ.λ.). Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία σχεδιάσαμε την ανεμογεννήτρια για δύο συγκεκριμένα φορτία σχεδιασμού DLC 1.3 και DLC 1.6a που φαίνονται στον Πίνακα 6.2. Η ανεμογεννήτρια και για τις δύο εντατικές καταστάσεις βρίσκεται στο στάδιο παραγωγής ενέργειας. Ο πρώτος συνδυασμός φόρτισης DLC 1.3 συνδυάζει Ακραίες Συνθήκες Τυρβώδους Ανέμου (Extreme Turbulent Wind Model (ETM)) με Κανονικές Συνθήκες Θάλασσας (Normal Sea State (NSS)). Ενώ ο δεύτερος συνδυασμός φόρτισης DLC 1.6 συνδυάζει Κανονικές Συνθήκες Τυρβώδους Ανέμου (Normal Turbulent Wind conditions (NTM)) με Δριμύς Συνθήκες Θάλασσας (Severe Sea State (SSS)). Όπως είναι εμφανές και στον Πίνακα 6.2 και οι δύο συνδυασμοί φορτίσεως είναι φορτίσεις Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (Ultimate Limit State) και όχι Κοπώσεως (Fatigue).

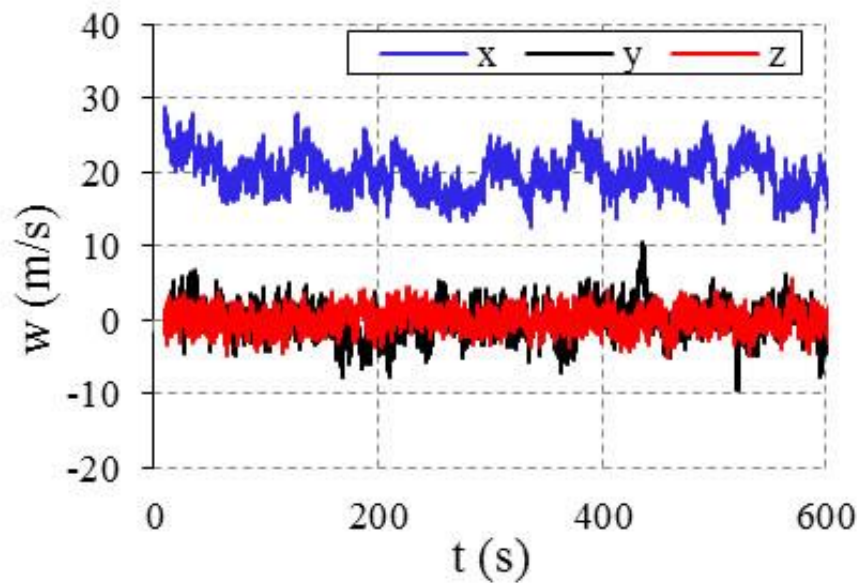
Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά Φορτίων Σχεδιασμού που μελετήθηκαν

DLC	Wind Condition	Wave Condition	Wind/Wave directionality	Type of analysis
1.3	ETM	NSS	Co-directional	ULS
1.6a	NTM	SSS	Co-directional	ULS

Προκειμένου να προσδιορίσουμε τη συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας και την εντατική της κατάσταση σε σχέση με τον άνεμο δοκιμάσαμε μια γκάμα ταχυτήτων αναφοράς V_{hub} . Οι ταχύτητα αυτή κυμαίνεται μεταξύ την ταχύτητα V_{in} και V_{out} , όπου V_{in} είναι η ταχύτητα ανέμου για την οποία η ξεκινάει τη λειτουργία της ενώ V_{out} είναι η ταχύτητα ανέμου για την οποία η ανεμογεννήτρια σταματάει την λειτουργία της προκειμένου να αποφευχθούν βλάβες. Εισάγοντας τις ταχύτητες αναφοράς στο υποπρόγραμμα TurbSim και μέσω του λογισμικού FAST παρήγαμε μια τρισδιάστατη χρονοϊστορία για κάθε ταχύτητα αναφοράς και για κάθε φόρτιση. Στο Σχήμα 6.3 και στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της ταχύτητας του ανέμου στις διευθύνσεις x, y, z . Οι χρονοϊστορίες πραγματοποιήθηκαν με χρονικό βήμα ίσο με 0.05sec ενώ ο χρόνος της ανάλυσης διήρκεσε 610sec. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα πρώτα 10sec της ανάλυσης παραλήφθηκαν των ανομοιογενών αποτελεσμάτων που εμφανίζονται κατά την εκκίνηση. Όπως επιβεβαιώνεται και από το γράφημα, ο συνδυασμό φόρτισης DLC 1.3 που αντιπροσωπεύει Ακραίες Συνθήκες Τυρβώδους Ανέμου παράγει μια χρονοϊστορία με ψηλότερες κορυφές που ταιριάζει στο προφίλ τυρβώδους ανέμου



Σχήμα 6.3: Χρονοϊστορία της ταχύτητας [m/sec] για τις τρεις διευθύνσεις x, y, z για τα φορτία σχεδιασμού DLC 1.3 με $V_{hub}=20$ [m/sec]



Σχήμα 6.4: Χρονοϊστορία της ταχύτητας [m/sec] για τις τρεις διευθύνσεις x,y,z για τα φορτία σχεδιασμού DLC 1.6a με $V_{hub}=20$ [m/sec]

Έχοντας προσδιορίσει τις παραμέτρους για κάθε μια από τις φορτίσεις, τρέξαμε δυναμικές αναλύσεις μέσω του λογισμικού FAST. Έξαγαμε μια σειρά χρονοϊστοριών των εντατικών μεγεθών που οφείλονται σε φορτία ανέμου για το σημείο που βρίσκεται στην κορυφή του τριπόδου. Για την κάθε φόρτιση καταλήξαμε στις δύο δυσμενέστερες εντατικές καταστάσεις, (1) όταν παρουσιάζει μέγιστη ροπή και (2) όταν παρουσιάζει μέγιστη τέμνουσα. Τις εντατικές καταστάσεις αυτές τις χρησιμοποιήσαμε ως δρώντα φορτία στην κορυφή του μοντέλου. Σημειώνουμε εδώ ότι επειδή η κατασκευή μας δεν είναι συμμετρική έπρεπε να ελέγξουμε και τις ίδιες εντατικές καταστάσεις με αντίθετες διευθύνσεις, το σύνολο τους φαίνεται στον Πίνακα 6.3 για $V_{hub}=20$ m/sec.

Πίνακας 6.3: Συγκεντρωμένα φορτία που ασκήθηκαν στην κορυφή του μοντέλου για κάθε Φόρτιση Σχεδιασμού

		Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
DLC 1.3	maxFx	-1341	-39.61	-5873	-1702	-100000	2094
	-maxFx	1341	-39.61	-5873	-1702	100000	2094
	maxMy	1210	47.7	5859	2610	101000	-676.3
	-maxMy	-1210	47.7	5859	2610	-101000	-676.3
DLC 1.6a	maxFx	1126	86.6	-5822	2246	81470	-1652
	-maxFx	-1126	86.6	-5822	2246	-81470	-1652
	maxMy	1102	62.71	-5810	2665	82370	-1778
	-maxMy	-1102	62.71	-5810	2665	-82370	-1778

6.3.2 Υδροδυναμικά φορτία

Η βασική πηγή για την κατανόηση και των υπολογισμό των υδροστατικών φορτίων το βιβλίου του Κ.Ι. Μουτζούρη με τίτλο "Θαλάσσια Υδραυλική"[6.2]. Σκοπός μας ήταν να υπολογίσουμε τις καμπύλες των υδροδυναμικών φορτίων συναρτήσει του βάθους για κάθε διατομή.

Αρχικά προσδιορίσαμε τα χαρακτηριστικά του κυματισμού (1) χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s και (2) η χαρακτηριστική περίοδος T_s . Τα δύο αυτά στοιχεία εξαρτώνται από:

- Την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας ($W=15\text{m/sec}$)
- Το μήκος αναπτύγματος του κυματισμού ($F=113.62\text{km}$)
- Τη διάρκεια πνοής του ανέμου ($t_a=4\text{hr}$)

Ο υπολογισμός του χαρακτηριστικού ύψους και της περιόδου έγιναν με βάση το πιο διαδεδομένο μοντέλο βραχυπρόθεσμης περιγραφής της καταστάσεως διαταραχής της θαλάσσιας επιφάνειας, το μοντέλο SMB (Sverdrup – Munk – Bretschneider) [6.3]. Μέσω της παραπάνω μεθόδου υπολογίσαμε ότι $H_s=2,63\text{m}$ και $T_s=6.34\text{sec}$. Τα χαρακτηριστικά του κυματισμού (χαρακτηριστικό ύψος H_s και χαρακτηριστική περίοδος T_s) που προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο SMB αναφέρονται σε συνθήκες ανοικτής θάλασσας. Είναι δηλαδή τα χαρακτηριστικά του κυματισμού στη περιοχή των βαθέων υδάτων ($d/L>0.5$). Συγκεκριμένα:

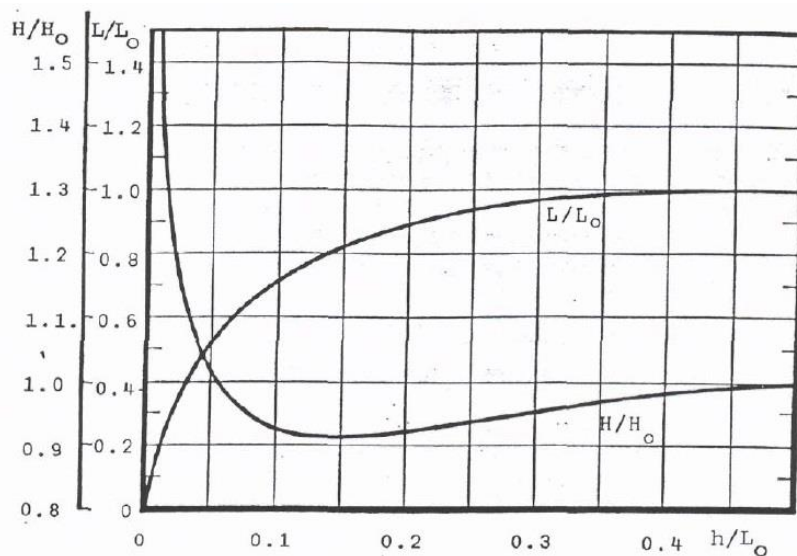
- Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s ισούται με το ύψος κύματος στη περιοχή των βαθέων υδάτων H_o . Άρα ισχύει $H_o=H_s$
- Η περίοδος του κύματος δεν μεταβάλλεται σε όλη τη διάρκεια της μεταδόσεως του κύματος πάνω στον κεκλιμένο πυθμένα. Άρα ισχύει: $T=T_s$
- Το μήκος κύματος είναι αυτό της περιοχής των βαθέων υδάτων:(σχέση)

Από το γράφημα του Σχήμα 6.5 και γνωρίζοντας:

- Το ύψος κύματος στη περιοχή των βαθέων υδάτων (H_o)
- Το μήκος κύματος στη περιοχή των βαθέων υδάτων (L_o)
- Τα βάθος του πυθμένα της θάλασσας (d)

Προκύπτουν:

- Το ύψος κύματος του κυματισμού που φτάνεις στο έργο ($H=2.63\text{m}$)
- Το μήκος κύματος του κυματισμού που φτάνει στο έργο ($L=62.66\text{m}$)



Σχήμα 6.5: Μεταβολές του μήκους και του ύψους κύματος σε συνάρτηση με το βάθος του πυθμένα [6.4]

Στη συνέχεια, έπρεπε να διαλέξουμε τη θεωρία που ταίριαζε καλύτερα στο προφίλ της θαλάσσιας περιοχής της ανεμογεννήτριας. Σύμφωνα με τον Νορβηγικό κανονισμό θαλάσσιων ανεμογεννητριών (Design of Offshore Wind Turbine Structures DNV-OS-J101) προτείνεται η επιλογή της κατάλληλης θεωρίας κυματισμού ανάλογα με τις τιμές τριών παραμέτρων του κύματος. Αυτές είναι το ύψος του κύματος (H), η περίοδος του κύματος (T) και το βάθος του πυθμένα (d). Οι τρεις αυτές παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον ορισμό τριών αδιάστατων παραμέτρων οι οποίοι ορίζουν τα όρια εφαρμογής της κάθε θεωρίας κυματισμού. Οι αδιάστατες παράμετροι είναι:

$$\text{Wave steepness parameter:} \quad S = 2\pi \frac{H}{gT^2} = \frac{H}{L_o} \quad (6-1)$$

$$\text{Shallow water parameter:} \quad \mu = 2\pi \frac{d}{gT^2} = \frac{d}{L_o} \quad (6-2)$$

$$\text{Ursel parameter:} \quad U_r = \frac{H}{k_o^2 d^3} = \frac{1}{4\pi^2} \frac{S}{\mu^3} \quad (6-3)$$

Όπου L_o είναι το μήκος κύματος στη περιοχή των βαθέων υδάτων και k_o είναι ο αριθμός κύματος ($k_o=2\pi/L_o$) που αντιστοιχούν σε περίοδο κύματος T. Στον Πίνακα 6.4 απεικονίζονται τα όρια εφαρμογής της κάθε θεωρίας κυματισμού ανάλογα με τις τιμές των αδιάστατων παραμέτρων.

Πίνακας 6.4: Τα όρια εφαρμογής της κάθε θεωρίας κυματισμού ανάλογα με τις τιμές των αδιάστατων παραμέτρων.

Theory	Application		
	Depth	Approximate range	
Linear (Airy) wave	Deep and shallow	$S < 0,006$	$S/\mu < 0,03$
2nd order Stokes wave	Deep water	$U_r < 0,65$	$S < 0,04$
5th order Stokes wave	Deep water	$U_r < 0,65$	$S < 0,14$
Cnoidal theory	Shallow water	$U_r < 0,65$	$\mu < 0,125$

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα η περίπτωση μας έπρεπε να αναλυθεί με τη θεωρία Stokes 2ης τάξης και με βάση τον παρακάτω πίνακα προσδιορίσαμε τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος.

Parameter	Airy wave theory		Stokes second-order wave theory
	General water depth	Deep water	
Velocity potential, ϕ	$\frac{\pi H}{kT} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$ = $\frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \sin \theta$	$\frac{\pi H}{kT} e^{kz} \sin \theta$ = $\frac{gH}{2\omega} e^{kz} \sin \theta$	$\phi_t + \frac{3}{8} \frac{\pi H}{kT} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)] \sin 2\theta}{\sinh^4(kd)}$ Note that in deep water the Stokes second-order wave potential is equal to the first order Airy wave potential.
Phase velocity, celerity, c	$\sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)}$	$gT/(2\pi)$	$\sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)}$
Wavelength, λ	cT	$gT^2/(2\pi)$	cT
Surface elevation, η	$\frac{H}{2} \cos \theta$	$\frac{H}{2} \cos \theta$	$\eta_t + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} [2 + \cosh 2kd] \cos 2\theta$
Horizontal particle displacement, ξ	$-\frac{H}{2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$	$-\frac{H}{2} e^{kz} \sin \theta$	$\xi_t + \frac{H}{8} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{1}{\sinh^2(kd)} \left[1 - \frac{3 \cosh[2k(z+d)]}{2 \sinh^2(kd)} \right] \sin 2\theta$ + $\frac{H}{4} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^2(kd)} (\omega t)$
Vertical particle displacement, ζ	$-\frac{H}{2} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$	$\frac{H}{2} e^{kz} \cos \theta$	$\zeta_t + \frac{3H}{16} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$
Horizontal particle velocity, u	$\frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$	$\frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos \theta$	$u_t + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$
Vertical particle velocity, w	$\frac{\pi H}{T} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$	$\frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin \theta$	$w_t + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin 2\theta$
Horizontal particle acceleration, \dot{u}	$\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$	$\frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \sin \theta$	$\dot{u}_t + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin 2\theta$
Vertical particle acceleration, \dot{w}	$-\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$	$-\frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \cos \theta$	$\dot{w}_t - \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$
Subsurface pressure, p	$-\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \cos \theta$	$-\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H e^{kz} \cos \theta$	$p_t + \frac{3}{4} \rho g H \frac{\pi H}{\lambda \sinh(2kd)} \left\{ \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^2(kd)} - \frac{1}{3} \right\} \cos 2\theta$ $-\frac{1}{4} \rho g H \frac{\pi H}{\lambda \sinh(2kd)} \{ \cosh[2k(z+d)] - 1 \}$
Group velocity, c_g	$\frac{c}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right]$	$\frac{c}{2}$	$(c_g)_t$
Average energy density, E	$\frac{1}{8} \rho g H^2$	$\frac{1}{8} \rho g H^2$	$\frac{1}{8} \rho g H^2$
Energy flux, F	$E c_g$	$\frac{1}{2} E c$	$E c_g$

Notation: d = mean water depth, g = acceleration of gravity, H = trough-to-crest wave height, $k = 2\pi/\lambda$ = wave number, λ = wave length, T = wave period; t = time; x = distance of propagation; z = distance from mean free surface positive upward; $\theta = kx - \omega t = k(x-ct)$; $\omega = 2\pi/T$ = angular wave frequency. Subscript l denotes linear small-amplitude theory.

Εικόνα 6.3: Χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος σύμφωνα με τη θεωρία Airy και σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2ης τάξης [6.5]

Τέλος υπολογίσαμε την υδροδυναμική δύναμη που ασκείται από τον κυματισμό σε κυλινδρικό πυλώνα η οποία προκύπτει από την εξίσωση Morison δίνοντας τη συνολική οριζόντια δύναμη F ανά μονάδα βάθους [6.6]

Εξίσωση Morisson:
$$\frac{dF}{dz} = \frac{dF_1}{dz} + \frac{dF_D}{dz} = C_M \rho A \frac{du}{dt} + C_D \frac{1}{2} \rho D |u|u \quad (6-4)$$

όπου:

F_1 είναι η δύναμη αδράνειας [kN]

F_D είναι η δύναμη αντίστασης [kN]

C_M είναι ο συντελεστής αδράνειας ($C_M = 1 + C_a$) [-]

C_a είναι ο συντελεστής πρόσθετης μάζας της διατομής του πυλώνα [-]

C_D είναι ο συντελεστής αντίστασης της διατομής του πυλώνα [-]

A είναι το εμβαδό της διατομής του πυλώνα [m^2]

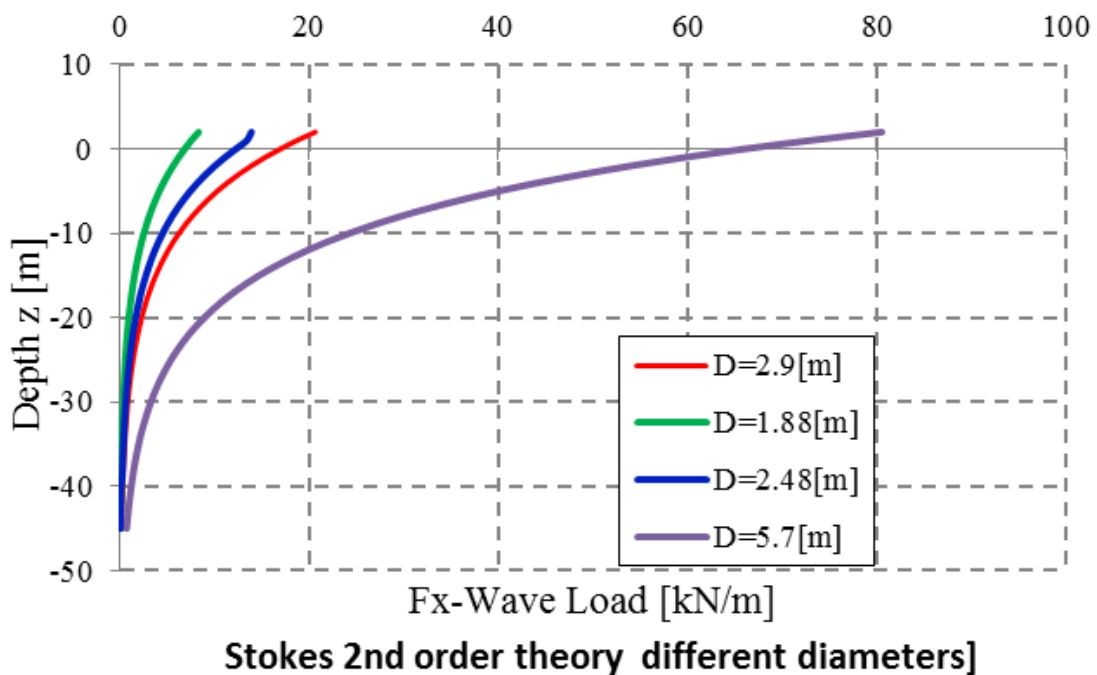
D είναι η χαρακτηριστική διάμετρος τη διατομής του πυλώνα [m]

ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού [Mgr/m^3]

u είναι η ταχύτητα των ρευστών σωματιδίων (κύματα και/ή ρεύματα) στο κέντρο βάρους της διατομής του πυλώνα [m/s]

du/dt είναι η επιτάχυνση των ρευστών σωματιδίων (κύματα) στο κέντρο βάρους της διατομής του πυλώνα [m/s^2].

Έτσι για κάθε διατομή προέκυψαν τα διαγράμματα συνολικής οριζόντιας δύναμης (F) ανά μονάδα βάθους Σχήμα 6.6. Σύμφωνα με αυτά τα διαγράμματα φορτίσαμε τα μέλη της ανεμογεννήτριας με τα αντίστοιχα μεταβαλλόμενα κατανεμημένα φορτία αναπαριστώντας έτσι την επιρροή των υδροδυναμικών φαινομένων.



Σχήμα 6.6: Διάγραμμα οριζόντιας δύναμης F [kN] σε πάσσαλο με κυκλική διατομή σε σχέση με το βάθος. Για υδροδυναμική φόρτιση και υπολογισμός με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

6.4 Προδιαστασιολόγηση

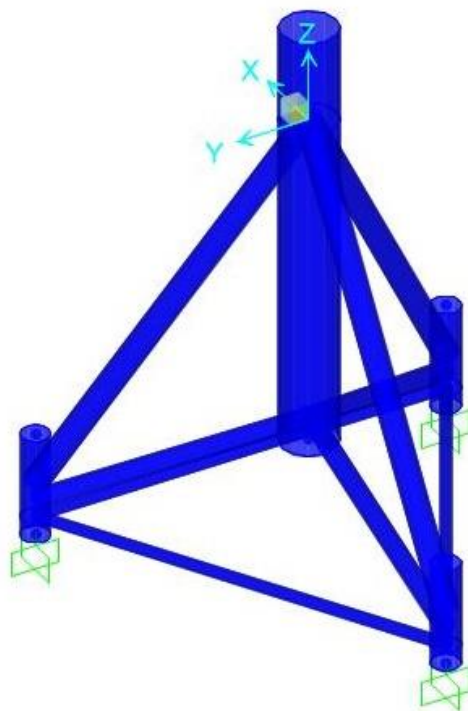
6.4.1 Προδιαστασιολόγηση φορέα στήριξης

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων SAP2000 δημιουργήσαμε ένα μοντέλο βασισμένο στην πρότυπη ανεμογεννήτρια (Πίνακας 6.1). Το μοντέλο αποτελούταν από τμήμα του πυλώνα από το φορέα στήριξης, οι πάσσαλοι δεν περιλήφθηκαν διότι δεν ήταν δυνατή η προσομοίωση του εδάφους. Στόχος αυτού του μοντέλου ήταν ο έλεγχος των διατομών. Επειδή όμως το λογισμικό αυτό δεν ήταν ικανό να ελέγξει διατομές κατηγορίας 4, επιλέξαμε να αλλάξουμε ελαφρώς τη γεωμετρία (διάμετρο και πάχος) των διατομών προκειμένου να εντάσσονται στην κατηγορία 3 όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.5.

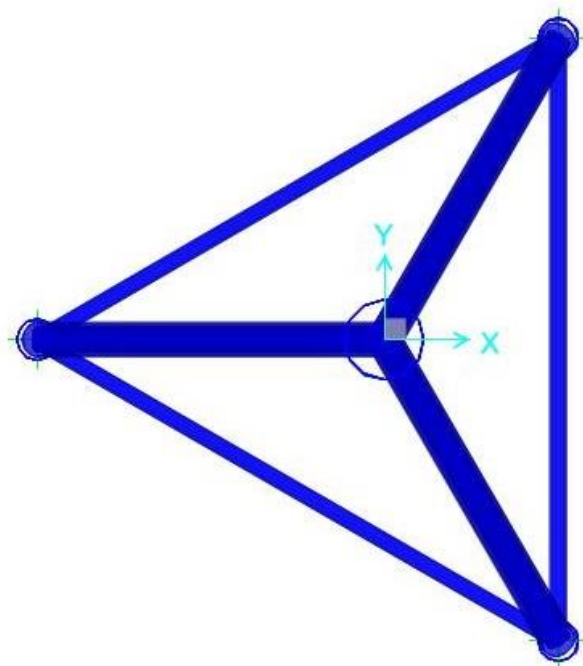
Πίνακας 6.5: Πίνακας τροποποιημένων γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των διατομών

Διατομές	Μέτρο του Young	Μέτρο Διάτμ. χάλυβα	Ειδ. πυκνότητα χάλυβα	Διάμετρος-D	Πάχος-t
	(N/m ²)	(N/m ²)	(kg/m ³)	(m)	(m)
1	2.10E+11	8.10E+10	7850	2.9	0.05
2	2.10E+11	8.10E+10	7850	2.9	0.05
3	2.10E+11	8.10E+10	7850	1.875	0.035
4	2.10E+11	8.10E+10	7850	2.475	0.045
5	2.10E+11	8.10E+10	7850	1.2	0.025
6	2.10E+11	8.10E+10	7850	3.14188	0.05
7	2.10E+11	8.10E+10	7850	3.4	0.05
8-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	5.7	0.05
9	2.10E+11	8.10E+10	7850	3.6875	0.05
10-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	3.975	0.05
11-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	4.2625	0.05
12-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	4.55	0.05
13-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	4.8375	0.05
14-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	5.125	0.05
15-Πυλώνας	2.10E+11	8.10E+10	7850	5.4125	0.05

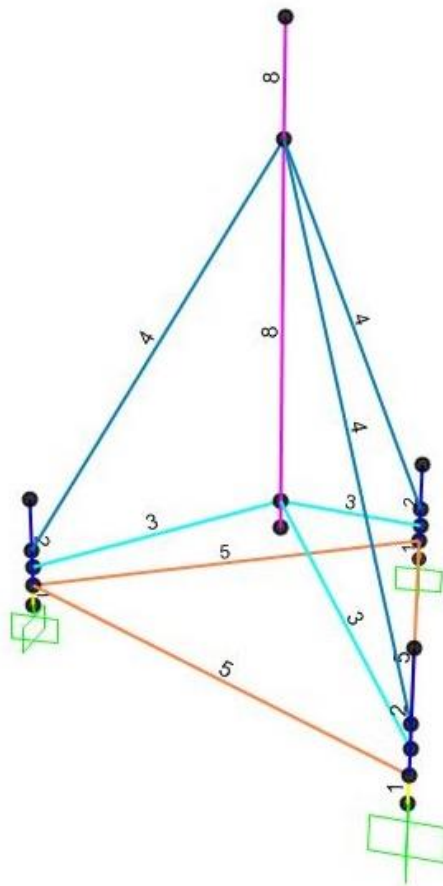
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.4 και στην Εικόνα 6.5 Όλα τα παραπάνω μέλη προσομοιώθηκαν ως στοιχεία δοκού ενώ οι στηρίξεις δημιουργήθηκαν στα σημεία που βρισκόταν στη στάθμη του πυθμένα ενώ στην Εικόνα 6.X φαίνονται όλες οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν. Ο έλεγχος έγινε για δύο περιπτώσεις στήριξης, στην πρώτη περίπτωση όλες οι στηρίξεις ήταν πακτώσεις και στη δεύτερη περίπτωση όλες οι στηρίξεις ήταν αρθρώσεις. Αυτό έγινε προκειμένου να ελέγξουμε τις δύο ακραίες συνθήκες αφού στην πραγματικότητα το έδαφος θα έδινε μια ενδιάμεση συμπεριφορά.



Εικόνα 6.4: Προσομοίωση του πακτωμένου τρίποδου στο SAP2000



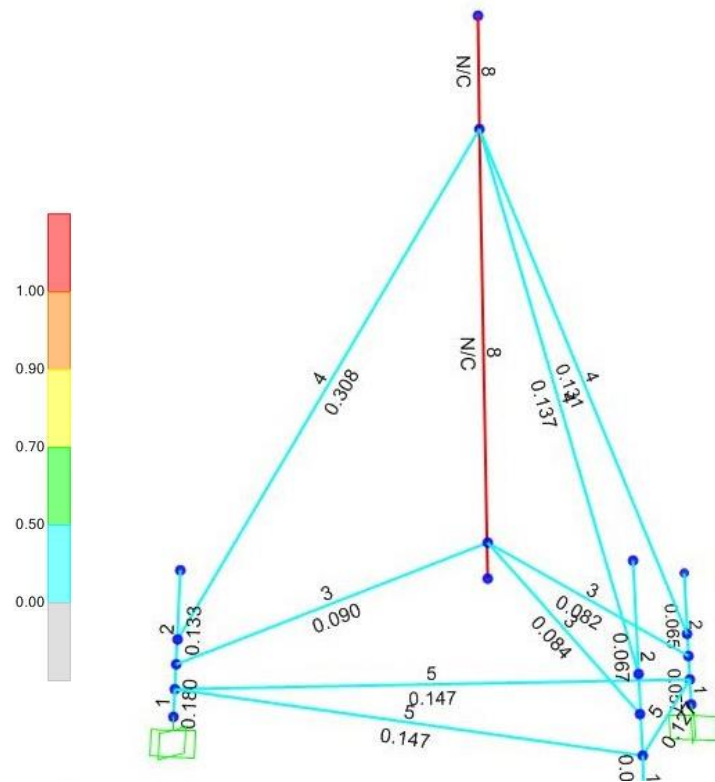
Εικόνα 6.5: Προσομοίωση του πακτωμένου τρίποδου στο SAP2000



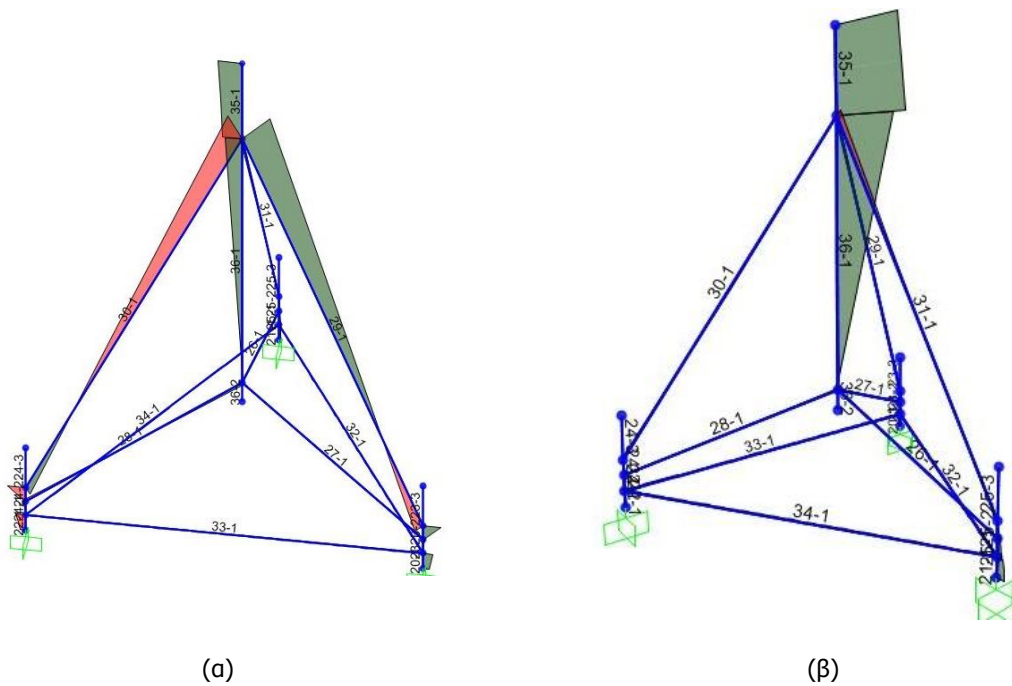
Εικόνα 6.6: Αρίθμηση διατομών με βάση τα χαρακτηριστικά τους στο μοντέλο του SAP2000, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.5

Τα φορτία που ασκήθηκαν στην κορυφή του μοντέλου (Πίνακας 6.3) είναι αποτέλεσμα της δυναμικής ανάλυσης του λογισμικού FAST, όπως αναφέρθηκε στο 6.3.1. Όσο αφορά τα υδροδυναμικά φορτία όπως αναφέρθηκε και στο 6.3.2 υπολογίστηκαν βάση της θεωρίας Stokes 2ης τάξης και ασκήθηκαν στην κατασκευή ως κατανεμημένα φορτία μεταβλητού μεγέθους.

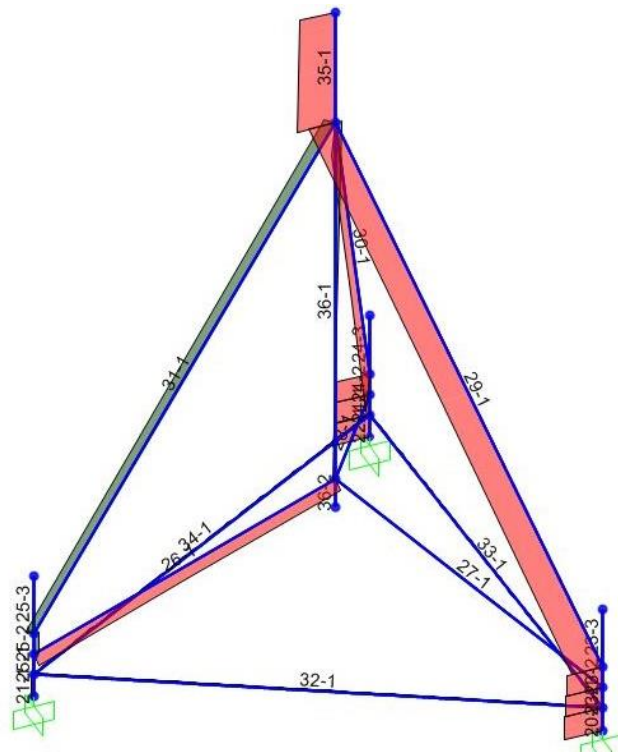
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εμφανίζονται στην Εικόνα 6.7, σύμφωνα με την οποία παρατηρούμε ότι το ποσοστό εκμετάλλευσης όλων των δευτερευουσών δοκών (δοκοί φορέα στήριξης) είναι πολύ μικρό και κυμαίνεται από 0.10 έως 0.30. Αυτό σημαίνει ότι για τα συγκεκριμένα φορτία σχεδιασμού ο φορέας στήριξης επαρκεί με άνεση. Όσο αφορά τον πυλώνα, επειδή είναι κατηγορίας 4 ελέγχθηκε σε δεύτερο μοντέλο μαζί με τους πυλώνες. Το μοντέλο αυτό δημιουργήθηκε στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA προκειμένου να προσομοιωθούν τα μέλη πάνω αλλά και κάτω από τη στάθμη του πυθμένα.



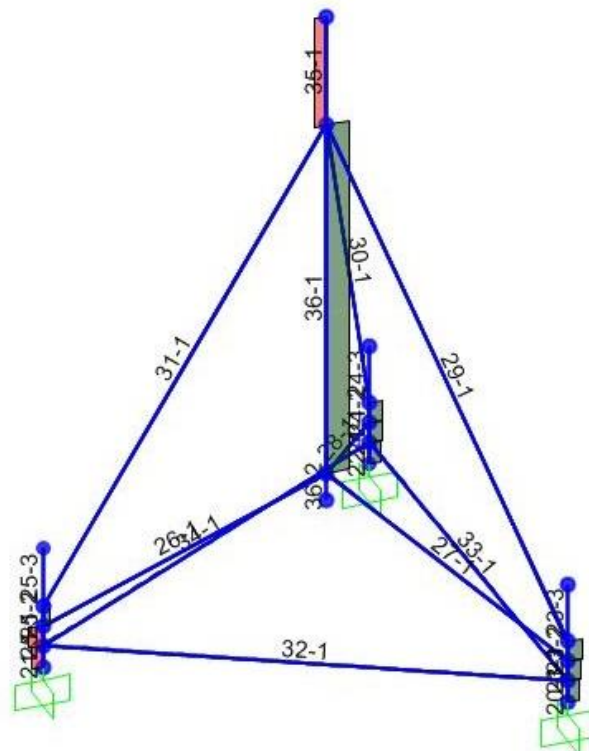
Εικόνα 6.7: Ποσοστό αξιοποίησης των διατομών για τη δυσμενέστερη φόρτιση



Εικόνα 6.8 Διαγράμματα ροπών (α) M_x και (β) M_y για τη δυσμενέστερη φόρτιση



Εικόνα 6.9: Διάγραμμα αξονικής δύναμης για τη δυσμενέστερη φόρτιση



Εικόνα 6.10: Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης για τη δυσμενέστερη φόρτιση

6.4.2 Προσομοίωση του εδάφους

Οι θεωρητική τοποθεσία της ανεμογεννήτριας είναι στο βόρειο κομμάτι του Αιγαίου πελάγους, και σύμφωνα με αυτή επιλέχθηκε το βάθος πυθμένα ($d=45\text{m}$) και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Το έδαφος θεμελίωσης θεωρήθηκε ως μη συνεκτικό με εσωτερική γωνία τριβής $\varphi=35^\circ$. ενώ απλουστευτικά έγινε η παραδοχή ενιαίου εδαφικού προφίλ. άπειρου βάθους.

Η προσομοίωση του εδάφους έγινε με την εφαρμογή μη γραμμικών ελατηρίων καθ' ύψος των πασσάλων εφαρμόζοντάς τα στις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις. όπου το κάθε ζεύγος ελατηρίων έχει απόσταση 1m από το επόμενο ζεύγος. Στην κατακόρυφη διεύθυνση του πασσάλου δεν εφαρμόστηκε κανένα ελατήριο παρά μόνον απλή κύλιση, διότι η πλευρική τριβή στη διεπιφάνεια του πασσάλου με το έδαφος είναι πολύ μεγάλη συγκριτικά με τις μικρές θλιπτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στους πασσάλους και οι καθιζήσεις είναι αμελητέες.

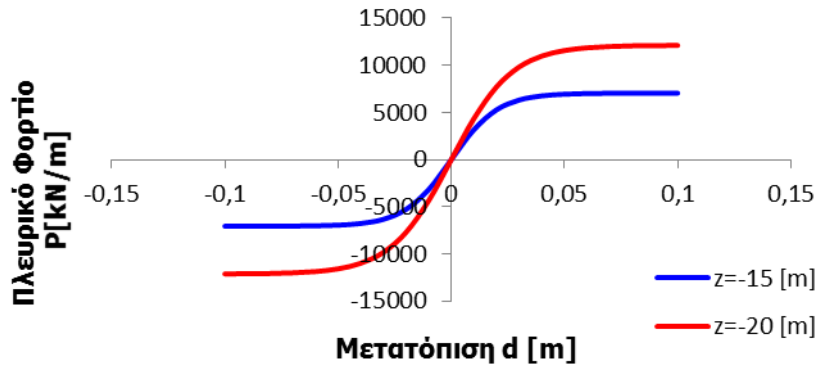
Η δυσκαμψία των μη γραμμικών ελατηρίων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πασσάλων και τις ιδιότητες του εδάφους. Οπότε υπολογίσαμε για κάθε ελατήριο την καμπύλη πλευρικού φορτίου ανά μέτρο μήκους που ασκείται στον πάσσαλο και πλευρικής μετατόπισης πασσάλου (καμπύλη $p-y$) για τα χαρακτηριστικά του εδάφους, του πασσάλου και το αντίστοιχο βάθος του ελατηρίου. Εφόσον το έδαφος είναι μη συνεκτικό ακολουθήσαμε τα μεθοδολογία που παρατέθηκε στο κεφάλαιο 5.5.2. παρακάτω παρουσιάζεται η πορεία υπολογισμού των καμπυλών. $p-y$ για κάθε ελατήριο που ακολουθείται για μη συνεκτικά εδάφη.

Για γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi=35^\circ$ από το Σχήμα 5.3 προκύπτουν οι συντελεστές $C_1= 3.0$, $C_2= 3.5$, $C_3= 55$. Αντίστοιχα από το Σχήμα 5.4, η σταθερά του δείκτη εδάφους στην οριζόντια διεύθυνση προκύπτει $k_h= 22802\text{Mpa/m}^3$. Όπως έχει αναλυθεί η ανεμογεννήτρια και κατ' επέκταση η θεμελίωση της υπόκειται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. επομένως ο συντελεστής A 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 (5-16), για κάθε ελατήριο προκύπτουν οι καμπύλες $p-y$ οι οποίες τελικά καθορίζουν και την δυσκαμψία του. Τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 6.6:

Πίνακας 6.6: Παράμετροι απαραίτητοι για τον υπολογισμό των καμπυλών $p-y$

φ	0	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
p_u	kN/m		Μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου
p	kN/m		Πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι καμπύλες πλευρικού φορτίου επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του p - y για διάφορα βάθη κάτω από τον πυθμένα της με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε παραπάνω.



Σχήμα 6.7: Καμπύλες πλευρικού φορτίου επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του p - y

6.4.3 Διαστασιολόγηση πασσάλων

Επειδή η πρότυπη ανεμογεννήτρια του λογισμικού FAST σύμφωνα με την οποία είχε στηθεί το μοντέλο δε ανέφερε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πασσάλων, έπρεπε εμείς να κάνουμε μια αρχική υπόθεση. Θεωρήσαμε μια αρχική διάμετρο D_1 , ένα αρχικό πάχος t_1 και ένα αρχικό μήκος πασσάλου L_1 . Ως γνωστόν το τρίποδο δεν είναι συμμετρικό και ο τρόπος μεταφοράς των φορτίων από την κατασκευή στο έδαφος γίνεται κυρίως αξονικά μέσω των πασσάλων, οπότε για κάθε φόρτιση κάποιοι πάσσαλοι εφελκύνονται και κάποιοι θλίβονται. Ένας αρχικός έλεγχος που έπρεπε να κάνουμε ήταν ο έλεγχος αιχμής για θλιβόμενο πάσσαλο και ο έλεγχος έναντι ολίσθησης για εφελκυσμένο πάσσαλο, όπως παρουσιάστηκε στο 5.4.1 και 5.4.2. Οι φέρουσα ικανότητα του πασσάλου έναντι ολίσθησης και η αντοχή αιχμής υπολογίστηκαν από το Από το βιβλίο "Θεμελιώσεις με Πασσάλους" Αναγνωστόπουλος, Παπαδόπουλος σελ.45[6.7]

Αρχικά προσδιορίσαμε τα χαρακτηριστικά του εδάφους που ήταν απαραίτητα για τον έλεγχο (Πίνακας 6.7). Από το ενεργό ειδικό βάρος υπολογίζουμε τις ενεργές τάσεις (σ_{vz}') καταμήκος του πασσάλου και με βάση αυτές βρίσκουμε είναι η οριακή πλευρική τριβή της i -στης εδαφικής στρώσης (f_{sui}).

Πίνακας 6.7: Χαρακτηριστικά εδάφους

δ	Γωνία τριβής κατά τη διεπιφάνεια εδάφους- πασσάλου	20°
γ'	Ενεργό ειδικό βάρος	10 [κN/m ³]
κ	Συντελεστής ωθήσεως	1 [-]

Στη συνέχεια από τον τύπο (5-2) προσδιορίζουμε την οριακή αντίσταση πλευρικής τριβής (Q_{su}). Ενώ η οριακή μοναδιαία αντίσταση αιχμής του πασσάλου (q_{pu}) και ισούται με $q_{pu} = 15000$ [κN/m²]. Από τη σχέση (5-3) προσδιορίζουμε την οριακή αντίσταση αιχμής του πασσάλου Q_{pu} και καταλήγουμε μέσω του τύπου (5-1) στην εύρεση του οριακού κατακόρυφου φορτίου του πασσάλου σε θλίψη- Q_u . Παράλληλα έχουμε προσδιορίσει και όλες τις παραμέτρους για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου έναντι ολίσθησης από τον τύπο (5-4).

Τέλος έχοντας εξάγει τις αξονικές αντιδράσεις των στηρίξεων του μοντέλου στο λογισμικό SAP2000 κάνουμε τον έλεγχο, συγκρίνοντας τον μέγιστο εφελκυσμό με τη $\Phi \cdot I$, έναντι Ολίσθησης και τη μέγιστη θλίψη με την Οριακή Αντίσταση Αιχμής. Από τα αποτελέσματα παρατηρήσαμε ότι η Οριακή αντίσταση Αιχμής είναι έως και πέντε φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη θλίψη που εμφανίζεται, οπότε κρίσιμο κριτήριο για τη διαστασιολόγηση του πασσάλου είναι ο έλεγχος έναντι ολίσθησης.

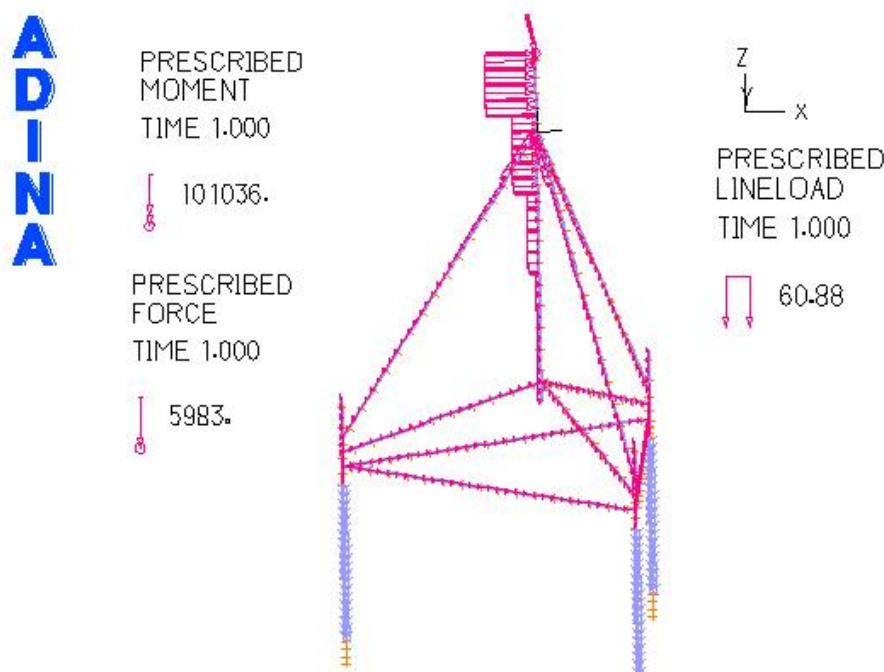
Μετά από δοκιμές καταλήξαμε στις τελικές διαστάσεις (Πίνακας 6.8) του πασσάλου σύμφωνα με τις οποίες δημιουργήσαμε και το τελικό μοντέλο στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

Πίνακας 6.8: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πασσάλων μετά τη διαστασιολόγηση

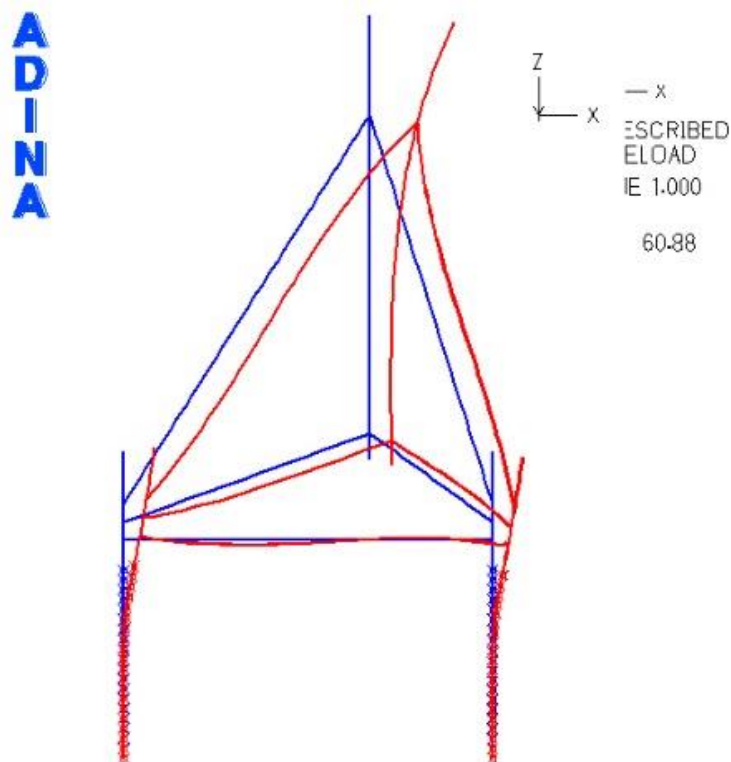
L- Μήκος Πασσάλου	20 [m]
D- Διάμετρος	2 [m]
t- Πάχος	0.02 [m]

6.5 Τελικοί έλεγχοι ανωδομής και διαστασιολόγηση θεμελίωσης

Εφόσον είχαμε υπολογίσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πασσάλων και τα διαγράμματα πιέσεων-μετατοπίσεων των μη γραμμικών ελατηρίων για την προσομοίωση του εδάφους, σειρά είχε η δημιουργία του επόμενου μοντέλου στο λογισμικό ADINA. Το μοντέλο αυτό αποτελούταν από την ανωδομή και τους πασσάλους, όπου όλα τα μέρη της κατασκευής προσομοιώθηκαν ως μέλη δοκού με κοίλες κυκλικές διατομές σταθερή διατομής και πάχους. Η επιρροή του εδάφους λήφθηκε υπόψιν με την τοποθέτηση κατάλληλων μη γραμμικών ελατηρίων κατά μήκος των πασσάλων. ενώ το μοντέλο φορτίστηκε με τον ίδιο τρόπο που φορτίσαμε το αρχικό μοντέλο στο λογισμικό SAP2000. Στη συνέχεια εκτελέσαμε στατική ανάλυση και πήραμε αποτελέσματα ως προς τα εντατικά μεγέθη και τις μετακινήσεις κάθε μέλους.



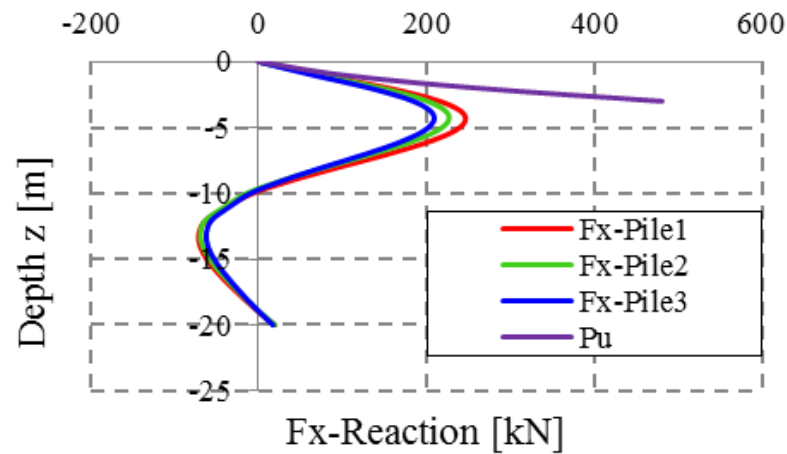
Εικόνα 6.11: Μοντέλο προσομοίωσης στο λογισμικό ADINA, όπου εμφανίζονται τα στοιχεία δοκού, τα φορτία και τα μη-γραμμικά ελατήρια



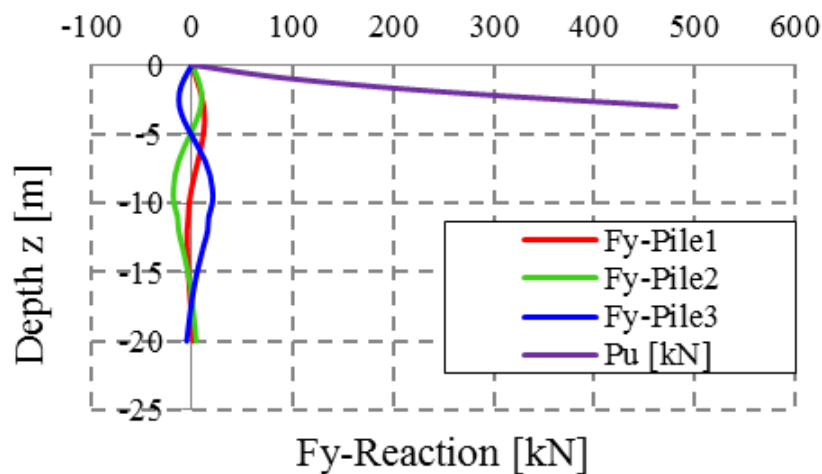
Εικόνα 6.12: Παραμορφωμένη εικόνα του μοντέλου μετά από φόρτιση

6.5.1 Έλεγχος εδάφους

Μέσα από τη στατική ανάλυση που εκτελέσαμε αναζητήσαμε τις οριζόντιες αντιδράσεις των μη γραμμικών ελατηρίων. Έτσι συντάξαμε έναν πίνακα που περιείχε όλες τις αντιδράσεις των ελατηρίων κάθε πασσάλου και για κάθε φόρτιση. Παράλληλα με αυτό υπολογίσαμε την φέρουσα ικανότητα του εδάφους F_u συναρτήσει του βάθους από τον τύπο (5-16) και όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.5.2. Με αυτό τον τρόπο θέλαμε να ελέγξουμε εάν τα φορτία που ασκούνται στην ανεμογεννήτρια προκαλούν πλαστικοποίηση στο έδαφος και εάν ναι σε πόσο βάθος. Έτσι δημιουργήσαμε για κάθε φόρτιση τα διαγράμματα με τις αντιδράσεις των τριών πασσάλων και τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους για τις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8 και Σχήμα 6.9. Από τα διαγράμματα καταλήξαμε στο γεγονός ότι ακόμη και στις δυσμενέστερες των περιπτώσεων το βάθος πλαστικοποίησης του εδάφους δε ξεπερνά τα τρία μέτρα, που με άλλα λόγια σημαίνει ότι δεν υπάρχει πρόβλημα στη θεμελίωση.

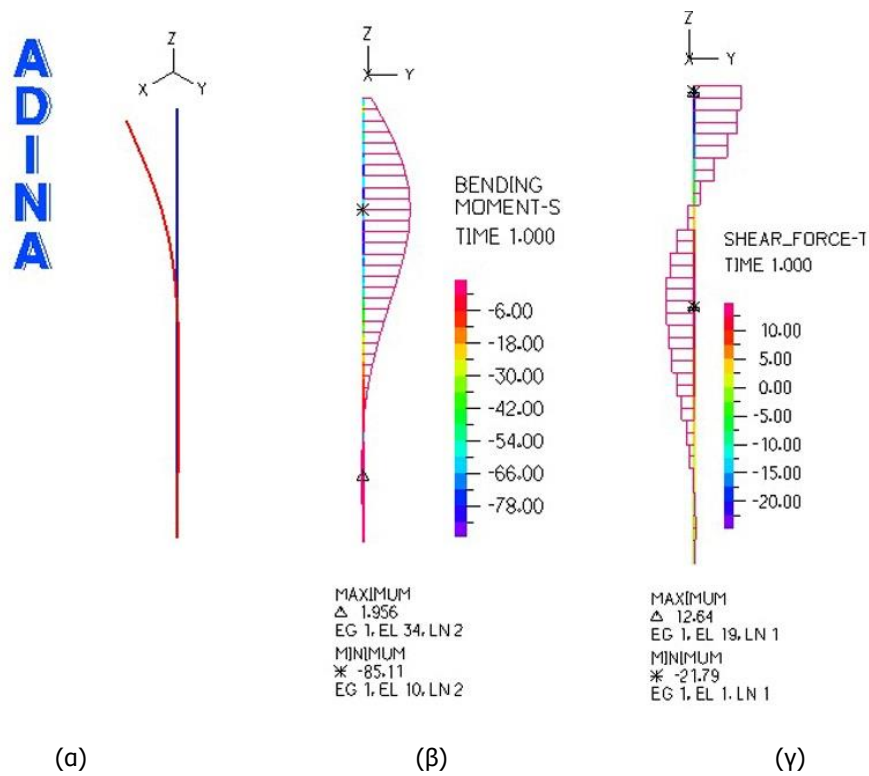


Σχήμα 6.8: Αντιδράσεις μη-γραμμικών ελατηρίων των πασσάλων στην εγκάρσια διεύθυνση x

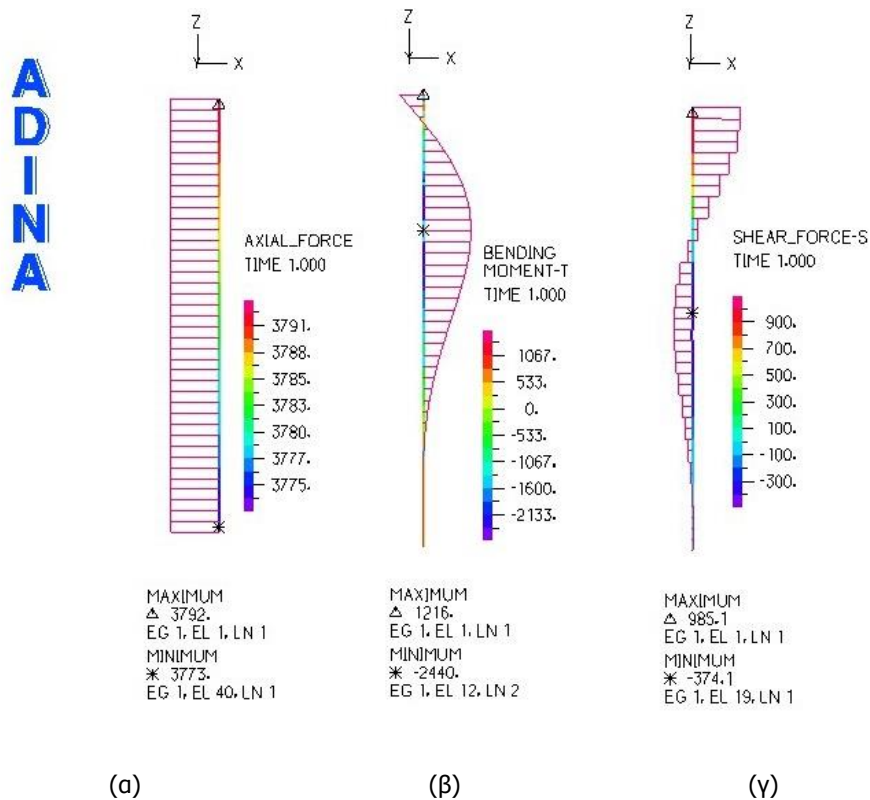


Σχήμα 6.9: Αντιδράσεις μη-γραμμικών ελατηρίων των πασσάλων στην εγκάρσια διεύθυνση y

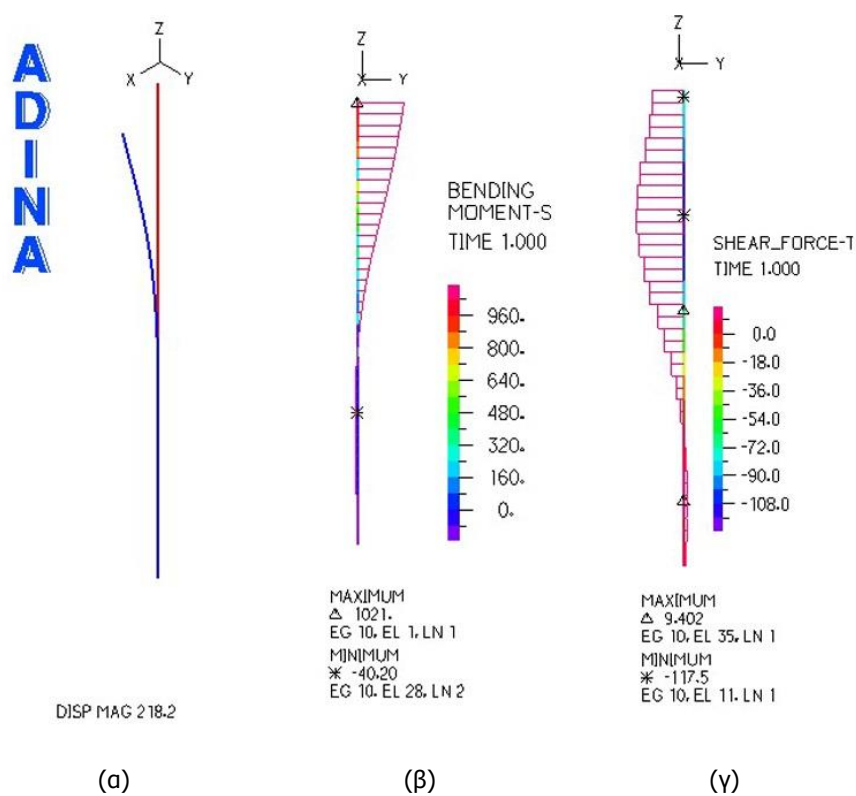
Προκειμένου όμως να βεβαιωθούμε ότι οι διαστάσεις και κυρίως το μήκος των πασσάλων είναι επαρκές συλλέξαμε για κάθε φόρτιση τα διαγράμματα των εντατικών μεγεθών όλων των πασσάλων. Σύμφωνα με το εμπειρικό κριτήριο θα πρέπει τα διαγράμματα των ροπών να "σβήνουν" ομαλά προς της βάση του πασσάλου. Το κριτήριο αυτό ικανοποιήθηκε για όλες τις φορτίσεις και στις παρακάτω εικόνες εμφανίζονται τα εντατικά μεγέθη και η παραμόρφωση των τριών πασσάλων για μια ενδεικτική φόρτιση.



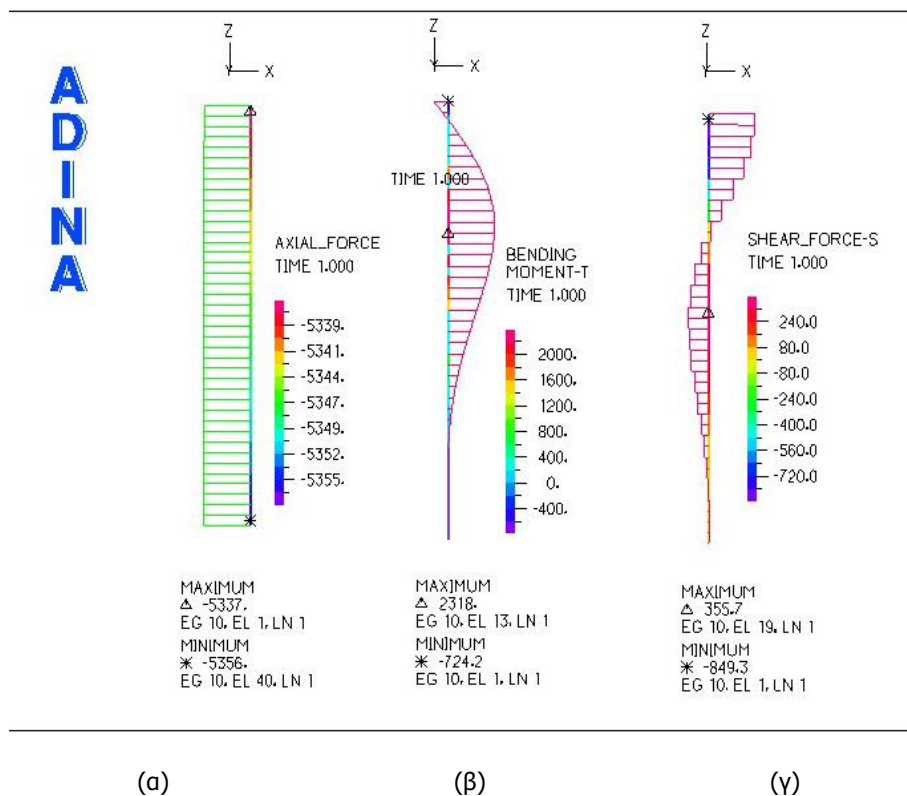
Εικόνα 6.13: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για τον Πάσσαλο-1. α) Παραμόρφωση, β) Ροπή εντός επιπέδου, γ) Τέμνουσα εκτός επιπέδου



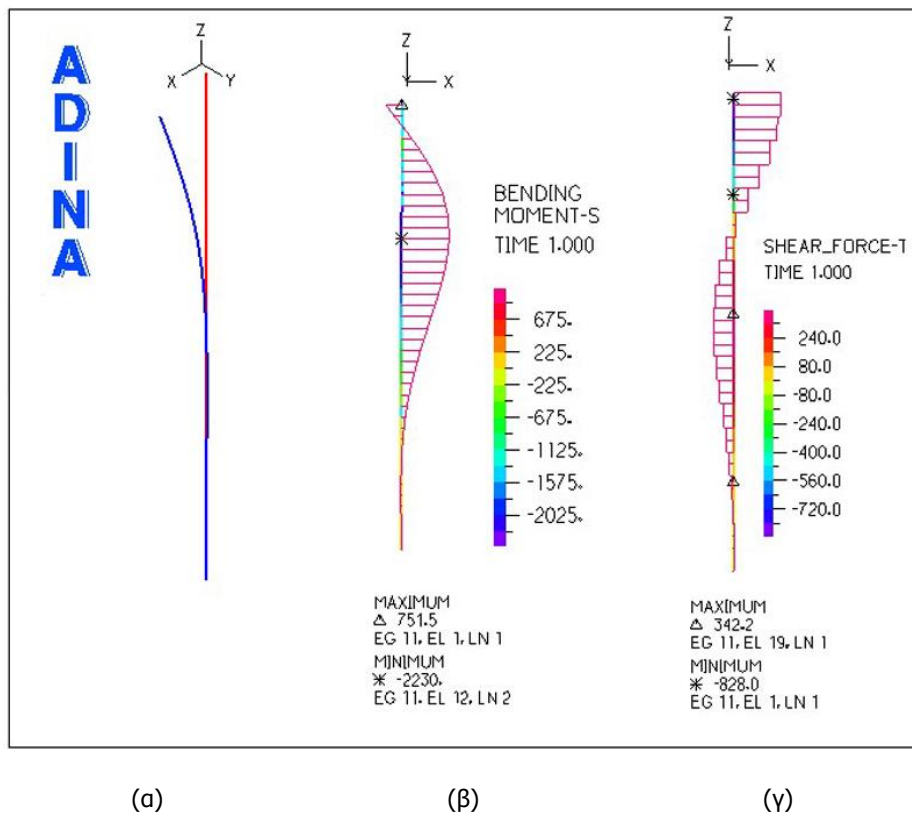
Εικόνα 6.14: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για τον Πάσσαλο-1. α) Αξονική δύναμη, β) Ροπή εκτός επιπέδου γ) Τέμνουσα εντός επιπέδου



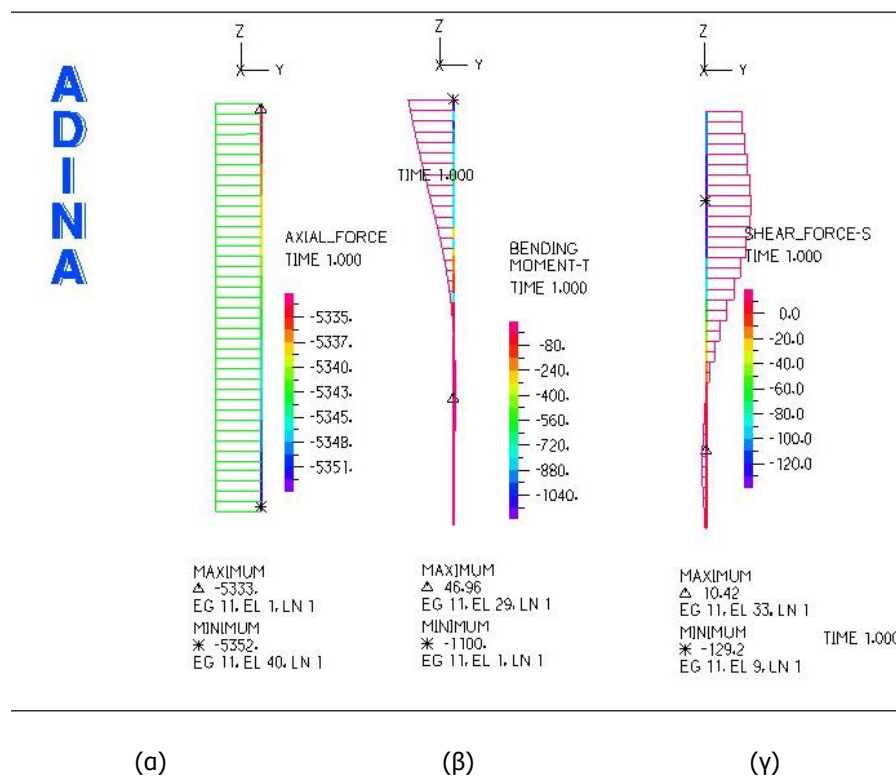
Εικόνα 6.15: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για τον Πάσσαλο-2. α) Παραμόρφωση, β) Ροπή εντός επιπέδου, γ) Τέμνουσα εκτός επιπέδου



Εικόνα 6.16: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για τον Πάσσαλο-1. α) Αξονική δύναμη, β) Ροπή εκτός επιπέδου γ) Τέμνουσα εντός επιπέδου



Εικόνα 6.17: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για τον Πάσσαλο-3. α) Παραμόρφωση, β) Ροπή εντός επιπέδου, γ) Τέμνουσα εκτός επιπέδου



Εικόνα 6.18: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης για τον Πάσσαλο-1. α) Αξονική δύναμη, β) Ροπή εκτός επιπέδου, γ) Τέμνουσα εντός επιπέδου

6.5.2 Έλεγχοι επάρκειας διατομής και μέλους με την μέθοδο των τάσεων

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται οι έλεγχοι φέρουσας ικανότητας των διατομών και των μελών του πυλώνα και των πασσάλων της ανεμογεννήτριας σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 1993-1-6.

6.5.2.1 Έλεγχος Πυλώνα

Μετά την στατική ανάλυση που εκτελέστηκε στο λογισμικό ADINA ζητήσαμε από το πρόγραμμα να μας εξάγει τα εντατικά του μεγέθη. Ο πυλώνας έχει Διάμετρο ίση με $D= 6\text{m}$ και πάχος $t= 0.06\text{m}$ ενώ το σημείο του πυλώνα που καταπονείται περισσότερο δεν είναι προφανές. Οπότε, ζητήσαμε από το πρόγραμμα να μας δώσει τις θέσεις του πυλώνα όπου εμφανίζεται κάθε φορά το μέγιστο κάθε εντατικού μεγέθους. Για κάθε ένα από αυτά τα σημεία σημειώσαμε την εντατική τους κατάσταση και με το σύνολο των αποτελεσμάτων δημιουργήσαμε τον Πίνακα 6.9. Αυτές ήταν και οι εντατικές καταστάσεις για τις οποίες ελέγξαμε τον τη διατομή αλλά και ολόκληρο τον πυλώνα. 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.

Πίνακας 6.9: Δυσμενέστερες εντατικές καταστάσεις του πυλώνα

Μέγιστα Εντατικά Μεγέθη						
	M_x[kNm]	M_y[kNm]	M_z[kNm]	F_x[kN]	F_y[kN]	F_z[kN]
maxMx	612.7	-150500	2049	1374	-44.85	9466.95
maxMy	433.87	-153861	2049	-774.259	-43.854	9818.52
maxMz	433.87	-153861	2049	-774.259	-43.854	9818.52
maxFx	43.3708	-92048.8	2049	-9231.23	-21.4544	10785.4
maxFy	612.7	-150500	2049	1374	-44.85	9466.95
maxFz	-96.594	-954.355	2049	-954.355	-4.09153	12015.9

Αρχικά για τα εντατικά μεγέθη του Πίνακα 6.9, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τάσεις σχεδιασμού σύμφωνα με το Παράρτημα Α του EN 1993-1-6:

- Ορθές τάσεις λόγω της αξονικής δύναμης F_z

$$\sigma_{x,E,N} = -\frac{F_z}{2\pi r_e t} \quad (6-5)$$

- Ορθές τάσεις λόγω διαξονικής κάμψης περί τους x και y

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

- Διαμητικές τάσεις λόγω στρεπτικής ροπής M_z

$$T_{x\theta,ED} = \frac{M_z}{2\pi r_e^2 t} \quad (6-7)$$

– Διατμητικές τάσεις λόγω τεμνουσών δυνάμεων FX και FY

$$T_{x\theta,ED} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\pi r_e t} \quad (6-8)$$

Συγκεντρωτικά οι υπολογισμένες τάσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6.10):

Πίνακας 6.10: Ορθές και διατμητικές τάσεις σχεδιασμού για τους έξι δυσμενέστερους συνδυασμούς φορτίσεων

Υπολογισμός Τάσεων				
$\sigma_{x,E,N}$ [kPa]	$\sigma_{x,E,M}$ [kPa]	$\sigma_{x,E}$ [kPa]	$T_{x\theta,E,M}$ [kPa]	$T_{x\theta,E,V}$ [kPa]
16825.37	180113.49	196938.86	603.90	2431.06
17450.21	184135.04	201585.24	603.90	1371.39
17450.21	184135.04	201585.24	603.90	1371.39
19168.62	110160.10	129328.72	603.90	16324.44
16825.37	180113.49	196938.86	603.90	2431.06
21355.55	1147.97	22503.52	603.90	1687.69

Ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού

Ακολουθούμε τη μεθοδολογία που προτείνει ο ευροκώδικας και ξεκινάμε υπολογίζοντας την αδιάστατη παράμετρο μήκους του κελύφους ω , η οποία είναι ίση με:

$$\omega = \frac{L}{\sqrt{rt}} = \frac{30}{\sqrt{3 \times 0.06}} = 70,71 \quad (6-9)$$

Εφόσον ικανοποιούνται οι συνθήκες μακρών κελυφών:

$$\frac{r}{t} \leq 150, \omega \leq 6 \left(\frac{r}{t} \right) \text{ και } 500 \leq \frac{E}{f_{yk}} \leq 1000 \quad (6-10)$$

ο συντελεστές C_x και η ανώτατη ανηγμένη λυγηρότητα της πλαστικής περιοχής λ_0 υπολογίζονται ως εξής και οι τιμές τους φαίνονται στο Πίνακας 6.11:

$$C_x = C_{x,N} \left(\frac{\sigma_{x,E,N}}{\sigma_{xE}} \right) + \left(\frac{\sigma_{x,E,M}}{\sigma_{xE}} \right) \quad (6-11)$$

όπου:

$$C_{x,N} = \max \left(0,6, 1 + \frac{0,2}{C_{xb}} \left[1 - 2\omega \frac{t}{r} \right] \right) = 0,878 \quad (6-12)$$

$$\lambda_{x0} = 0.20 + 0.10 \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}} \right) \quad (6-13)$$

Επομένως η ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού υπολογίζεται από τη σχέση και οι τιμές του φαίνονται στο Πίνακα 6.11:

$$\sigma_{xRcr} = 0.605 E C_x \frac{t}{r} \quad (6-14)$$

Πίνακας 6.11: Πίνακας τιμών για τους συντελεστές C_x , λ_{x0} όπως και η ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού $\sigma_{x,Rcr}$ για κάθε εντατική κατάσταση

Μέγιστα Εντατικά Μεγέθη	C_x	λ_{x0}	$\sigma_{x,Rcr}$ [kPa]
maxMx	0.989586	0.29145655	2514537.903
maxMy	0.989448	0.29134351	2514187.772
maxMz	0.937563	0.24877795	2382347.103
maxFx	0.981933	0.28517838	2495092.158
maxFy	0.989586	0.29145655	2514537.903
maxFz	0.884323	0.20510128	2247064.911

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:

$$a_x = \frac{0.62}{1 + 1.91(\Delta w_k / t)^{1.44}} = \frac{0.62}{1 + 1.91(0.0170 / 0.06)^{1.44}} = 0.473 \quad (6-15)$$

όπου:

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{1}{25} \sqrt{\frac{3}{0.06}} 0.06 \quad (6-16)$$

Οι υπόλοιπες παράμετροι λυγισμού είναι:

$$\beta = 0.6$$

$$n = 1.0$$

Η τιμή της ανηγμένης πλαστικής λυγηρότητας λαμβάνεται ως:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{a}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0.4}{1-0.6}} = 1.0 \quad (6-17)$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα λ_x και ο μειωτικός συντελεστής λυγισμού χ για αξονική θλίψη δίνεται από τη σχέση (4-11) και (4-8) αντίστοιχα. Στη συνέχεια υπολογίσαμε τη χαρακτηριστική τάση λυγισμού $\sigma_{x,Rd}$

από τη σχέση (4-4) καταλήγοντας στην εύρεση της αντοχής σχεδιασμού έναντι λυγισμού για αξονική θλίψη για κάθε εντατική κατάσταση. Οι τιμές των παραπάνω μεταβλητών φαίνεται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.12: Πίνακας τιμών για τους συντελεστές λ_x και χ_x όπως και η της αντοχής σχεδιασμού έναντι λυγισμού για αξονική θλίψη $\sigma_{x,Rd}$ για κάθε εντατική κατάσταση

Μέγιστα Εντατικά Μεγέθη	λ_x	χ_x	$\sigma_{x,Rd}$ [kPa]
maxMx	0.375738	0.93649737	302233.2432
maxMy	0.375764	0.93640152	302202.3077
maxMz	0.386022	0.90185259	291052.4272
maxFx	0.377199	0.93120831	300526.3197
maxFy	0.375738	0.93649737	302233.2432
maxFz	0.397472	0.86923681	280526.4245

Ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού

Όπως και στην προηγούμενη ενότητα ξεκινάμε υπολογίζοντας την αδιάστατη παράμετρο μήκους του κελύφους ω . όπου από τον τύπο (6-9) την έχουμε ήδη υπολογίσει ίση με $\omega=70.71$. Η διατομή χαρακτηρίζεται μεσαίου μήκους αφού ικανοποιείται η συνθήκη $10 < \omega < 8.7r/t$. επομένως ο συντελεστής C_T λαμβάνεται ίσος με 1.

Από το Πίνακας 4.3 για υψηλή ποιότητα κατασκευής ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών α_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:

$$T_{x\theta,Rcr} = 0.75EC_T \sqrt{\frac{1}{\omega} \left(\frac{t}{r} \right)} = 374600,241 \text{ kPa} \quad (6-18)$$

Η τιμή της ανηγμένης πλαστικής λυγηρότητας λαμβάνεται ως:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha_t}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0.65}{1-0.6}} = 1.028 \quad (6-19)$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα λ_T για δίνεται από τη σχέση (4-11):

$$\lambda_T = \sqrt{\frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{T_{x\theta,Rcr}}} = 0.740 \quad (6-20)$$

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

$$\chi_T = 0.22 \quad (6-21)$$

Η αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού για διάτμηση είναι ίδια για όλες τις εντατικές καταστάσεις . υπολογίζεται από τη σχέση (4-6) και είναι ίση με:

$$T_{x\theta,Rk} = \chi_T f_{yk} / \sqrt{3} = 40330.91 \text{ kPa} \quad (6-22)$$

Έλεγχος αντοχής έναντι λυγισμού

Σύμφωνα με την παράγραφο 4.4.3 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:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (6-23)$$

$$T_{x\theta,Ed} \leq T_{x\theta,Rd} \quad (6-24)$$

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} + \left(\frac{T_{x\theta,Ed}}{T_{x\theta,Rd}} \right)^{k_T} \leq 1 \quad (6-25)$$

Οι εκθέτες αλληλεπίδρασης που υπεισέρχονται στη σχέση (6-26) υπολογίζονται από τις σχέσεις (4-30) και (4-32) και είναι ίσοι με:

$$k_x = 1.25 + 0.75x_x = 1.95 \quad (6-26)$$

$$k_T = 1.25 + 0.75x_T = 1.80 \quad (6-27)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ο Πίνακας 6.13 με τα ποσοστά εκμετάλλευσης της διατομής για ορθές τάσεις, διατμητικές τάσεις και για συνδυασμό των δύο για κάθε εντατική κατάσταση. Όπως είναι εμφανές η διατομή επαρκεί με μέγιστο ποσοστό εκμετάλλευσης ίσο με 46%.

Πίνακας 6.13: ποσοστά εκμετάλλευσης της διατομής για ορθές τάσεις, διατμητικές τάσεις και για συνδυασμό των δύο για κάθε εντατική κατάσταση

Μέγιστα Εντατικά Μεγέθη	σ_{Ed}/σ_{Rd}	T_{Ed}/T_{Rd}	σ/T
maxMx	0.65	0.08	0.44
maxMy	0.67	0.05	0.46
maxMz	0.08	0.06	0.01
maxFx	0.43	0.42	0.40
maxFy	0.65	0.08	0.44
maxFz	0.08	0.06	0.01

6.5.2.2 Έλεγχος πασσάλων

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον έλεγχο των πασσάλων με τη μέθοδο των τάσεων είναι πανομοιότυπη με αυτή που παρουσιάστηκε στην παραπάνω ενότητα για τον έλεγχο του πυλώνα στην ενότητα 6.5.2.1. Στην περίπτωση των πασσάλων η επιλογή των εντατικών καταστάσεων για τις οποίες θα γίνει ο έλεγχος είναι πιο σύνθετος απ' ό τι στον πυλώνα. Ενώ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του

πασσάλου υπολογίστηκαν στην ενότητα 6.4.3 και είναι Διάμετρος $D=2\text{m}$, πάχος $t=0.02\text{m}$ και μήκος $L=20\text{m}$.

Αρχικά γίνεται στατική ανάλυση του μοντέλου για το σύνολο των φορτίων σχεδιασμού. Μετά το πέρας των αναλύσεων συλλέγουμε για κάθε πάσσαλο τις εντατικές καταστάσεις των σημείων που παρουσιάζει μέγιστο κάποιο εντατικό μέγεθος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.14. Η ίδια διαδικασία γίνεται και για τους τρεις πασσάλους και για τις οχτώ φορτίσεις, καταλήγοντας στη συγκέντρωση των κρίσιμων εντατικών καταστάσεων.

Πίνακας 6.14: Οι εντατικές καταστάσεις των σημείων, όπου παρουσιάζει μέγιστο κάποιο εντατικό μέγεθος στον πάσσαλο-1, για συγκεκριμένη φόρτιση σχεδιασμού

Φόρτιση DLC1.3 maxFx						
	Fz[kN]	Fy[kN]	Fx[kN]	Mz[kN]	My[kN]	Mx[kN]
Max Nodal Force R	3966.33	-967.287	363.61	1.36965E-13	-151.396	-740.451
Max Nodal Force S	3966.33	-967.287	363.61	1.36965E-13	-151.396	-740.451
Max Nodal Force T	3966.33	-967.287	363.61	1.36965E-13	-151.396	-740.451
Max Nodal Moment R	3966.33	-967.287	363.61	1.36965E-13	-151.396	2375.76
Max Nodal Moment S	3960.96	-101.21	23.0139	0	977.128	2375.76
Max Nodal Moment T	3960.96	-101.21	23.0139	0	977.128	2375.76

Η ίδια διαδικασία γίνεται και για τους τρεις πασσάλους και για τις οχτώ φορτίσεις, καταλήγοντας στη συγκέντρωση των σημαντικότερων εντατικών καταστάσεων. Επειδή όμως ο αριθμός τους είναι πολύ μεγάλος γίνεται μια δεύτερη διαλογή, συγκεντρώνοντας για κάθε φόρτιση τις δυσμενέστερες εντατικές καταστάσεις. Η διαλογή αυτή γίνεται με κριτήριο τη μέση τετραγωνική διαφορά (RSS) των εγκάρσιων ροπών (M_x , M_y). Έτσι από κάθε φόρτιση επιλέχθηκαν μία με δύο εντατικές καταστάσεις για τις οποίες έγινε και ο έλεγχος των πασσάλων.

Πίνακας 6.15: Κρίσιμες εντατικές καταστάσεις των πασσάλων για τις οποίες θα γίνει έλεγχος των τάσεων

Εντατικές καταστάσεις	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]
1	977.128	2375.76	0	-101.21	23.0139	3960.96
2	455.32	2249.29	0	-110.276	122.424	5422.54
3	420.462	1485.88	0	214.079	-112.541	5451.55
4	849.39	2288.05	0	-95.4715	28.8131	3778.74
5	479.853	-2294.38	0	117.316	-47.3151	5337.99
6	486.89	1510.63	0	263.846	-110.922	5260
7	909.561	2159.73	0	-106.189	28.5846	3149.36
8	371.203	2088.25	0	-106.709	109.728	4942.47
9	438.717	1431.64	0	268.764	-139.421	4605.95
10	893.985	2142.42	0	-105.415	26.6059	3141.26
11	430.976	-2269.58	0	104.646	-37.172	5013.08
12	427.126	1447.78	0	279.244	-136.527	4589.86

Στη συνέχεια για τα εντατικά μεγέθη του Πίνακας 6.15. υπολογίζονται οι αντίστοιχες τάσεις σχεδιασμού από τους τύπους (6-5), (6-6) και (6-7) οι τιμές των οποίων φαίνονται στο πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 6.16: Ορθές και διατμητικές τάσεις σχεδιασμού για τις κρίσιμες εντατικές καταστάσεις

Υπολογισμός Τάσεων					
Εντατικές Καταστάσεις	$\sigma_{x.E.N}$	$\sigma_{x.E.M}$	$\sigma_{x.E}$	$\tau_{\theta.E.M}$	$\tau_{\theta.E.V}$
1	-1618.90	42131.78	40512.88	0.00	1651.93
2	86736.08	37638.85	124374.93	0.00	2622.36
3	87200.11	25326.81	112526.93	0.00	3849.29
4	60442.73	40028.63	100471.36	0.00	1587.17
5	85383.67	38444.29	123827.96	0.00	2013.28
6	84136.18	26030.94	110167.12	0.00	4555.24
7	50375.50	38434.83	88810.33	0.00	1750.21
8	79057.14	34786.28	113843.42	0.00	2436.01
9	73674.34	24558.08	98232.42	0.00	4818.80
10	50245.94	38074.24	88320.18	0.00	1730.34
11	80186.58	37888.55	118075.13	0.00	1767.45
12	73416.98	24756.83	98173.81	0.00	4947.05

Ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού

Ακολουθούμε τη μεθοδολογία που προτείνει ο ευροκώδικας και ξεκινάμε υπολογίζοντας την αδιάστατη παράμετρο μήκους του κελύφους ω από τον τύπο (6-9). η οποία είναι ίση με $\omega = 141.42$ και εφόσον ικανοποιείται η συνθήκη μακρών κελυφών (6-10) ο συντελεστής C_x και η ανώτατη ανηγμένη λυγηρότητα της πλαστικής περιοχής λ_{θ} υπολογίζονται από τους τύπους (6-12) και (6-14) αντίστοιχα και οι τιμές τους φαίνονται στο Πίνακα 6.17. μαζί με την ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού $\sigma_{x.Rcr}$ (6-15).

Πίνακας 6.17: Πίνακας τιμών για τους συντελεστές C_x , λ_{θ} όπως και η ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού $\sigma_{x.Rcr}$ για κάθε εντατική κατάσταση

Μέγιστα Εντατικά Μεγέθη	C_x	λ_{θ}	$\sigma_{x,Rcr}$
1	1,012	0,304	2572523,429
2	0,783	0,230	1990860,267
3	0,759	0,223	1929682,753
4	0,813	0,240	2066421,763
5	0,786	0,231	1997046,054
6	0,763	0,224	1938528,05
7	0,824	0,243	2093532,077
8	0,784	0,231	1993178,306
9	0,767	0,225	1949346,46
10	0,823	0,243	2092205,997
11	0,789	0,232	2005265,885
12	0,768	0,225	1951061,282

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 $\alpha_\chi = 0.473$ με $\Delta w_k = 0.0057$ από τον τύπο (6-17), με τις υπόλοιπες παραμέτρους λυγισμού να λαμβάνουν τις τιμές $\beta = 0.6$ και $n = 1.0$. Η ανηγμένη πλαστική λυγρότητα (6-18) υπολογίζεται ίση με $\lambda_p = 1.09$. Η ανηγμένη λυγρότητα λ_χ και ο μειωτικός συντελεστής λυγισμού χ_χ για αξονική θλίψη δίνεται από τη σχέση (4-11) και (4-8) αντίστοιχα. Στη συνέχεια υπολογίσαμε τη χαρακτηριστική τάση λυγισμού $\sigma_{\chi,Rd}$ από τη σχέση (4-4) καταλήγοντας στην εύρεση της αντοχής σχεδιασμού έναντι λυγισμού για αξονική θλίψη για κάθε εντατική κατάσταση. Οι τιμές των παραπάνω μεταβλητών φαίνεται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.18: Πίνακας τιμών για τους συντελεστές λ_χ και χ_χ όπως και η της αντοχής σχεδιασμού έναντι λυγισμού για αξονική θλίψη $\sigma_{\chi,Rd}$ για κάθε εντατική κατάσταση

Εντατικές Καταστάσεις	λ_χ	χ_χ	$\sigma_{\chi,Rd}$ [kPa]
1	0.37	0.95	306055.41
2	0.42	0.87	279369.36
3	0.43	0.86	276536.21
4	0.41	0.88	282846.39
5	0.42	0.87	279654.83
6	0.43	0.86	276947.04
7	0.41	0.88	284089.42
8	0.42	0.87	279476.36
9	0.43	0.86	277448.93
10	0.41	0.88	284028.66
11	0.42	0.87	280033.92
12	0.43	0.86	277528.43

Ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού

Όπως και στην προηγούμενη ενότητα ξεκινάμε υπολογίζοντας την αδιάστατη παράμετρο μήκους του κελύφους ω , όπου από τον τύπο (6-9) την έχουμε ήδη υπολογίσει ίση με $\omega = 141.42$. Η διατομή χαρακτηρίζεται μεσαίου μήκους αφού ικανοποιείται η συνθήκη $10 < \omega < 8.7r/t$. επομένως ο συντελεστής C_T λαμβάνεται ίσος με 1. Από το Πίνακας 4.3 για υψηλή ποιότητα κατασκευής ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών α_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

$$T_{\chi0,Rcr} = 0.75 E C_T \sqrt{\frac{1}{\omega}} \left(\frac{t}{r} \right) = 264882.371 \text{ kPa} \quad (6-28)$$

Η τιμή της ανηγμένης πλαστικής λυγρότητας λαμβάνεται ως:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha_t}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0.65}{1-0.6}} = 1.028 \quad (6-29)$$

Η ανηγμένη λυγρότητα λ_T για δίνεται από τη σχέση (4-11):

$$\lambda_T = \sqrt{\frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{T_{x\theta, Rcr}}} = 0.88 \quad (6-30)$$

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

$$\chi_T = 0.31 \quad (6-31)$$

Η αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού για διάτμηση είναι ίδια για όλες τις εντατικές καταστάσεις . υπολογίζεται από τη σχέση (4-6) και είναι ίση με:

$$T_{x\theta, Rk} = \chi_T f_{yk} / \sqrt{3} = 56947.52 \text{ kPa} \quad (6-32)$$

Έλεγχος αντοχής έναντι λυγισμού

Σύμφωνα με την παράγραφο 4.4.3 απαιτούνται μεμονωμένοι έλεγχοι των τιμών των μεμβρανικών τάσεων. καθώς και έλεγχος αλληλεπίδρασης τους. Επομένως. η διατομή του πύργου θεωρείται επαρκής αν ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι συνθήκες (6-24), (6-25) και (6-26). Οι εκθέτες αλληλεπίδρασης που υπεισέρχονται στη σχέση (6-26) υπολογίζονται από τις σχέσεις (4-30) και (4-32) και είναι ίσοι με :

Πίνακας 6.19: Οι τιμές των εκθετών αλληλεπίδρασης k_x και k_t για όλες τις εντατικές καταστάσεις

k_x	k_t
1.96	1.83
1.90	1.83
1.89	1.83
1.91	1.83
1.90	1.83
1.89	1.83
1.91	1.83
1.90	1.83
1.89	1.83
1.91	1.83
1.90	1.83
1.89	1.83

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ο Πίνακας 6.20 με τα ποσοστά εκμετάλλευσης της διατομής για ορθές τάσεις, διατμητικές τάσεις και για συνδυασμό των δύο για κάθε εντατική κατάσταση. Όπως είναι εμφανές η διατομή επαρκεί με μέγιστο ποσοστό εκμετάλλευσης ίσο με 22%.

Πίνακας 6.20: ποσοστά εκμετάλλευσης της διατομής για ορθές τάσεις, διατμητικές τάσεις και για συνδυασμό των δύο για κάθε εντατική κατάσταση

Εντατική Κατάσταση	σ_{Ed}/σ_{Rd}	τ_{Ed}/τ_{Rd}	σ/τ
1	0.13	0.03	0.02
2	0.45	0.05	0.22
3	0.41	0.07	0.19
4	0.36	0.03	0.14
5	0.44	0.04	0.21
6	0.40	0.08	0.18
7	0.31	0.03	0.11
8	0.41	0.04	0.18
9	0.35	0.08	0.15
10	0.31	0.03	0.11
11	0.42	0.03	0.20
12	0.35	0.09	0.15

Εφόσον αποδείξαμε ότι οι πάσσαλοι ικανοποιούν τον έλεγχο των τάσεων πρέπει να επανελέγξουμε κατά πόσο ικανοποιείται ακόμη ο έλεγχος έναντι ολίσθησης που έγινε στην ενότητα 6.4.3. Αυτό που χρειάζεται να κάνουμε είναι να ελέγξουμε εάν το μέγιστο εφελκυστικό φορτίο που εμφανίζεται στους πασσάλους είναι μικρότερο από τη Φέρουσα Ικανότητα του πασσάλου έναντι ολίσθησης. Όπως φαίνεται παρακάτω και αυτό ο έλεγχος ικανοποιείται άρα ο πάσσαλος είναι κατάλληλος.

$$\max F_z = 3960.96\text{kN} < 4972.91\text{kN} = Q_u \quad (6-33)$$

6.6 Υπολογισμός Ισοδύναμου τμήματος

Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, για την συγκεκριμένη φόρτιση και τα δεδομένα εδαφικά χαρακτηριστικά, προέκυψε πάσσαλος μήκους $L=20\text{m}$, διαμέτρου $D=5.7\text{m}$ και πάχους $t = 0.06\text{m}$. Όλοι οι πάσσαλοι έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά άρα είναι σαν να προσπαθούμε να υπολογίσουμε το ισοδύναμο τμήμα ενός πασσάλου ο οποίος υπόκειται σε πολλές διαφορετικές εντατικές καταστάσεις. Έτσι ξεκινήσαμε να συλλέγουμε για την κεφαλή κάθε πασσάλου την μετακίνηση δ και τη στροφή φ ως προς τον εγκάρσιο άξονα $\gamma-\gamma$. Για κάθε μία από τις οχτώ φορτίσεις σχεδιασμού επιλέξαμε τον πάσσαλο με τη μέγιστη μετακίνηση και στροφή και συντάξαμε τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.21: Μέγιστες μετακινήσεις και στροφές των κεφαλών των πασσάλων για κάθε φόρτιση σχεδιασμού

	DLC1.3				DLC1.6a			
	1	2	3	4	1	2	3	4
φ [rad]	0.001288	0.00031	0.001349	0.000324	0.001474	0.001434	0.001363	0.000225
δ [m]	0.009005	0.001317	0.00859	0.001408	0.00943	0.009821	0.009352	0.000795

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 των πασσάλων 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 [6.8]

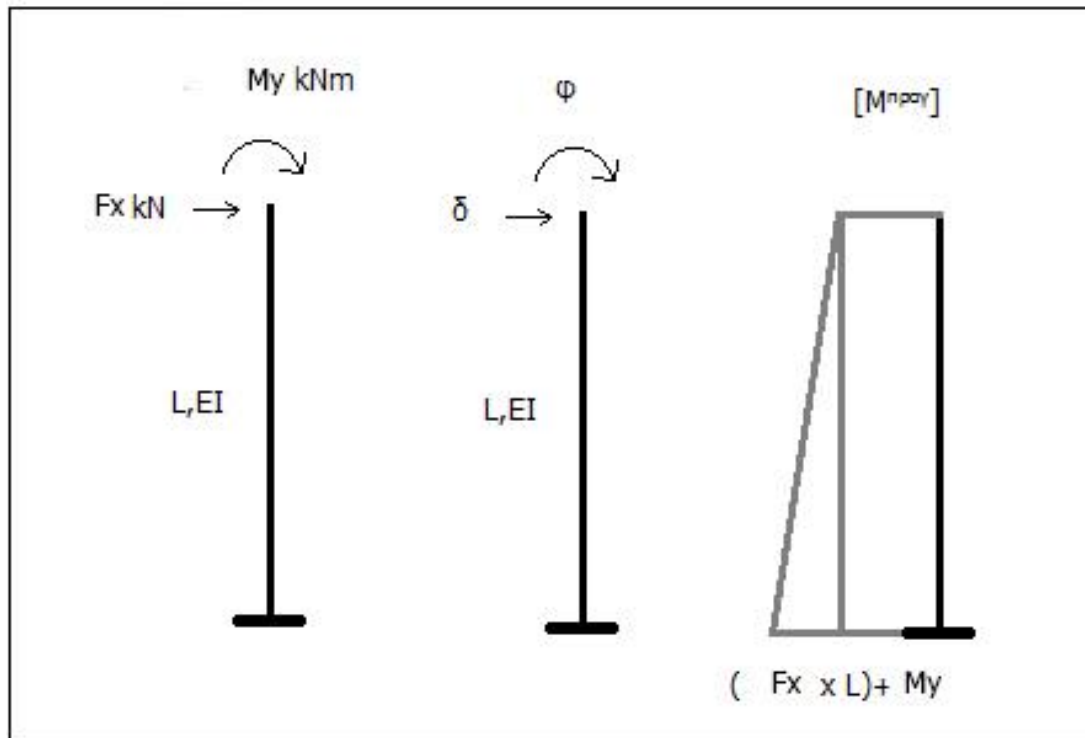
Με δεδομένα την μετατόπιση δ , τη στροφή φ και τα φορτία που ασκούνται στην κεφαλή του πασσάλου, αναζητούμε τα χαρακτηριστικά (L, EI) ενός ισοδύναμου προβόλου για τον οποίο ασκώντας τα παραπάνω εντατικά μεγέθη, αναπτύσσει στο ελεύθερο άκρο του τα αντίστοιχα παραμορφωσιακά μεγέθη (δ, φ).

Από την Α.Δ.Ε προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

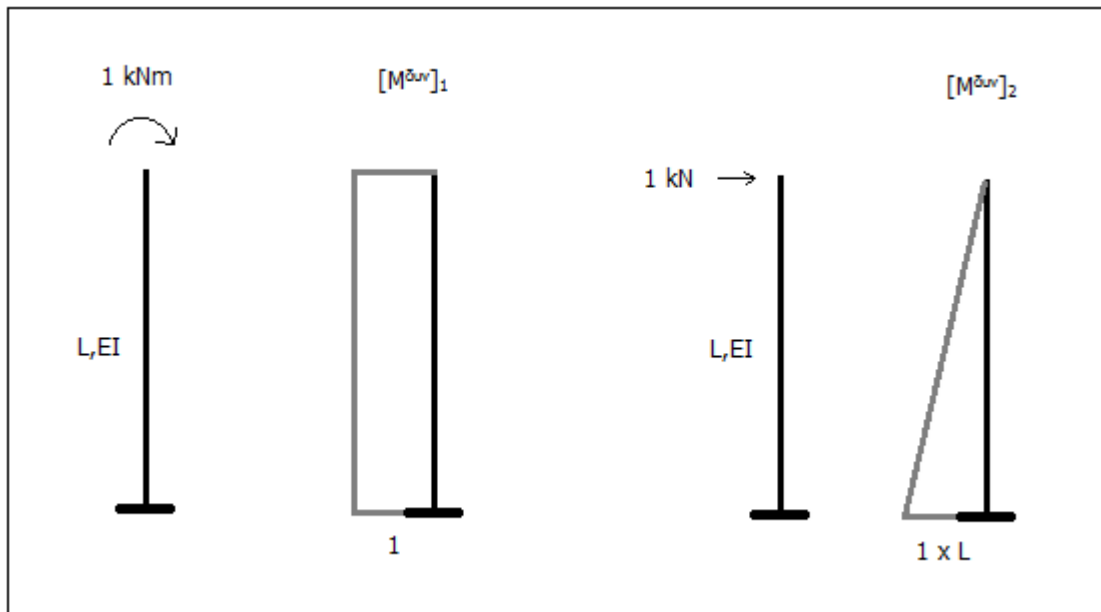
$$1 \times \varphi = \int M_1^{\delta \varphi} \times \frac{M^{\text{πραγ}}}{EI} ds \quad (6-34)$$

$$1 \times \delta = \int M_2^{\delta \varphi} \times \frac{M^{\text{πραγ}}}{EI} ds \quad (6-35)$$

από όπου οι άγνωστοι είναι οι L, E, I του ισοδύναμου τμήματος.



Σχήμα 6.10: Α.Δ.Ε-Πραγματική φόρτιση



Σχήμα 6.11: Α.Δ.Ε-Δυνατές φορτίσεις

Από την επίλυση του συστήματος προκύπτει ένα μήκος ισοδύναμου τμήματος για κάθε φόρτιση όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.22. Για $E=210000000\text{kPa}$ προκύπτουν οι ροπές αδράνειας για τις οποίες επιλέγουμε διάμετρο $D=6\text{m}$ και προκύπτουν τα ισοδύναμα πάχη.

Πίνακας 6.22: Ισοδύναμο μήκος πασσάλου, η ισοδύναμη ροπή αδράνειας και το ισοδύναμο πάχος για κάθε φόρτιση σχεδιασμού

	DLC1.3				DLC1.6a			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$L_{\text{ισ}} [\text{m}]$	10.9	7.85	9.9	7.85	10.85	10.67678	10.8	6.9
$E I_{\text{ισ}} [\text{kNm}^2]$	51625574	14387223.27	34414670.28	14426679	6684376	40295382	51783152	14906102
$I_{\text{ισ}} [\text{m}^4]$	0.25	0.07	0.16	0.07	0.03	0.19	0.25	0.07
$t_{\text{ισ}} [\text{m}]$	0.090	0.023	0.057	0.023	0.010	0.068	0.090	0.023

Τα τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ισοδύναμου τμήματος θα προκύψουν από τον μέσω όρο των παραπάνω. καταλήγοντας έτσι στα τελικά μεγέθη όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 6.23: Χαρακτηριστικά ισοδύναμου τμήματος

$L_{\text{ισ}} [\text{m}]$	9.47	Μήκος ισοδύναμου τμήματος
$D [\text{m}]$	6	Διάμετρος ισοδύναμου τμήματος
$t_{\text{ισ}} [\text{m}]$	0.048	Πάχος ισοδύναμου τμήματος

Βιβλιογραφία

- [6.1] Α. Αναγνωστόπουλος, Β. Παπαδόπουλος, «Θεμελιώσεις με πασσάλους»
- [6.2] Κ.Ι. Μουτζούρης, Θαλάσσια Υδραυλική
- [6.3] Α.Α. Δήμας, Παράκτια Υδραυλική, Κεφάλαιο 4ο, σελ. 77
- [6.4] Κ.Ι. Μουτζούρης, Θαλάσσια Υδραυλική, Κεφάλαιο 6ο, σελ 87
- [6.5] RECOMMENDED PRACTISE. DNV-RP-C205. Environmental Conditions and Environmental Loads. October 2010. Page 32)
- [6.6] Α.Α. Δήμας, Λιμενικά Έργα, Κεφάλαιο 9ο, σελ. 103
- [6.7] "Θεμελιώσεις με Πασσάλους" Αναγνωστόπουλος, Παπαδόπουλος σελ.45
- [6.8] Σταυρίδης Λ. «Στατική των δομικών φορέων»

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας επισημαίνονται παρακάτω:

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 αποδοτικότητα αλλά και οι δυνατότητες των υπεράκτιων ανεμογεννητριών βελτιώνονται ραγδαία. Από τη μία η παραγωγικότητα αυξάνεται με κινητήρες μεγαλύτερης ισχύος και από την άλλη η απόσταση από την ακτή και το βάθος εγκατάστασης διαρκώς μεγαλώνουν.
- Υπάρχουν διάφορα είδη φορέων στήριξης θαλάσσιων ανεμογεννητριών, η επιλογή των οποίων εξαρτάται κυρίως από το βάθος της θάλασσας στην περιοχή εγκατάστασης. Το τρίποδο σύστημα χρησιμοποιείται για ενδιάμεσα βάθη όπου οι κοινές μονοπάσσαλες ανεμογεννήτριες δεν επαρκούν.
- 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:

- Παρόλο που οι ανεμογεννήτριες αποτελούν ένα σύγχρονο αντικείμενο κατασκευής, παρατηρούμε ότι έχουν αναπτυχθεί αρκετοί κανονισμοί για το σχεδιασμό τους. Ο Ευροκώδικας δεν ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο κανονισμό όμως βασίζόμενοι στην εμπειρία των υπεράκτιων πλατφόρμων εξόρυξης πετρελαίου συντάχθηκαν ο DNV-OS-J101 (Νορβηγικός κανονισμός) και ο IEC61400-3 (Βρετανικός κανονισμός), που αποτελούν τη βάση της μελέτης.

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_{η}), 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} .
- Για τον υπολογισμό του χαρακτηριστικού ύψους (H_s) και της χαρακτηριστικής περιόδου (T_s) του κυματισμού θα πρέπει να είναι γνωστά η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας (W), το μήκος αναπτύγματος του κυματισμού (F) και η διάρκεια πνοής του ανέμου (t_d).
- Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κυματισμού χρησιμοποιείται και η αντίστοιχη θεωρία κυματισμού η οποία περιγράφει καλύτερα την κίνηση των υγρών σωματιδίων.
- Όσο πιο πολύ πλησιάζουμε στη κορυφή του κυματισμού τόσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο που ασκείται στον κυλινδρικό πάσσαλο της ανεμογεννήτριας.

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 τους πασσάλους της ανεμογεννήτριας.
- 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 ανεμογεννητριών εδραζόμενες σε τρίποδο κρίσιμη εμφανίζεται συνήθως η φέρουσα ικανότητα έναντι ολίσθησης. Αυτό συμβαίνει λόγω του τρόπου μεταφοράς των φορτίων (μέσω ζευγών δυνάμεων). Έτσι σχεδόν πάντα κάποιος πάσσαλος εφελκύεται.
- Η ανάλυση πλευρικά φορτισμένων πασσάλων γίνεται με τη χρήση μη-γραμμικών ελατηρίων, τα οποία τοποθετούνται καθ' ύψος των πασσάλων.
- 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.
- Προκειμένου να αποφευχθεί η αστοχία, τηρούνται τα θα πρέπει η πλαστικοποίηση του εδάφους να μη ξεπερνά τα 4 με 5 μέτρα βάθος και τα διαγράμματα των ροπών των πασσάλων να σβήνουν ομαλά στη βάση τους.

Όσον αφορά τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν:

- Η ανάλυση στο λογισμικό ADINA για την επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου έναντι ολίσθησης μας οδήγησε στα παρακάτω συμπεράσματα:
 - Η αύξηση του μήκους του πασσάλου αυξάνει σχεδόν σταθερά την Φ.Ι., ενώ η εφελκυστική αξονική δύναμη παραμένει πρακτικά σταθερή. Η αύξηση είναι σχεδόν 0.9% για κάθε μέτρο μήκους που προστίθεται.
 - Η αύξηση της διαμέτρου οδηγεί σε αναλογική αύξηση της φέρουσας ικανότητας, ενώ και πάλι η εφελκυστική αξονική δύναμη παραμένει πρακτικά σταθερή.
 - Η επιρροή του πάχους είναι αμελητέα.
 - Η αύξηση της απόστασης μεταξύ των πασσάλων οδηγεί στη μείωση των αξονικών δυνάμεων. Για κάθε ένα μέτρο που αυξάνεται η διαγώνιος του τριπόδου η αξονική δύναμη μειώνεται γύρω στο 15.7%. Χωρίς όμως γνωρίζουμε πως επηρεάζεται το υπόλοιπο τρίποδο.
- Το λογισμικό FAST προσομοιώνει πλήρως την συζευγμένη αέρο-υδροελαστική απόκριση της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας αλλά η προσομοίωση και έλεγχος της ανωδομής γίνεται σε άλλο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (SAP2000) ενώ η προσομοίωση του εδάφους και η μελέτη του πασσάλου γίνεται σε άλλο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (ADINA).
- Το λογισμικό SAP2000 δεν μπορεί να ελέγξει διατομές κατηγορίας 4 ούτε να προσομοιώσει το έδαφος.
- Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο των διατομών στο λογισμικό SAP2000 αποδεικνύουν ότι η ανωδομή είναι υπερδιαστασιολογημένη για τους συγκεκριμένους συνδυασμούς φορτίσεων.
- Στο λογισμικό ADINA δεν μπορούμε να κάνουμε έλεγχο διατομών αλλά μόνο να λάβουμε τις εντατικές καταστάσεις.
- Η επιλογή των κρίσιμων εντατικών καταστάσεων για το σύνολο των φορτίσεων και των πασσάλων είναι δύσκολο να προσδιοριστεί λόγω της σύνθετης αλληλεπίδρασης των εντατικών μεγεθών.
- Ο έλεγχος των τάσεων για τους πασσάλους αποδεικνύει ότι δεν υπάρχει πρόβλημα διαρροής ή λυγισμού όμως για μια δυσμενέστερη φόρτιση η ολίσθηση είναι κρίσιμη.
- Το ισοδύναμο τμήμα του φορέα θα πρέπει να υπολογίζεται για κάθε φόρτιση ξεχωριστά διότι δημιουργούνται αποκλίσεις.