



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών»

Τομέας Δομοστατικής - Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΦΟΡΤΙΑ, ΑΝΑΛΥΣΗ, ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**



Ανδρέας Μπέντας, Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π

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

ΑΘΗΝΑ 2014

ΕΜΚ ΜΕ 2014 1

Μπέντας Ανδρέας
Φορτία, Ανάλυση, Συμπεριφορά και Δομοστατικός Σχεδιασμός Θαλάσσιων Ανεμογεννητριών
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2014 1
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Bentas Andreas
Loads, Analysis, Behavior and Structural Design of Offshore Wind Turbines
Postgraduate Thesis MSL PT 2014 1
Laboratory of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

στους γονείς μου Δημήτρη και Ευαγγελία

και στην αδερφή μου Μαρία

Θα ήθελα να ευχαριστήσω...

Αποτελεί υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, σαν τον ελάχιστο τρόπο να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την πολύτιμη αυτή βοήθεια που μου πρόσφεραν.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ για την αμέριστη συμπαράσταση, τον πολύτιμο χρόνο και την συμβουλευτική υποστήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας. Η άρτια επιστημονική του κατάρτιση και το άριστο πνεύμα συνεργασίας του με διευκόλυναν στην προσπάθεια μου αυτή.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Κωνσταντίνα Κουλάτσου και τον Στέλιο Βερνάρδο για την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφεραν στο κομμάτι των αεροδυναμικών φορτίων της κατασκευής. Οι χρονοϊστορίες της ταχύτητας του ανέμου κατά μήκος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας προέρχονται από το λογισμικό που κατασκεύασε ο ίδιος ο Στέλιος στη μεταπτυχιακή του εργασία αλλά και η χρονοϊστορία της φόρτισης λόγω της περιστροφής των πτερυγίων που προέρχεται από τη διατριβή της Κωνσταντίνας, ήταν απαραίτητες για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αθανάσιο Δήμα για την πολύτιμη βοήθεια του στο κομμάτι των υδροδυναμικών φορτίων που ασκούνται στη κατασκευή. Οι συμβουλές του βοήθησαν σημαντικά στην ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ε. Σαπουντζάκη και τον Δ. Βαμβάτσικο για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσαν ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών»
Τομέας Δομοστατικής - Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Μεταπτυχιακή Εργασία Ανδρέα Μπέντα - ΕΜΚ ΜΕ 2014 1

ΦΟΡΤΙΑ, ΑΝΑΛΥΣΗ, ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

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

Ιανουάριος 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης της συμπεριφοράς των θαλασσιών ανεμογεννητριών μέσα από τον καθορισμό των φορτίων που ασκούνται σε αυτές τις κατασκευές. Σκοπός της εργασίας είναι μέσα από μια σειρά παραμετρικών επιλύσεων να διερευνηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των θαλάσσιων ανεμογεννητριών καθώς και η βαρύτητα τους. Μεταβάλλοντας παραμέτρους που αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φορέα, τον τρόπο προσομοίωσης του εδάφους αλλά και τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελιώσεως προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τις εντατικές καταπονήσεις και τις παραμορφώσεις της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια αναφορά στους διάφορους τύπους φορέων των θαλάσσιων ανεμογεννητριών. Εξηγούνται τα βασικά μέρη της ανεμογεννήτριας και περιγράφεται ο τρόπος περιστροφής των πτερυγίων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού του υδροδυναμικού φορτίου που ασκείται στη κατασκευή. Πραγματοποιούνται μια σειρά από παραμετρικές επιλύσεις μέσα από τις οποίες διερευνάται ο ρόλος της κάθε παραμέτρου στο υδροδυναμικό φορτίο της ανεμογεννήτριας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης του εδάφους θεμελιώσεως της ανεμογεννήτριας μέσω ελατηρίων. Πραγματοποιούνται μια σειρά από παραμετρικές επιλύσεις μέσα από τις οποίες διερευνάται ο ρόλος της κάθε παραμέτρου στη δυσκαμψία των ελατηρίων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού του αεροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Καθορίζονται επίσης και τα χαρακτηριστικά της συνολικής φόρτισης της κατασκευής στην οριακή κατάσταση αστοχίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη δοκιμή στατικής ανάλυσης της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας. Πραγματοποιούνται επίσης μια σειρά παραμετρικών στατικών επιλύσεων όπου μεταβάλλονται διάφορες παράμετροι της κατασκευής και προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη δοκιμή δυναμικής ανάλυσης της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας. Πραγματοποιούνται επίσης μια σειρά παραμετρικών δυναμικών επιλύσεων όπου μεταβάλλονται διάφορες παράμετροι της κατασκευής και προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μεταπτυχιακής εργασίας.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
POSTGRADUATE COURSE OF STUDIES
«Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures»
Division of Structural Engineering - Laboratory of Steel Structures

Postgraduate Thesis by Andreas Bentas - MSL PT 2014 1

LOADS, ANALYSIS, BEHAVIOR AND STRUCTURAL DESIGN OF OFFSHORE WIND TURBINES

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

January 2014

ABSTRACT

In this postgraduate thesis is attempted the investigation of the behavior of offshore wind turbines through the determination of loads exerted on such structures. The aim of the thesis is to be investigated the factors that affect the behavior of offshore wind turbines and their severities through a series of parametric solutions. Interesting conclusions about the stresses and strains of the offshore wind turbine was received by varying parameters of the structure such as geometry, simulation of the soil and the bearing capacity of the foundation.

The first chapter is referred to the types of offshore wind turbines. Furthermore, it is explained the basic parts of the wind turbine and it is described the rotation of the blades.

In the second chapter it is described the calculation process of the hydrodynamic load that exerts on the structure. A series of parametric solutions is conducted, trying to investigate the role of each parameter to the hydrodynamic load of the structure.

In the third chapter it is described the simulation process of the soil through linear and non-linear springs. A series of parametric solutions is conducted, trying to investigate the role of each parameter in the stiffness of the springs.

In the fourth chapter it is described the calculation process of the aerodynamic load that exerts along the tower of the wind turbine. Furthermore, the characteristics of the overall load of the structure are determined in its ultimate limit state.

In the fifth chapter it is presented a comprehensive static analysis of the offshore wind turbine. It is also performed a series of parametric static analysis where while changing parameters of the structure, useful conclusions were received about the behavior of the wind turbine.

In the sixth chapter it is presented a comprehensive dynamic analysis of the offshore wind turbine. It is also performed a series of parametric dynamic analysis where while changing parameters of the structure, useful conclusions were received about the behavior of the wind turbine.

In the seventh chapter it is presented the conclusions of the postgraduate thesis.

Περιεχόμενα Κεφαλαίων

Κεφάλαιο 1^ο - Εισαγωγικά στοιχεία περί θαλάσσιων ανεμογεννητριών

1.1	Γενικά	1
1.2	Ιστορική εξέλιξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων	2
1.3	Τύποι ανεμογεννητριών	3
1.3.1	Τυπικές μορφές ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα	3
1.3.2	Τυπικές μορφές ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα	4
1.4	Πυλώνες ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα	5
1.5	Ανάγκη μετάβασης στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες	7
1.6	Πλεονεκτήματα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.....	7
1.7	Μειονεκτήματα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.....	8
1.8	Εισαγωγικές έννοιες υπεράκτιων ανεμογεννητριών.....	8
1.9	Σύνθεση της κατασκευής.....	10
1.10	Είδη φορέων στήριξης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας	12
1.10.1	Φορέας στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου	13
1.10.2	Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου.....	15
1.10.3	Φορέας στήριξης μορφής δικτυώματος.....	17
1.11	Είδη θεμελίωσης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας.....	18
1.11.1	Θεμελίωση της κατασκευής μέσω θεμελίου βαρύτητας.....	20
1.12	Περιγραφή της ανεμογεννήτριας.....	21
1.13	Αρχή λειτουργίας των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας	24
1.14	Επιλογή της διατομής των πτερυγίων	32
1.15	Επιλογή του σχήματος των πτερυγίων	33

Κεφάλαιο 2^ο – Υδροδυναμικά φορτία

2.1	Εισαγωγή στους κυματισμούς	35
2.2	Ανεμογενείς κυματισμοί.....	37
2.3	Βραχυπρόθεσμη φασματική πρόβλεψη κυματισμών.....	38
2.3.1	Μεθοδολογία πρόβλεψης χαρακτηριστικών κυματισμού SMB.....	40
2.4	Επιδράσεις του πυθμένα	42
2.4.1	Παραμορφώσεις της διατομής του κύματος	42
2.5	Επιλογή θεωρίας κυματισμού	44
2.5.1	Θεωρία κύματος απειροστού ύψους (θεωρία Airy).....	45
2.5.2	Θεωρία Stokes.....	47
2.6	Θαλάσσια ρεύματα	49
2.7	Υδροδυναμικά φορτία σε κυλινδρικούς πυλώνες.....	51
2.8	Παραμετρική ανάλυση υδροδυναμικών φορτίων	53
2.8.1	Παρουσίαση μεμονωμένης δοκιμής εύρεσης υδροδυναμικού φορτίου	55

2.8.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων παραμετρικών αναλύσεων εύρεσης υδροδυναμικού φορτίου κατά μήκος του πασσάλου	64
-------	---	----

Κεφάλαιο 3^ο – Θεμελίωση Πασσάλου

3.1	Γενικά χαρακτηριστικά	74
3.2	Τρόποι εγκατάστασης.....	74
3.3	Χαλύβδινοι εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι.....	76
3.4	Φέρουσα ικανότητα - Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση	77
3.5	Φέρουσα ικανότητα - Αντοχή σε πλευρική φόρτιση	78
3.5.1	Δείκτης εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση	79
3.6	Σταθερά ελατηρίων	80
3.7	Θεμελίωση πασσάλου σε συνεκτικά εδάφη	81
3.8	Θεμελίωση πασσάλου σε μη-συνεκτικά εδάφη	84
3.9	Μεμονωμένη δοκιμή θεμελίωσης πασσάλου σε συνεκτικά εδάφη.....	86
3.9.1	Θεμελίωση πασσάλου σε προφορτισμένες αργίλους.....	87
3.9.2	Θεμελίωση πασσάλου σε κανονικά φορτισμένες αργίλους	88
3.10	Παραμετρικές αναλύσεις θεμελίωσης πασσάλου σε συνεκτικά εδάφη	91
3.10.1	Θεμελίωση πασσάλου σε προφορτισμένες αργίλους.....	91
3.10.2	Θεμελίωση πασσάλου σε κανονικά φορτισμένους αργίλους.....	94
3.11	Μεμονωμένη δοκιμή θεμελίωσης πασσάλου σε μη-συνεκτικά εδάφη	95
3.12	Παραμετρικές αναλύσεις θεμελίωσης πασσάλου σε μη-συνεκτικά εδάφη.....	97

Κεφάλαιο 4^ο – Αεροδυναμικά φορτία, συνολική φόρτιση και έλεγχοι σχεδιασμού

4.1	Αεροδυναμικά φορτία ανεμογεννήτριας	102
4.2	Συνολική φόρτιση ανεμογεννήτριας και προσομοίωση εδάφους	106
4.2.1	Υδροδυναμικό φορτίο κατασκευής.....	107
4.2.2	Αεροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πυλώνα	108
4.2.3	Αεροδυναμικό φορτίο λόγω περιστροφής πτερυγίων.....	109
4.2.4	Προσομοίωση εδάφους	109
4.3	Χαρακτηριστικά χάλυβα.....	110
4.4	Κατάταξη διατομών.....	111
4.4.1	Χαρακτηριστικές ιδιότητες διατομής	111
4.5	Έλεγχοι διατομής στην οριακή κατάσταση αστοχίας	112
4.5.1	Έλεγχος διατομής σε ομοιόμορφη θλίψη	112
4.5.2	Ελαστικός έλεγχος διατομής σε μονοαξονική κάμψη	113
4.5.3	Ελαστικός έλεγχος διατμητικών τάσεων	113
4.5.3.1	Ελαστικός έλεγχος διατμητικών τάσεων κατά τον τοπικό άξονα z.....	114
4.5.3.2	Ελαστικός έλεγχος διατμητικών τάσεων κατά τον τοπικό άξονα γ	114
4.5.4	Ελαστικός έλεγχος αντοχής σε διαξονική κάμψη.....	115
4.5.5	Ελαστικό έλεγχος διατομής υπό θλίψη και διαξονική κάμψη	115
4.5.6	Σύνθετος έλεγχος κατά Von Mises – Ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη, διαξονική κάμψη και διαξονική διάτμηση	116

4.5.7	Κριτήρια σχεδιασμού στην οριακή κατάσταση αστοχίας	117
4.6	Απόσβεση θαλάσσιας ανεμογεννήτριας	118

Κεφάλαιο 5^ο – Στατικές επιλύσεις θαλάσσιας ανεμογεννήτριας

5.1	Μεμονωμένη δοκιμή στατικής ανάλυσης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας	120
5.1.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και προσομοίωση κατασκευής.....	120
5.1.2	Υδροδυναμικό φορτίο.....	123
5.1.3	Αεροδυναμικό φορτίο.....	128
5.1.4	Προσομοίωση εδάφους	131
5.1.5	Αποτελέσματα μεμονωμένης δοκιμής στατικής ανάλυσης.....	134
5.2	Παραμετρικές στατικές επιλύσεις	146
5.2.1	Μεταβολή του μήκους θεμελιώσεως του πασσάλου.....	146
5.2.2	Μεταβολή της διαμέτρου του πασσάλου	153
5.2.3	Μεταβολή του πάχους των τοιχωμάτων του πασσάλου.....	160
5.2.4	Μεταβολή του τρόπου προσομοίωσης του εδάφους	167
5.2.5	Μεταβολή της φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελιώσεως	170
5.2.6	Μεταβολή του υψομέτρου του άξονα του δρομέα.....	177

Κεφάλαιο 6^ο – Δυναμικές επιλύσεις θαλάσσιας ανεμογεννήτριας

6.1	Μεμονωμένη δοκιμή δυναμικής ανάλυσης ανεμογεννήτριας	185
6.1.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και προσομοίωση κατασκευής.....	185
6.1.2	Υδροδυναμικό φορτίο.....	187
6.1.3	Αεροδυναμικό φορτίο.....	193
6.1.4	Προσομοίωση εδάφους	199
6.1.5	Αποτελέσματα μεμονωμένης δοκιμής δυναμικής ανάλυσης.....	201
6.2	Σύγκριση δυναμικής με στατική ανάλυση	221
6.3	Παραμετρικές δυναμικές επιλύσεις	224
6.3.1	Μεταβολή του μήκους θεμελιώσεως του πασσάλου.....	224
6.3.2	Μεταβολή της διαμέτρου του πασσάλου	231
6.3.3	Μεταβολή της φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελιώσεως	238
6.3.4	Μεταβολή του υψομέτρου του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας	246

Κεφάλαιο 7^ο – Συμπεράσματα Εργασίας

7.1	Περίληψη μεταπτυχιακής εργασίας.....	254
7.2	Συμπεράσματα μεταπτυχιακής εργασίας.....	255
7.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	261

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγικά στοιχεία περί θαλάσσιων ανεμογεννητριών

1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μια συνεχώς αυξανόμενη ανάπτυξη και εκμετάλλευση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) λόγω του αυξανόμενου κόστους των συμβατικών μορφών ενέργειας αλλά και της ρύπανσης του περιβάλλοντος που αυτές προκαλούν.

Μια από τις πλέον αναπτυσσόμενες, καθαρές και ήπιες μορφές ενέργειας είναι η αιολική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί από τα πανάρχαια χρόνια μέχρι σήμερα για διάφορους σκοπούς όπως την άλεση σιτηρών και την άντληση υδάτων. Μια σχετικά πρόσφατη αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, αποτελεί η μετατροπή της κινητικής ενέργειας που προκαλεί η κίνηση του δρομέα της ανεμογεννήτριας λόγω της ροής του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Από τις πρώτες ανεμομηχανές των μερικών kW η τεχνολογία έχει προχωρήσει στη κατασκευή ανεμοκινητήρων μερικών MW και αναμένεται στα επόμενα χρόνια η ισχύς να αυξηθεί περαιτέρω.

Η ισχύς του ρέοντος ανέμου που μπορεί να δεσμευτεί από την κίνηση του δρομέα της ανεμογεννήτριας δίνεται από τη σχέση :

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3 \quad (1.1)$$

όπου

- C_p είναι ο συντελεστής ισχύος (η μέγιστη τιμή του είναι 0.593 και καλείται όριο του Betz)
- ρ είναι η πυκνότητα του αέρα
- R είναι η ακτίνα των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας
- U είναι η ταχύτητα του ανέμου

Από την εξίσωση (1.1), είναι φανερό ότι η ισχύς της ανεμογεννήτριας εξαρτάται σημαντικά από δύο παράγοντες :

- από την ακτίνα των πτερυγίων R
- από την ταχύτητα του ανέμου U

1.2 Ιστορική εξέλιξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων

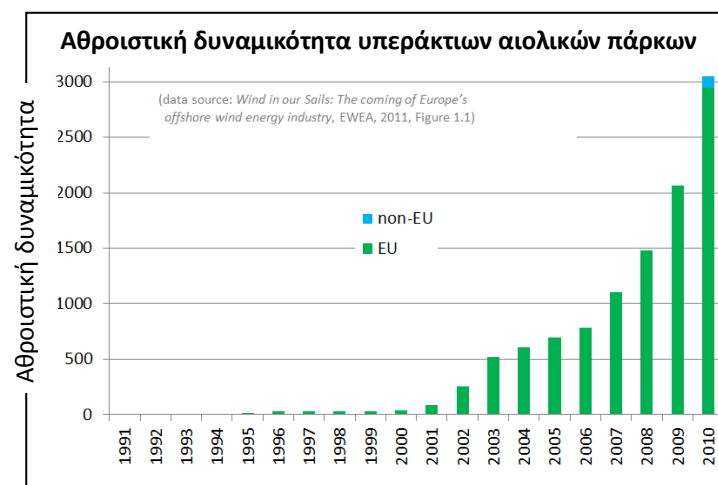
Η Ευρώπη είναι πρωτοπόρος στην εκμετάλλευση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, με την εγκατάσταση του πρώτου υπεράκτιου αιολικού πάρκου στη Δανία το 1991. Το 2008 η υπεράκτια αιολική ενέργεια συνέβαλε 0.8 γιγαβάτ (GW) στο σύνολο των 28 GW της αιολικής ενέργειας των αιολικών πάρκων που κατασκευάστηκαν εκείνη τη χρονιά. Μέχρι τον Οκτώβριο του 2009, 26 υπεράκτια αιολικά πάρκα είχαν κατασκευαστεί στην Ευρώπη με ένα μέσο όρο δυναμικότητας 76 MW. Από το 2010 το Ηνωμένο Βασίλειο έχει τη μεγαλύτερη δυναμικότητα στα υπεράκτια αιολικά πάρκα με 1.3 GW. Ακολουθεί η Δανία (854 MW), η Ολλανδία (249 MW), το Βέλγιο (195 MW), η Σουηδία (164 MW), η Γερμανία (92 MW), η Φινλανδία (26 MW), η Ιρλανδία (25 MW) και η Νορβηγία (2.3 MW) [1.1].

Στο τέλος του 2011, υπήρχαν 53 ευρωπαϊκά υπεράκτια αιολικά πάρκα στα ανοιχτά του Βελγίου, της Δανίας, της Φινλανδίας, της Γερμανίας, της Ιρλανδίας, της Ολλανδίας, της Νορβηγίας, της Σουηδίας και του Ηνωμένου Βασιλείου με συνολική δυναμικότητα 3.813 MW ενώ 5.603 MW είναι υπό κατασκευή. Υπεράκτια αιολικά πάρκα συνολικής δυναμικότητας 100GW έχουν προταθεί ή είναι υπό κατασκευή στην Ευρώπη. Η Ένωση Ευρωπαϊκής Αιολικής Ενέργειας θεωρεί ότι θα έχουν εγκατασταθεί 40 GW μέχρι το τέλος του 2020 και 150 GW μέχρι το τέλος του 2030 [1.1].

Από τον Ιούλιο του 2013, το "London Array" στο Ηνωμένο Βασίλειο είναι το μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο κόσμο με 175 θαλάσσιες ανεμογεννήτριες, συνολικής ισχύς 630 MW. Ακολουθείται από το "Greater Gabbard" (504 MW) και το "Wanley Wind Farm" (367 MW) [1.1].

Υπάρχουν πολλά μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα υπό κατασκευή και σε αυτά περιλαμβάνονται το "Anholt Offshore Wind Farm (400 MW)", το "BARD Offshore 1 (400 MW)", το "Lincs Wind Farm (270 MW)", το "Sheringham Shoal (317 MW)" [11.].

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 1.1) απεικονίζεται η ετήσια αύξηση της συνολικής δυναμικότητας των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στον κόσμο:



Σχήμα 1.1 – Αθροιστική δυναμικότητα υπεράκτιων αιολικών πάρκων ανά χρόνο [1.2]

1.3 Τύποι ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου στις παρακάτω κατηγορίες :

- Οριζόντιου άξονα, στους οποίους ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου (Σχήμα 1.2 (α)).
- Οριζόντιου άξονα (cross-wind), στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης αλλά κάθετος στην κατεύθυνση της ροής του ανέμου.
- Κατακόρυφου άξονα, στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης και κάθετος στη ροή του ανέμου (Σχήμα 1.2 (β)).



Σχήμα 1.2 – Βασικοί τύποι ανεμογεννητριάς (α) Οριζόντιου άξονα [1.3] (β) κατακόρυφου άξονα [1.4]

1.3.1 Τυπικές μορφές ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

Οι παρακάτω παράγραφοι που αφορούν την επεξήγηση των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα έχουν ληφθεί από τη διδακτορική διατριβή του Χριστόφορου Δημόπουλου με θέμα: "Ενίσχυση οπών ανθρωποθυρίδων σε χαλύβδινα κελύφη πυλώνων ανεμογεννητριών - Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση" [1.5]

Ο περιστρεφόμενος μηχανισμός τέτοιων μηχανών, που καλείται δρομέας μπορεί να έχει από ένα πτερύγιο (μονόπτερος) μέχρι 3 ή και περισσότερα (πολύπτερος). Σε σχέση με τη θέση του δρομέα ως προς τον πυλώνα στήριξης και τη διεύθυνση του ανέμου, οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου μπορούν να έχουν το δρομέα μπροστά από τον πύργο (ανάντη) ή πίσω (κατάντη). Για τη μεγιστοποίηση δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου απαιτείται το επίπεδο του δρομέα του ανεμοκινητήρα να είναι κάθετο στη κατεύθυνση του ανέμου. Για το σκοπό αυτό στους μικρής ισχύος ανεμοκινητήρες με το δρομέα ανάντη του πύργου, υπάρχει συνήθως πτερύγιο που ευθυγραμμίζει τον άξονα του δρομέα στον άνεμο. Στους "μικρούς" ανεμοκινητήρες με το δρομέα κατάντη δεν

τοποθετείται πτερύγιο προσανατολισμού γιατί το κουβούκλιο που καλύπτει τα εξαρτήματα της διάταξης μετατροπής της ενέργειας του δρομέα έχει τέτοιο σχήμα, ώστε το ίδιο να αποτελεί πτερύγιο προσανατολισμού. Στους "μεγάλους" ανεμοκινητήρες εφαρμόζονται συστήματα αυτόματης ρύθμισης της σωστής θέσης του δρομέα ως προς τον άνεμο μέσω σερβομηχανισμού.

Ο δρομέας του ανεμοκινητήρα δεν πρέπει να ξεπερνάει κάποια μέγιστη γωνιακή ταχύτητα για λόγους προστασίας των πτερυγίων από μηχανικές καταπονήσεις που προέρχονται από φυγόκεντρες δυνάμεις. Για την προστασία έναντι υπερτάχυνσης έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αυτοματισμοί, όπως λειτουργία αεροπέδης στα ακροπτερύγια του δρομέα κλπ. Στην ανάγκη πέδησης του δρομέα είτε γιατί υπερταχύνθηκε ο δρομέας (π.χ. δεν λειτούργησε η αεροπέδη των ακροπτερυγίων) ή λόγω υπερβολικής ταχύτητας ανέμου ή μηδενικής ενεργειακής ζήτησης (π.χ. διακοπής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας), χρησιμοποιείται δισκόφρενο που ενεργεί είτε στον χαμηλόστροφο άξονα του δρομέα (πριν από το κιβώτιο ταχυτήτων) είτε στον υψηλόστροφο άξονα του δρομέα (μετά το κιβώτιο ταχυτήτων).

1.3.2 Τυπικές μορφές ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα

Οι παρακάτω παράγραφοι που αφορούν την επεξήγηση των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα έχουν ληφθεί από τη διδακτορική διατριβή του Χριστόφορου Δημόπουλου με θέμα: "Ενίσχυση οπών ανθρωποθυρίδων σε χαλύβδινα κελύφη πυλώνων ανεμογεννητριών - Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση" [1.5]

Οι ανεμοκινητήρες αυτού του τύπου είναι κατασκευαστικά απλούστεροι του ανεμοκινητήρα οριζόντιου άξονα γιατί δεν απαιτούν πτερύγιο ή σύστημα αυτοματισμού για τον προσανατολισμό του δρομέα στη διεύθυνση πνοής του ανέμου και επειδή το σύστημα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας του δρομέα σε άλλη μορφή ενέργειας βρίσκεται στο έδαφος, στη βάση του ανεμοκινητήρα. Συνεπώς τα έξοδα αυτοματισμού, συντήρησης ή επισκευής είναι σαφώς μικρότερα σε σύγκριση με τον ανεμοκινητήρα οριζόντιου άξονα. Οι βασικοί τύποι ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα είναι ο τύπος Savonius και ο τύπος Darrieus (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3 – Διάφοροι τύποι ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα (α) Savonius [1.6] (β) Darrieus [1.7] (γ) Συνδυασμός Savonius και Darrieus [1.8]

Οι ανεμοκινητήρες τύπου Savonious πρωτοεμφανίστηκαν το 1931 από τον Savonious και έχουν την χαρακτηριστική μορφή των σχημάτων 1.3 (α) και 1.3 (γ). Τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι ο χαμηλός συντελεστής ισχύος, ο μικρός λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου για βέλτιστο συντελεστή ισχύος (δηλ. μικρή ακραία περιφερειακή ταχύτητα), το περιορισμένο μέγεθος και η εξαιρετική απλότητα και οικονομικότητα της κατασκευής. Παρά τα μειονεκτήματα, το τελευταίο πλεονέκτημα σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν χρειάζεται σύστημα προσανατολισμού ως προς τον άνεμο, έχει δώσει ώθηση σε μια σειρά από έρευνες πάνω στο δρομέα Savonious για την εύρεση του καλύτερου συνδυασμού των διαφόρων παραμέτρων. Τέτοιες παράμετροι είναι ο λόγος ύψους προς διάμετρο, ο αριθμός των πτερυγίων, το σχήμα των πτερυγίων κλπ. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απλότητα κατασκευής του δρομέα Savonious φθάνει μέχρι το σημείο να μπορεί να κατασκευαστεί με ερασιτεχνικά μέσα, ακόμα και από βαρέλια πετρελαίου, έχει λοιπόν άμεσες δυνατότητες εφαρμογής για οικιακή χρήση ή για χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές (π.χ. άντληση νερού από πηγάδια).

Ο ανεμοκινητήρας τύπου Darrieus (Σχήμα 1.3 (β)) επινοήθηκε από το Γάλλο Darrieus γύρω στα 1920 και έτυχε εκτεταμένης ανάπτυξης και εφαρμογής στον Καναδά, κυρίως στη δεκαετία του 1970, οπότε και έγινε ευρύτερα γνωστός. Ο ανεμοκινητήρας Darrieus είναι μηχανή που χαρακτηρίζεται από καμπυλωτά πτερύγια. Έχει σχετικά χαμηλή αρχική ροπή εκκίνησης (low starting torque) και ως εκ τούτου έχει το μειονέκτημα να μην ξεκινάει μόνος του όταν φυσάει ο άνεμος. Συνδυασμός όμως του ανεμοκινητήρα Darrieus και ενός μικρού Savonious επιλύει αυτό το πρόβλημα (Σχήμα 1.3 (γ)). Ο άξονας περιστροφής του δρομέα αποτελεί συνήθως και τον πύργο στήριξης της αιολικής μηχανής. Συνηθέστερα ο πύργος αυτός προσδένεται και με συρματόσχοινα, ενώ υπάρχουν και πύργοι αυτοστηριζόμενοι. Τα λοιπά υποσυστήματα του ανεμοκινητήρα κατακόρυφου άξονα, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, το σύστημα πέδησης αξόνων, η γεννήτρια κλπ δεν διαφέρουν ως προς το σκεπτικό επιλογής τους από τα υποσυστήματα του ανεμοκινητήρα οριζόντιου άξονα.

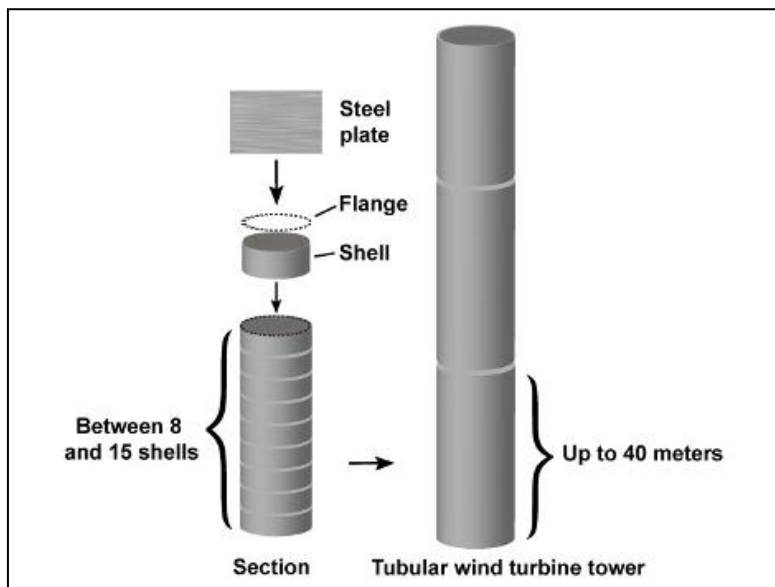
1.4 Πυλώνες ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

Οι παρακάτω παράγραφοι που αφορούν την επεξήγηση των πυλώνων των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα έχουν ληφθεί από τη διδακτορική διατριβή του Χριστόφορου Δημόπουλου με θέμα: "Ενίσχυση οπών ανθρωποθυρίδων σε χαλύβδινα κελύφη πυλώνων ανεμογεννητριών - Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση" [1.5]

Η σύγχρονη τάση είναι η κατασκευή υψηλών πυλώνων ώστε να γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού μιας και, ως γνωστόν, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος. Ειδικά στη περίπτωση των συστημάτων ξηράς (onshore wind turbines), η μεγαλύτερη τραχύτητα που παρουσιάζει το έδαφος οδηγεί σε μικρότερο ρυθμό αύξησης της ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος. Αυτό συνεπάγεται ότι στη ξηρά θα υπάρχει καλύτερη απόδοση των ανεμογεννητριών εφόσον τοποθετηθούν σε μεγαλύτερο ύψος.

Τα δύο βασικά υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι πυλώνες είναι ο χάλυβας και το σκυρόδεμα. Οι τύποι των πυλώνων που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα περιλαμβάνουν δικτυωτούς μεταλλικούς πυλώνες, σωληνωτούς πυλώνες από χάλυβα χωρίς ή με καλώδια και πυλώνες από σκυρόδεμα. Ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα που παρατηρούνται κατά την ανέγερση των τελευταίας γενιάς ανεμογεννητριών με πολλά megawatt, αποτελεί η μεταφορά και ανέγερση τους. Για πυλώνες με ύψος μεγαλύτερο των 100m απαιτούνται διάμετροι στη βάση του πυλώνα που ξεπερνούν τα 5m. Αυτό κάνει αδύνατη τη μεταφορά των προκατασκευασμένων τμημάτων μέσω των οδικών αξόνων.

Σήμερα ο σωληνωτός πυλώνας από χάλυβα είναι ο κατεξοχήν χρησιμοποιούμενος τύπος πυλώνα για τις εγκαταστάσεις εμπορικών ανεμογεννητριών, κυρίως λόγω του μικρού χρόνου που απαιτείται για την ανέγερσή του. Πυλώνες μικρού ύψους μπορούν να κατασκευαστούν από βιομηχανίες και να κοχλιωθούν στη θεμελίωση στο χώρο ανέγερσης. Οι υψηλότεροι πυλώνες (π.χ. με ύψος 100m) κατασκευάζονται από την κοχλιωτή σύνδεση ενός αριθμού από προκατασκευασμένα τμήματα αποφεύγοντας με αυτό τον τρόπο τις συγκολλήσεις στο χώρο της ανέγερσης. Οι σωληνωτοί πυλώνες οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις μεγάλες ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως κυλινδρικό ή κολουροκωνικό σχήμα.



Σχήμα 1.4 – Μέθοδος συναρμολόγησης του πυλώνα της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας [1.9]

Αποτελούνται από έναν αριθμό προκατασκευασμένων τμημάτων, τυπικά δύο με τέσσερα, με μήκος που μπορεί να φτάσει τα 40m το καθένα ανάλογα με τις δυνατότητες μεταφοράς και ανέγερσης. Το πάχος των ελασμάτων από τα οποία φτιάχνονται αυτά τα τμήματα κυμαίνεται από 12 μέχρι 75mm (όσο πιο μεγάλη είναι η διάμετρος τόσο πιο λεπτό είναι το έλασμα). Κάθε προκατασκευασμένο τμήμα αποτελείται από έναν αριθμό ελασμάτων, τυπικά οχτώ με δεκαπέντε ελάσματα, συνήθως πλάτους 2m τα οποία καμπυλώνονται στην τελική κυλινδρική μορφή τους σε ειδικά μηχανήματα. Ακολουθώντας, τα δύο άκρα κάθε ενός από τα καμπυλωμένα αυτά ελάσματα συγκολλούνται μεταξύ τους με μια διαμήκη ραφή ενώ τα επιμέρους καμπυλωμένα ελάσματα συγκολλούνται μεταξύ τους με περιφερειακές

ραφές με μεγάλη προσοχή, ενώ πραγματοποιούνται ενδεδειγμένοι έλεγχοι για να διακριβωθεί η ποιότητα των συγκολλήσεων. Οι έλεγχοι αυτοί περιλαμβάνουν υπερήχους, ακτίνες Χ και οπτικούς ελέγχους της επιφάνειας για τυχόν ρωγμές. Σε κάθε ένα από τα δύο άκρα του κάθε προκατασκευασμένου τμήματος συγκολλάται ένας εσωτερικός δακτύλιος. Η σύνδεση μεταξύ των επιμέρους προκατασκευασμένων τμημάτων γίνεται μέσω προεντεταμένων κοχλιών. Η χρήση προεντεταμένων κοχλιών είναι αναγκαία ώστε να αυξηθεί η αντοχή τους έναντι του φαινομένου της κόπωσης που προκύπτει από τη δυναμική φύση των ανεμοπιέσεων και τη συνεπαγόμενη κυκλική φόρτιση που οι κοχλίες υφίστανται. Ειδικότερα, για το κατώτερο τμήμα του πυλώνα, αυτό συνδέεται κοχλιωτά σε μια ειδική κατασκευή (φορέα στήριξης) η οποία κατασκευάζεται ξεχωριστά. Στη κορυφή, ο θάλαμος της ανεμογεννήτριας συνδέεται με τον πυλώνα μέσω του αζιμούθιου δακτυλίου. Το τελευταίο στάδιο της κατασκευής των προκατασκευασμένων τμημάτων είναι η διαμόρφωση της εξωτερικής τους επιφάνειας ώστε να είναι ανθεκτικά στη διάβρωση που προκαλείται σε αυτές από παράγοντες του περιβάλλοντος με την πάροδο του χρόνου. Μετά την αμμοβολή, η εξωτερική επιφάνεια των τμημάτων επενδύεται με θερμικώς επενδύμενο ψευδάργυρο ενώ βάφεται με δυο κατ' ελάχιστο και τρεις το πολύ στρώσεις.

1.5 Ανάγκη μετάβασης στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Η παγκόσμια απαίτηση για αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς λόγω της αύξησης των τιμών του πετρελαίου αλλά και της σταδιακής εξάντλησης των πετρελαϊκών πόρων. Η αιολική ενέργεια εμφανίζεται σαν μια καθαρή και φθηνή λύση για να εξυπηρετήσει ένα μεγάλο μέρος των ενεργειακών απαιτήσεων. Καθώς η έλλειψη χώρου γίνεται όλο και πιο φανερό για την εγκατάσταση χερσαίων ανεμογεννητριών, η εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων φαίνεται να αποτελεί μια καλή εναλλακτική λύση λόγω του τεράστιου δυναμικού που συνδέεται με τις παραθαλάσσιες περιοχές. Οι βέλτιστες λύσεις για την αξιοποίηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας διαφέρουν από τις αντίστοιχες χερσαίες επιλογές. Κύρια προϋπόθεση αποτελεί η υιοθέτηση επιτυχημένων λύσεων επιλογών σχεδίασης, οι οποίες θα οδηγήσουν σε μια σημαντική μείωση του κόστους, καθιστώντας έτσι αυτή τη μορφή ενέργειας πιο ανταγωνιστική και την ανάπτυξή της πιο σημαντική στα επόμενα χρόνια. Ως εκ τούτου, αναμένεται να είναι το επόμενο μεγάλο βήμα στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας.

1.6 Πλεονεκτήματα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα από την αξιοποίηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας σε σύγκριση με την αντίστοιχη χερσαία. Οι ισχυρότεροι άνεμοι που πνέουν στις υπεράκτιες περιοχές συμβάλλουν σε μια μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας που μπορεί να αντισταθμίσει πλήρως το υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Η εγκατάσταση

ανεμογεννητριών μακριά από την ακτή μπορεί να εξαλείψει σχεδόν ζητήματα οπτικής, αισθητικής και υψηλού θορύβου. Αυτό καθιστά δυνατή την χρήση διαφορετικών σχεδίων για τις ανεμογεννήτριες, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητά τους. Επίσης οι διαθέσιμες εκτάσεις για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων αυξάνουν σημαντικά. Καθώς η μεταφορά και η συναρμολόγηση γίνονται στη θάλασσα, ουσιαστικά δεν υπάρχει όριο στο μέγεθος των ανεμογεννητριών που μπορούν να εγκατασταθούν, σε αντίθεση με τους περιορισμούς που επιβάλλει η διέλευση μέσα από τους δρόμους στην περίπτωση των χερσαίων ανεμογεννητριών. Επίσης, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα μπορούν να εγκατασταθούν κοντά σε αστικά κέντρα, απαιτώντας έτσι μικρότερες γραμμές για τη μεταφορά αυτής της καθαρής ενέργειας σε περιοχές με υψηλή ενεργειακή ζήτηση.

1.7 Μειονεκτήματα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας

Πολλές όμως είναι και προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν έτσι ώστε να κρίνεται συμφέρουσα η εκμετάλλευση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Η δημιουργία των πύργων, της θεμελίωσης αλλά και η απαίτηση υποβρύχιων καλωδίων απαιτούν μεγαλύτερες επενδύσεις σε σύγκριση με αυτές που απαιτούνται στη περίπτωση χερσαίων ανεμογεννητριών. Επίσης, η εγκατάσταση είναι πιο δύσκολη και δαπανηρή στη περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η εκμετάλλευση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι 1.5-2 φορές πιο ακριβή σε σύγκριση με την εκμετάλλευση της χερσαίας αιολικής ενέργειας. Ακόμη, ο ανταγωνισμός με άλλους χρήστες της θαλάσσιας περιοχής θέτει δυσκολίες στην υλοποίηση του έργου. Η πρόσβαση επίσης στις υπεράκτιες τοποθεσίες για συντήρηση και επισκευή είναι μια σημαντική παράμετρος που θα πρέπει να εξεταστεί. Απλά προβλήματα που θα μπορούσαν να επισκευαστούν αμέσως και με χαμηλό κόστος στη περίπτωση των χερσαίων ανεμογεννητριών, θα αποτελούν τώρα μια χρονοβόρα διαδικασία που θα καθορίζεται και από τις απρόβλεπτες καιρικές συνθήκες. Η εκτέλεση των επισκευών είναι κατ' εκτίμηση 5-10 φορές πιο ακριβή στη περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε σύγκριση με τις αντίστοιχες χερσαίες κυρίως λόγω του μεγάλου κόστους χρήσης πλωτών γερανών αλλά και οι καθυστερήσεις μέχρι να παρουσιαστούν κατάλληλες καιρικές συνθήκες μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρές. Θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες που ισχύουν για τις υπεράκτιες περιοχές όπου δράσεις όπως τα κύματα, τα θαλάσσια ρεύματα, αλλά και η διάβρωση λόγω του αλμυρού νερού της θάλασσας θα επιβαρύνουν σημαντικά την κατασκευή.

1.8 Εισαγωγικές έννοιες υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες αποτελούν μια εξέλιξη των ανεμογεννητριών της στεριάς, των οποίων η κατασκευή είναι αρκετά διαδεδομένη με αποτέλεσμα να αποτελούν μια από

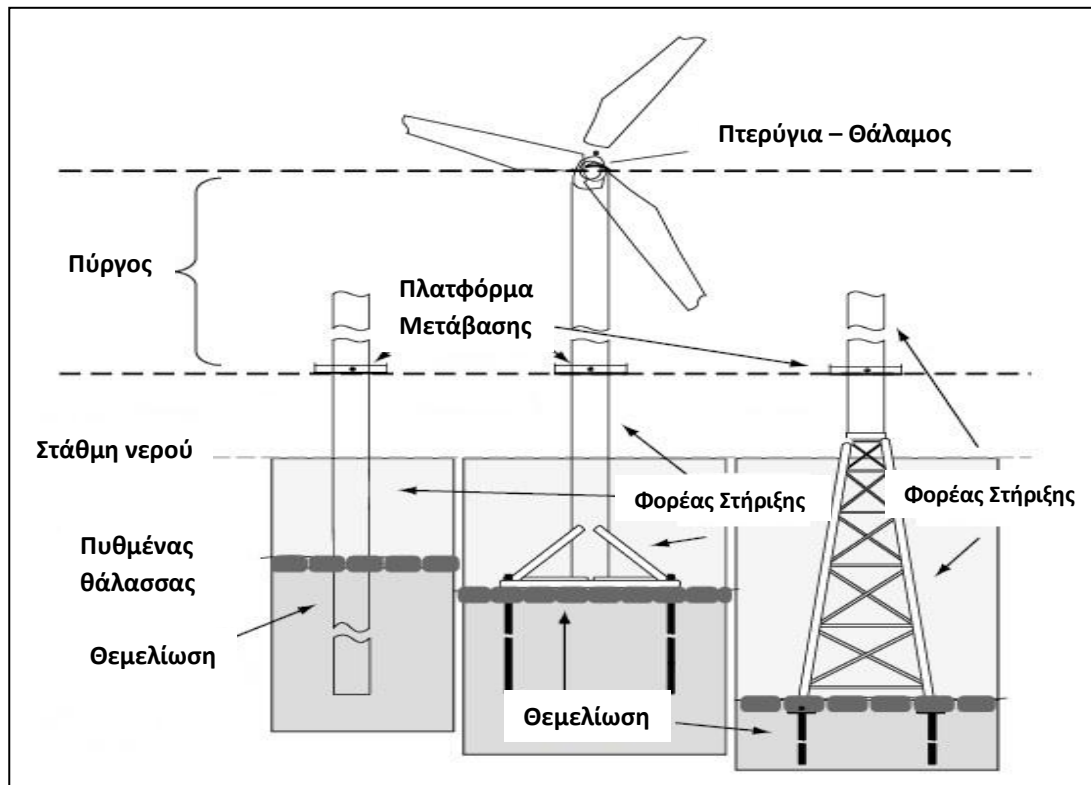
τις κύριες μορφές παροχής ανανεώσιμης ενέργειας. Προκειμένου να καταστεί η αιολική ενέργεια που παράγεται περισσότερο ανταγωνιστική σε σχέση με τις υπόλοιπες συμβατικές, εξαντλήσιμες και υψηλών περιβαλλοντικών επιπτώσεων πηγών ενέργειας η προσοχή έχει στραφεί προς την εκμετάλλευση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.

Εκτός του ότι χαρακτηρίζονται από μειωμένο οπτικό αντίκτυπο, δεδομένου ότι βρίσκονται μακριά από την ακτή, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες μπορούν να επωφεληθούν από τον πιο ισχυρό και πιο σταθερό αέρα που πνέει στις υπεράκτιες περιοχές, κάτι που μπορεί να αυξήσει την παραγωγικότητά τους και να τις καταστήσει περισσότερο αποδοτικές σε σχέση με άλλες πηγές ενέργειας.

Από μια γενική άποψη, μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια αποτελείται τόσο από μηχανικά όσο και από δομικά στοιχεία. Ωστόσο, δεν είναι μια συνηθισμένη κατασκευή πολιτικού μηχανικού. Συμπεριφέρεται διαφορετικά, ανάλογα με τις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας της (αδρανής, σε κατάσταση παραγωγής ενέργειας κ.α), και υποβάλλεται σε μεταβλητά φορτία (φορτία ανέμου, φορτία κυμάτων, φορτία θαλάσσιων ρευμάτων). Κατά την διαδικασία σχεδιασμού, έχουν υιοθετηθεί διάφορα είδη διαμόρφωσης του φορέα στήριξης και της θεμελίωσης μιας ανεμογεννήτριας (Σχήμα 1.5), κυρίως ανάλογα με το βάθος της κατασκευής το οποίο καθορίζει το μέγεθος των υδροδυναμικών φορτίων που ασκούνται στη κατασκευή.

Επιπλέον, δεδομένου ότι η δομική συμπεριφορά μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι μη-γραμμική και επηρεάζεται από αβεβαιότητες και αλληλεπιδράσεις, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες μπορούν να χαρακτηριστούν ως σύνθετα δομικά συστήματα.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις καταδεικνύουν ότι μια σύγχρονη προσέγγιση για τη μελέτη των υπεράκτιων ανεμογεννητριών θα πρέπει να εξελιχθεί από την ιδέα της “κατασκευής” στην οποία ασκούνται μια σειρά από φορτία, σε εκείνη του “δομικού συστήματος” το οποίο περιλαμβάνει αλληλένδετες συνιστώσες οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.



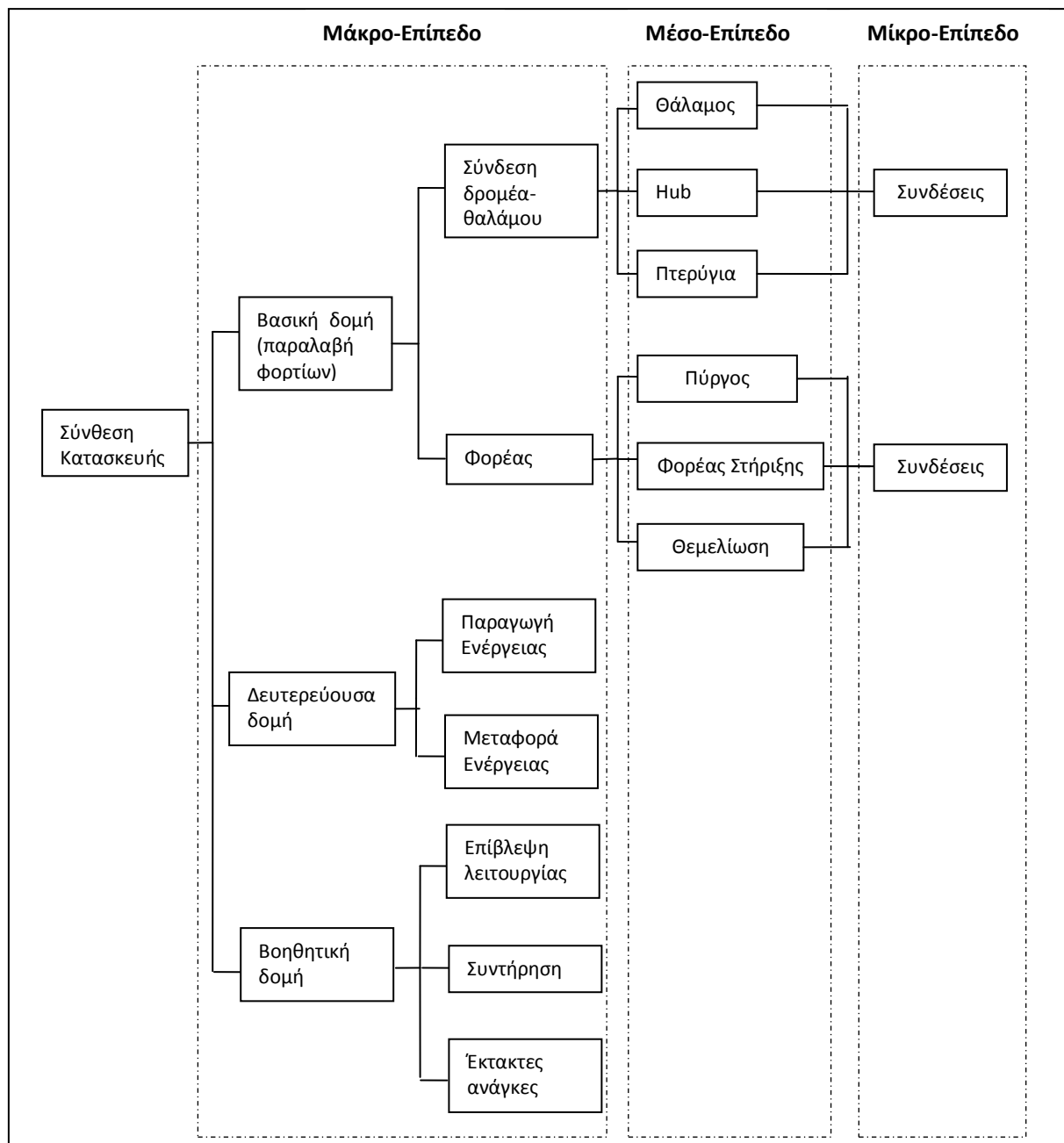
Σχήμα 1.5 – Είδη φορέων στήριξης και θεμελίωσης θαλάσσιων ανεμογεννητριών [1.10]

1.9 Σύνθεση της κατασκευής

Λαμβάνοντας υπόψη τα δομικά τμήματα του συνόλου της κατασκευής, αυτή μπορεί να χωριστεί σε τρία επίπεδα (Σχήμα 1.6):

1. Μακροσκοπικό (μάκρο-επίπεδο) το οποίο σχετίζεται με γεωμετρικές διαστάσεις ανάλογες με αυτές του συνόλου της κατασκευής ή με ένα γενικό ρόλο στη δομική συμπεριφορά της κατασκευής. Τα μέρη που ανήκουν σε αυτό το επίπεδο ονομάζονται μακρο-στοιχεία και είναι τα εξής:
 - Η βασική δομή η οποία πρέπει να παραλάβει τα φορτία που ασκούνται στο φορέα
 - Η δευτερεύουσα δομή η οποία σχετίζεται με το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας και συνδέεται με το δομικό κομμάτι
 - Η βοηθητική δομή που έχει να κάνει με λειτουργίες που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής όπως επίβλεψη της λειτουργίας, συντήρηση και καταστάσεις έκτακτης ανάγκης
2. Μεσοσκοπικό (μέσο-επίπεδο) όπου οι διαστάσεις των τμημάτων που ανήκουν σε αυτό εξακολουθούν να είναι συγκρίσιμες με τη συνολική κατασκευή αλλά συνδέονται με ένα συγκεκριμένο ρόλο στα στοιχεία του μακρο-επιπέδου. Τα μέρη που ανήκουν σε αυτό το επίπεδο ονομάζονται μέσο-στοιχεία. Συγκεκριμένα ο φορέας της κατασκευής περιλαμβάνει τα ακόλουθα τμήματα :

- Τη θεμελίωση: δηλαδή το μέρος της κατασκευής που μεταφέρει τα φορτία που ασκούνται στη κατασκευή στο βυθό της θάλασσας
 - Το φορέα στήριξης: δηλαδή το μέρος που εκτείνεται πάνω από το βυθό της θάλασσας και συνδέει τη θεμελίωση με τον πύργο
 - Τον πύργο: δηλαδή το τμήμα που συνδέει το φορέα στήριξης με τον δρομέα
3. Μικροσκοπικό (μίκρο-επίπεδο) όπου σχετίζεται με μικρότερες γεωμετρικές διαστάσεις και περιλαμβάνει τις συνδέσεις των διάφορων τμημάτων της κατασκευής αλλά και στοιχεία με συγκεκριμένο δομικό ρόλο.



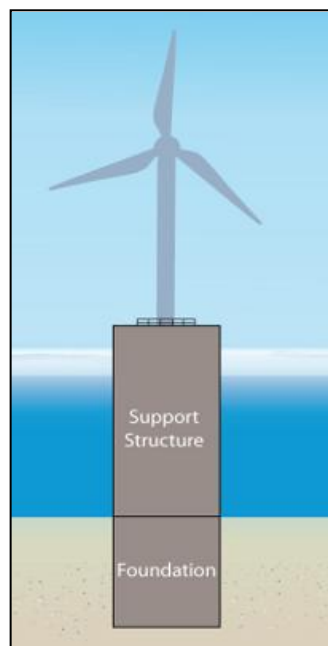
Σχήμα 1.6 – Επίπεδα διαχωρισμού της κατασκευής [1.10]

1.10 Είδη φορέων στήριξης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας

Ένα σημαντικό θέμα όσον αφορά τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι η κατάλληλη επιλογή του φορέα στήριξης και του είδους της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας που σχετίζονται κυρίως με το βάθος της θάλασσας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους αλλά και με οικονομικά θέματα. Η συνολική κατασκευή στήριξης του δρομέα της ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει :

- Τον πύργο της ανεμογεννήτριας (tower)
- Τον φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας (support structure)
- Τη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας (foundation)

Η θεμελίωση είναι το τμήμα της κατασκευής που βρίσκεται μέσα στο έδαφος ή το μέρος της κατασκευής που διατηρεί το φορέα στήριξης σταθερό στη θέση του στο πυθμένα της θάλασσας (Σχήμα 1.7). Η κατασκευή πάνω από τον πυθμένα ονομάζεται φορέας στήριξης και περιλαμβάνει και το κομμάτι μετάβασης.



Σχήμα 1.7 – Διαχωρισμός μεταξύ της θεμελίωσης και της δομής στήριξης της ανεμογεννήτριας [1.11]

Τα κυριότερα είδη των φορέων στήριξης που θεμελιώνονται στο έδαφος είναι τα εξής:

- Φορέας στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου
- Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου
- Φορέας στήριξης μορφής δικτυώματος

Τα κυριότερα είδη θεμελιώσεων είναι τα εξής:

- Θεμελίωση μέσω εμπηγνυόμενων πασσάλων
- Θεμελίωση μέσω θεμελίων βαρύτητας
- Θεμελίωση μέσω φρεατίων αναρρόφησης

Αν το βάθος της θάλασσας θεωρείται η βασική παράμετρος επιλογής της δομής υποστήριξης (η οποία περιλαμβάνει τη θεμελίωση και το φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας) της ανεμογεννήτριας μια γενική κατά προσέγγιση κατάταξη μπορεί να είναι η εξής :

- Φορέας στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου (monopile) που θεμελιώνεται στο πυθμένα της θάλασσας μέσω εμπηγνυόμενου πασσάλου, θεμελίων βαρύτητας και φρεατίων αναρρόφησης για βάθη έως 30m
- Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου (tripod) και μορφής δικτυώματος (jacket) που θεμελιώνονται στο πυθμένα της θάλασσας μέσω εμπηγνυόμενων πασσάλων για βάθη από 20m έως 50m
- Πλωτήρες και πλατφόρμες που συνδέονται με το πυθμένα της θάλασσας μέσω καλωδίων για βάθη μεγαλύτερα από 50m

1.10.1 Φορέας στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου

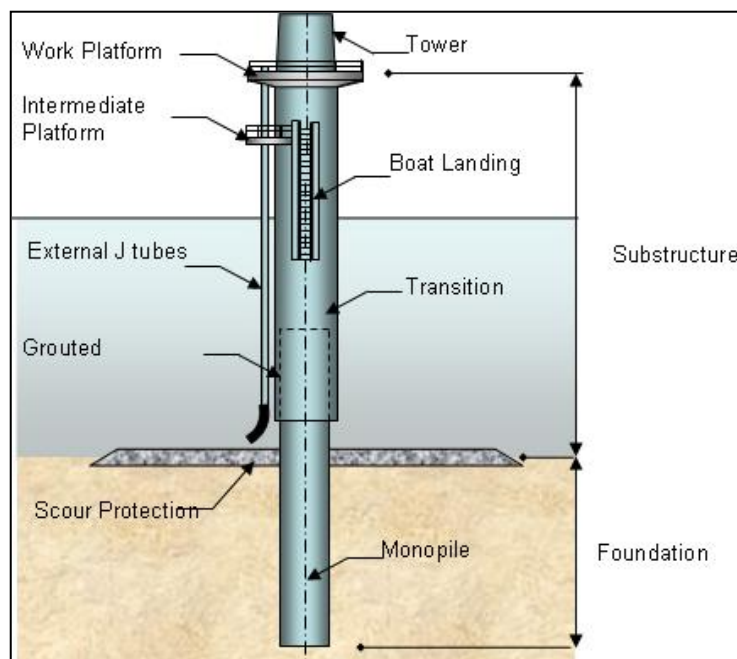
Η περίπτωση όπου σαν φορέας στήριξης και θεμελίωσης επιλέγεται ένας κυλινδρικός πάσσαλος (Σχήμα 1.8) είναι η συνηθέστερη όσο αφορά τις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες. Οι κυριότεροι λόγοι είναι οι εξής:

- Η απλότητα στο σχεδιασμό και στη κατασκευή (είναι ένας μακρύς σωλήνας ο οποίος καθιστά τους υπολογισμούς και την παραγωγή του εύκολη)
- Το σχήμα του καθιστά τη μεταφορά στη περιοχή εγκατάστασης σχετικά εύκολη
- Η τεχνική εγκατάστασης είναι γνωστή και ευρέως διαδεδομένη στις εταιρείες παραγωγής θαλάσσιων ανεμογεννητριών

Ωστόσο η απλότητα του σχήματος καθιστά αναγκαία μια μεγάλη διάμετρο πασσάλου η οποία κυμαίνεται από 3,5 έως 6,0m και πάχος τοιχωμάτων μέχρι 150mm με αποτέλεσμα στη κατασκευή να ασκούνται μεγάλα υδροδυναμικά φορτία. Η πίεση του νερού ωθεί το κυλινδρικό πάσσαλο και επηρεάζει τη κατασκευή πολύ περισσότερο από τη περίπτωση που ο φορέας στήριξης ήταν μορφής τριπόδου ο οποίος θα ήταν κατασκευασμένος από σωλήνες μικρότερης διαμέτρου. Η περίπτωση όπου σαν φορέας στήριξης και θεμελίωσης επιλέγεται ένας κυλινδρικός πάσσαλος ενδείκνυται για βάθη έως 30m αφού καθώς το βάθος του πυθμένα αυξάνεται απαιτούνται πιο δύσκαμπτες κατασκευές (μεγαλύτερη διάμετρος και πάχος πασσάλου), που αντέχουν τα μεγάλα επιβαλλόμενα φορτία, με αποτέλεσμα το κόστος της κατασκευής να αυξάνει σημαντικά.

Η συγκεκριμένη περίπτωση είναι η μοναδική στην οποία ο πάσσαλος αποτελεί ταυτόχρονα τη θεμελίωση και το φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας. Ο κυλινδρικός πάσσαλος εμπηγνύεται στο έδαφος με δόνηση ή με υδραυλικό σφυρί με βάθος έμπηξης παρόμοιο με το βάθος του πυθμένα της θάλασσας. Για την θεμελίωση του πασσάλου στο έδαφος δεν

απαιτείται προετοιμασία του πυθμένα της θάλασσας, απαιτείται όμως προστασία από την περιμετρική απομάκρυνση της άμμου και αποκάλυψη του πασσάλου. Η θεμελίωση της κατασκευής μέσω κυλινδρικού πασσάλου επιλέγεται στη περίπτωση που το έδαφος περιέχει λίγους ογκόλιθους αφού αυτοί δυσκολεύουν την έμπηξη του πασσάλου. Τα σκληρά εδάφη απαιτούν τη διάτρηση του βυθού και σκυροδέτηση μετά την έμπηξη. Στη κορυφή του πασσάλου τοποθετείται ένα κομμάτι μετάβασης (transition piece) το οποίο ουσιαστικά εξασφαλίζει τη σύνδεση μεταξύ του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας. Το κομμάτι μετάβασης είναι επίσης ένας σωλήνας ο οποίος έχει μια ελαφρώς μεγαλύτερη διάμετρο έτσι ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί πάνω από τον κυλινδρικό πάσσαλο. Στη κορυφή του κομματιού μετάβασης υπάρχει μια φλάντζα η οποία εξασφαλίζει τη σύνδεση με τον πύργο μέσω κοχλιών. Το ύψος του κομματιού μετάβασης είναι περίπου 25m. Η μεταφορά του πασσάλου, του κομματιού μετάβασης και του πύργου της ανεμογεννήτριας στη περιοχή εγκατάστασης γίνεται μέσω πλωτών γερανών.



Σχήμα 1.8 – Φορέας στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου [1.12]

Η ύπαρξη του κομματιού μετάβασης (Σχήμα 1.9) είναι απαραίτητη εξαιτίας της μεθόδου που χρησιμοποιείται για την έμπηξη του κυλινδρικού πασσάλου (Σχήμα 1.9) μέσα στο έδαφος. Η έμπηξη του πασσάλου με δόννηση ή με υδραυλικό σφυρί δεν επιτρέπει την ύπαρξη μιας φλάντζας στη κορυφή του έτσι ώστε να τοποθετηθεί πάνω σε αυτή ο πύργος της ανεμογεννήτριας πολύ απλά γιατί αυτή θα καταστρεφόταν κατά τη διαδικασία έμπηξης. Επίσης η μέθοδος έμπηξης δεν εγγυάται την απαιτούμενη πολύ μικρή απόκλιση του πασσάλου από την κατακόρυφο (κλίση μικρότερη από 0,5°) καθώς είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί κάτι τέτοιο κατά την έμπηξη του πασσάλου στο έδαφος. Γενικά ο σκοπός του κομματιού μετάβασης είναι η παροχή μιας τέλει φλάντζας στη κορυφή για να είναι εφικτή η σύνδεση με τον πύργο της ανεμογεννήτριας και να εξοπλίσει τη κατασκευή με αποβάθρα, σκάλες και μια εξέδρα εργασίας. Από την άλλη μεριά το κομμάτι μετάβασης

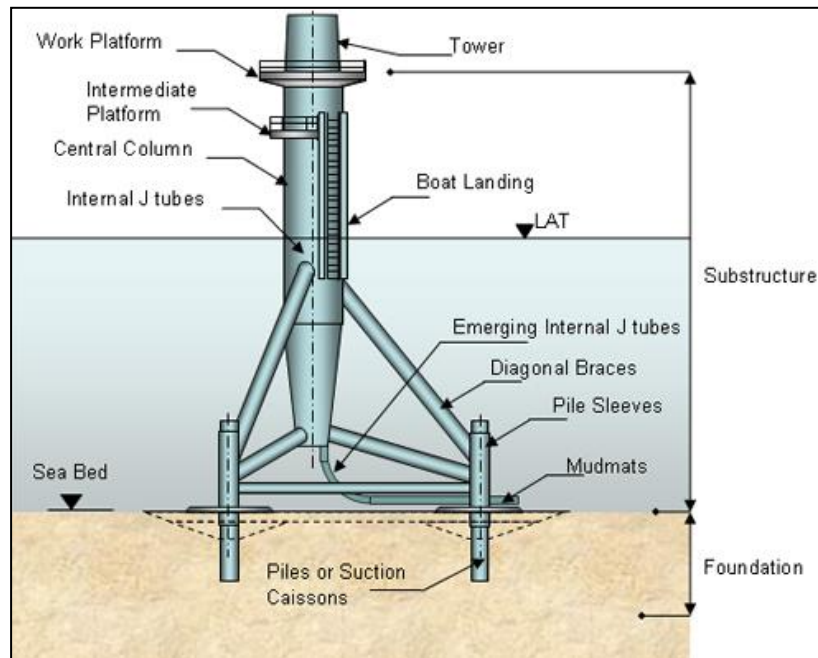
αποτελεί την κύρια αδυναμία της κατασκευής αφού συνδέεται με τον κυλινδρικό πάσσαλο μέσω τσιμέντου ή κάποιων ειδικών ενεμάτων. Απαιτείται μια πολύ ισχυρή πλήρωση του κενού έτσι ώστε τα φορτία να μεταφέρονται από τον πύργο της ανεμογεννήτριας μέσω του κομματιού μετάβασης στο φορέα στήριξης της κατασκευής. Καθώς η κατασκευή δονείται κατά τη διάρκεια της ζωής της λόγω των δυναμικών φορτίων των κυμάτων και του ανέμου, τα ενέματα αρχίζουν να θρυμματίζονται με αποτέλεσμα να απαιτείτε η πλήρωση των κενών με νέα ενέματα.



Σχήμα 1.9 – Κομμάτια μετάβασης και εμπηγνυόμενοι κυλινδρικοί πάσσαλοι [1.13]

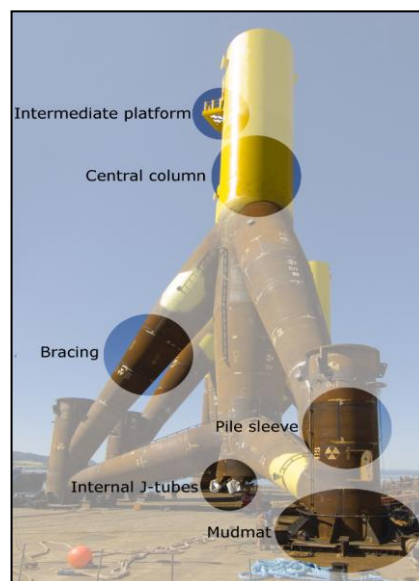
1.10.2 Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου

Ο φορέας στήριξης μορφής τριπόδου (Σχήμα 1.10) και (Σχήμα 1.11) χρησιμοποιείται σπάνια στη περίπτωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών. Η κατασκευή 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 τριπόδου 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.



Σχήμα 1.10 – Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου [1.14]

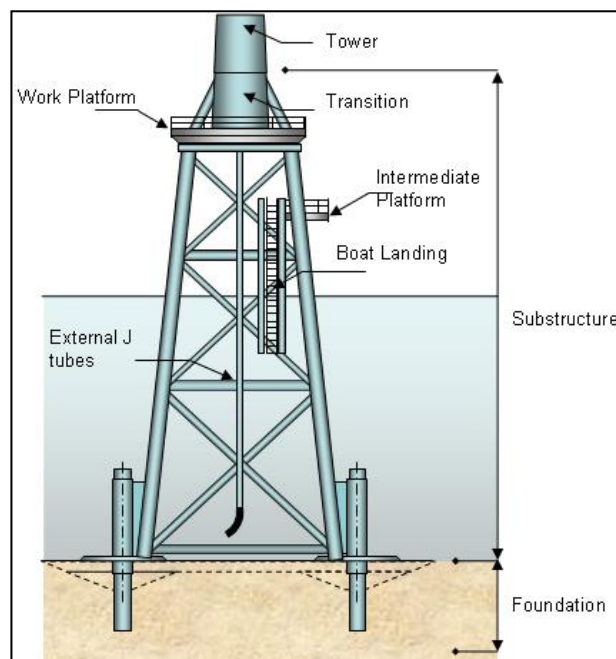
Η πίεση που ασκεί το νερό στη κατασκευή είναι μικρότερη από τη περίπτωση του μεμονωμένου πασσάλου λόγω των μικρότερων διαμέτρων των μελών του τριπόδου, ωστόσο λόγω των περισσότερων μελών τις κατασκευής αυξάνεται και η επιφάνεια προσβολής της από τα κύματα. Σε σύγκριση όμως με το φορέα στήριξης μορφής 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.



Σχήμα 1.11 – Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου [1.15]

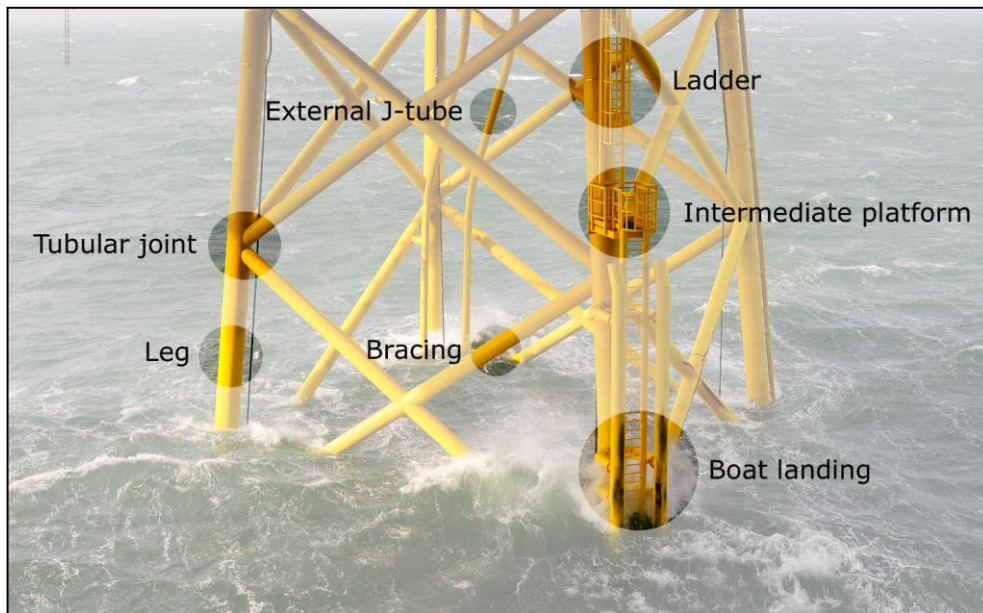
1.10.3 Φορέας στήριξης μορφής δικτυώματος

Για να καταστεί εφικτή η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε μεγαλύτερα βάθη, άρχισαν να ερευνώνται νέες μορφές φορέων στήριξης. Έτσι ο φορέας στήριξης μορφής δικτυώματος (Σχήμα 1.12) εισήλθε στο τομέα των θαλάσσιων ανεμογεννητριών αυξάνοντας τα όρια εγκατάστασης τους. Μέχρι το 2007 οι φορείς στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου και θεμελίωσης μέσω επιφανειακών θεμελίων εφαρμόζονταν για βάθη έως 20m. Με την είσοδο των δικτυωμάτων τα όρια εγκατάστασης αυξήθηκαν από τα 20m στα 50m. Ο φορέας στήριξης προσκολλάται στο πυθμένα της θάλασσας μέσω εμπηγνυόμενων πασσάλων οι οποίοι συνδέονται με το δικτύωμα με τη βοήθεια ειδικών στοιχείων σύνδεσης (pile sleeves). Η σύνδεση μεταξύ των εμπηγνυόμενων πασσάλων και των στοιχείων σύνδεσης γίνεται μέσω ειδικών ενεμάτων.



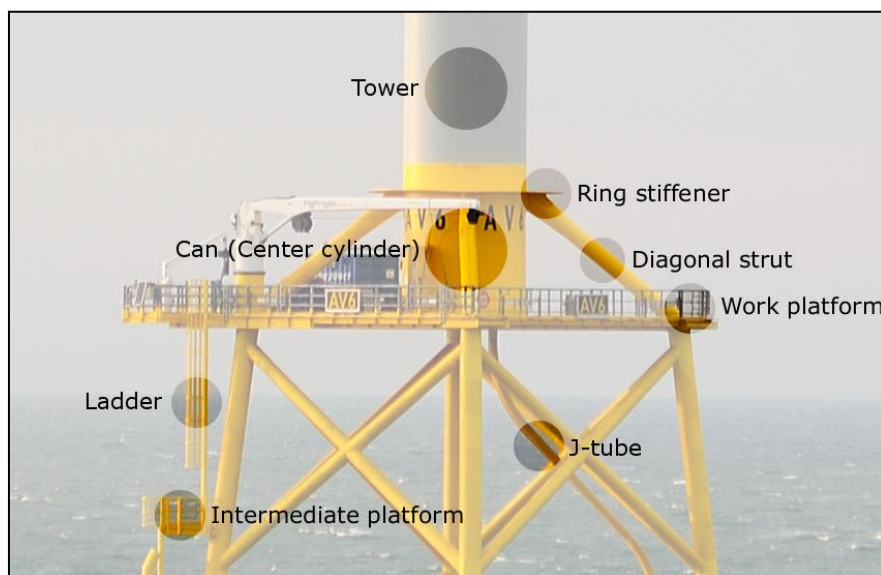
Σχήμα 1.12 – Φορέας στήριξης μορφής δικτυώματος [1.16]

Το δικτύωμα αποτελείται από τρία ή τέσσερα βασικά μέλη τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω διαγώνιων συνδέσμων (Σχήμα 1.13). Οι διατομές όλων των στοιχείων είναι κοίλες κυκλικές. Τα βασικά μέλη συνδέονται με τους διαγώνιους συνδέσμους μέσω συγκολλήσεων οι οποίες αποτελούν ένα κρίσιμο στοιχείο της κατασκευής μιας και είναι ευάλωτες σε καταπονήσεις λόγω κόπωσης. Η διάμετρος των κύριων μελών της κατασκευής μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 1,4m ενώ η διάμετρος των διαγώνιων μελών είναι μικρότερη από 1,0m.



Σχήμα 1.13 – Λεπτομέρεια του δικτύωματος της δομής στήριξης [1.17]

Όπως και στο φορέα στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου έτσι και στη περίπτωση του δικτύωματος απαιτείται ένα κομμάτι μετάβασης πάνω στο οποίο θα στηριχτεί ο πύργος της ανεμογεννήτριας (Σχήμα 1.14). Το κομμάτι μετάβασης αποτελείται από μια φαρδιά κορυφή με ύψος περίπου 9m ενώ περιλαμβάνει και μια πλατφόρμα εργασίας ακριβώς κάτω από τον πύργο.



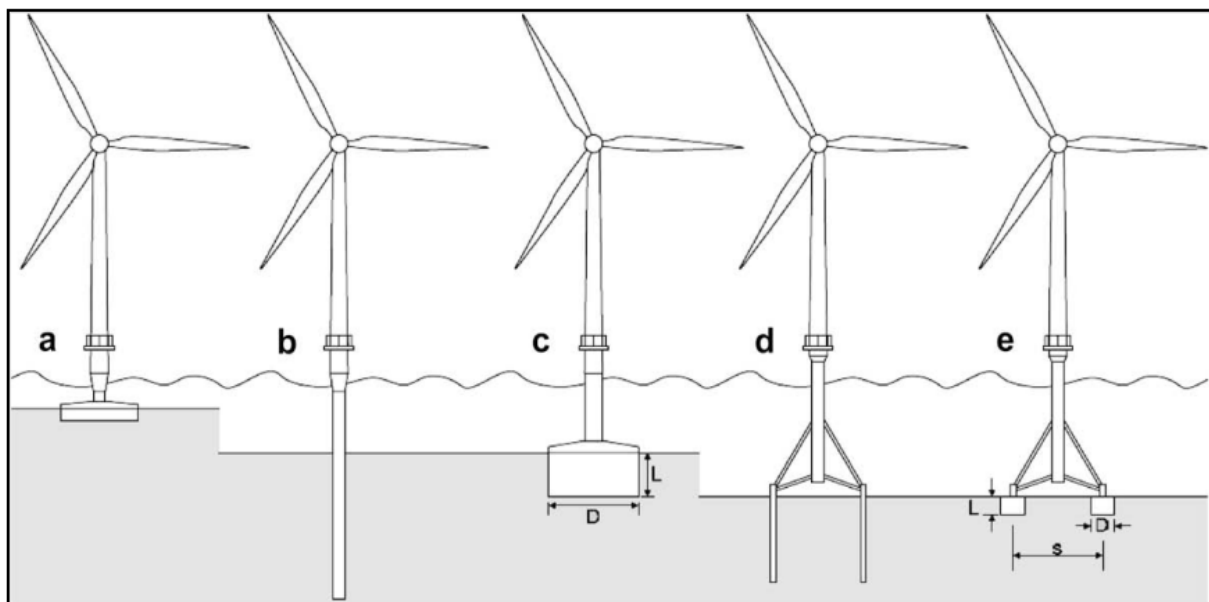
Σχήμα 1.14 – Κομμάτι μετάβασης της δομής στήριξης μορφής δικτύωματος [1.18]

1.11 Είδη θεμελίωσης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας

Όσον αφορά τα είδη της θεμελίωσης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών οι μέχρι τώρα εφαρμοσμένες μέθοδοι για βάθη μέχρι 30m είναι δύο ειδών : μέσω θεμελίων βαρύτητας ή μέσω εμπηγνυόμενων πασσάλων όπως φαίνονται στο (Σχήμα 1.15, α και β). Η επιλογή

μεταξύ αυτών των δύο τύπων θεμελίωσης εξαρτάται από το βάθος του πυθμένα και το είδος του εδάφους στη βάση της ανεμογεννήτριας. Στη πρώτη περίπτωση (a) τοποθετείται στο βυθό της θάλασσας ένα θεμέλιο από σκυρόδεμα ή από χάλυβα όπου μόνο με την επίδραση του βάρους του ισορροπεί ολόκληρη την κατασκευή. Στη περίπτωση (b) αξιοποιώντας τις δυνάμεις τριβής του εμπηγνυόμενου πασσάλου υποστηρίζεται ολόκληρη η κατασκευή της ανεμογεννήτριας. Η εφαρμογή των παραπάνω λύσεων περιορίζεται στη περίπτωση που τα νερά είναι ρηχά καθώς για μεγαλύτερα βάθη η χρήση θεμελίων βαρύτητας γίνεται πολύ ακριβή ενώ η χρήση εμπηγνυόμενων πασσάλων σε μεγάλα βάθη δεν υποστηρίζεται από την υπάρχουσα τεχνολογία. Μια εναλλακτική πρόταση για την περίπτωση των ρηχών νερών, η οποία απαιτεί μια απλούστερη διαδικασία κατασκευής και χρησιμοποιεί λιγότερο υλικό από αυτό που απαιτείται στη περίπτωση των θεμελίων βαρύτητας είναι η χρήση ενός φρέατος αναρρόφησης (Σχήμα 1.15, c). Για βάθη μεγαλύτερα από τα 30m, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές επιλογές θεμελίωσης έτσι ώστε η κατασκευή να είναι σταθερή και με ένα λογικό κόστος. Δύο παραδείγματα της τρίποδης δομής είναι είτε αυτή να στηρίζεται σε τρεις διαφορετικούς εμπηγνυόμενους πασσάλους (Σχήμα 1.15, d) είτε αυτή να στηρίζεται σε πολλαπλά θεμέλια βαρύτητας (Σχήμα 1.15, e).

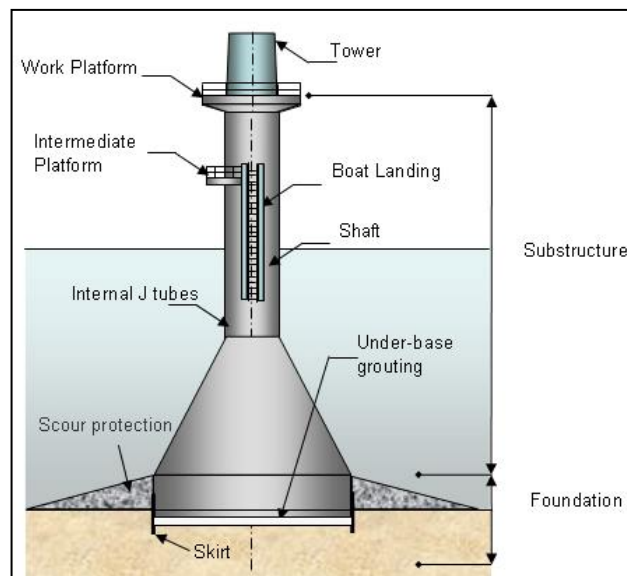
Καθώς το βάθος συνεχίζει να αυξάνεται υπάρχει ένα σημείο, μετά το οποίο είναι τεχνολογικά και οικονομικά ανέφικτη η απευθείας θεμελίωση της κατασκευής στο πυθμένα της θάλασσας. Σε αυτή τη περίπτωση εξετάζονται κατασκευές που θα επιπλέουν μέσα στη θάλασσα και στις οποίες το φορτίο της κατασκευής θα αντισταθμίζεται από τη δύναμη της άνωσης.



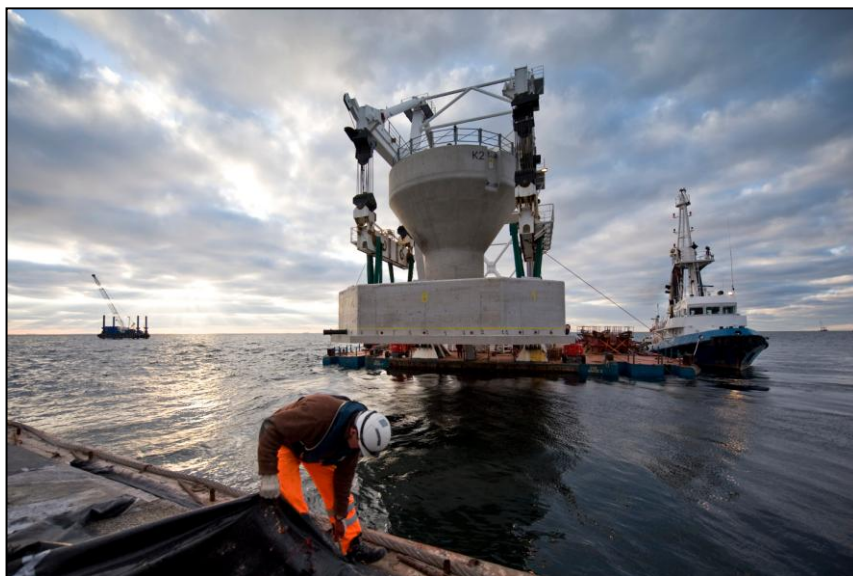
Σχήμα 1.15 – Είδη θεμελίωσης θαλάσσιων ανεμογεννητριών [1.19]

1.11.1 Θεμελίωση της κατασκευής μέσω θεμελίου βαρύτητας

Η αρχή της επιφανειακής θεμελίωσης (Σχήμα 1.16) και (Σχήμα 1.17) είναι ότι το βάρος του θεμελίου συγκρατεί σταθερή τη κατασκευή απέναντι στα φορτία του ανέμου και των κυμάτων. Επειδή τα φορτία των κυμάτων αυξάνονται και με το βάθος του πυθμένα, το βάρος της θεμελίωσης αυξάνει σημαντικά με την αύξηση του βάθους της θάλασσας. Για την εγκατάσταση της επιφανειακής θεμελίωσης απαιτείται προετοιμασία του πυθμένα με χαλίκι και τσιμέντο το κόστος της οποίας αυξάνει και αυτό σημαντικά ανάλογο με το βάθος του πυθμένα. Το θεμέλιο κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η επιλογή του συγκεκριμένου τρόπου θεμελίωσης είναι πολύ οικονομική για βάθη έως 10m σε σύγκριση με άλλους τύπους θεμελιώσεων. Το κόστος της επιφανειακής θεμελίωσης είναι ανάλογο του τετραγώνου του βάθους πράγμα που κάνει απαγορευτική τη συγκεκριμένη επιλογή για μεγάλα βάθη πυθμένα.

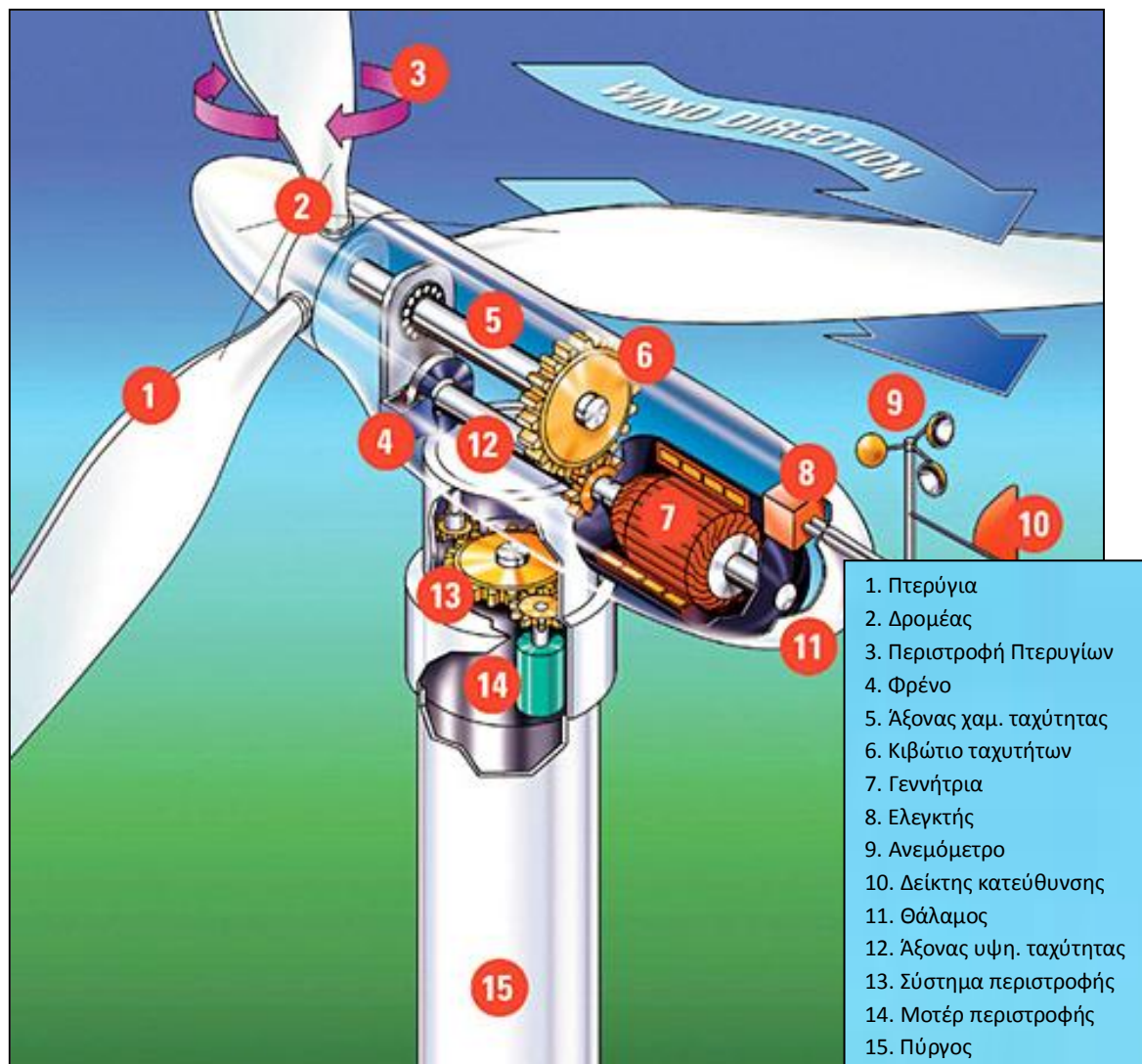


Σχήμα 1.16 – Θεμελίωση της κατασκευής μέσω θεμελίου βαρύτητας [1.20]



Σχήμα 1.17 – Θεμέλιο βαρύτητας [1.21]

1.12 Περιγραφή της ανεμογεννήτριας



Σχήμα 1.18 – Μέλη της ανεμογεννήτριας [1.22]

Οι συμβατικές ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μπορούν να διαιρεθούν σε τρία διαφορετικά τμήματα:

- Το πρώτο τμήμα αποτελείται από το δρομέα-στροφείο (Rotor) το οποίο περιλαμβάνει τα πτερύγια που μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε χαμηλής ταχύτητας περιστροφική ενέργεια και ένα σφαιρικό εξάρτημα πάνω στο οποίο στηρίζονται τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας που ονομάζεται Hub
- Το δεύτερο τμήμα αποτελείται από τα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας και περιλαμβάνει την ηλεκτρική γεννήτρια, τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου καθώς και το κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο μετατρέπει την εισερχόμενη χαμηλής ταχύτητας περιστροφή σε περιστροφή υψηλής ταχύτητας η οποία είναι κατάλληλη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

- Το τρίτο τμήμα αποτελεί τη δομική υποστήριξη της κατασκευής και περιλαμβάνει τη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας, το φορέα στήριξης, τον πύργο καθώς και τον μηχανισμό εκτροπής του δρομέα

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ο μηχανισμός παραγωγής ενέργειας της ανεμογεννήτριας βρίσκονται μέσα στο θάλαμο στη κορυφή της κατασκευής ο οποίος ονομάζεται Nacelle. Ουσιαστικά ο θάλαμος αυτός είναι ένα κάλυμμα που στεγάζει όλα εξαρτήματα παραγωγής ενέργειας όπως τη γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων, το σύστημα κίνησης, το σύστημα πέδησης κ.α.

Τα κυριότερα μέρη της ανεμογεννήτριας είναι (Σχήμα 1.18):

1. Πτερύγια (Blades). Τα πτερύγια (ή πτερωτές) της ανεμογεννήτριας κατασκευάζονται από αλουμίνιο και σύνθετα υλικά. Λόγω του ειδικού σχήματος των πτερυγίων ο άνεμος δημιουργεί ένα θύλακα πίεσης προς τα πάνω καθώς διέρχεται πίσω από το πτερύγιο. Αυτή η πίεση “σπρώχνει” τα πτερύγια προς τα πάνω προκαλώντας έτσι τη περιστροφή του δρομέα. Ουσιαστικά ο άνεμος φυσώντας πάνω στα πτερύγια τα προκαλεί να “σηκωθούν” και να περιστραφούν.

2. Δρομέας (Rotor). Ο δρομέας περιλαμβάνει τα πτερύγια που μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε χαμηλής ταχύτητας περιστροφική ενέργεια και ένα σφαιρικό εξάρτημα (Hub) πάνω στο οποίο στηρίζονται τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Από το σφαιρικό αυτό εξάρτημα ξεκινάει ο άξονας ο οποίος μεταδίδει τη περιστροφή στο εσωτερικό του θαλάμου (Nacelle).

3. Περιστροφή πτερυγίων (Pitch). Τα πτερύγια έχουν τη δυνατότητα περιστροφής γύρω από το διαμήκη άξονα τους (Pitch) με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η γωνία προσβολής τους από τον άνεμο. Με την τεχνική αυτή διατηρείται σταθερή η ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας, βελτιστοποιείται η αεροδυναμική απόδοση των πτερυγίων, επιτυγχάνεται έλεγχος της παραγόμενης ισχύος και πραγματοποιείται ένας περιορισμός των δυνάμεων που καταπονούν τα πτερύγια. Η περιστροφή των πτερυγίων γύρω από τον άξονα τους παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας του δρομέα (προστατεύοντάς τον από ανέμους οι οποίοι είναι υπερβολικά ισχυροί).

4. Φρένο (Brake). Η ανεμογεννήτρια διαθέτει μηχανισμό φρένου, το οποίο περιορίζει τη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε περιπτώσεις ισχυρών ανέμων. Επίσης σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών ανέμων το φρένο ακινητοποιεί το δρομέα για την ασφάλεια της ανεμογεννήτριας. Τέλος σε περίπτωση συντήρησης της ανεμογεννήτριας απαιτείται η πλήρης ακινητοποίησή της για την ασφάλεια των εργασιών.

5. Άξονας χαμηλής ταχύτητας (Low-speed shaft). Ο άξονας αυτός ξεκινάει από το σφαιρικό εξάρτημα (Hub) πάνω στο οποίο στηρίζονται τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας και περιστρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο δρομέας. Ο

άξονας αυτός μεταδίδει τη περιστροφή στον άξονα υψηλής ταχύτητας μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων.

6. Κιβώτιο ταχυτήτων (Gear box). Μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων μεταφέρεται η κίνηση από τον άξονα χαμηλής ταχύτητας στον άξονα υψηλής ταχύτητας με την κατάλληλη αναλογία ταχυτήτων.

7. Γεννήτρια (Generator). Η γεννήτρια μετατρέπει την κινητική ενέργεια του άξονα υψηλής ταχύτητας σε ηλεκτρική ενέργεια.

8. Ελεγκτής (Controller). Ο ελεγκτής είναι μια συσκευή που ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου επιτρέπει ή απαγορεύει τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

9. Ανεμόμετρο (Anemometer). Το ανεμόμετρο είναι ένας μηχανισμός ο οποίος μετρά τη ταχύτητα του ανέμου και μεταφέρει δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου στον ελεγκτή.

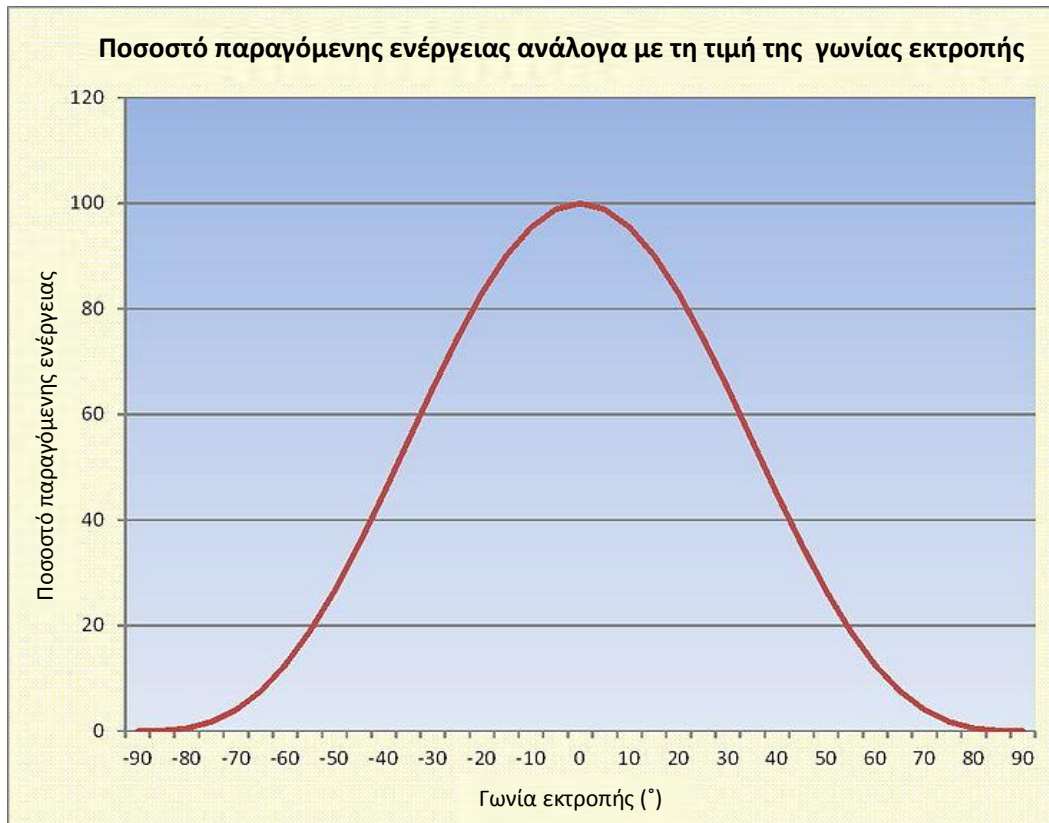
10. Δείκτης κατεύθυνσης (Wind Vane). Ο δείκτης κατεύθυνσης αναγνωρίζει τη διεύθυνση του ανέμου και δίνει πληροφορίες στο σύστημα περιστροφής ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός προσανατολισμός της ανεμογεννήτριας σε σχέση με τον άνεμο.

11. Θάλαμος (Nacelle). Είναι ένας θάλαμος στη κορυφή της κατασκευής που περιλαμβάνει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, τον ελεγκτή, τη γεννήτρια και το φρένο.

12. Άξονας υψηλής ταχύτητας (High-speed shaft). Ο άξονας αυτός περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα αφού συνδέεται με τον άξονα χαμηλής ταχύτητας μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων. Η ταχύτητα περιστροφής του μπορεί να περιορισθεί μέσω του φρένου με το οποίο είναι συνδεδεμένος. Μέσω του άξονα αυτού μεταδίδεται η κίνηση στη γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

13. Σύστημα περιστροφής (Yaw drive). Το σύστημα περιστροφής στηρίζεται στο πύργο και αποτελείται από έναν κατακόρυφο άξονα και μερικά γρανάζια που συνδέονται με το θάλαμο (Nacelle). Μέσω αυτού του συστήματος είναι δυνατή η περιστροφή του συστήματος δρομέα-θαλάμου ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός προσανατολισμός σε σχέση με τον άνεμο. Το σύστημα αυτό εξασφαλίζει ότι ο άξονας του δρομέα θα είναι πάντα στραμμένος προς τον άνεμο καθώς αυτός αλλάζει κατεύθυνση. Ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου ο δείκτης κατεύθυνσης στέλνει τις αντίστοιχες πληροφορίες στο σύστημα περιστροφής και αυτό στρέφει το δρομέα προς την διεύθυνση του ανέμου. Ελαχιστοποιώντας τη γωνία εκτροπής (η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα του δρομέα και της διεύθυνσης του ανέμου) μεγιστοποιείται η παραγόμενη ενέργεια της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, δεδομένου ότι η κατεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται συνεχώς ο δρομέας δεν μπορεί να ακολουθεί αυστηρά τη κατεύθυνσή του και έτσι θα υπάρχει πάντα μια μικρή γωνία εκτροπής. Συγκεκριμένα σε χαμηλές έως μεσαίες ταχύτητες ανέμου μεγάλες γωνίες εκτροπής μπορούν να προκαλέσουν σημαντική μείωση της

παραγόμενης ενέργειας της ανεμογεννήτριας καθώς η μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου της τάξης των $\pm 30^\circ$ είναι αρκετά συχνή σε αυτές τις ταχύτητες. Σε υψηλές ταχύτητες ανέμου η μεταβλητότητα της διεύθυνσης του ανέμου είναι αρκετά μικρή. Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 1.19) φαίνεται το ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας της ανεμογεννήτριας ανάλογα με τη τιμή της γωνίας εκτροπής.



Σχήμα 1.19 – Ποσοστό παραγόμενης ενέργειας ανεμογεννήτριας ανάλογα με τη τιμή της γωνίας εκτροπής [1.23]

14. Μοτέρ περιστροφής (Yaw motor). Είναι ένας μηχανισμός ο οποίος θέτει σε περιστροφή το σύστημα περιστροφής.

15. Πύργος (Tower). Ο πύργος είναι ένα μέρος της δομής της κατασκευής. Έχει όμως και λειτουργικό ρόλο αφού στο εσωτερικό του γίνεται η στέγαση κάποιων οργάνων της ανεμογεννήτριας και υπάρχει μια εσωτερική σκάλα που επιτρέπει τη πρόσβαση στο θάλαμο που υπάρχει στη κορυφή της κατασκευής όπου βρίσκεται η "καρδιά" της μηχανής.

1.13 Αρχή λειτουργίας των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας

Η ισχύς του ρέοντος ανέμου που μπορεί να δεσμευτεί από την κίνηση του δρομέα της ανεμογεννήτριας παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα (είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ανέμου εις το κύβο) πράγμα που σημαίνει ότι διπλάσια ταχύτητα ανέμου οδηγεί σε οχταπλάσια ισχύ. Αυτός είναι και ο λόγος που η επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας είναι αρκετά σημαντική. Ταχύτητες ανέμου κάτω από 5 m/s δεν είναι

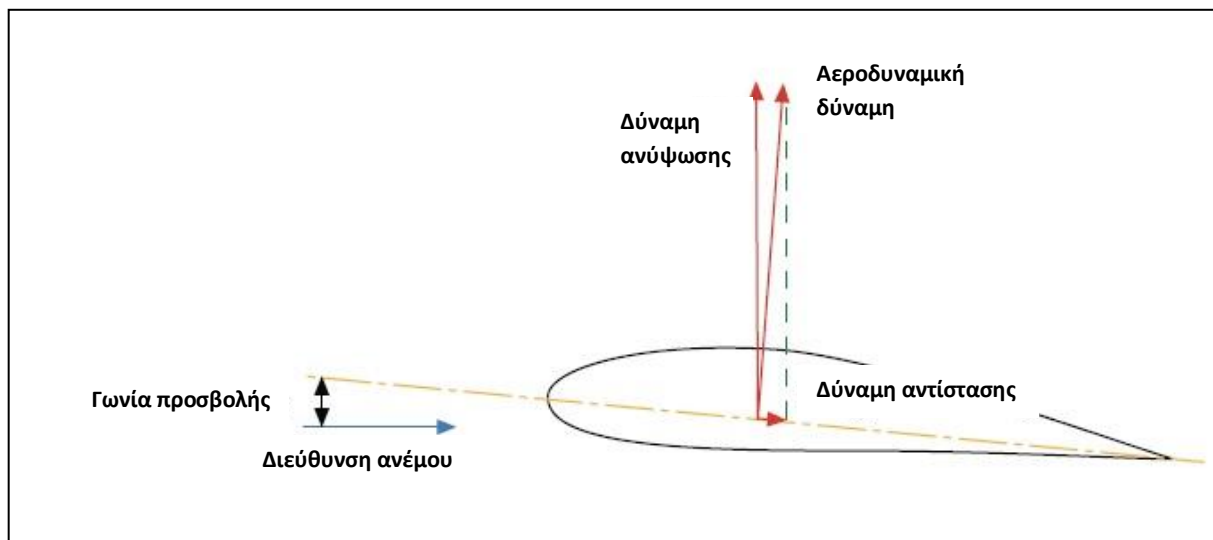
ικανές να παράγουν αρκετή ενέργεια έτσι ώστε να είναι αποδοτική η ανεμογεννήτρια. Από την άλλη μεριά ισχυρές ριπές ανέμου μπορεί βραχυπρόθεσμα να παράγουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας αλλά δεν είναι οικονομικά βιώσιμο να σχεδιάζονται ανεμογεννήτριες οι οποίες θα μπορούν να αξιοποιήσουν τις σπάνιες υψηλές τιμές προσφερόμενης ενέργειας αλλά λόγω της υψηλής αντοχής τους θα υπολειτουργούν όλο το υπόλοιπο χρονικά διάστημα. Έτσι η ιδανική τοποθεσία είναι ένα μέρος με σταθερές ταχύτητες ανέμων και μια ανεμογεννήτρια που θα είναι σε θέση να αξιοποιήσει στο έπακρο του “ελαφρύτερους” ανέμους ενώ θα αντέχουν σε περιπτώσεις ισχυρών ριπών αέρα.

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται συνεχώς εξαιτίας των χαρακτηριστικών του εδάφους, της θερμότητας και των καιρικών συνθηκών. Επίσης κοντά στα έδαφος οι ταχύτητες του ανέμου είναι μικρές εξαιτίας της επιφανειακής τριβής ενώ σε μεγαλύτερα υψόμετρα πνέουν ισχυρότεροι άνεμοι. Όλες αυτές οι επιδράσεις μεταβάλλουν συνεχώς τα φορτία που ασκούνται στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας καθώς αυτά περιστρέφονται που σημαίνει ότι η αεροδυναμική και η δομοστατική τους σχεδίαση θα πρέπει να αντιμετωπίσει συνθήκες που σπάνια είναι οι βέλτιστες δυνατές.

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μια επεξήγηση της διατομής, του σχήματος, του τρόπου λειτουργίας και περιστροφής (περί τον άξονα τους) των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Τα σχήματα καθώς και πολλά σημεία του κειμένου προέρχονται από το βιβλίο “Wind energy handbook”[1.24]

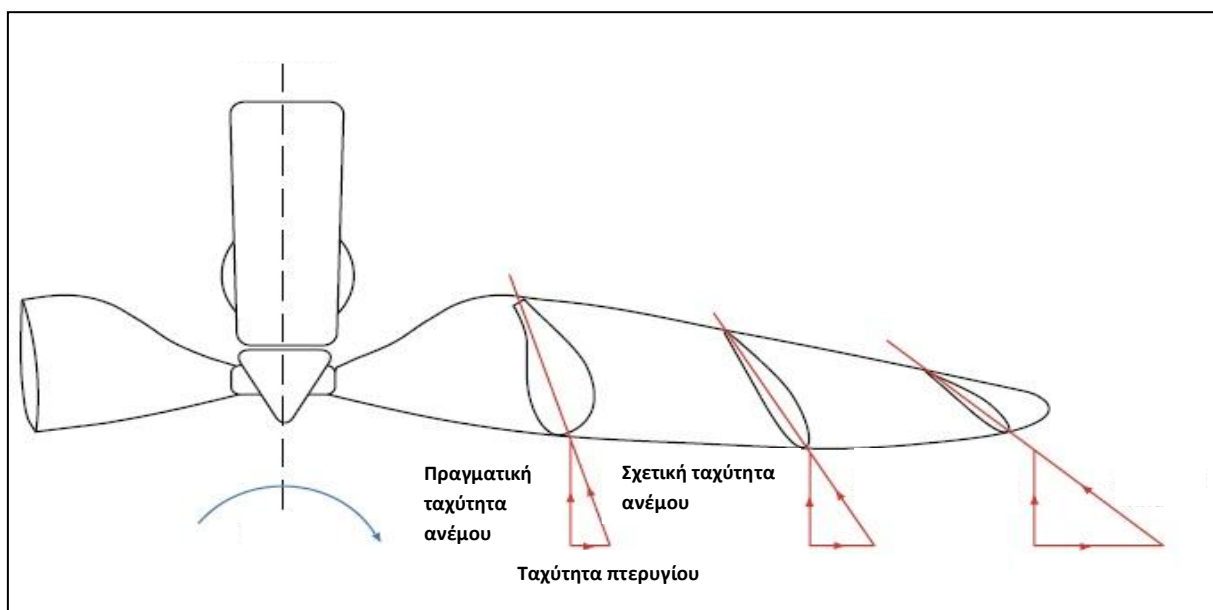
Τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας σχεδιάζονται με σκοπό τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας με το λιγότερο δυνατό κόστος. Η διαμόρφωση του τελικού σχήματος των πτερυγίων είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ των αεροδυναμικών απαιτήσεων και του κόστους κατασκευής τους. Συγκεκριμένα τα πτερύγια των ανεμογεννητριών τείνουν να είναι παχύτερα από το αεροδυναμικά βέλτιστο πάχος στη ρίζα τους (το σημείο όπου το πτερύγιο ενώνεται με το σφαιρικό εξάρτημα) όπου οι καταπονήσεις που οφείλονται στη κάμψη είναι μεγαλύτερες.

Όπως και στη περίπτωση του φτερού ενός αεροπλάνου έτσι και τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας λειτουργούν παράγοντας μια ανυψωτική δύναμη (lift force) χάρη στο σχήμα και τη κλίση τους. Η ανυψωτική αυτή δύναμη είναι κάθετη στη ροή του ανέμου (Σχήμα 1.20) και αυξάνεται καθώς αυξάνεται η γωνία προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο. Για μεγάλες γωνίες προσβολής η ανυψωτική δύναμη αρχίζει να μειώνεται πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει μια βέλτιστη γωνία προσβολής κατά την οποία παράγεται η μέγιστη ανυψωτική δύναμη. Υπάρχει δυστυχώς και μια επιβραδυντική δύναμη που ασκείται επί του πτερυγίου η οποία είναι η δύναμη αντίστασης (drag force). Η δύναμη αυτή είναι παράλληλη στη ροή του ανέμου (Σχήμα 1.20) και αυξάνει καθώς αυξάνει η γωνία προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο. Εάν το σχήμα του πτερυγίου είναι καλό τότε η δύναμη ανύψωσης είναι πολύ μεγαλύτερη από τη δύναμη αντίστασης, αλλά σε πολύ μεγάλες γωνίες προσβολής η δύναμη αντίστασης αυξάνει σημαντικά. Έτσι σε μια γωνία ελαφρώς μικρότερη από αυτή που παράγεται η μέγιστη ανυψωτική δύναμη, ο λόγος δύναμης ανύψωσης προς δύναμη αντίστασης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του.



Σχήμα 1.20 – Δυνάμεις ανύψωσης και αντίστασης στο πτερύγιο [1.24]

Αξίζει να τονιστεί, ότι για σταθερή γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ω , η γραμμική ταχύτητα του υλικού κατά μήκος του πτερυγίου αυξάνεται με την απομάκρυνση από το κέντρο περιστροφής του δρομέα ($v = \omega \cdot r$). Η μεταβολή της ταχύτητας του πτερυγίου κατά το μήκος του (Σχήμα 1.21) έχει σαν αποτέλεσμα να είναι διαφορετική η ταχύτητα του ανέμου που προσπίπτει στο πτερύγιο (σχετική ταχύτητα) από τη πραγματική ταχύτητα του ανέμου. Η σχετική ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από την πραγματική ταχύτητα του ανέμου και έχει διαφορετική διεύθυνση από αυτόν. Καθώς πλησιάζουμε προς το άκρο του πτερυγίου, αυξάνεται η σχετική ταχύτητα του ανέμου που προσπίπτει στο πτερύγιο αλλά μειώνεται η γωνία προσβολής με αποτέλεσμα να μειώνεται η τιμή της ανυψωτικής δύναμης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το πτερύγιο να πρέπει να στραφεί (περί τον άξονα του) περισσότερο στην άκρη του από τι στη ρίζα του, δηλαδή να κατασκευαστεί με μια συστροφή κατά το μήκος του. Συνήθως η συστροφή αυτή είναι μεταξύ 10-20° από τη ρίζα του πτερυγίου μέχρι την άκρη του.



Σχήμα 1.21 – Μεταβολή της σχετικής ταχύτητας του ανέμου που προσπίπτει στο πτερύγιο κατά το μήκος του [1.24]

Η ανυψωτική δύναμη (lift force) που ασκείται στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας πηγάζει από τη διαφορά πίεσης ανάμεσα στο πάνω και στο κάτω μέρος του πτερυγίου (Σχήμα 1.22). Εξαιτίας της μη-συμμετρικής μορφής του πτερυγίου, το πάνω μέρος του πτερυγίου έχει μεγαλύτερη περίμετρο από αυτή που έχει το κάτω μέρος. Δεδομένου ότι η ροή πάνω από το πτερύγιο πρέπει να καλύψει μεγαλύτερη απόσταση, είναι αναγκασμένη να κινηθεί πιο γρήγορα. Αυτό συμβαίνει διότι η ροή του αέρα θα πρέπει μέσα στο ίδιο χρονικό διάστημα να “καλύψει” και το πάνω και το κάτω μέρος του πτερυγίου (αρχή διατήρησης της μάζας). Καθώς η ροή του αέρα επιταχύνεται πάνω από το πτερύγιο, η πίεση πέφτει ανάλογα στο πάνω μέρος του πτερυγίου (από τη θεωρία Bernoulli: $\frac{1}{2} \rho u^2 + P = \text{constant}$) προκύπτει ότι

όταν τα σωματίδια του αέρα περνούν από μια περιοχή χαμηλότερης πίεσης τότε αυτά επιταχύνουν και αντίστροφα). Έτσι υπάρχει μια περιοχή χαμηλότερης πίεσης πάνω από το πτερύγιο σε σύγκριση με τη πίεση που υπάρχει κάτω από αυτό. Αυτή η διαφορά πίεσης είναι που δημιουργεί την αεροδυναμική δύναμη (Aerodynamic force). Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διαφορά πίεσης ανάμεσα στο πάνω και στο κάτω μέρος του πτερυγίου τόσο μεγαλύτερη είναι η αεροδυναμική δύναμη, η οποία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο συνιστώσες:

- Τη δύναμη ανύψωσης (lift force) η οποία είναι κάθετη στη ροή του ανέμου

Αν ο συντελεστής ανύψωσης (C_L) για ένα σχήμα πτερυγίου μιας συγκεκριμένης γωνίας προσβολής είναι γνωστός τότε η ανυψωτική δύναμη που παράγεται για συγκεκριμένες συνθήκες ροής ανέμου είναι:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \cdot A \cdot C_L \quad (1.2)$$

όπου:

ρ η πυκνότητα του αέρα
 u η ταχύτητα (σχετική) του αέρα
 A το εμβαδό της κάτοψης
 C_L ο συντελεστής ανύψωσης

- Τη δύναμη αντίστασης (drag force) η οποία είναι παράλληλη στη ροή του ανέμου

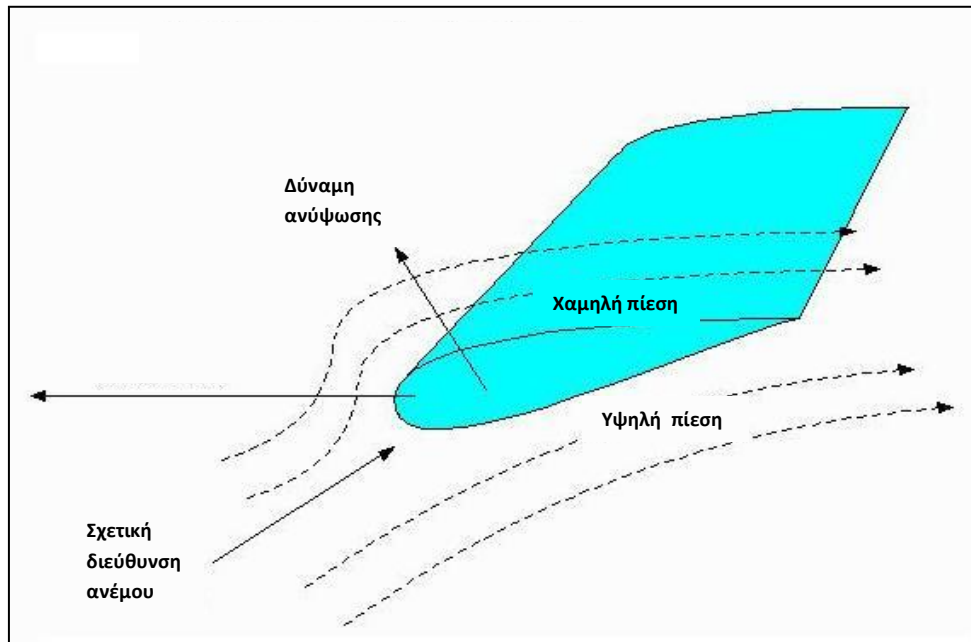
Η δύναμη αντίστασης εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού καθώς και από το μέγεθος, το σχήμα και τη ταχύτητα του πτερυγίου και ισούται με:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \cdot A \cdot C_D \quad (1.3)$$

όπου:

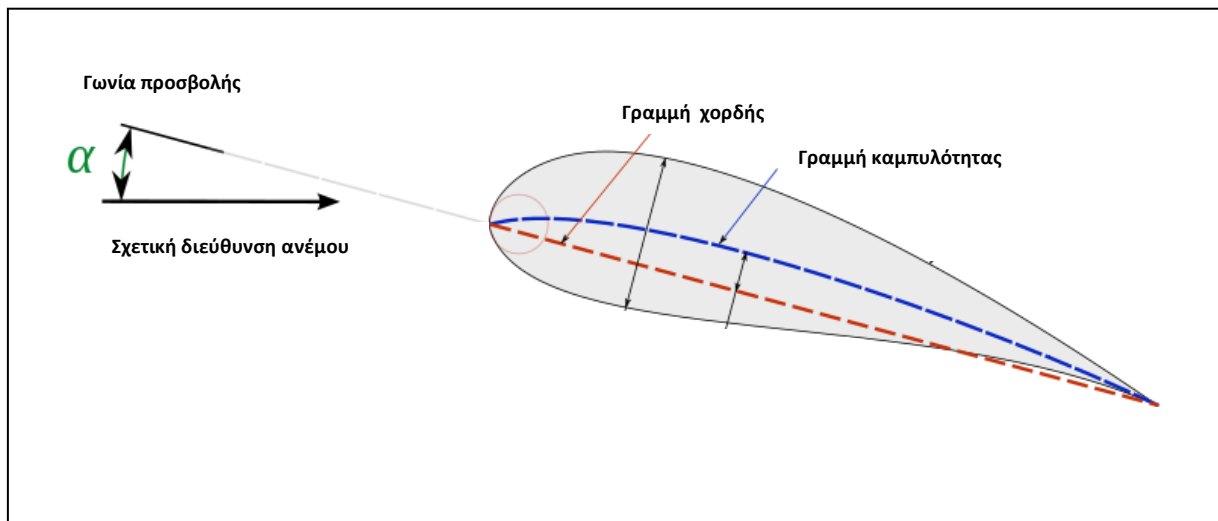
ρ η πυκνότητα του αέρα
 u η ταχύτητα (σχετική) του αέρα

- A το εμβαδό της διατομής του πτερυγίου
 C_D ο συντελεστής αντίστασης



Σχήμα 1.22 – Ροή του ανέμου στο πάνω και στο κάτω μέρος του πτερυγίου [1.24]

Το μέγεθος της ανυψωτικής δύναμης (lift force) εξαρτάται από τη γωνία προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο (angle of attack). Στην αεροδυναμική, η γωνία προβολής είναι η γωνία μεταξύ της χορδής του πτερυγίου και του διανύσματος που αντιπροσωπεύει τη σχετική κίνηση μεταξύ του αεροσκάφους και της ατμόσφαιρας.



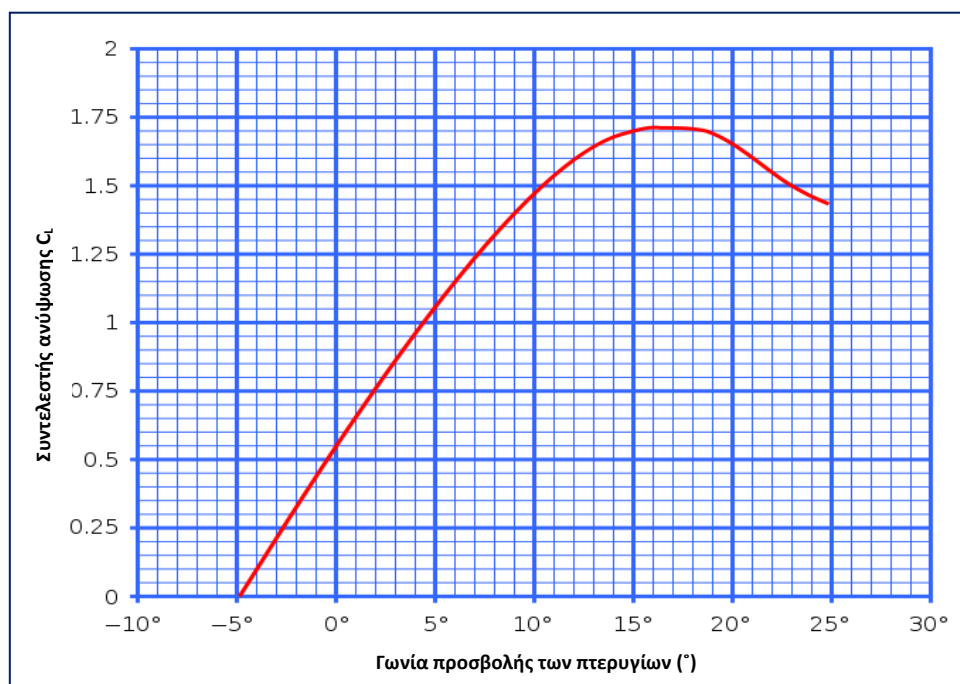
Σχήμα 1.23 – Χαρακτηριστικά του προφίλ ενός πτερυγίου [1.24]

Στη παραπάνω εικόνα απεικονίζεται το προφίλ ενός πτερυγίου (Σχήμα 1.23). Όπως φαίνεται η μορφή του πτερυγίου χαρακτηρίζεται από μια ασυμμετρία η οποία με τη σειρά της επηρεάζει και αυτή τη τιμή της ανυψωτικής δύναμης. Ένα συμμετρικό πτερύγιο με μηδενική γωνία προσβολής θα παράγει μηδενική ανυψωτική δύναμη, ενώ ένα μη-

συμμετρικό πτερύγιο με μηδενική γωνία προσβολής είναι ικανό να παράγει ανυψωτική δύναμη. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου είναι τα εξής:

- Η επιφάνεια αναρρόφησης (άνω επιφάνεια) γενικά συνδέεται με μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα και επομένως μικρότερη στατική πίεση
- Η επιφάνεια πίεσης (κάτω επιφάνεια) έχει μια συγκριτικά μεγαλύτερη στατική πίεση από την επιφάνεια αναρρόφησης
- Η προπορευόμενη ακμή είναι το σημείο στο μπροστινό μέρος του πτερυγίου που έχει τη μεγαλύτερη καμπυλότητα
- Η ακμή της ουράς είναι το σημείο στο πίσω μέρος του πτερυγίου που έχει τη μικρότερη καμπυλότητα
- Η γραμμή της χορδής είναι μια ευθεία γραμμή που συνδέει τις δυο ακμές του πτερυγίου
- Η γραμμή της καμπυλότητας είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που βρίσκονται ανάμεσα από τη κάτω και την άνω επιφάνεια

Ο συντελεστής ανύψωσης (C_L) ποικίλει ανάλογα με τη γωνία προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο και το σχήμα των πτερυγίων. Η αύξηση της γωνίας προσβολής σχετίζεται με την αύξηση του συντελεστή ανύψωσης μέχρι τη μέγιστη τιμή του συντελεστή ανύψωσης μετά την οποία οποιαδήποτε αύξηση στη γωνία προσβολής προκαλεί μείωση του συντελεστή ανύψωσης. Καθώς η γωνία προσβολής αυξάνεται ο διαχωρισμός της ροής του αέρα από την άνω επιφάνεια του πτερυγίου γίνεται όλο και πιο έντονος οδηγώντας έτσι σε μια μείωση του ρυθμού αύξησης του συντελεστή ανύψωσης. Το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 1.24) απεικονίζει πως μεταβάλλεται ο συντελεστής ανύψωσης σε ένα καμπύλο πτερύγιο καθώς μεταβάλλεται η γωνία προσβολής του πτερυγίου από τον άνεμο:

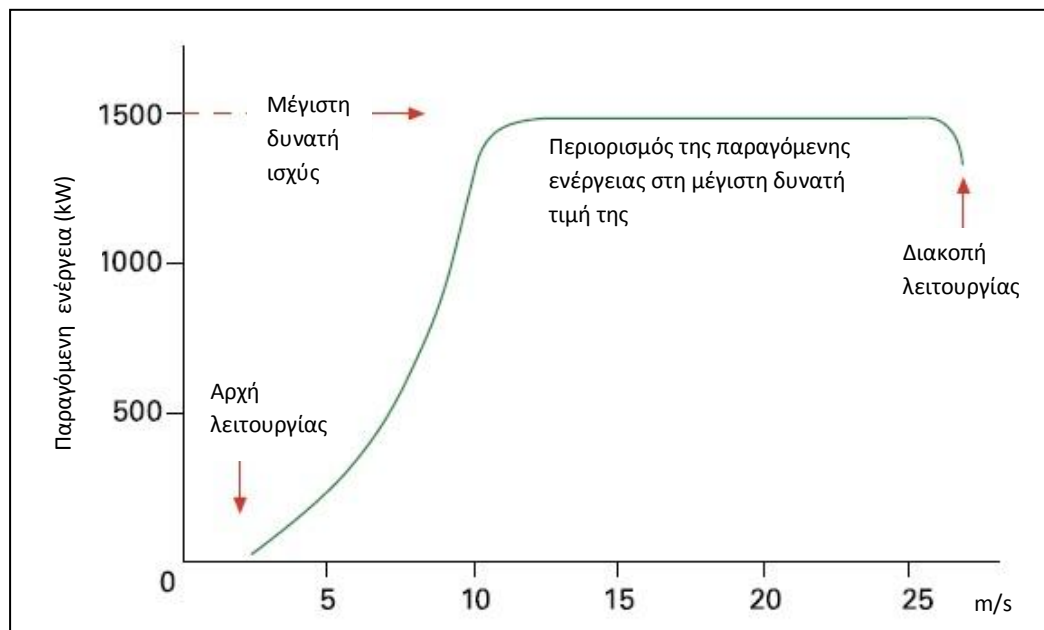


Σχήμα 1.24 – Μεταβολή του συντελεστή ανύψωσης ανάλογα με τη γωνία προσβολής του πτερυγίου [1.25]

Η κρίσιμη γωνία προσβολής είναι η γωνία προσβολής στην οποία αντιστοιχεί ο μέγιστος συντελεστής ανύψωσης. Κάτω από τη κρίσιμη γωνία προσβολής καθώς αυξάνεται η γωνία προσβολής αυξάνεται και ο συντελεστής ανύψωσης ενώ ο αέρας αρχίζει να ρέει λιγότερο ομαλά στην άνω επιφάνεια του πτερυγίου και να διαχωρίζεται από αυτή. Στα περισσότερα σχήματα πτερυγίων, καθώς αυξάνεται η γωνία προσβολής το σημείο διαχωρισμού της ροής του αέρα από την άνω επιφάνεια του πτερυγίου μετακινείται από την ακμή της ουράς προς την προπορευόμενη ακμή. Κατά τη κρίσιμη γωνία προσβολής υπάρχει κάποιος διαχωρισμός στη ροή του αέρα ενώ ο συντελεστής ανύψωσης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του. Η αύξηση της γωνίας προσβολής πέραν του κρίσιμου σημείου έχει σαν αποτέλεσμα η ροή να γίνεται ταραχώδεις και να διαχωρίζεται αμέσως από την άνω επιφάνεια του πτερυγίου. Την ίδια στιγμή υπάρχει μικρότερη εκτροπή του αέρα προς το κάτω, με αποτέλεσμα ο συντελεστής ανύψωσης να μειώνεται και άρα να μειώνεται και η δύναμη ανύψωσης (στη περίπτωση της μικρής γωνίας προσβολής όλος ο αέρας που περνά από την άνω και τη κάτω επιφάνεια του πτερυγίου εκτρέπεται προς τα κάτω αφού η αποκόλληση της ροής που πραγματοποιείται είναι πολύ μικρή).

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτή η μεγάλη σημασία της γωνίας προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο στη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Επειδή η ισχύς του ρέοντος ανέμου που μπορεί να δεσμευτεί από την κίνηση του δρομέα της ανεμογεννήτριας παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα (είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ανέμου εις το κύβο) η ανεμογεννήτρια θα πρέπει να είναι σε θέση να παράγει ενέργεια ακόμη και με ασθενείς ανέμους αλλά να αντέχει και τα φορτία σε περίπτωση ισχυρής ανεμοπύσης. Ως εκ τούτου, για υπερβολικά μεγάλες ταχύτητες ανέμων τα πτερύγια περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους (pitched) μεταβάλλοντας τη γωνία προσβολής τους από τον άνεμο (μειώνοντας τη γωνία προσβολής) ώστε να περιορισθεί η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (με τη μείωση της γωνίας προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο ουσιαστικά μειώνεται η δύναμη ανύψωσης), να μειωθεί η παραγόμενη ενέργεια και να ρυθμιστούν τα φορτία που ασκούνται στην ανεμογεννήτρια.

Για έναν οικονομικό σχεδιασμό, η μέγιστη απόδοση της γεννήτριας και του κιβωτίου ταχυτήτων θα πρέπει να περιορίζεται σε ένα κατάλληλο επίπεδο ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Η ιδανική κατάσταση για την ανεμογεννήτρια θα ήταν να μπορεί να παράγει όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια από τον άνεμο μέχρι την ονομαστική ισχύ της και στη συνέχεια να περιορίζει τη παραγωγή ενέργειας σε αυτό το σημείο καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου.



Σχήμα 1.25 – Παραγόμενη ενέργεια της ανεμογεννήτριας ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου [1.24]

Αν η γωνία προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο διατηρούνταν σταθερή τότε η ανεμογεννήτρια δεν θα ήταν σε θέση να ανταποκριθεί σε μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό θα καθιστούσε αδύνατη τη διατήρηση μιας βέλτιστης γωνίας προσβολής των πτερυγίων (ώστε να παράγεται η μέγιστη ανυψωτική δύναμη) για τη παραγωγή της μέγιστης δυνατής ενέργειας καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου.

Αν αντίθετα τα πτερύγια έχουν τη δυνατότητα περιστροφής περί τον άξονα τους τότε μπορούν να διατηρούν πάντα τη βέλτιστη γωνία προσβολής (παράγοντας τη μέγιστη ανυψωτική δύναμη) μέχρι η ταχύτητα του ανέμου να φτάσει τη ταχύτητα σχεδιασμού. Πάνω από την ταχύτητα σχεδιασμού η γωνία προσβολής των πτερυγίων μειώνεται (μειώνεται έτσι και η παραγόμενη ανυψωτική δύναμη) και περιορίζεται έτσι η παραγόμενη ενέργεια σε ένα ανώτατο επίπεδο για τη διατήρηση της ασφάλειας της ανεμογεννήτριας.

Μια εναλλακτική της μείωσης της γωνίας προσβολής των πτερυγίων σε περιπτώσεις όπου η ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά τη ταχύτητα σχεδιασμού είναι η αύξηση της γωνίας προσβολής σε τιμές πάνω από τη βέλτιστη τιμή της. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ανυψωτικής δύναμης και την αύξηση της δύναμης αντίστασης καταλήγοντας πάλι στο ίδιο αποτέλεσμα με πριν, δηλαδή τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα.

Συνοψίζοντας η λειτουργία των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας για της διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου είναι η εξής (Σχήμα 1.25):

- Για μικρές ταχύτητας ανέμου όπου η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι μικρότερη από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας η γωνία προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο είναι η βέλτιστη δυνατή (ο λόγος δύναμη ανύψωσης προς δύναμη αντίστασης παίρνει τη μέγιστη τιμή του) ώστε να παράγεται η μέγιστη

ανυψωτική δύναμη και άρα τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας να περιστρέφονται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα παράγοντας έτσι τη μέγιστη δυνατή ενέργεια.

- Για μεγάλες ταχύτητες ανέμου όπου η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας η γωνία προσβολής των πτερυγίων είναι μικρότερη από τη βέλτιστη δυνατή παράγοντας έτσι μικρότερη ανυψωτική δύναμη από τη μέγιστη δυνατή. Αυτός ο περιορισμός προστατεύει το δρομέα και τα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας από τις ισχυρές καταπονήσεις που επιβάλλονται όταν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι αρκετά μεγάλη. Σε αυτή τη περίπτωση η παραγόμενη ενέργεια είναι η μέγιστη δυνατή που μπορεί να παράγει η ανεμογεννήτρια.
- Για υπερβολικές ταχύτητες ανέμου όπου ακόμα και για μικρές γωνίες προσβολής των πτερυγίων η ανυψωτικές δυνάμεις που παράγονται είναι αρκετά μεγάλες και ικανές να περιστρέφουν το δρομέα πολύ γρήγορα, η λειτουργία της ανεμογεννήτριας διακόπτεται και ο δρομέας σταματά να περιστρέφεται έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

1.14 Επιλογή της διατομής των πτερυγίων

Τα σχήματα των πτερυγίων των ανεμογεννητριών έχουν παρόμοιες απαιτήσεις χαρακτηριστικών με αυτές που έχουν τα πτερύγια των αεροπλάνων με αποτέλεσμα οι διατομές τους να είναι παρόμοιες. Γενικά μεγαλύτερες τιμές του λόγου της δύναμης ανύψωσης προς τη δύναμη αντίστασης επιτυγχάνονται για πτερύγια που είναι αρκετά λεπτά (το πάχος του πτερυγίου δεν ξεπερνά το 10 με 15% του μήκους της χορδής του). Αν δεν υπήρχαν δομοστατικές απαιτήσεις το πάχος του πτερυγίου θα ήταν αρκετά μικρό. Από την άλλη μεριά όμως το πτερύγιο θα πρέπει να αντέξει την ασκούμενη δύναμη ανύψωσης, τη ασκούμενη δύναμη αντίστασης και φυσικά του ίδιο βάρους του. Αυτές οι δομοστατικές απαιτήσεις επιβάλλουν ένα μεγαλύτερο πάχος πτερυγίου από το αεροδυναμικά βέλτιστο πάχος ειδικά σε σημεία κοντά στη ρίζα του (το σημείο όπου το πτερύγιο ενώνεται με το σφαιρικό εξάρτημα) όπου οι καμπτικές ροπές είναι μεγαλύτερες. Ευτυχώς σε εκείνη το σημείο η σχετική ταχύτητα του ανέμου είναι η μικρότερη και έτσι μια αεροδυναμική αναποτελεσματικότητα εκεί σε εκείνη τη θέση είναι λιγότερο σοβαρή από ότι θα ήταν αν αυτό συνέβαινε σε κάποιο σημείο κοντά στο άκρο του πτερυγίου. Από την άλλη μεριά το πάχος του πτερυγίου κοντά στη ρίζα του δεν μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με το μήκος της χορδής του γιατί αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα τον διαχωρισμό της ροής του αέρα από το πίσω μέρος του πτερυγίου και την μεγάλη αύξηση της δύναμης αντίστασης.

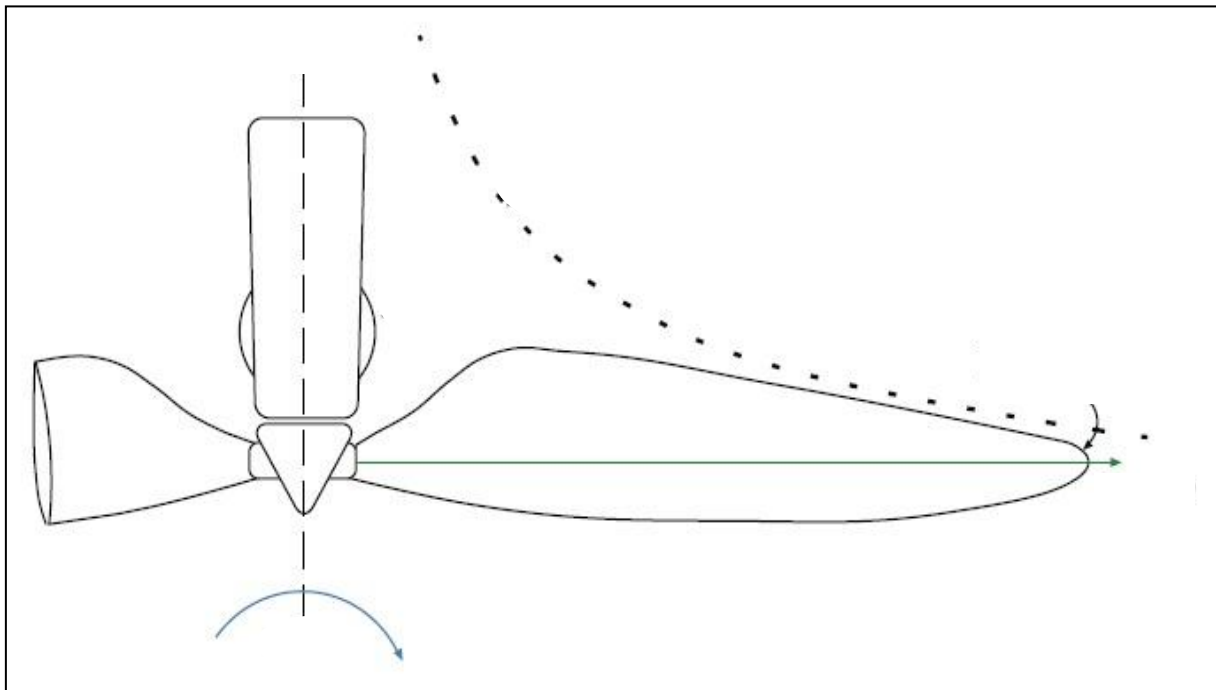
Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι θα πρέπει να υπάρξει ένας συμβιβασμός μεταξύ της αεροδυναμικής απόδοσης και δομοστατικών απαιτήσεων του πτερυγίου. Ακόμη και ένα πολύ λεπτό πτερύγιο μπορεί να γίνει ισχυρό και άκαμπτο χρησιμοποιώντας αρκετή εσωτερική ενίσχυση. Από τη άλλη μεριά ένα παχύτερο πτερύγιο (με μικρότερη

αεροδυναμική απόδοση) μπορεί να αποτελεί καλύτερη επιλογή αν εξοικονομεί τόσο μεγάλο κόστος υλικού που υπερβαίνει το συνολικό κόστος της παραγόμενης ενέργειας. Υπάρχει λοιπόν αναπόφευκτα μια επανάληψη της διαδικασίας σχεδιασμού προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο πάχος του πτερυγίου.

1.15 Επιλογή του σχήματος των πτερυγίων

Η επιλογή του σχήματος της κάτοψης του πτερυγίου (Σχήμα 1.26) γίνεται έτσι ώστε το πτερύγιο να έχει μια περίπου σταθερή επίδραση στην επιβράδυνση του αέρα. Δηλαδή η άκρη του πτερυγίου να επιβραδύνει τον άνεμο στον ίδιο βαθμό που τον επιβραδύνει το κέντρο και η ρίζα του πτερυγίου. Αυτό εξασφαλίζει ότι ο άνεμος δεν θα περνά πολύ αργά (προκαλώντας αναταράξεις) ούτε πολύ γρήγορα (το οποίο θα αποτελούσε σπατάλη ενέργειας).

Επειδή η άκρη του πτερυγίου κινείται πιο γρήγορα από την ρίζα του, διέρχεται μέσα από μεγαλύτερο όγκο αέρα και ως αποτέλεσμα θα πρέπει να παράγει μια μεγαλύτερη δύναμη ανύψωσης. Η δύναμη ανύψωσης αυξάνεται με το τετράγωνο της ταχύτητας (σχετικής ταχύτητας) και έτσι ο παραγόμενη δύναμη ανύψωσης είναι αρκετά μεγάλη στην άκρη του πτερυγίου αφού σε εκείνη το σημείο η σχετική ταχύτητα του ανέμου λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της. Στη πραγματικότητα το πτερύγιο μπορεί να είναι στενότερο κοντά στην άκρη του από ότι είναι κοντά στη ρίζα του και η παραγόμενη ανυψωτική δύναμη να είναι αρκετά μεγάλη.



Σχήμα 1.26 – Σχήμα της κάτοψης ενός πτερυγίου [1.24]

Βιβλιογραφία

- [1.1] http://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power
- [1.2] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:OffshoreWindPower-CumulativeCapacity.PNG>
- [1.3] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Off-shore_Wind_Farm_Turbine.jpg
- [1.4] <http://www.top-alternative-energy-sources.com/vertical-axis-wind-turbine.html>
- [1.5] <http://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/27476>
- [1.6] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Savonius_wind_turbine.jpg
- [1.7] <http://www.reuk.co.uk/Darrieus-Wind-Turbines.htm>
- [1.8] <http://www.diebrennstoffzelle.de/alternativen/wind/vertikal.shtml>
- [1.9] <http://www.lorc.dk/offshore-wind-energy/towers/tower-welding>
- [1.10] Francesco Petrini, Hui Li, Franco Bontempi, "Basis of design and numerical modeling of offshore wind turbines", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 36, No. 5 (2010) 599-624
- [1.11] <http://www.lorc.dk/offshore-wind/foundations/what-is-the-support-structure>
- [1.12] <http://studentaccess.emporia.edu/~lgerber1/monopile.jpg>
- [1.13] http://www.lorc.dk/cgi-bin/lorc/uploads/images/Knowledge/Wind/Support%20structures/Horns-Rev-transition-piece_1large.jpg
- [1.14] <http://studentaccess.emporia.edu/~lgerber1/torpid.jpg>
- [1.15] http://www.lorc.dk/cgi-bin/lorc/uploads/images/Knowledge/Wind/Support%20structures/Tripod-terminology_large.jpg
- [1.16] <http://www.wind-energy-the-facts.org/en/part-i-technology/chapter-5-offshore/wind-farm-design-offshore/offshore-support-structures.html>
- [1.17] http://www.lorc.dk/cgi-bin/lorc/uploads/images/Knowledge/Wind/Support%20structures/Jacket-terminology_large.jpg
- [1.18] http://www.lorc.dk/cgi-bin/lorc/uploads/images/Knowledge/Wind/Support%20structures/Jacket-Transition-piece-terminology_large.jpg
- [1.19] Simon-Philippe Breton, Geir Moe, "Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America"
- [1.20] <http://studentaccess.emporia.edu/~lgerber1/gravity.jpg>
- [1.21] http://www.lorc.dk/cgi-bin/lorc/uploads/images/Knowledge/Wind/Support%20structures/Roedsand2-installing-gravity-based-support-structures_large.jpg
- [1.22] <http://www.alliantenergykids.com/EnergyandTheEnvironment/RenewableEnergy/022397>
- [1.23] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Yawanglecurve.jpg>
- [1.24] Gurit, "Wind energy handbook" - http://www.gurit.com/files/documents/2_Aerodynamics.pdf
- [1.25] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lift_curve.svg

Κεφάλαιο 2^ο

Υδροδυναμικά φορτία

2.1 Εισαγωγή στους κυματισμούς

Βασική πηγή για την κατανόηση και τη συγγραφή της λειτουργίας των κυματισμών αποτελεί το βιβλίο του Κ.Ι. Μουτζούρη με τίτλο “Θαλάσσια Υδραυλική” [2.1].

Η ταυτόχρονη δράση δυνάμεων απομακρύνσεως των υδάτινων σωματιδίων της θαλάσσιας μάζας από τη θέση ηρεμίας τους (γενεσιουργές δυνάμεις) και δυνάμεων επαναφοράς των σωματιδίων στις αρχικές θέσεις τους (επαναφέρουσες δυνάμεις), σε συνδυασμό με τη μεγάλη κινητικότητα των σωματιδίων, προκαλεί κάτω από ορισμένες συνθήκες τη δημιουργία κινήσεων ταλαντώσεως στα σωματίδια. Η συνισταμένη διαταραχή της θαλάσσιας μάζας από τις ταλαντώσεις των σωματιδίων οδηγεί στο θαλάσσιο κυματισμό.

Τα κυριότερα γενεσιουργά αίτια των ταλαντώσεων είναι ο άνεμος (ανεμογενείς κυματισμοί), οι σεισμικές δονήσεις (τσουνάμια), οι γρήγορες μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης (seiches) και η έλξη της σελήνης (παλίρροια).

Οι κυριότερες επαναφέρουσες δυνάμεις προέρχονται από τη βαρύτητα, τη δύναμη Coriolis και την επιφανειακή τάση. Η δύναμη Coriolis υπεισέρχεται στους κυματισμούς μεγάλης κλίμακας ενώ η επιφανειακή τάση υπεισέρχεται στους κυματισμούς μικρής κλίμακας με μήκος κύματος μερικά μόνο εκατοστά.

Η συνηθέστερη διάκριση στους κυματισμούς γίνεται με βάση την περίοδο των ταλαντώσεων των σωματιδίων. Για περιόδους μεγαλύτερες των 5min οι κυματισμοί ονομάζονται μεγάλης περιόδου. Οι κυματισμοί μικρότερων περιόδων – και ιδιαίτερα περιόδων μικρότερων από 30sec – ονομάζονται κυματισμοί μικρής περιόδου. Στους κυματισμούς μικρής περιόδου η γενεσιουργός δύναμη προέρχεται από τον άνεμο και η επαναφέρουσα δύναμη από τη βαρύτητα. Για το λόγο αυτό οι όροι “κυματισμοί μικρής περιόδου”, “κυματισμοί βαρύτητας” και “ανεμογενείς κυματισμοί” χρησιμοποιούνται για την ίδια κατηγορία κυματισμών.

Οι πιο κοινοί κυματισμοί στη φύση είναι οι ανεμογενείς κυματισμοί. Η δύναμη από την πνοή του ανέμου απομακρύνει τα υγρά σωματίδια από τη θέση ισορροπίας. Η φορά κινήσεων αντιστρέφεται από την επενέργεια της δυνάμεως βαρύτητας στα σωματίδια, οπότε αυτά τείνουν να επανέλθουν στην αρχική τους θέση. Οι αδρανειακές δυνάμεις τα επαναπομακρύνουν κ.ο.κ.

Μια άλλη διάκριση που μπορεί να γίνει στους κυματισμούς είναι σε δισδιάστατους και τρισδιάστατους. Στη πρώτη κατηγορία οι τροχιές των ταλαντούμενων σωματιδίων είναι επίπεδες ενώ στη δεύτερη τρισδιάστατες.

Ένας κυματισμός μεταδιδόμενος σε μια κατεύθυνση ονομάζεται προοδευτικός κυματισμός. Η επαλληλία δύο ή περισσότερων κυματισμών προοδευτικών κυματισμών δίνει κυματισμούς περισσότερο πολύπλοκης υφής. Η πολυπλοκότητα αυξάνει, αν οι διευθύνσεις μεταδόσεως και οι συχνότητες των κυματισμών είναι διαφορετικές. Από επαλληλία δύο κυματισμών της ίδιας διευθύνσεως και συχνότητας αλλά διαφορετικής φοράς μεταδόσεων προκύπτει ένας στάσιμος κυματισμός.

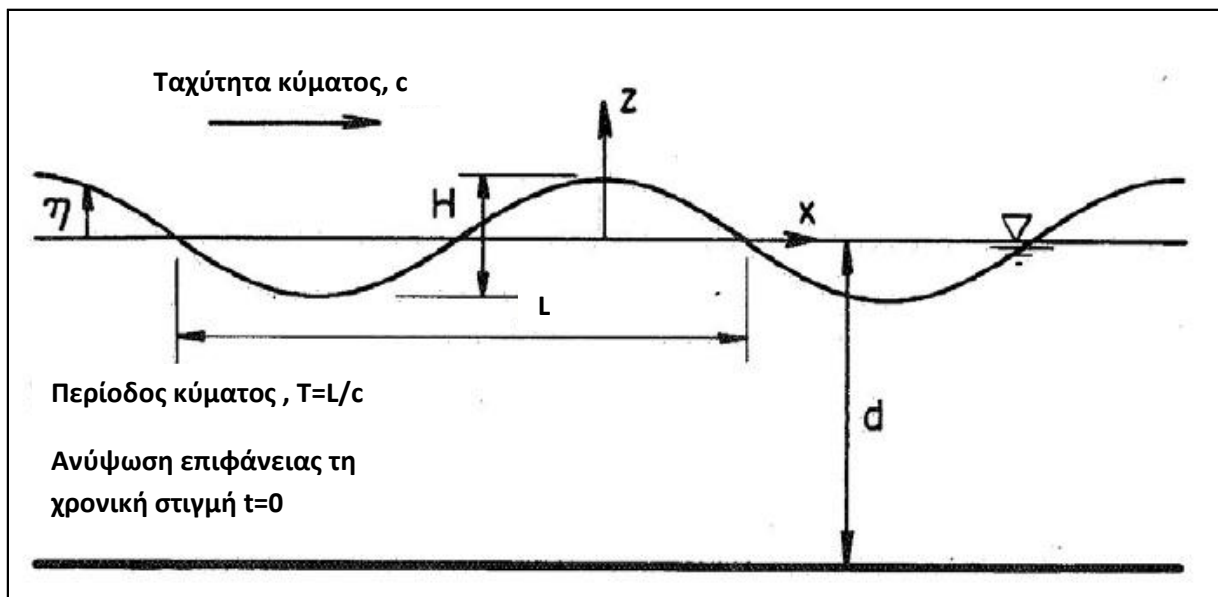
Τέλος οι κυματισμοί διακρίνονται σε αναπτυσσόμενους, ανεπτυγμένους και αποσβηνόμενους ανάλογα με το αν τα μέσα χαρακτηριστικά διαδοχικών ομάδων κυματισμών αυξάνουν, μένουν σταθερά ή μειώνονται.

Οι ορισμοί των σημαντικότερων γεωμετρικών και άλλων χαρακτηριστικών των δισδιάστατων μονοχρωματικών προοδευτικών ανεμογενών κυματισμών είναι οι εξής:

- Ύψος κύματος (H) είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής και της κοιλιάς του κύματος. Ισούται με το διπλάσιο του εύρους ταλαντώσεως των σωματιδίων
- Μήκος κύματος (L) είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο σωματιδίων που βρίσκονται στην ίδια φάση ταλαντώσεως. Μετράται κατά μήκος της διευθύνσεως μεταδόσεως
- Περίοδος κύματος (T) είναι ο χρόνος μιας πλήρους ταλάντωσης των σωματιδίων. Ορίζεται σαν το χρονικό διάστημα μεταξύ της διελεύσεως δυο διαδοχικών κορυφών κύματος από ένα ορισμένο σημείο.
- Μέτωπο κύματος είναι ένα επίπεδο κάθετο προς το επίπεδο ταλαντώσεως και εφαπτόμενο στη διατομή του κύματος
- Διεύθυνση μεταδόσεως είναι η κάθετη γραμμή προς το μέτωπο του κύματος
- Ταχύτητα κύματος (c) είναι η απόσταση που διανύεται από το μέτωπο του κύματος στη μονάδα του χρόνου. Εξ ορισμού είναι $c = L/T$
- Διατομή κύματος είναι η κατακόρυφη διατομή του κατά τη διεύθυνση μεταδόσεως
- Κορυφή κύματος είναι το υψηλότερο σημείο πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία
- Κοιλιά κύματος είναι το χαμηλότερο σημείο του κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία
- Συχνότητα κύματος είναι το αντίστροφο της περιόδου του κύματος: $f = 1/T$
- Γωνιακή ταχύτητα κύματος: $\omega = 2\pi/T$
- Σχετικό βάθος νερού: d/L
- Αριθμός κύματος: $k = 2\pi/L$

- ΣΗΥ είναι η ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία (Στάθμη Ηρεμούντος Ύδατος)
- Υψόμετρο επιφάνειας είναι η απόσταση ανάμεσα στη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας σε ηρεμία και της επιφάνειας του κύματος $z = \eta(x,y,t)$
- Βάθος πυθμένα (d) είναι η απόσταση ανάμεσα στη ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία και του πυθμένα της θάλασσας

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.1) απεικονίζονται κάποια από τα χαρακτηριστικά του κυματισμού:



Σχήμα 2.1 – Χαρακτηριστικά κυματισμού [2.2]

2.2 Ανεμογενείς κυματισμοί

Η δημιουργία, η διάδοση και η αλληλεπίδραση των ανεμογενών κυματισμών καθιστούν δύσκολη την θεωρητική αλλά και την αριθμητική περιγραφή τους. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση τους, προκειμένου να γίνει ο σχεδιασμός των παράκτιων λιμενικών έργων, είναι η στατιστική περιγραφή τους.

Η ενέργεια του ανέμου που πνέει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας μεταφέρεται στο νερό και παίρνει τη μορφή επιφανειακού ρεύματος και κυματισμού βαρύτητας. Το επιφανειακό ρεύμα δημιουργείται από τη διατμητική τάση που επιβάλλει η πνοή του ανέμου στην ελεύθερη επιφάνεια [2.3]. Ο κυματισμός βαρύτητας δημιουργείται από τις διακυμάνσεις του πεδίου της πίεσης που επιβάλλει η πνοή του ανέμου στην ελεύθερη επιφάνεια [2.3]. Προκειμένου να γίνει ο σχεδιασμός των παράκτιων λιμενικών έργων χρειάζεται η πλήρης περιγραφή του κυματισμού μέσα από το μοναδικό «χαρακτηριστικό» ύψος κύματος και τη μοναδική «χαρακτηριστική» περίοδο κύματος. Ο καθορισμός του «κύματος σχεδιασμού» γίνεται κυρίως με την ανάλυση κυματικών καταγραφών. Οι

κυματικές καταγραφές είναι σημειακές μετρήσεις της χρονικής μεταβολής της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για ένα χρονικό διάστημα αρκετών λεπτών. Οι μετρήσεις γίνονται συνήθως από πλωτήρα με επιταχυνσιόμετρο. Οι κυματικές καταγραφές δεν παρέχουν πληροφορίες για τη διεύθυνση των κυματισμών. Άλλες μέθοδοι συμπεριλαμβάνουν φωτογραφίες και ραντάρ από αεροπλάνα ή δορυφόρους.

Η ανάλυση των κυματικών καταγραφών γίνεται με δύο τρόπους [2.3]:

- Στατιστική ανάλυση της κυματικής καταγραφής απευθείας στο πεδίο χρόνου
- Φασματική ανάλυση της κυματικής καταγραφής στο πεδίο συχνοτήτων

Σε μια κυματική καταγραφή, το χαρακτηριστικό ύψος H_s του κυματισμού ισούται συνήθως με το ύψος H_{33} που είναι η μέση τιμή από το 1/3 των μεγαλύτερων τιμών της καταγραφής. Παρόμοια ορίζεται και η χαρακτηριστική περίοδος T_s του κυματισμού.

Το χαρακτηριστικό ύψος H_s , η χαρακτηριστική περίοδος T_s και το φάσμα του κυματισμού εξαρτώνται από:

- Την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας (W)
- Το μήκος αναπτύγματος του κυματισμού (F)
- Τη διάρκεια πνοής του ανέμου (t_d)

2.3 Βραχυπρόθεσμη φασματική πρόβλεψη κυματισμών

Για τον υπολογισμό του χαρακτηριστικού ύψους H_s και της χαρακτηριστικής περιόδου T_s του κυματισμού πρέπει να είναι γνωστά:

- Η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας (W)
- Το μήκος αναπτύγματος του κυματισμού (F)
- Η διάρκεια πνοής του ανέμου (t_d)

Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του κυματισμού υπάρχουν δύο μεθοδολογίες οι οποίες βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις για τον καθορισμό σχέσεων μεταξύ αδιάστατων παραμέτρων:

- Μεθοδολογία πρόβλεψης SMB
- Μεθοδολογία πρόβλεψης SPM-JONSWAP

Και οι σχέσεις είναι της μορφής:

$$\frac{gH_s}{W^2}, \frac{gT_s}{2\pi W} = f\left(\frac{gF}{W^2}, \frac{gt_d}{W}\right)$$

Στοιχεία για την ένταση (ταχύτητα) και τη διεύθυνση των ανέμων χορηγούνται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) σε μορφή στατιστικών αναλύσεων μετρήσεων ταχύτητας και διεύθυνσης πνοής ανέμων. Η κλίμακα Beaufort κατατάσσει τους ανέμους ανάλογα με την έντασή τους σε βαθμούς όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

Αριθμός Beaufort	W (m/s)	W (knots)	Περιγραφή
0	< 0,2	< 1	Νηνεμία
1	0,3 - 1,5	1 - 3	Αύρα
2	1,6 - 3,3	4 - 6	Ασθενής άνεμος
3	3,4 - 5,4	7 - 10	Λεπτός άνεμος
4	5,5 - 7,9	11 - 16	Μέτριος άνεμος
5	8,0 - 10,7	17 - 21	Λαμπρός άνεμος
6	10,8 - 13,8	22 - 27	Ισχυρός άνεμος
7	13,9 - 17,1	28 - 33	Σφοδρός άνεμος
8	17,2 - 20,7	34 - 40	Θυελλώδης άνεμος
9	20,8 - 24,4	41 - 47	Θύελλα
10	24,5 - 28,4	48 - 55	Ισχυρή θύελλα
11	28,5 - 32,6	56 - 63	Σφοδρή θύελλα
12 - 17	32,7 <	64 <	Τυφώνας

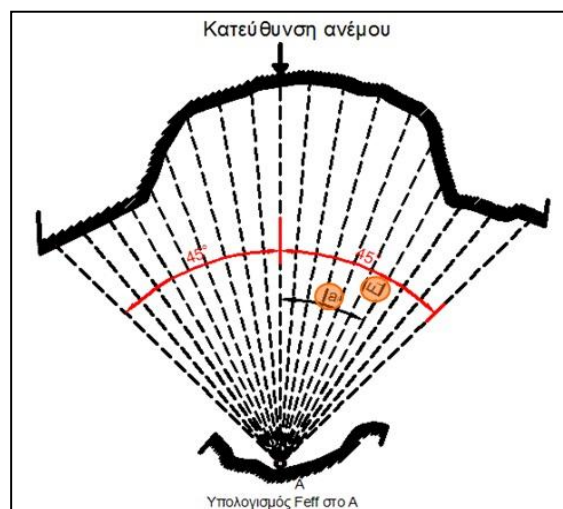
Σχήμα 2.2 - Κλίμακα Beaufort έντασης ανέμου [2.4]

(1 knot = 1 κόμβος = 1 ναυτικό μίλι ανά ώρα = 1,852 km/hr = 0,515 m/s)

Το μήκος αναπτύγματος F υπολογίζεται, για κάθε μια από τις οκτώ διευθύνσεις ανέμου, θεωρώντας τομέα γωνίας 90° γύρω από τη διεύθυνση του ανέμου σύμφωνα με την εξίσωση:

$$F = \frac{\sum_{i=-N}^N F_i \cos^2 \alpha_i}{\sum_{i=-N}^N \cos \alpha_i} \quad (2.1)$$

όπου F_i είναι το μήκος αναπτύγματος στη διεύθυνση με γωνία $\alpha_i = i \cdot \Delta\alpha$ ως προς τη διεύθυνση του ανέμου. Συνήθως $\Delta\alpha = 5^\circ$ και $N=9$ έτσι ώστε $-45^\circ \leq \alpha_i \leq +45^\circ$ (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 – Υπολογισμός μήκους αναπτύγματος F στο σημείο Α για τη συγκεκριμένη διεύθυνση ανέμου

2.3.1 Μεθοδολογία πρόβλεψης χαρακτηριστικών κυματισμού SMB

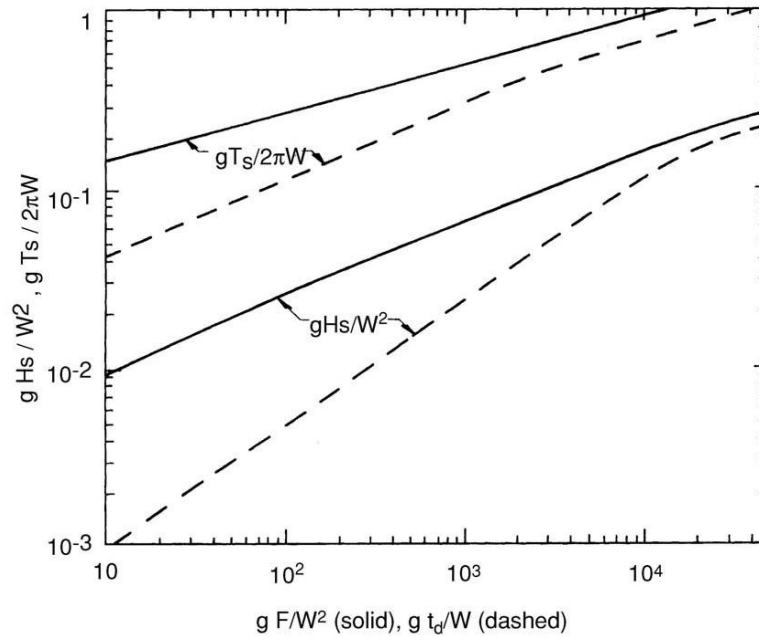
Το πιο διαδεδομένο μοντέλο βραχυπρόθεσμης περιγραφής της καταστάσεως διαταραχής της θαλάσσιας επιφάνειας είναι το μοντέλο SMB (Sverdrup – Munk – Bretschneider). Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο τα κύματα διαιρούνται σε τρεις κατηγορίες [2.5]:

- Στη πρώτη κατηγορία ανήκουν τα κύματα πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας. Δημιουργούνται από την πνοή του ανέμου μακράς διάρκειας κατά μήκος μεγάλου αναπτύγματος πελάγους
- Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα κύματα που δημιουργούνται από την μακρά πνοή ανέμου κατά μήκος περιορισμένου αναπτύγματος πελάγους. Τα κύματα αυτά είναι περιορισμένα από το μήκος αναπτύγματος
- Στη τρίτη κατηγορία ανήκουν τα κύματα που δημιουργούνται από την πνοή ανέμου σύντομης διάρκειας κατά μήκος μεγάλου αναπτύγματος πελάγους. Τα κύματα αυτά είναι περιορισμένα από τη διάρκεια πνοής του ανέμου

Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s καθώς και το μήκος κύματος L_0 μεγαλώνουν με την αύξηση της διάρκειας πνοής του ανέμου και του αναπτύγματος πελάγους.

Η βασική παραδοχή του μοντέλου SMB είναι ότι υπάρχει ένα κύμα, που κατά κάποιο τρόπο αντιπροσωπεύει τη διαταραχή της θαλάσσιας επιφάνειας, το οποίο και ονομάζεται χαρακτηριστικό. Αντιστοιχεί προσεγγιστικά με το φυσικό κύμα του οποίου το ύψος είναι δυνατό να εκτιμηθεί από την ακτή. Το ύψος του ισούται με το μέσο ύψος του 1/3 των υψηλότερων κυμάτων που εμφανίζονται.

Η μεθοδολογία βασίζεται στο νομογράφημα του Σχήματος 2.4 όπου για δεδομένες τιμές των gF/W^2 και gt_d/W προκύπτουν δύο ζεύγη τιμών H_s και T_s . Οι συνεχείς καμπύλες του σχήματος αντιστοιχούν σε περιορισμένους από το μήκος αναπτύγματος κυματισμούς ενώ οι διακεκομμένες καμπύλες αντιστοιχούν σε περιορισμένους από τη διάρκεια πνοής του ανέμου κυματισμούς. Το ζεύγος με τη μικρότερη τιμή χαρακτηριστικού ύψους κύματος H_s είναι το επικρατέστερο και ανάλογα με την προέλευσή του ο κυματισμός είναι περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος (gF/W^2) ή από τη διάρκεια πνοής του ανέμου (gt_d/W).



Σχήμα 2.4 – Αδιάστατες παράμετροι μεθοδολογίας SMB πρόβλεψης χαρακτηριστικού ύψους και χαρακτηριστικής περιόδου ανεμογενών κυματισμών [2.6]

Αν ο κυματισμός είναι περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος, τότε για δεδομένο μήκος αναπτύγματος κυματισμού (F) και δεδομένη ταχύτητα ανέμου (W) υπολογίζεται ο λόγος gF/W^2 . Στη συνέχεια, από τις συνεχείς καμπύλες του Σχήματος 2.5 διαβάζεται το πρώτο ζεύγος gH_s/W^2 και $gT_s/2\pi W$. Γνωρίζοντας την ταχύτητα του ανέμου (W) υπολογίζεται το χαρακτηριστικό ύψος H_s και η χαρακτηριστική περίοδο T_s του κυματισμού.

Αν ο κυματισμός είναι περιορισμένος από τη διάρκεια πνοής του ανέμου, τότε για δεδομένη διάρκεια πνοής του ανέμου (t_d) και δεδομένη ταχύτητα ανέμου (W) υπολογίζεται ο λόγος gt_d/W . Στη συνέχεια από τις διακεκομμένες καμπύλες του Σχήματος 2.5 διαβάζεται το δεύτερο ζεύγος gH_s/W^2 και $gT_s/2\pi W$. Γνωρίζοντας την ταχύτητα του ανέμου (W) υπολογίζεται το χαρακτηριστικό ύψος H_s και η χαρακτηριστική περίοδο T_s του κυματισμού.

Οι συνεχείς καμπύλες του Σχήματος 2.4, οι οποίες αντιστοιχούν σε περιορισμένους από το μήκος αναπτύγματος κυματισμούς δίνονται και σε αναλυτική μορφή:

$$\frac{gH_s}{W^2} = 0,283 \tanh \left(0,0125 \left(\frac{gF}{W^2} \right)^{0,42} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{gT_s}{2\pi W} = 1,2 \tanh \left(0,077 \left(\frac{gF}{W^2} \right)^{0,25} \right) \quad (2.3)$$

Η ελάχιστη κρίσιμη διάρκεια πνοής του ανέμου t_{min} η οποία προκαλεί κυματισμούς περιορισμένους από το μήκος αναπτύγματος δίνεται σε αναλυτική μορφή:

$$\frac{gt_{min}}{W} = 6,5882 \exp \left[\left(0,0161 \ln^2 \left(\frac{gF}{W^2} \right) - 0,3692 \ln \left(\frac{gF}{W^2} \right) + 2,2024 \right)^{0,5} + 0,8798 \ln \left(\frac{gF}{W^2} \right) \right] \quad (2.4)$$

Γνωρίζοντας το μήκος αναπτύγματος του κυματισμού (F) και την ταχύτητα του ανέμου (W) υπολογίζεται από την εξίσωση 2.4 ο λόγος $gt_{\min}/W$ και στη συνέχεια υπολογίζεται ο χρόνος $t_{\min}$.

1. Αν $t_d > t_{\min}$ τότε ο κυματισμός είναι περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος και με δεδομένο το μήκος αναπτύγματος (F) και τη ταχύτητα του ανέμου (W) από τις σχέσεις 2.2 και 2.3 υπολογίζεται το χαρακτηριστικό ύψος H_s και η χαρακτηριστική περίοδο T_s του κυματισμού

2. Αν $t_d < t_{\min}$ τότε ο κυματισμός είναι περιορισμένος από τη διάρκεια πνοής του ανέμου. Σε αυτή τη περίπτωση ορίζεται ισοδύναμο μήκος αναπτύγματος $F_{eq} < F$ τέτοιο ώστε:

$$\frac{gt_d}{W} = 6,5882 \exp \left[\left(0,0161 \ln^2 \left(\frac{gF_{eq}}{W^2} \right) - 0,3692 \ln \left(\frac{gF_{eq}}{W^2} \right) + 2,2024 \right)^{0,5} + 0,8798 \ln \left(\frac{gF_{eq}}{W^2} \right) \right] \quad (2.5)$$

Γνωρίζοντας τη διάρκεια πνοής του ανέμου t_d επιλύεται η εξίσωση 2.5 και προκύπτει το ισοδύναμο μήκος αναπτύγματος F_{eq} . Με δεδομένο το μήκος αναπτύγματος (F_{eq}) και τη ταχύτητα του ανέμου (W) από τις σχέσεις 2.2 και 2.3 υπολογίζεται το χαρακτηριστικό ύψος H_s και η χαρακτηριστική περίοδο T_s του κυματισμού

3. Το ζεύγος με τη μικρότερη τιμή χαρακτηριστικού ύψους κύματος H_s είναι το επικρατέστερο και ανάλογα με την προέλευσή του ο κυματισμός είναι περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος (gF/W^2) ή από τη διάρκεια πνοής του ανέμου (gt_d/W).

2.4 Επιδράσεις του πυθμένα

Ο θαλάσσιος πυθμένας επιδρά στους κυματισμούς. Η επίδραση εκδηλώνεται κατά κύριο λόγο στην υφή και μορφή των κυμάτων καθώς και στη διεύθυνση μεταδόσεως. Η επίδραση του πυθμένα γίνεται αισθητή από τα κύματα όταν μειωθεί το βάθος του νερού. Κατά τις θεωρίες κυμάτων, για βάθη μεγαλύτερα του μισού μήκους κύματος η επίδραση είναι αμελητέα. Οι κυριότερες μορφές επιδράσεως του πυθμένα στους θαλάσσιους κυματισμούς είναι οι παραμορφώσεις, η θραύση και η διάθλαση των κυμάτων.

2.4.1 Παραμορφώσεις της διατομής του κύματος

Η διατομή του κύματος μεταβάλλεται ριζικά στη περιοχή των μικρών σχετικών βαθών d/L . Οι σημαντικότερες μεταβολές σε μια διατομή είναι η μείωση του μήκους κύματος, η μείωση και στη συνέχεια η αύξηση του ύψους κύματος, η αύξηση της καμπυλότητας, η εμφάνιση υψηλότερων αρμονικών, η σταδιακή μετατροπή της ημιτονοειδούς διατομής σε τροχοειδή διατομή και στη συνέχεια σε διατομή μακρού κύματος (κύμα σε ρηχό νερό).

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 βαθών υδάτων ($d/L > 0,5$). Συγκεκριμένα:

- Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s ισούται με το ύψος κύματος στη περιοχή των βαθών 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 βαθών υδάτων: $L_o = \frac{gT^2}{2\pi}$

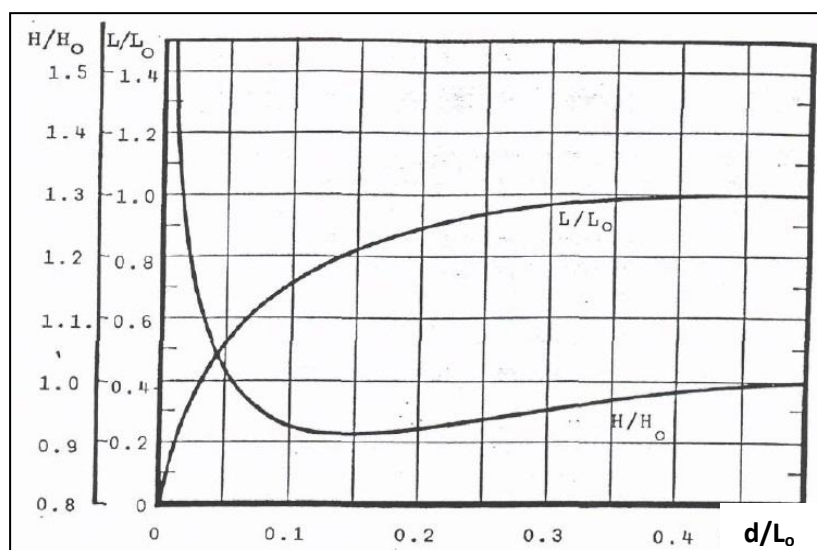
Το μήκος κύματος (L) και το ύψος κύματος (H) μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια μεταδόσεως του κυματισμού σε κεκλιμένο πυθμένα. Μια σχετικά απλή μέθοδος υπολογισμού των H και L σε ένα τυχαίο βάθος πυθμένα d , σε συνάρτηση με τα H_o και L_o είναι η ενεργειακή μέθοδος. Βασίζεται στη παραδοχή ότι η ανάκλαση της ενέργειας του κυματισμού από τον πυθμένα και οι λοιπές απώλειες μεταξύ των εξεταζόμενων βαθών είναι αμελητέες. Ισχύει στη περιοχή μεταξύ της ανοικτής θάλασσας και της θραύσεως.

Από το γράφημα του Σχήματος 2.5 και γνωρίζοντας:

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

Προκύπτουν:

- Το ύψος κύματος του κυματισμού που φτάνει στο έργο (H)
- Το μήκος κύματος του κυματισμού που φτάνει στο έργο (L)



Σχήμα 2.5 – Μεταβολές του μήκους και του ύψους κύματος σε συνάρτηση με το βάθος του πυθμένα [2.7]

2.5 Επιλογή θεωρίας κυματισμού

Το σχετικό βάθος νερού είναι μια σημαντική παράμετρος και χαρακτηρίζει τις θεωρίες των κυμάτων. Η θαλάσσια περιοχή χαρακτηρίζεται από το σχετικό βάθος, που βέβαια δεν είναι μόνο συνάρτηση του βάθους της (d) αλλά και του μήκους κύματος (L). Οι κατηγορίες που διακρίνονται είναι οι εξής:

- Βαθιά νερά για σχετικό βάθος νερού: $\frac{d}{L} \geq 0,50$
- Ενδιάμεσα νερά για σχετικό βάθος νερού: $0,04 \leq \frac{d}{L} \leq 0,50$
- Ρηχά νερά για σχετικό βάθος νερού: $\frac{d}{L} \leq 0,04$

Οι μαθηματικές θεωρίες περιγραφής των θαλάσσιων κυματισμών κατατάσσονται ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη παράμετρο και τις παραδοχές [2.8]:

- Για μικρά ύψη κύματος εισάγεται σαν μικρή παράμετρος ο λόγος H/L με πεδίο ισχύος όλο το φάσμα των βαθών d . Η αντίστοιχη θεωρία ονομάζεται "θεωρία κύματος απειροστού ύψους" ή "θεωρία Airy" ή "θεωρία Stokes 1^{ης} τάξεως"
- Για σχετικά μεγαλύτερα ύψη κύματος οι σπουδαιότερες από τις υφιστάμενες θεωρίες κύματος πεπερασμένου ύψους είναι οι παρακάτω:
 1. Θεωρία Stokes (2^{ης}, 3^{ης} και ανωτέρων τάξεων) στην οποία χρησιμοποιείται ακόμη σαν μικρή παράμετρος ο λόγος H/L
 2. Θεωρία κύματος σε μικρό βάθος νερού στην οποία χρησιμοποιείται σαν παράμετρος ο λόγος d/L
 3. Θεωρία μοναχικού κύματος
 4. Θεωρία ελλειπτικού κύματος

Πέραν της μικρής παραμέτρου, κάθε θεωρία έχει ένα ορισμένο πεδίο εφαρμογής. Ένα πρώτο κριτήριο βασίζεται στις τιμές του σχετικού βάθους d/L [2.9]:

- Η θεωρία Airy εφαρμόζεται για όλες τις τιμές d/L
- Η θεωρία Stokes υψηλότερης τάξεως εφαρμόζεται για ενδιάμεσα σχετικά βάθη: $d/L > 0,10$
- Οι θεωρίες μοναχικού κύματος, κύματος σε μικρό βάθος νερού και ελλειπτικού κύματος εφαρμόζονται για μικρά σχετικά βάθη: $d/L < 0,02$

Οι θεωρίες Airy και Stokes δεν είναι για μικρά σχετικά βάθη d/L . Στις περιοχές μικρών και πολύ μικρών τιμών d/L οι λοιπές θεωρίες προβλέπουν καλύτερα τα χαρακτηριστικά της ροής. Η θεωρία Airy είναι η απλούστερη και πιθανόν η σημαντικότερη δεδομένου ότι δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε ένα ευρύ φάσμα τιμών d/L . Η θεωρία Stokes 1^{ης} τάξεως συμπίπτει με τη θεωρία Airy. Στις υψηλότερες της τάξεις εισάγει πρόσθετους όρους που κάθε ένας βελτιώνει την ακρίβεια του προηγούμενου.

Ο Νορβηγικός κανονισμός θαλάσσιων ανεμογεννητριών (Design of Offshore Wind Turbine Structures DNV-OS-J101) προτείνει την 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:

- Wave steepness parameter: $S = 2\pi \frac{H}{gT^2} = \frac{H}{L_o}$
- Shallow water parameter: $\mu = 2\pi \frac{d}{gT^2} = \frac{d}{L_o}$
- Ursell parameter: $U_r = \frac{H}{k_o^2 d^3} = \frac{1}{4\pi^2} \frac{S}{\mu^3}$

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. Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζονται τα όρια εφαρμογής της κάθε θεωρίας κυματισμού ανάλογα με τις τιμές των αδιάστατων παραμέτρων.

Θεωρία κυματισμού	Εφαρμογή		
	Βάθος	Όρια εφαρμογής	
Θεωρία Airy	Βαθιά και ρηχά νερά	$S < 0,006$	$S/\mu < 0,03$
Θεωρία Stokes 2 ^{ης} τάξης	Βαθιά νερά	$U_r < 0,65$	$S < 0,04$
Θεωρία Stokes 5 ^{ης} τάξης	Βαθιά νερά	$U_r < 0,65$	$S < 0,14$
Θεωρία ελλειπτικού κύματος	Ρηχά νερά	$U_r < 0,65$	$\mu < 0,125$

Σχήμα 2.6 – Όρια εφαρμογής της κάθε θεωρίας κυματισμού [2.10]

2.5.1 Θεωρία κύματος απειροστού ύψους (θεωρία Airy)

Η θεωρία Airy είναι η πιο απλή θεωρία κυματισμού η οποία δίνει μια γραμμικοποιημένη περιγραφή της διάδοσης των κυμάτων βαρύτητας επί της επιφάνειας ενός ομοιογενούς στρώματος ρευστού. Η θεωρία υποθέτει ότι το υγρό στρώμα έχει ένα ομοιόμορφο μέσο βάθος και ότι η ροή του ρευστού είναι ασυμπίεστη και αστρόβιλη. Η θεωρία αυτή ισχύει όταν το ύψος του κύματος (H) είναι πολύ μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος (L) και το βάθος του πυθμένα της θάλασσας (d). Η θεωρία κύματος απειροστού ύψους ισχύει για όλα τα σχετικά βάθη d/L.

Η ελεύθερη επιφάνεια του νερού δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.6)$$

Η εξίσωση (2.6) είναι περιοδική ως προς x και t . Η σταθερά περιοδικότητας ως προς x είναι ο αριθμός κύματος k ($=2\pi/L$), όπου L είναι το μήκος κύματος, H είναι το ύψος κύματος και ω είναι η γωνιακή ταχύτητα του κύματος.

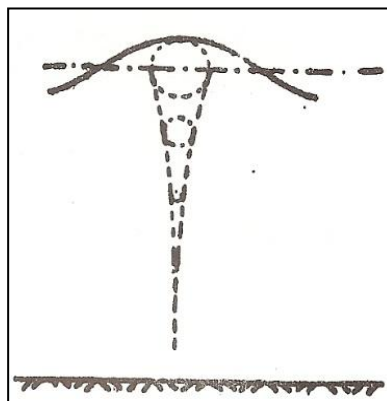
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.7) δίνονται οι τιμές των υπερβολικών συναρτήσεων στη περίπτωση των μικρών ($d/L < 0,05$) και των μεγάλων ($d/L > 0,5$) σχετικών βαθών. Οι παραστάσεις απλοποιούνται λόγω των ασυμπτωτικών τιμών στις οποίες τείνουν οι υπερβολικές συναρτήσεις.

	$\frac{d}{L} < 0,05$	$\frac{d}{L} > 0,5$
$\tanh$	$\frac{2\pi d}{L}$	$\frac{1}{2}e^{\frac{2\pi d}{L}}$
$\sinh \frac{2\pi d}{L}$	$\frac{2\pi d}{L}$	$\frac{1}{2}e^{\frac{2\pi d}{L}}$
$\cosh \frac{2\pi d}{L}$	1	$\frac{1}{2}e^{\frac{2\pi d}{L}}$

Σχήμα 2.7 – Ασυμπτωτικές τιμές υπερβολικών συναρτήσεων [2.11]

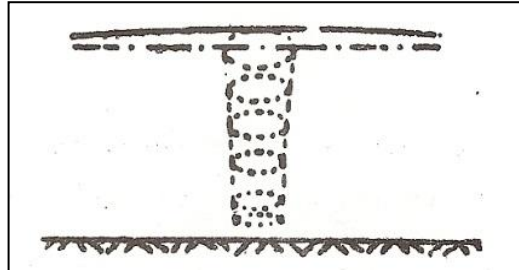
Κάτω από την επιφάνεια υπάρχει μια κίνηση ρευστού που συνδέεται με την κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας. Τα υγρά σωματίδια διαγράφουν τροχιές σε μια περίοδο κύματος, η εξίσωση των οποίων επιτυγχάνεται με μια ολοκλήρωση σε μια περίοδο T των εξισώσεων των ταχυτήτων u και v . Για το κύμα απειροστού ύψους οι τροχιές είναι κλειστές, που σημαίνει ότι ένα υγρό σωματίδιο διαγράφει μια τροχιά και επανέρχεται στην αρχική του θέση μετά από χρόνο T . Καθώς το κύμα διαδίδεται, τα υγρά σωματίδια ακολουθούν την τροχιά τους (ουσιαστικά ταλαντώνονται) γύρω από τη μέση θέση τους. Κατά συνέπεια, κατά τη θεωρία κύματος απειροστού ύψους δεν υφίσταται μετακίνηση μάζας λόγω κυματικής κινήσεως. Με τη κίνηση διάδοσης του κύματος, τα ρευστά σωματίδια μεταφέρουν ενέργεια στη κατεύθυνση διάδοσης των κυμάτων χωρίς αυτά να έχουν μια μέση ταχύτητα.

Στη περιοχή των βαθιών νερών ($d/L > 0,5$) οι τροχιές των ρευστών σωματιδίων είναι κυκλικές. Η ακτίνα τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8 – Τροχιές σωματιδίων στα βαθιά νερά [2.12]

Στις περιοχές με $d/L < 0,50$ οι τροχιές γίνονται ελλειπτικές. Στην ελεύθερη επιφάνεια ο μικρός άξονας της ελλείψεως έχει μήκος ίσο με H και ο μεγάλος άξονας (μέγιστη οριζόντια μετατόπιση του σωματιδίου) με $H \cdot \coth kd$. Από την επιφάνεια προς τον πυθμένα οι ελλείψεις πλατύνονται και τείνουν σε ευθύγραμμα τμήματα μήκους $H/\sinh kd$. Οι ελλείψεις γίνονται περισσότερο πεπλατυσμένες όταν μειώνεται το βάθος d/L (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9 – Τροχιές σωματιδίων σε ρηχότερα νερά [2.13]

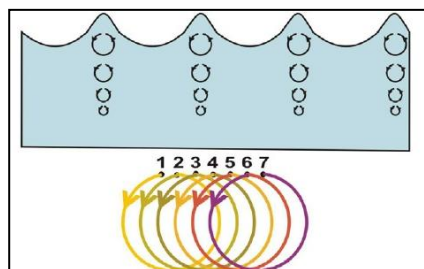
2.5.2 Θεωρία Stokes

Ο Stokes παρατήρησε ότι η θεωρία του Airy δεν είναι αρκετή για να εξηγήσει τις περιπτώσεις στις οποίες έχουμε μεταφορά μάζας κατά τη διεύθυνση μετάδοσης των κυμάτων. Η ανεπάρκεια της θεωρίας του Airy προέρχεται από την προϋπόθεση ότι το ύψος του κύματος (H) πρέπει να είναι πολύ μικρότερο από το μήκος του (L). Αυτό δεν συμβαίνει πάντα στη πράξη και έτσι ο Stokes έλαβε υπόψη στους υπολογισμούς του και το ύψος του κύματος (H). Η θεωρία Stokes ισχύει για σχετικά βάθη $d/L > 0,1$.

Η ελεύθερη επιφάνεια του νερού δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta + \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} [2 + \cosh 2kd] \cos 2\theta \quad (2.7)$$

Κατά τη θεωρία Stokes οι κινήσεις των υγρών σωματιδίων είναι μεν κυκλικές τροχιές (όπως στη θεωρία Airy) αλλά τα σωματίδια δεν διαγράφουν πλήρεις κύκλους σε μια πλήρη περίοδο (T), αλλά τόξα λίγο μικρότερα από 360° . Το αποτέλεσμα είναι τα υγρά σωματίδια κάθε φορά που διαγράφουν μια πλήρη τροχιά της ταλάντωσης να σταματούν λίγο πιο μπροστά από εκεί που ξεκίνησαν. Με αυτό τον τρόπο γίνεται σταδιακή μετάδοση μάζας κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10 – Κύματα Stokes (α) Η ταλάντωση κατά Stokes έχει οξύτερες κορυφές και πλατύτερες κοιλίες (β) Η πορεία ενός σωματιδίου μετά από διέλευση έξι ταλαντώσεων όπου από τη θέση 1 μετατοπίστηκε στη θέση 7

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.11) παρουσιάζονται οι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του κυματισμού στη περίπτωση της θεωρίας Airy (για ενδιάμεσα νερά $d/L < 0,5$ και για βαθιά νερά $d/L > 0,5$) και στη περίπτωση της θεωρίας Stokes 2^{ης} τάξης.

Parameter	Airy wave theory		Stokes second-order wave theory
	General water depth	Deep water	
Velocity potential, ϕ	$\frac{\pi H}{kT} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$ = $\frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \sin \theta$	$\frac{\pi H}{kT} e^{kz} \sin \theta$ $\frac{gH}{2\omega} e^{kz} \sin \theta$	$\phi_i + \frac{3}{8} \frac{\pi H}{kT} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)] \sin 2\theta}{\sinh^4(kd)}$ 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	$\frac{H}{2} \cos \theta$	$\frac{H}{2} \cos \theta$	$\eta_i + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} [2 + \cosh 2kd] \cos 2\theta$
Horizontal particle displacement, ξ	$-\frac{H}{2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$	$-\frac{H}{2} e^{kz} \sin \theta$	$\xi_i + \frac{H}{8} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{1}{\sinh^2(kd)} \left\{ 1 - \frac{3 \cosh[2k(z+d)]}{2 \sinh^2(kd)} \right\} \sin 2\theta$ + $\frac{H}{4} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^2(kd)} (\omega t)$
Vertical particle displacement, ζ	$-\frac{H}{2} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$	$\frac{H}{2} e^{kz} \cos \theta$	$\zeta_i + \frac{3H}{16} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$
Horizontal particle velocity, u	$\frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$	$\frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos \theta$	$u_i + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$
Vertical particle velocity, w	$\frac{\pi H}{T} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$	$\frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin \theta$	$w_i + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin 2\theta$
Horizontal particle acceleration, $\dot{u}$	$\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin \theta$	$\frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \sin \theta$	$\dot{u}_i + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin 2\theta$
Vertical particle acceleration, $\dot{w}$	$-\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos \theta$	$-\frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \cos \theta$	$\dot{w}_i - \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{\lambda} \right) \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta$
Subsurface pressure, p	$-\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \cos \theta$	$-\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H e^{kz} \cos \theta$	$p_i + \frac{3}{4} \rho g H \frac{\pi H}{\lambda \sinh(2kd)} \left\{ \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^2(kd)} - \frac{1}{3} \right\} \cos 2\theta$ - $\frac{1}{4} \rho g H \frac{\pi H}{\lambda \sinh(2kd)} \{ \cosh[2k(z+d)] - 1 \}$
Group velocity, c_g	$\frac{c}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right]$	$\frac{c}{2}$	$(c_g)_i$
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	Ec_g	$\frac{1}{2} Ec$	Ec_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 i denotes linear small-amplitude theory.

Σχήμα 2.11 – Χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος σύμφωνα με τη θεωρία Airy και σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης [2.14]

2.6 Θαλάσσια ρεύματα

Οι κυριότεροι παράγοντες που συντελούν στη δημιουργία θαλάσσιων ρευμάτων είναι:

1. Ο άνεμος. Πρόκειται για σημαντικό παράγοντα γιατί εκτός του ότι μετέχει ενεργά στη γένεση των κυμάτων, παρασύρει ταυτόχρονα κατά τη διεύθυνση της πνοής του και τις επιφανειακές μάζες νερού. Επομένως από τη δράση των κυμάτων δημιουργούνται ρεύματα.
2. Η παλίρροια. Συνιστά μια άλλη αιτία δημιουργίας των ρευμάτων που μπορεί βέβαια να είναι μικρής σημασίας για τις ανοικτές θαλάσσιες λεκάνες, αλλά όταν λαμβάνει χώρα σε κλειστές λεκάνες με ιδιαίτερα χαρακτηριστική μορφολογία, τότε είναι δυνατό να προκαλέσει πολύ ισχυρά ρεύματα κατά τις φάσεις της αμπωτίδας και της πλημμυρίδας.
3. Οι διαφορές της υδροστατικής πίεσης. Και αυτές επίσης δημιουργούν θαλάσσια ρεύματα, λόγω της παρουσίας διαφορετικών τιμών πυκνοτήτων, που προκαλούν τη μετακίνηση της πυκνότερης μάζας προς την περιοχή της αραιότερης.
4. Η περιστροφή της γης. Ο παράγοντας αυτός επηρεάζει την πορεία και την εξέλιξη των θαλάσσιων ρευμάτων, όπως άλλωστε αυτός εκφράζεται από τις δυνάμεις Coriolis.

Η ταχύτητα των ρευμάτων μεταβάλλεται με το βάθος της θάλασσας. Στη πραγματικότητα η ταχύτητα των ρευμάτων μεταβάλλεται στο χώρο και στο χρόνο. Στις περισσότερες εφαρμογές η ταχύτητα των ρευμάτων μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πεδίο σταθερής ροής όπου το διάνυσμα της ταχύτητας (μέγεθος και κατεύθυνση) είναι μόνο συνάρτηση του βάθους.

Η συνολική ταχύτητα του ρεύματος σε μια δεδομένη θέση (x,y) μπορεί να ληφθεί ως το διανυσματικό άθροισμα της κάθε συνιστώσας του ρεύματος:

- Ταχύτητα των ρευμάτων που δημιουργούνται εξαιτίας της πνοής του ανέμου
- Ταχύτητα των ρευμάτων που δημιουργούνται εξαιτίας της παλίρροιας

$$v_{\text{ρευ}}(z) = v_{\text{ρευ, ανε}}(z) + v_{\text{ρευ, παλ}}(z) + \dots \quad (2.8)$$

όπου:

- $v_{\text{ρευ}}(z)$ είναι η συνολική ταχύτητα του ρεύματος στο βάθος z
- $v_{\text{ρευ, ανε}}(z)$ είναι η ταχύτητα του ρεύματος στο βάθος z που δημιουργείται εξαιτίας της πνοής του ανέμου
- $v_{\text{ρευ, παλ}}(z)$ είναι η ταχύτητα του ρεύματος στο βάθος z που δημιουργείται εξαιτίας της παλίρροιας

Η μεταβολή της ταχύτητας των ρευμάτων που δημιουργούνται εξαιτίας της πνοής του ανέμου μπορεί να θεωρηθεί ένα γραμμικό προφίλ της μορφής:

$$v_{\rho\epsilon\upsilon,\alpha\nu\epsilon}(z) = v_{\rho\epsilon\upsilon,\alpha\nu\epsilon}(0) \left(\frac{d_o + z}{d_o} \right) \quad \text{for } -d_o \leq z \leq 0 \quad (2.9)$$

όπου:

- $v_{\rho\epsilon\upsilon,\alpha\nu\epsilon}(z)$ είναι η ταχύτητα του ρεύματος στο βάθος z που δημιουργείται εξαιτίας της πνοής του ανέμου
- z είναι η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια με θετική φορά προς τα πάνω
- $v_{\rho\epsilon\upsilon,\alpha\nu\epsilon}(0)$ είναι η ταχύτητα του ρεύματος που παράγεται από τον άνεμο στο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας
- d_o είναι ένα ύψος αναφοράς που δηλώνει ότι η επιρροή του ανέμου στη δημιουργία ρευμάτων εξαλείφεται μετά από κάποιο βάθος ($d_o=50\text{m}$)

Η ταχύτητα του ρεύματος (που δημιουργείται εξαιτίας της πνοής του ανέμου) στο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας είναι ίση με:

$$v_{\rho\epsilon\upsilon,\alpha\nu\epsilon}(0) = k \cdot U_{0,10\text{m}} \quad (2.10)$$

όπου:

- $U_{0,10\text{m}}$ είναι η μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια 1 ώρας σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας
- k είναι ένας μειωτικός συντελεστής που κυμαίνεται από 0,015 έως 0,03

Στη περίπτωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών η ταχύτητα του ανέμου μετράται από ανεμόμετρα που είναι εγκατεστημένα σε διάφορα ύψη πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η μέση χρονική διάρκεια των μετρήσεων είναι συνήθως 10 λεπτά. Κατά τη διάρκεια κάθε δεκαλέπτου υπολογίζεται η μέση ταχύτητα του ανέμου, η μέγιστη και η ελάχιστη ταχύτητα. Μέσα σε κάθε δεκάλεπτο η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται σταθερή και ίση με την μέση ταχύτητα του δεκαλέπτου που καταγράφει του ανεμόμετρο.

Στα πλαίσια της εργασίας η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας (W) θεωρείται ότι είναι ίση με τη μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας ($U_{10,10\text{m}}$).

Ο παρακάτω τύπος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας του ανέμου (U), μέσης χρονικής διάρκειας (T) σε ύψος (z) πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας:

$$U(T,z) = U_{10,10m} \left(1 + 0,137 \ln \frac{z}{h} - 0,047 \ln \frac{T}{T_{10}} \right) \quad (2.11)$$

όπου $h=10m$, $T_{10}=10$ λεπτά και $U_{10,10m}$ είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου σε ύψος $h=10m$ από την επιφάνεια της θάλασσας.

Αν στη σχέση 2.11 θεωρήσουμε $z=10m$ και $T=60$ λεπτά προκύπτει η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια 1 ώρας σε ύψος 10m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας ($U_{0,10m}$).

2.7 Υδροδυναμικά φορτία σε κυλινδρικούς πυλώνες

Η υδροδυναμική δύναμη που ασκείται από τον κυματισμό σε κυλινδρικό πυλώνα προκύπτει από την εξίσωση Morison η οποία δίνει τη συνολική οριζόντια δύναμη F ανά μονάδα βάθους [2.15]

$$\frac{dF}{dz} = \frac{dF_I}{dz} + \frac{dF_D}{dz} = C_M \rho A \frac{du}{dt} + C_D \frac{1}{2} \rho D |u|u \quad (2.12)$$

όπου:

F_I 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]

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

Η δύναμη αδράνειας υπολογίζεται σύμφωνα με την παραδοχή μη παραμόρφωσης του πεδίου ροής από την παρουσία του πυλώνα και η δύναμη αντίστασης υπολογίζεται σύμφωνα με την παραδοχή ότι τα οριακά στρώματα που δημιουργούνται στην επιφάνεια του πυλώνα, λόγω της συνεκτικότητας της ροής, είναι πολύ λεπτά συγκριτικά με τις διαστάσεις της διατομής του πυλώνα.

Ο συντελεστής αδράνειας C_M και ο συντελεστής αντίστασης C_D εξαρτώνται από το σχήμα της διατομής του πυλώνα και τους αδιάστατους αριθμούς Reynolds

$$Re = \frac{\rho u_{\max} D}{\mu} = \frac{u_{\max} D}{\nu} \quad (2.13)$$

και Keylegan-Carpenter

$$KC = \frac{u_{\max} T}{D} \quad (2.14)$$

όπου:

T είναι η περίοδος του προσπίπτοντος κύματος [s]

$u_{\max}$ είναι η μέγιστη οριζόντια ταχύτητα των ρευστών σωματιδίων στη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας [m/s^2]

μ είναι η συνεκτικότητα του ρευστού [$\frac{kg}{ms}$]

ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού [m^2/s]

Ο συντελεστής αντίστασης C_{DS} για σταθερή κατάσταση ροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βάση για τον υπολογισμό των C_D και C_M . Ο συντελεστής αντίστασης C_{DS} για σταθερή κατάσταση ροής εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας του δομικού μέλους και μπορεί να θεωρηθεί ίσος με:

$$C_{DS} = \begin{cases} 0,65 & \text{για } k/D < 10^{-4} \text{ (λεία)} \\ \frac{29 + 4 \log(k/D)}{20} & \text{για } 10^{-4} < \frac{k}{D} < 10^{-2} \\ 1,05 & \text{για } k/D > 10^{-2} \text{ (τραχεία)} \end{cases} \quad (2.15)$$

Στη σχέση (2.15) k είναι η επιφανειακή τραχύτητα και D είναι η διάμετρος του δομικού μέλους. Η επιφανειακή τραχύτητα ανάλογα με το είδος του υλικού ισούται (Σχήμα 2.12):

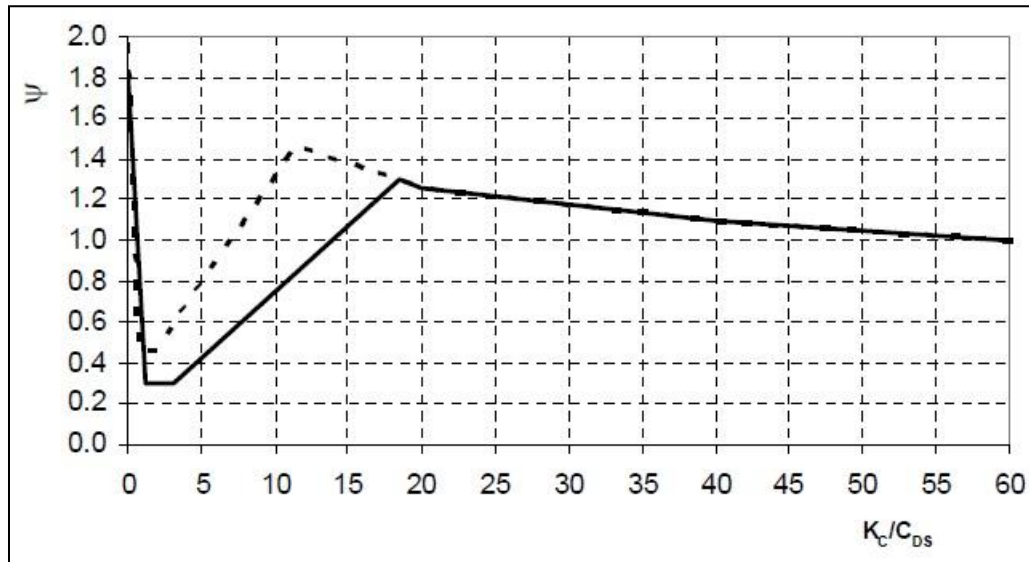
Υλικό	k (m)
Χάλυβας (χωρίς επίστρωση)	$5 \cdot 10^{-5}$
Χάλυβας (με επίστρωση)	$5 \cdot 10^{-6}$
Χάλυβας (ιδιαίτερα διαβρωμένος)	$3 \cdot 10^{-3}$
Σκυρόδεμα	$3 \cdot 10^{-3}$
Ανάπτυξη θαλάσσιας βλάστησης	$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$

Σχήμα 2.12 – Τιμές της επιφανειακής τραχύτητας k ανάλογα με το είδος της προβαλλόμενης επιφάνειας [2.16]

Ο συντελεστής αντίστασης C_D εξαρτάται από τον αριθμό C_{DS} και τον αριθμό KC . Μπορεί να θεωρηθεί ίσος με:

$$C_D = C_{DS} \cdot \psi(C_{DS}, KC) \quad (2.16)$$

Όπου ο συντελεστής ψ μπορεί να διαβαστεί από το Σχήμα 2.13. Για ενδιάμεσες τραχύτητες μεταξύ λείας και τραχείας επιφάνειας, ο συντελεστής ψ μπορεί να υπολογιστεί με γραμμική παρεμβολή μεταξύ της καμπύλης που αντιστοιχεί σε λείες επιφάνειες και της καμπύλης που αντιστοιχεί σε τραχείς επιφάνειες.



Σχήμα 2.13 – Συντελεστής ψ για λείες επιφάνειες(συνεχής γραμμή)και τραχείς επιφάνειες(διακεκομμένη γραμμή)[2.17]

Για $K_C < 3$, θεωρείται $C_M = 2,0$. Για $K_C > 3$, ο συντελεστής αδράνειας C_M μπορεί να θεωρηθεί ίσος με:

$$C_M = \max\{2,0 - 0,044 \cdot (K_C - 3) ; 1,6 - (C_{Ds} - 0.65)\} \quad (2.17)$$

2.8 Παραμετρική ανάλυση υδροδυναμικών φορτίων

Σε αυτή τη παράγραφο γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης της επιρροής που έχουν οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τα υδροδυναμικά φορτία στην τελική τιμή του φορτίου που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου πάνω στον οποίο στηρίζεται ο πύργος της ανεμογεννήτριας.

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας έχουν επιλεχθεί πέντε παράμετροι που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά των υδροδυναμικών φορτίων οι οποίοι μεταβάλλονται κάθε φορά, μεταβάλλοντας και την τιμή του υδροδυναμικού φορτίου που ασκείται στον πάσσαλο. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- W (m/s) Η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας
- F (m) Το μήκος αναπτύγματος του κυματισμού
- t_d (hr) Η διάρκεια πνοής του ανέμου
- d (m) Το βάθος του πυθμένα της θάλασσας
- D (m) Η διάμετρος του πασσάλου

Το εύρος της διακύμανσης κάθε παραμέτρου είναι:

- W από 10m/s έως 35m/s με βήμα 5m/s
- F από 10.000m έως 100.000m με βήμα 10.000m
- t_d από 1hr έως 10hr με βήμα 1hr
- d από 10m έως 40m με βήμα 5m
- D από 4m έως 8m με βήμα 1m

Επιλέχθηκαν επίσης κάποιες μέσες τιμές των παραπάνω παραμέτρων έτσι ώστε όταν μεταβάλλεται η μία από τις πέντε παραμέτρους οι άλλες τέσσερις να παραμένουν σταθερές και η τιμή τους να ισούται με την μέση τιμή της κάθε παραμέτρου. Οι μέσες τιμές είναι:

- W = 20m/s
- F = 50.000m
- t_d = 5hr
- d = 35m
- D = 5m

Η πορεία που ακολουθήθηκε με σκοπό την εύρεση του υδροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου είναι η εξής:

1. Αρχικά επιλέγεται μια τιμή για κάθε μια από τις παραπάνω πέντε παραμέτρους. Όπως έχει αναφερθεί πιο πάνω καθώς μεταβάλλεται η τιμή της μιας παραμέτρου οι άλλες τέσσερις παραμένουν σταθερές και ίσες με τη μέση τιμή τους.
2. Γίνεται πρόβλεψη των παραμέτρων του χαρακτηριστικού κύματος με τη μέθοδο SMB. Διαπιστώνεται δηλαδή αν ο κυματισμός είναι περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος ή από τη διάρκεια πνοής του ανέμου και υπολογίζεται τελικά η χαρακτηριστική περίοδος T_s και το χαρακτηριστικό ύψος του κυματισμού H_s .
3. Προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά του κυματισμού που φτάνει στο έργο. Ανάλογα με τη τιμή του σχετικού βάθους νερού d/L_0 (όπου d το βάθος του πυθμένα και L_0 το μήκος του κύματος στα βαθιά νερά) υπολογίζεται το μήκος του κύματος που φτάνει στο έργο L και το ύψος του κύματος που φτάνει στο έργο H.
4. Χρησιμοποιώντας κάθε φορά την κατάλληλη θεωρία κυματισμού (θεωρία Airy ή θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης) υπολογίζεται η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας (εξαιτίας των κυμάτων και των θαλάσσιων ρευμάτων) και της επιτάχυνσης (εξαιτίας των κυμάτων) των υγρών σωματιδίων από τον πυθμένα της θάλασσας μέχρι τη κορυφή του κυματισμού. Ο υπολογισμός της ταχύτητας και της επιτάχυνσης γίνεται για πολλές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια μια περιόδου του κυματισμού. Σαν αποτέλεσμα οι υπολογιζόμενες ταχύτητες και επιταχύνσεις εξαρτώνται τόσο από την απόσταση από τον πυθμένα όσο και από τη χρονική στιγμή. Η επιλογή της

κατάλληλης θεωρίας κυματισμού γίνεται μετά από κάποιους περιορισμούς που θέτει ο Νορβηγικός κανονισμός σχεδιασμού θαλάσσιων ανεμογεννητριών (DNV-OS-J101) όπου με βάση τα χαρακτηριστικά του κυματισμού προτείνει και την χρήση της αντίστοιχης θεωρίας.

5. Για τον υπολογισμό του φορτίου που ασκείται κατά μήκος του κυλινδρικού πασσάλου χρησιμοποιείται η εξίσωση Morison. Για κάθε δοκιμή υπολογίζονται οι παράμετροι της εξίσωσης. Επίσης υπολογίζονται ο συντελεστής αδράνειας C_M και ο συντελεστής αντίστασης της διατομής του πυλώνα C_D τόσο για την περίπτωση που βρισκόμαστε κάτω από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας όσο και για την περίπτωση που βρισκόμαστε πάνω από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας (υπάρχει μια διαφορά στην πορεία υπολογισμού των συντελεστών καθώς κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια έχουν θεωρηθεί τραχείς επιφάνειες με $C_{DS}=1,05$ και πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια έχουν θεωρηθεί λείες επιφάνειες με $C_{DS}=0,65$).
6. Ο υπολογισμός του φορτίου που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου έγινε για τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές στις οποίες έχουν υπολογιστεί η ταχύτητα και η επιτάχυνση των υγρών σωματιδίων κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Άρα σαν τελικό αποτέλεσμα προκύπτει το φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου σε διάφορες χρονικές στιγμές μιας περιόδου του κυματισμού.

2.8.1 Παρουσίαση μεμονωμένης δοκιμής εύρεσης υδροδυναμικού φορτίου

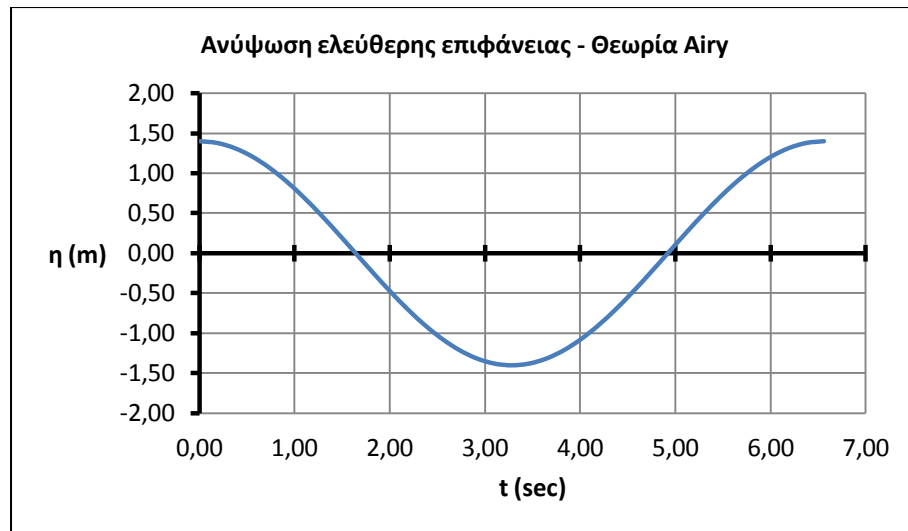
Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται κάποια συγκεντρωτικά αποτελέσματα που αφορούν μια μεμονωμένη δοκιμή εύρεσης του υδροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος του κυλινδρικού πασσάλου. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Σχήμα 2.14) με τις κυριότερες τιμές των παραμέτρων, που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Αρχικά με κόκκινο χρώμα τονίζονται οι τιμές των πέντε παραμέτρων που επιλέχθηκαν.

W (m/s)	20	W - Ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας
F (m)	50.000	F - Μήκος αναπτύγματος του κυματισμού
t_d (hours)	5	t_d - Διάρκεια πνοής του ανέμου
D (m)	5,0	D - Διάμετρος πασσάλου
d (m)	35,00	d - Βάθος πυθμένα
Πρόβλεψη παραμέτρων χαρακτηριστικού κύματος με τη μέθοδο SMB		
Ο κυματισμός είναι περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος		
H_s (m)	2,80	H_s - Χαρακτηριστικό ύψος κυματισμού
T_s (s)	6,56	T_s - Χαρακτηριστική περίοδος κυματισμού
Προσδιορισμός χαρακτηριστικών κυματισμού που φτάνει στο έργο		
d (m)	35	d - Βάθος πυθμένα
H_o=H_s (m)	2,80	H_o - Ύψος κύματος στα βαθιά
T = T_s (s)	6,56	T - Περίοδος κύματος
L_o (m)	67,1	L_o - Μήκος κύματος στα βαθιά

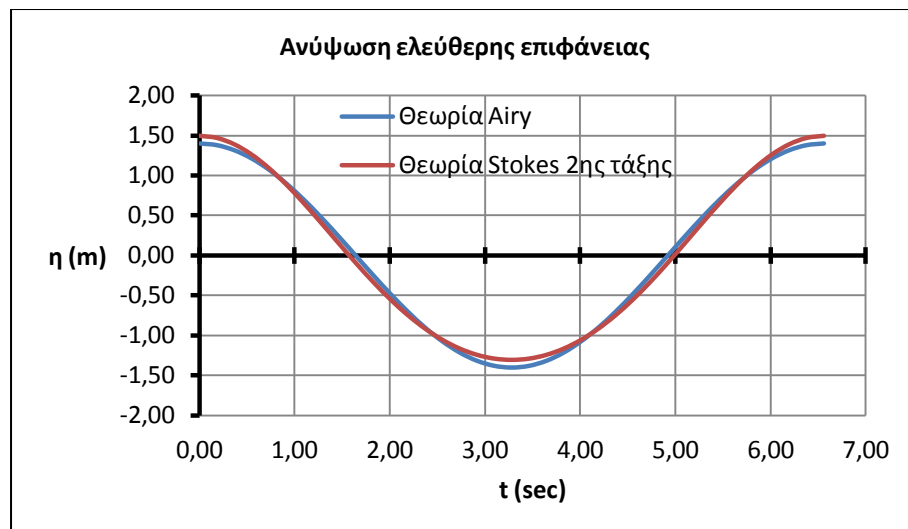
d/L_o	0,521	d/L_o - Σχετικό βάθος νερού
L/L_o	0,995	
H/H_o	1,046	
L (m)	66,78	L - Μήκος κύματος (που φτάνει στο έργο)
H (m)	2,80	H - Ύψος κύματος (που φτάνει στο έργο)
T (s)	6,56	T - Περίοδος κύματος
Κινηματική θεωρία κυματισμού		
d/L	0,524	d/L - Σχετικό βάθος νερού
Θεωρία Κυματισμού:		Stokes 2 ^{ης} Τάξης
Κινηματικές Παράμετροι που αντιστοιχούν σε :		Βαθιά νερά
Χαρακτηριστικά εξίσωσης Morison		
D (m)	5,0	D - Διάμετρος πασσάλου
H (m)	2,80	H - Ύψος κύματος (που φτάνει στο έργο)
H/D	0,56	
u_{max} (m/s)	1,71	u_{max} - μέγιστη οριζόντια ταχ. σωματιδίων ($t=0$) στην ελευ. επιφ. ($z=0m$)
v (m ² /s)	$1,3 \cdot 10^{-6}$	v - κινηματική συνεκτικότητα
T (s)	6,56	T - Περίοδος κύματος
R_e	$6,6 \cdot 10^6$	R_e - Αριθμός Reynolds
K_C	2,24	K_C - Αριθμός Keygen-Carpenter
k (m)	0,05	k - τραχύτητα επιφάνειας ($z<0m$)
k/D	$1,0 \cdot 10^{-2}$	($z<0m$)
C_{DS}	1,05	C_{DS} - Συντελεστής αντίστασης ($z<0m$)
K_C/C_{DS}	2,14	($z<0m$)
$\psi(C_{DS}, K_C)$	0,494	($z<0m$)
$C_D=C_{DS} \cdot \psi$	0,518	C_D - Συντελεστής αντίστασης ($z<0m$)
C_M	2,0	C_M - Συντελεστής αδράνειας ($z<0m$)
A (m ²)	19,63	A - Εμβαδό διατομής πυλώνα
ρ (Mg/m ³)	1,0	ρ - Πυκνότητα νερού
k (m)	$5,0 \cdot 10^{-6}$	k - τραχύτητα επιφάνειας ($z>0m$)
C_{DS}	0,65	C_{DS} - Συντελεστής αντίστασης ($z>0m$)
K_C/C_{DS}	3,45	($z>0$)
$\psi(C_{DS}, K_C)$	0,330	($z>0$)
$C_D=C_{DS} \cdot \psi$	0,215	C_D - Συντελεστής αντίστασης ($z>0$)
C_M	2,0	C_M - Συντελεστής αδράνειας ($z>0$)
z_{max} (m)	2,80	z_{max} - Μέγιστο ύψος κύματος
$F z_{max}$ (kN/m)	65,74	$F z_{max}$ - Μέγιστη δύναμη στη κορυφή του κύματος

Σχήμα 2.14 – Τιμές των κυριότερων παραμέτρων του κυματισμού

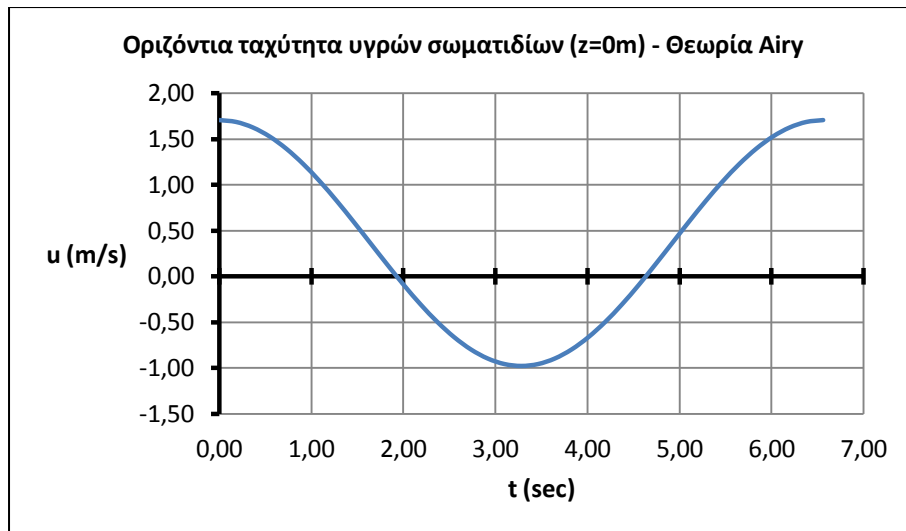
Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 2.15 και Σχήμα 2.16) παρουσιάζεται η ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας σύμφωνα με τη θεωρία Airy και σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Όπως γίνεται αντιληπτό η ταλάντωση κατά Stokes έχει οξύτερες κορυφές και πλατύτερες κοιλίες. Και στις δύο περιπτώσεις το ύψος του κύματος παραμένει σταθερό ($H_s = 2,80m$). Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος και στον κατακόρυφο το υψόμετρο της επιφάνειας.



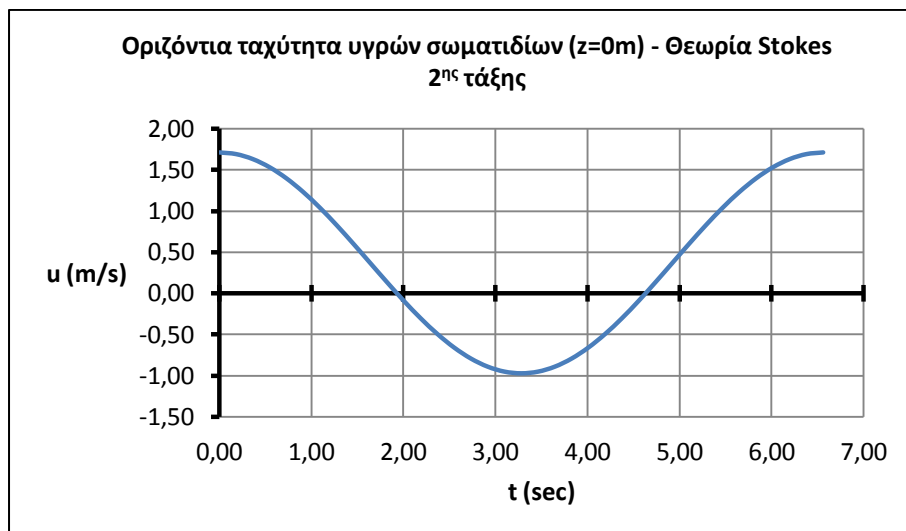
Σχήμα 2.15 – Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας σύμφωνα με τη θεωρία Airy

Σχήμα 2.16 – Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας σύμφωνα με τη θεωρία Airy και με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 2.17 και Σχήμα 2.18) παρουσιάζεται η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας (εξαιτίας των κυμάτων και των θαλάσσιων ρευμάτων) των υγρών σωματιδίων σύμφωνα με τη θεωρία Airy και σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, που βρίσκονται στο υψόμετρο $z=0\text{m}$ (ελεύθερη επιφάνεια) κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Λόγω της πρόσθετης ταχύτητας των υγρών σωματιδίων που επιβάλλουν τα θαλάσσια ρεύματα, τα διαγράμματα της οριζόντιας ταχύτητας των υγρών σωματιδίων δεν είναι συμμετρικά ως προς τον άξονα των ταχυτήτων αλλά είναι μετατοπισμένα "προς τα πάνω" εξαιτίας αυτής της πρόσθετης ταχύτητας. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος και στον κατακόρυφο η ταχύτητα.

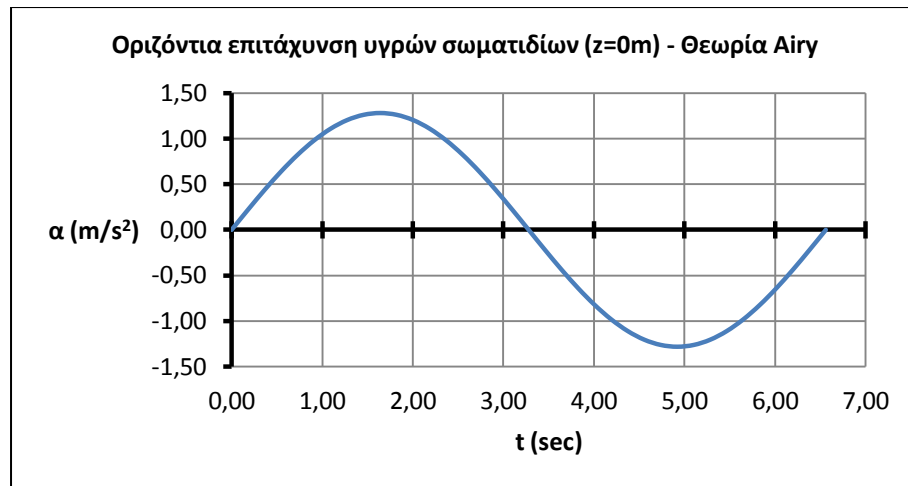


Σχήμα 2.17 – Οριζόντια ταχύτητα υγρών σωματιδίων ($z=0m$) σύμφωνα με τη θεωρία Airy

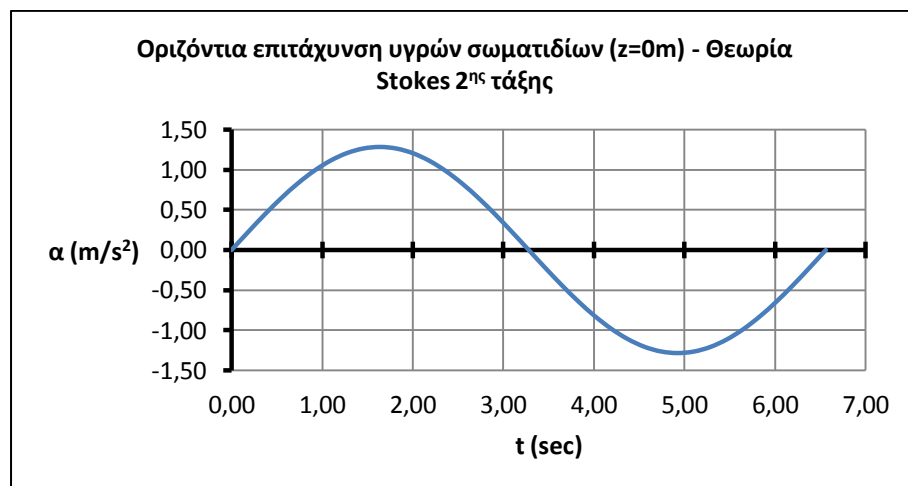


Σχήμα 2.18 – Οριζόντια ταχύτητα υγρών σωματιδίων ($z=0m$) σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 2.19 και Σχήμα 2.20) παρουσιάζεται η οριζόντια συνιστώσα της επιτάχυνσης (εξαιτίας των κυμάτων) των υγρών σωματιδίων σύμφωνα με τη θεωρία Airy και σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, που βρίσκονται στο υψόμετρο $z=0m$ (ελεύθερη επιφάνεια) κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Η επιτάχυνση των υγρών σωματιδίων οφείλεται μόνο στη κίνηση των θαλασσίων κυμάτων με αποτέλεσμα τα διαγράμματα των επιταχύνσεων να είναι συμμετρικά ως προς τον οριζόντιο άξονα. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος και στον κατακόρυφο η επιτάχυνση.

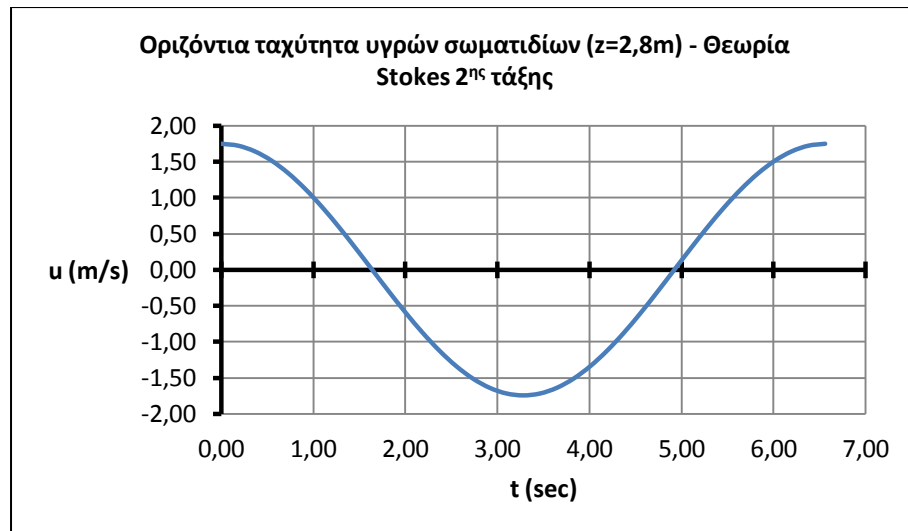


Σχήμα 2.19 – Οριζόντια επιτάχυνση υγρών σωματιδίων ($z=0\text{m}$) σύμφωνα με τη θεωρία Airy

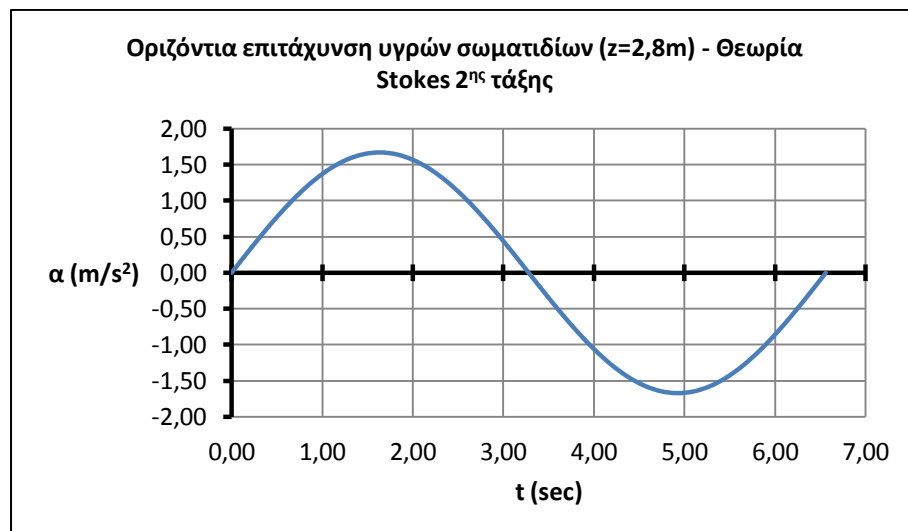


Σχήμα 2.20 – Οριζόντια επιτάχυνση υγρών σωματιδίων ($z=0\text{m}$) σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 2.21 και Σχήμα 2.22) παρουσιάζεται η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας (εξαιτίας των κυμάτων) και η οριζόντια συνιστώσα της επιτάχυνσης (εξαιτίας των κυμάτων) των υγρών σωματιδίων σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, που βρίσκονται στο υψόμετρο $z=+2,8\text{m}$ κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος και στον κατακόρυφο η ταχύτητα/επιτάχυνση. Τόσο οι τιμές των ταχυτήτων όσο και οι τιμές των επιταχύνσεων των υγρών σωματιδίων στη περίπτωση που βρισκόμαστε $2,8\text{m}$ πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, είναι μεγαλύτερες από την περίπτωση που βρισκόμαστε στο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας ($z=0\text{m}$). Στη περίπτωση που βρισκόμαστε πάνω από το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας η ταχύτητα των υγρών σωματιδίων οφείλεται μόνο στη κίνηση των θαλασσίων κυμάτων και έτσι το διάγραμμα των ταχυτήτων είναι συμμετρικό ως προς τον οριζόντιο άξονα.

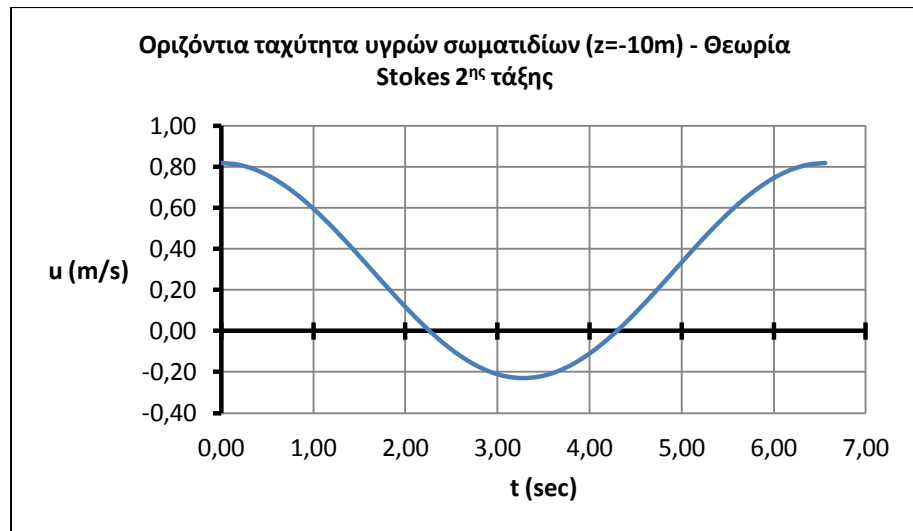


Σχήμα 2.21 – Οριζόντια ταχύτητα υγρών σωματιδίων ($z=+2,80\text{m}$) σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

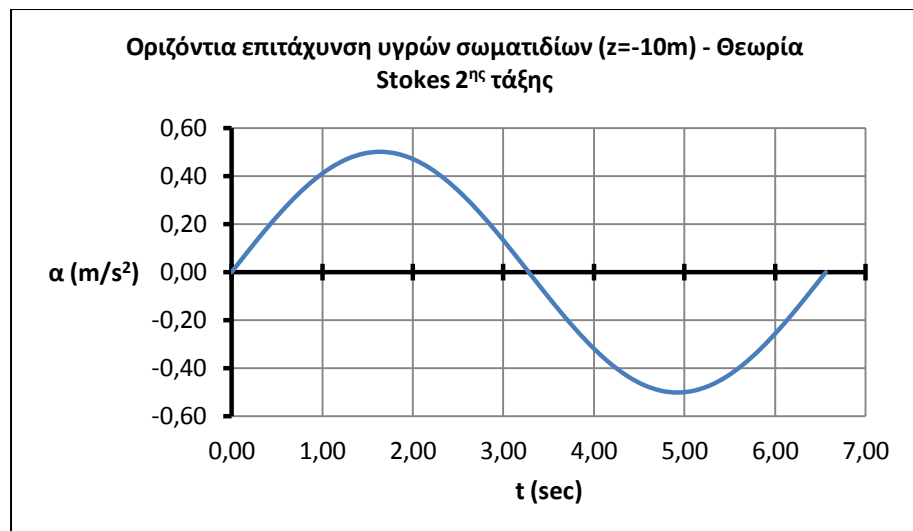


Σχήμα 2.22 – Οριζόντια επιτάχυνση υγρών σωματιδίων ($z=+2,80\text{m}$) σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 2.23 και Σχήμα 2.24) παρουσιάζεται η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας (εξαιτίας των κυμάτων και των θαλάσσιων ρευμάτων) και η οριζόντια συνιστώσα της επιτάχυνσης (εξαιτίας των κυμάτων) των υγρών σωματιδίων σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, που βρίσκονται στο υψόμετρο $z=-10\text{m}$ κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος και στον κατακόρυφο η ταχύτητα/επιτάχυνση. Τόσο οι τιμές των ταχυτήτων όσο και οι τιμές των επιταχύνσεων των υγρών σωματιδίων στη περίπτωση που βρισκόμαστε 10m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, είναι αρκετά μικρότερες από την περίπτωση που βρισκόμαστε στο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας ($z=0\text{m}$).

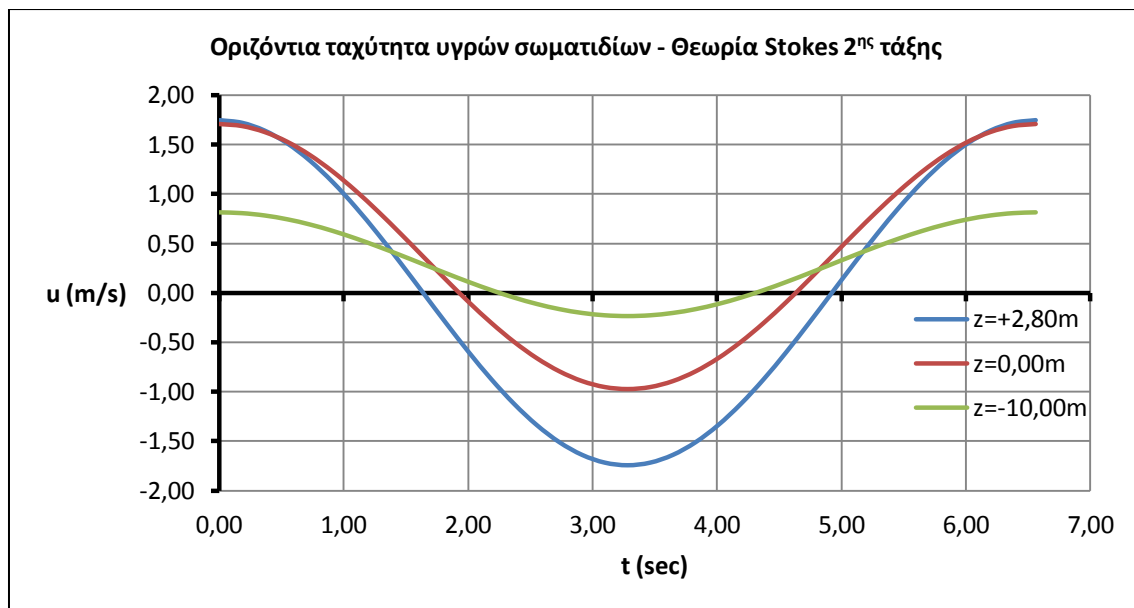


Σχήμα 2.23 – Οριζόντια ταχύτητα υγρών σωματιδίων ($z=-10\text{m}$) σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης



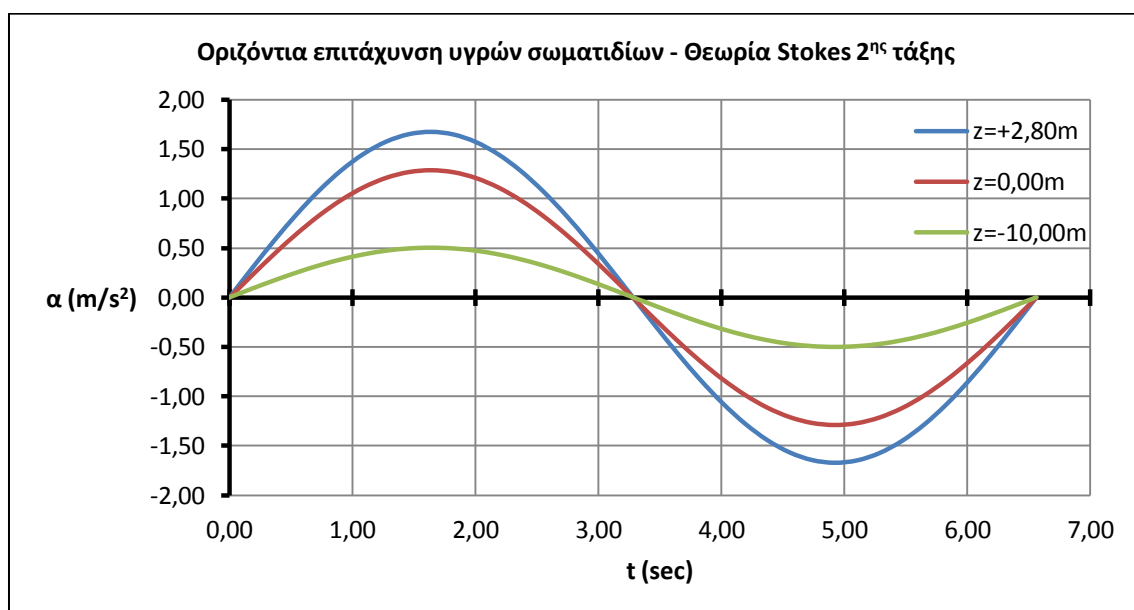
Σχήμα 2.24 – Οριζόντια επιτάχυνση υγρών σωματιδίων ($z=-10\text{m}$) σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.25) παρουσιάζεται συνοπτικά η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας των υγρών σωματιδίων σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, για διάφορα υψόμετρα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στη κορυφή του κύματος τόσο μεγαλύτερο γίνεται το εύρος τιμών της ταχύτητας των υγρών σωματιδίων.



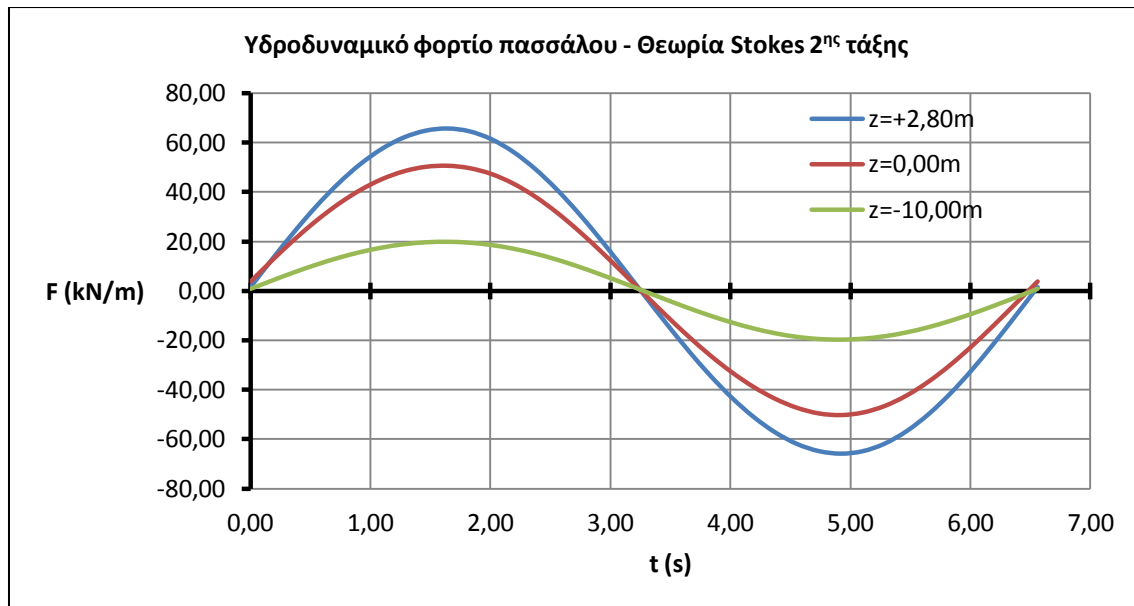
Σχήμα 2.25 – Οριζόντια ταχύτητα υγρών σωματιδίων για διάφορα ύψη σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.26) παρουσιάζεται συνοπτικά η οριζόντια συνιστώσα της επιτάχυνσης των υγρών σωματιδίων σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, για διάφορα υψόμετρα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στη κορυφή του κύματος τόσο μεγαλύτερο γίνεται το εύρος τιμών της επιτάχυνσης των υγρών σωματιδίων.



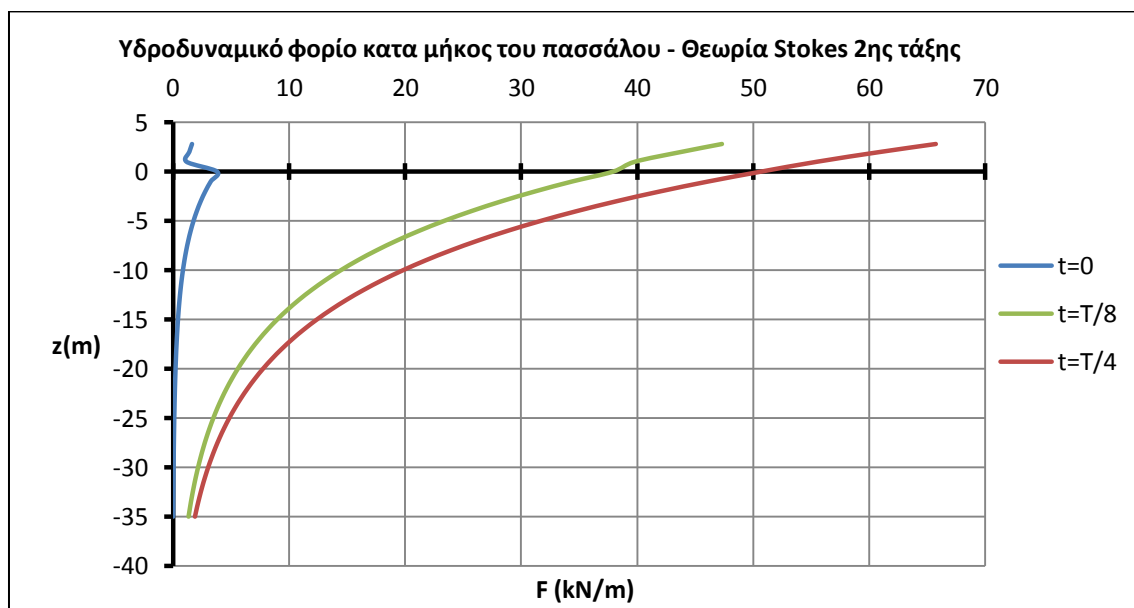
Σχήμα 2.26 – Οριζόντια επιτάχυνση υγρών σωματιδίων για διάφορα ύψη σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.27) παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται στο πάσσαλο στα υψόμετρα $z = +2,80\text{m}$, $z = 0,00\text{m}$ και $z = -10,00\text{m}$ σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Παρατηρούμε ότι σε κάθε υψόμετρο, τη χρονική στιγμή $t = T/4$ ($= 1,64\text{sec}$) το φορτίο παίρνει τη μέγιστη τιμή του και ότι η κορυφή του κύματος ασκεί το μέγιστο φορτίο στην κατασκευή.



Σχήμα 2.27 – Υδροδυναμικό φορτίο πασσάλου στα υψόμετρα $z=+2,80\text{m}$, $z=0,00\text{m}$, $z=-10,00\text{m}$ κατά τη διάρκεια μιας περιόδου

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.28) παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται στο κατά μήκος του πασσάλου (από το πυθμένα μέχρι και τη κορυφή του κυματισμού) τις χρονικές στιγμές $t=0$, $t=T/8$ και $t=T/4$. Παρατηρούμε ότι τη χρονική στιγμή $t=T/4$ ασκείται το μέγιστο φορτίο κατά μήκος της κατασκευής.



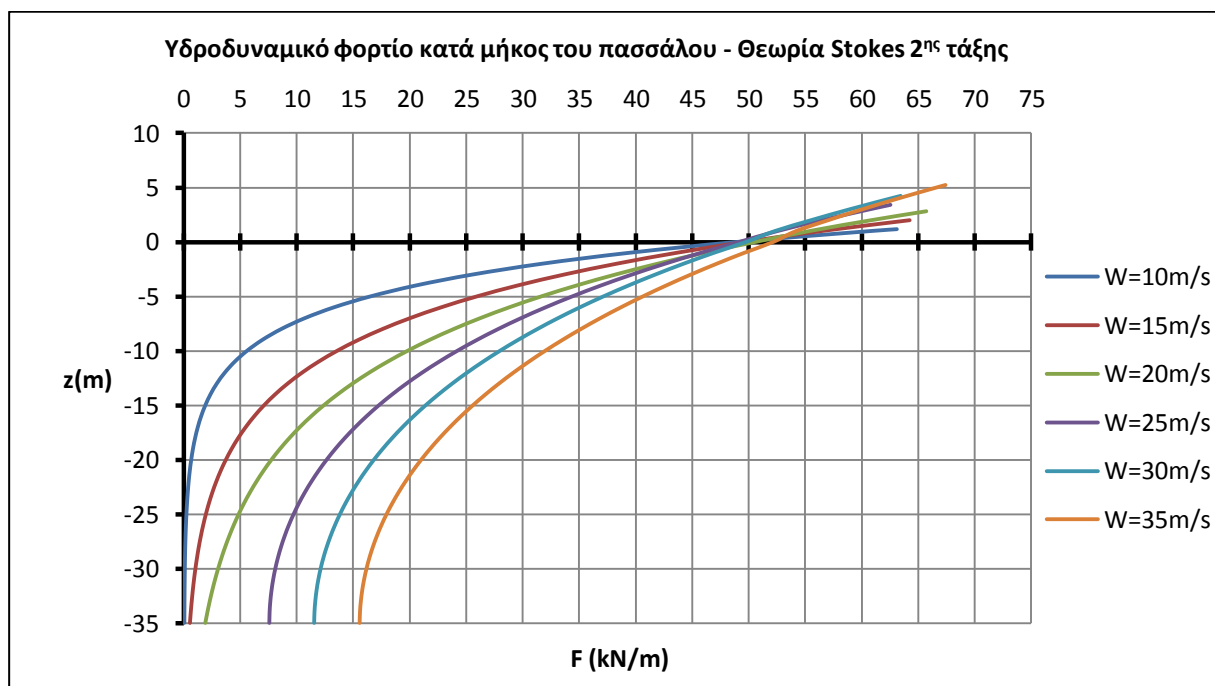
Σχήμα 2.28 – Υδροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πασσάλου τις χρονικές στιγμές $t=0$, $t=T/8$, $t=T/4$

2.8.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων παραμετρικών αναλύσεων εύρεσης υδροδυναμικού φορτίου κατά μήκος του πασσάλου

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων εύρεσης του υδροδυναμικού φορτίου κατά μήκος του πασσάλου. Σε κάθε δοκιμή μεταβάλλεται η μία παράμετρος ενώ οι υπόλοιπες τέσσερις παίρνουν τη μέση τιμή τους.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.29) παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου (από το πυθμένα μέχρι και τη κορυφή του κυματισμού) τη χρονική στιγμή $t=T/4$, για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας (W). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

- $F = 50.000\text{m}$
- $t_d = 5\text{hr}$
- $d = 35\text{m}$
- $D = 5\text{m}$

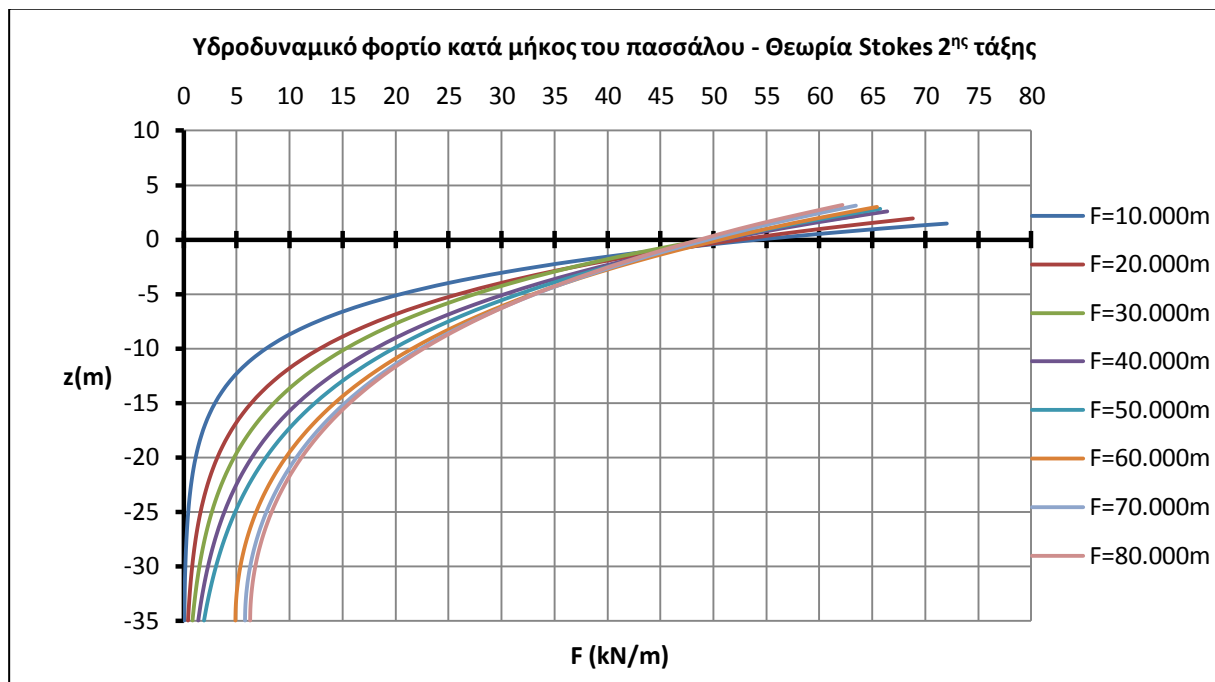


Σχήμα 2.29 – Υδροδυναμικά φορτία κατά μήκος του πασσάλου τη χρονική στιγμή $t=T/4$

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 2.29) προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας (W), αυξάνεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.30) παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου (από το πυθμένα μέχρι και τη κορυφή του κυματισμού) τη χρονική στιγμή $t=T/4$, για διάφορες τιμές του μήκους αναπτύγματος του κυματισμού (F). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

- $W=20\text{m/s}$
- $t_d = 5\text{hr}$
- $d = 35\text{m}$
- $D = 5\text{m}$

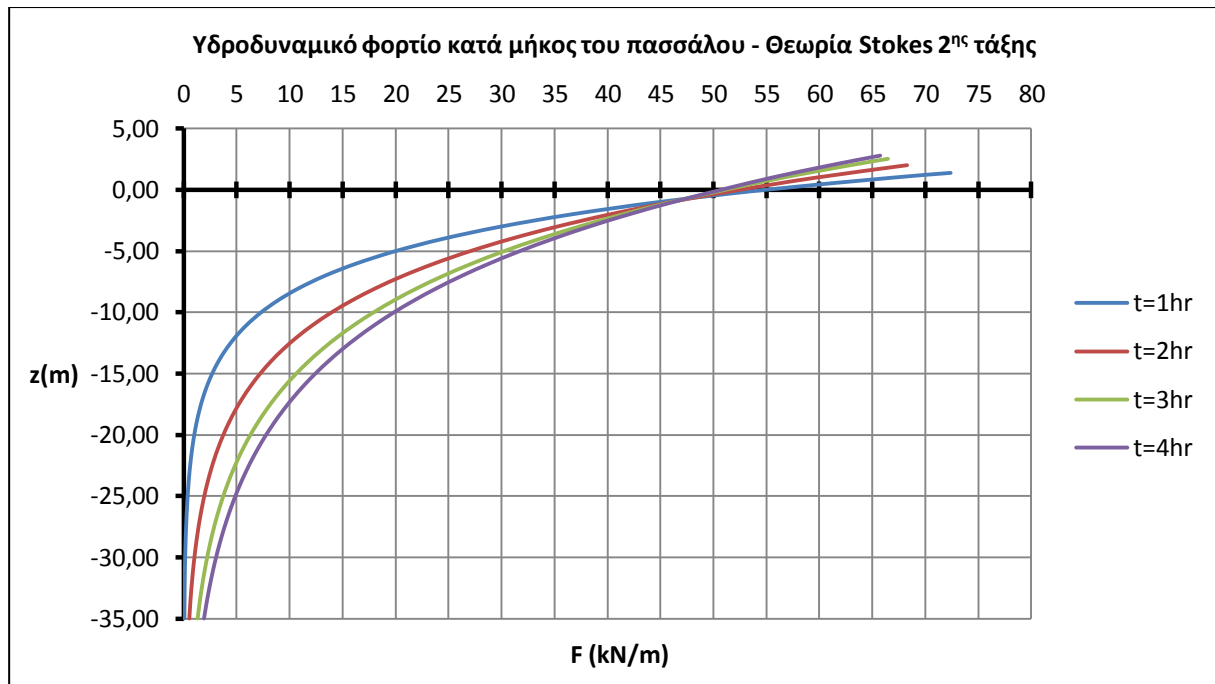


Σχήμα 2.30 – Υδροδυναμικά φορτία κατά μήκος του πασσάλου τη χρονική στιγμή $t=T/4$

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 2.30) προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται το μήκος αναπτύγματος του κυματισμού (F), αυξάνεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου. Για μήκος αναπτύγματος μεγαλύτερο των 80.000m το υδροδυναμικό φορτίο παραμένει σταθερό και ίσο με την περίπτωση όπου $F=80.000\text{m}$ γιατί από εκεί και πέρα ο κυματισμός είναι περιορισμένος από τη διάρκεια πνοής του ανέμου.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.31) παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου (από το πυθμένα μέχρι και τη κορυφή του κυματισμού) τη χρονική στιγμή $t=T/4$, για διάφορες τιμές της διάρκειας πνοής του ανέμου (t_d). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

- $F = 50.000\text{m}$
- $W=20\text{m/s}$
- $d = 35\text{m}$
- $D = 5\text{m}$

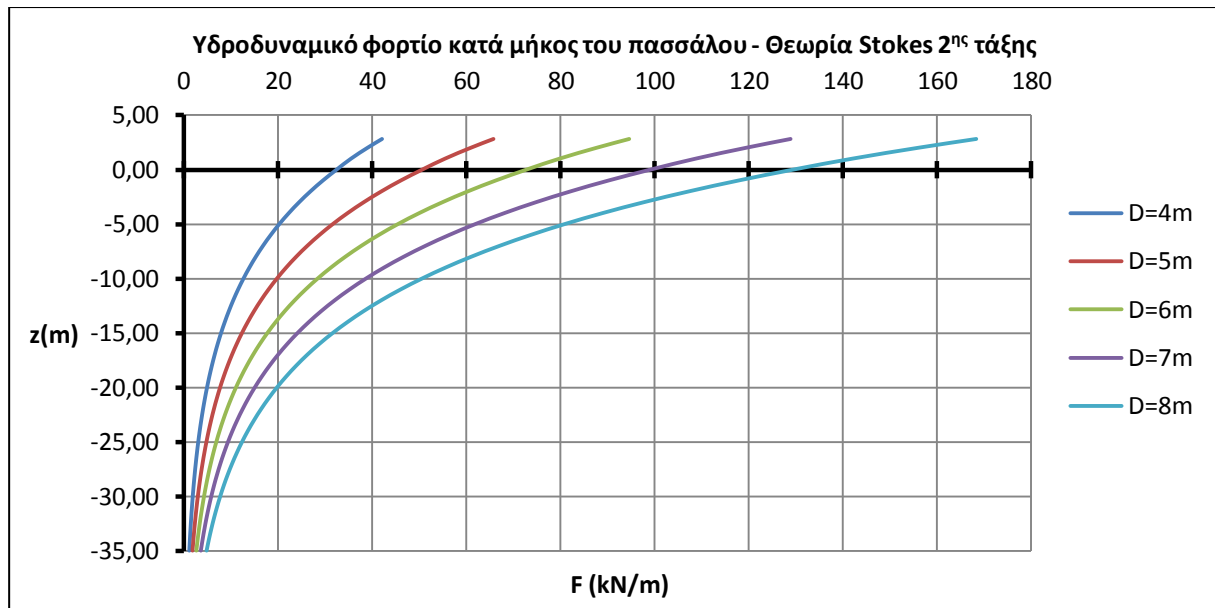


Σχήμα 2.31 – Υδροδυναμικά φορτία κατά μήκος του πασσάλου τη χρονική στιγμή $t=T/4$

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 2.31) προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται η διάρκεια πνοής του ανέμου (t_d), αυξάνεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου. Για διάρκεια πνοής ανέμου μεγαλύτερη των τεσσάρων ωρών το υδροδυναμικό φορτίο παραμένει σταθερό και ίσο με την περίπτωση όπου $t_d=4\text{hr}$ γιατί από εκεί και πέρα ο κυματισμός είναι περιορισμένος από τη μήκος αναπτύγματος του κυματισμού.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.32) παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου (από το πυθμένα μέχρι και τη κορυφή του κυματισμού) τη χρονική στιγμή $t=T/4$, για διάφορες τιμές της διαμέτρου του πασσάλου (D). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

- $F = 50.000\text{m}$
- $t_d = 5\text{hr}$
- $W=20\text{m/s}$
- $d = 35\text{m}$

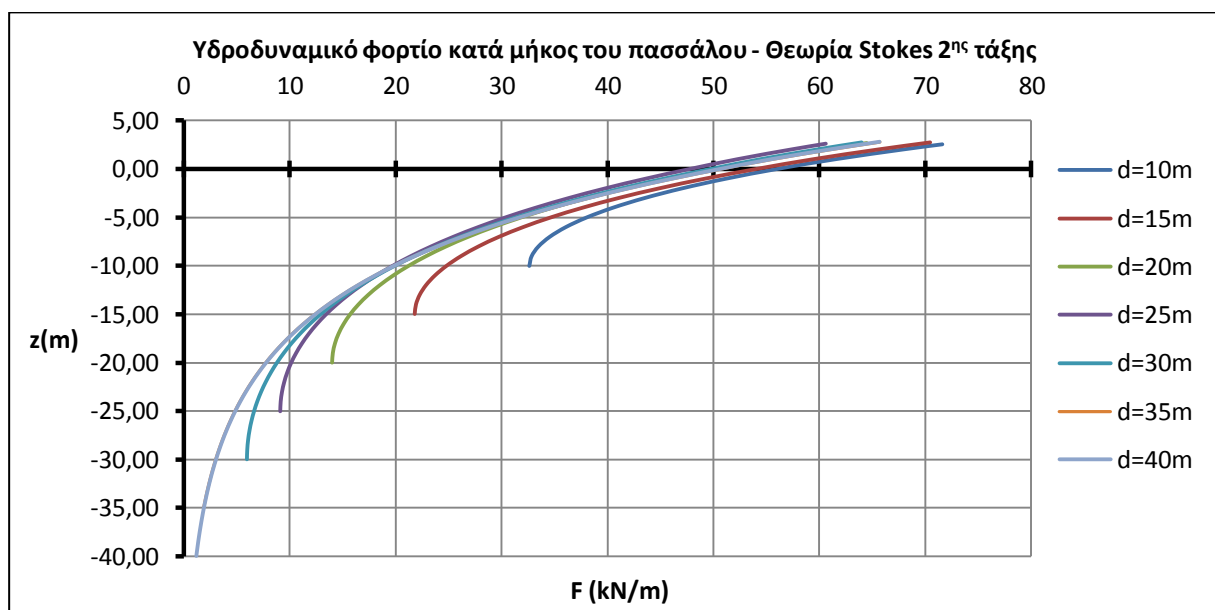


Σχήμα 2.32 – Υδροδυναμικά φορτία κατά μήκος του πασσάλου τη χρονική στιγμή $t=T/4$

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 2.32) προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται η διάμετρος του πασσάλου, αυξάνεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.33) παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου (από το πυθμένα μέχρι και τη κορυφή του κυματισμού) τη χρονική στιγμή $t=T/4$, για διάφορες τιμές του βάθους του πυθμένα της θάλασσας (d). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

- $F = 50.000m$
- $t_d = 5hr$
- $W=20m/s$
- $D = 5m$

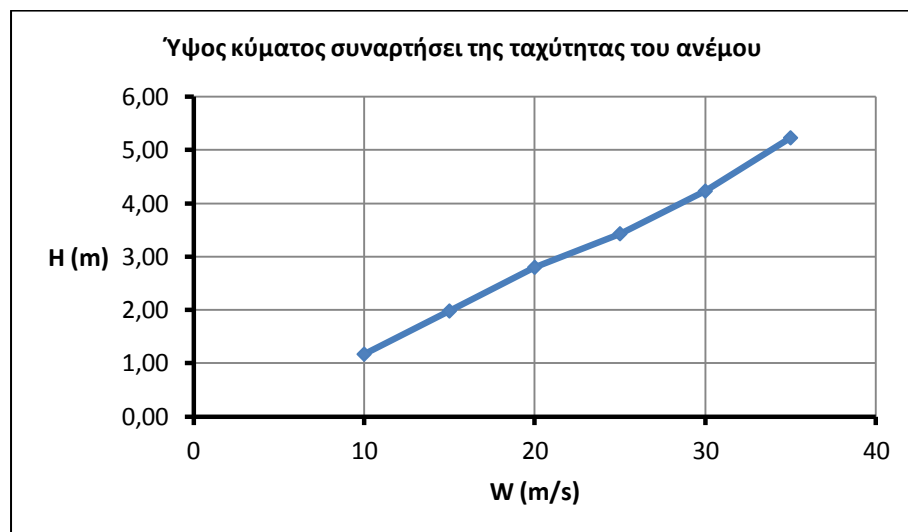


Σχήμα 2.33 – Υδροδυναμικά φορτία κατά μήκος του πασσάλου τη χρονική στιγμή $t=T/4$

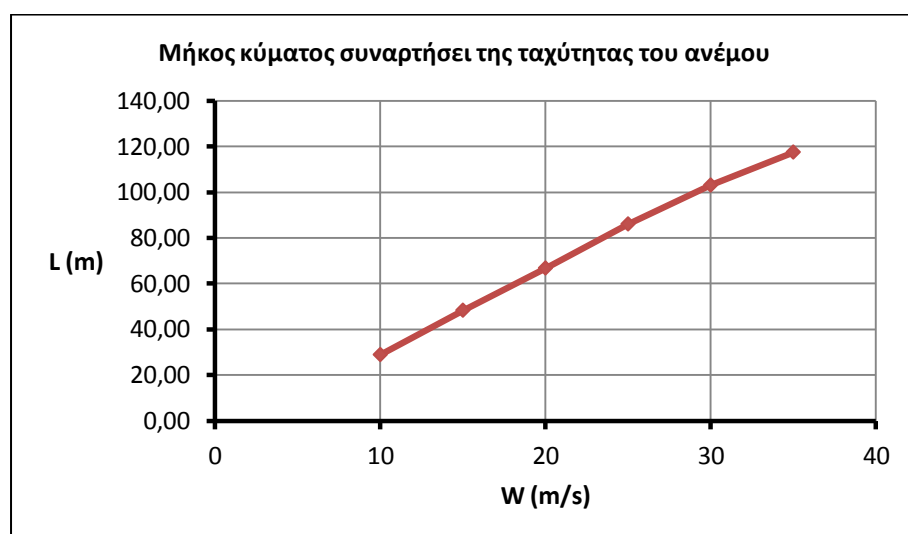
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 2.33) προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται το βάθος του πυθμένα της θάλασσας, μειώνεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου.

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 2.34, Σχήμα 2.35 και Σχήμα 2.36) παρουσιάζεται η μεταβολή του ύψους κύματος (H), του μήκους κύματος (L) και της περιόδου του κύματος (T_s), για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας (W). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

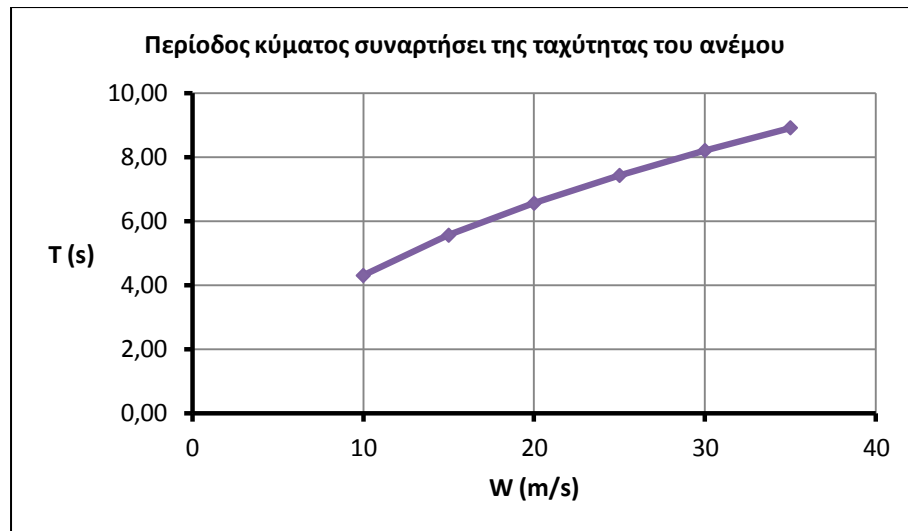
- $F = 50.000\text{m}$
- $t_d = 5\text{hr}$
- $d = 35\text{m}$
- $D = 5\text{m}$



Σχήμα 2.34 – Ύψος κύματος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου



Σχήμα 2.35 – Μήκος κύματος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου

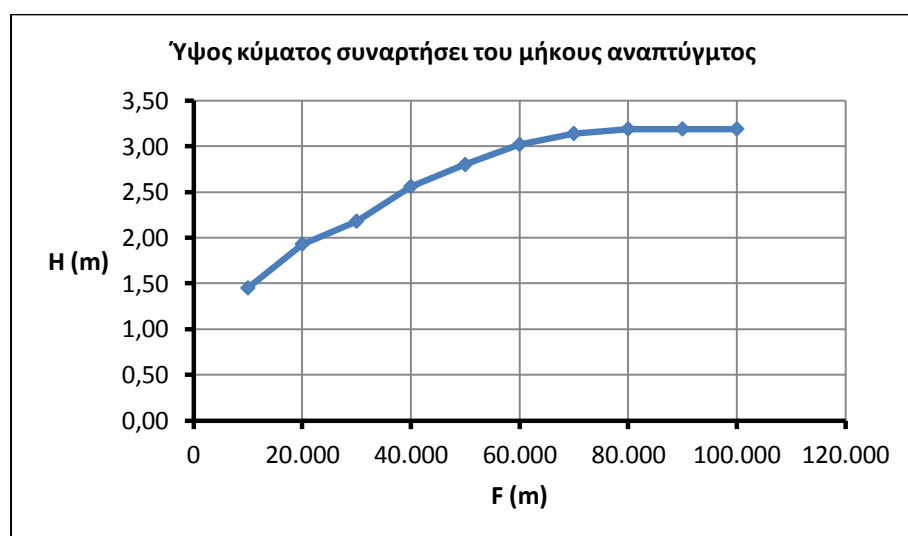


Σχήμα 2.36 – Περίοδος κύματος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου

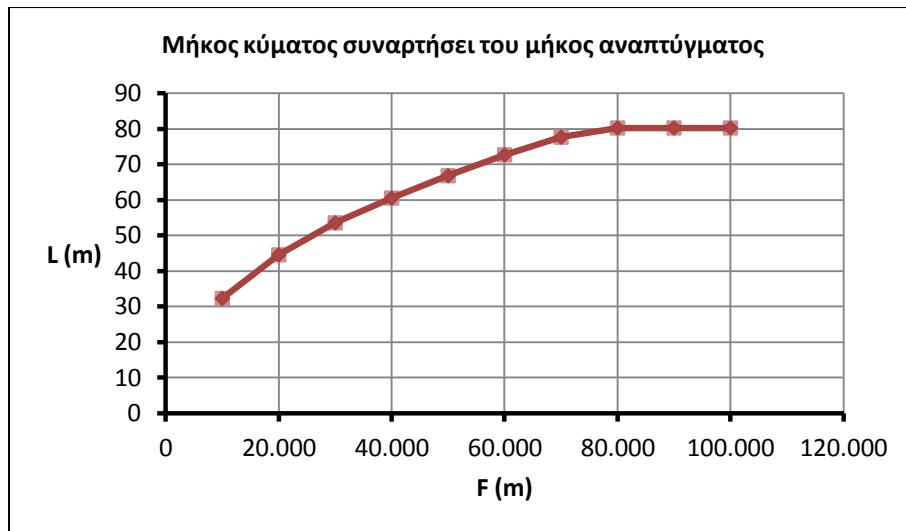
Από τα παραπάνω τρία διαγράμματα προκύπτει πως καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (W), αυξάνεται το ύψος του κύματος (H), το μήκος του κύματος (L) και η περίοδος του κύματος (T_s).

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 2.37, Σχήμα 2.38 και Σχήμα 2.39) παρουσιάζεται η μεταβολή του ύψους κύματος (H), του μήκους κύματος (L) και της περιόδου του κύματος (T_s), για διάφορες τιμές του μήκους αναπτύγματος του κυματισμού (F). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

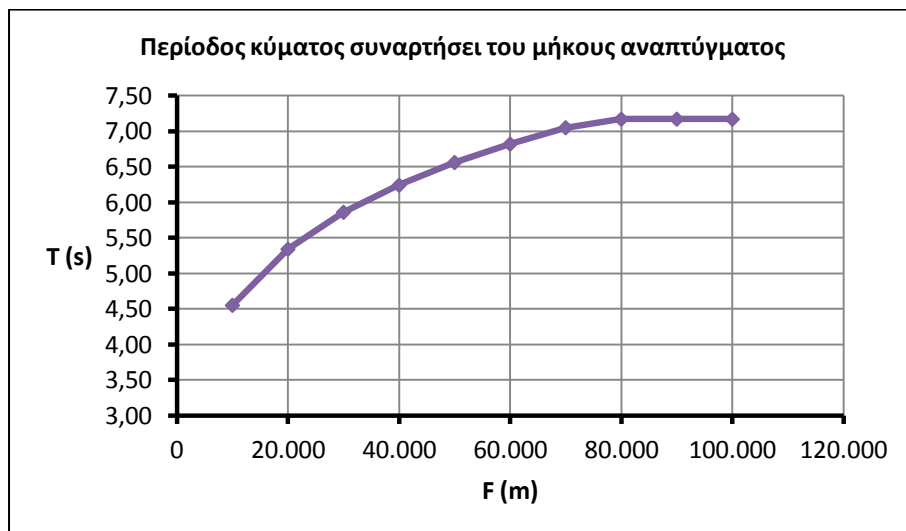
- $W=20\text{m/s}$
- $t_d = 5\text{hr}$
- $d = 35\text{m}$
- $D = 5\text{m}$



Σχήμα 2.37 – Ύψος κύματος συναρτήσει του μήκους αναπτύγματος του κυματισμού



Σχήμα 2.38 – Μήκος κύματος συναρτήσει του μήκους αναπτύγματος του κυματισμού



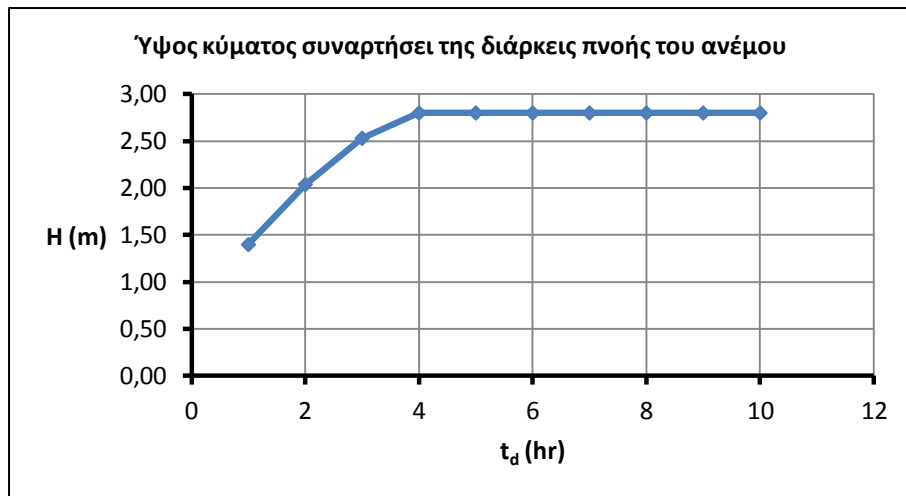
Σχήμα 2.39 – Περίοδος κύματος συναρτήσει του μήκους αναπτύγματος του κυματισμού

Από τα παραπάνω τρία διαγράμματα προκύπτει πως μέχρι το μήκος αναπτύγματος των 80.000m αυξάνεται το ύψος του κύματος (H), το μήκος του κύματος (L) και η περίοδος του κύματος (T_s). Για μήκος αναπτύγματος μεγαλύτερο των 80.000m ο κυματισμός είναι περιορισμένος από τη διάρκεια πνοής του ανέμου (εξαρτάται δηλαδή μόνο από τη διάρκεια πνοής του ανέμου και τη ταχύτητα του ανέμου) με αποτέλεσμα το ύψος του κύματος (H), το μήκος του κύματος (L) και η περίοδος του κύματος (T_s) να παραμένουν αμετάβλητα.

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 2.40, Σχήμα 2.41 και Σχήμα 2.42) παρουσιάζεται η μεταβολή του ύψους κύματος (H), του μήκους κύματος (L) και της περιόδου του κύματος (T_s), για διάφορες τιμές της διάρκειας πνοής του ανέμου (t_d). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

- $F = 50.000\text{m}$
- $W = 20\text{m/s}$

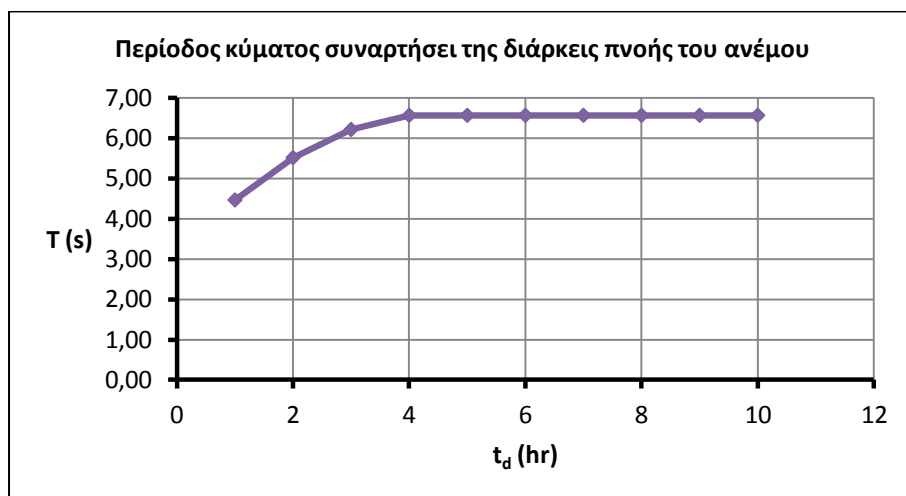
- $d = 35\text{m}$
- $D = 5\text{m}$



Σχήμα 2.40 – Ύψος κύματος συναρτήσει της διάρκειας πνοής του ανέμου



Σχήμα 2.41 – Μήκος κύματος συναρτήσει της διάρκειας πνοής του ανέμου

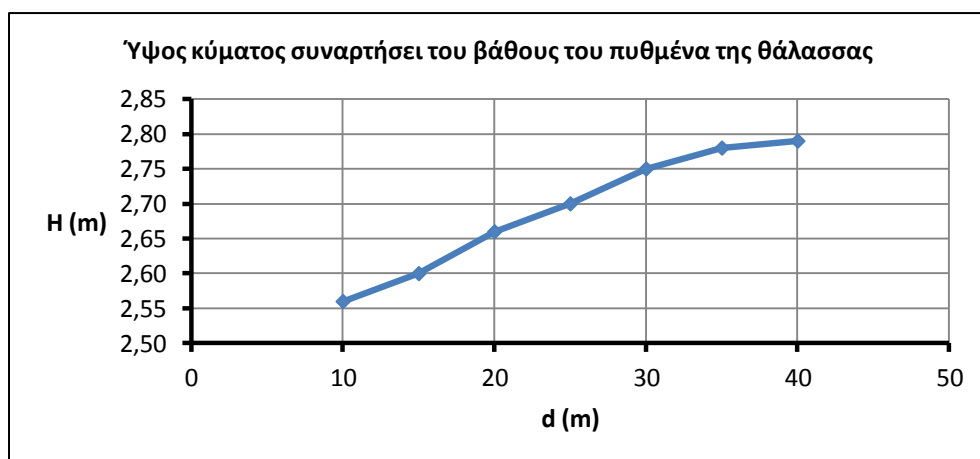


Σχήμα 2.42 – Περίοδος κύματος συναρτήσει της διάρκειας πνοής του ανέμου

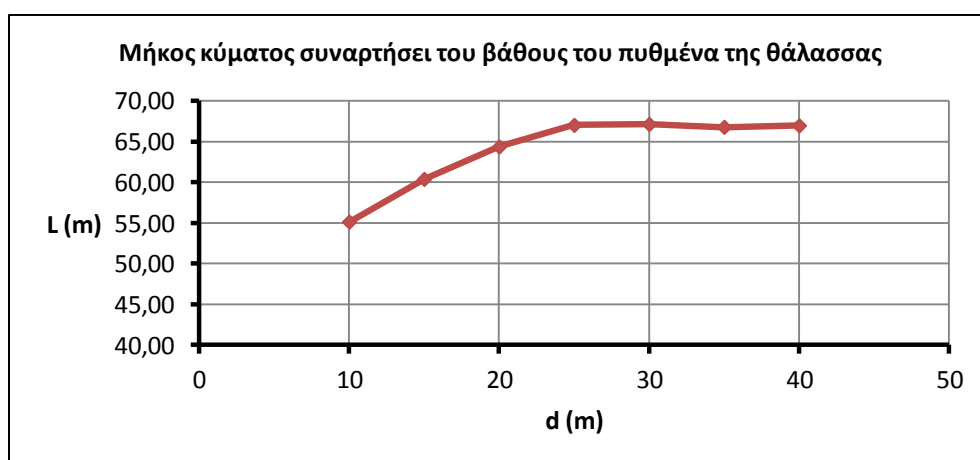
Από τα παραπάνω τρία διαγράμματα προκύπτει πως μέχρι τη διάρκεια πνοής ανέμου των τεσσάρων ωρών αυξάνεται το ύψος του κύματος (H), το μήκος του κύματος (L) και η περίοδος του κύματος (T_s). Για διάρκεια πνοής ανέμου μεγαλύτερη των τεσσάρων ωρών ο κυματισμός είναι περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος (εξαρτάται δηλαδή μόνο από το μήκος αναπτύγματος και τη ταχύτητα του ανέμου) με αποτέλεσμα το ύψος του κύματος (H), το μήκος του κύματος (L) και η περίοδος του κύματος (T_s) να παραμένουν αμετάβλητα.

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 2.43, Σχήμα 2.44 και Σχήμα 2.45) παρουσιάζεται η μεταβολή του ύψους κύματος (H), του μήκους κύματος (L) και της περιόδου του κύματος (T_s), για διάφορες τιμές του βάθους του πυθμένα της θάλασσας (d). Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

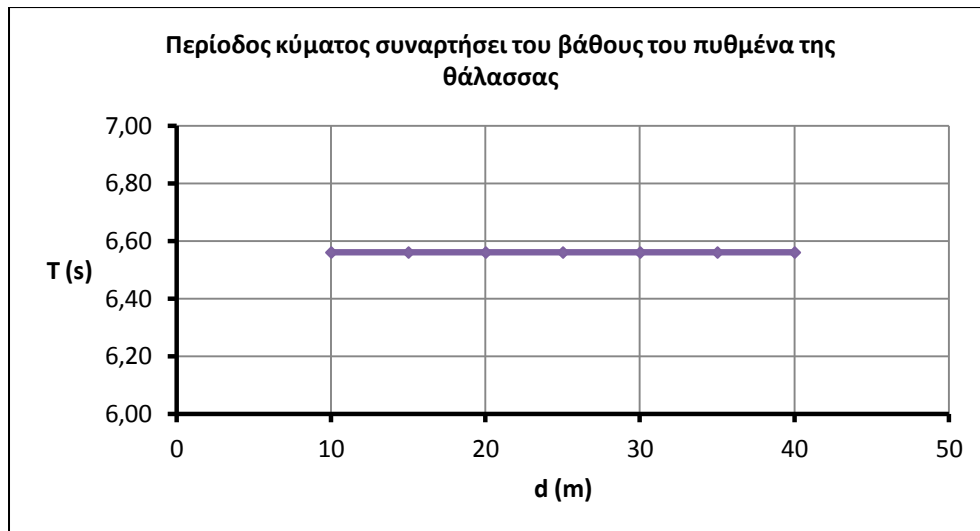
- $F = 50.000\text{m}$
- $t_d = 5\text{hr}$
- $W = 20\text{m/s}$
- $D = 5\text{m}$



Σχήμα 2.43 – Ύψος κύματος συναρτήσει του βάθους του πυθμένα της θάλασσας



Σχήμα 2.44 – Μήκος κύματος συναρτήσει του βάθους του πυθμένα της θάλασσας



Σχήμα 2.45 – Περίοδος κύματος συναρτήσει του βάθους του πυθμένα της θάλασσας

Από τα παραπάνω τρία διαγράμματα προκύπτει πως καθώς αυξάνεται το βάθος του πυθμένα της θάλασσας (d), αυξάνεται το ύψος του κύματος (H) και το μήκος του κύματος (L). Η περίοδος του κύματος (T) παραμένει σταθερή καθώς είναι ανεξάρτητη του βάθους του πυθμένα της θάλασσας.

Βιβλιογραφία

- [2.1] Κ.Ι. Μουτζούρης, Θαλάσσια Υδραυλική
- [2.2] RECOMMENDED PRACTISE, DNV-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, October 2010, Page 25
- [2.3] Α.Α. Δήμας, Παράκτια Υδραυλική, Κεφάλαιο 4^ο, σελ. 69
- [2.4] Α.Α. Δήμας, Παράκτια Υδραυλική, Κεφάλαιο 4^ο, σελ. 77
- [2.5] Κ.Ι. Μουτζούρης, Θαλάσσια Υδραυλική, Κεφάλαιο 5^ο, σελ 80
- [2.6] Α.Α. Δήμας, Παράκτια Υδραυλική, Κεφάλαιο 4^ο, σελ. 77
- [2.7] Κ.Ι. Μουτζούρης, Θαλάσσια Υδραυλική, Κεφάλαιο 6^ο, σελ 87
- [2.8] Κ.Ι. Μουτζούρης, Θαλάσσια Υδραυλική, Κεφάλαιο 4^ο, σελ 32
- [2.9] Κ.Ι. Μουτζούρης, Θαλάσσια Υδραυλική, Κεφάλαιο 4^ο, σελ 33
- [2.10] OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures, September 2011, Sec. 3 – C502 - Page 51
- [2.11] Κ.Ι. Μουτζούρης, Θαλάσσια Υδραυλική, Κεφάλαιο 4^ο, σελ 38
- [2.12] Κ.Ι. Μουτζούρης, Θαλάσσια Υδραυλική, Κεφάλαιο 4^ο, σελ 40
- [2.13] Κ.Ι. Μουτζούρης, Θαλάσσια Υδραυλική, Κεφάλαιο 4^ο, σελ 40
- [2.14] RECOMMENDED PRACTISE, DNV-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, October 2010, Page 32
- [2.15] Α.Α. Δήμας, Λιμενικά Έργα, Κεφάλαιο 9^ο, σελ. 103
- [2.16] RECOMMENDED PRACTISE, DNV-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, October 2010, Page 56
- [2.17] RECOMMENDED PRACTISE, DNV-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, October 2010, Page 55

Κεφάλαιο 3^ο

Θεμελίωση πασσάλου

3.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Οι πάσσαλοι αποτελούν τον συνηθέστερο τρόπο βαθιάς θεμελίωσης και προτιμώνται έναντι των επιφανειακών θεμελιώσεων στη περίπτωση των υπεράκτιων κατασκευών γιατί το τυπικό εδαφικό προφίλ του πυθμένα της θάλασσας αποτελείται από μια στρώση πολύ μαλακού εδάφους στην επιφάνεια, η οποία δίνει πολύ μικρή εδαφική πλευρική αντίσταση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται επιμήκη στοιχεία (πάσσαλοι) οι οποίοι μεταφέρουν τα φορτία της κατασκευής με ασφάλεια σε μεγάλα βάθη όπου οι εδαφικές στρώσεις είναι επαρκώς πιο ανθεκτικές, περιορίζοντας ταυτόχρονα τις μετατοπίσεις της κατασκευής.

Οι πάσσαλοι ως στοιχεία θεμελιώσεων χρησιμοποιούνται συνήθως στις εξής περιπτώσεις:

- Όταν μαλακά εδάφη υπέρκεινται στιφρών
- Σε αποθέσεις μαλακών ή χαλαρών εδαφών μεγάλου πάχους
- Για μεταβίβαση στο έδαφος υψηλών φορτίων με ταυτόχρονο περιορισμό των καθιζήσεων
- Για ανάληψη οριζόντιων φορτίων

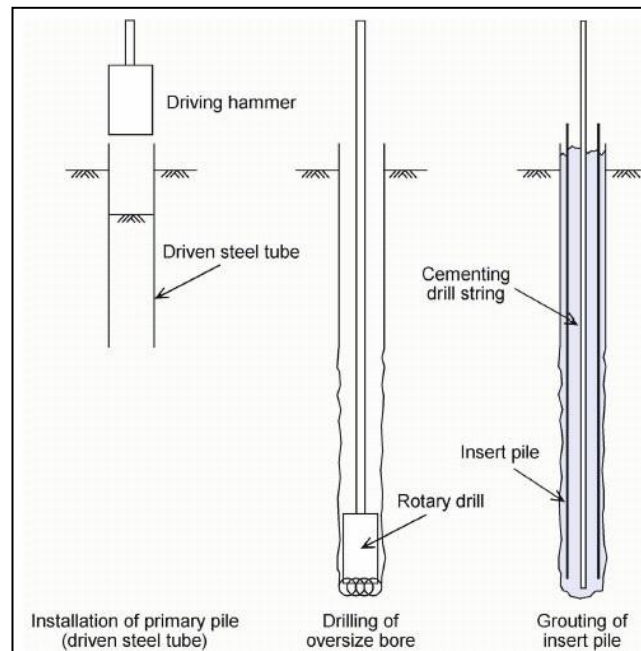
Στη περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών οι μεταλλικοί σωλήνες που χρησιμοποιούνται έχουν τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

- Διάμετρο (D) που κυμαίνεται μεταξύ 3.5m και 6.0m
- Βάθος θεμελίωσης (L) που κυμαίνεται από 20m έως 40m
- Λόγο διαμέτρου (D) προς πάχος τοιχώματος (t) μεταξύ 25 και 120

3.2 Τρόποι εγκατάστασης

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εγκατάστασης του μονοπασσάλου εξαρτάται από τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες και μπορεί να γίνει (Σχήμα 3.1):

- Μέσω έμπηξης με ειδικά σφυριά (driven piles)
- Μέσω εκσκαφής και ενίσχυσης (drilled and grouted piles)
- Με συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων



Σχήμα 3.1 – Τρόποι εγκατάστασης πασσάλων (από αριστερά) α) με έμψηξη β) με εκσκαφή και ενίσχυση [3.1]

Στη περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών η πρώτη μέθοδος τοποθέτησης χρησιμοποιείται στη πλειοψηφία των περιπτώσεων. Ο πάσσαλος ο οποίος είναι ανοιχτός στη βάση του, εμπηνύεται μέσα στο πυθμένα μέσω ενός ειδικού σφυριού το οποίο είναι ατμοκίνητο είτε υδραυλικό είτε βενζινοκίνητο (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2 – Διαδικασία έμψηξης μονοπασσάλου μέσω ειδικού σφυριού [3.2]

Το σφυρί "σπρώχνει" ουσιαστικά τον πάσσαλο ο οποίος ελέγχεται από έναν οδηγό έτσι ώστε να αποτρέπεται τυχόν απόκλιση του πασσάλου από την κατακόρυφο. Τα σφυριά αυτά λόγω της κρούσης μεταφέρουν ένα ισχυρό θλιπτικό κύμα στην κεφαλή του πασσάλου το οποίο μεταφέρεται σε όλο το πάσσαλο με την ταχύτητα του ήχου. Το κύμα αυτό είναι ένα δυναμικό φαινόμενο επιβολής τάσεων το οποίο περνά στο έδαφος δια μέσου του πασσάλου. Το πάχος του πασσάλου θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να μπορεί να παραλάβει με ασφάλεια τα επιβαλλόμενα αξονικά και πλευρικά φορτία που ασκούνται στη κατασκευή, καθώς και τις επιβαλλόμενες τάσεις κατά τη διάρκεια της έμψηξης.

3.3 Χαλύβδινοι εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας μελετώνται οι χαλύβδινοι εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι. Οι χαλύβδινοι πάσσαλοι χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της αυξημένης αντοχής τους και της ευχέρειας χειρισμού τους. Είναι ικανοί για μεταφορά μεγάλων θλιπτικών φορτίων ιδιαίτερα όταν καταλήγουν σε συμπαγή εδαφική στρώση. Έχουν τη δυνατότητα έμπηξης σε μεγάλο βάθος, μέχρι να συναντήσουν το κατάλληλο εδαφικό στρώμα ή να αναπτύξουν υψηλή πλευρική τριβή. Επίσης διαθέτουν υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα έναντι κάμψης και λυγισμού. Μειονέκτημα τους το αυξημένο κόστος ανά μέτρο βάθους έμπηξης. Οι χαλύβδινοι πάσσαλοι αποτελούν τον ιδανικότερο τρόπο θεμελίωσης στη περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών καθώς η κατασκευή τους δεν επηρεάζεται από τα υπόγεια ύδατα, επανεμπηγνύονται σε περίπτωση «ανύψωσης» και είναι κατάλληλοι για τις περιπτώσεις όπου σχετικώς μεγάλου πάχους μαλακές αποθέσεις υπέρκεινται της βάσης έδρασης. Όσο βέβαια αυξάνεται η διατομή του πασσάλου, τόσο δυσκολότερη γίνεται η έμπηξη του και εμφανίζονται δυσκολίες κατά την κατασκευή του.

Η θεμελίωση της κατασκευής μέσω πασσάλων επιτρέπει τη θεμελίωση σε μεγάλα βάθη με αποτέλεσμα η φέρουσα ικανότητα του εδάφους (διατμητική αστοχία-θραύση του εδάφους θεμελιώσεως) να είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με άλλες μεθόδους θεμελιώσεως. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα των θεμελιώσεων με πασσάλους είναι η δραστική μείωση των αναμενόμενων καθιζήσεων. Στη περίπτωση των πασσάλων, η παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου στην οποία αναπτύσσεται πλευρική τριβή είναι αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα οι καθιζήσεις της κατασκευής να είναι πολύ μικρές.

Οι κοίλοι κυκλικοί πάσσαλοι (που είναι και οι πιο διαδεδομένοι) αποτελούνται από ελάσματα τα οποία έχουν μια διαμήκη ραφή και το μήκος του κάθε ελάσματος μπορεί να φτάσει έως και τα 4m. Οι διαμήκεις ραφές δύο γειτονικών κομματιών του πάσαλου πρέπει να έχουν περιστραφεί τουλάχιστον κατά 90°. Οι ισχύοντες αμερικάνικοι κανονισμοί API RP2A και API RP2B, δίνουν επιτρεπόμενες αντοχές για της εξωτερική διάμετρο και την αρχική οβαλοποίηση. Αν ο πάσσαλος αποτελείται από διαφορετικού πάχους μέρη, τότε αυτά τα μέρη δεν πρέπει να διαφέρουν παραπάνω από 3mm σε πάχος, αλλιώς χρειάζονται μια εξομάλυνση 4:1 (κατακόρυφα προς οριζόντια).

Για συνήθη εδαφικά στρώματα οι χαλύβδινες διατομές πρέπει να έχουν επαρκή αντοχή σε διάβρωση για τη περίοδο ζωής που σχεδιάζονται και το τμήμα του πασσάλου που βρίσκεται πάνω από τη στάθμη της θάλασσας ή το τμήμα που βρίσκεται σε διαβρωμένα εδαφικά στρώματα θα πρέπει να προστατεύεται έναντι διάβρωσης.

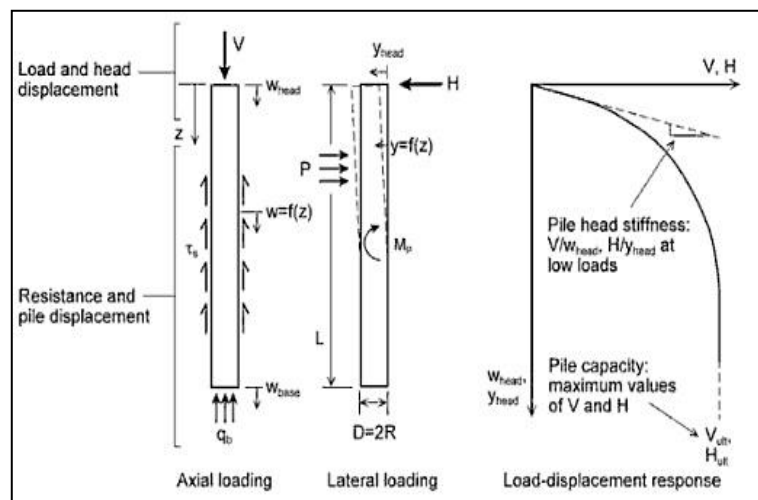
Τα βασικά κριτήρια για την επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μονοπασσάλου είναι τα εξής:

- Το μέγεθος των υδροδυναμικών και αεροδυναμικών φορτίων που ασκούνται στην ανωδομή

- Τα εδαφικά χαρακτηριστικά του εδάφους θεμελιώσεως
- Τις δυνατότητες και τα κόστος κατασκευής του

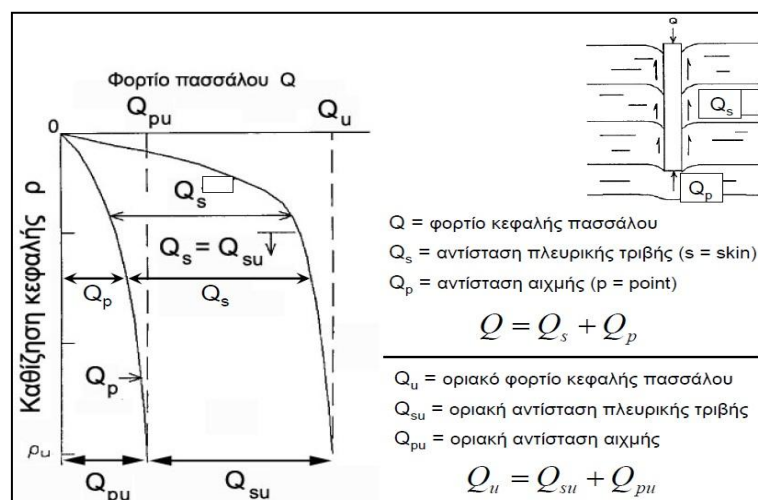
3.4 Φέρουσα ικανότητα - Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση

Η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου υπό κατακόρυφη φόρτιση ορίζεται ως το θεωρητικό φορτίο που οδηγεί σε διατμητική αστοχία-θραύση το έδαφος θεμελιώσεως. Στη περίπτωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών η κατακόρυφη φόρτιση δεν έχει κυρίαρχο λόγο καθώς πρόκειται για κατασκευές που φορτίζονται κυρίως πλευρικά και φορτίζονται "ελαφρά" κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Ο μηχανισμός ανάληψης φορτίσεων είναι διαφορετικός για αξονική και πλευρική φόρτιση, ωστόσο οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης (p - y) είναι της ίδιας μορφής (Σχήμα 3.3):



Σχήμα 3.3 – Μηχανισμός ανάληψης (από αριστερά) α) κατακόρυφων β) οριζόντιων φορτίσεων από πασσάλους και καμπύλες φόρτισης μετατόπισης (P - y) με θεώρηση μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους [3.3]

Ο μηχανισμός ανάληψης φορτίων από θλιβόμενους πασσάλους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.4):



Σχήμα 3.4 – Μορφή καμπύλης αξονικής δύναμης-μετατόπισης στη κορυφή του πασσάλου [3.4]

Η φέρουσα ικανότητα ενός μεμονωμένου κατακόρυφου πασσάλου ο οποίος υποβάλλεται σε αξονική θλιπτική κατακόρυφη φόρτιση, δίνεται από τη σχέση:

$$Q_u = Q_{su} + Q_{pu} - W_p \quad (3.1)$$

όπου:

- Q_u είναι το οριακό φορτίο του πασσάλου
- Q_{su} είναι η οριακή αντίσταση πλευρικής τριβής του πασσάλου
- 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:

$$Q_{su} = \pi D \int_0^L \tau_{su} dz = \pi D \sum_i \tau_{sui} \Delta z_i \quad (3.2)$$

όπου:

- D είναι η διάμετρος του πασσάλου
- τ_{su} είναι η οριακή πλευρική τριβή
- τ_{sui} είναι η οριακή πλευρική τριβή της i -οστής στρώσης (πάχους Δz_i)

Η οριακή αντίσταση αιχμής του πασσάλου δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{pu} = A_p q_{pu} \quad (3.3)$$

όπου:

- A_p είναι το εμβαδό της αιχμής του πασσάλου
- q_{pu} είναι η οριακή μοναδιαία αντίσταση αιχμής του πασσάλου

3.5 Φέρουσα ικανότητα - Αντοχή σε πλευρική φόρτιση

Στη περίπτωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών οι πλευρικές φορτίσεις κυριαρχούν στην καταπόνηση της κατασκευής. Αυτές οι φορτίσεις προέρχονται κυρίως από το υδροδυναμικά και τα αεροδυναμικά φορτία που ασκούνται στην ανωδομή της κατασκευής. Οι πάσσαλοι αναλαμβάνουν τις οριζόντιες δυνάμεις με σύγχρονη κάμψη και πλευρική μετατόπιση, ενεργοποιώντας έτσι τόσο την αντοχή τους όσο και την αντοχή του εδάφους που τους περιβάλλει. Ο έλεγχος λοιπόν της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου σε οριζόντια φορτία θα πρέπει να περιλαμβάνει:

- Τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας του περιβάλλοντος εδάφους

- Τον έλεγχο της αντοχής του πασσάλου ως φέροντος στοιχείου σε κάμψη λόγω των πλευρικών καταπονήσεων

Η φέρουσα ικανότητα των πασσάλων εκφράζεται συνήθως με μη-γραμμική ανάλυση σε όρους "P-γ". Ο μηχανισμός αστοχίας διαφέρει ανάλογα με το αν ο πάσσαλος θεωρείται κοντός (άκαμπτος) ή μακρύς (εύκαμπτος). Ένας κοντός, άκαμπτος πάσσαλος που φορτίζεται πλευρικά, περιστρέφεται γύρω από ένα σημείο περιστροφής εντός του εδάφους και η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του βασίζεται κυρίως στην αντοχή του περιβάλλοντος εδάφους. Αντίθετα στη περίπτωση ενός μακρού, εύκαμπτου πασσάλου η φέρουσα ικανότητα του συστήματος πάσσαλος-έδαφος συνδέεται κυρίως με τη κάμψη του πασσάλου λόγω των καμπτικών ροπών που προέρχονται από την πλευρική φόρτιση του πασσάλου [3.5].

Η αντίδραση του εδάφους στην παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου λόγω την οριζόντιων φορτίων που ασκούνται στη κατασκευή μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπο οι κυριότεροι από τους οποίους είναι:

- Ο δείκτης εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση k_h
- Το μέτρο ελαστικότητας του Young
- Καμπύλες πιέσεων-υποχωρήσεων "p-γ"

Οι καμπύλες αυτές συνδέουν τις εδαφικές αντιδράσεις με την παραμόρφωση του πασσάλου, για διάφορα βάθη κατά μήκος του πασσάλου κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

3.5.1 Δείκτης εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση

Ο δείκτης εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση (k_h) αποτελεί ένα τρόπο έκφρασης της αντίδρασης του εδάφους στην παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου λόγω των οριζόντιων φορτίων που ασκούνται στη κατασκευή.

Στα συνεκτικά εδάφη, για την περίπτωση των οριζόντιων φορτίσεων μικρής διάρκειας, ο δείκτης εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση (k_h), αυξάνει με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και κατά συνέπεια με την αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (c_u) του εδαφικού υλικού (Broms, 1964). Έτσι για την περίπτωση των κανονικά φορτισμένων (NC) αργίλων όπου η αστράγγιστη διατμητική τους αντοχή αυξάνεται με το βάθος, αναμένεται και ο δείκτης εδάφους (k_h) να αυξάνεται αναλογικά με το βάθος. Για την περίπτωση όμως των προφορτισμένων (O.C) αργίλων όπου η αστράγγιστη διατμητική τους αντοχή είναι πρακτικά σταθερή για ορισμένο βάθος, αναμένεται και ο δείκτης εδάφους (k_h) να είναι αντίστοιχα σταθερός για το βάθος αυτό.

Στα μη συνεκτικά εδάφη, ο δείκτης εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση (k_h) είναι ανάλογος προς το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους (Broms, 1964). Επειδή όμως στα εδάφη αυτά το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα του εδάφους (D_r) καθώς και από την ενεργό πίεση των υπερκειμένων γαιών (σ'_v), ο δείκτης εδάφους (k_h) θα αυξάνεται γραμμικά με το βάθος.

Συμπερασματικά λοιπόν προκύπτει:

- Στη περίπτωση των κανονικά φορτισμένων αργίλων ο δείκτης εδάφους (k_h) αυξάνει με το βάθος
- Στη περίπτωση των προφορτισμένων αργίλων ο δείκτης εδάφους (k_h) παραμένει σταθερός με το βάθος
- Στη περίπτωση των μη συνεκτικών εδαφών ο δείκτης εδάφους (k_h) αυξάνει με το βάθος

Σε αυτό το σημείο γίνεται σύνδεση του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση (k_h) με τη σταθερά των ελατηρίων (K):

Σταθερά ελατηρίου (K) = Δείκτης εδάφους (k_h) · Διάμετρος πασσάλου (D) · Επιφάνεια επιρροής ελατηρίου

3.6 Σταθερά ελατηρίων

Η επιρροή του εδάφους στους πασσάλους προσομοιώνεται με τη χρήση μη-γραμμικών ελατηρίων που τοποθετούνται σε όλες τις διευθύνσεις. Η δυσκαμψία των ελατηρίων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πασσάλου καθώς και από τις ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων. Για το λόγο αυτό υπολογίζονται οι εδαφικές σταθερές στη περιοχή που θα τοποθετηθούν οι πάσσαλοι.

Παρότι δεν είναι φυσικώς δυνατό, οι αναλύσεις γίνονται θεωρώντας ενιαίο εδαφικό προφίλ για όλο το βάθος έμπηξης του πασσάλου προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή μόνο της μεταβολής της σταθεράς των ελατηρίων στην απόκριση της κατασκευής. Για το λόγο αυτό, οι αναλύσεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τιμών της δυσκαμψίας των ελατηρίων και μελετάται έτσι η συμπεριφορά του πασσάλου σε όλα τα είδη εδάφους, από το πιο χαλαρό μέχρι αυτό με τη μεγαλύτερη συνοχή που πλησιάζει όσο είναι δυνατόν τις συνθήκες πάκτωσης.

Στα πλαίσια της εργασίας δεν τοποθετούνται γραμμικά ελατήρια κατά τη διεύθυνση του άξονα του πασσάλου αφού η πλευρική τριβή που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου είναι αρκετά μεγάλη και άρα οι καθιζήσεις της κατασκευής είναι ελάχιστες (η κορυφή του πασσάλου δεσμεύεται με άρθρωση). Κατά την εγκάρσια διεύθυνση του πασσάλου

τοποθετούνται μη-γραμμικά ελατήρια τα οποία προσομοιώνουν τη δυσκαμψία του εδάφους.

3.7 Θεμελίωση πασσάλου σε συνεκτικά εδάφη

Στη περίπτωση των συνεκτικών εδαφών διακρίνονται δύο κατηγορίες εδαφών και άρα δύο κατανομές δυσκαμψίας του εδάφους:

- Η περίπτωση των προφορτισμένων (O.C) αργίλων όπου η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους (c_u) παραμένει σταθερή με το βάθος με αποτέλεσμα και το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους να παραμένει σταθερό με το βάθος. Σε αυτή τη περίπτωση η δυσκαμψία των ελατηρίων παραμένει σταθερή με το βάθος
- Η περίπτωση των κανονικά φορτισμένων (N.C) αργίλων όπου η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους (c_u) αυξάνεται με το βάθος με αποτέλεσμα και το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους να αυξάνει με το βάθος. Σε αυτή τη περίπτωση η δυσκαμψία των ελατηρίων αυξάνει με το βάθος

Η μη-γραμμική κατανομή της δυσκαμψίας των ελατηρίων, η οποία προσδιορίζεται από την καμπύλη πιέσεων-υποχωρήσεων “p-y” εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως:

- Το τύπο του εδάφους
- Τη διατμητική αντοχή του εδάφους
- Τη παραμορφωσιμότητα του εδάφους
- Το βάθος των ελατηρίων
- Τη διάμετρο του πασσάλου
- Τη καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι η διαδικασία καθώς και όλοι οι τύποι παραγωγής των καμπύλων πιέσεων-υποχωρήσεων “P-y” αντλήθηκαν από τη δημοσίευση του Κωνσταντίνου Γεωργιάδη και του Μιχάλη Γεωργιάδη με τίτλο: “Development of p-y curves for undrained response of piles near slopes” [3.6].

Η υπερβολική εξίσωση που ορίζει το σχήμα της καμπύλης η οποία καθορίζει τη σχέση μεταξύ πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και της αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλη “p-y”) για αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης είναι η εξής:

$$p = \frac{y}{\frac{1}{K_i} + \frac{y}{p_u}} \quad (3.4)$$

όπου:

- p είναι πλευρικό φορτία ανά μέτρο μήκους που ασκείται στον πάσσαλο υπό αστράγγιστες συνθήκες [kN/m]
- y η πλευρική μετατόπιση του πασσάλου [m]
- K_i είναι η αρχική δυσκαμψία της καμπύλης “p-y” [kN/m²]
- p_u το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου υπό αστράγγιστες συνθήκες [kN/m]

Η αρχική δυσκαμψία στις καμπύλες “p-y” εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά παραμορφωσιμότητας του εδάφους, τη διάμετρο του πασσάλου, την καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου και δίνεται από τη σχέση:

$$K_i = 3E_{u,50} \left(\frac{E_{u,50} D^4}{E_p I_p} \right)^{1/12} \quad (3.5)$$

όπου:

- K_i η αρχική δυσκαμψία της καμπύλης “p-y” [kN/m²]
- $E_{u,50}$ το μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί στο 50% της τάσης αστοχίας η οποία καθορίζεται από δοκιμή τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες [kPa]
- D είναι η διάμετρος του πασσάλου [m]
- $E_p I_p$ είναι η καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου [kNm²]

Στη τριαξονική δοκιμή υπό αστράγγιστες συνθήκες ισχύει:

$$E_{u,50} = \frac{c_u}{\varepsilon_{u,50}} \quad (3.6)$$

όπου:

- c_u είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους [kPa]
- $\varepsilon_{u,50}$ η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο 50% της τάσης αστοχίας η οποία καθορίζεται από δοκιμή τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες

1. Στη περίπτωση των προφορτισμένων (Ο.Σ) αργίλων ισχύει η σχέση:

$$E_{u,50} = 300c_u \Rightarrow \frac{c_u}{E_{u,50}} = \frac{1}{300} \Rightarrow \varepsilon_{u,50} = \frac{1}{300} \quad (3.7)$$

Όπως έχει αναφερθεί στη περίπτωση των προφορτισμένων αργίλων η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους παραμένει σταθερή με το βάθος. Συνεπώς από τη σχέση 3.7 προκύπτει ότι και το μέτρο ελαστικότητας $E_{u,50}$ παραμένει σταθερό με το βάθος. Επιπλέον από τη σχέση 3.7 προκύπτει πως και η παραμόρφωση $\varepsilon_{u,50}$ παραμένει σταθερή με το βάθος. Συμπερασματικά προκύπτει πως η αρχική δυσκαμψία της καμπύλης “p-y” (K_i)

παραμένει σταθερή με το βάθος και εξαρτάται από την τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (c_u).

2. Στη περίπτωση των κανονικά φορτισμένων (N.C) αργίλων η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους (c_u) αυξάνεται με το βάθος με αποτέλεσμα το μέτρο ελαστικότητας $E_{u,50}$ να αυξάνει με το βάθος. Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές της παραμόρφωσης $\epsilon_{u,50}$ για διάφορες τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για την περίπτωση των κανονικά στερεοποιημένων αργίλων.

	c_u (kPa)	$\epsilon_{u,50}$
Στιφρή	< 48	0,020
Πολύ στιφρή	48 - 96	0,010
Σκληρή	96 - 192	0,005

Σχήμα 3.5 – Τιμές παραμόρφωσης $\epsilon_{u,50}$ για διάφορες τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (N.C άργιλοι)

Συμπερασματικά προκύπτει πως η αρχική δυσκαμψία της καμπύλης “p-γ” (K_i) αυξάνει με το βάθος και εξαρτάται από την τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (c_u).

Το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου υπό αστράγγιστες συνθήκες (p_u) δίνεται από τη σχέση:

$$p_u = N_p c_u D \quad (3.8)$$

όπου:

- N_p είναι ο συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας
- c_u είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους [kPa]
- D είναι η διάμετρος του πασσάλου [m]

Ο συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας (N_p) δίνεται από τη σχέση:

$$N_p = N_{pu} - (N_{pu} - N_{po}) e^{-\lambda(z/D)} \quad (3.9)$$

όπου:

- N_{pu} είναι ο μέγιστος συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας
- N_{po} είναι ο συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας στην επιφάνεια του εδάφους
- λ είναι ένας αδιάστατος συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από την τραχύτητα στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους
- z είναι το βάθος από την πυθμένα της θάλασσας [m]
- D είναι η διάμετρος του πασσάλου [m]

Ο συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας (N_p) αυξάνεται με το βάθος στο ανώτερο τμήμα του πασσάλου, ξεκινώντας από την τιμή N_{po} στην επιφάνεια του εδάφους και φτάνει στη μέγιστη τιμή του N_{pu} σε μεγαλύτερα βάθη όπου και παραμένει σταθερός.

Ο αδιάστατος συντελεστής λ εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή τραχύτητας στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους (α) ο οποίος ορίζεται σαν ο λόγος της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας ($\alpha = \tau_{su}/c_u$). Συγκεκριμένα ο συντελεστής λ ορίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = 0.55 - 0.15\alpha \quad (3.10)$$

και παίρνει τιμές από 0.55 για $\alpha=0$ (λεία επιφάνεια) μέχρι 0.40 για $\alpha=1$ (τραχιά επιφάνεια).

Ο συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας στην επιφάνεια του εδάφους (N_{po}) ορίζεται από τη σχέση:

$$N_{po} = 2 + 1.5\alpha \quad (3.11)$$

Ο μέγιστος συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας (N_{pu}) ορίζεται από τη σχέση:

$$N_{pu} = \pi + 2\Delta + 2\cos\Delta + 4\left(\cos\frac{\Delta}{2} + \sin\frac{\Delta}{2}\right) \quad (3.12)$$

όπου $\Delta = \arcsin(\alpha)$.

3.8 Θεμελίωση πασσάλου σε μη-συνεκτικά εδάφη

Στη περίπτωση των μη-συνεκτικών εδαφών ο δείκτης εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση (k_h) είναι ανάλογος με το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους. Στα εδάφη αυτά το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα του εδάφους (D_r) καθώς και την ενεργό πίεση των υπερκειμένων γαιών (σ'_v) με αποτέλεσμα ο δείκτης εδάφους (k_h) να αυξάνει με το βάθος. Έτσι στη περίπτωση των μη-συνεκτικών εδαφών η δυσκαμψία των ελατηρίων αυξάνει με το βάθος.

Η μη-γραμμική κατανομή της δυσκαμψίας των ελατηρίων, η οποία προσδιορίζεται από την καμπύλη πιέσεων-υποχωρήσεων "p-y" εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως:

- Το τύπο του εδάφους
- Τη σχετική πυκνότητα του εδάφους
- Το βάθος των ελατηρίων
- Την ενεργό πίεση των υπερκειμένων γαιών
- Τη διάμετρο του πασσάλου

Η υπερβολική εξίσωση που ορίζει το σχήμα της καμπύλης η οποία καθορίζει τη σχέση μεταξύ πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και της αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλη "p-y") είναι η εξής [3.7]:

$$p = A p_u \tanh\left(\frac{k_z}{A p_u} y\right) \quad (3.13)$$

όπου:

- ρ είναι το πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους που ασκείται στον πάσσαλο [kN/m]
 γ η πλευρική μετατόπιση του πασσάλου [m]
 k είναι η σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση [kN/m³]
 z είναι το βάθος από την πυθμένα της θάλασσας [m]
 ρ_u το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου [kN/m]
 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 φέρουσα ικανότητα (ρ_u) διαφέρει ανάλογα με απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους. Για ένα συγκεκριμένο βάθος το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου ορίζεται ως η μικρότερη τιμή από τις παρακάτω δύο εξισώσεις [3.7]:

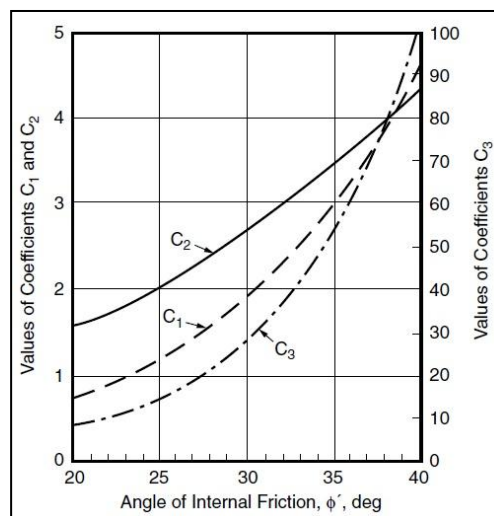
$$\rho_{us} = (C_1 z + C_2 D) \gamma' z \quad (3.14)$$

$$\rho_{ud} = C_3 D \gamma' z \quad (3.15)$$

όπου:

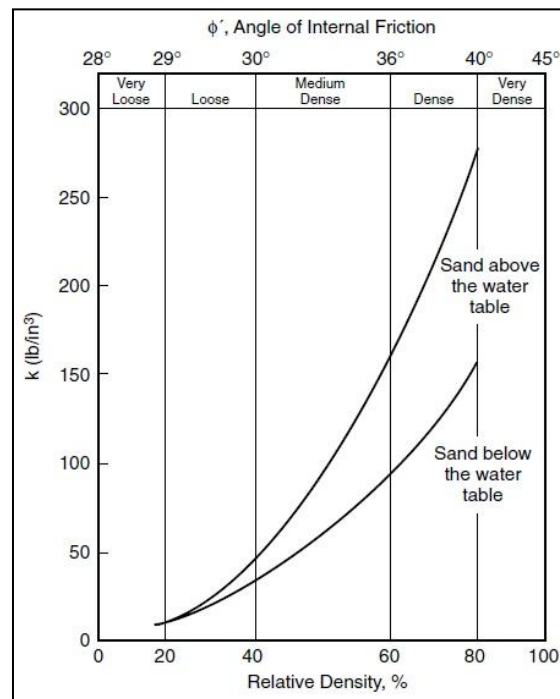
- ρ_{us} είναι το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου - ρηχά βάθη [kN/m]
 ρ_{ud} είναι το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου - βαθιά βάθη [kN/m]
 z είναι το βάθος από την πυθμένα της θάλασσας [m]
 γ' είναι η ενεργός πίεση των υπερκειμένων γαιών [kN/m³]
 D είναι η διάμετρος του πασσάλου [m]
 $C_{1,2,3}$ είναι συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους

Οι συντελεστές C_1, C_2, C_3 οι οποίοι εξαρτώνται από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους, λαμβάνονται από το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3.6):



Σχήμα 3.6 – Συντελεστές C_1, C_2, C_3 συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής του εδάφους [3.7]

Η σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση (k) εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα του εδάφους και λαμβάνεται από το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3.7):



Σχήμα 3.7 – Σταθερά δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση συναρτήσει σχετικής πυκνότητας του εδάφους (D_r) [3.7]

3.9 Μεμονωμένη δοκιμή θεμελίωσης πασσάλου σε συνεκτικά εδάφη

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζεται διαδικασία υπολογισμού της σταθεράς των ελατηρίων (K), αρχικά για την περίπτωση της θεμελίωσης του πασσάλου σε προφορτισμένες (O.C) αργίλους και στη συνέχεια για την περίπτωση της θεμελίωσης του πασσάλου σε κανονικά φορτισμένες (N.C) αργίλους. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του επιλεγόμενου πασσάλου (Σχήμα 3.8):

D (m)	5	D - Διάμετρος πασσάλου
t (m)	0,10	t – Πάχος τοιχωμάτων πασσάλου
E_p (MPa)	210.000	E_p - Μέτρο ελαστικότητας πασσάλου
I_p (m⁴)	4,62	I_p - Ροπή αδράνειας πασσάλου
$E_p \cdot I_p$ (MN·m²)	970.617,8	$E_p \cdot I_p$ - Καμπτική δυσκαμψία πασσάλου
L (m)	30,0	L – Βάθος έμπηξης πασσάλου

Σχήμα 3.8 – Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πασσάλου

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στα πλαίσια της εργασίας στη περίπτωση χρήσης γραμμικών ελατηρίων σαν δυσκαμψία των ελατηρίων λαμβάνεται αυτή που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου (p_u) υπό αστράγγιστες συνθήκες.

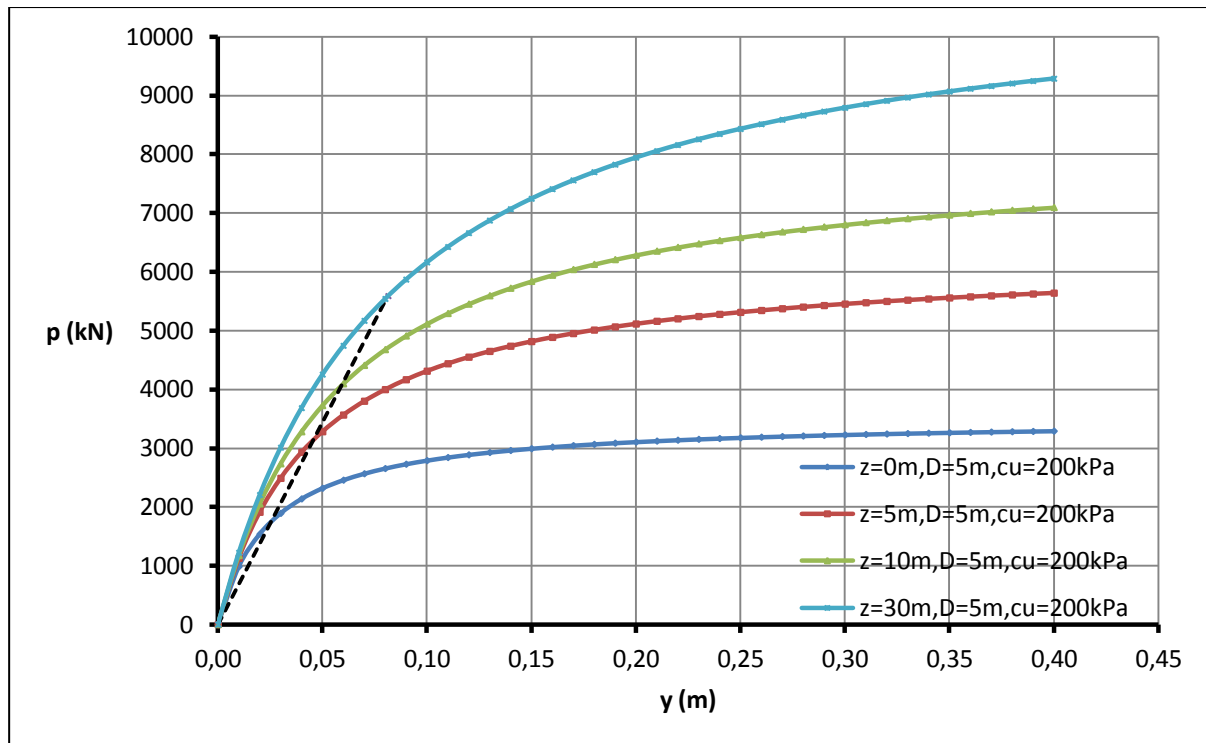
3.9.1 Θεμελίωση πασσάλου σε προφορτισμένες αργίλους

Όπως έχει αναφερθεί, στη περίπτωση των προφορτισμένων αργίλων η δυσκαμψία των ελατηρίων (K) παραμένει σταθερή με το βάθος και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του πασσάλου καθώς και από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή (c_u) του εδάφους. Στις προφορτισμένες αργίλους η αστράγγιστη διατμητική αντοχή παραμένει σταθερή με το βάθος και στα πλαίσια της μεμονωμένης δοκιμής που παρουσιάζεται σε αυτή τη παράγραφο θα ληφθεί ίση με $c_u = 200$ kPa. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της διαδικασίας που αναλύθηκε στη παράγραφο 3.7 (Σχήμα 3.9) με τελικό σκοπό τον υπολογισμό της δυσκαμψίας των ελατηρίων. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στα πλαίσια της εργασίας στη περίπτωση χρήσης γραμμικών ελατηρίων σαν δυσκαμψία των ελατηρίων λαμβάνεται αυτή που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου (p_u) υπό αστράγγιστες συνθήκες.

c_u (kPa)	200	c_u - Αστράγγιστη διατμητική αντοχή εδάφους
$E_{u,50}$ (kPa)	60.000	$E_{u,50}$ - Μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί στο 50% της τάσης αστοχίας η οποία καθορίζεται από τριαξονική θλίψη υπό αστράγγιστες συνθήκες $E_{u,50}=300 \cdot c_u$
$\epsilon_{u,50}$	0,0033	$\epsilon_{u,50}$ - Παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο 50% της τάσης αστοχίας η οποία καθορίζεται από τριαξονική θλίψη υπό αστράγγιστες συνθήκες
K_i (kN/m ²)	137.252,8	K_i - Αρχική δυσκαμψία της καμπύλης p - y
x (m)	1,0	x - Μήκος επιρροής κάθε ελατηρίου
K_i (kN/m)	137.252,8	K_i - Αρχική δυσκαμψία της καμπύλης p - y
α	1,0	α - Συντελεστής τραχύτητας στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους (0 - 1)
λ	0,40	λ - Αδιάστατος συντελεστής
N_{po}	3,50	N_{po} - Συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας στην επιφάνεια του εδάφους
Δ	1,57	Δ - Αδιάστατος συντελεστής
N_{pu}	11,94	N_{pu} - Μέγιστος συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας
N_p		N_p - Συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας (μεταβάλλεται με το βάθος z)
p_u (kN/m)		p_u - Μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκος πασσάλου υπό αστράγγιστες συνθήκες $p_u=N_p \cdot c_u \cdot D$ (μεταβάλλεται με το βάθος z)
p (kN/m)		P - Πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκος πασσάλου υπό αστράγγιστες συνθήκες

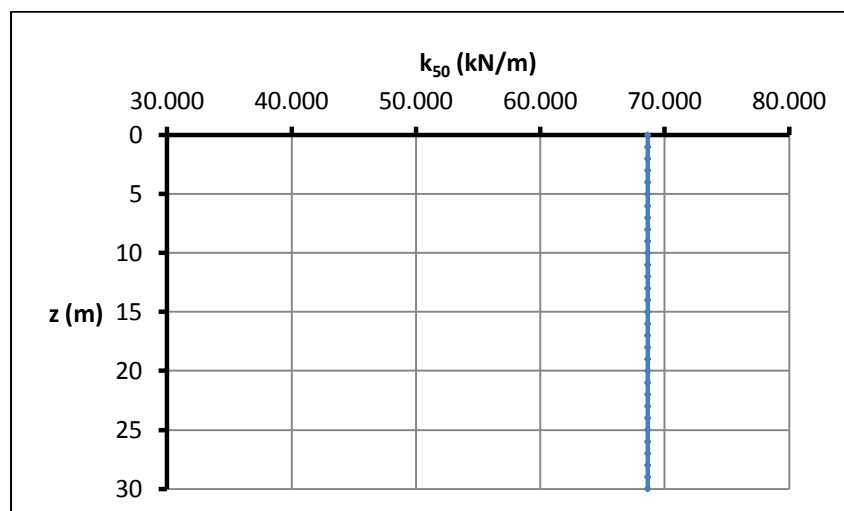
Σχήμα 3.9 – Χαρακτηριστικά υπολογισμού δυσκαμψίας ελατηρίων – Προφορτισμένοι άργιλοι

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.10) απεικονίζονται οι καμπύλες πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλες " p - y ") σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Όπως είναι προφανές η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου (p_u) υπό αστράγγιστες συνθήκες είναι ίδια για κάθε βάθος z κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας με αποτέλεσμα η δυσκαμψία των γραμμικών ελατηρίων να παραμένει σταθερή με το βάθος.



Σχήμα 3.10 – Καμπύλες “ p - γ ” για διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ($c_u=200\text{kPa}$ – $D=5\text{m}$)

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.11) απεικονίζεται η δυσκαμψία των γραμμικών ελατηρίων συναρτήσει του βάθους z κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας. Όπως είναι προφανές η δυσκαμψία των ελατηρίων παραμένει σταθερή με το βάθος.



Σχήμα 3.11 – Δυσκαμψία ελατηρίων συναρτήσει του βάθους από τον πυθμένα της θάλασσας ($c_u=200\text{kPa}$ – $D=5\text{m}$)

3.9.2 Θεμελίωση πασσάλου σε κανονικά φορτισμένες αργίλους

Όπως έχει αναφερθεί, στη περίπτωση των κανονικά φορτισμένων αργίλων η δυσκαμψία των ελατηρίων (K) αυξάνει με το βάθος και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του πασσάλου καθώς και από την αστράγγιστη διατμητική αντοχή (c_u) του

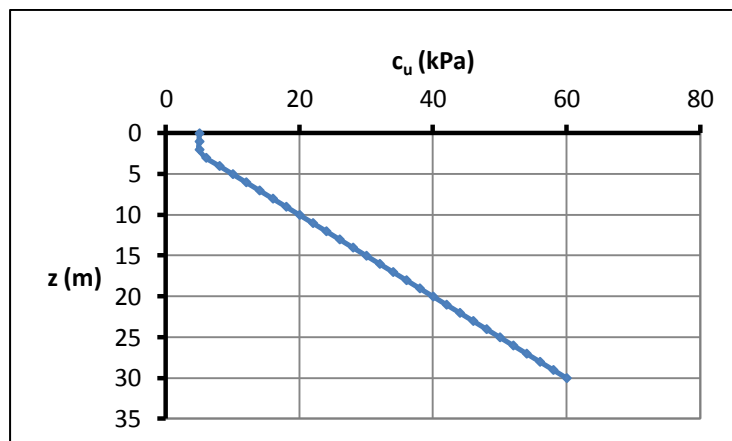
εδάφους. Στις κανονικά φορτισμένους αργίλους η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους μεταβάλλεται με το βάθος και στα πλαίσια της μεμονωμένης δοκιμής που παρουσιάζεται σε αυτή τη παράγραφο ακολουθεί τη κατανομή του παρακάτω σχήματος (Σχήμα 3.12). Όπως παρατηρούμε η αστράγγιστη διατμητική αντοχή παραμένει σταθερή κοντά στην επιφάνεια ενώ στη συνέχεια αυξάνεται γραμμικά εξαιτίας της αντίστοιχης αύξησης της ενεργού πίεσης των υπερκειμένων γαιών (σ'_v). Συγκεκριμένα η αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ορίζεται από τη σχέση:

$$c_u = A \cdot \sigma'_v(z) \quad (3.16)$$

όπου:

A είναι ο συντελεστής κλίσεως της ευθείας που εκφράζει τη μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους συναρτήσει της ενεργού πίεσης των υπερκειμένων γαιών ($A=0.20$)

$\sigma'_v(z)$ είναι η ενεργός πίεση των υπερκειμένων γαιών σε βάθος z κάτω από την επιφάνεια του εδάφους



Σχήμα 3.12 – Μεταβολή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής συναρτήσει του βάθους z από την επιφάνεια του εδάφους

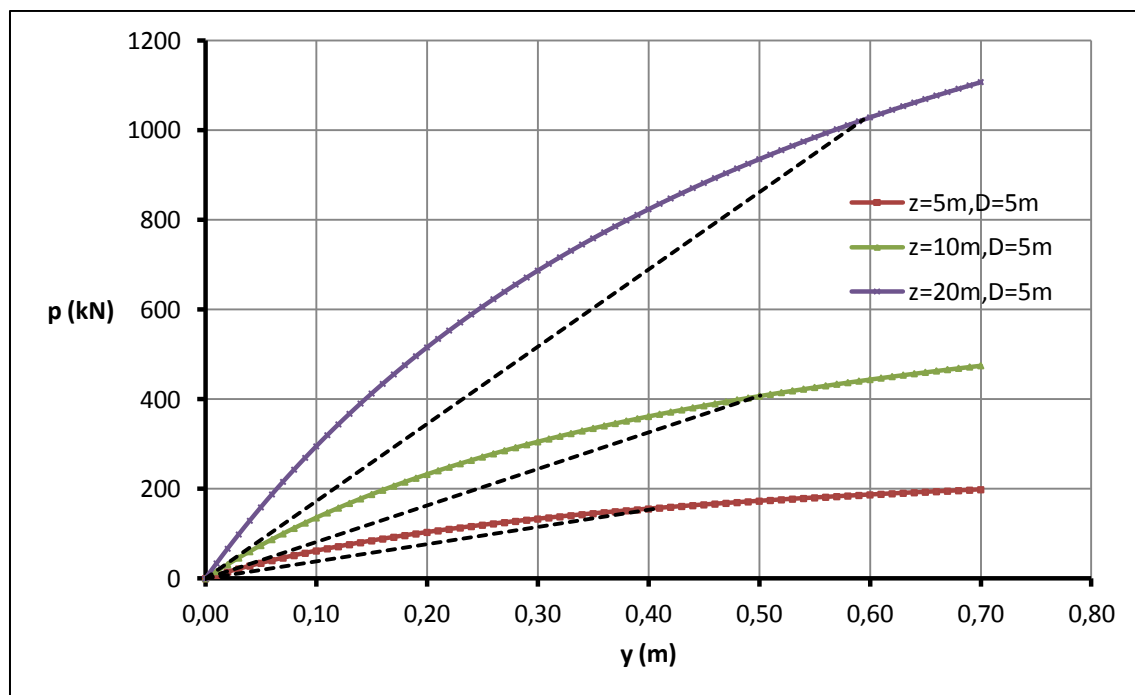
Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της διαδικασίας που αναλύθηκε στη παράγραφο 3.7 (Σχήμα 3.13) με τελικό σκοπό τον υπολογισμό της δυσκαμψίας των ελατηρίων.

c_u (kPa)		c_u - Αστράγγιστη διατμητική αντοχή εδάφους [$c_u=0.20 \cdot \sigma'_v(z)$]
$\epsilon_{u,50}$		$\epsilon_{u,50}$ - Παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο 50% της τάσης αστοχίας η οποία καθορίζεται από τριαξονική θλίψη υπό αστράγγιστες συνθήκες (λαμβάνεται από το Σχήμα 3.5 ανάλογα με την τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u)
$E_{u,50}$ (kPa)		$E_{u,50}$ - Μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί στο 50% της τάσης αστοχίας η οποία καθορίζεται από τριαξονική θλίψη υπό αστράγγιστες συνθήκες $E_{u,50} = \frac{c_u}{\epsilon_{u,50}}$
K_i (kN/m ²)		K_i - Αρχική δυσκαμψία της καμπύλης p - y (μεταβάλλεται με το βάθος z)

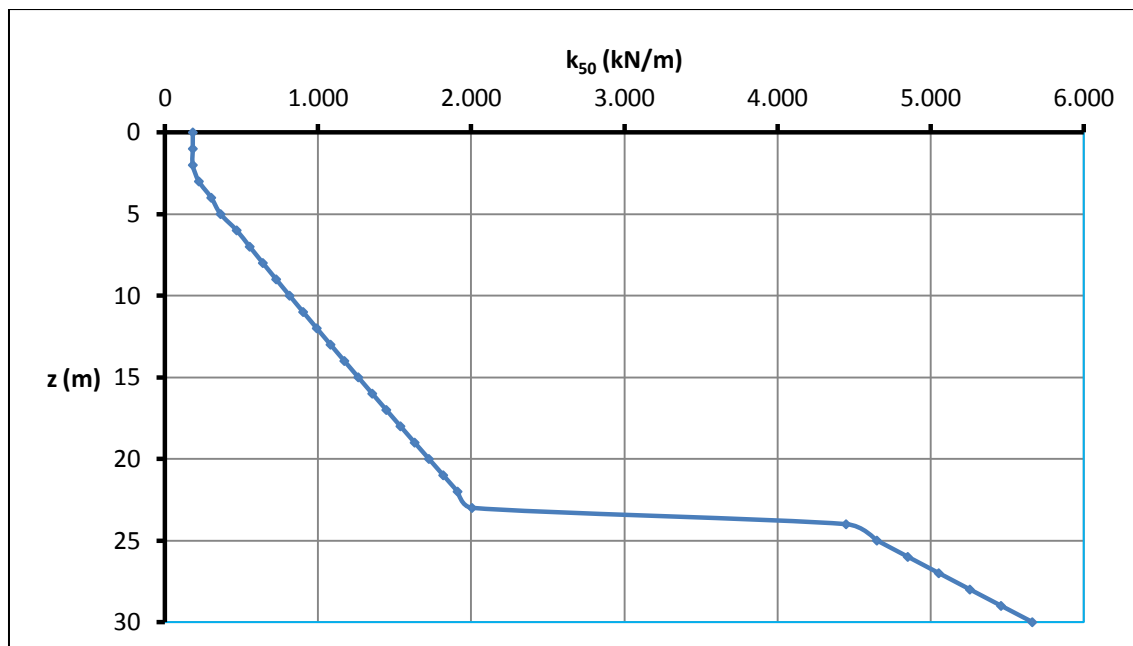
x (m)	1,0	x - Μήκος επιρροής κάθε ελατηρίου
K_i (kN/m)		K_i - Αρχική δυσκαμψία της καμπύλης $p-y$ (μεταβάλλεται με το βάθος z)
α	1,0	α - Συντελεστής τραχύτητας στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους (0 - 1)
λ	0,40	λ - Αδιάστατος συντελεστής
N_{po}	3,50	N_{po} - Συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας στην επιφάνεια του εδάφους
Δ	1,57	Δ - Αδιάστατος συντελεστής
N_{pu}	11,94	N_{pu} - Μέγιστος συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας
N_p		N_p - Συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας (μεταβάλλεται με το βάθος z)
p_u (kN/m)		p_u - Μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκος πασσάλου υπό αστράγγιστες συνθήκες $p_u = N_p \cdot c_u \cdot D$ (μεταβάλλεται με το βάθος z)
p (kN/m)		P - Πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκος πασσάλου υπό αστράγγιστες συνθήκες

Σχήμα 3.13 – Χαρακτηριστικά υπολογισμού δυσκαμψίας ελατηρίων – Κανονικά φορτισμένες άργιλοι

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.14) απεικονίζονται οι καμπύλες πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλες “ $p-y$ ”) σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Όπως είναι προφανές η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου (p_u) υπό αστράγγιστες συνθήκες μεταβάλλεται για κάθε βάθος z κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας με αποτέλεσμα η δυσκαμψία των ελατηρίων να αυξάνει με το βάθος.

Σχήμα 3.14 – Καμπύλες “ $p-y$ ” για διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ($D=5m$)

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.15) απεικονίζεται η δυσκαμψία των γραμμικών ελατηρίων συναρτήσει του βάθους z κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας. Όπως είναι προφανές η δυσκαμψία των ελατηρίων αυξάνεται με το βάθος.



Σχήμα 3.15 – Δυσκαμψία ελατηρίων συναρτήσει του βάθους από τον πυθμένα της θάλασσας ($D=5\text{m}$)

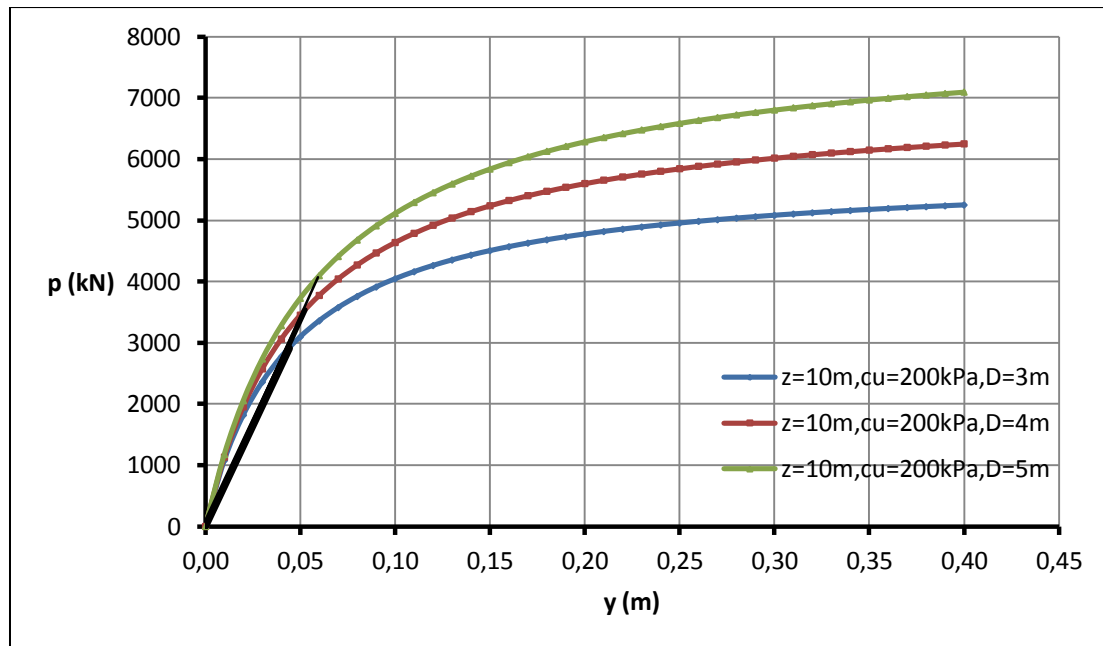
3.10 Παραμετρικές αναλύσεις θεμελίωσης πασσάλου σε συνεκτικά εδάφη

Σε αυτή τη παράγραφο γίνονται κάποιες παραμετρικές αναλύσεις για τον υπολογισμό της σταθεράς των ελατηρίων (K), αρχικά για την περίπτωση της θεμελίωσης του πασσάλου σε προφορτισμένες (O.C) αργίλους και στη συνέχεια για την περίπτωση της θεμελίωσης του πασσάλου σε κανονικά φορτισμένες (N.C) αργίλους. Συγκεκριμένα τα μεγέθη τα οποία μεταβάλλονται είναι τα εξής:

- Η κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους (c_u)
- Η διάμετρος του πασσάλου (D)

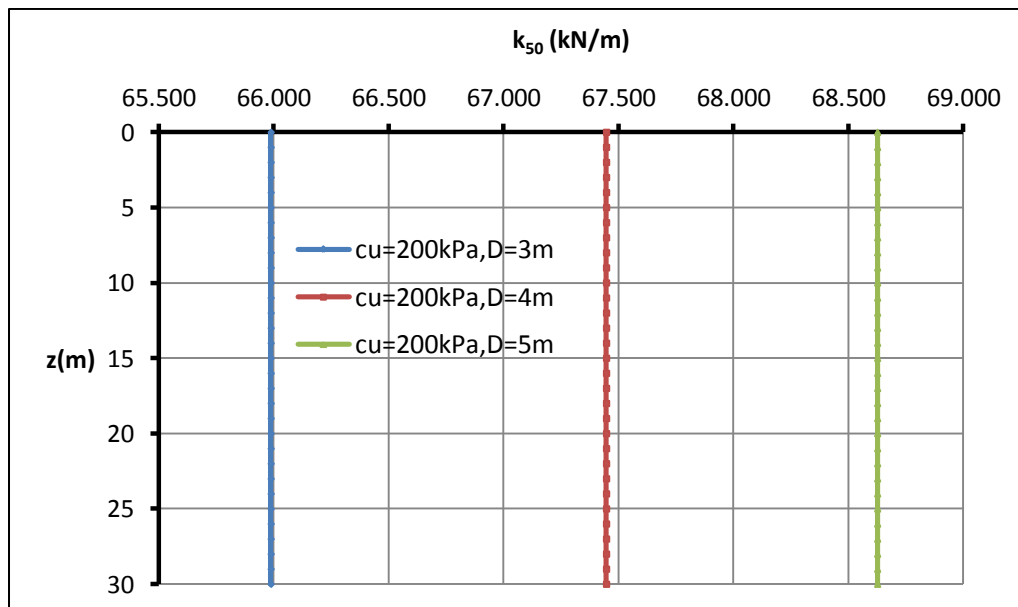
3.10.1 Θεμελίωση πασσάλου σε προφορτισμένες αργίλους

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.16) απεικονίζονται οι καμπύλες πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλες " $p-y$ ") για ένα συγκεκριμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ($z=10\text{m}$), μια συγκεκριμένη τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους ($c_u=200\text{kPa}$) για διάφορες τιμές της διαμέτρου (D) του πασσάλου. Η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου (p_u) υπό αστράγγιστες συνθήκες μεταβάλλεται για κάθε διάμετρο πασσάλου με αποτέλεσμα η δυσκαμψία των ελατηρίων να αυξάνει καθώς αυξάνεται η τιμή της διαμέτρου.

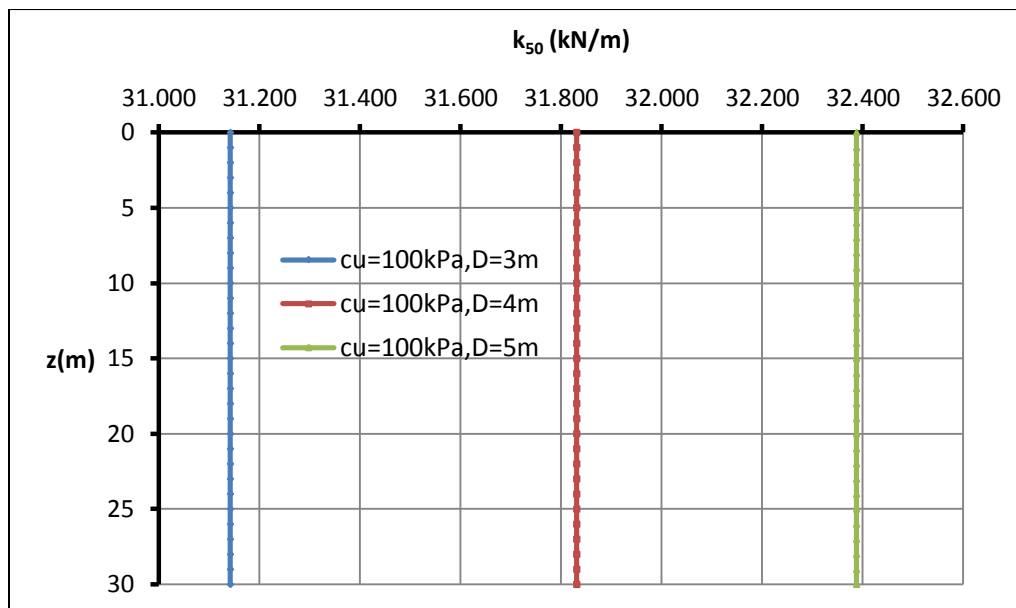


Σχήμα 3.16 – Καμπύλες “ p - y ” για διάφορες διαμέτρους πασσάλου ($c_u=200\text{kPa}$ – $z=10\text{m}$)

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 3.17 και Σχήμα 3.18) απεικονίζεται η δυσκαμψία των γραμμικών ελατηρίων συναρτήσει του βάθους z κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας, για διάφορες τιμές της διαμέτρου του πασσάλου και για μια συγκεκριμένη τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους (c_u). Όπως είναι προφανές η δυσκαμψία των ελατηρίων αυξάνεται με την αύξηση της τιμής της διαμέτρου.

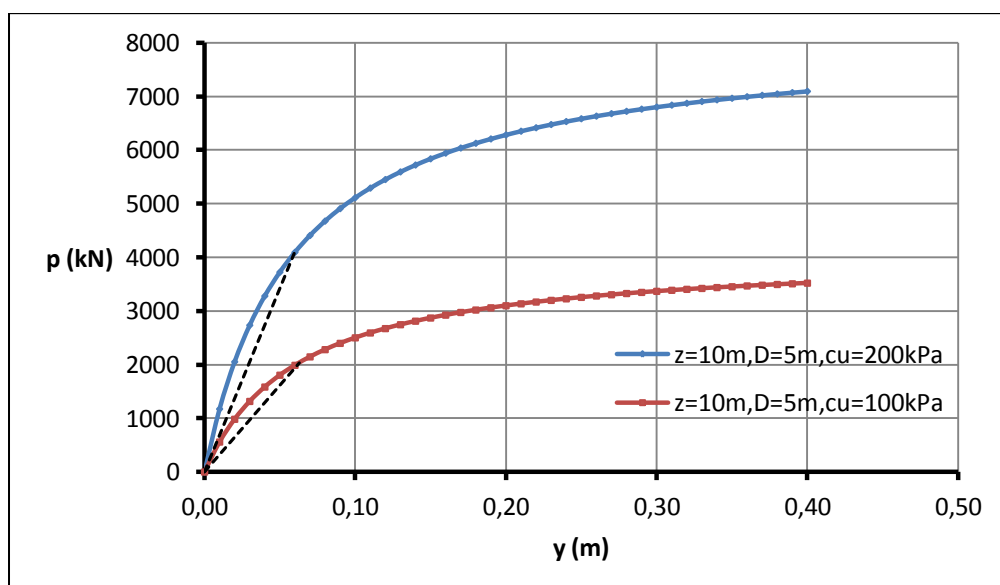


Σχήμα 3.17 – Δυσκαμψία ελατηρίων συναρτήσει του βάθους από τον πυθμένα της θάλασσας για διάφορες τιμές διαμέτρου πασσάλου ($c_u=200\text{kPa}$)



Σχήμα 3.18 – Δυσκαμψία ελατηρίων συναρτήσει του βάθους από τον πυθμένα της θάλασσας για διάφορες τιμές διαμέτρου πασσάλου ($c_u=100\text{kPa}$)

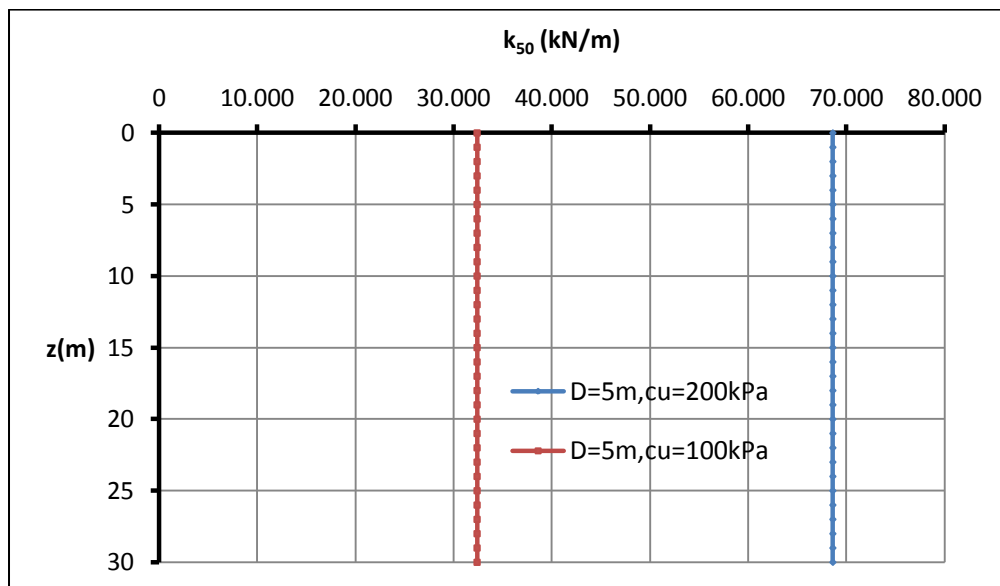
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.19) απεικονίζονται οι καμπύλες πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλες “ $p-\gamma$ ”) για ένα συγκεκριμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ($z=10\text{m}$), μια συγκεκριμένη τιμή της διαμέτρου του πασσάλου ($D=5\text{m}$) για διάφορες τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους (c_u). Η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου (p_u) υπό αστράγγιστες συνθήκες μεταβάλλεται για κάθε τιμή της διατμητικής αντοχής με αποτέλεσμα η δυσκαμψία των ελατηρίων να αυξάνει καθώς αυξάνεται η τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.



Σχήμα 3.19 – Καμπύλες “ $p-\gamma$ ” για διάφορες διαμέτρους πασσάλου ($D=5\text{m} - z=10\text{m}$)

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.20) απεικονίζεται η δυσκαμψία των γραμμικών ελατηρίων συναρτήσει του βάθους z κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας, για

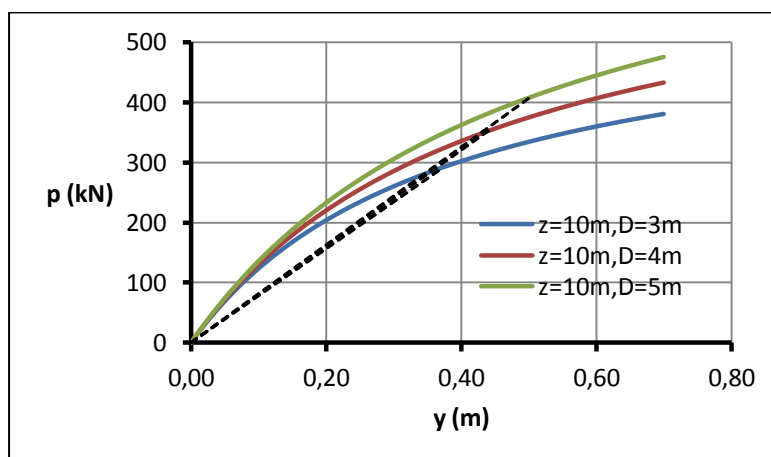
διάφορες τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (c_u) και για μια συγκεκριμένη τιμή διαμέτρου πασσάλου. Όπως είναι προφανές η δυσκαμψία των ελατηρίων αυξάνεται με την αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους.



Σχήμα 3.20 – Δυσκαμψία ελατηρίων συναρτήσει του βάθους από τον πυθμένα της θάλασσας για διάφορες τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ($D=5m$)

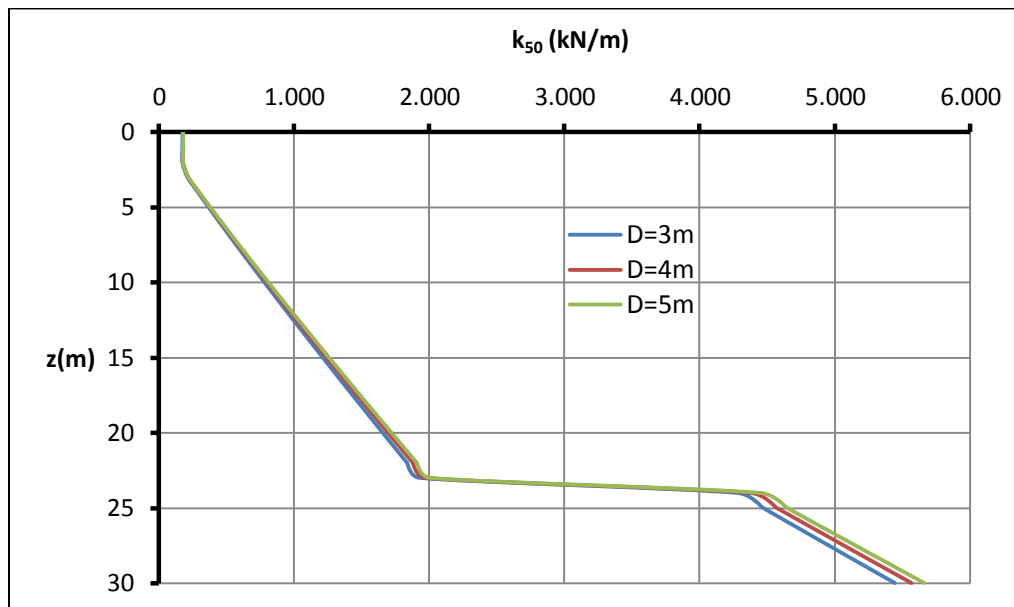
3.10.2 Θεμελίωση πασσάλου σε κανονικά φορτισμένους αργίλους

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.21) απεικονίζονται οι καμπύλες πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλες "p-γ") για ένα συγκεκριμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ($z=10m$), μια συγκεκριμένη κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους, για διάφορες τιμές της διαμέτρου (D) του πασσάλου. Η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου (p_u) υπό αστράγγιστες συνθήκες μεταβάλλεται για κάθε διάμετρο πασσάλου με αποτέλεσμα η δυσκαμψία των ελατηρίων να αυξάνει καθώς αυξάνεται η τιμή της διαμέτρου.



Σχήμα 3.21 – Καμπύλες "p-γ" για διάφορες διαμέτρους πασσάλου ($z=10m$)

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.22) απεικονίζεται η δυσκαμψία των γραμμικών ελατηρίων συναρτήσει του βάθους z κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας, για διάφορες τιμές της διαμέτρου του πασσάλου και για μια συγκεκριμένη κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους (c_u). Όπως είναι προφανές η δυσκαμψία των ελατηρίων αυξάνεται με την αύξηση της τιμής της διαμέτρου.



Σχήμα 3.22 – Δυσκαμψία ελατηρίων συναρτήσει του βάθους από τον πυθμένα της θάλασσας για διάφορες τιμές διαμέτρου πασσάλου

3.11 Μεμονωμένη δοκιμή θεμελίωσης πασσάλου σε μη-συνεκτικά εδάφη

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζεται διαδικασία υπολογισμού της σταθεράς των ελατηρίων (K) στη περίπτωση της θεμελίωσης του πασσάλου σε αμμώδη εδάφη. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του επιλεγόμενου πασσάλου (Σχήμα 3.23):

D (m)	5	D - Διάμετρος πασσάλου
t (m)	0,10	t – Πάχος τοιχωμάτων πασσάλου
E_p (MPa)	210.000	E_p - Μέτρο ελαστικότητας πασσάλου
I_p (m⁴)	4,62	I_p - Ροπή αδράνειας πασσάλου
$E_p \cdot I_p$ (MN·m²)	970.617,8	$E_p \cdot I_p$ - Καμπτική δυσκαμψία πασσάλου
L (m)	30,0	L – Βάθος έμπηξης πασσάλου

Σχήμα 3.23 – Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πασσάλου

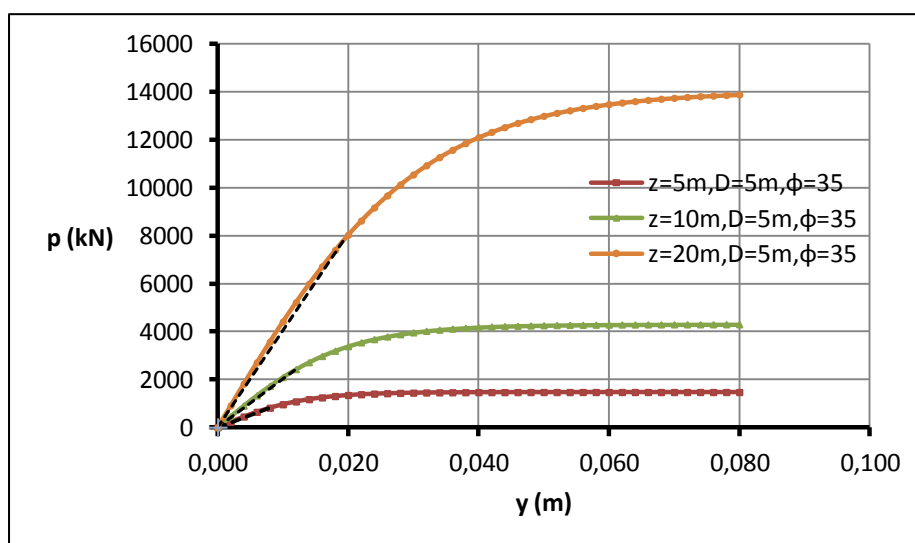
Όπως έχει αναφερθεί, στη περίπτωση των μη-συνεκτικών εδαφών η δυσκαμψία των ελατηρίων (K) αυξάνει με το βάθος και εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα του εδάφους (D_r), την ενεργό πίεση των υπερκειμένων γαιών (σ'_v) καθώς και από τη διάμετρο του πασσάλου (D).

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της διαδικασίας που αναλύθηκε στη παράγραφο 3.8 (Σχήμα 3.24) με τελικό σκοπό τον υπολογισμό της δυσκαμψίας των ελατηρίων. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στα πλαίσια της εργασίας στη περίπτωση χρήσης γραμμικών ελατηρίων σαν δυσκαμψία των ελατηρίων λαμβάνεται αυτή που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου (p_u), ενώ στη περίπτωση χρήσης μη-γραμμικών ελατηρίων εισάγεται για κάθε ελατήριο η πραγματική καμπύλη “ p - y ” η οποία καθορίζει τη συμπεριφορά του.

ϕ (°)	35	ϕ - Γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
C_1	3,02	C_1 - Συντελεστής που εξαρτάται από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
C_2	3,49	C_2 - Συντελεστής που εξαρτάται από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
C_3	54,4	C_3 - Συντελεστής που εξαρτάται από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
γ (kN/m ³)	10	γ - Ενεργό βάρος εδάφους
z (m)		z - Βάθος από τον πυθμένα της θάλασσας
A	0,9	A - Συντελεστής ανακυκλιζόμενης φόρτισης
k (kN/m ³)	22.801,55	k - Σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση
p_{us} (kN/m)		p_{us} - Μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους εδάφους - ρηχά (μεταβάλλεται με το βάθος z)
p_{ud} (kN/m)		p_{ud} - Μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους εδάφους - βαθιά (μεταβάλλεται με το βάθος z)
p (kN/m)		p - Πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκος πασσάλου

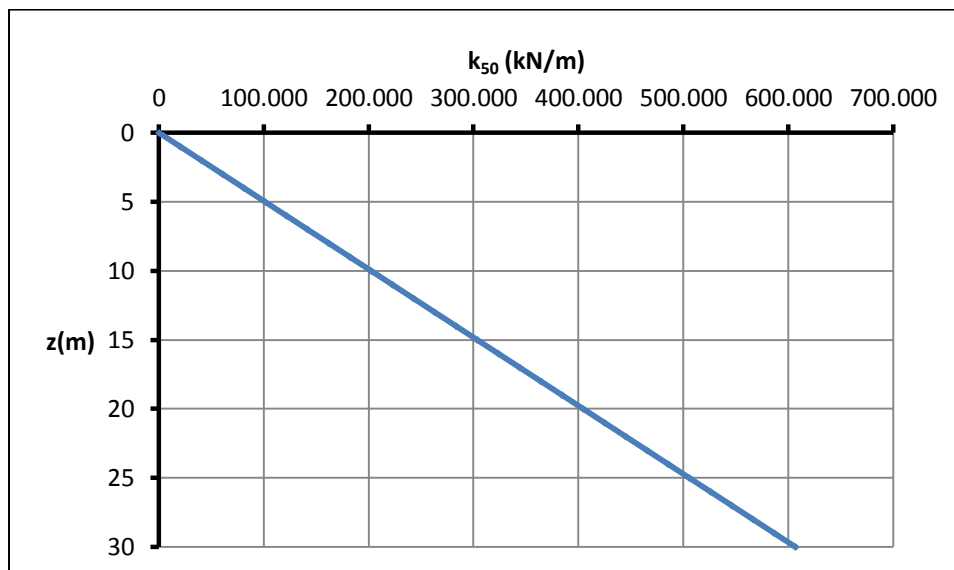
Σχήμα 3.24 – Χαρακτηριστικά υπολογισμού δυσκαμψίας ελατηρίων – Αμμώδη εδάφη

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.25) απεικονίζονται οι καμπύλες πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλες “ p - y ”) σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Όπως είναι προφανές η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου (p_u) μεταβάλλεται για κάθε βάθος z κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας με αποτέλεσμα η δυσκαμψία των γραμμικών ελατηρίων να αυξάνει με το βάθος.



Σχήμα 3.25 – Καμπύλες “ p - y ” για διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ($\phi=35$ – $D=5m$)

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.26) απεικονίζεται η δυσκαμψία των γραμμικών ελατηρίων συναρτήσει του βάθους z κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας. Όπως είναι προφανές η δυσκαμψία των ελατηρίων αυξάνεται με το βάθος.



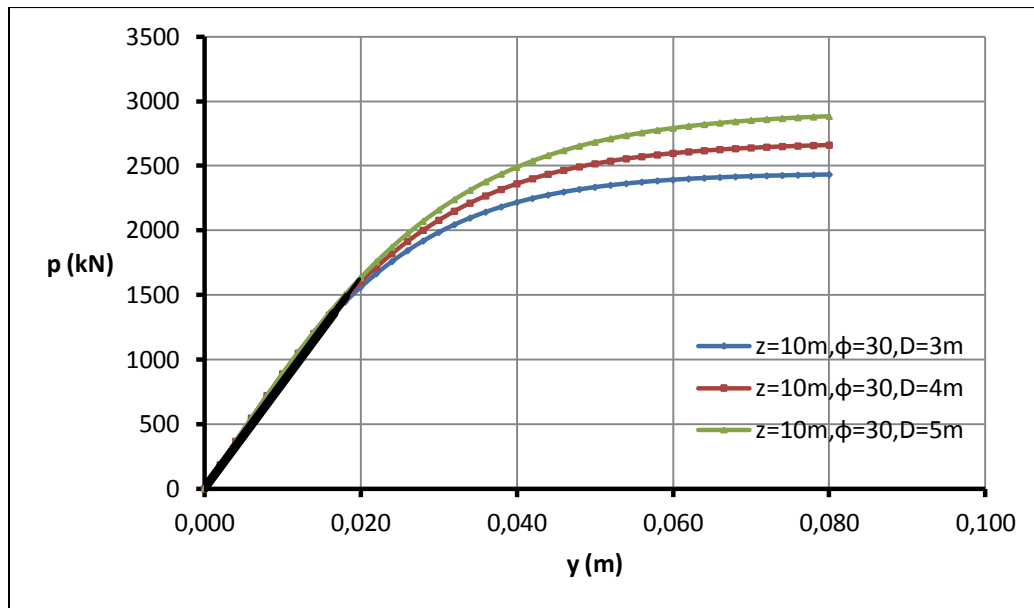
Σχήμα 3.26 – Δυσκαμψία ελατηρίων συναρτήσει του βάθους από τον πυθμένα της θάλασσας ($\phi=35^\circ$ – $D=5m$)

3.12 Παραμετρικές αναλύσεις θεμελίωσης πασσάλου σε μη-συνεκτικά εδάφη

Σε αυτή τη παράγραφο γίνονται κάποιες παραμετρικές αναλύσεις για τον υπολογισμό της σταθεράς των ελατηρίων (K), για την περίπτωση της θεμελίωσης του πασσάλου σε αμμώδη εδάφη. Συγκεκριμένα τα μεγέθη τα οποία μεταβάλλονται είναι τα εξής:

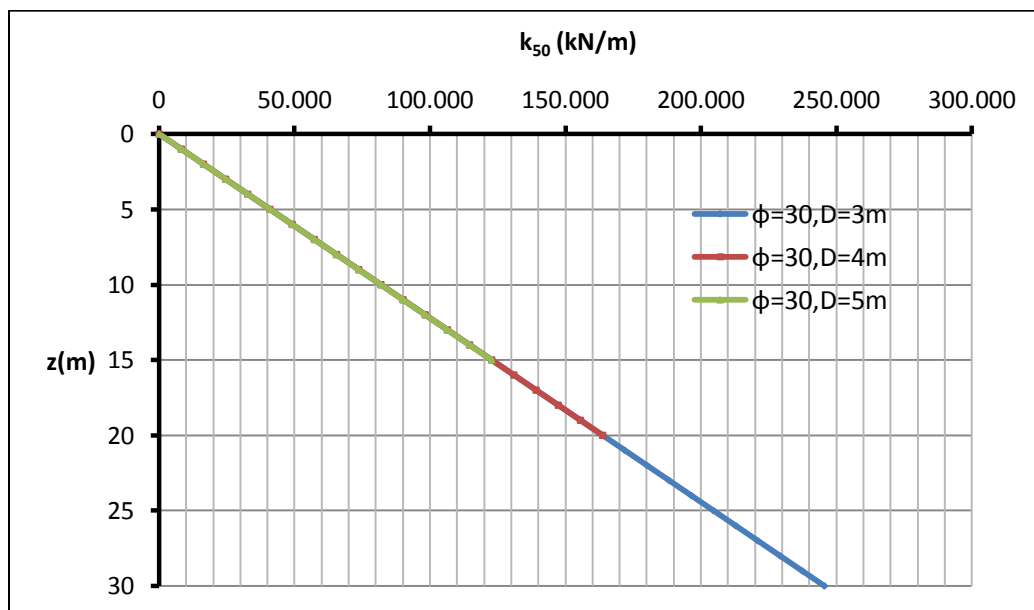
- Η σχετική πυκνότητα του εδάφους (D_r) (δηλαδή η εσωτερική γωνία τριβής ϕ)
- Η διάμετρος του πασσάλου (D)

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.27) απεικονίζονται οι καμπύλες πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλες “ p - y ”) για ένα συγκεκριμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ($z=10m$), μια συγκεκριμένη τιμή της εσωτερικής γωνίας τριβής του εδάφους ($\phi=30^\circ$) για διάφορες τιμές της διαμέτρου (D) του πασσάλου. Η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου (p_u) είναι ίδια για κάθε διάμετρο πασσάλου με αποτέλεσμα η δυσκαμψία των γραμμικών ελατηρίων να παραμένει σταθερή καθώς αυξάνεται η τιμή της διαμέτρου. Βλέπουμε δηλαδή ότι στη περίπτωση χρήσης γραμμικών ελατηρίων (όπου η δυσκαμψία τους είναι ίση με την κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου) η αύξηση της διαμέτρου δεν μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της δυσκαμψίας των ελατηρίων. Οδηγούμαστε έτσι σε λανθασμένα αποτελέσματα αφού στη πραγματικότητα η αύξηση της διαμέτρου του πασσάλου “ενεργοποιεί” μεγαλύτερο όγκο εδάφους άρα και η δυσκαμψία πρέπει να είναι μεγαλύτερη.

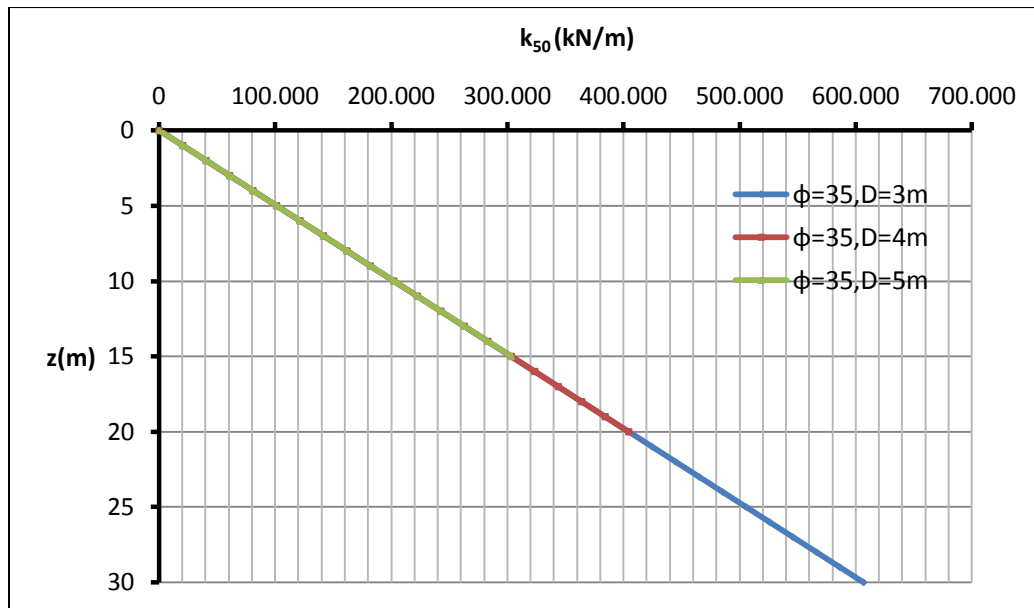


Σχήμα 3.27 – Καμπύλες “ p - y ” για διάφορες διαμέτρους πασσάλου ($\phi=30^\circ - z=10\text{m}$)

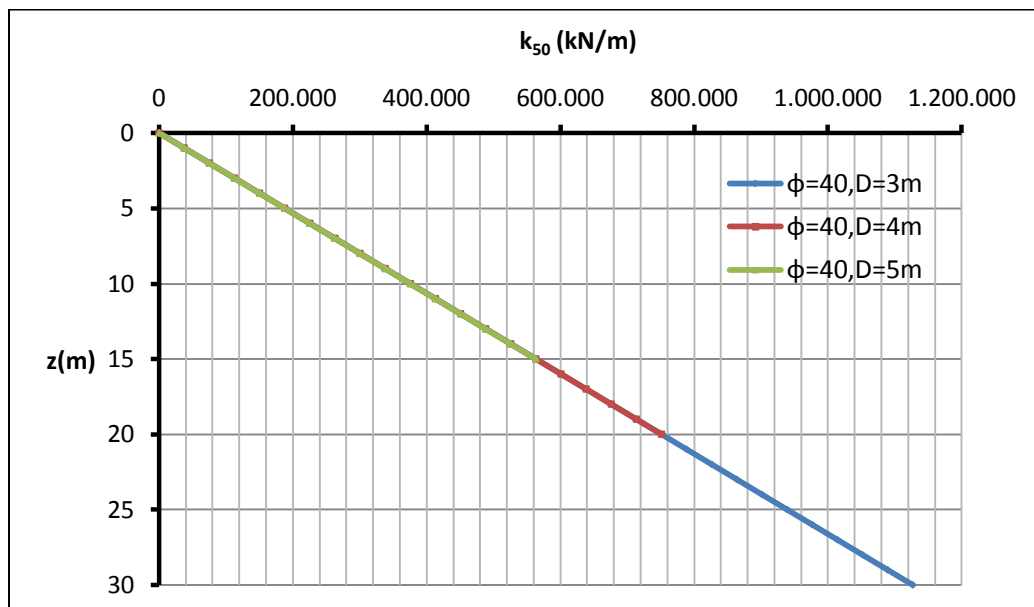
Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 3.28, Σχήμα 3.29 και Σχήμα 3.30) απεικονίζεται η δυσκαμψία των ελατηρίων συναρτήσει του βάθους z κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας, για διάφορες τιμές της διαμέτρου του πασσάλου και για μια συγκεκριμένη τιμή της εσωτερικής γωνίας τριβής του εδάφους (ϕ). Όπως είναι προφανές η δυσκαμψία των γραμμικών ελατηρίων παραμένει σταθερή με την μεταβολή της τιμής της διαμέτρου.



Σχήμα 3.28 – Δυσκαμψία ελατηρίων συναρτήσει του βάθους από τον πυθμένα της θάλασσας για διάφορες τιμές διαμέτρου πασσάλου ($\phi=30^\circ$)

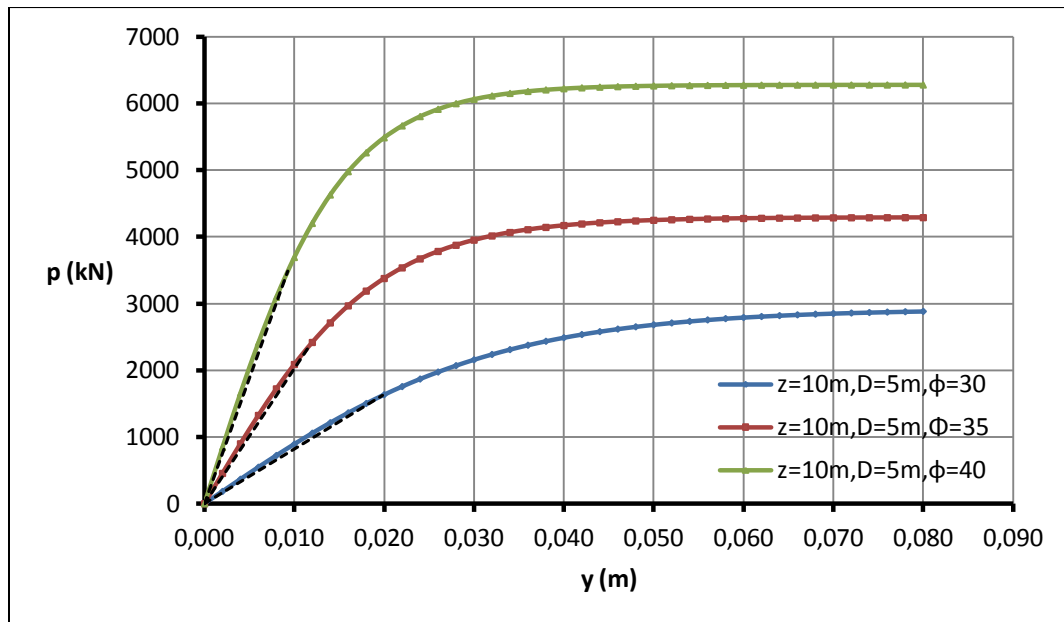


Σχήμα 3.29 – Δυσκαμψία ελατηρίων συναρτήσει του βάθους από τον πυθμένα της θάλασσας για διάφορες τιμές διαμέτρου πασσάλου ($\phi=35^\circ$)



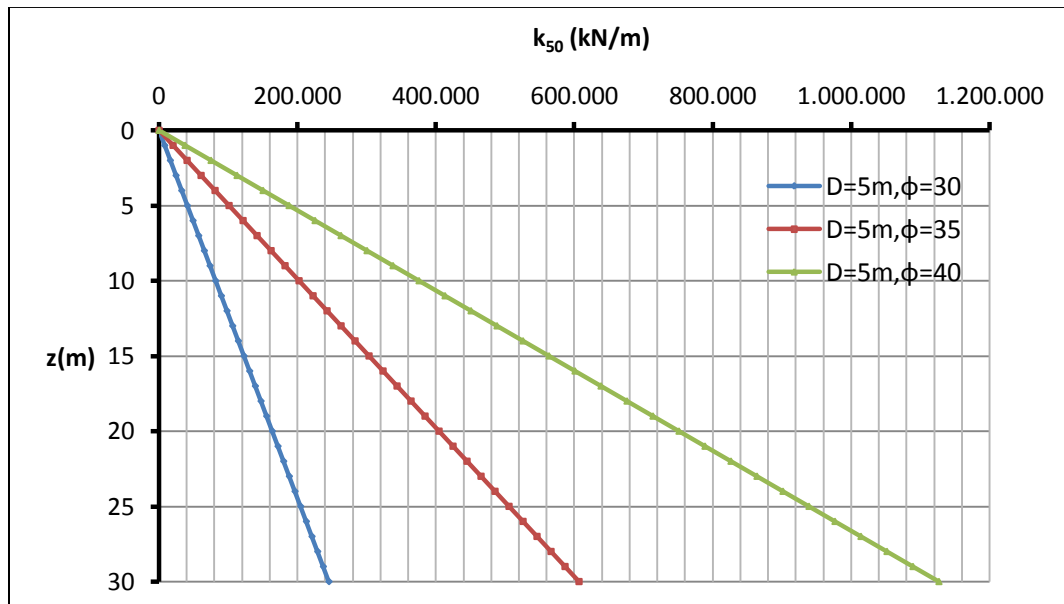
Σχήμα 3.30 – Δυσκαμψία ελατηρίων συναρτήσει του βάθους από τον πυθμένα της θάλασσας για διάφορες τιμές διαμέτρου πασσάλου ($\phi=40^\circ$)

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.31) απεικονίζονται οι καμπύλες πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλες "p-y") για ένα συγκεκριμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ($z=10\text{m}$), μια συγκεκριμένη τιμή της διαμέτρου του πασσάλου ($D=5\text{m}$) για διάφορες τιμές της εσωτερικής γωνίας τριβής του εδάφους (ϕ). Η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου (p_u) μεταβάλλεται για κάθε τιμή της εσωτερικής γωνίας τριβής με αποτέλεσμα η δυσκαμψία των γραμμικών ελατηρίων να αυξάνει καθώς αυξάνεται η τιμή της γωνίας τριβής.



Σχήμα 3.31 – Καμπύλες “p-y” για διάφορους διαμέτρους πασσάλου ($D=5m - z=10m$)

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.32) απεικονίζεται η δυσκαμψία των ελατηρίων συναρτήσει του βάθους z κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας, για διάφορες τιμές της εσωτερικής γωνίας τριβής του εδάφους (ϕ) και για μια συγκεκριμένη τιμή διαμέτρου πασσάλου. Όπως είναι προφανές η δυσκαμψία των ελατηρίων αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας τριβής.



Σχήμα 3.32 – Δυσκαμψία ελατηρίων συναρτήσει του βάθους από τον πυθμένα της θάλασσας για διάφορες τιμές της εσωτερικής γωνίας τριβής του εδάφους ($D=5m$)

Βιβλιογραφία

[3.1] Mark Randolph, Susan Gourvenec, “Offshore Geotechnical Engineering”

- [3.2] Mark J. Kaiser, Brian F. Snyder, "Modeling offshore wind installation costs on the U.S. Outer Continental Shelf"
- [3.3] Μ. Καββαδάς, "Θεμελιώσεις με πασσάλους"
- [3.4] Μ. Καββαδάς, "Θεμελιώσεις με πασσάλους"
- [3.5] Α. Αναγνωστόπουλος, Β. Παπαδόπουλος, "Θεμελιώσεις με πασσάλους"
- [3.6] K.Georgiadis, M. Georgiadis, "Development of p-y curves for undrained response of piles near slopes"
- [3.7] Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design (API RP 2A-WSD)

Κεφάλαιο 4^ο

Αεροδυναμικά φορτία, συνολική φόρτιση και έλεγχοι σχεδιασμού

4.1 Αεροδυναμικά φορτία ανεμογεννήτριας

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο. Ποικίλει επίσης καθ' ύψος πάνω από την επιφάνεια του εδάφους ή πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Για αυτούς τους λόγους πρέπει να ορίζεται η μέση διάρκεια καταγραφής της ταχύτητας του ανέμου και το αντίστοιχο ύψος στο οποίο αναφέρεται. Ένα συνηθισμένο ύψος αναφοράς για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου στη περίπτωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών είναι τα δέκα μέτρα ($H=10\text{m}$) πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ οι πιο συνηθισμένες διάρκειες καταγραφής της ταχύτητας του ανέμου είναι ένα λεπτό ($T=1\text{min}$), δέκα λεπτά ($T=10\text{min}$) και μία ώρα ($T=1\text{hr}$).

Για την αναπαράσταση του ανέμου, πρέπει να γίνει μια διάκριση μεταξύ "συνηθισμένων" (normal wind conditions) και "ακραίων" (extreme wind conditions) συνθηκών ανέμου. Οι "συνηθισμένες" συνθήκες ανέμου αφορούν γενικά επαναλαμβανόμενες συνθήκες φόρτισης της κατασκευής ενώ οι "ακραίες" συνθήκες ανέμου αναπαριστούν σπάνιες εξωτερικές συνθήκες φόρτισης που καθορίζουν τον σχεδιασμό των θαλάσσιων ανεμογεννητριών. Οι "συνηθισμένες" συνθήκες ανέμου χρησιμοποιούνται σαν βάση για τον καθορισμό των φορτίων κόπωσης της κατασκευής αλλά και των μέγιστων φορτίων σε συνθήκες λειτουργίας της κατασκευής. Οι "ακραίες" συνθήκες ανέμου επιβάλλουν ακραία φορτία στα μέλη της κατασκευής, στο φορέα και στη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας.

Στη περίπτωση των "συνηθισμένων" συνθηκών ανέμου ο άνεμος αναπαριστάται από μια μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου (U_{10}) και την αντίστοιχη τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου (σ_U). Σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο, δηλαδή σε μια περίοδο διάρκειας δέκα λεπτών ($T=10\text{min}$), θεωρούμε ότι επικρατούν σταθερές συνθήκες ανέμου με μια σταθερή μέση ταχύτητα ανέμου (U_{10}) και μια σταθερή τυπική απόκλιση ταχύτητας ανέμου (σ_U) [4.1]. Η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου (U_{10}) είναι ένα μέτρο της εντάσεως του ανέμου, ενώ η τυπική απόκλιση (σ_U) είναι ένα μέτρο της μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου γύρω από τη μέση ταχύτητα.

Στη περίπτωση σταθερών συνθηκών ανέμου διάρκειας δέκα λεπτών, σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται ότι ακολουθεί μια πιθανοτική κατανομή της οποίας η μέση τιμή είναι U_{10} και η τυπική απόκλιση είναι σ_U . Ο λόγος της συνεχούς μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου γύρω από τη μέση ταχύτητα είναι το φαινόμενο του

στροβιλισμού (turbulence). Η ένταση του στροβιλισμού ορίζεται σαν ο λόγος της τυπικής απόκλισης (σ_U) της ταχύτητας του ανέμου προς τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου (U_{10}) κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου (σ_U / U_{10}).

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται καθ' ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Συνήθως η μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται σαν ταχύτητα αναφοράς. Όταν δεν είναι γνωστή η ταχύτητα του ανέμου σε υψόμετρα διαφορετικά από το υψόμετρο του άξονα του δρομέα, τότε αυτές οι ταχύτητες υπολογίζονται με τη βοήθεια ενός προφίλ της ταχύτητας του ανέμου ως συνάρτηση της ταχύτητας στον άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας.

Όσων αφορά την εφαρμογή των φορτίων του ανέμου στους συνδυασμούς φόρτισης που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό της κατασκευής, ορίζονται κάποιες κατηγορίες συνθηκών ανέμου ανάλογα με τις ταχύτητες ανέμου που επικρατούν [4.2]:

1. The Normal Wind Profile (NWP) το οποίο αναπαριστά μια μέση ταχύτητα του ανέμου ως συνάρτηση του ύψους πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Για θαλάσσιες περιοχές προτείνεται ο εκθέτης που αφορά την τραχύτητα του εδάφους να λαμβάνει τιμή ίση με $\alpha=0,14$.
2. The Normal Turbulence Model (NTM) το οποίο αναπαριστά ένα ταραχώδες προφίλ ταχύτητας ανέμου με μια χαρακτηριστική τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου $\sigma_{U,c}$. Η χαρακτηριστική αυτή τυπική απόκλιση $\sigma_{U,c}$ ορίζεται ως το ποσοστμόριο 90% στη πιθανοτική κατανομή της τυπικής απόκλισης σ_U , με μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας.
3. The Extreme Wind Speed Model (EWM) αναπαριστά ακραίες συνθήκες ανέμου μιας συγκεκριμένης περιόδου επαναφοράς, συνήθως ένα ($T=1$ year) ή πενήντα ($T=50$ years) χρόνια. Προτείνεται η χρήση είτε ενός σταθερού προφίλ ταχύτητας ανέμου είτε ενός ταραχώδους προφίλ ταχύτητας ανέμου. Για θαλάσσιες περιοχές προτείνεται ο εκθέτης που αφορά την τραχύτητα του εδάφους να λαμβάνει τιμή ίση με $\alpha=0,11$.
4. The Extreme Operating Gust (EOG)
5. The Extreme Turbulence Model (ETM)
6. The Extreme Direction Change (EDC)
7. The Extreme Coherent Gust with Direction Change (ECD)
8. The Extreme Wind Shear Model (EWS)
9. The Reduced Wind Speed Model (RWM)

Το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της μέσης ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η μέση ταχύτητα του ανέμου στα διάφορα ύψη πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας δίνεται από τον παρακάτω δυναμικό νόμο [4.3]:

$$U_{10,z} = U_{10,hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \quad (4.1)$$

όπου:

$U_{10,z}$	είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου σε ύψος z πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
$U_{10,hub}$	είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας
z	είναι το ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
z_{hub}	είναι το υψόμετρο του άξονα του δρομέα
α	είναι ένας δυναμικός εκθέτης ο οποίος εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους

Ο παρακάτω τύπος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας του ανέμου (U), μέσης χρονικής διάρκειας (T) σε ύψος (z) πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας [4.4]:

$$U(T,z) = U_{10,10m} \left(1 + 0,137 \ln \frac{z}{h} - 0,047 \ln \frac{T}{T_{10}} \right) \quad (4.2)$$

όπου $h=10m$, $T_{10}=10$ λεπτά και $U_{10,10m}$ είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου σε ύψος $h=10m$ από την επιφάνεια της θάλασσας. Η παραπάνω έκφραση υπολογίζει της μέσες ταχύτητες ανέμου ανάμεσα σε διαφορετικές χρονικές διάρκειας πνοής του ανέμου.

Τα φορτία που επιβάλλει ο άνεμος στις κατασκευές μεταβάλλονται μέσα στο χρόνο λόγω της συνεχούς μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου. Τα φορτία του ανέμου ασκούνται στις εξωτερικές επιφάνειες των κλειστών κατασκευών αλλά και στις εσωτερικές επιφάνειες των ανοιχτών κατασκευών. Η πίεση του ανέμου ασκείται σε μια διεύθυνση κάθετη προς την εξεταζόμενη επιφάνεια.

Για τον σχεδιασμό υπεράκτιων κατασκευών που παρουσιάζουν σημαντική δυναμική συμπεριφορά, η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου μέσα στο χρόνο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Όταν το πεδίο ανέμου περιέχει συχνότητες κοντά στις φυσικές συχνότητες της κατασκευής, απαιτείται η διενέργεια μιας δυναμικής ανάλυσης χρησιμοποιώντας ένα φάσμα συχνοτήτων της ταχύτητας του ανέμου.

Η πίεση που ασκεί ο άνεμος δίνεται από την παρακάτω σχέση [4.5]:

$$q = \frac{1}{2} \rho_\alpha U_{T,z}^2 \quad (4.3)$$

όπου:

q είναι η πίεση που ασκεί ο άνεμος

ρ_α είναι η πυκνότητα του αέρα [$\rho_\alpha=1,226 \text{ kg/m}^3$ για ξηρό αέρα θερμοκρασίας 15°C]

$U_{T,z}$ είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος T σε ύψος z πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

Η δύναμη η οποία ασκείται λόγω της πίεσης του ανέμου κάθετα στον άξονα ενός μέλους ή μιας επιφάνειας δίνεται από την παρακάτω σχέση [4.5]:

$$F_w = C q S \sin \alpha \quad (4.4)$$

όπου:

F_w είναι η δύναμη που ασκείται κάθετα στην επιφάνεια λόγω της πίεσης του ανέμου

C είναι ο συντελεστής σχήματος ο οποίος εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds, την τραχύτητα της επιφάνειας και την διάμετρο του εξεταζόμενου μέλους

q είναι η πίεση που ασκεί ο άνεμος στην επιφάνεια της κατασκευής

S είναι το εμβαδό της προβαλλόμενης επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση του ανέμου

α είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του ανέμου και του άξονα του μέλους ή της επιφάνειας

Ο αριθμός Reynolds δίνεται από την παρακάτω σχέση [4.6]:

$$R_e = \frac{D U_{T,z}}{\nu_\alpha} \quad (4.5)$$

όπου:

D είναι η διάμετρος του κυλινδρικού μέλους

$U_{T,z}$ είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος T σε ύψος z πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

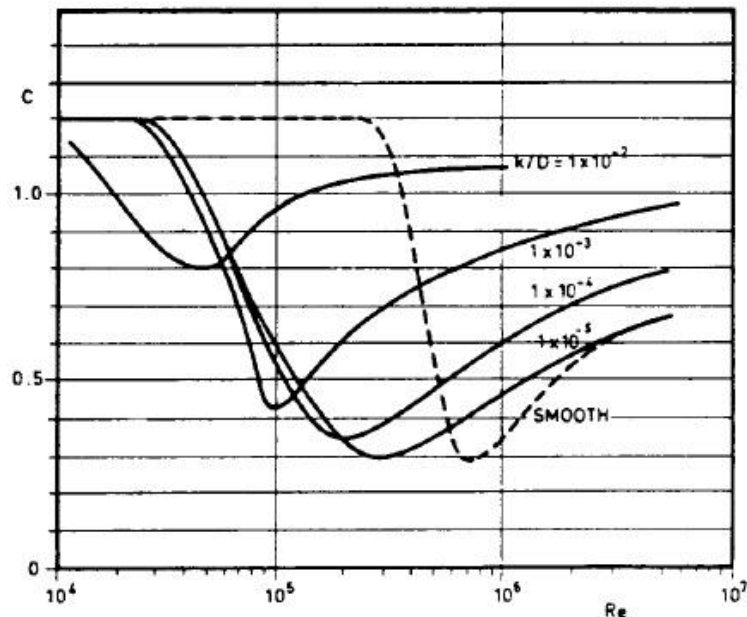
ν_α είναι η κινηματική συνεκτικότητα του αέρα [$\nu_\alpha = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ στους 15°C για κανονική ατμοσφαιρική πίεση]

Η επιφανειακή τραχύτητα k ανάλογα με το είδος του υλικού της επιφάνειας της κατασκευής ισούται (Σχήμα 4.1):

Υλικό	$k \text{ (m)}$
Χάλυβας (χωρίς επίστρωση)	$5 \cdot 10^{-5}$
Χάλυβας (με επίστρωση)	$5 \cdot 10^{-6}$
Χάλυβας (ιδιαίτερα διαβρωμένος)	$3 \cdot 10^{-3}$
Σκυρόδεμα	$3 \cdot 10^{-3}$
Ανάπτυξη θαλάσσιας βλάστησης	$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$

Σχήμα 4.1 – Τιμές της επιφανειακής τραχύτητας k ανάλογα με το είδος της προβαλλόμενης επιφάνειας [4.7]

Ο συντελεστής σχήματος C λαμβάνεται από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.2) ανάλογα με την επιφανειακή τραχύτητα k , τη διάμετρο του πύργου D και τον αριθμό Reynolds Re :



Σχήμα 4.2 – Τιμές του συντελεστή σχήματος C ανάλογα με τον λόγο k/D και τον αριθμό Reynolds [4.8]

Οι ιστορίες της ταχύτητας του ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία δόθηκαν από τη Κωνσταντίνα Κουλάτσου δεδομένης και της εμπειρίας που έχει πάνω στο θέμα των αεροδυναμικών φορτίσεων. Δυστυχώς, μέσα σε ένα μικρό χρονικό διάστημα δεν είναι δυνατόν να μελετηθεί από την αρχή όλη η διαδικασία υπολογισμού των φορτίων μιας θαλάσσιας ανεμογεννήτριας. Έτσι στο κομμάτι των αεροδυναμικών φορτίων επιλέχθηκε να λάβουμε έτοιμες τις ιστορίες της ταχύτητας του ανέμου κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας και εμείς να τις μετατρέψουμε σε αεροδυναμικές πιέσεις πάνω στη κατασκευή.

Το αεροδυναμικό φορτίο λόγω της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας είναι αποτέλεσμα χρόνιας διερεύνησης που δεν ήταν δυνατόν να γίνει στο διάστημα εκπόνησης μιας μεταπτυχιακής εργασίας και για αυτό το λόγο δόθηκε ως δεδομένο από την Κωνσταντίνα Κουλάτσου δεδομένης και της ενασχόλησης της με αυτό το θέμα.

4.2 Συνολική φόρτιση ανεμογεννήτριας και προσομοίωση εδάφους

Τα φορτία που ασκούνται σε μια θαλάσσια ανεμογεννήτρια και μελετήθηκαν σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία είναι τα εξής:

1. Ίδιο βάρος κατασκευής
2. Υδροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πασσάλου
3. Αεροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πυλώνα
4. Αεροδυναμικό φορτίο λόγω της περιστροφής των πτερυγίων

4.2.1 Υδροδυναμικό φορτίο κατασκευής

Το υδροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πασσάλου της ανεμογεννήτριας είναι αποτέλεσμα των θαλασσίων κυμάτων και των θαλασσίων ρευμάτων. Ο τύπος της ανεμογεννήτριας που επιλέγεται, φτάνει στη μέγιστη παραγωγή ενέργειας όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι 25m/s ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου διακόπτεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Για να βρεθεί η μέγιστη μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας που προκαλεί και τη μέγιστη υδροδυναμική φόρτιση, όταν η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία, δεν έχουμε παρά να βάλουμε στο προφίλ της μέσης ταχύτητας του ανέμου (Σχέση 4.1) σαν μέση ταχύτητα στο ύψος του άξονα του δρομέα τα 25m/s. Προκύπτει πως η μέγιστη μέση ταχύτητα του ανέμου που μπορεί να μετρηθεί σε ύψος 10m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ η ανεμογεννήτρια βρίσκεται στη μέγιστη παραγωγή της, είναι τα 18m/s.

Στο 2^ο Κεφάλαιο αναλύθηκαν πέντε παράμετροι οι οποίοι επηρεάζουν το μέγεθος του υδροδυναμικού φορτίου που ασκείται στη κατασκευή. Στις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν στα επόμενα κεφάλαια και αφορούν το υδροδυναμικό φορτίο της κατασκευής η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, η οποία είναι και η γενεσιουργός αιτία του υδροδυναμικού φορτίου, επιλέγεται ίση με $W=18\text{m/s}$ αφού αυτή είναι η μέγιστη ταχύτητα σε αυτό το ύψος ενώ η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία (άρα στη κορυφή της κατασκευής ασκείται ταυτόχρονα και το αεροδυναμικό φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων). Σαν μήκος αναπτύγματος του κυματισμού (δηλαδή το διαθέσιμο χώρο που έχει το κύμα για να αναπτυχθεί) επιλέγεται ένα μέγεθος της τάξης των $F=200.000\text{m}$ το οποίο δίνει την δυνατότητα στον κυματισμό να αναπτυχθεί και να αποκτήσει τη μέγιστη ενέργεια όταν φτάνει στη κατασκευή. Σαν διάρκεια πνοής του ανέμου επιλέχτηκε ένα μέγεθος της τάξης των $t_d=100\text{hr}$ το οποίο ουσιαστικά είναι ανέφικτο αλλά με αυτό τον τρόπο απαλείφεται η επιρροή της διάρκειας της πνοής του ανέμου στον καθορισμό του υδροδυναμικού φορτίου. Αυτό έγινε διότι το μέγεθος αυτό μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή και για τον υπολογισμό του είναι απαραίτητα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Στις αναλύσεις που ακολουθούν το βάθος του πυθμένα στην περιοχή εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας είναι σταθερό ίσο με $d=25\text{m}$ μιας και σε οποιαδήποτε εγκατάσταση θαλασσίων ανεμογεννητριών το βάθος της θάλασσας στη περιοχή εγκατάστασης είναι δεδομένο. Η επιλογή ενός τόσο μεγάλου βάθους θάλασσας (για τη περίπτωση φορέα στήριξης μεμονωμένου πασσάλου) γίνεται συνειδητά με σκοπό να εξεταστούν τα όρια στα οποία μπορεί να φτάσει μια θαλάσσια ανεμογεννήτρια. Τέλος η διάμετρος του πασσάλου μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο του πασσάλου που επιλέγεται και άλλες φορές είναι ίση με $D=4\text{m}$ ενώ άλλες ίση με $D=5\text{m}$.

Στη περίπτωση των στατικών επιλύσεων σαν υδροδυναμικό φορτίο επιλέγεται το μέγιστο φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου κατά τη διάρκεια μιας περιόδου του

κυματισμού. Το φορτίο αυτό πολλαπλασιάζεται με έναν δυναμικό συντελεστή $\gamma=1,35$ έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη ο δυναμικός χαρακτήρας του φορτίου.

Στη περίπτωση των δυναμικών αναλύσεων το υδροδυναμικό φορτίο ασκείται σαν δυναμική φόρτιση στη κατασκευή για μια διάρκεια ίση με 600sec. Σε αυτή τη περίπτωση ασκούνται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του φορτίου χωρίς να επαυξάνονται με κάποιο συντελεστή.

4.2.2 Αεροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πυλώνα

Ο τύπος της ανεμογεννήτριας που επιλέγεται φτάνει στη μέγιστη παραγωγή ενέργειάς όταν η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα είναι 25m/s. Χρησιμοποιώντας τον δυναμικό νόμο της μέσης ταχύτητας του ανέμου (Σχέση 4.1) και θεωρώντας σαν μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα τα 25m/s προκύπτει η μέση ταχύτητα του ανέμου όλο το ύψος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας.

Στη περίπτωση των στατικών επιλύσεων χρησιμοποιούμε τη μέση ταχύτητα του ανέμου καθ' ύψος του πυλώνα και ανάλογα με τη διάμετρο του στο αντίστοιχο ύψος προκύπτει η αεροδυναμική πίεση που ασκείται σε όλο το μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας. Το φορτίο αυτό πολλαπλασιάζεται με έναν δυναμικό συντελεστή $\gamma=1,4$ έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη ο δυναμικός χαρακτήρας του φορτίου.

Στη περίπτωση των δυναμικών επιλύσεων προκειμένου να βρεθεί το αεροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πυλώνα της ανεμογεννήτρια έγινε η παρακάτω απλοποίηση. Αρχικά η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας μέχρι τον άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας χωρίστηκε σε δέκα ισομερή διαστήματα (ο άξονας του δρομέα βρίσκεται σε απόσταση 100m από την επιφάνεια της θάλασσας). Στη συνέχεια έχοντας ως δεδομένη τη μέση ταχύτητα του ανέμου στο μέσο κάθε διαστήματος (η μέση ταχύτητα του ανέμου προκύπτει από το δυναμικό νόμο της σχέσης 4.1) δόθηκε η αντίστοιχη χρονοϊστορία ταχύτητας ανέμου διάρκειας 600sec (οι χρονοϊστορίες αυτές δόθηκαν από την Κωνσταντίνα Κουλάτσου). Προέκυψαν δηλαδή δέκα χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου, κάθε μια από τις οποίες έχει τη μέση ταχύτητα ανέμου του αντίστοιχου κομματιού. Τέλος με βάση τη χρονοϊστορία της ταχύτητας του ανέμου κάθε κομματιού υπολογίζεται η αεροδυναμική πίεση που ασκείται σε κάθε ένα από τα δέκα διαστήματα διαχωρισμού του πύργου ανάλογα βέβαια και με την διάμετρο του πυλώνα στο αντίστοιχο ύψος. Στην προσομοίωση του αεροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας, έχουν χρησιμοποιηθεί τα χαρακτηριστικά μεγέθη της αεροδυναμικής φόρτισης χωρίς αυτά να επαυξάνονται με κάποιο συντελεστή.

4.2.3 Αεροδυναμικό φορτίο λόγω περιστροφής πτερυγίων

Ο τύπος της ανεμογεννήτριας που επιλέγεται φτάνει στη μέγιστη παραγωγή ενέργειάς όταν η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα είναι 25m/s. Έτσι όταν στο ύψος του δρομέα η ταχύτητα του ανέμου είναι 25m/s ασκείται η μέγιστη φόρτιση στη κατασκευή λόγω της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Η φόρτιση αυτή προκύπτει επιλέγοντας μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας 25m/s, υψόμετρο άξονα δρομέα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και μήκος πτερυγίων 45m (η χρονοϊστορία της φόρτισης λόγω της περιστροφής των πτερυγίων δόθηκε από την Κωνσταντίνα Κουλάτσου). Η διάρκεια της συγκεκριμένης φόρτισης είναι 600sec.

Στη περίπτωση των στατικών επιλύσεων το φορτίο που ασκείται στη κορυφή του πύργου εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας προκύπτει από την επιλογή της μέγιστης τιμής κατά την διάρκεια μιας χρονοϊστορίας φόρτισης διάρκειας 600sec. Στην προσομοίωση του φορτίου η μέγιστη τιμή της φόρτισης έχει πολλαπλασιαστεί με τον δυναμικό συντελεστή $\gamma=1,35$ έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη ο δυναμικός χαρακτήρας του φορτίου.

Στη περίπτωση των δυναμικών αναλύσεων ασκείται στη κορυφή της κατασκευής ολόκληρη η χρονοϊστορία φόρτισης διάρκειας 600sec. Στην προσομοίωση του αεροδυναμικού φορτίου που ασκείται στη κορυφή της κατασκευής λόγω της περιστροφής των πτερυγίων, έχουν χρησιμοποιηθεί τα χαρακτηριστικά μεγέθη της φόρτισης χωρίς αυτά να επαυξάνονται με κάποιο συντελεστή.

4.2.4 Προσομοίωση εδάφους

Η επιρροή του εδάφους στους πασσάλους προσομοιώνεται με τη χρήση μη-γραμμικών ελατηρίων που τοποθετούνται σε όλες τις διευθύνσεις. Η δυσκαμψία των ελατηρίων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πασσάλου καθώς και από τις ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων. Παρότι δεν είναι φυσικώς δυνατό, οι αναλύσεις γίνονται θεωρώντας ενιαίο εδαφικό προφίλ για όλο το βάθος έμπληξης του πασσάλου προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή μόνο της μεταβολής της σταθεράς των ελατηρίων στην απόκριση της κατασκευής. Για το λόγο αυτό, οι αναλύσεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τιμών της δυσκαμψίας των ελατηρίων και μελετάται έτσι η συμπεριφορά του πασσάλου σε όλα τα είδη εδάφους, από το πιο χαλαρό μέχρι αυτό με τη μεγαλύτερη συνοχή που πλησιάζει όσο είναι δυνατόν τις συνθήκες πάκτωσης.

Στα πλαίσια της εργασίας δεν τοποθετούνται γραμμικά ελατήρια κατά τη διεύθυνση του άξονα του πασσάλου αφού η πλευρική τριβή που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου είναι αρκετά μεγάλη και άρα οι καθιζήσεις της κατασκευής είναι ελάχιστες (η κορυφή του

πασσάλου δεσμεύεται με άρθρωση). Κατά τις εγκάρσιες διευθύνσεις του πασσάλου τοποθετούνται μη-γραμμικά ελατήρια τα οποία προσομοιώνουν τη δυσκαμψία του εδάφους.

Στις αναλύσεις που πραγματοποιούνται 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. Έχοντας τη καμπύλη $p-y$ κάθε ελατηρίου το πρόγραμμα υπολογίζει αυτόματα τη σταθερά του ελατηρίου (δηλαδή τη δυσκαμψία του) για την μετατόπιση του πασσάλου κάθε χρονική στιγμή.

4.3 Χαρακτηριστικά χάλυβα

Σύμφωνα με το Νορβηγικό κανονισμό (DNV-OS-B101) ο οποίος ασχολείται με τις ιδιότητες και την πιστοποίηση των μεταλλικών μελών των θαλάσσιων ανεμογεννητριών, οι ποιότητες χάλυβα που χρησιμοποιούνται σε αυτό τον τύπο των κατασκευών χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [4.9]:

- Χάλυβες συνηθισμένης αντοχής (NS)
- Χάλυβες υψηλής αντοχής (HS)
- Χάλυβες πολύ υψηλής αντοχής (EXS)

Κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες χάλυβα [4.9]:

- Χάλυβες συνηθισμένης συγκολλησιμότητας
- Χάλυβες βελτιωμένης συγκολλησιμότητας

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας ασχολούμαστε με χάλυβες υψηλής αντοχής (HS) των οποίων η χαρακτηριστική τάση διαρροής κυμαίνεται από 265 MPa έως 390 MPa. Συγκεκριμένα η χαρακτηριστική τάση διαρροής ($f_{y,k}$) των χαλύβων αυτής της κατηγορίας ανάλογα με τον πάχος των ελασμάτων συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα (Σχήμα 4.3):

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

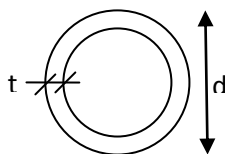
Σχήμα 4.3 – Χαρακτηριστικές τάσεις διαρροής χάλυβα ανάλογα με το πάχος των ελασμάτων [4.10]

4.4 Κατάταξη διατομών

Ο ρόλος της κατάταξης των διατομών είναι να αναγνωρίσει την έκταση στην οποία η αντοχή και η ικανότητα στροφής των διατομών περιορίζεται από την αντοχή τους σε τοπικό λυγισμό.

Οι διατομές τόσο του πασσάλου όσο και του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι κοίλες κυκλικές, που κάμπτονται και θλίβονται ταυτόχρονα. Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας λόγω των ελαστικών ελέγχων που γίνονται τόσο για την περίπτωση του πασσάλου όσο και για την περίπτωση του πύργου της ανεμογεννήτριας οι διατομές που επιλέγονται είναι μέχρι και κατηγορίας 3 στις οποίες η τάση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του χαλύβδινου μέλους, υποθέτοντας ελαστική κατανομή των τάσεων, μπορεί να φθάσει την αντοχή διαρροής, αλλά ο τοπικός λυγισμός είναι πιθανόν να εμποδίσει την ανάπτυξη της πλαστικής ροπής αντοχής.

Για την περίπτωση των σωληνωτών διατομών η κατηγορία τους υπολογίζεται ανάλογα με την ποιότητα του χάλυβα και το πάχος της διατομής όπως παρακάτω (Σχήμα 4.4 και Σχήμα 4.5):



Σχήμα 4.4 – Κατάταξη διατομής ανάλογα με την ποιότητα χάλυβα και το πάχος της διατομής

Κατηγορία	Διατομή σε κάμψη και/ή θλίψη
1	$d / t \leq 50\varepsilon^2$
2	$d / t \leq 70\varepsilon^2$
3	$d / t \leq 90\varepsilon^2$

Σχήμα 4.5 – Κατάταξη διατομής ανάλογα με την ποιότητα χάλυβα και το πάχος της διατομής

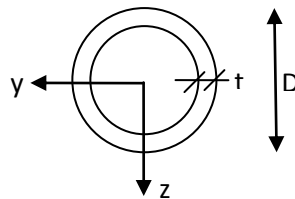
$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y} \quad (4.6)$$

όπου:

f_y είναι το όριο διαρροής του χάλυβα

4.4.1 Χαρακτηριστικές ιδιότητες διατομής

Οι διατομές τόσο του πασσάλου όσο και του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι κοίλες κυκλικές. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των κοίλων κυκλικών διατομών (Σχήμα 4.6) που χρησιμοποιούνται στη μεταπτυχιακή εργασία προκύπτουν από τους παρακάτω τύπους:



Σχήμα 4.6 – Διατομές πασσάλου και πύργου ανεμογεννήτριας

Εμβαδό διατομής:
$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{D}{2} - t \right)^2 \quad (4.7)$$

Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα:
$$E = 210.000 \text{ MP} \quad (4.8)$$

Ροπή αδράνειας διατομής:
$$I = I_y = I_z = \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{D}{2} \right)^4 - \left(\frac{D}{2} - t \right)^4 \right] \quad (4.9)$$

Ελαστική ροπή αντίστασης διατομής:
$$W_{el} = W_{el,y} = W_{el,z} = \pi \frac{\left(\frac{D}{2} \right)^4 - \left(\frac{D}{2} - t \right)^4}{4 \left(\frac{D}{2} \right)} \quad (4.10)$$

Πλαστική ροπή αντίστασης διατομής:
$$W_{pl} = W_{pl,y} = W_{pl,z} = \frac{D^3 - (D - 2t)^3}{6} \quad (4.11)$$

Επιφάνεια διάτμησης διατομής:
$$A_v = \frac{2A}{\pi} \quad (4.12)$$

όπου:

D είναι η διάμετρος της κυλινδρικής διατομής

t είναι το πάχος της κυλινδρικής διατομής

A είναι το εμβαδό της κυλινδρικής διατομής

4.5 Έλεγχοι διατομής στην οριακή κατάσταση αστοχίας

Σύμφωνα με τον Νορβηγικό κανονισμό (DNV-OS-J101) οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ_M , πρέπει να εφαρμόζονται στις διάφορες χαρακτηριστικές τιμές αντοχής ως εξής:

- Στα μέλη κοίλης κυκλικής διατομής, η αντοχή των διατομών λαμβάνεται με συντελεστής ασφαλείας γ_{M0} ίσο με 1,10 [4.11].

4.5.1 Έλεγχος διατομής σε ομοιόμορφη θλίψη

Η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης N_{Ed} σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (4.13)$$

Η αντοχή σχεδιασμού της διατομής για ομοιόμορφη θλίψη $N_{c,Rd}$ πρέπει να καθορίζεται όπως παρακάτω:

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 1,2 ή 3} \quad (4.14)$$

όπου:

A είναι το εμβαδόν της διατομής

f_y είναι το όριο διαρροής του χάλυβα

γ_{M0} είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας της διατομής του χάλυβα

4.5.2 Ελαστικός έλεγχος διατομής σε μονοαξονική κάμψη

Σύμφωνα με τον ελαστικό έλεγχο σε μονοαξονική κάμψη η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης M_{Ed} σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (4.15)$$

Η ελαστική αντοχή σχεδιασμού για κάμψη περί ένα κύριο άξονα μια διατομής καθορίζεται ως εξής:

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.16)$$

όπου:

$W_{el,min}$ η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής (η $W_{el,min}$ αντιστοιχεί στην ίνα με την μεγαλύτερη ελαστική τάση)

f_y είναι το όριο διαρροής του χάλυβα

γ_{M0} είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας της διατομής του χάλυβα

4.5.3 Ελαστικός έλεγχος διατμητικών τάσεων

Σύμφωνα με τον ελαστικό έλεγχο διατμητικών τάσεων και με την παραδοχή ότι η διατμητική τάση κατανέμεται ομοιόμορφα στη διατομή θα πρέπει να ισχύει:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_v} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \Rightarrow \frac{\tau_{Ed}}{\frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}} \leq 1 \quad (4.17)$$

όπου:

- V_{Ed} είναι η τιμή σχεδιασμού της διατμητικής δύναμης της διατομής
 A_v είναι η επιφάνεια διάτμησης της διατομής
 f_y είναι το όριο διαρροής του χάλυβα
 γ_{M0} είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας της διατομής του χάλυβα

4.5.3.1 Ελαστικός έλεγχος διατμητικών τάσεων κατά τον τοπικό άξονα z

Σύμφωνα με τον ελαστικό έλεγχο διατμητικών τάσεων κατά τον τοπικό άξονα z θα πρέπει να ισχύει:

$$\tau_{xz,Ed} = \frac{V_{z,Ed}}{A_v} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \Rightarrow \frac{\tau_{xz,Ed}}{\frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}} \leq 1 \quad (4.18)$$

όπου:

- $V_{z,Ed}$ είναι η τιμή σχεδιασμού της διατμητικής δύναμης της διατομής κατά τον τοπικό άξονα z
 A_v είναι η επιφάνεια διάτμησης της διατομής
 f_y είναι το όριο διαρροής του χάλυβα
 γ_{M0} είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας της διατομής του χάλυβα

4.5.3.2 Ελαστικός έλεγχος διατμητικών τάσεων κατά τον τοπικό άξονα y

Σύμφωνα με τον ελαστικό έλεγχο διατμητικών τάσεων κατά τον τοπικό άξονα y θα πρέπει να ισχύει:

$$\tau_{xy,Ed} = \frac{V_{y,Ed}}{A_v} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \Rightarrow \frac{\tau_{xy,Ed}}{\frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}} \leq 1 \quad (4.19)$$

όπου:

- $V_{y,Ed}$ είναι η τιμή σχεδιασμού της διατμητικής δύναμης της διατομής κατά τον τοπικό άξονα y
 A_v είναι η επιφάνεια διάτμησης της διατομής

f_y είναι το όριο διαρροής του χάλυβα
 γ_{M0} είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας της διατομής του χάλυβα

4.5.4 Ελαστικός έλεγχος αντοχής σε διαξονική κάμψη

Σύμφωνα με τον ελαστικό έλεγχο σε διαξονική κάμψη θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{el,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{el,z,Rd}} \leq 1 \quad (4.20)$$

με

$$M_{el,y,Rd} = \frac{W_{el,y} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{και} \quad M_{el,z,Rd} = \frac{W_{el,z} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.21)$$

όπου:

$M_{y,Ed}$ η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης περί τον άξονα y
 $M_{z,Ed}$ η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης περί τον άξονα z
 $M_{el,y,Rd}$ η ελαστική αντοχή σχεδιασμού για κάμψη περί τον άξονα y
 $M_{el,z,Rd}$ η ελαστική αντοχή σχεδιασμού για κάμψη περί τον άξονα z
 $W_{el,y}$ η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής για κάμψη περί τον άξονα y
 $W_{el,z}$ η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής για κάμψη περί τον άξονα z
 f_y είναι το όριο διαρροής του χάλυβα
 γ_{M0} είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας της διατομής του χάλυβα

4.5.5 Ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη και διαξονική κάμψη

Σύμφωνα με τον ελαστικό έλεγχο διατομής υπό θλίψη και διαξονική κάμψη θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{el,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_{el,z}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \Rightarrow \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{el,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{el,z,Rd}} \leq 1 \quad (4.22)$$

όπου:

N_{Ed} είναι η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης
 $M_{y,Ed}$ η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης περί τον άξονα y
 $M_{z,Ed}$ η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης περί τον άξονα z
 A είναι το εμβαδόν της διατομής
 $W_{el,y}$ η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής για κάμψη περί τον άξονα y
 $W_{el,z}$ η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής για κάμψη περί τον άξονα z

f_y	είναι το όριο διαρροής του χάλυβα
γ_{M0}	είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας της διατομής του χάλυβα
$N_{c,Rd}$	είναι η αντοχή σχεδιασμού της διατομής για ομοιόμορφη θλίψη
$M_{el,y,Rd}$	η ελαστική αντοχή σχεδιασμού για κάμψη περί τον άξονα y
$M_{el,z,Rd}$	η ελαστική αντοχή σχεδιασμού για κάμψη περί τον άξονα z

4.5.6 Σύνθετος έλεγχος κατά Von Mises – Ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη, διαξονική κάμψη και διαξονική διάτμηση

Σύμφωνα με τον σύνθετο έλεγχο κατά Von Mises θα πρέπει να ισχύει για κάθε σημείο του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.23)$$

με

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{el,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_{el,z}} \quad (4.24)$$

όπου:

$\sigma_{x,Ed}$	είναι οι ορθές τάσεις σε σημείο της διατομής λόγω N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ και $M_{z,Ed}$
N_{Ed}	είναι η θλιπτική δύναμη σχεδιασμού
A	είναι το εμβαδό της διατομής
$M_{y,Ed}$	η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης περί τον άξονα y
$W_{el,y}$	η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής για κάμψη περί τον άξονα y
$M_{z,Ed}$	η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης περί τον άξονα z
$W_{el,z}$	η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής για κάμψη περί τον άξονα z

και

$$\tau_{Ed} = \sqrt{\tau_{xz,Ed}^2 + \tau_{xy,Ed}^2} \quad (4.25)$$

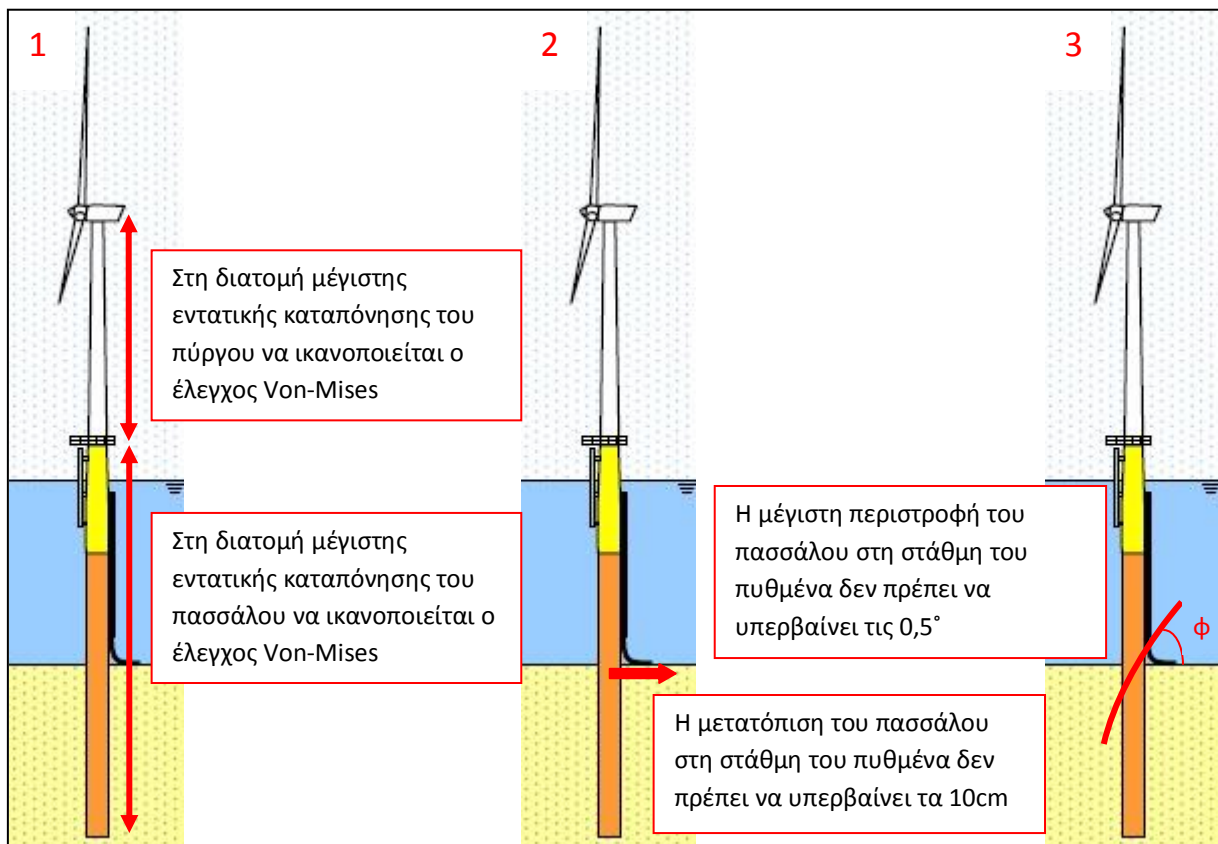
όπου:

τ_{Ed}	είναι η διατμητική τάση σε σημείο διατομής λόγω $V_{y,Ed}$ και $V_{z,Ed}$
$\tau_{xz,Ed}$	είναι η διατμητική τάση σε σημείο διατομής λόγω $V_{z,Ed}$
$\tau_{xy,Ed}$	είναι η διατμητική τάση σε σημείο διατομής λόγω $V_{y,Ed}$

4.5.7 Κριτήρια σχεδιασμού στην οριακή κατάσταση αστοχίας

Τα κριτήρια σχεδιασμού της κατασκευής στην οριακή κατάσταση αστοχίας είναι τα εξής (Σχήμα 4.7):

1. Έλεγχος φέρουσας ικανότητας πασσάλου και του πύργου. Δηλαδή στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου και του πύργου να ικανοποιείται ο σύνθετος έλεγχος Von-Mises, δηλαδή ο ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη, διαξονική κάμψη και διαξονική διάτμηση
2. Μέγιστη μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα: 0,10m
3. Μέγιστη περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα: 0,5°



Σχήμα 4.7 – Κριτήρια σχεδιασμού της κατασκευής [4.12]

Σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία εξετάζεται η οριακή κατάσταση αστοχίας σε συνθήκες λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Σε αυτή τη περίπτωση ασκείται το μέγιστο υδροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πασσάλου και το μέγιστο αεροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Τα πτερύγια περιστρέφονται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα ασκώντας έτσι το μέγιστο αεροδυναμικό φορτίο στην κορυφή της κατασκευής. Τέλος επιλέγεται τόσο τα υδροδυναμικά όσο κατά αεροδυναμικά φορτία της κατασκευής να ασκούνται στη ίδια διεύθυνση έτσι ώστε να επιβληθεί η μέγιστη δυνατή φόρτιση στη κατασκευή και να διερευνηθεί η μέγιστη ένταση και παραμόρφωση της ανεμογεννήτριας.

4.6 Απόσβεση θαλάσσιας ανεμογεννήτριας

Στις μη-γραμμικές αναλύσεις χρησιμοποιείται συχνά η απόσβεση κατά Rayleigh η οποία εξαρτάται από τη μάζα και την ακαμψία της κατασκευής. Ο πίνακας της απόσβεσης θεωρείται ότι είναι ανάλογος της μάζας και της ακαμψίας ως εξής:

$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K \quad (4.26)$$

όπου:

α είναι ο συντελεστής απόσβεσης της μάζας

M είναι το μητρώο μάζας

β είναι ο συντελεστής απόσβεσης της ακαμψίας της κατασκευής

K είναι το μητρώο ακαμψίας της κατασκευής

Όταν η κατασκευή είναι συμμετρική και η απόσβεση είναι ίδια και στις δύο διευθύνσεις της κατασκευής ισχύει:

$$\xi_i = \xi_j = \xi \quad (4.27)$$

$$\alpha = \frac{2\xi\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (4.28)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \quad (4.29)$$

όπου:

ξ η απόσβεση της κατασκευής

ω_i ιδιοσυχνότητα της ιδιομορφής i

ω_j ιδιοσυχνότητα της ιδιομορφής j

Σε αυτή την εργασία η απόσβεση της κατασκευής θεωρείται ίση με 2% ($\xi=2\%$) ενώ σαν ω_i και ω_j λαμβάνονται οι ιδιοσυχνότητες εκείνων των ιδιομορφών που ενεργοποιούν το μεγαλύτερο ποσοστό της ιδιομορφικής μάζας κατά τη διεύθυνση φόρτισης της κατασκευής.

Βιβλιογραφία

- [4.1] OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures, September 2011, Sec. 3 – B201 - Page 34
- [4.2] OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures, September 2011, Sec. 3 – B500 - Page 39

- [4.3] OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures, September 2011, Sec. 3 – B406 - Page 38
- [4.4] OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures, September 2011, Sec. 3 – B303 - Page 35
- [4.5] RECOMMENDED PRACTISE, DNV-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, October 2010, Page 47
- [4.6] RECOMMENDED PRACTISE, DNV-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, October 2010, Page 48
- [4.7] RECOMMENDED PRACTISE, DNV-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, October 2010, Page 56
- [4.8] RECOMMENDED PRACTISE, DNV-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, October 2010, Page 56
- [4.9] OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-B101, METALLIC MATERIALS, April 2009, (page 13)
- [4.10] OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-B101, METALLIC MATERIALS, April 2009, (page 18)
- [4.11] OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures, September 2011, (page 108)
- [4.12] Final report WP 4.2 – Support Structure Concepts for Deep Water Sites, Wybren de Vries, Delf University of Technology

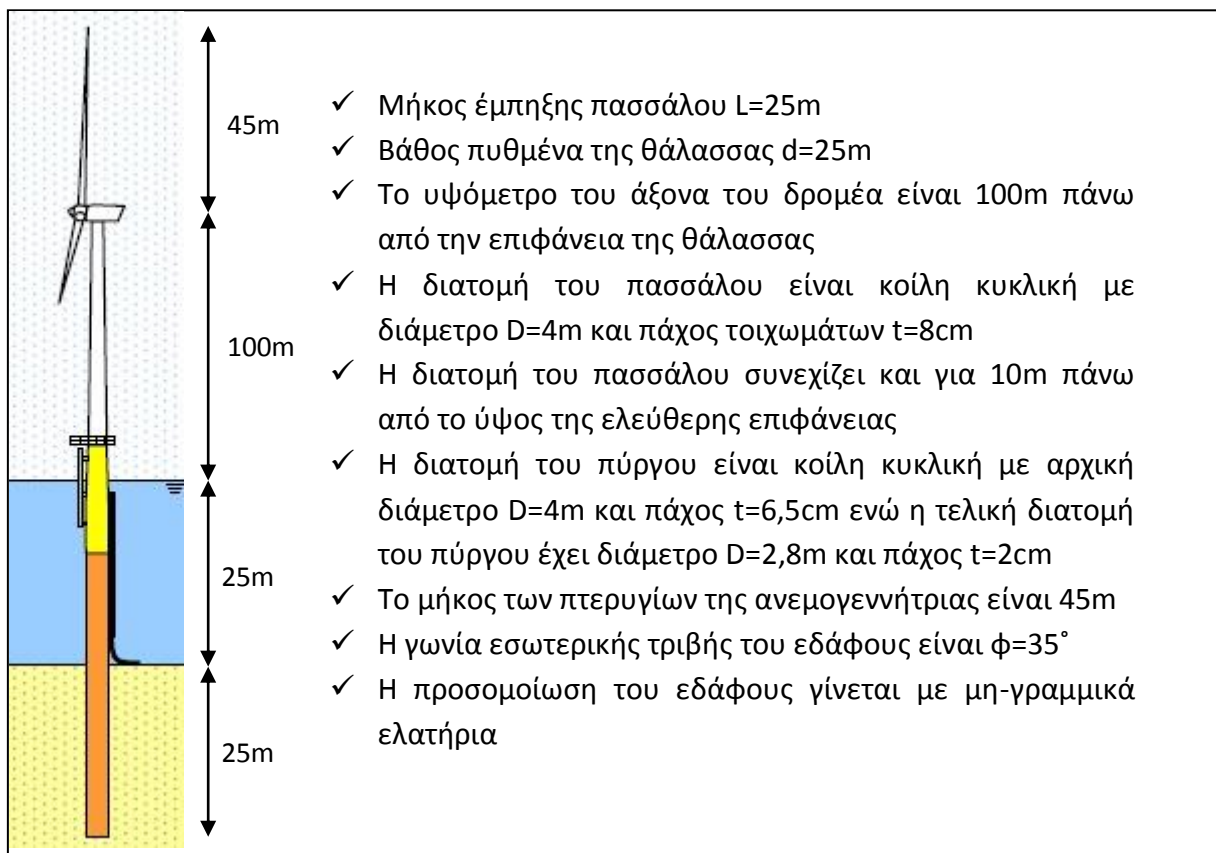
Κεφάλαιο 5^ο

Στατικές επιλύσεις θαλάσσιας ανεμογεννήτριας

5.1 Μεμονωμένη δοκιμή στατικής ανάλυσης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η διαδικασία εύρεσης των υδροδυναμικών και αεροδυναμικών φορτίων που ασκούνται στη κατασκευή, ο τρόπος προσομοίωσης του φορέα και του περιβάλλοντος εδάφους αλλά και οι έλεγχοι λειτουργικότητας και αστοχίας της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας. Σε αυτό το σημείο τα υδροδυναμικά και τα αεροδυναμικά φορτία που ασκούνται στη κατασκευή επιβάλλονται σαν στατικά φορτία.

5.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και προσομοίωση κατασκευής



Σχήμα 5.1 – Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοίωσης της κατασκευής [5.1]

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 5.1) παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εδάφους την στατικής ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί σε αυτή τη παράγραφο.

Για την προσομοίωση και της επίλυση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA 8.5.2 (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis).

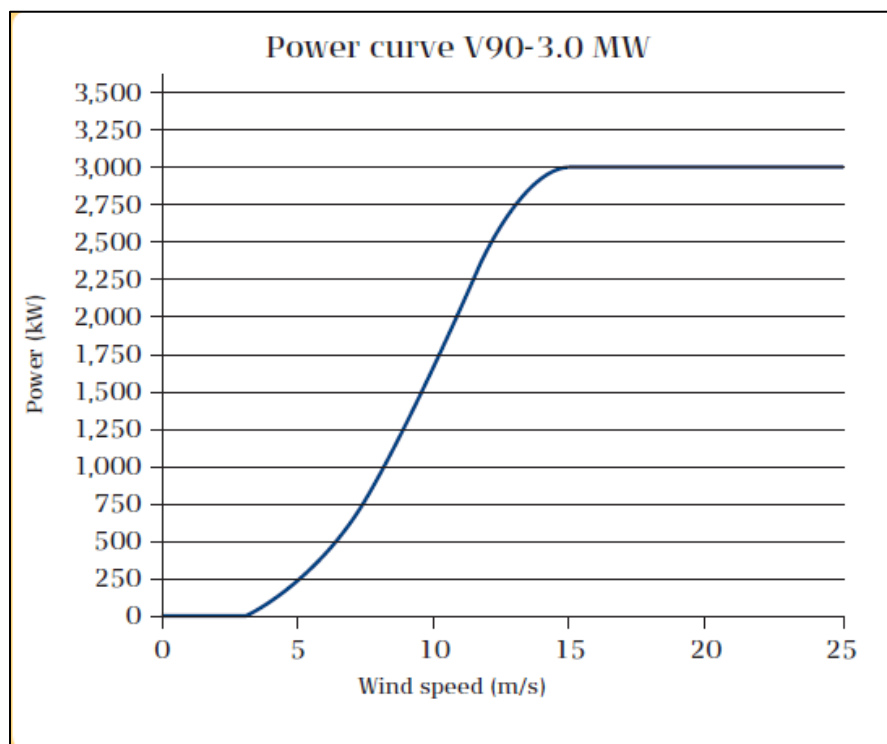
Όπως φαίνεται και από το παραπάνω προσομοίωμα της κατασκευής ο πάσσαλος που αποτελεί ταυτόχρονα την θεμελίωση αλλά και τον φορέα στήριξης της κατασκευής είναι σταθερής κοίλης κυκλικής διατομής με διάμετρο $D=4\text{m}$ και πάχος τοιχωμάτων $t=8\text{cm}$. Το μήκος έμπτυξης του πασσάλου μέσα στο πυθμένα της θάλασσας είναι $L=25\text{m}$ ενώ το βάθος της θάλασσας στη συγκεκριμένη τοποθεσία είναι $d=25\text{m}$. Στη προσομοίωση της κατασκευής δεν έχει ληφθεί υπόψη το κομμάτι μετάβασης το οποίο ουσιαστικά εξασφαλίζει τη σύνδεση μεταξύ του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας. Στη περίπτωση μας η διατομή του πασσάλου συνεχίζει για 10m πάνω από την επιφάνεια της ελεύθερης επιφάνειας, ύψος στο οποίο σταματά και αρχίζει ταυτόχρονα η διατομή του πύργου της ανεμογεννήτριας. Ο πύργος της ανεμογεννήτριας έχει μήκος 90m ενώ το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η διατομή του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι κοίλη κυκλική και μειώνεται με το ύψος. Στα πλαίσια της εργασίας έχει επιλεγεί η διατομή του πύργου να μειώνεται γραμμικά ανά 2m ξεκινώντας από αρχική διάμετρο $D=4\text{m}$ με πάχος τοιχωμάτων $6,5\text{cm}$ καταλήγοντας σε διάμετρο $D=2,8\text{m}$ με πάχος $t=2\text{cm}$. Το έδαφος θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας έχει χαρακτηριστικά μη-συνεκτικού εδάφους με γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=35^\circ$ ενώ θεωρούμε ενιαίο εδαφικό προφίλ για όλο το βάθος έμπτυξης του πασσάλου.

Στα πλαίσια της εργασία ο τύπος της ανεμογεννήτριας που επιλέγεται είναι Vestas V90-3.0MW Offshore. Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τύπου ανεμογεννήτριας απεικονίζονται παρακάτω [5.2]:

Operational data	Rated power: 3,000 kW Cut-in wind speed: 3.5 m/s Rated wind speed: 15 m/s Cut-out wind speed: 25 m/s Wind Class: IEC IA and IEC IIA Operating temperature range: standard range -20°C to 40°C , low temperature option -30°C to 40°C
Rotor	Rotor diameter: 90 m Swept area: $6,362\text{ m}^2$ Nominal revolutions: 16.1 rpm Operational interval: 8.6 - 18.4 rpm Air brake: full blade feathering with three pitch cylinders
Electrical	Frequency: 50 Hz/60 Hz Generator type: 4-pole doubly fed generator

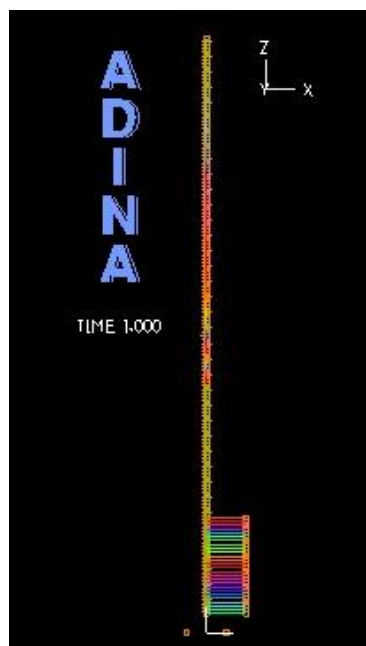
Gearbox	Type: two planetary stages and one helical stage
Power regulation	Pitch regulated with variable speed
Blade dimensions	Length: 44m Max. Chord: 3.5m
Nacelle Dimensions	Height for transport: 4 m Length: 9.65 m Width: 3.65 m (3.85 m installed)
Hub Dimensions	Max. diameter: 3.6 m Max. width: 4.2 m Length: 4.4 m
Weight	Nacelle: 70 t Rotor: 41 t

Η καμπύλη παραγωγής ενέργειας της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2 – Παραγόμενη ενέργεια ανεμογεννήτριας ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου [5.3]

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.3) απεικονίζεται η προσομοίωση του φορέα της ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina.



Σχήμα 5.3 – Προσομοίωση της κατασκευής στο πρόγραμμα Adina

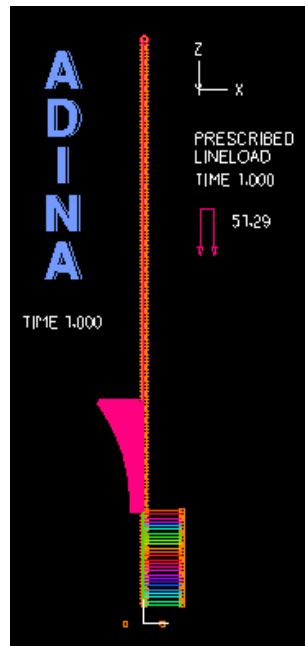
Κατά τη διεύθυνση z η συνοριακή συνθήκη που έχει επιβληθεί στην κατασκευή είναι ο περιορισμός μετακίνησης της κορυφής του πασσάλου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (η κορυφή του πασσάλου δεσμεύεται με άρθρωση κατά τον άξονα z) αφού η πλευρική τριβή που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου είναι αρκετά μεγάλη και άρα οι καθιζήσεις της κατασκευής είναι ελάχιστες. Στη περίπτωση του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι τύπου "Beam Elements" και έχουν μήκος 0,5m.

5.1.2 Υδροδυναμικό φορτίο

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν μια μεμονωμένη δοκιμή εύρεσης του υδροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος ενός κυλινδρικού πασσάλου με τα παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Σε αυτό το κεφάλαιο το υδροδυναμικό φορτίο ασκείται σαν στατική φόρτιση στη κατασκευή. Συγκεκριμένα σαν στατικό φορτίο επιλέγεται το μέγιστο υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου στη διάρκεια μια περιόδου του κυματισμού.

Ο προσομοίωση του υδροδυναμικού φορτίου στο πρόγραμμα Adina φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4 – Προσομοίωση υδροδυναμικού φορτίου στο πρόγραμμα Adina

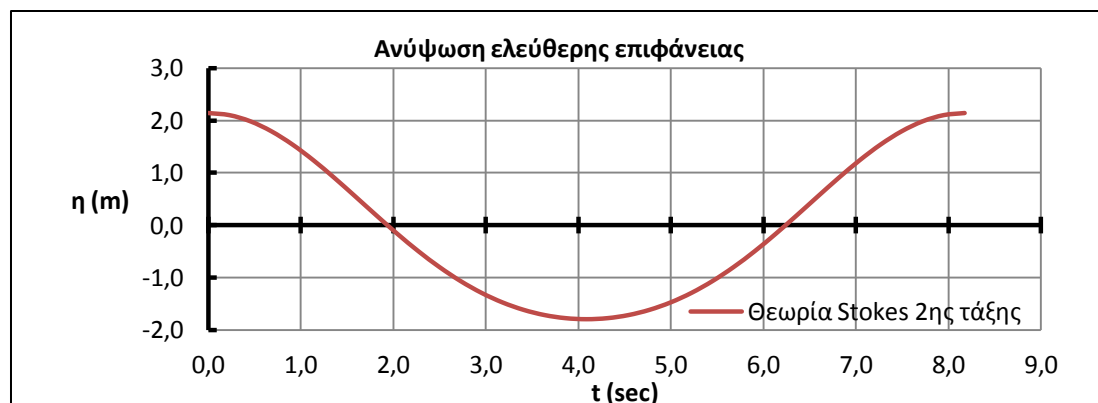
Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Σχήμα 5.5) με τις κυριότερες τιμές των παραμέτρων, που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Αρχικά παρουσιάζονται οι τιμές των πέντε παραμέτρων που επιλέχθηκαν. Σαν μέση ταχύτητα του ανέμου σε υψόμετρο 10m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας έχει επιλεγεί αυτή των 18m/s, η οποία προκύπτει αν στο προφίλ της μέσης ταχύτητας του ανέμου απαιτήσουμε μέση ταχύτητα ανέμου 25m/s στο υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Υπενθυμίζεται ότι ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννήτριας παράγει τη μέγιστη ενέργεια για ταχύτητα ανέμου 25m/s ενώ πάνω από αυτή την ταχύτητα διακόπτεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

W (m/s)	18	W - Ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας
F (m)	200.000	F - Μήκος αναπτύγματος του κυματισμού
t_d (hours)	100	t_d - Διάρκεια πνοής του ανέμου
D (m)	4,0	D - Διάμετρος πασσάλου
d (m)	25,00	d - Βάθος πυθμένα
Πρόβλεψη παραμέτρων χαρακτηριστικού κύματος με τη μέθοδο SMB		
Ο κυματισμός είναι περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος		
H_s (m)	4,21	H_s - Χαρακτηριστικό ύψος κυματισμού
T_s (s)	8,18	T_s - Χαρακτηριστική περίοδος κυματισμού
Προσδιορισμός χαρακτηριστικών κυματισμού		
d (m)	25	d - Βάθος πυθμένα
H_o=H_s (m)	4,21	H_o - Ύψος κύματος στα βαθιά
T = T_s (s)	8,18	T - Περίοδος κύματος
L_o (m)	104,4	L_o - Μήκος κύματος στα βαθιά
d/L_o	0,239	d/L_o - Σχετικό βάθος νερού
L/L_o	0,913	
H/H_o	0,000	
L (m)	95,33	L - Μήκος κύματος (που φτάνει στο έργο)
H (m)	3,93	H - Ύψος κύματος (που φτάνει στο έργο)
T (s)	8,18	T - Περίοδος κύματος

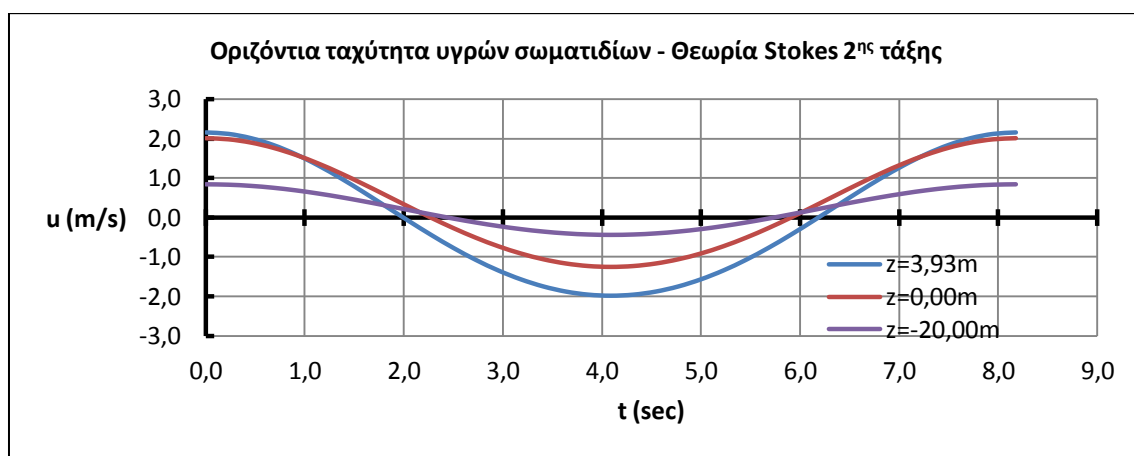
Κινηματική θεωρία κυματισμού		
d/L	0,262	d/L - Σχετικό βάθος νερού
Θεωρία Κυματισμού:		Stokes 2 ^{ης} Τάξης
Κινηματικές Παράμετροι που αντιστοιχούν σε :		Ενδιάμεσα νερά
Χαρακτηριστικά εξίσωσης Morison		
D (m)	4,0	D - Διάμετρος πασσάλου
H (m)	3,93	H - Ύψος κύματος (που φτάνει στο έργο)
H/D	0,98	
u_{max} (m/s)	2,01	u_{max} - μέγιστη οριζόντια ταχ. σωματιδίων ($t=0$) στην ελευ. επιφ. ($z=0m$)
ν (m ² /s)	$1,3 \cdot 10^{-6}$	ν - κινηματική συνεκτικότητα
T (s)	8,18	T - Περίοδος κύματος
Re	$6,2 \cdot 10^6$	Re - Αριθμός Reynolds
KC	4,10	KC - Αριθμός Keulegan-Carpenter
k (m)	0,05	k - τραχύτητα επιφάνειας ($z<0$)
k/D	$1,3 \cdot 10^{-2}$	($z<0$)
C_{DS}	1,05	C_{DS} - Συντελεστής αντίστασης ($z<0$)
KC/C_{DS}	3,91	($z<0$)
$\psi(C_{DS}, KC)$	0,671	($z<0$)
$C_D = C_{DS} \cdot \psi$	0,704	C_D - Συντελεστής αντίστασης ($z<0$)
C_M	1,952	C_M - Συντελεστής αδράνειας ($z<0$)
A (m ²)	12,57	A - Εμβαδό διατομής πυλών
ρ (Mg/m ³)	1,0	ρ - Πυκνότητα νερού
k (m)	$5,0 \cdot 10^{-6}$	k - τραχύτητα επιφάνειας ($z>0$)
C_{DS}	0,65	C_{DS} - Συντελεστής αντίστασης ($z>0$)
KC/C_{DS}	6,31	($z>0$)
$\psi(C_{DS}, KC)$	0,521	($z>0$)
$C_D = C_{DS} \cdot \psi$	0,339	C_D - Συντελεστής αντίστασης ($z>0$)
C_M	1,952	C_M - Συντελεστής αδράνειας ($z>0$)
z_{max} (m)	3,93	z_{max} - Μέγιστο ύψος κύματος
$F z_{max}$ (kN/m)	39,10	$F z_{max}$ - Μέγιστη δύναμη στη κορυφή του κύματος

Σχήμα 5.5 – Τιμές των κυριότερων παραμέτρων του κυματισμού

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.6) παρουσιάζεται η ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας σύμφωνα με θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Το ύψος του κύματος είναι $H_s = 3,93m$. Όπως παρατηρούμε, το διάγραμμα δεν είναι συμμετρικό ως προς των άξονα της ελεύθερης επιφάνειας ($\eta=0,00m$) αφού στη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης υπάρχουν κάποιοι πρόσθετοι όροι οι οποίοι ουσιαστικά μετατοπίζουν το διάγραμμα προς τα πάνω. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος και στον κατακόρυφο το υψόμετρο της επιφάνειας.

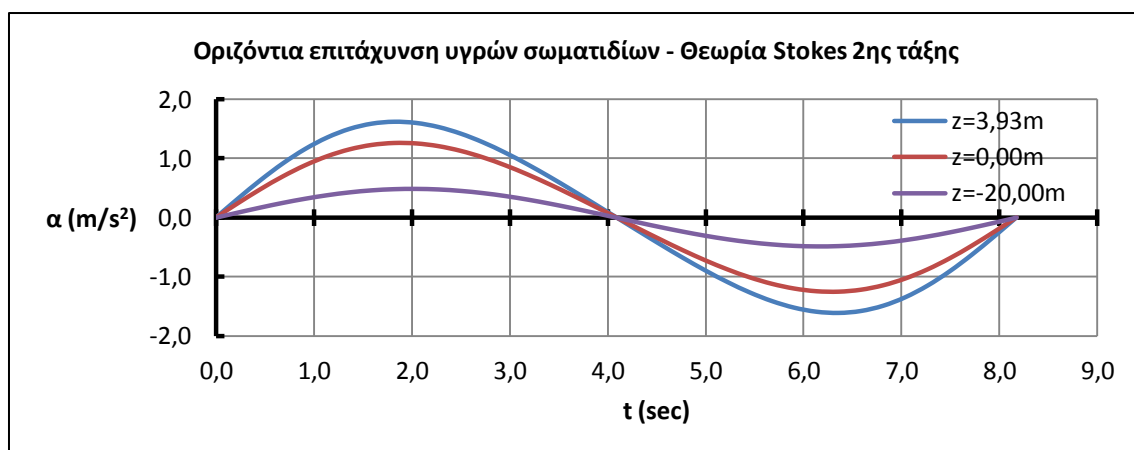
Σχήμα 5.6 – Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.7) παρουσιάζεται συνοπτικά η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας των υγρών σωματιδίων σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, για διάφορα υψόμετρα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Στη περίπτωση που βρισκόμαστε πάνω από το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας η ταχύτητα των υγρών σωματιδίων οφείλεται μόνο στη κίνηση των θαλασσίων κυμάτων και έτσι το διάγραμμα των ταχυτήτων είναι συμμετρικό ως προς τον οριζόντιο άξονα. Στη περίπτωση που βρισκόμαστε κάτω από το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας η ταχύτητα των υγρών σωματιδίων οφείλεται στη κίνηση των θαλασσίων κυμάτων και των θαλασσίων ρευμάτων και έτσι το διάγραμμα των ταχυτήτων είναι μετατοπισμένο προς τα πάνω. Παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στη κορυφή του κύματος τόσο μεγαλύτερο γίνεται το εύρος τιμών της ταχύτητας των υγρών σωματιδίων.



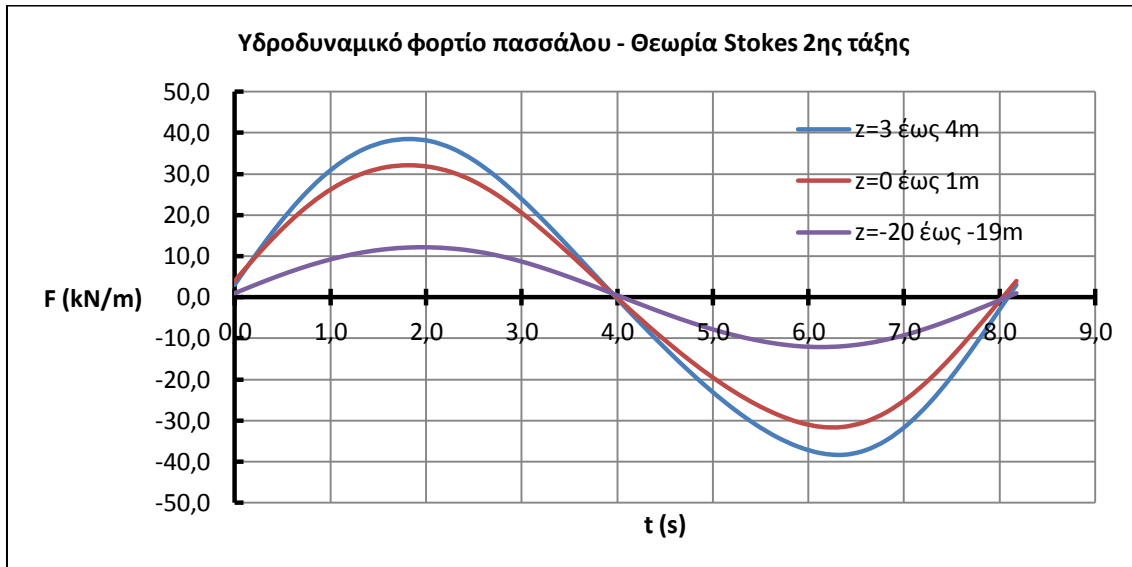
Σχήμα 5.7 – Οριζόντια ταχύτητα υγρών σωματιδίων για διάφορα ύψη σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.8) παρουσιάζεται συνοπτικά η οριζόντια συνιστώσα της επιτάχυνσης των υγρών σωματιδίων σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, για διάφορα υψόμετρα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Η επιτάχυνση των υγρών σωματιδίων οφείλεται μόνο στη κίνηση των θαλασσίων κυμάτων με αποτέλεσμα τα διαγράμματα των επιταχύνσεων να είναι συμμετρικά ως προς τον οριζόντιο άξονα. Παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στη κορυφή του κύματος τόσο μεγαλύτερο γίνεται το εύρος τιμών της επιτάχυνσης των υγρών σωματιδίων.



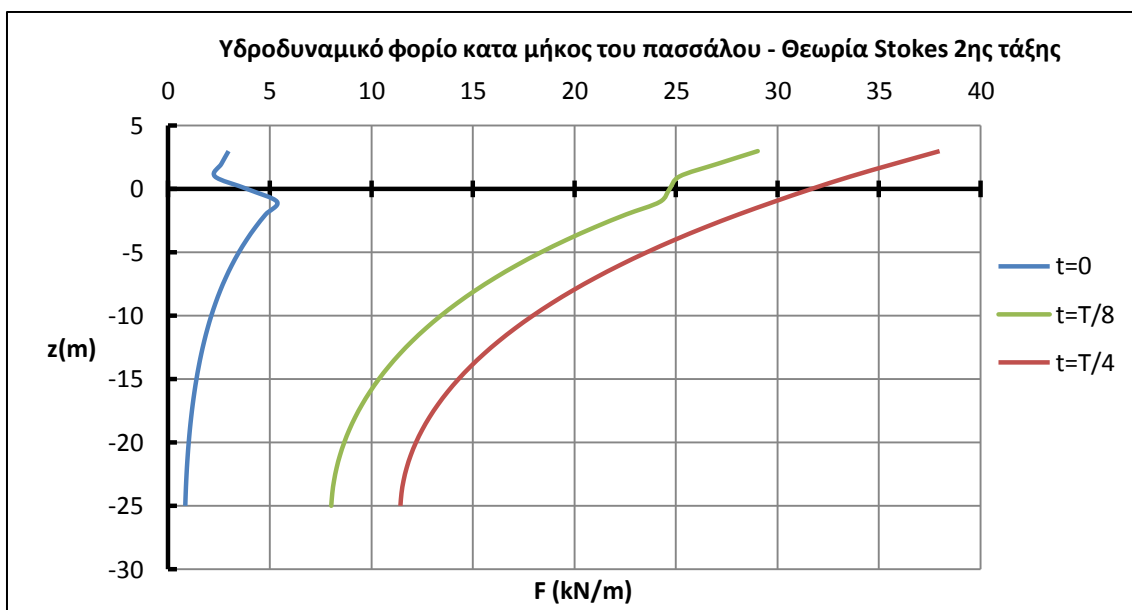
Σχήμα 5.8 – Οριζόντια επιτάχυνση υγρών σωματιδίων για διάφορα ύψη σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.9) παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται στο πάσσαλο στα υψόμετρα 3 έως 4m, 0 έως 1m και -20 έως -19m σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Παρατηρούμε ότι σε κάθε υψόμετρο, τη χρονική στιγμή $t=T/4$ ($=2,045\text{sec}$) το φορτίο παίρνει τη μέγιστη τιμή του και ότι η κορυφή του κύματος ασκεί το μέγιστο φορτίο στην κατασκευή.



Σχήμα 5.9 – Υδροδυναμικό φορτίο πασσάλου σε διάφορα υψόμετρα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.10) παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται στο κατά μήκος του πασσάλου (από το πυθμένα μέχρι και τη κορυφή του κυματισμού) τις χρονικές στιγμές $t=0$, $t=T/8$ και $t=T/4$. Παρατηρούμε ότι τη χρονική στιγμή $t=T/4$ ασκείται το μέγιστο φορτίο κατά μήκος της κατασκευής.



Σχήμα 5.10 – Υδροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πασσάλου τις χρονικές στιγμές $t=0$, $t=T/8$, $t=T/4$

Στα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές τιμές του υδροδυναμικού φορτίου που ασκείται στην κατασκευή. Στην προσομοίωση του υδροδυναμικού φορτίου

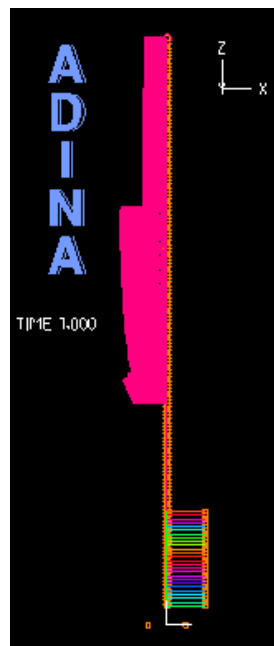
στο πρόγραμμα Adina για την επίλυση της κατασκευής τα μεγέθη αυτά έχουν πολλαπλασιαστεί με τον δυναμικό συντελεστή $\gamma=1,35$ έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη ο δυναμικός χαρακτήρας του φορτίου.

5.1.3 Αεροδυναμικό φορτίο

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν μια μεμονωμένη δοκιμή εύρεσης του αεροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος του πύργου με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν αρχικά.

Σε αυτό το κεφάλαιο το αεροδυναμικό φορτίο ασκείται σαν στατική φόρτιση στη κατασκευή. Συγκεκριμένα η φόρτιση αυτή προκύπτει χρησιμοποιώντας το προφίλ της μέσης ταχύτητας του ανέμου. Με βάση τη μέση ταχύτητα του ανέμου κάθε κομματιού υπολογίζεται η αεροδυναμική πίεση που ασκείται σε κάθε κομμάτι του πύργου (το κάθε κομμάτι έχει μήκος 1m) ανάλογα βέβαια και με την διάμετρο του.

Ο προσομοίωση του αεροδυναμικού φορτίου στο πρόγραμμα Adina φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11 – Προσομοίωση αεροδυναμικού φορτίου στο πρόγραμμα Adina

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Σχήμα 5.12) με τις τιμές και την επεξήγηση των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια υπολογισμού του αεροδυναμικού φορτίου.

$V_{10, hub}$ (m/s)	25	$V_{10, hub}$ - Μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου στο ύψος του άξονα του δρομέα
z_{hub} (m)	100	z_{hub} - Ύψος του άξονα του δρομέα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
z (m)		z - Ύψος πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας

α	0,14	α - εκθέτης που καθορίζεται ανάλογα με τις συνθήκες ανέμου που επικρατούν [(NWP) : 0,14]
$V_{10,z}$ (m/s)		$V_{10,z}$ - Μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου στο ύψος z
ρ_a (kg/m ³)	1,226	ρ_a - Η πυκνότητα του αέρα
q (kg/m·s ²)		q - Πίεση του ανέμου στην επιφάνεια της κατασκευής
D (m)		D - Διάμετρος πύργου
S (m ² /m)		S - Εμβαδό προβαλλόμενης επιφάνειας κάθετη στη διεύθυνση του ανέμου
α (°)	90	α - γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του ανέμου και του άξονα του μέλους
v_a (m ² /s)	$1,45 \cdot 10^{-5}$	v - Κινηματική συνεκτικότητα του αέρα : $1,45 \cdot 10^{-5}$ m ² /s
R_e		R_e - Αριθμός Reynolds
k (m)	$5 \cdot 10^{-6}$	k - Επιφανειακή τραχύτητα του μέλους
k/D		
C		C - Συντελεστής σχήματος (εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds, την τραχύτητα της επιφάνειας και την διάμετρο του εξεταζόμενου μέλους)
γ_f	1,35	γ_f - Συντελεστής ασφαλείας για την αεροδυναμική φόρτιση
γ	0,50	γ - Συντελεστής φόρτισης στη σκιά των πτερυγίων

Σχήμα 5.12 – Τιμές και επεξήγηση των κυριότερων παραμέτρων της αεροδυναμικής φόρτισης

Επιλέγοντας ταχύτητα ανέμου 25m/s στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας και χρησιμοποιώντας το προφίλ του ανέμου, η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου στα διάφορα ύψη πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.13).

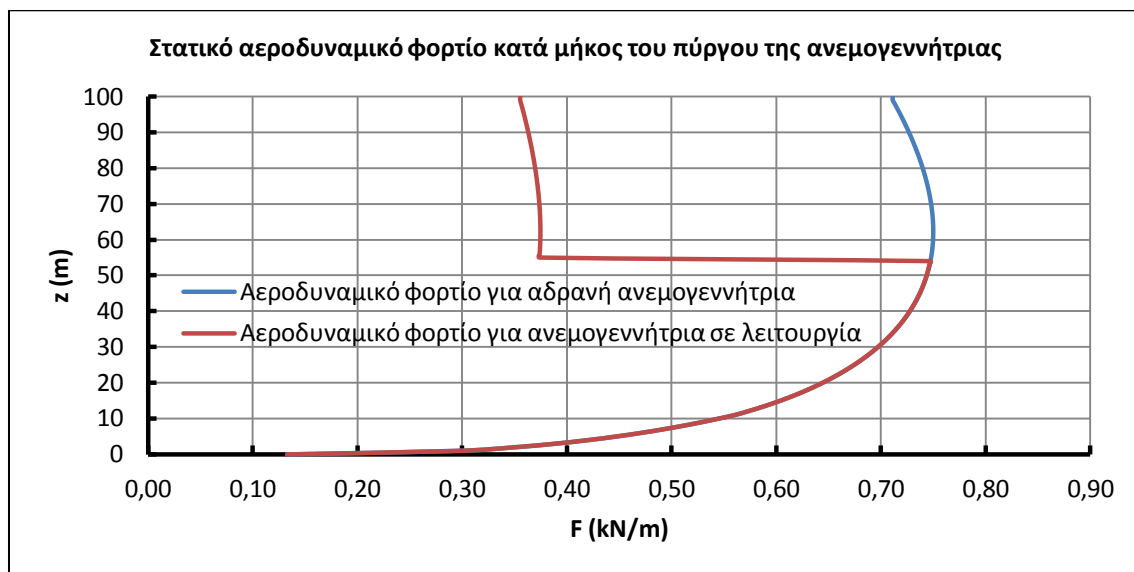
Σύμφωνα με τον Νορβηγικό κανονισμό DNV-OS-J101 στη περίπτωση που θέλουμε να ασκήσουμε το αεροδυναμικό φορτίο σαν στατική φόρτιση θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί η ταχύτητα του ανέμου με τον δυναμικό συντελεστή $\gamma=1,4$ ώστε να ληφθεί υπόψη ο δυναμικός χαρακτήρας της αεροδυναμικής φόρτισης [5.4].



Σχήμα 5.13 – Μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.14) παρουσιάζεται το αεροδυναμικό φορτίο που ασκείται στο κατά μήκος του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας από υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας ($z=0,0m$) μέχρι το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας ($z=100,0m$). Όπως μπορεί να γίνει κατανοητό, λόγω της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας το φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πύργου που

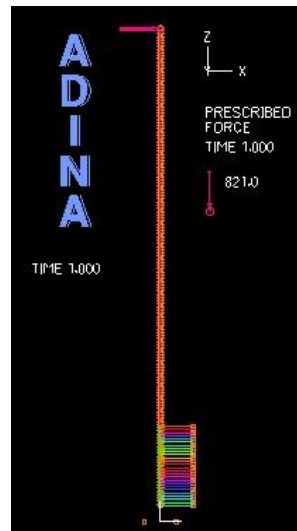
βρίσκεται στη σκιά των πτερυγίων είναι μικρότερο από αυτό που θα ασκούνται στο ίδιο μήκος στη περίπτωση που η ανεμογεννήτρια παρέμενε αδρανής. Λόγω της κίνησης των πτερυγίων η ταχύτητα του ανέμου απομειώνεται στο μήκος του πύργου που βρίσκεται πίσω από τα περιστρεφόμενα πτερύγια. Για την αναπαράσταση αυτού του φαινομένου στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας έχουμε επιλέξει έναν μειωτικό συντελεστή για τη φόρτιση του ανέμου στο μήκος του πύργου που βρίσκεται στη σκιά των πτερυγίων ($\gamma=0,50$). Ο συντελεστής αυτός πολλαπλασιάζεται με το αεροδυναμικό φορτίο στο μήκος του πύργου που βρίσκεται στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας (από τα 55m έως τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας).



Σχήμα 5.14 – Αεροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές τιμές του αεροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας. Στην προσομοίωση του αεροδυναμικού φορτίου στο πρόγραμμα Adina για την επίλυση της κατασκευής η μέση ταχύτητα του ανέμου έχει πολλαπλασιαστεί με τον δυναμικό συντελεστή $\gamma=1,4$ έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη ο δυναμικός χαρακτήρας του φορτίου.

Η προσομοίωση του φορτίου που ασκείται στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας λόγω της περιστροφής των πτερυγίων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.15). Η φόρτιση λόγω της περιστροφής των πτερυγίων προκύπτει επιλέγοντας μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας 25m/s, υψόμετρο άξονα δρομέα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και μήκος πτερυγίων 45m. Η διάρκεια της συγκεκριμένης φόρτισης είναι 600sec. Στη περίπτωση της στατικής φόρτισης το φορτίο που ασκείται στη κορυφή του πύργου εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας προκύπτει από την επιλογή της μέγιστης τιμής κατά την διάρκεια μιας ιστορίας φόρτισης διάρκειας 600sec. Στην προσομοίωση του φορτίου στο πρόγραμμα Adina για την επίλυση της κατασκευής η μέγιστη τιμή της φόρτισης έχει πολλαπλασιαστεί με τον δυναμικό συντελεστή $\gamma=1,35$ έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη ο δυναμικός χαρακτήρας του φορτίου.

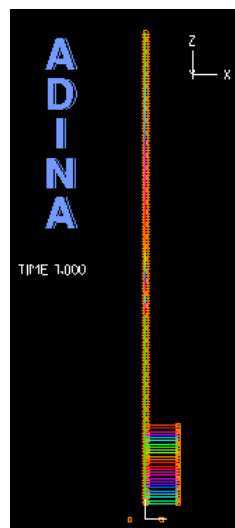


Σχήμα 5.15 – Προσομοίωση φορτίου λόγω περιστροφής πτερυγίων στο πρόγραμμα Adina

5.1.4 Προσομοίωση εδάφους

Η επιρροή του εδάφους στους πασσάλους προσομοιώνεται με τη χρήση μη-γραμμικών ελατηρίων που τοποθετούνται σε όλες τις διευθύνσεις. Η δυσκαμψία των ελατηρίων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πασσάλου καθώς και από τις ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων. Για το λόγο αυτό υπολογίζονται οι εδαφικές σταθερές στη περιοχή που θα τοποθετηθούν οι πάσσαλοι.

Η προσομοίωση του εδάφους μέσω μη-γραμμικών ελατηρίων στο πρόγραμμα Adina απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.16).



Σχήμα 5.16 – Προσομοίωση μη-γραμμικών ελατηρίων στο πρόγραμμα Adina

Παρότι δεν είναι φυσικώς δυνατό, οι αναλύσεις γίνονται θεωρώντας ενιαίο εδαφικό προφίλ για όλο το βάθος έμπηξης του πασσάλου προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή μόνο της μεταβολής της σταθεράς των ελατηρίων στην απόκριση της κατασκευής. Για το λόγο αυτό,

οι αναλύσεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τιμών της δυσκαμψίας των ελατηρίων και μελετάται έτσι η συμπεριφορά του πασσάλου σε όλα τα είδη εδάφους, από το πιο χαλαρό μέχρι αυτό με τη μεγαλύτερη συνοχή που πλησιάζει όσο είναι δυνατόν τις συνθήκες πάκτωσης.

Στα πλαίσια της εργασίας δεν τοποθετούνται γραμμικά ελατήρια κατά τη διεύθυνση του άξονα του πασσάλου αφού η πλευρική τριβή που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου είναι αρκετά μεγάλη και άρα οι καθιζήσεις της κατασκευής είναι ελάχιστες (η κορυφή του πασσάλου δεσμεύεται με άρθρωση). Κατά την εγκάρσια διεύθυνση του πασσάλου τοποθετούνται μη-γραμμικά ελατήρια τα οποία προσομοιώνουν τη δυσκαμψία του εδάφους.

Η παραδοχή που γίνεται στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας είναι ότι το εδαφικό προφίλ της περιοχής θεμελίωσης του πασσάλου είναι ενιαίο καθώς επίσης αυτό αποτελείται από αμμώδες (μη-συνεκτικό) έδαφος με σταθερή σχετική πυκνότητα.

Στη περίπτωση των μη-συνεκτικών εδαφών ο δείκτης εδάφους [Σταθερά ελατηρίου (K) = Δείκτης εδάφους (k_h) · Διάμετρος πασσάλου (D) · Επιφάνεια επιρροής ελατηρίου] κατά την οριζόντια διεύθυνση (k_h) είναι ανάλογος με το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους. Στα εδάφη αυτά το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα του εδάφους (D_r) καθώς και την ενεργό πίεση των υπερκειμένων γαιών (σ'_v) με αποτέλεσμα ο δείκτης εδάφους (k_h) να αυξάνει με το βάθος. Έτσι στη περίπτωση των μη-συνεκτικών εδαφών η δυσκαμψία των ελατηρίων (δηλαδή οι σταθερές των ελατηρίων) αυξάνει με το βάθος.

Η μη-γραμμική κατανομή της δυσκαμψίας των ελατηρίων, η οποία προσδιορίζεται από την καμπύλη πιέσεων-υποχωρήσεων “ p - y ” εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως:

- Το τύπο του εδάφους
- Τη σχετική πυκνότητα του εδάφους
- Το βάθος των ελατηρίων
- Την ενεργό πίεση των υπερκειμένων γαιών
- Τη διάμετρο του πασσάλου

Στις αναλύσεις που γίνονται στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας υπολογίζεται για κάθε ελατήριο η καμπύλη πλευρικού φορτίου ανά μέτρο μήκους που ασκείται στον πάσσαλο και πλευρικής μετατόπισης πασσάλου (καμπύλη p - y) για τα χαρακτηριστικά του εδάφους, το αντίστοιχο βάθος του ελατηρίου και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του πασσάλου. Έχοντας τη καμπύλη p - y κάθε ελατηρίου το πρόγραμμα υπολογίζει αυτόματα τη σταθερά του ελατηρίου (δηλαδή τη δυσκαμψία του) για κάθε μετατόπιση του πασσάλου.

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζεται διαδικασία υπολογισμού της σταθεράς των ελατηρίων (K) στη περίπτωση της θεμελίωσης του πασσάλου σε αμμώδες έδαφος με

συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του επιλεγόμενου πασσάλου (Σχήμα 5.17):

D (m)	4	D - Διάμετρος πασσάλου
t (m)	0,08	t - Πάχος τοιχωμάτων πασσάλου
E _p (MPa)	210.000	E _p - Μέτρο ελαστικότητας πασσάλου
I _p (m ⁴)	1,89	I _p - Ροπή αδράνειας πασσάλου
E _p ·I _p (MN·m ²)	397.565,1	E _p ·I _p - Καμπτική δυσκαμψία πασσάλου
L (m)	25,0	L - Βάθος έμπηξης πασσάλου

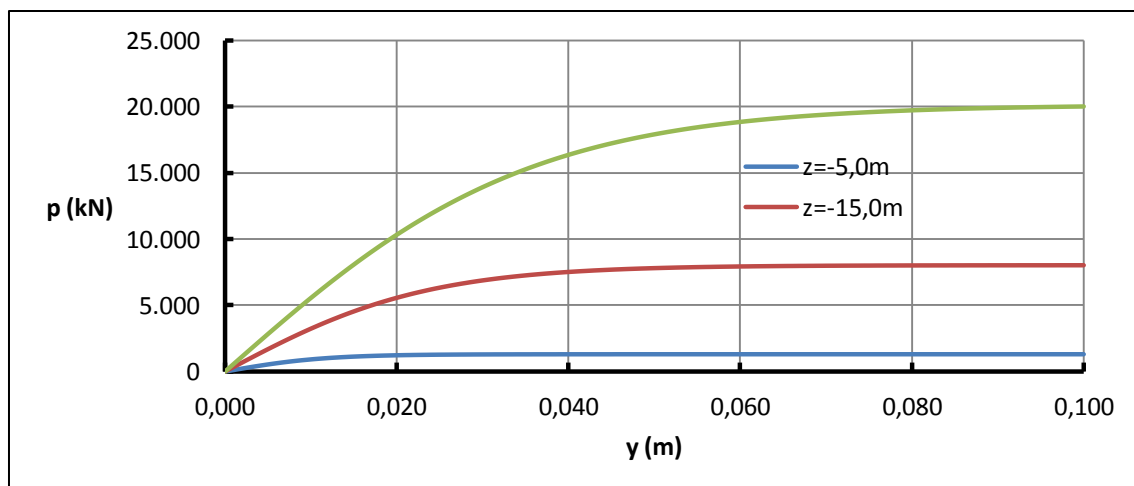
Σχήμα 5.17 – Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πασσάλου

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της διαδικασίας που ακολουθείται στη περίπτωση των συνεκτικών εδαφών με τελικό σκοπό τον υπολογισμό της δυσκαμψίας των ελατηρίων (Σχήμα 5.18). Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω στη περίπτωση χρήσης μη-γραμμικών ελατηρίων εισάγεται για κάθε ελατήριο η πραγματική καμπύλη “p-γ” η οποία καθορίζει τη συμπεριφορά του ελατηρίου.

φ (°)	35	φ - Γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
C ₁	3,02	C ₁ - Συντελεστής που εξαρτάται από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
C ₂	3,49	C ₂ - Συντελεστής που εξαρτάται από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
C ₃	54,4	C ₃ - Συντελεστής που εξαρτάται από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
γ (kN/m ³)	10	γ - Ενεργό βάρος εδάφους
z (m)		z - Βάθος από τον πυθμένα της θάλασσας
A	0,9	A –Συντελεστής ανακυκλιζόμενης φόρτισης
k (kN/m ³)	22.801,55	k - Σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση
p _{us} (kN/m)		p _{us} - Μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους εδάφους - ρηχά (μεταβάλλεται με το βάθος z)
p _{ud} (kN/m)		p _{ud} - Μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους εδάφους - βαθιά (μεταβάλλεται με τα βάθος z)
p (kN/m)		p - Πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκος πασσάλου

Σχήμα 5.18 – Χαρακτηριστικά υπολογισμού δυσκαμψίας ελατηρίων – Αμμώδες έδαφος

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.19) απεικονίζονται οι καμπύλες πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλες “p-γ”) σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους για τη περίπτωση εδάφους και πασσάλου με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5.19 – Καμπύλες “p-γ” για διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (φ=35 – D=4m)

5.1.5 Αποτελέσματα μεμονωμένης δοκιμής στατικής ανάλυσης

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την στατική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Adina.

Στους παρακάτω πίνακες (Σχήμα 5.20, Σχήμα 5.21 και Σχήμα 5.22) παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της διατομής του πασσάλου και τα χαρακτηριστικά της αρχικής και της τελικής διατομής του πύργου της ανεμογεννήτριας.

D (m)	4,00	D - Διάμετρος διατομής πασσάλου
t (m)	0,08	t - Πάχος διατομής
A (m ²)	0,9852	A - Εμβαδό διατομής
E (MPa)	210.000,0	E - Μέτρο ελαστικότητας υλικού
I (m ⁴)	1,893	I - Ροπή αδράνειας πασσάλου (I=I _y =I _z)
W _{el} (m ³)	0,9466	W _{el} - Ελαστική ροπή αντίστασης διατομής (W _{el} = W _{el,y} = W _{el,z})
W _{pl} (m ³)	1,2295	W _{pl} - Πλαστική ροπή αντίστασης διατομής (W _{pl} = W _{pl,y} = W _{pl,z})
E _p ·I _p (MN·m ²)	397.565,1	E _p ·I _p - Καμπτική δυσκαμψία πασσάλου
A _v (m ²)	0,627	A _v - Επιφάνεια διάτμησης της διατομής
D / t	50,0	D / t - Κατάταξη διατομής
f _y (MPa)	310	f _y - Τάση διαρροής χάλυβα (εξαρτάται από το πάχος t της διατομής)
ε	0,87	ε - Κατάταξη διατομής
	2	Κατηγορία διατομής
γ _{Mo}	1,10	γ _{Mo} - Συντελεστής ασφαλείας για αντοχή διατομών
N _{c,Rd} (kN)	277.648,2	N _{c,Rd} - Θλιπτική αντοχή της διατομής
M _{el,Rd} (kNm)	266.764,4	M _{el,Rd} - Ελαστική ροπή αντοχής της διατομής M _{el,Rd} = M _{el,y,Rd} = M _{el,z,Rd}
M _{pl,Rd} (kNm)	346.490,6	M _{pl,Rd} - Πλαστική ροπή αντοχής της διατομής M _{pl,Rd} = M _{pl,y,Rd} = M _{pl,z,Rd}

Σχήμα 5.20 – Χαρακτηριστικά διατομής πασσάλου θεμελιώσεως της ανεμογεννήτριας

D (m)	4,00	D - Διάμετρος αρχικής διατομής πύργου
t (m)	0,065	t - Πάχος αρχικής διατομής
A (m ²)	0,8035	A - Εμβαδό διατομής
E (MPa)	210.000	E - Μέτρο ελαστικότητας υλικού
I (m ⁴)	1,556	I - Ροπή αδράνειας πασσάλου (I=I _y =I _z)
W _{el} (m ³)	0,7779	W _{el} - Ελαστική ροπή αντίστασης διατομής (W _{el} = W _{el,y} = W _{el,z})
W _{pl} (m ³)	1,0066	W _{pl} - Πλαστική ροπή αντίστασης διατομής (W _{pl} = W _{pl,y} = W _{pl,z})
E _p ·I _p (MN·m ²)	326.697,1	E _p ·I _p - Καμπτική δυσκαμψία πασσάλου
A _v (m ²)	0,512	A _v - Επιφάνεια διάτμησης της διατομής
D / t	61,5	D / t - Κατάταξη διατομής
f _y (MPa)	320	f _y - Τάση διαρροής χάλυβα (εξαρτάται από το πάχος t της διατομής)
ε	0,86	ε - Κατάταξη διατομής
	3	Κατηγορία διατομής
γ _{Mo}	1,10	γ _{Mo} - Συντελεστής ασφαλείας για αντοχή διατομών
N _{c,Rd} (kN)	233.757,3	N _{c,Rd} - Θλιπτική αντοχή της διατομής
M _{el,Rd} (kNm)	226.283,7	M _{el,Rd} - Ελαστική ροπή αντοχής της διατομής M _{el,Rd} = M _{el,y,Rd} = M _{el,z,Rd}
M _{pl,Rd} (kNm)	292.819,2	M _{pl,Rd} - Πλαστική ροπή αντοχής της διατομής M _{pl,Rd} = M _{pl,y,Rd} = M _{pl,z,Rd}

Σχήμα 5.21 – Χαρακτηριστικά αρχικής διατομής του πύργου της ανεμογεννήτριας

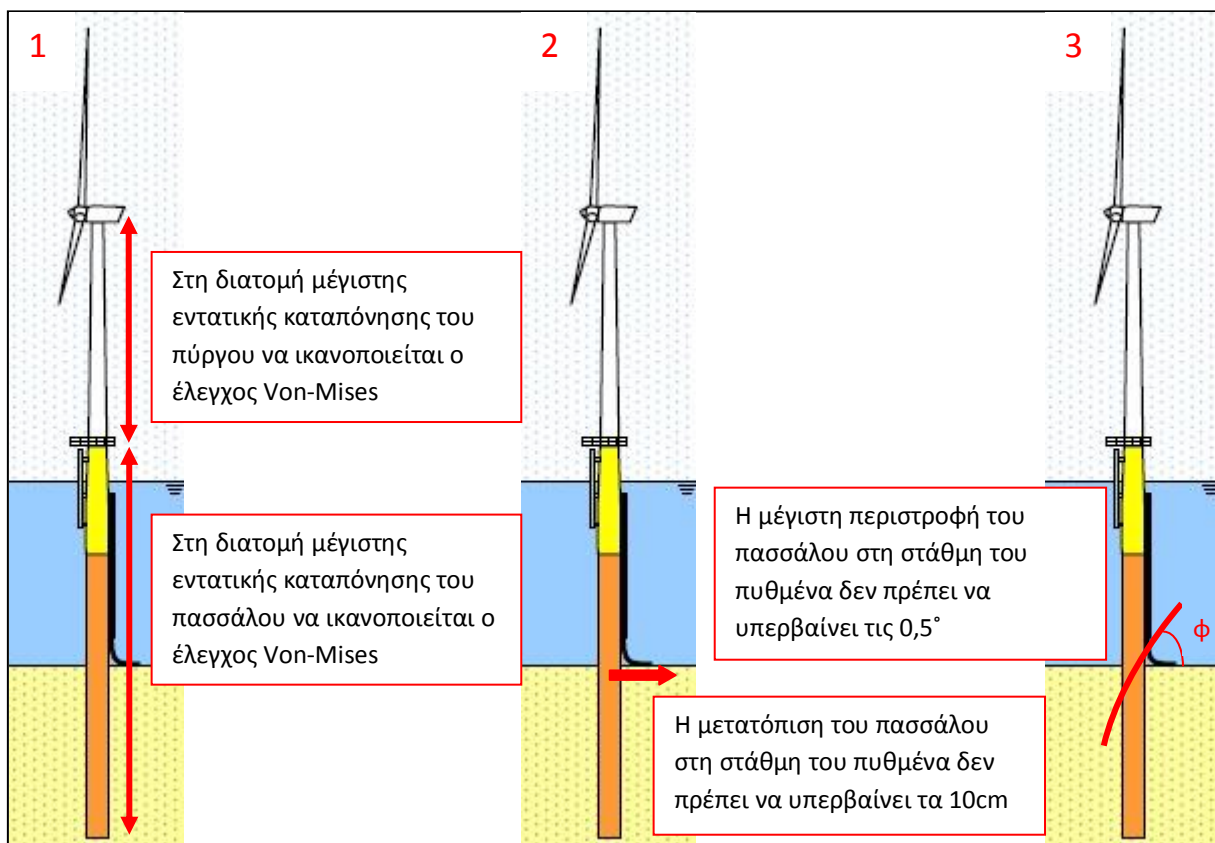
D (m)	2,80	D - Διάμετρος τελικής διατομής πύργου
t (m)	0,0200	t - Πάχος τελικής διατομής
A (m ²)	0,1747	A - Εμβαδό διατομής
E (MPa)	210.000	E - Μέτρο ελαστικότητας υλικού
I (m ⁴)	0,169	I - Ροπή αδράνειας πασσάλου (I=I _y =I _z)
W _{el} (m ³)	0,1205	W _{el} - Ελαστική ροπή αντίστασης διατομής (W _{el} = W _{el,y} = W _{el,z})

$W_{pl} \text{ (m}^3\text{)}$	0,1546	W_{pl} - Πλαστική ροπή αντίστασης διατομής ($W_{pl} = W_{pl,y} = W_{pl,z}$)
$E_p \cdot I_p \text{ (MN} \cdot \text{m}^2\text{)}$	35.437,7	$E_p \cdot I_p$ - Καμπτική δυσκαμψία πασσάλου
$A_v \text{ (m}^2\text{)}$	0,111	A_v - Επιφάνεια διάτμησης της διατομής
D / t	140,0	D / t - Κατάταξη διατομής
$f_y \text{ (MPa)}$	355	f_y - Τάση διαρροής χάλυβα (εξαρτάται από το πάχος t της διατομής)
ε	0,81	ε - Κατάταξη διατομής
γ_{M0}	1,10	γ_{M0} - Συντελεστής ασφαλείας για αντοχή διατομών
$N_{c,Rd} \text{ (kN)}$	56.371,6	$N_{c,Rd}$ - Θλιπτική αντοχή της διατομής
$M_{el,Rd} \text{ (kNm)}$	38.900,4	$M_{el,Rd}$ - Ελαστική ροπή αντοχής της διατομής $M_{el,Rd} = M_{el,y,Rd} = M_{el,z,Rd}$
$M_{pl,Rd} \text{ (kNm)}$	49.884,2	$M_{pl,Rd}$ - Πλαστική ροπή αντοχής της διατομής $M_{pl,Rd} = M_{pl,y,Rd} = M_{pl,z,Rd}$

Σχήμα 5.22 – Χαρακτηριστικά τελικής διατομής του πύργου της ανεμογεννήτριας

Στα πλαίσια της εργασίας τα κριτήρια σχεδιασμού της κατασκευής που έχουν επιλεγεί είναι (Σχήμα 5.23):

1. Έλεγχος φέρουσας ικανότητας πασσάλου και του πύργου. Δηλαδή στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου και του πύργου να ικανοποιείται ο σύνθετος έλεγχος Von-Mises, δηλαδή ο ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη, διαξονική κάμψη και διαξονική διάτμηση
2. Μέγιστη μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα: 0,10m
3. Μέγιστη περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα: 0,5°



Σχήμα 5.23 – Κριτήρια σχεδιασμού της κατασκευής [5.5]

Στο παρακάτω πίνακα (Σχήμα 5.24) παρουσιάζονται οι εντάσεις που αναπτύσσονται στο σημείο μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου καθώς και οι μετατοπίσεις και στροφές του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα.

$M_{z,Ed}$ (kNm)	138.564,00	$M_{z,Ed}$ - Ροπή κάμψης διατομής περί τον άξονα z
$\sigma_{x,Ed}$ (MPa)	146,38	$\sigma_{x,Ed}$ - Ορθές τάσεις σε σημείο διατομής λόγω $M_{z,Ed}$
$V_{y,Ed}$ (kN)	565,200	$V_{y,Ed}$ - Διατμητική δύναμη διατομής
$\tau_{xy,Ed}$ (Mpa)	0,90	$\tau_{xy,Ed}$ - Διατμητική τάση σε σημείο διατομής λόγω $V_{y,Ed}$
N_{Ed} (kN)	7.385,68	N_{Ed} - Θλιπτική δύναμη διατομής
$\sigma_{x,Ed}$ (MPa)	7,50	$\sigma_{x,Ed}$ - Ορθές τάσεις σε σημείο διατομής λόγω N_{Ed}
σ_{Ed} (MPa)	153,88	σ_{Ed} - Ορθές τάσεις σε σημείο διατομής λόγω $M_{z,Ed}$ - $M_{y,Ed}$ - N_{Ed}
τ_{Ed} (Mpa)	0,90	τ_{Ed} - Διατμητική τάση σε σημείο διατομής λόγω $V_{y,Ed}$ - $V_{z,Ed}$
x_2 (m)	0,03983	x_2 - Μετακίνηση σημείου πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα
$x_{2,max}$ (m)	0,10	$x_{2,max}$ - Μέγιστη επιτρεπόμενη μετακίνηση σημείου πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα
L_1 (m)	25,0	L_1 - Μήκος έμπτυξης πασσάλου
x_3 (m)	0,04245	x_3 - Μετακίνηση σημείου πασσάλου 0,5m πάνω από τη στάθμη του πυθμένα
Δx (m)	0,00262	$\Delta x = x_2 - x_3$
Δz (m)	0,50	
θ_1 (rad)	0,00525	θ_1 - Γωνία περιστροφής πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα
θ_1 (°)	0,30054	θ_1 - Γωνία περιστροφής πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα
$\theta_{1,max}$ (°)	0,5	$\theta_{1,max}$ - Μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία περιστροφής πασσάλου
L_2 (m)	14	L_2 - Απόσταση σημείου περιστροφής πασσάλου από τον πυθμένα

Σχήμα 5.24 – Εντατικά μεγέθη και μετακινήσεις πασσάλου

Στο παρακάτω πίνακα (Σχήμα 5.25) παρουσιάζονται οι έλεγχοι εντατικών μεγεθών της διατομής του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση καθώς και οι έλεγχοι μετατοπίσεων και στροφών του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα.

$N_{Ed} / N_{c,Rd}$	0,027	Έλεγχος διατομής σε ομοιόμορφη θλίψη (διατομή υπό καθαρή θλίψη)
$(M_{z,Ed} / M_{el,z,Rd})$	0,5194	Ελαστικός έλεγχος διατομής σε μονοαξονική κάμψη (διατομή υπό καθαρή κάμψη)
$(M_{z,Ed} / M_{el,z,Rd}) + (M_{y,Ed} / M_{el,y,Rd})$	0,5194	Ελαστικός έλεγχος διατομής σε διαξονική κάμψη (διατομή υπό καθαρή κάμψη)
$\tau_{xy,Ed} / (f_y / 3^{0,5} \gamma_{M0})$	0,01	Ελαστικός έλεγχος διατμητικών τάσεων (διατομή υπό καθαρή διάτμηση)
$(N_{Ed} / N_{c,Rd}) + (M_{z,Ed} / M_{el,z,Rd}) + (M_{y,Ed} / M_{el,y,Rd})$	0,546025	Ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη και διαξονική κάμψη
σ_{VM} (Mpa)	153,89	Σύνθετος έλεγχος κατά Von-Mises – Ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη, διαξονική κάμψη και διαξονική διάτμηση
$\sigma_{VM} / (f_y / \gamma_{M0})$	0,546054	Σύνθετος έλεγχος κατά Von-Mises – Ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη, διαξονική κάμψη και διαξονική διάτμηση
$x_2 / x_{2,max}$	0,40	Έλεγχος μετακίνησης πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα
$\theta_1 / \theta_{1,max}$	0,60	Έλεγχος περιστροφής του πασσάλου
$\sigma_{VM} / (f_y / \gamma_{M0})$ (%)	54,61	Σύνθετος έλεγχος κατά Von-Mises – Ελ. έλεγχος διατομής υπό θλίψη, διαξονική κάμψη και διαξονική διάτμηση
$x_2 / x_{2,max}$ (%)	39,83	Έλεγχος μετακίνησης πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα
$\theta_1 / \theta_{1,max}$ (%)	60,11	Έλεγχος περιστροφής του πασσάλου

Σχήμα 5.25 – Έλεγχοι εντατικών μεγεθών και μετακινήσεων πασσάλου

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα ο πιο κρίσιμος έλεγχος είναι ο περιορισμός που υπάρχει στη περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα, αφού εκπληρώνεται κατά 60%. Στη συνέχεια ακολουθεί ο περιορισμός στην αναπτυσσόμενη ένταση του πασσάλου (εκπληρώνεται κατά 55%) και τέλος ο περιορισμός στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα που εκπληρώνεται κατά 40%.

Στο παρακάτω πίνακα (Σχήμα 5.26) παρουσιάζονται οι εντάσεις που αναπτύσσονται στο σημείο μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πύργου της ανεμογεννήτριας, δηλαδή στη διατομή της βάσης του πύργου καθώς και οι μετατοπίσεις στη βάση και στη κορυφή του πύργου.

$M_{z,Ed}$ (kNm)	84.161,5	$M_{z,Ed}$ - Ροπή κάμψης διατομής περί τον άξονα z
$\sigma_{x,Ed}$ (MPa)	108,20	$\sigma_{x,Ed}$ - Ορθές τάσεις σε σημείο διατομής λόγω $M_{z,Ed}$
$V_{y,Ed}$ (kN)	1.017,24	$V_{y,Ed}$ - Διατμητική δύναμη διατομής
$\tau_{xy,Ed}$ (Mpa)	1,99	$\tau_{xy,Ed}$ - Διατμητική τάση σε σημείο διατομής λόγω $V_{y,Ed}$
$\tau_{xz,Ed}$ (Mpa)	0,00	$\tau_{xz,Ed}$ - Διατμητική τάση σε σημείο διατομής λόγω $V_{z,Ed}$
N_{Ed} (kN)	4.352,67	N_{Ed} - Θλιπτική δύναμη διατομής
$\sigma_{x,Ed}$ (MPa)	5,42	$\sigma_{x,Ed}$ - Ορθές τάσεις σε σημείο διατομής λόγω N_{Ed}
σ_{Ed} (MPa)	113,61	σ_{Ed} - Ορθές τάσεις σε σημείο διατομής λόγω $M_{z,Ed}$ - $M_{y,Ed}$ - N_{Ed}
τ_{Ed} (Mpa)	1,99	τ_{Ed} - Διατμητική τάση σε σημείο διατομής λόγω $V_{y,Ed}$ - $V_{z,Ed}$
x_1 (m)	0,397023	x - Μετακίνηση στη βάση του πύργου - κορυφή πασσάλου
x_2 (m)	2,83021	x - Μετακίνηση στη κορυφή του πύργου

Σχήμα 5.26 – Εντατικά μεγέθη και μετακινήσεις του πύργου

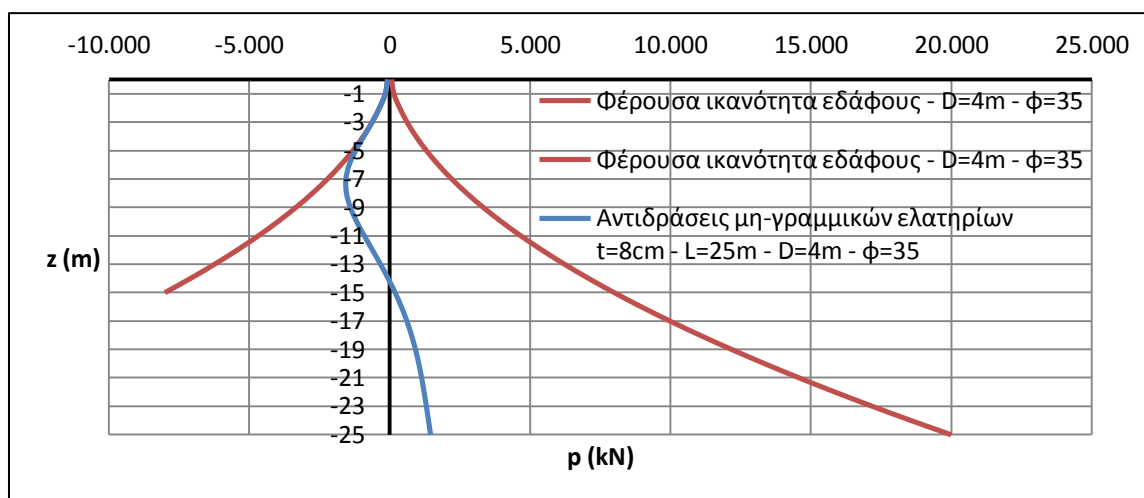
Στο παρακάτω πίνακα (Σχήμα 5.27) παρουσιάζονται οι έλεγχοι εντατικών μεγεθών της διατομής του πύργου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση (βάση πύργου).

$N_{Ed} / N_{c,Rd}$	0,019	Έλεγχος διατομής σε ομοιόμορφη θλίψη (διατομή υπό καθαρή θλίψη)
$(M_{z,Ed} / M_{el,z,Rd})$	0,3719	Ελαστικός έλεγχος διατομής σε μονοαξονική κάμψη (διατομή υπό καθαρή κάμψη)
$(M_{z,Ed} / M_{el,z,Rd}) + (M_{y,Ed} / M_{el,y,Rd})$	0,3719	Ελαστικός έλεγχος διατομής σε διαξονική κάμψη (διατομή υπό καθαρή κάμψη)
$\tau_{xy,Ed} / (f_y / 3^{0.5} \gamma_{M0})$	0,01	Ελαστικός έλεγχος διατμητικών τάσεων (διατομή υπό καθαρή διάτμηση)
$(N_{Ed} / N_{c,Rd}) + (M_{z,Ed} / M_{el,z,Rd}) + (M_{y,Ed} / M_{el,y,Rd})$	0,390550	Ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη και διαξονική κάμψη
σ_{VM} (Mpa)	113,67	Σύνθετος έλεγχος κατά Von-Misses – Ελ. έλεγχος διατομής υπό θλίψη, διαξονική κάμψη και διαξονική διάτμηση
$\sigma_{VM} / (f_y / \gamma_{M0})$	0,39	Σύνθετος έλεγχος κατά Von-Misses – Ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη, διαξονική κάμψη και διαξονική διάτμηση
$\sigma_{VM} / (f_y / \gamma_{M0})$ (%)	39,07	Σύνθετος έλεγχος κατά Von-Misses – Ελ. έλεγχος διατομής υπό θλίψη, διαξονική κάμψη και διαξονική διάτμηση

Σχήμα 5.27 – Έλεγχοι εντατικών μεγεθών πύργου

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα ο έλεγχος που αφορά τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων στο πύργο της ανεμογεννήτριας εκπληρώνεται κατά 39%.

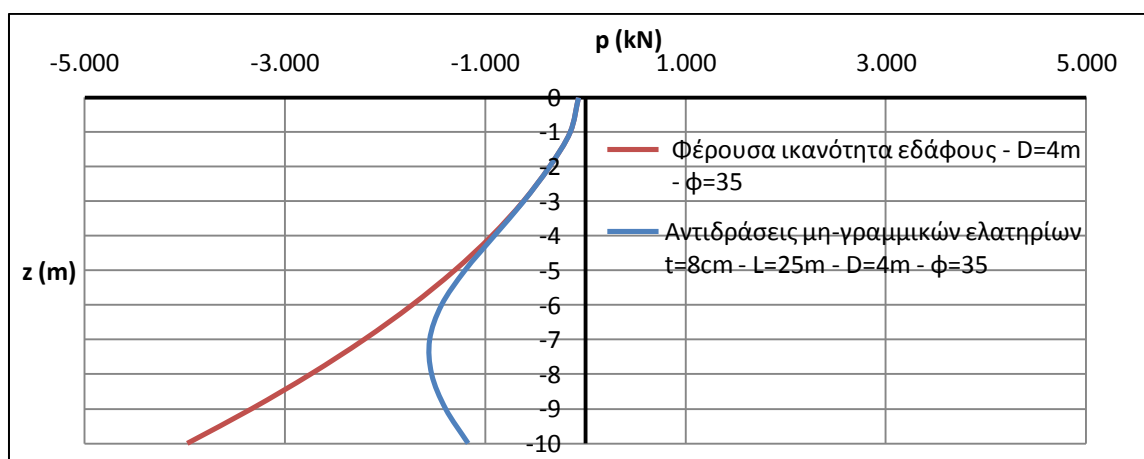
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.28) απεικονίζεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους καθώς και οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του εδάφους του πυθμένα μέσα στον οποίο θεμελιώνεται η θαλάσσια ανεμογεννήτρια (Στο υψόμετρο $z=0m$ βρίσκεται ο πυθμένας της θάλασσας).



Σχήμα 5.28 – Φέρουσα ικανότητα εδάφους και αντιδράσεις μη-γραμμικών ελατηρίων

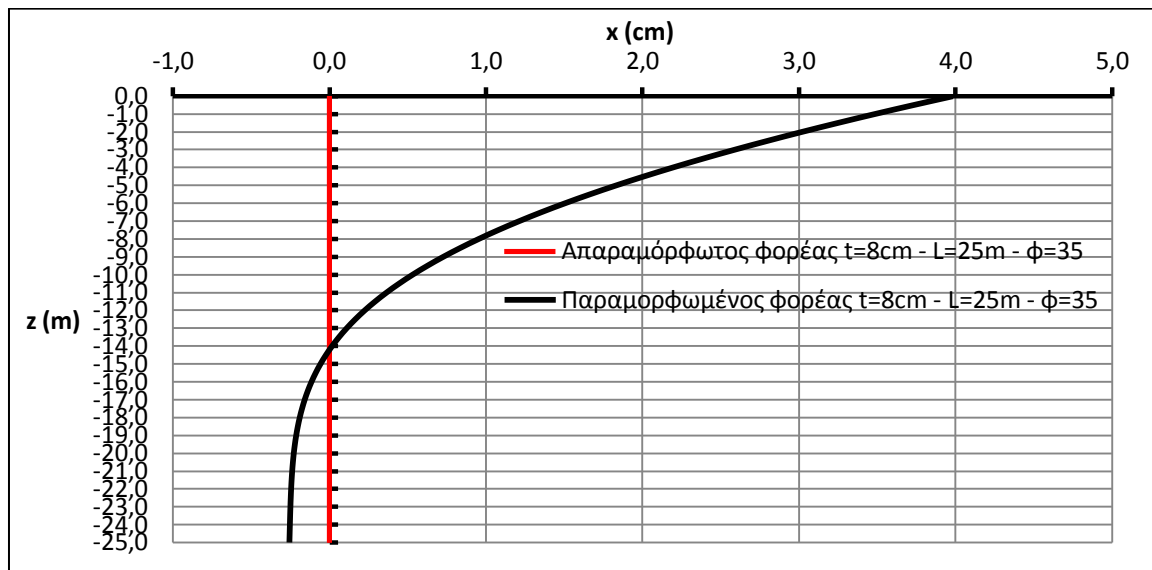
Από το Σχήμα 5.28 και από το Σχήμα 5.29 προκύπτει πως στα πρώτα 4m θεμελίωσης του πασσάλου εξαντλείται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους μιας και οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων ταυτίζονται με την καμπύλη που αντιπροσωπεύει τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται σε αυτή τη περιοχή (πρώτα 4m θεμελίωσης) μια πλαστική ζώνη μέσα στο έδαφος. Παρατηρούμε επίσης πως στο βάθος $z=-14\text{m}$ κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, η αντίδραση του ελατηρίου είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει λόγω της μηδενικής μετατόπισης του πασσάλου σε αυτό το σημείο από την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση. Μπορούμε δηλαδή να συμπεράνουμε πως 14m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας είναι το σημείο περιστροφής του πασσάλου μέσα στο έδαφος. Τέλος γίνεται αντιληπτό πως στο μέγιστο βάθος θεμελιώσεως του πασσάλου οι αντιδράσεις των ελατηρίων δεν είναι μηδενικές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην "σβήνει" η τέμνουσα δύναμη του πασσάλου στο μέγιστο βάθος έμπληξης, πράγμα που σημαίνει ότι τα 25m μήκος θεμελιώσεως δεν επαρκούν και πρέπει αυτό το μήκος να αυξηθεί.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.29) απεικονίζεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους καθώς και οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων στα δέκα πρώτα μέτρα θεμελίωσης του πασσάλου.



Σχήμα 5.29 – Φέρουσα ικανότητα εδάφους και αντιδράσεις μη-γραμμικών ελατηρίων

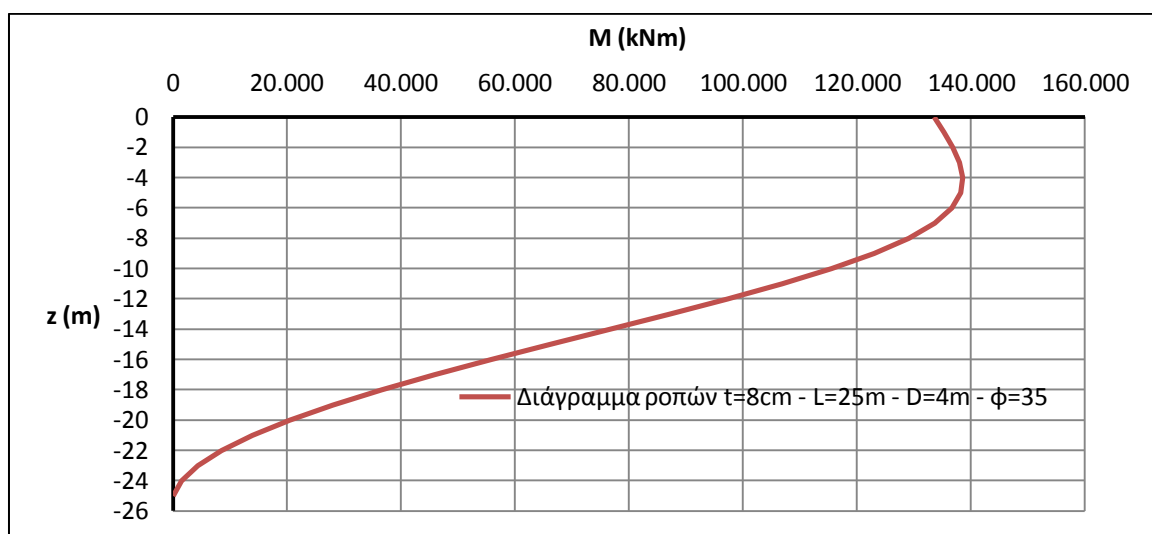
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.30) απεικονίζεται η παραμόρφωση του φορέα από το υψόμετρο του πυθμένα της θάλασσας ($z=0,0\text{m}$) μέχρι το υψόμετρο του μέγιστου βάθους της θεμελίωσης του πασσάλου ($z=-25,0\text{m}$).



Σχήμα 5.30 – Παραμόρφωση πασσάλου

Η μετατόπιση του πασσάλου στο ύψος του πυθμένα της θάλασσας είναι 3,98cm. Πιστοποιείται επίσης, όπως αναφέρθηκε και σε παραπάνω παράγραφο, ότι το σημείο περιστροφής του πασσάλου μέσα στο έδαφος είναι τα 14m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Η μετατόπιση του πασσάλου στο μέγιστο βάθος της θεμελίωσης του ($z=-25\text{m}$) είναι 0,26cm. Όπως είναι προφανές, οι μετατοπίσεις του πασσάλου δεν έχουν "σβήσει" στα τελευταία μέτρα της θεμελίωσης πράγμα που σημαίνει ότι το βάθος της θεμελίωσης του πασσάλου δεν είναι επαρκές και πρέπει να αυξηθεί.

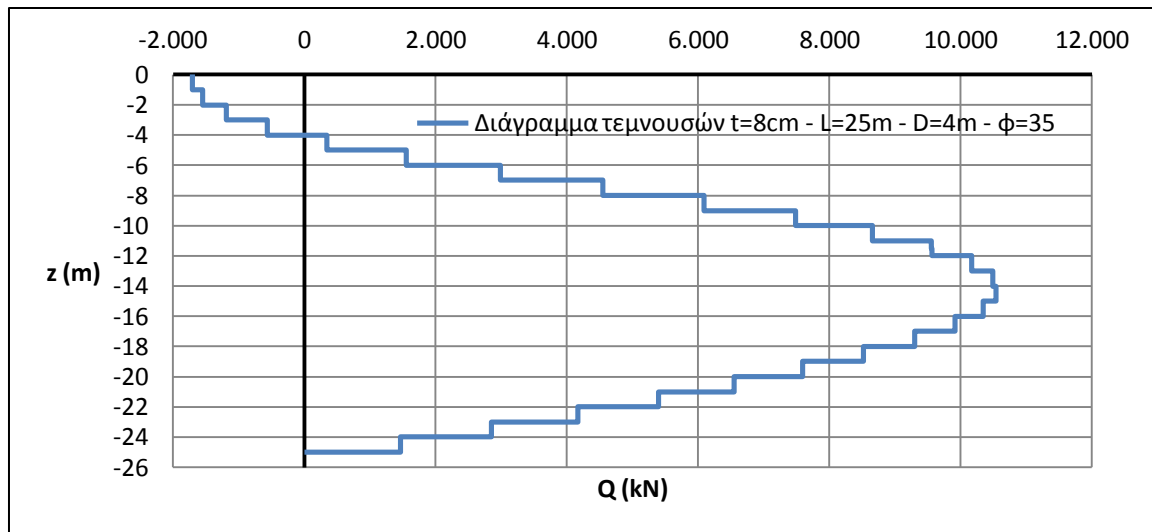
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.31) απεικονίζεται το διάγραμμα ροπών του πασσάλου από το υψόμετρο του πυθμένα της θάλασσας ($z=0,0\text{m}$) μέχρι το υψόμετρο του μέγιστου βάθους της θεμελίωσης του πασσάλου ($z=-25,0\text{m}$).



Σχήμα 5.31 – Ροπή κατά μήκος του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως 4m κάτω από τον πυθμένα τις θάλασσας ($z=-4,0\text{m}$) αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή κατά μήκος του πασσάλου. Γίνεται αντιληπτό πως στα τελευταία μέτρα θεμελίωσης του πασσάλου οι ροπή που ασκείται "σβήνει" απότομα. Αυτό σημαίνει πως το βάθος θεμελίωσης του πασσάλου είναι ανεπαρκές και πρέπει να αυξηθεί.

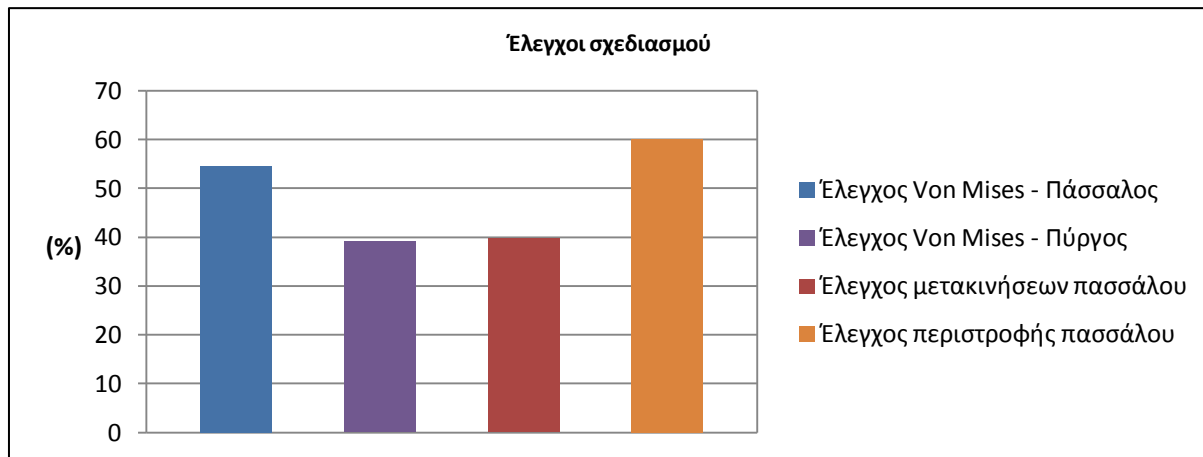
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.32) απεικονίζεται το διάγραμμα τεμνουσών του πασσάλου από το υψόμετρο του πυθμένα της θάλασσας ($z=0,0\text{m}$) μέχρι το υψόμετρο του μέγιστου βάθους της θεμελίωσης του πασσάλου ($z=-25,0\text{m}$).



Σχήμα 5.32 – Τέμνουσα κατά μήκος του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως 15m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας ($z=-15,0\text{m}$) αναπτύσσεται η μέγιστη τέμνουσα κατά μήκος του πασσάλου. Το πλάτος του "πηδήματος" του διαγράμματος των τεμνουσών που γίνεται ανά ένα μέτρο ισούται με την αντίδραση του μη-γραμμικού ελατηρίου που υπάρχει στο αντίστοιχο υψόμετρο. Όπως είναι προφανές 14m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας του πλάτος του "πηδήματος" είναι ουσιαστικά μηδενικό που σημαίνει ότι η αντίδραση του ελατηρίου σε αυτό το υψόμετρο είναι μηδενική. Σαν αποτέλεσμα και η μετακίνηση του πασσάλου σε αυτό το σημείο είναι μηδενική. Επαληθεύεται λοιπόν, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πως 14m κάτω από το πυθμένα είναι το σημείο περιστροφής του πασσάλου. Τέλος γίνεται αντιληπτό πως στο μέγιστο βάθος θεμελίωσης του πασσάλου η τέμνουσα του πασσάλου δεν είναι μηδενική. Το ότι δεν απομεινώνεται σημαντικά (δεν "σβήνει") η τέμνουσα στα τελευταία μέτρα της θεμελίωσης του πασσάλου σημαίνει ότι τα 25m μήκος θεμελίωσης δεν επαρκούν και πρέπει αυτό το μήκος να αυξηθεί.

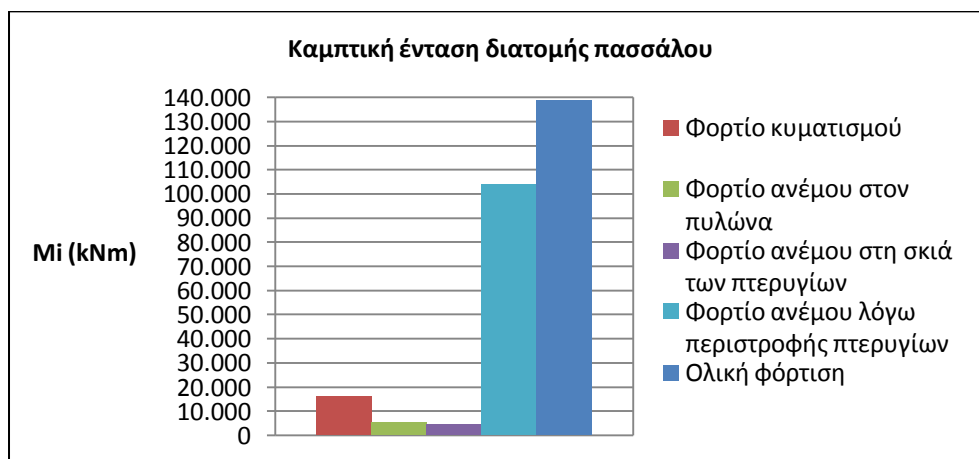
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.33) παρουσιάζεται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας, ο έλεγχος μέγιστης μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα και ο έλεγχος μέγιστης περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα.



Σχήμα 5.33 – Έλεγχοι σχεδιασμού πασσάλου και πύργου

Σε ότι αφορά τον πάσσαλο, ο πιο κρίσιμος έλεγχος είναι ο περιορισμός που υπάρχει στη περιστροφή του στη στάθμη του πυθμένα ο οποίος εκπληρώνεται κατά 60%. Στη συνέχεια ακολουθεί ο περιορισμός στην αναπτυσσόμενη ένταση του πασσάλου (εκπληρώνεται κατά 55%) και τέλος ο περιορισμός στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα που εκπληρώνεται κατά 40%. Στη περίπτωση του πύργου ο έλεγχος της φέρουσας ικανότητας του εκπληρώνεται κατά 39%.

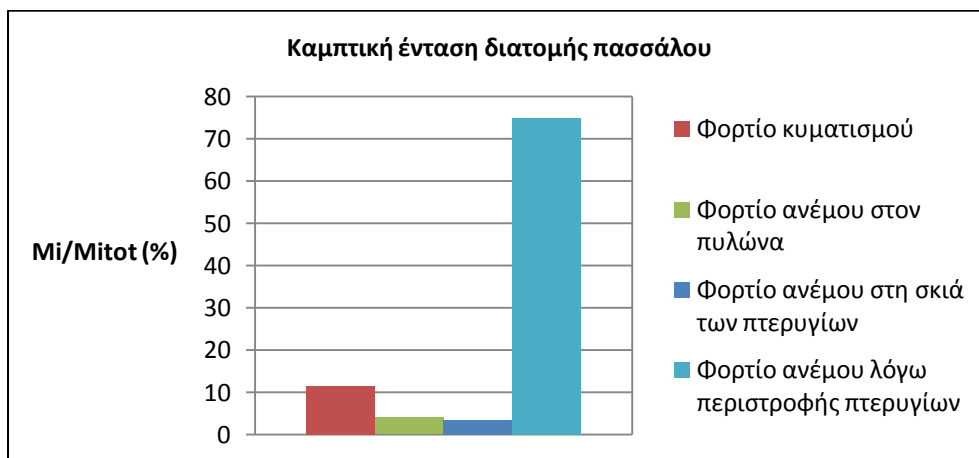
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.34) παρουσιάζεται η καμπτική ένταση της διατομής του πασσάλου που παρουσιάζεται η μέγιστη καταπόνηση, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση του πασσάλου.



Σχήμα 5.34 – Καμπτική ένταση διατομής πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η συμβολή του φορτίου του κυματισμού στη καμπτική καταπόνηση του πασσάλου είναι 15.896kNm, του φορτίου του ανέμου κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι 5.516kNm και του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων είναι 4.725kNm. Τη μεγαλύτερη συμβολή στη κάμψη του πασσάλου έχει το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων με 103.847kNm το οποίο κυριαρχεί στη καταπόνηση του πασσάλου. Στη ταυτόχρονη επιβολή όλων των φορτίων η καμπτική ένταση του πασσάλου είναι 138.564kNm.

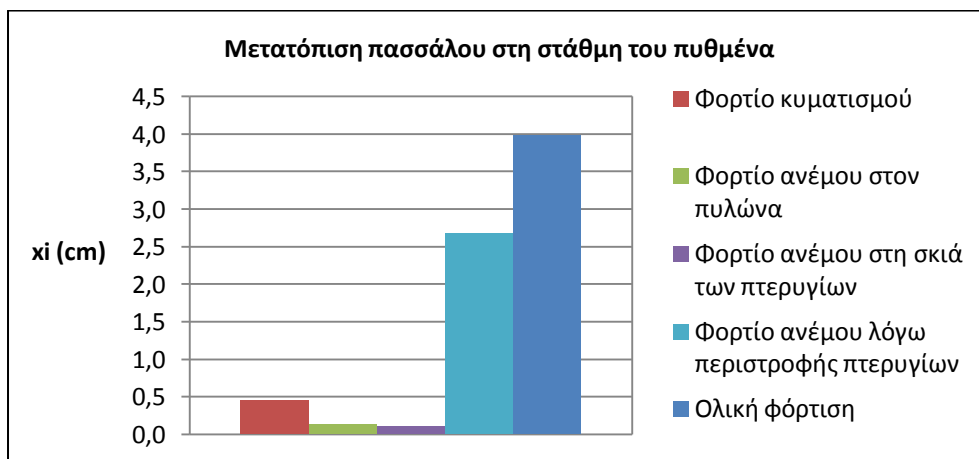
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.35) παρουσιάζεται το ποσοστό της καμπτικής έντασης της διατομής του πασσάλου, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά.



Σχήμα 5.35 – Ποσοστά καμπτικής έντασης διατομής πασσάλου

Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 11,0% της συνολικής καμπτικής καταπόνησης του πασσάλου ενώ το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 4% της συνολικής φόρτισης. Το φορτίο του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 3% της συνολικής καμπτικής φόρτισης. Το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων αποτελεί το 75% της συνολικής φόρτισης.

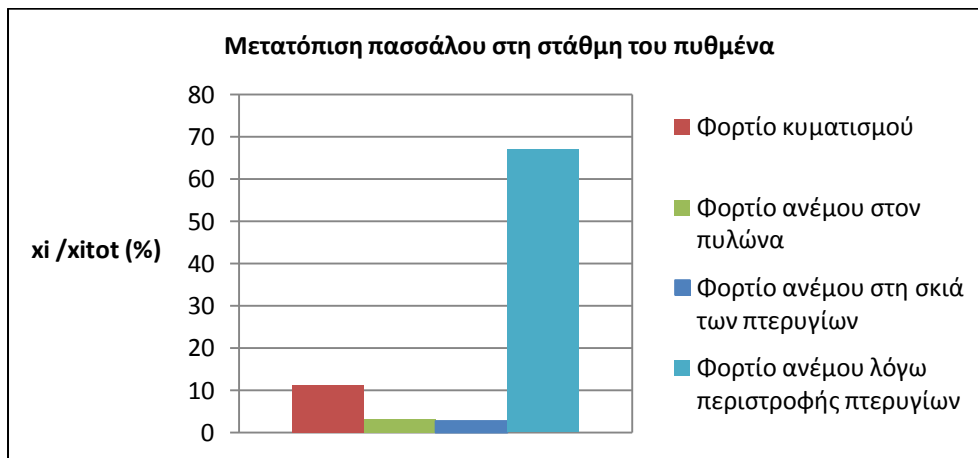
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.36) παρουσιάζεται η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση.



Σχήμα 5.36 – Μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η συμβολή του φορτίου του κυματισμού στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι 0,5cm. Το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πυλώνα και στη σκιά των πτερυγίων συνεισφέρουν το ίδιο στη μετατόπιση της βάσης με 0,1cm. Τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση του πασσάλου έχει το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων με 2,7cm. Στη ταυτόχρονη επιβολή όλων των φορτίων η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι 4,0cm.

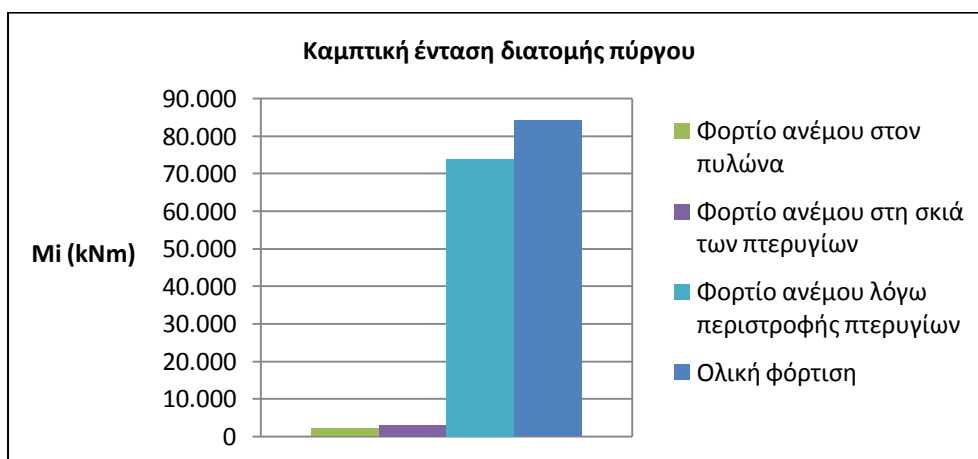
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.37) παρουσιάζεται το ποσοστό της μετατόπισης του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά.



Σχήμα 5.37 – Ποσοστά μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα

Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 11% της συνολικής μετατόπισης του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα ενώ το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας και στη σκιά των πτερυγίων συμβάλουν το ίδιο με ποσοστό 3%. Το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων αποτελεί το 67% της συνολικής μετατόπισης.

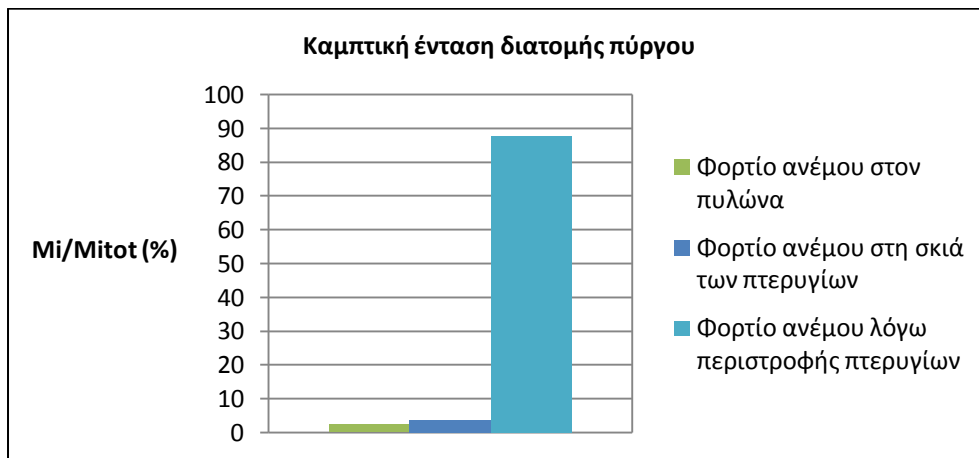
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.38) παρουσιάζεται η καμπτική ένταση της διατομής της βάσης του πύργου, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση.



Σχήμα 5.38 – Καμπτική ένταση διατομής πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η καμπτική ένταση που ασκεί το αεροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι 2.032kNm ενώ το αεροδυναμικό φορτίο στη σκιά των πτερυγίων ασκεί 3.132kNm. Τη μεγαλύτερη συμβολή στη κάμψη της βάσης του πύργου έχει το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων με 73.869kNm το οποίο κυριαρχεί στη καταπόνηση του πύργου. Στη ταυτόχρονη επιβολή όλων των φορτίων η καμπτική ένταση της βάσης του πύργου είναι 84.161kNm.

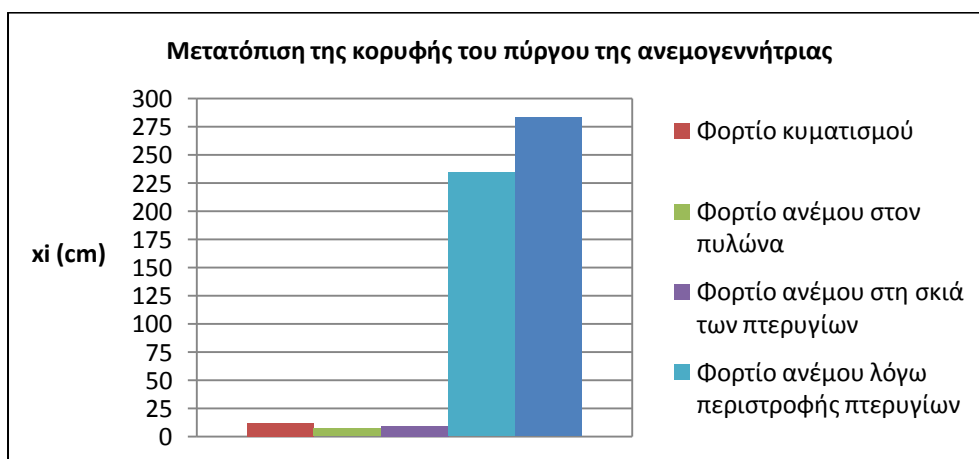
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.39) παρουσιάζεται το ποσοστό της καμπτικής έντασης της διατομής της βάσης του πύργου, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά.



Σχήμα 5.39 – Ποσοστά καμπτικής έντασης διατομής πύργου

Το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πυλώνα αποτελεί το 2,4% της συνολικής καμπτικής καταπόνησης της βάσης του πύργου ενώ το φορτίο του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων αποτελεί το 3,7% της συνολικής φόρτισης. Το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων αποτελεί το 87,8% της συνολικής φόρτισης.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.40) παρουσιάζεται η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση της κατασκευής.



Σχήμα 5.40 – Μετατόπιση της κορυφής του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως τη μικρότερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής του πύργου έχει το φορτίο του ανέμου στον πυλώνα και το φορτίο του ανέμου σκιά των πτερυγίων με 6,9cm και 9,2cm αντίστοιχα. Μεγαλύτερη μετατόπιση στη κορυφή του πύργου προκαλεί το φορτίο του κυματισμού (12cm). Τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας έχει το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων με 235cm. Στη ταυτόχρονη επιβολή όλων των φορτίων η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι 283cm.

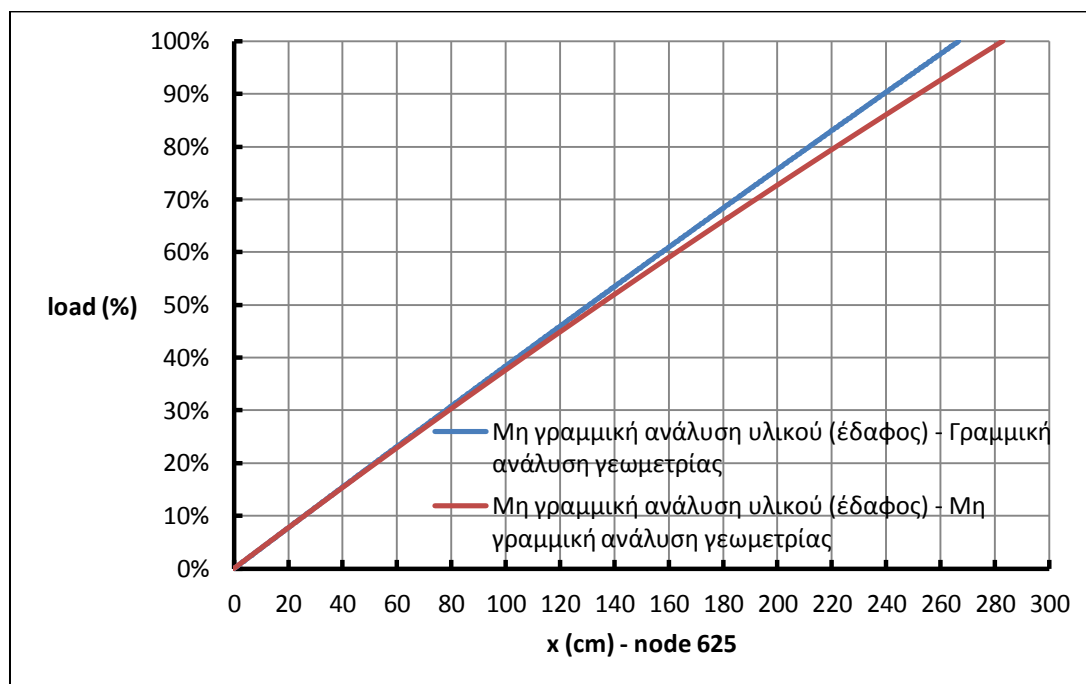
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.41) παρουσιάζεται το ποσοστό της μετατόπισης της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά.



Σχήμα 5.41 – Ποσοστά μετακίνησης της κορυφής του πύργου

Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 4,6% της συνολικής μετατόπισης της κορυφής του πύργου ενώ το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 2,6% της συνολικής μετατόπισης και το φορτίο του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων το 3,5 της συνολικής φόρτισης. Το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων αποτελεί το 89,3% της συνολικής μετατόπισης της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.42) απεικονίζεται η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας στη περίπτωση που πραγματοποιηθεί γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση γεωμετρίας του φορέα. Και στις δύο περιπτώσεις το έδαφος προσομοιώνεται με μη-γραμμικά ελατήρια (μη-γραμμική ανάλυση υλικού).



Σχήμα 5.42 – Μετατόπιση της κορυφής του πασσάλου

Όπως είναι προφανές η μετατόπιση της κορυφής διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της ανάλυσης που πραγματοποιείται. Λόγω των μεγάλων μετατοπίσεων του φορέα, η συμπεριφορά της κατασκευής είναι μη-γραμμική πράγμα που σημαίνει ότι για την ορθότερη εξαγωγή αποτελεσμάτων σε όλες της αναλύσεις που θα ακολουθήσουν επιλέγεται η μη-γραμμική ανάλυση γεωμετρίας της κατασκευής.

5.2 Παραμετρικές στατικές επιλύσεις

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των παραμετρικών στατικών αναλύσεων που έγιναν για να διαπιστωθεί η επιρροή των διάφορων παραμέτρων στην συμπεριφορά της κατασκευής. Συγκεκριμένα οι παράμετροι που μεταβάλλονται είναι οι εξής:

- Το μήκος θεμελιώσεως του πασσάλου
- Η διάμετρος του πασσάλου
- Το πάχος των τοιχωμάτων του πασσάλου
- Ο τρόπος προσομοίωσης του εδάφους
- Η φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελιώσεως
- Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας

Τα κριτήρια σχεδιασμού όπως έχουν αναφερθεί και σε παραπάνω κεφάλαιο είναι:

1. Έλεγχος φέρουσας ικανότητας πασσάλου
2. Μέγιστη μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα: 0,10m
3. Μέγιστη περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα: 0,5°

5.2.1 Μεταβολή του μήκους θεμελιώσεως του πασσάλου

Το μήκος θεμελίωσης του πασσάλου παίρνει τις εξής τιμές:

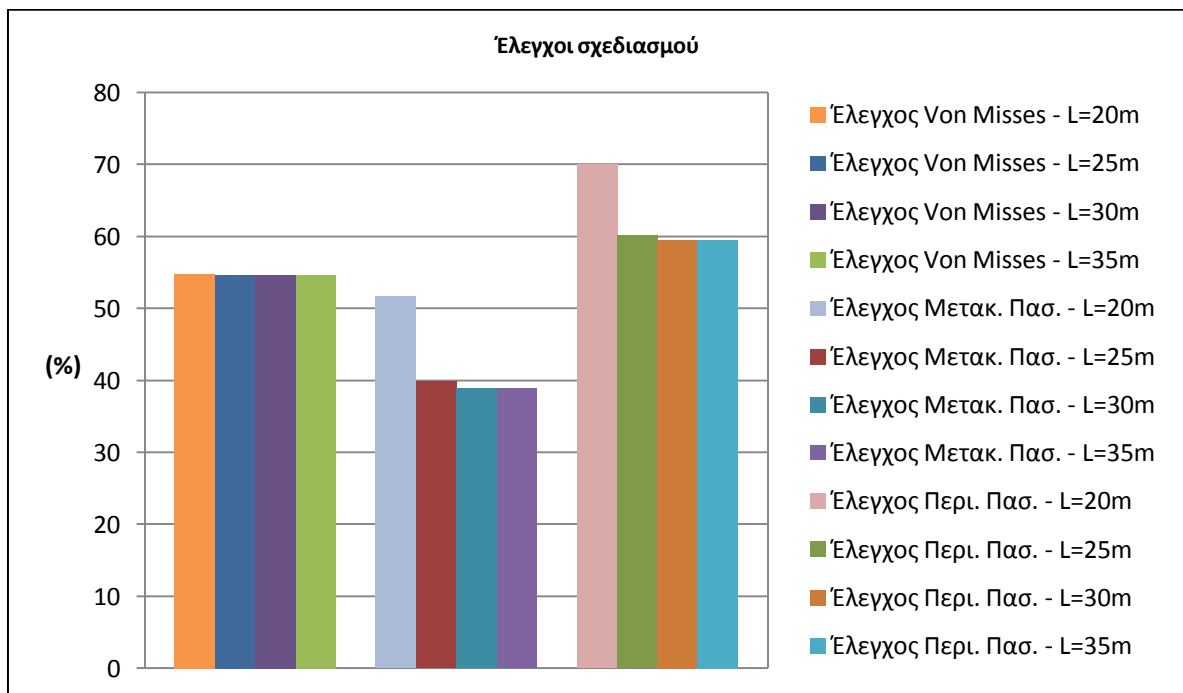
1. $L=20,0\text{m}$
2. $L=25,0\text{m}$
3. $L=30,0\text{m}$
4. $L=35,0\text{m}$

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

1. Διάμετρος πασσάλου $D=4,0\text{m}$
2. Πάχος τοιχωμάτων πασσάλου $t=0,08\text{m}$
3. Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

4. Το έδαφος προσομοιώνεται με μη-γραμμικά ελατήρια
5. Εσωτερική γωνία τριβής $\phi=35^\circ$

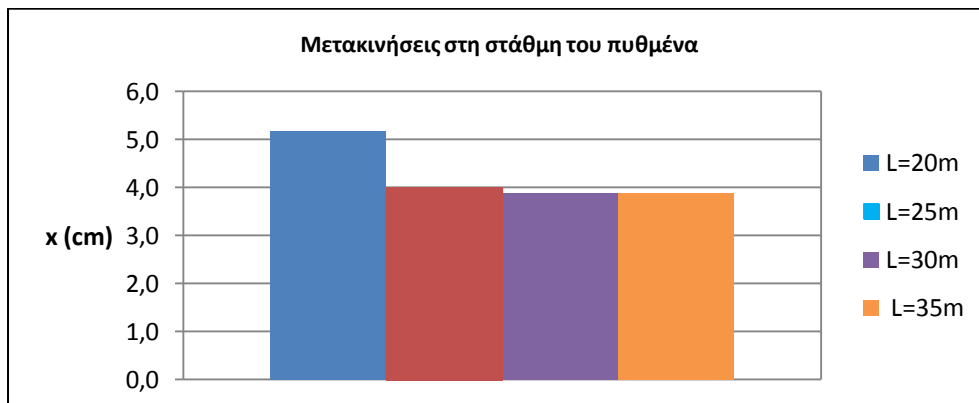
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου, ο έλεγχος μέγιστης μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα και ο έλεγχος μέγιστης περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα για τις διάφορες τιμές του μήκους θεμελιώσεως του πασσάλου. Προβάλλονται επίσης οι μετακινήσεις τις κατασκευής στη στάθμη του πυθμένα, στη βάση και στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς μεταβάλλεται το μήκος έμπηξης του πασσάλου. Επίσης παρουσιάζονται οι αντιδράσεις των ελατηρίων και τα διαγράμματα ροπών και τεμνουσών κατά μήκος του πασσάλου για τις διάφορες τιμές του μήκους θεμελιώσεως του πασσάλου. Τέλος προβάλλονται για τα μήκη θεμελιώσεως των 25m και των 35m τα ποσοστά συμβολής της κάθε φόρτισης ξεχωριστά, στα εντατικά μεγέθη και τις μετατοπίσεις του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 5.43 – Έλεγχοι σχεδιασμού πασσάλου

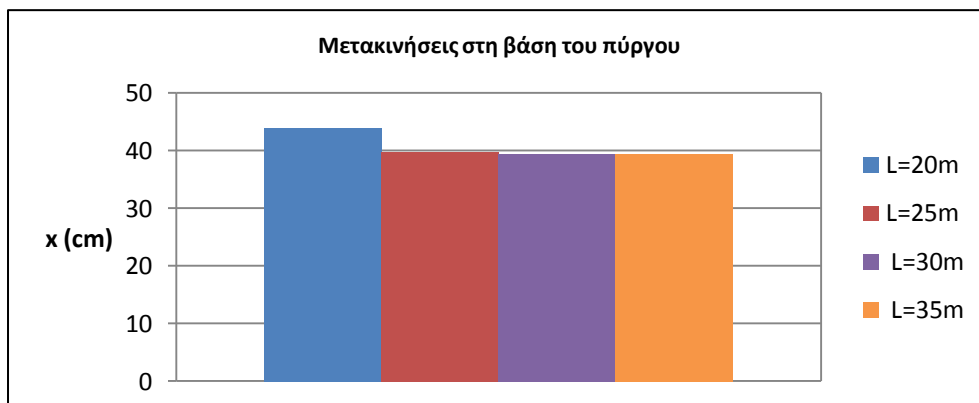
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.43) προκύπτει πως η μέγιστη καταπόνηση του πασσάλου μεταβάλλεται ελάχιστα καθώς αλλάζει το μήκος έμπηξης του πασσάλου από τα 20m στα 35m και συνεπώς δεν μεταβάλλεται η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου. Συγκεκριμένα και για τις τέσσερις περιπτώσεις βάθων έμπηξης η καταπόνηση του πασσάλου είναι περίπου στο 55% της αντοχής του. Η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται σημαντικά από το 52% στο 40% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς αυξάνει το μήκος θεμελίωσης από τα 20m στα 25m, ενώ παραμένει σταθερή στο 39% για βάθη έμπηξης μεγαλύτερα των 25m. Τέλος η περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται σημαντικά από το 70% στο 60% της μέγιστης

επιτρεπόμενη καθώς αυξάνεται το μήκος θεμελίωσης του πασσάλου από τα 20m στα 25m ενώ παραμένει σταθερή στο 59% για μεγαλύτερα βάθη.



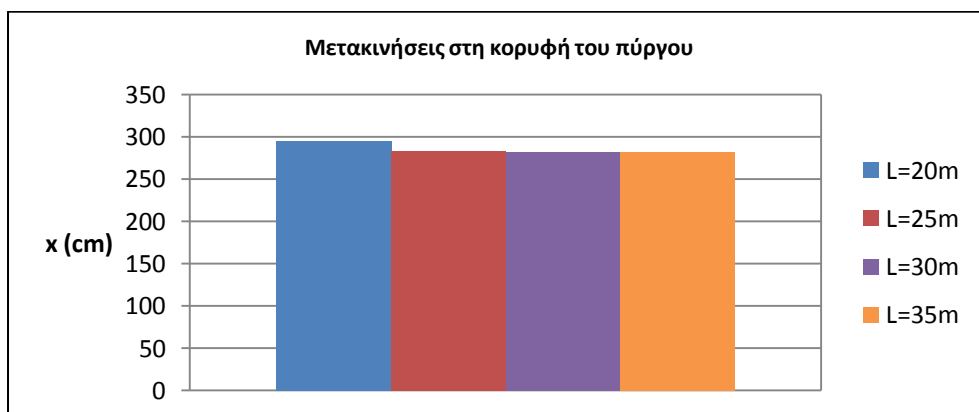
Σχήμα 5.44 – Μετακινήσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.44) είναι προφανές πως η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται από τα 5,2cm στα 4,0cm καθώς το μήκος θεμελίωσης αυξάνεται από τα 20m στα 25m ενώ παραμένει σχεδόν σταθερή στα 3,9cm για μήκη έμπηξης μεγαλύτερα των 25m.



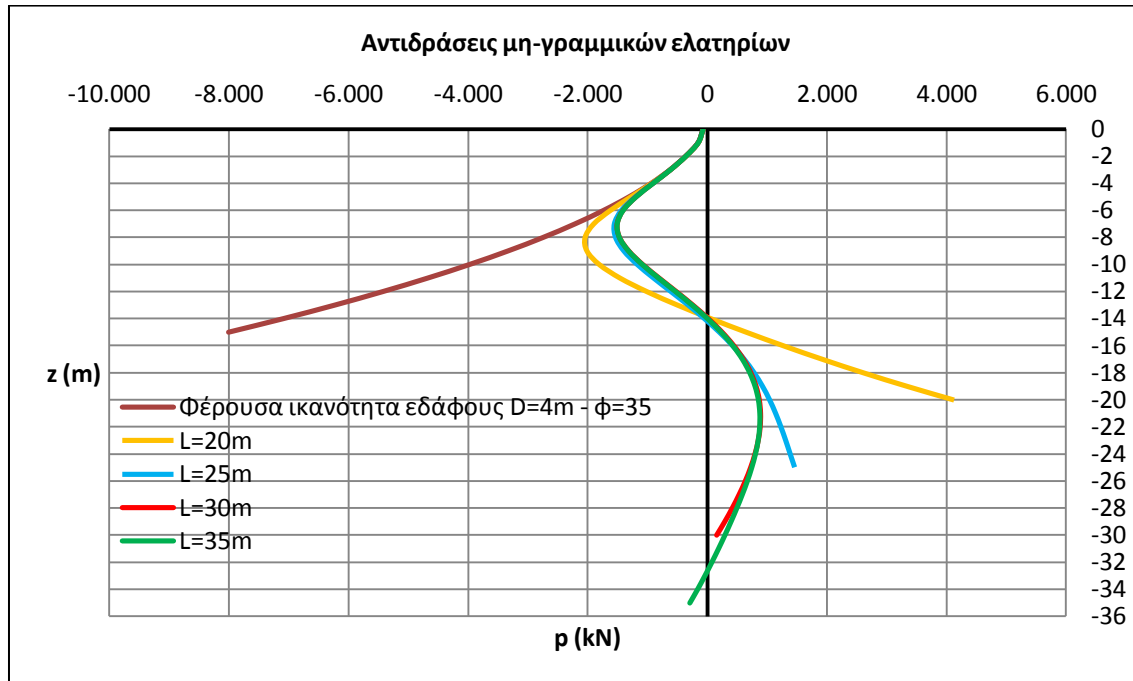
Σχήμα 5.45 – Μετακινήσεις στη βάση του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.45) προκύπτει πως η μετατόπιση της βάσης του πύργου μειώνεται από τα 44cm στα 40cm καθώς το μήκος θεμελίωσης αυξάνεται από τα 20m στα 25m ενώ παραμένει σταθερή στα 39cm για μήκη έμπηξης μεγαλύτερα των 25m.



Σχήμα 5.46 – Μετακινήσεις στη κορυφή του πύργου

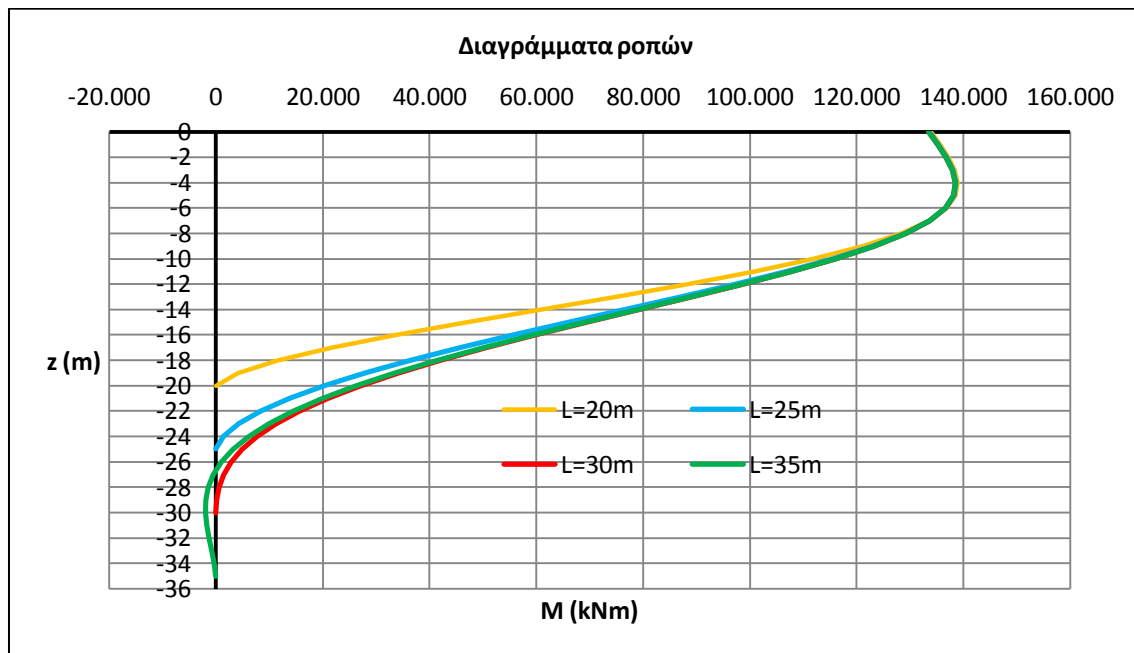
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.46) προκύπτει πως η μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής μειώνεται ελαφρώς από τα 2,95m στα 2,83m καθώς αυξάνεται το μήκος έμπηξης του πασσάλου από τα 20m στα 25m ενώ παραμένει σταθερή στα 2,82m για μήκη έμπηξης πασσάλου μεγαλύτερα των 25m.



Σχήμα 5.47 – Αντιδράσεις μη-γραμμικών ελατηρίων

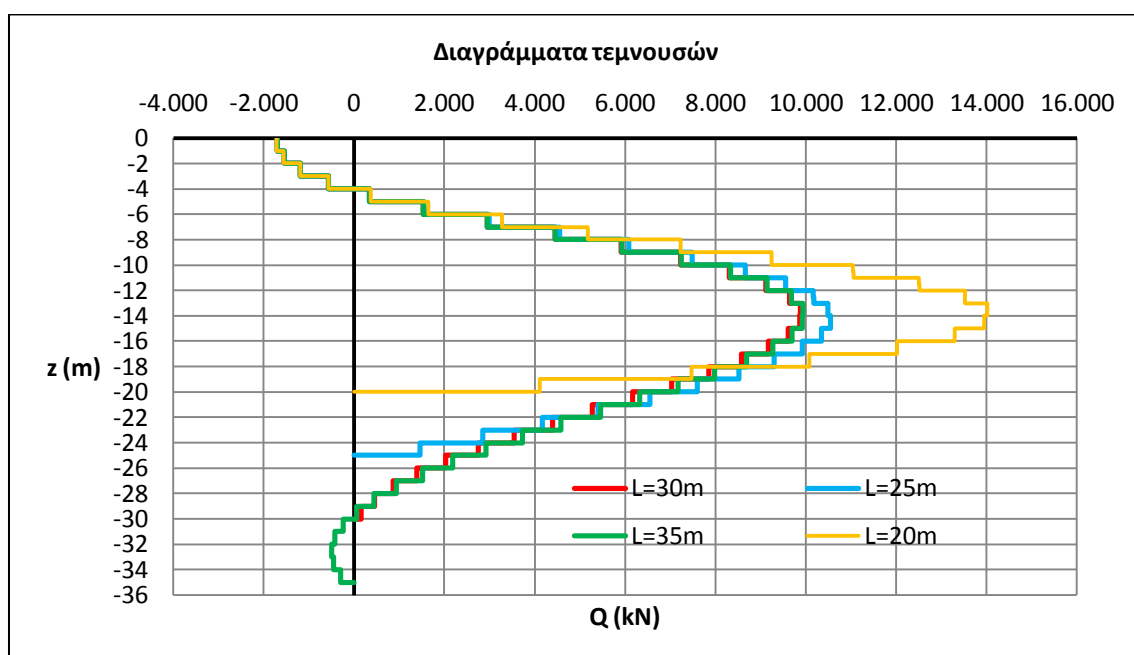
Από το Σχήμα 5.47 προκύπτει πως στα πρώτα μέτρα της θεμελίωσης του πασσάλου εξαντλείται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους για όλα τα μήκη έμπηξης, μιας και οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων ταυτίζονται με την καμπύλη που αντιπροσωπεύει τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται σε αυτή τη περιοχή μια πλαστική ζώνη μέσα στο έδαφος. Παρατηρούμε επίσης πως για όλα τα μήκη έμπηξης του πασσάλου, στο βάθος $z=-14\text{m}$ κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, η αντίδραση των ελατηρίων είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει λόγω της μηδενικής μετατόπισης του πασσάλου σε αυτό το σημείο από την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση. Μπορούμε δηλαδή να συμπεράνουμε πως 14m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας είναι το σημείο περιστροφής του πασσάλου μέσα στο έδαφος και για τα τέσσερα μήκη έμπηξης του πασσάλου. Για την περίπτωση όπου το μήκος θεμελίωσης του πασσάλου είναι 35m βλέπουμε πως υπάρχει και δεύτερο σημείο κατά μήκος του πασσάλου με μηδενική μετατόπιση στο υψόμετρο $z=-33,0\text{m}$. Αυτό συμβαίνει διότι στα μεγαλύτερα βάθη το έδαφος γίνεται ακόμη πιο δύσκαμπτο και περιορίζει πολύ την μετατόπιση του πασσάλου επιβάλλοντας ουσιαστικά συνθήκες πάκτωσης στη περιοχή αυτή. Τέλος γίνεται αντιληπτό πως όσο μικρότερο είναι το μήκος έμπηξης του πασσάλου τόσο μεγαλύτερες είναι οι αντιδράσεις των ελατηρίων στα μέγιστα βάθη θεμελιώσεως. Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως το μήκος έμπηξης του πασσάλου θα πρέπει να είναι μεταξύ 30m και 35m για τα οποία οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων στην

αιχμή του πασσάλου είναι πολύ μικρές με αποτέλεσμα και τα εντατικά του μεγέθη σε αυτό το σημείο ελαχιστοποιούνται.



Σχήμα 5.48 – Διαγράμματα ροπών κατά μήκος του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.48) προκύπτει πως για μήκη έμπηξης από 20m έως 35m η διαφορά στη μέγιστη ροπή που αναπτύσσεται, σε κάθε περίπτωση, κατά μήκος του πασσάλου είναι ελάχιστη. Διαπιστώνουμε ότι όσο πιο μικρό είναι το μήκος έμπηξης του πασσάλου, τόσο πιο απότομο είναι το "σβήσιμο" των ροπών στο μέγιστο βάθος έμπηξης. Συμπερασματική μπορούμε να πούμε πως ένα ιδανικό μήκος θεμελίωσης πασσάλου είναι μεταξύ 30m και 35m αφού σε αυτές της περιπτώσεις η απομείωση της ροπής του πασσάλου γίνεται με πιο ομαλό τρόπο.



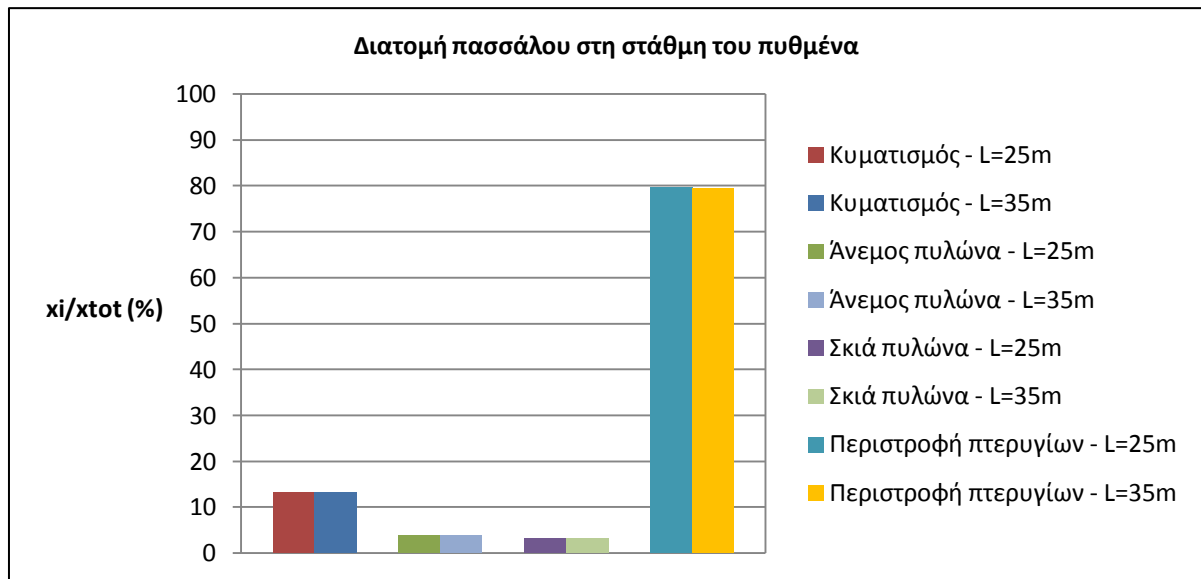
Σχήμα 5.49 – Διαγράμματα τεμνουσών κατά μήκος του πασσάλου

Από τα παραπάνω διαγράμματα τεμνουσών (Σχήμα 5.49) εύκολα μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι όσο πιο μικρό είναι το μήκος έμπτυξης του πασσάλου τόσο πιο μεγάλες είναι οι τέμνουσες δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτόν. Στα μικρότερα μήκη έμπτυξης οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων είναι μεγαλύτερες (το πλάτος του “πηδήματος” του διαγράμματος των τεμνουσών που γίνεται ανά ένα μέτρο ισούται με την αντίδραση του μη-γραμμικού ελατηρίου που υπάρχει στο αντίστοιχο υψόμετρο). Τέλος, προκύπτει ότι όσο πιο μεγάλο είναι το μήκος θεμελίωσης του πασσάλου τόσο πιο μικρές είναι οι αντιδράσεις των ελατηρίων (μικρότερα “πηδήματα”) κοντά στην αιχμή του πασσάλου με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται σε αυτή τη περιοχή μικρότερες τέμνουσες δυνάμεις και ουσιαστικά να γίνεται μια ομαλή απομείωση των εντατικών μεγεθών στην άκρη του πασσάλου.



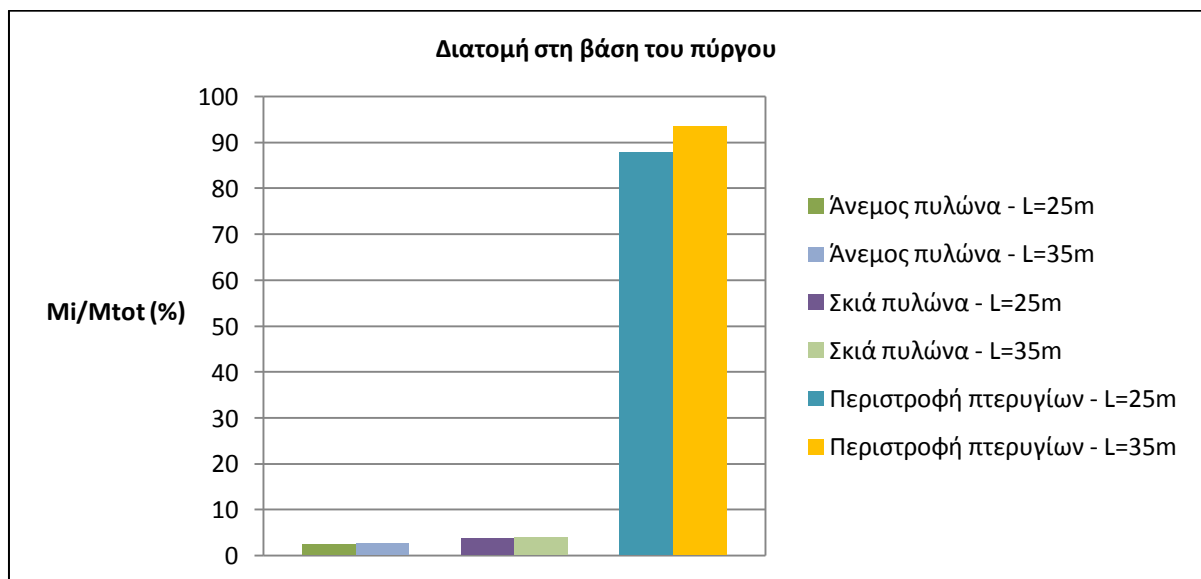
Σχήμα 5.50 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.50) προκύπτει πως και για τα δύο μήκη έμπτυξης πασσάλου (25m και 35m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση του πασσάλου είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 12% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 4% (και για τα δύο μήκη έμπτυξης) και του φορτίου του ανέμου στη σκία των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3% (και για τα δύο μήκη έμπτυξης). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πασσάλου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 80% (και για τα δύο μήκη έμπτυξης).



Σχήμα 5.51 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της διατομής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

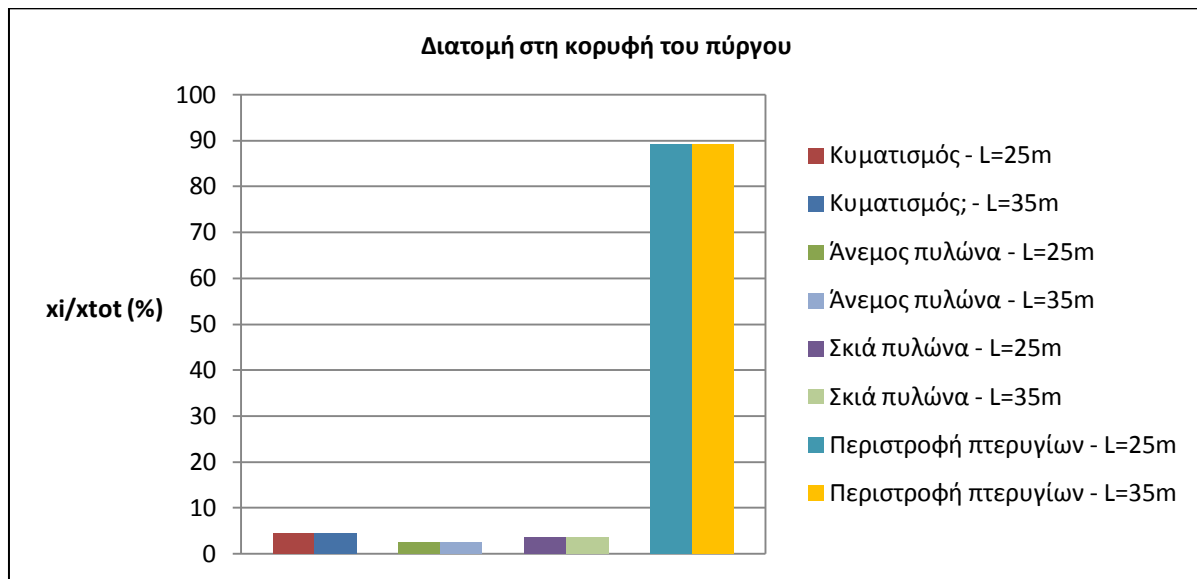
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.51) προκύπτει πως και για τα δύο μήκη έμπτυξης πασσάλου (25m και 35m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 13% στη συνολική μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση του πασσάλου με ποσοστό 4% (και για τα δύο μήκη έμπτυξης) και του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3% (και για τα δύο μήκη έμπτυξης). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 80% (και για τα δύο μήκη έμπτυξης).



Σχήμα 5.52 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή της βάσης του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.52) προκύπτει πως και για τα δύο μήκη έμπτυξης πασσάλου (25m και 35m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση

της βάσης του πύργου είναι περίπου ίδια με εξαίρεση μια διαφορά στο φορτίο λόγω της περιστροφής των πτερυγίων. Το φορτίο του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας αποτελεί περίπου το 2,5% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο της βάσης του πύργου. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 4% της συνολικής φόρτισης (και για τα δύο μήκη έμπτυξης). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πύργου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 88% για μήκος έμπτυξης πασσάλου $L=25\text{m}$ και 93% για μήκος έμπτυξης πασσάλου $L=35\text{m}$.



Σχήμα 5.53 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της κορυφής του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.53) προκύπτει πως και για τα δύο μήκη έμπτυξης τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 5% στη συνολική μετατόπιση της κορυφής. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση της κορυφής με ποσοστό 3% (και για τα δύο μήκη έμπτυξης) και του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3,5% (και για τα δύο μήκη έμπτυξης). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 89% (και για τα δύο μήκη έμπτυξης).

5.2.2 Μεταβολή της διαμέτρου του πασσάλου

Η διάμετρος του πασσάλου παίρνει τις εξής τιμές:

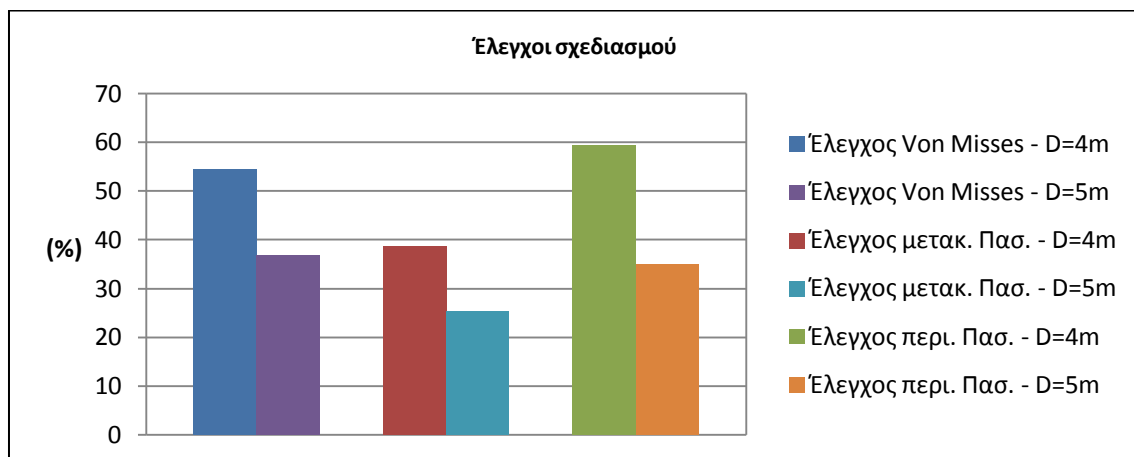
1. $D=4\text{m}$
2. $D=5\text{m}$

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

1. Μήκος έμπτυξης πασσάλου $L=30\text{m}$

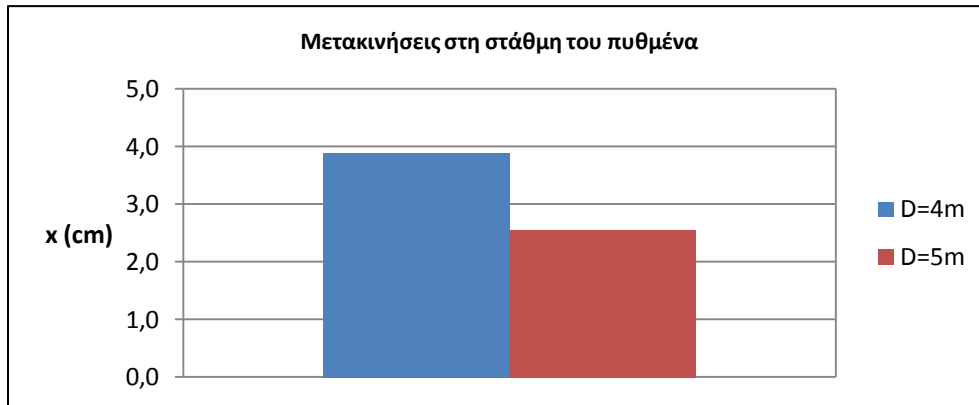
2. Πάχος τοιχωμάτων πασσάλου $t=0,08\text{m}$
3. Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
4. Το έδαφος προσομοιώνεται με μη-γραμμικά ελατήρια
5. Εσωτερική γωνία τριβής $\phi=35^\circ$

Σε αυτή την παράγραφο επιλέγεται η αύξηση της δυσκαμψίας του πασσάλου μέσω της αύξησης της διαμέτρου του. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου, ο έλεγχος μέγιστης μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα και ο έλεγχος μέγιστης περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα για τις δύο τιμές διαμέτρου του πασσάλου. Προβάλλονται επίσης οι μετακινήσεις τις κατασκευής στη στάθμη του πυθμένα, στη βάση και στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς μεταβάλλεται η διάμετρος του πασσάλου. Επίσης παρουσιάζονται οι αντιδράσεις των ελατηρίων και τα διαγράμματα ροπών και τεμνουσών κατά μήκος του πασσάλου για τις διάφορες τιμές της διαμέτρου. Τέλος προβάλλονται για τις δύο τιμές της διαμέτρου τα ποσοστά συμβολής της κάθε φόρτισης ξεχωριστά, στα εντατικά μεγέθη και τις μετατοπίσεις του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας.



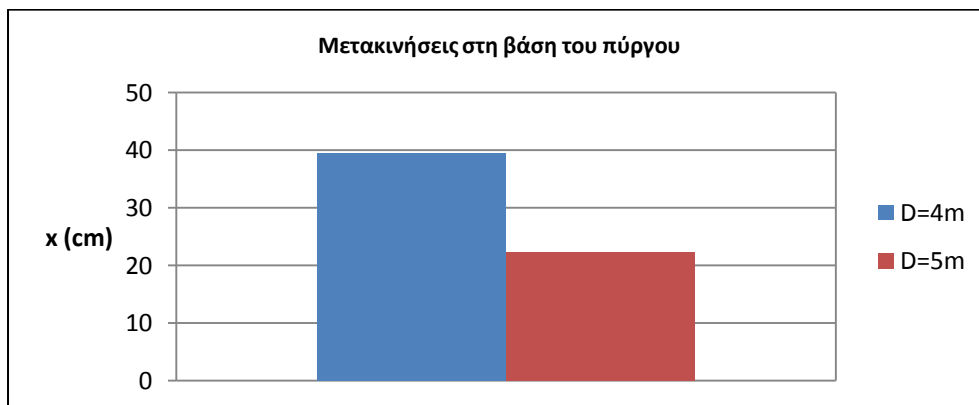
Σχήμα 5.54 – Έλεγχοι σχεδιασμού πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.54) προκύπτει πως ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου μεταβάλλεται σημαντικά καθώς αλλάζει η δυσκαμψία του πασσάλου μέσω της αύξησης της διαμέτρου του. Συγκεκριμένα για διάμετρο πασσάλου 4m η καταπόνηση του πασσάλου αγγίζει το 55% της αντοχής του ενώ στη περίπτωση των 5m το 37% της αντοχής του. Η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται σημαντικά από το 39% στο 25% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς αυξάνει η διάμετρος του πασσάλου από 4m σε 5m . Τέλος η περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται σημαντικά από το 59% στο 35% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς αυξάνει η διάμετρος του πασσάλου από 4m σε 5m .



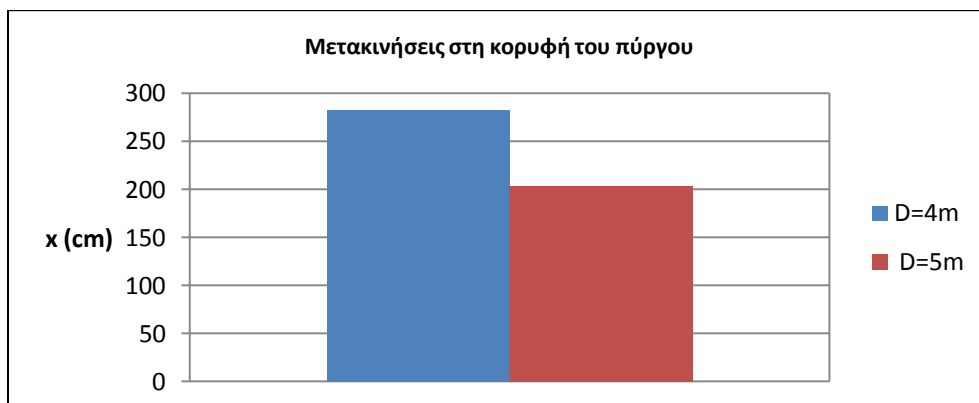
Σχήμα 5.55 – Μετακινήσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.55) είναι προφανές πως η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται αρκετά από 3,9cm σε 2,5cm καθώς αυξάνεται η διάμετρος του πασσάλου από 4m σε 5m.



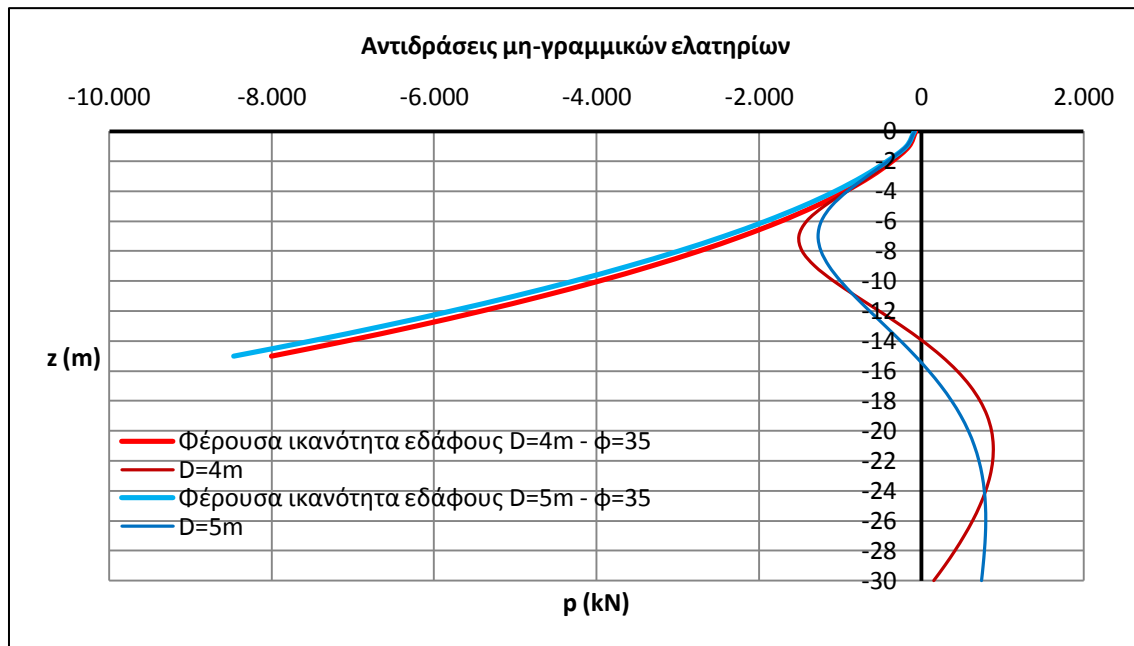
Σχήμα 5.56 – Μετακινήσεις στη βάση του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.56) προκύπτει πως η μετατόπιση της βάσης του πύργου μειώνεται σημαντικά από 39cm σε 22cm καθώς αυξάνεται η διάμετρος του πασσάλου.



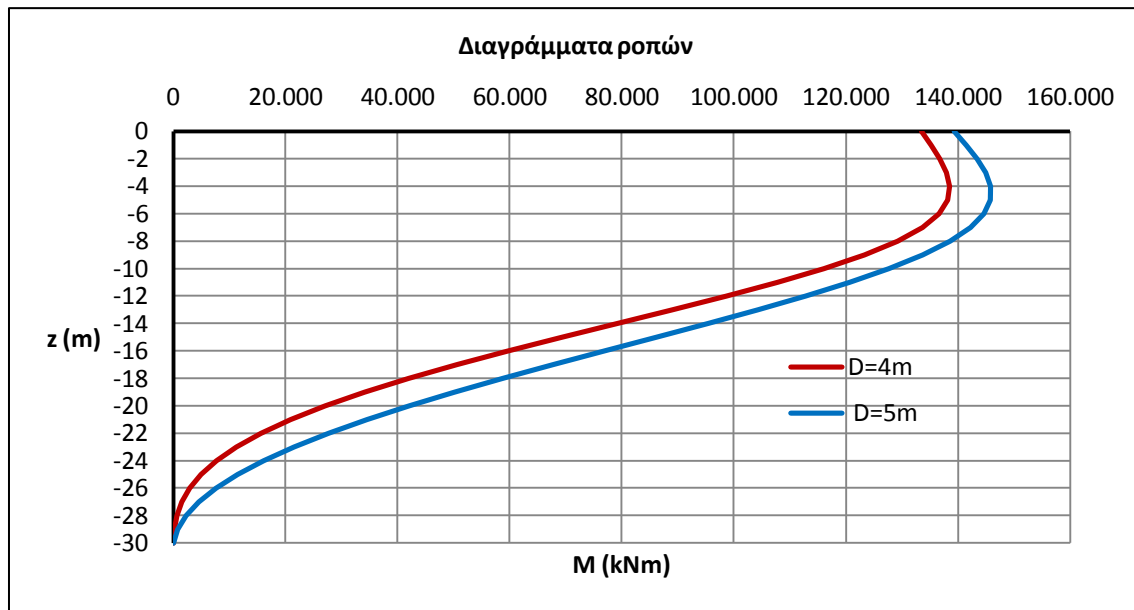
Σχήμα 5.57 – Μετακινήσεις στη κορυφή του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.57) προκύπτει πως η μετατόπιση της κορυφής του πύργου μειώνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται η διάμετρος του πασσάλου, από 282cm για D=4m σε 203cm για D=5m.



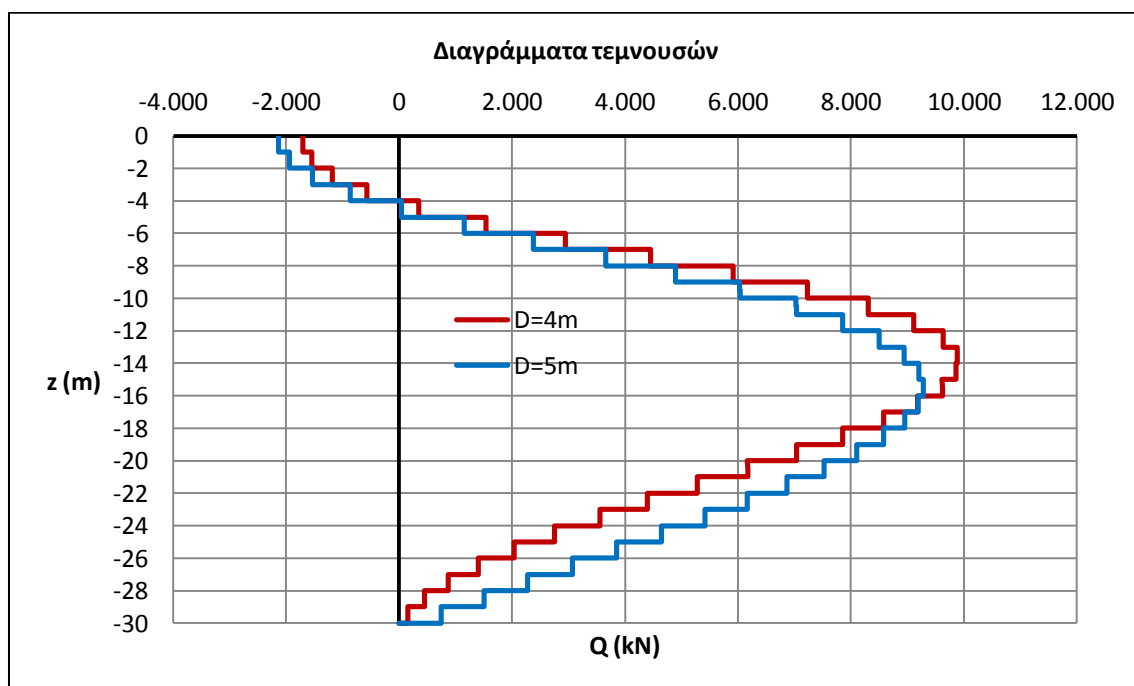
Σχήμα 5.58 – Αντιδράσεις μη-γραμμικών ελατηρίων

Όπως προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.58) η φέρουσα ικανότητα του εδάφους για διάμετρο πασσάλου $D=5\text{m}$ είναι μεγαλύτερη από αυτή για διάμετρο πασσάλου $D=4\text{m}$. Προκύπτει επίσης πως στα πρώτα μέτρα της θεμελίωσης του πασσάλου εξαντλείται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους και για τις δύο διαμέτρους, μιας και οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων ταυτίζονται με τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται σε αυτή τη περιοχή μια πλαστική ζώνη μέσα στο έδαφος. Παρατηρούμε επίσης πως καθώς αυξάνεται η διάμετρος του πασσάλου, το σημείο περιστροφής του πασσάλου μέσα στο έδαφος μετατοπίζεται πιο βαθιά από τα 14m στα 16m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας (μηδενική αντίδραση ελατηρίου σημαίνει και μηδενική μετατόπιση του πασσάλου σε αυτή τη θέση). Είναι προφανές πως για διάμετρο πασσάλου $D=5\text{m}$ οι αντιδράσεις των ελατηρίων κοντά στην αιχμή του πασσάλου είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αντιδράσεις αιχμής για $D=4\text{m}$. Αυτό προκύπτει λόγω της μεγαλύτερης δυσκαμψίας που έχει ο πάσσαλος με την μεγαλύτερη διάμετρο η οποία δεν τον αφήνει να παραμορφωθεί και να ακολουθήσει την αρχική απαραμόρφωτη θέση (και να περιοριστούν αντίστοιχα η μετατοπίσεις του). Για το ίδιο βάθος μέσα στον πυθμένα της θάλασσας το έδαφος είναι το ίδιο σκληρό, όμως ο πιο δύσκαμπτος πάσσαλος παραμορφώνεται δυσκολότερα από τον πιο εύκαμπτο.



Σχήμα 5.59 – Διαγράμματα ροπών κατά μήκος του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.59) προκύπτει πως οι ροπές που αναπτύσσονται κατά μήκος του πιο δύσκαμπτου πασσάλου ($D=5\text{m}$) είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες ροπές του πιο εύκαμπτου πασσάλου ($D=4\text{m}$). Και για τις δύο περιπτώσεις διαμέτρων το “σβήσιμο” του διαγράμματος ροπών είναι απότομο, άρα το μήκος έμπληξης του πασσάλου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο των 30m.



Σχήμα 5.60 – Διαγράμματα τεμνουσών κατά μήκος του πασσάλου

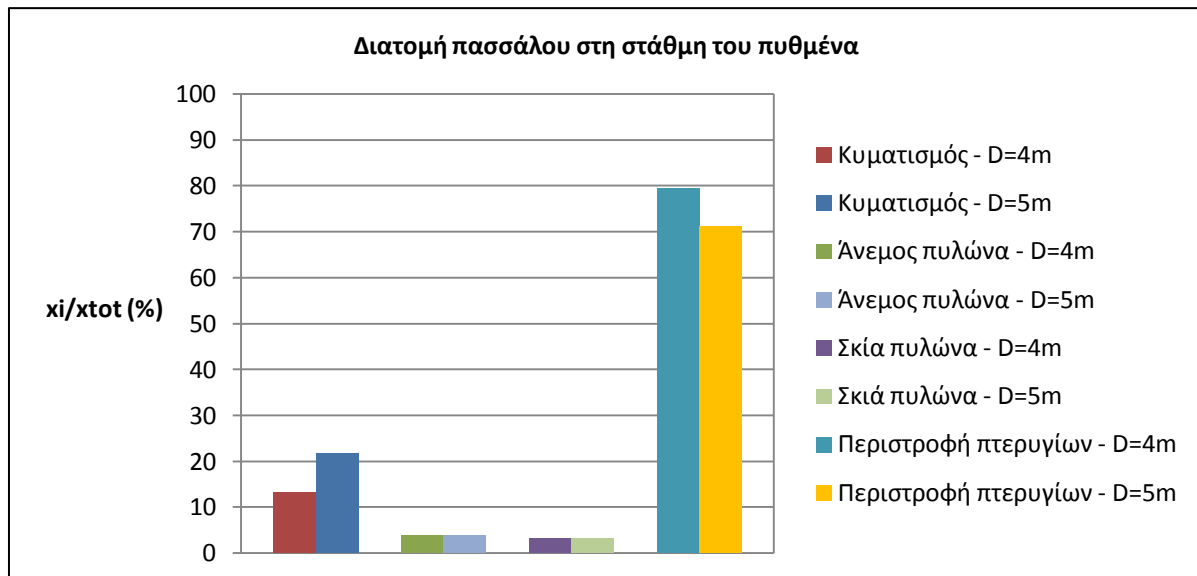
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.60) συμπεραίνει κανείς πως η μέγιστη τέμνουσα κατά μήκος του πασσάλου προκύπτει για διάμετρο $D=4\text{m}$. Επιβεβαιώνεται επίσης πως στη περίπτωση που η διάμετρος του πασσάλου είναι $D=4\text{m}$ το σημείο περιστροφής του πασσάλου είναι 14m κάτω από τον πυθμένα, ενώ στη περίπτωση όπου $D=5\text{m}$ το σημείο

περιστροφής του πασσάλου είναι περίπου 1,5m με 2m βαθύτερα (το πλάτος του “πηδήματος” του διαγράμματος των τεμνουσών που γίνεται ανά ένα μέτρο ισούται με την αντίδραση του μη-γραμμικού ελατηρίου που υπάρχει στο αντίστοιχο υψόμετρο). Μηδενικό πλάτος σημαίνει και μηδενική αντίδραση ελατηρίου που οδηγεί και σε μηδενική μετατόπιση του πασσάλου σε αυτό το σημείο. Είναι προφανές πως για διάμετρο πασσάλου $D=5\text{m}$ η τέμνουσα δύναμη που αναπτύσσεται κοντά στην αιχμή του πασσάλου είναι μεγαλύτερη την αντίστοιχη τέμνουσα για $D=4\text{m}$. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις μεγαλύτερες αντιδράσεις ελατηρίων κοντά στην αιχμή του πασσάλου για $D=5\text{m}$, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Τέλος γίνεται αντιληπτό πως στη περιοχή μέγιστου βάθους θεμελίωσης η τέμνουσα του πασσάλου δεν είναι μηδενική και για τις δύο περιπτώσεις διαμέτρων. Το ότι δεν απομεινώνεται σημαντικά (δεν “σβήνει”) η τέμνουσα στα τελευταία μέτρα της θεμελίωσης του πασσάλου σημαίνει ότι το μήκος θεμελίωσης δεν επαρκεί και πρέπει να αυξηθεί.



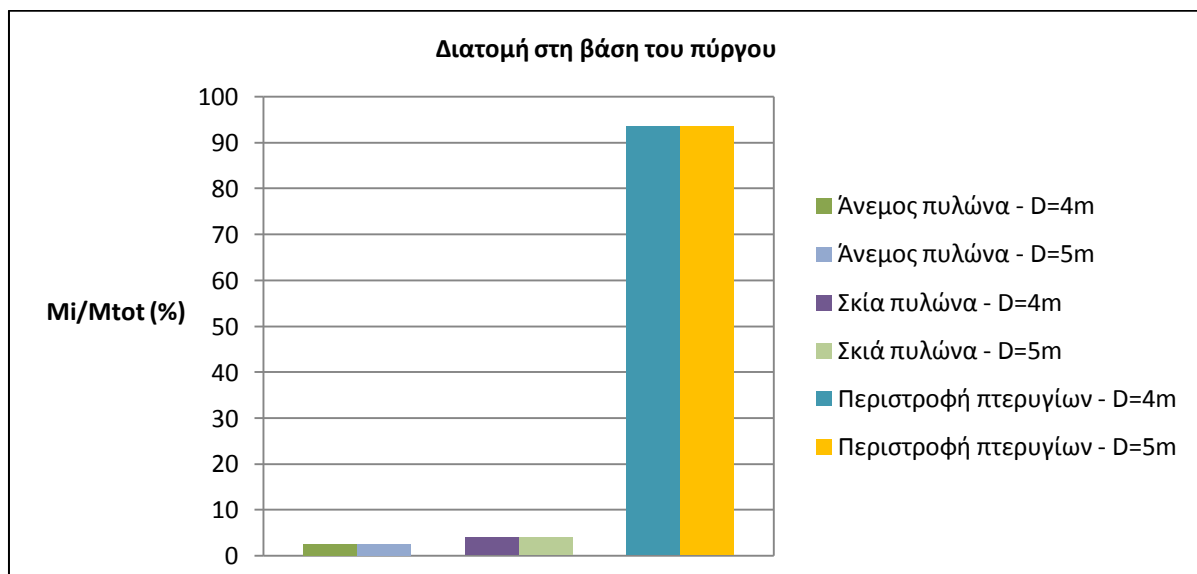
Σχήμα 5.61 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.61) προκύπτει πως στη περίπτωση που η διάμετρος του πασσάλου είναι $D=4\text{m}$ το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 12% της συνολικής φόρτισης ενώ στη περίπτωση $D=5\text{m}$ το 18% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 4% (και για τις δύο διαμέτρους) και του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3,5% (και για τις δύο διαμέτρους). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πασσάλου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 80% για διάμετρο πασσάλου $D=4\text{m}$ και 74% για διάμετρο πασσάλου $D=5\text{m}$.



Σχήμα 5.62 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της διατομής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

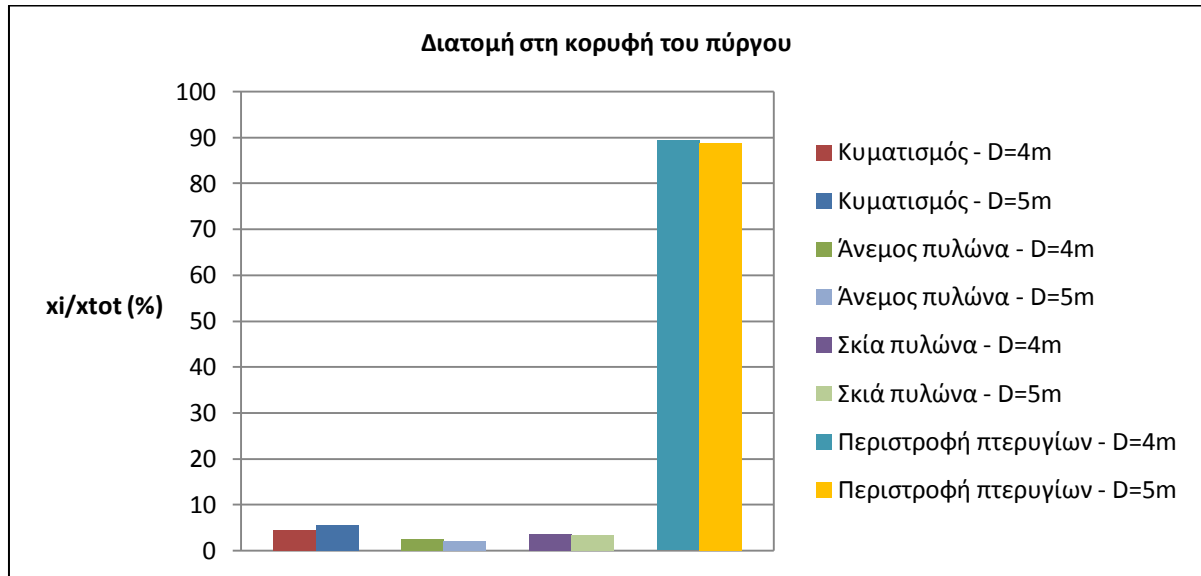
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.62) προκύπτει πως για τη περίπτωση διαμέτρου πασσάλου $D=4\text{m}$ το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 13% στη συνολική μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα και 22% για τη περίπτωση $D=5\text{m}$. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση του πασσάλου με ποσοστό 4% (και για τις δύο διαμέτρους) και του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3% (και για τις δύο διαμέτρους). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 79% για διάμετρο πασσάλου $D=4\text{m}$ και 71% για διάμετρο πασσάλου $D=5\text{m}$.



Σχήμα 5.63 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή της βάσης του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.63) προκύπτει πως και για τις δύο διαμέτρους (4m και 5m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση της βάσης του πύργου είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας

αποτελεί περίπου το 3% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο της βάσης του πύργου. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 4% της συνολικής φόρτισης (και για τις δύο διαμέτρους). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πύργου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 93% και για τις δύο διαμέτρους.



Σχήμα 5.64 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της διατομής της κορυφής του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.64) προκύπτει πως και για τις δύο διαμέτρους τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 5% στη συνολική μετατόπιση της κορυφής για διάμετρο πασσάλου D=4m και 6% για D=5m. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση της κορυφής με ποσοστό 3% για διάμετρο πασσάλου D=4m και 2% για D=5m. Το φορτίο του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αποτελεί περίπου το 3,5% (και για τις δύο διαμέτρους). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 89% (και για τις δύο διαμέτρους).

5.2.3 Μεταβολή του πάχους των τοιχωμάτων του πασσάλου

Η διάμετρος του πασσάλου παίρνει τις εξής τιμές:

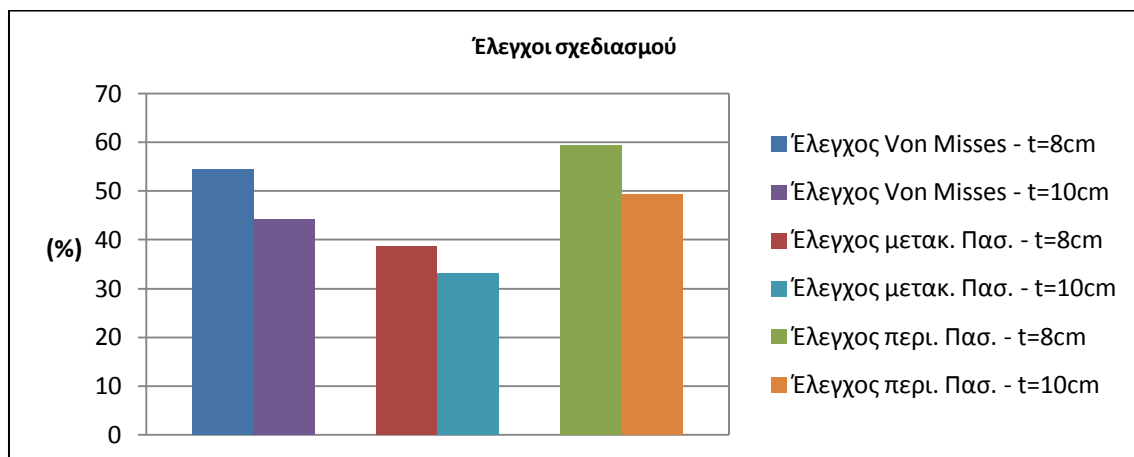
1. $t=8\text{cm}$
2. $t=10\text{cm}$

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

1. Μήκος έμπηξης πασσάλου $L=30\text{m}$
2. Διάμετρος πασσάλου $D=4\text{m}$

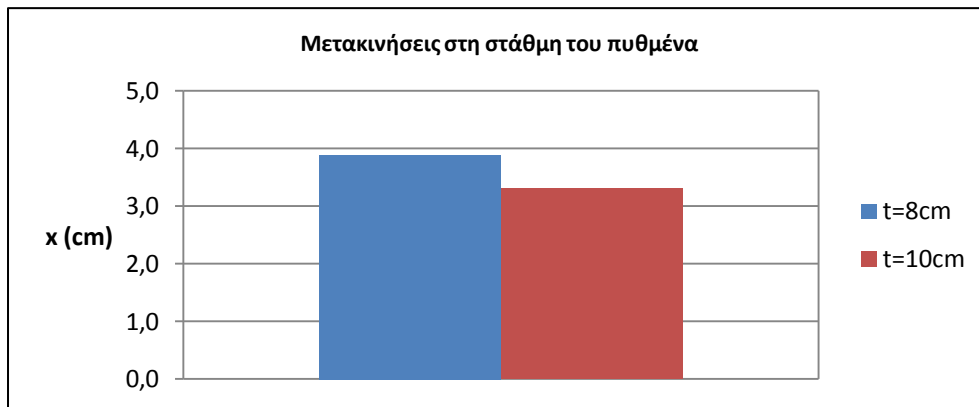
3. Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
4. Το έδαφος προσομοιώνεται με μη-γραμμικά ελατήρια
5. Εσωτερική γωνία τριβής $\phi=35^\circ$

Σε αυτή την παράγραφο επιλέγεται η αύξηση της δυσκαμψίας του πασσάλου μέσω της αύξησης του πάχους των τοιχωμάτων του πασσάλου. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου, ο έλεγχος μέγιστης μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα και ο έλεγχος μέγιστης περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα για τις δύο τιμές του πάχους των τοιχωμάτων του πασσάλου. Προβάλλονται επίσης οι μετακινήσεις τις κατασκευής στη στάθμη του πυθμένα, στη βάση και στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς μεταβάλλεται το πάχος των τοιχωμάτων του πασσάλου. Επίσης παρουσιάζονται οι αντιδράσεις των ελατηρίων και τα διαγράμματα ροπών και τεμνουσών κατά μήκος του πασσάλου για τις διάφορες τιμές του πάχους. Τέλος προβάλλονται για τις δύο τιμές του πάχους των τοιχωμάτων τα ποσοστά συμβολής της κάθε φόρτισης ξεχωριστά, στα εντατικά μεγέθη και τις μετατοπίσεις του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας.



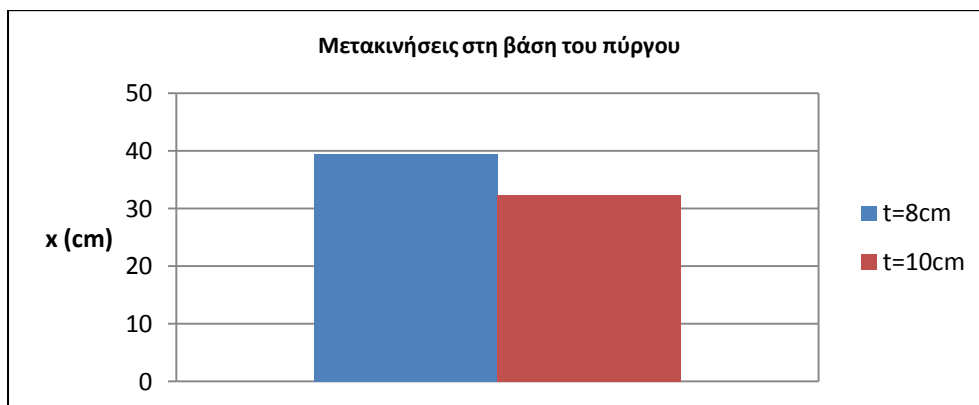
Σχήμα 5.65 – Έλεγχος σχεδιασμού πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.65) προκύπτει πως ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου μεταβάλλεται καθώς αλλάζει η δυσκαμψία του πασσάλου μέσω της αύξησης του πάχους των τοιχωμάτων του. Συγκεκριμένα για πάχος τοιχωμάτων $t=8\text{cm}$ η καταπόνηση του πασσάλου αγγίζει το 55% της αντοχής του ενώ στη περίπτωση των $t=10\text{cm}$ το 44% της αντοχής του. Η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται από το 39% στο 33% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς αυξάνει το πάχος των τοιχωμάτων από 8cm σε 10cm. Τέλος η περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται από το 59% στο 49% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς αυξάνει το πάχος των τοιχωμάτων του πασσάλου.



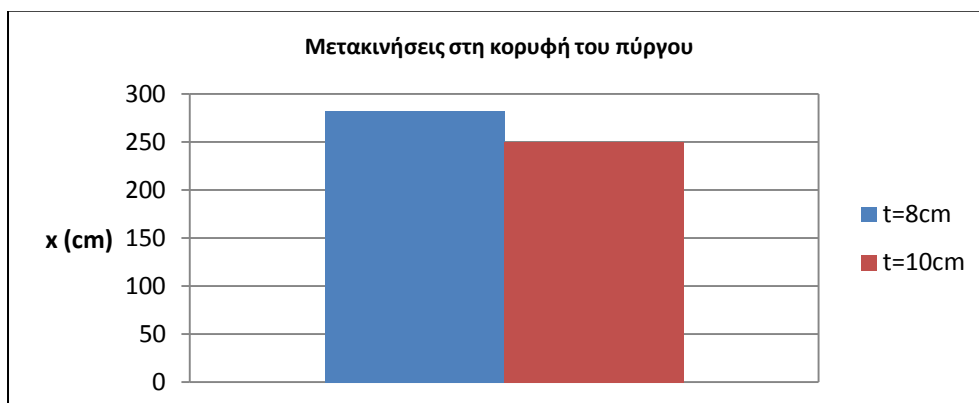
Σχήμα 5.66 – Μετακινήσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.66) είναι προφανές πως η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται αρκετά από 3,9cm σε 3,3cm καθώς αυξάνεται το πάχος των τοιχωμάτων του πασσάλου από t=8cm σε t=10cm.



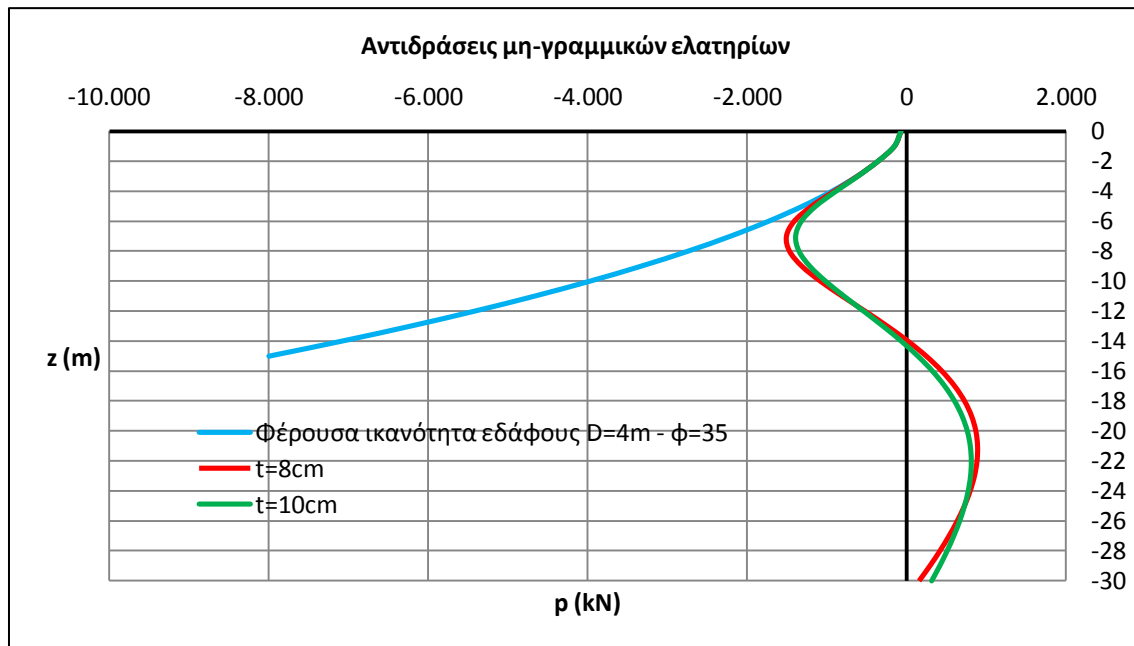
Σχήμα 5.67 – Μετακινήσεις στη βάση του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.67) προκύπτει πως η μετατόπιση της βάσης του πύργου μειώνεται από 39cm σε 32cm καθώς αυξάνεται το πάχος των τοιχωμάτων του πασσάλου.



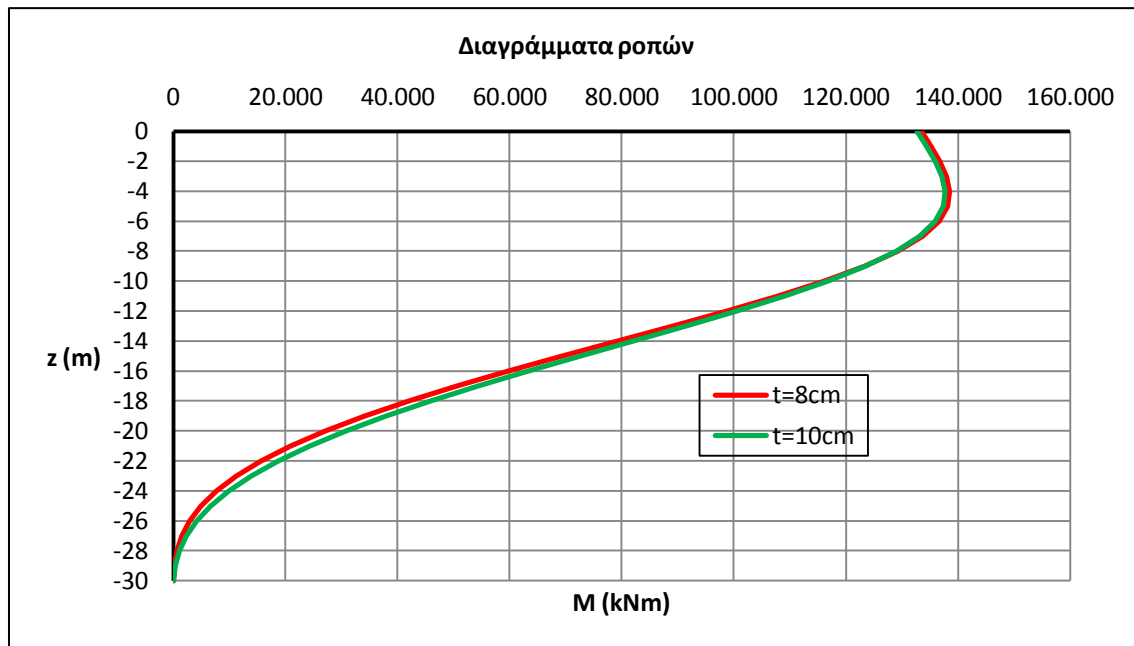
Σχήμα 5.68 – Μετακινήσεις στη κορυφή του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.68) προκύπτει πως η μετατόπιση της κορυφής του πύργου μειώνεται αρκετά καθώς αυξάνεται το πάχος των τοιχωμάτων του πασσάλου, από 282cm για t=8cm σε 250cm για t=10cm.



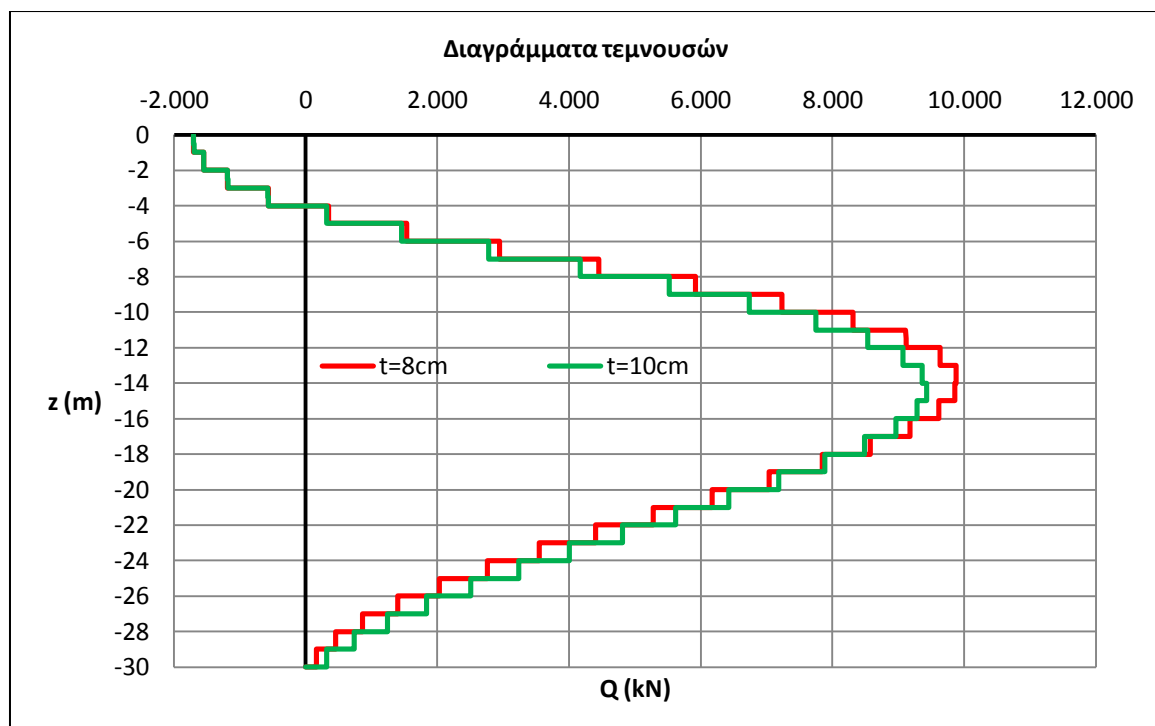
Σχήμα 5.69 – Αντιδράσεις μη-γραμμικών ελατηρίων

Από το Σχήμα 5.69 προκύπτει πως στα πρώτα μέτρα της θεμελίωσης του πασσάλου εξαντλείται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων, μιας και οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων ταυτίζονται με την καμπύλη που αντιπροσωπεύει τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται σε αυτή τη περιοχή μια πλαστική ζώνη μέσα στο έδαφος. Παρατηρούμε επίσης πως και στις δύο περιπτώσεις, στο βάθος $z=-14\text{m}$ κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, η αντίδραση των ελατηρίων είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει λόγω της μηδενικής μετατόπισης του πασσάλου σε αυτό το σημείο από την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση. Μπορούμε δηλαδή να συμπεράνουμε πως 14m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας είναι το σημείο περιστροφής του πασσάλου μέσα στο έδαφος και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων. Είναι προφανές πως για πάχος τοιχωμάτων πασσάλου $t=10\text{cm}$ οι αντιδράσεις των ελατηρίων κοντά στην αιχμή του πασσάλου είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αντιδράσεις αιχμής για $t=8\text{cm}$. Αυτό προκύπτει λόγω της μεγαλύτερης δυσκαμψίας που έχει ο πάσσαλος με το μεγαλύτερο πάχος τοιχωμάτων η οποία δεν τον αφήνει να παραμορφωθεί και να ακολουθήσει την αρχική απαραμόρφωτη θέση (και να περιοριστούν αντίστοιχα η μετατοπίσεις του). Για το ίδιο βάθος μέσα στον πυθμένα της θάλασσας το έδαφος είναι το ίδιο σκληρό, όμως ο πιο δύσκαμπτος πάσσαλος παραμορφώνεται δυσκολότερα από τον πιο εύκαμπτο.



Σχήμα 5.70 – Διαγράμματα ροπών κατά μήκος του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.70) προκύπτει πως οι ροπές που αναπτύσσονται και στις δύο περιπτώσεις πάχους πασσάλου είναι περίπου ίδιες. Και για τις δύο περιπτώσεις το “σβήσιμο” του διαγράμματος ροπών είναι απότομο, άρα το μήκος έμπληξης του πασσάλου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο των 30m.



Σχήμα 5.71 – Διαγράμματα τεμνουσών κατά μήκος του πασσάλου

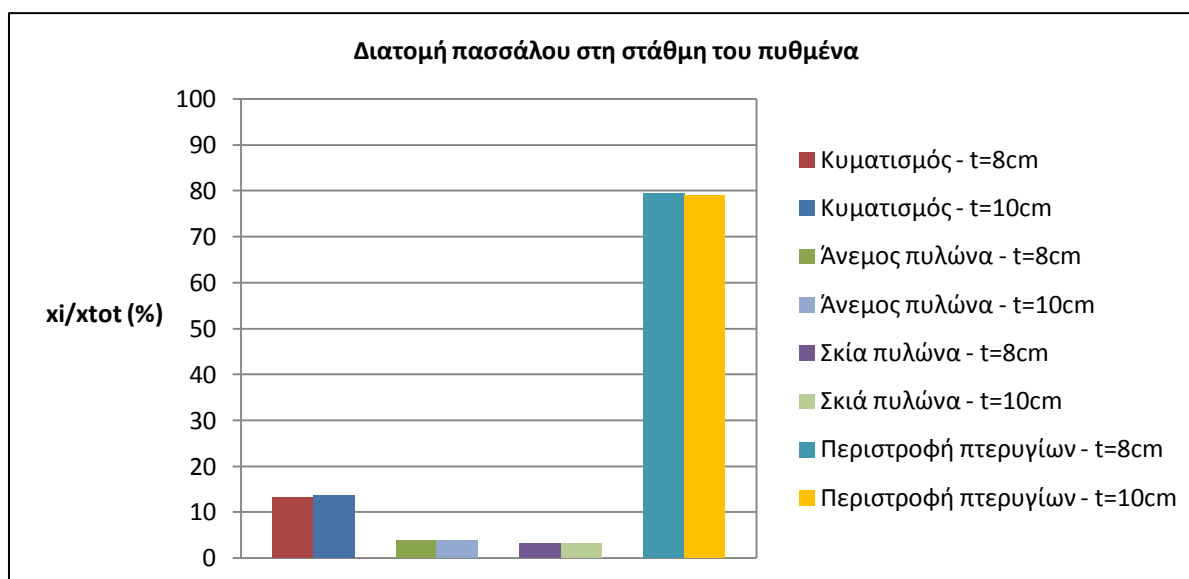
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.71) συμπεραίνει κανείς πως η μέγιστη τέμνουσα κατά μήκος του πασσάλου προκύπτει για πάχος πασσάλου $t=8\text{cm}$. Επιβεβαιώνεται επίσης πως και στις δύο περιπτώσεις το σημείο περιστροφής του πασσάλου είναι 14m κάτω από

τον πυθμένα (το πλάτος του “πηδήματος” του διαγράμματος των τεμνουσών που γίνεται ανά ένα μέτρο ισούται με την αντίδραση του μη-γραμμικού ελατηρίου που υπάρχει στο αντίστοιχο υψόμετρο). Μηδενικό πλάτος σημαίνει και μηδενική αντίδραση ελατηρίου που οδηγεί και σε μηδενική μετατόπιση του πασσάλου σε αυτό το σημείο. Είναι προφανές πως για πάχος τοιχωμάτων $t=10\text{cm}$ η τέμνουσα δύναμη που αναπτύσσεται κοντά στην αιχμή του πασσάλου είναι μεγαλύτερη την αντίστοιχη τέμνουσα για $t=8\text{cm}$. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις μεγαλύτερες αντιδράσεις ελατηρίων κοντά στην αιχμή του πασσάλου για $t=10\text{cm}$, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Τέλος γίνεται αντιληπτό πως στη περιοχή μέγιστου βάθους θεμελιώσεως η τέμνουσα του πασσάλου δεν είναι μηδενική και για τις δύο περιπτώσεις διαμέτρων. Το ότι δεν απομειώνεται σημαντικά (δεν “σβήνει”) η τέμνουσα στα τελευταία μέτρα της θεμελίωσης του πασσάλου σημαίνει ότι το μήκος θεμελιώσεως δεν επαρκεί και πρέπει να αυξηθεί.



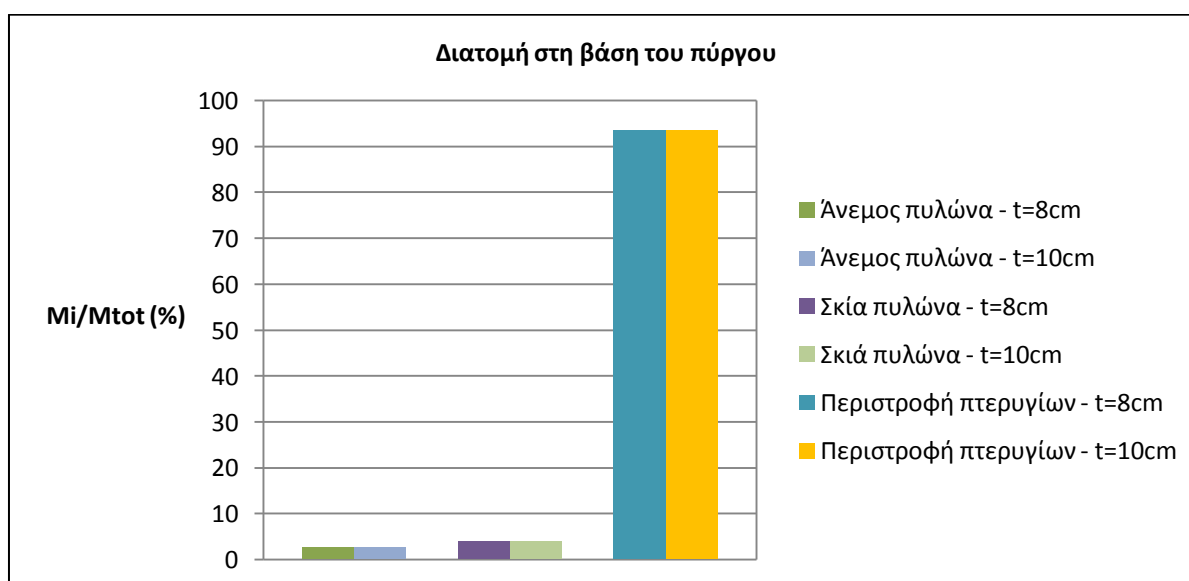
Σχήμα 5.72 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.72) προκύπτει πως και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων πασσάλου (8cm και 10cm) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση του πασσάλου είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 12% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 4% (και για τα δύο πάχη) και του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3% (και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πασσάλου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 80% (και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων πασσάλου).



Σχήμα 5.73 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της διατομής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

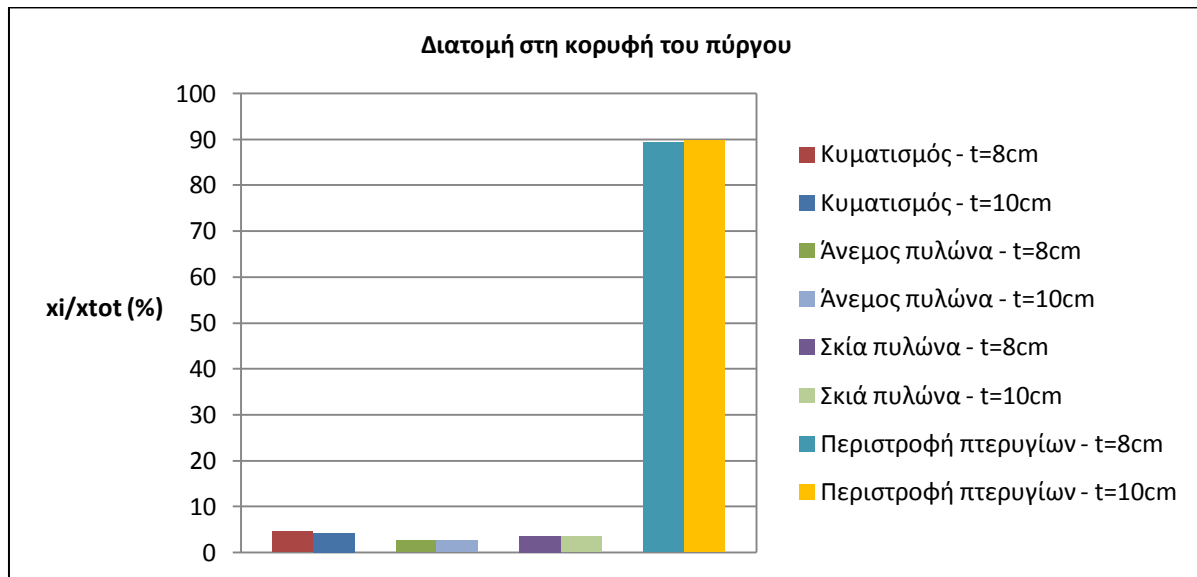
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.73) προκύπτει πως και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων πασσάλου (8cm και 10cm) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 13% στη συνολική μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση του πασσάλου με ποσοστό 4% (και για τα δύο πάχη) και του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3% (και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων πασσάλου). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 79% και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων πασσάλου.



Σχήμα 5.74 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή της βάσης του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.74) προκύπτει πως και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων πασσάλου (8cm και 10cm) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση

της βάσης του πύργου είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας αποτελεί περίπου το 2,5% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο της βάσης του πύργου. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 4% της συνολικής φόρτισης (και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πύργου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 93% και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων πασσάλου.



Σχήμα 5.75 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της κορυφής του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.75) προκύπτει πως και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων του πασσάλου δεν διαφέρουν τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 5% στη συνολική μετατόπιση της κορυφής. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση της κορυφής με ποσοστό 2,5% (και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων πασσάλου) και του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3,5% (και για τα δύο πάχη). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 89% και για τα δύο πάχη τοιχωμάτων πασσάλου.

5.2.4 Μεταβολή του τρόπου προσομοίωσης του εδάφους

Ο τρόποι προσομοίωσης του εδάφους είναι δύο:

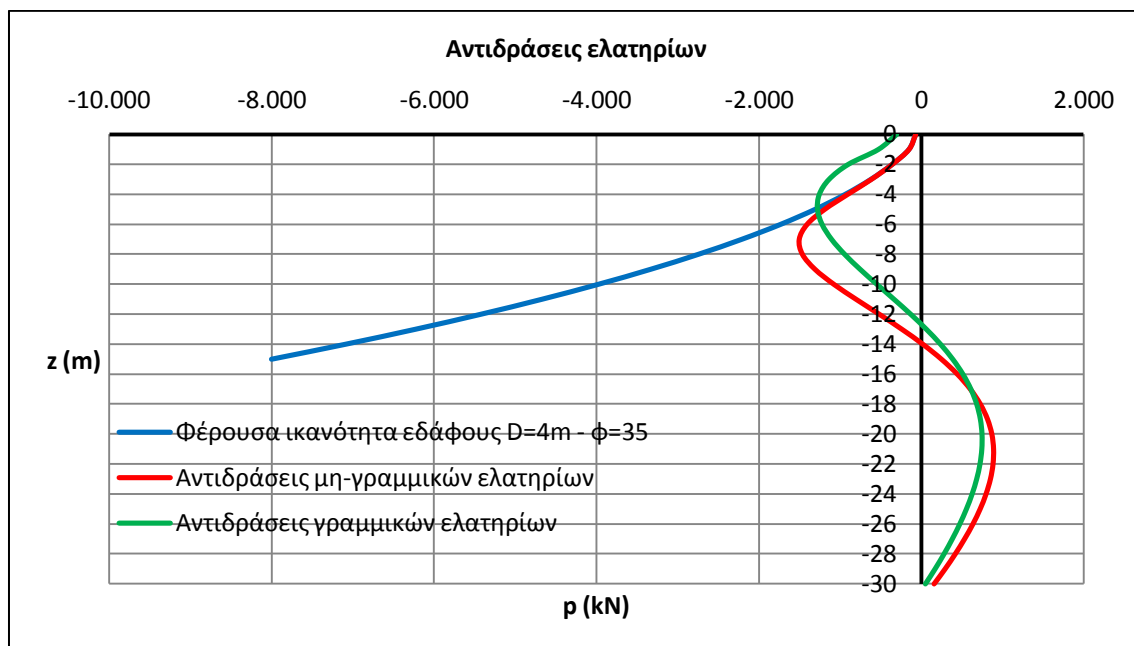
1. Προσομοίωση του εδάφους με γραμμικά ελατήρια
2. Προσομοίωση του εδάφους με μη-γραμμικά ελατήρια

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

1. Μήκος έμπηξης πασσάλου $L=30\text{m}$
2. Διάμετρος πασσάλου $D=4\text{m}$

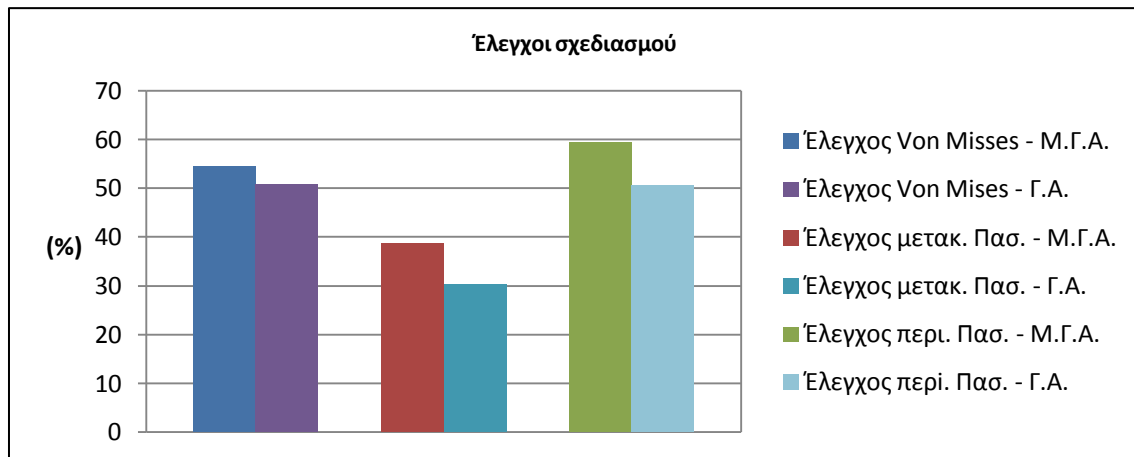
3. Πάχος τοιχωμάτων πασσάλου $t=0,08\text{m}$
4. Εσωτερική γωνία τριβής $\phi=35^\circ$
5. Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται αρχικά οι αντιδράσεις των ελατηρίων που προκύπτουν στους δύο τρόπους προσομοίωσης του εδάφους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου, ο έλεγχος μέγιστης μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα και ο έλεγχος μέγιστης περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα για τους δύο τρόπους προσομοίωσης του εδάφους. Προβάλλονται επίσης οι μετακινήσεις της κατασκευής στη στάθμη του πυθμένα, στη βάση και στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας για τον κάθε τρόπο προσομοίωσης του εδάφους.



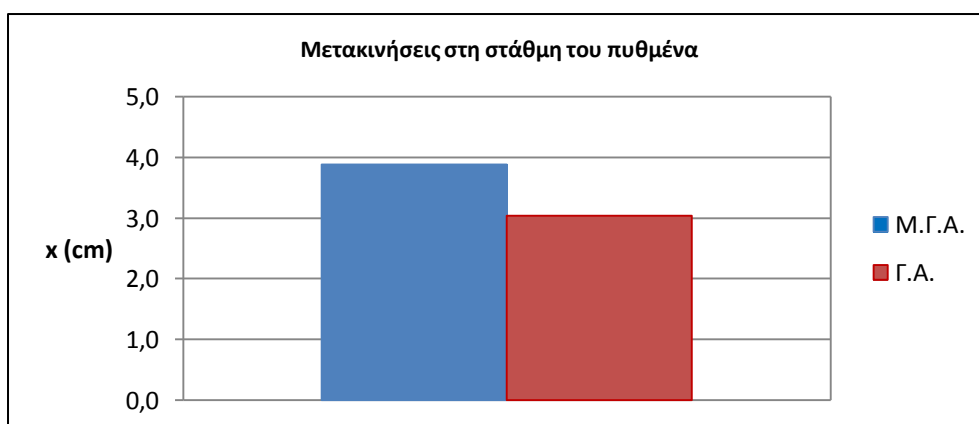
Σχήμα 5.76 – Αντιδράσεις ελατηρίων

Όπως προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.76) η σωστή προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους καθορίζει απόλυτα την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Είναι προφανές ότι η προσομοίωση του εδάφους με γραμμικά ελατήρια (σταθερής δηλαδή δυσκαμψίας ανεξάρτητης της παραμόρφωσης του εδάφους) οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα όσων αφορά τη συμπεριφορά της κατασκευής. Χρησιμοποιώντας γραμμικά ελατήρια, προκύπτει πως τα πρώτα μέτρα θεμελίωσης του πασσάλου οι αντιδράσεις των ελατηρίων ξεπερνούν τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Επίσης βλέπουμε πόσο διαφορετικές είναι οι αντιδράσεις των ελατηρίων σε όλο το μήκος έμπηξης του πασσάλου, μιας και οι καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τη προσομοίωση των γραμμικών και των μη-γραμμικών ελατηρίων διαφέρουν αρκετά. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε πως το έδαφος πρέπει να προσομοιωθεί με μη-γραμμικά ελατήρια (τα οποία αντιπροσωπεύουν και την πραγματική συμπεριφορά του εδάφους) διαφορετικά οδηγούμαστε σε λανθασμένα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της κατασκευής.



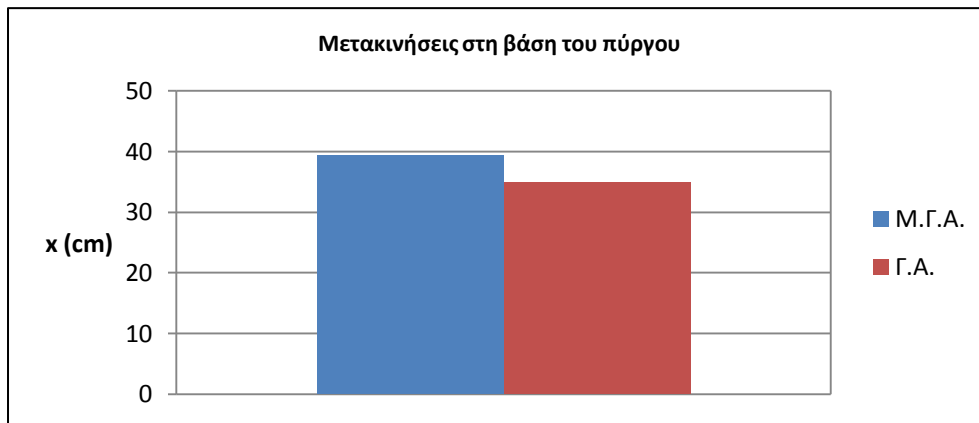
Σχήμα 5.77 – Έλεγχοι σχεδιασμού πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.77) προκύπτει πως ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου μεταβάλλεται σημαντικά καθώς αλλάζει ο τρόπος προσομοίωσης του εδάφους. Συγκεκριμένα στη περίπτωση προσομοίωσης του εδάφους με μη-γραμμικά ελατήρια η καταπόνηση του πασσάλου αγγίζει το 55% της αντοχής του ενώ στη περίπτωση χρήσης γραμμικών ελατηρίων το 51% της αντοχής του. Η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα στη περίπτωση των μη-γραμμικών ελατηρίων αγγίζει το 39% της μέγιστης επιτρεπόμενης ενώ με γραμμικά ελατήρια το 30%. Τέλος με τη χρήση μη-γραμμικών ελατηρίων η περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα αγγίζει το 60% της μέγιστης επιτρεπόμενης ενώ χρησιμοποιώντας γραμμικά ελατήρια αγγίζει το 51% της μέγιστης επιτρεπόμενης. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε πως η χρήση γραμμικών ελατηρίων μας δίνει διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με τη χρήση μη-γραμμικών ελατηρίων και οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της κατασκευής.



Σχήμα 5.78 – Μετακινήσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.78) είναι προφανές πως η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα με χρήση μη γραμμικών ελατηρίων προκύπτει 3,9cm ενώ με τη χρήση γραμμικών ελατηρίων 3,0cm. Όπως δηλαδή έχει αναφερθεί και παραπάνω η προσομοίωση του εδάφους με γραμμικά ελατήρια οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά τα κατασκευής.



Σχήμα 5.79 – Μετακινήσεις στη βάση του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.79) είναι προφανές πως η μετατόπιση της βάσης του πύργου στη περίπτωση των μη-γραμμικών ελατηρίων είναι 39cm ενώ στη περίπτωση των γραμμικών ελατηρίων είναι 35cm.



Σχήμα 5.80 – Μετακινήσεις στη κορυφή του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.80) προκύπτει πως στη περίπτωση προσομοίωσης του εδάφους με μη-γραμμικά ελατήρια η μετατόπιση της κορυφής του πύργου είναι 282cm ενώ στη περίπτωση των γραμμικών ελατηρίων είναι 259cm.

5.2.5 Μεταβολή της φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελιώσεως

Η φέρουσα ικανότητα του εδάφους παίρνει τις εξής τιμές:

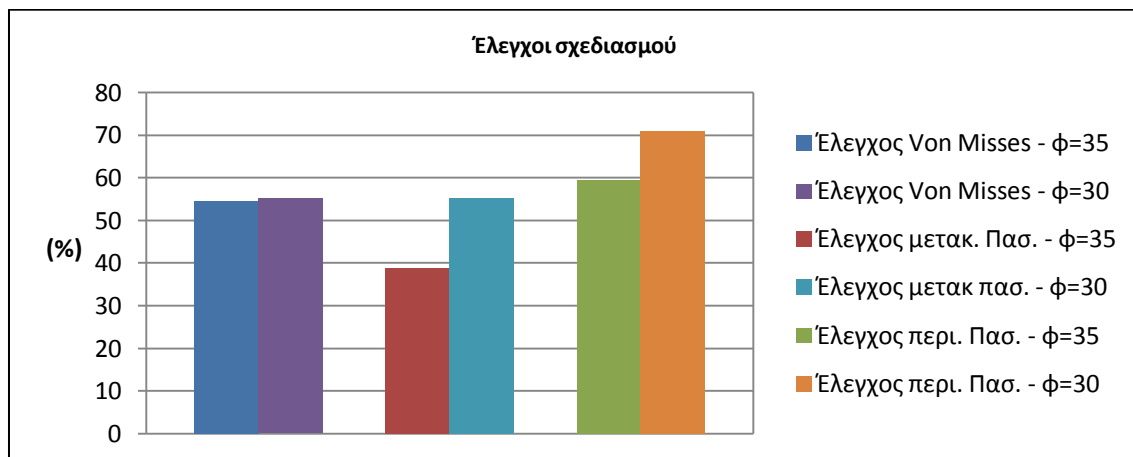
1. Εσωτερική γωνία τριβής $\phi=30^\circ$
2. Εσωτερική γωνία τριβής $\phi=35^\circ$

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

1. Μήκος έμπηξης πασσάλου $L=30m$
2. Διάμετρος πασσάλου $D=4,0m$
3. Πάχος τοιχωμάτων πασσάλου $t=0,08m$

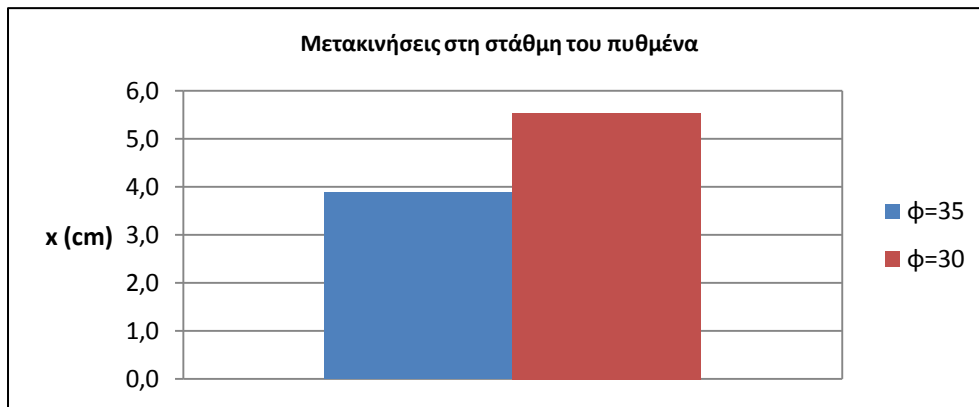
4. Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
5. Το έδαφος προσομοιώνεται με μη-γραμμικά ελατήρια

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου, ο έλεγχος μέγιστης μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα και ο έλεγχος μέγιστης περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα για τα διάφορα είδη εδάφους του πυθμένα. Προβάλλονται επίσης οι μετακινήσεις τις κατασκευής στη στάθμη του πυθμένα, στη βάση και στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς μεταβάλλεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Επίσης παρουσιάζονται οι αντιδράσεις των ελατηρίων και τα διαγράμματα ροπών και τεμνουσών κατά μήκος του πασσάλου για τις διάφορες τιμές τις σχετικής πυκνότητας του εδάφους. Τέλος προβάλλονται για τις δύο περιπτώσεις εδαφών (30° και 35°) τα ποσοστά συμβολής της κάθε φόρτισης ξεχωριστά, στα εντατικά μεγέθη και τις μετατοπίσεις του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας.



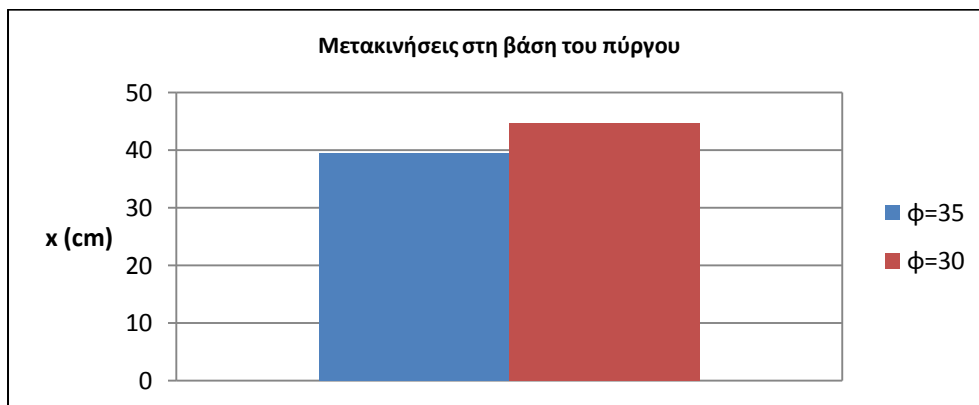
Σχήμα 5.81 – Έλεγχοι σχεδιασμού πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.81) προκύπτει πως ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου δεν μεταβάλλεται καθώς αλλάζει η φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Συγκεκριμένα και στις δύο περιπτώσεις της εσωτερικής γωνίας τριβής του εδάφους, η καταπόνηση του πασσάλου αγγίζει το 55% της αντοχής του. Η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα αυξάνεται από το 39% στο 55% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Τέλος η περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα αυξάνεται από το 59% στο 71% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς μειώνεται η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους από 35° σε 30° .



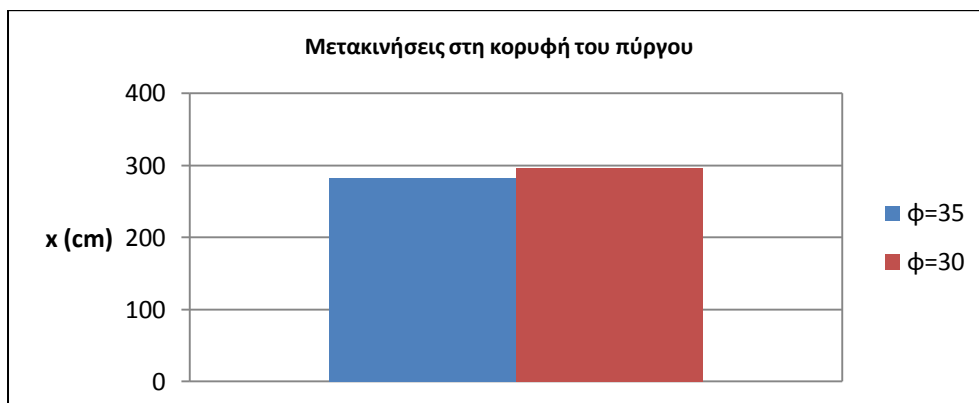
Σχήμα 5.82 – Μετακινήσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.82) είναι προφανές πως η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα αυξάνεται αρκετά από 3,9cm σε 5,5cm καθώς μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους.



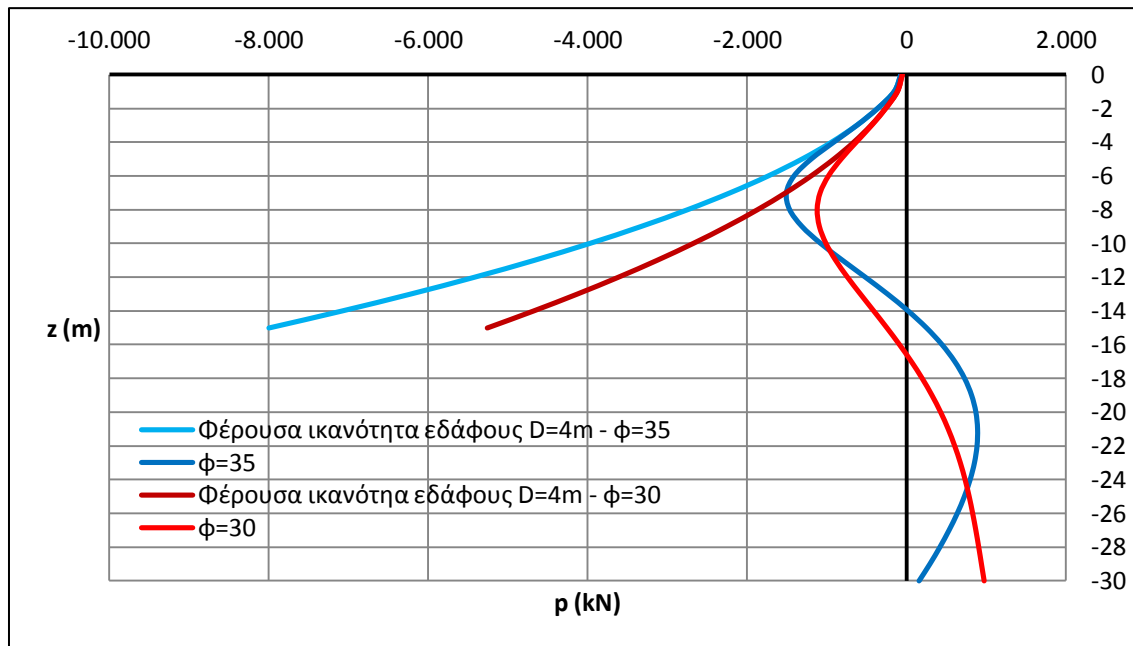
Σχήμα 5.83 – Μετακινήσεις στη βάση του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.83) προκύπτει πως η μετατόπιση της βάσης του πύργου αυξάνεται από 39cm σε 45cm καθώς μειώνεται η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους από $\phi=35^\circ$ σε $\phi=30^\circ$.



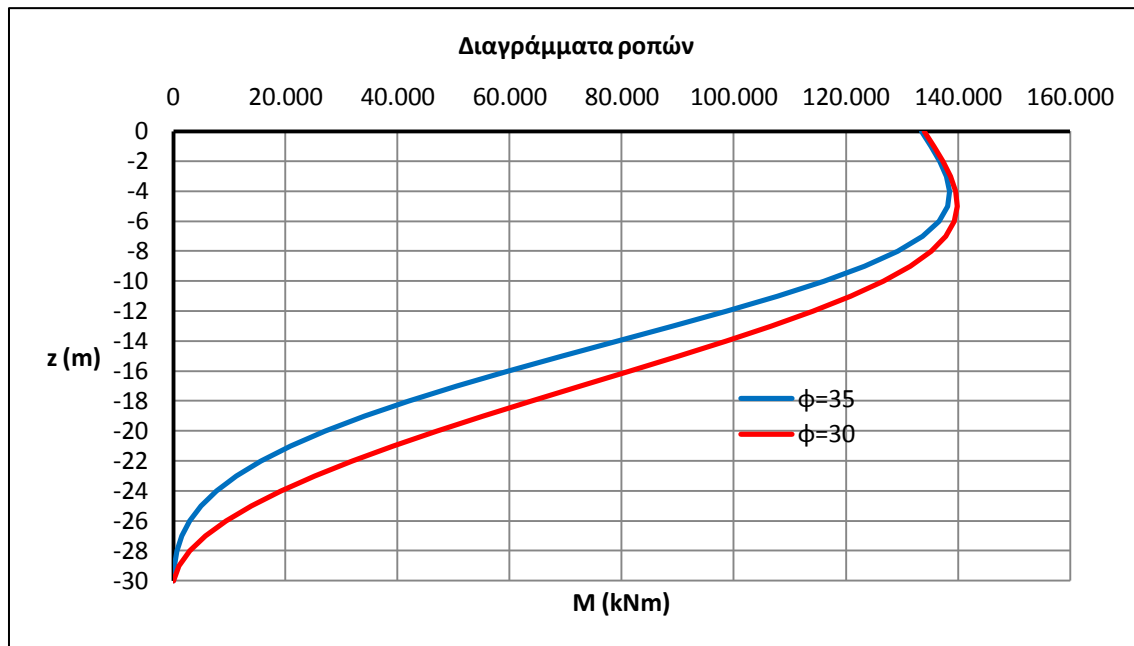
Σχήμα 5.84 – Μετακινήσεις στη κορυφή του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.84) προκύπτει πως η μετατόπιση της κορυφής του πύργου αυξάνεται καθώς μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους, από 282cm για $\phi=35^\circ$ σε 297cm για $\phi=30^\circ$.



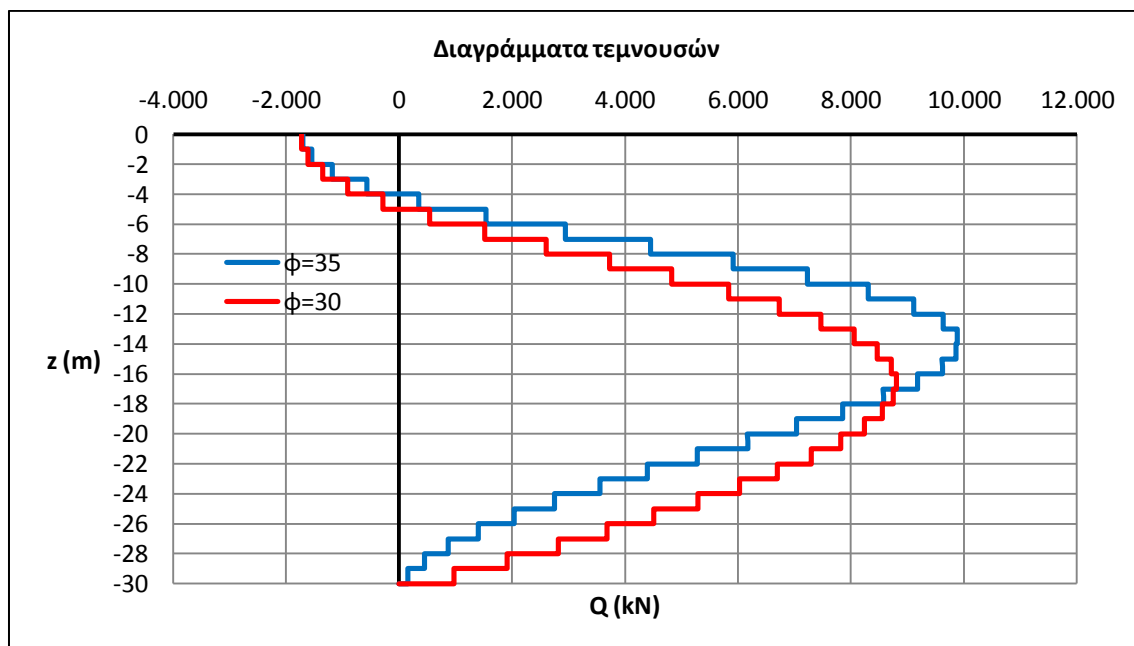
Σχήμα 5.85 – Αντιδράσεις μη-γραμμικών ελατηρίων

Όπως προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.85) η φέρουσα ικανότητα του εδάφους με εσωτερική γωνία τριβής $\phi=35^\circ$ είναι μεγαλύτερη από αυτή με εσωτερική γωνία τριβής $\phi=30^\circ$. Αυτό είναι φυσικά αφού όσο μεγαλύτερη είναι η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους τόσο μεγαλύτερη είναι η σχετική του πυκνότητα και άρα τόσο καλύτερο το έδαφος θεμελιώσεως. Προκύπτει επίσης πως στα πρώτα μέτρα της θεμελίωσης του πασσάλου εξαντλείται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους και για τις σχετικές πυκνότητες εδάφους, μιας και οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων ταυτίζονται με τις καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται σε αυτή τη περιοχή μια πλαστική ζώνη μέσα στο έδαφος. Παρατηρούμε επίσης πως καθώς μειώνεται η σχετική πυκνότητα του εδάφους, το σημείο περιστροφής του πασσάλου μέσα στο έδαφος μετατοπίζεται πιο βαθιά από τα 14m στα 16m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας (μηδενική αντίδραση ελατηρίου σημαίνει και μηδενική μετατόπιση του πασσάλου σε αυτή τη θέση). Είναι προφανές πως για εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους $\phi=30^\circ$ οι αντιδράσεις των ελατηρίων κοντά στην αιχμή του πασσάλου είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αντιδράσεις αιχμής για $\phi=35^\circ$. Αυτό προκύπτει διότι στη περίπτωση του λιγότερου δύσκαμπτου εδάφους (αυτό που έχει μικρότερη εσωτερική γωνία τριβής) το έδαφος δεν είναι αρκετά σκληρό ώστε να εμποδίσει τη παραμόρφωση του πασσάλου στην αιχμή του και ουσιαστικά να τον πακτώσει. Προκύπτουν έτσι μεγάλες μετατοπίσεις του πασσάλου και άρα και μεγάλες αντιδράσεις ελατηρίων στην αιχμή του πασσάλου. Αυτό μαρτυρά πως όσο χειρότερη είναι η ποιότητα του εδάφους (δηλαδή όσο πιο μικρή είναι η σχετική του πυκνότητα) τόσο πιο μεγάλο είναι το απαιτούμενο μήκος θεμελιώσεως του πασσάλου.



Σχήμα 5.86 – Διαγράμματα ροπών κατά μήκος του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.86) προκύπτει πως οι ροπές που αναπτύσσονται κατά μήκος του πασσάλου στη περίπτωση του εδάφους με μικρότερη σχετική πυκνότητα ($\phi=30^\circ$) είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες ροπές στη περίπτωση του εδάφους μεγαλύτερης πυκνότητας ($\phi=35^\circ$). Παρατηρούμε πως στη περίπτωση που το έδαφος έχει μικρότερη σχετική πυκνότητα το "σβήσιμο" της ροπής στην αιχμή του πασσάλου είναι αρκετά απότομο πράγμα που καταδεικνύει ότι όσο χειρότερο είναι το έδαφος τόσο πιο μεγάλο είναι το απαιτούμενο μήκος θεμελιώσεως του πασσάλου.



Σχήμα 5.87 – Διαγράμματα τεμνουσών κατά μήκος του πασσάλου

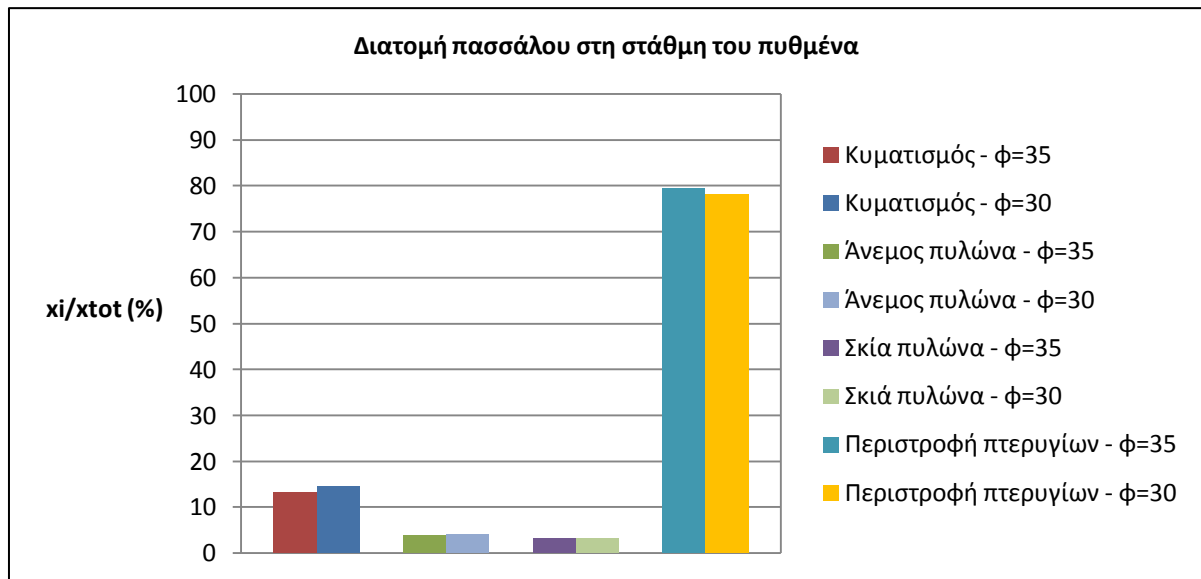
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.87) συμπεραίνει κανείς πως η μέγιστη τέμνουσα κατά μήκος του πασσάλου προκύπτει για το έδαφος με τη μεγαλύτερη σχετική πυκνότητα.

Επιβεβαιώνεται επίσης πως στη περίπτωση του εδάφους με εσωτερική γωνία τριβής $\phi=35^\circ$ το σημείο περιστροφής του πασσάλου είναι 14m κάτω από τον πυθμένα, ενώ στη περίπτωση όπου $\phi=30^\circ$ το σημείο περιστροφής του πασσάλου είναι περίπου 2m βαθύτερα (το πλάτος του "πηδήματος" του διαγράμματος των τεμνουσών που γίνεται ανά ένα μέτρο ισούται με την αντίδραση του μη-γραμμικού ελατηρίου που υπάρχει στο αντίστοιχο υψόμετρο). Μηδενικό πλάτος σημαίνει και μηδενική αντίδραση ελατηρίου που οδηγεί και σε μηδενική μετατόπιση του πασσάλου σε αυτό το σημείο. Είναι προφανές πως στο έδαφος με τη μικρότερη σχετική πυκνότητα ($\phi=30^\circ$) η τέμνουσα δύναμη που αναπτύσσεται κοντά στην αιχμή του πασσάλου είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης τέμνουσα για $\phi=35^\circ$. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις μεγαλύτερες αντιδράσεις ελατηρίων κοντά στην αιχμή του πασσάλου για το έδαφος με εσωτερική γωνία τριβής $\phi=30^\circ$. Τέλος γίνεται αντιληπτό πως στη περιοχή μέγιστου βάθους θεμελιώσεως η τέμνουσα του πασσάλου είναι αρκετά μεγάλη στη περίπτωση του εδάφους με $\phi=30^\circ$ κάτι που επιβεβαιώνει ότι το βάθος θεμελιώσεως του πασσάλου αυτής της περίπτωσης δεν επαρκεί.



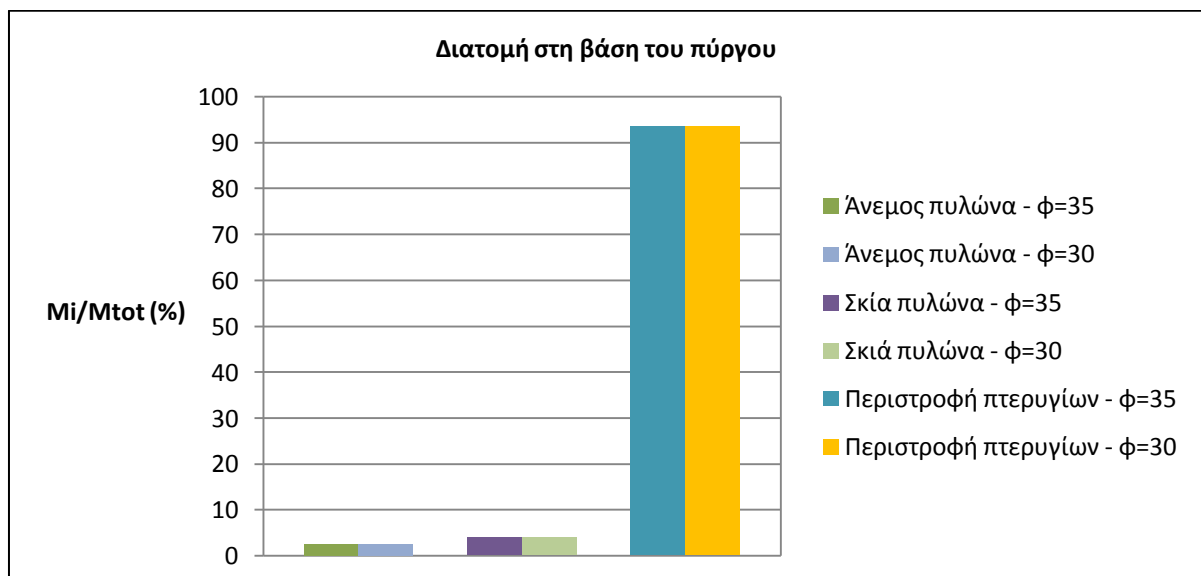
Σχήμα 5.88 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.88) προκύπτει πως και για τις δύο περιπτώσεις εδαφών τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 12% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 4% (και για τα δύο εδάφη) και του φορτίου του ανέμου στη σκία των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3,5% (και για τα δύο εδάφη). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πασσάλου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 79% και για τις δύο σχετικές πυκνότητες εδάφους.



Σχήμα 5.89 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της διατομής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

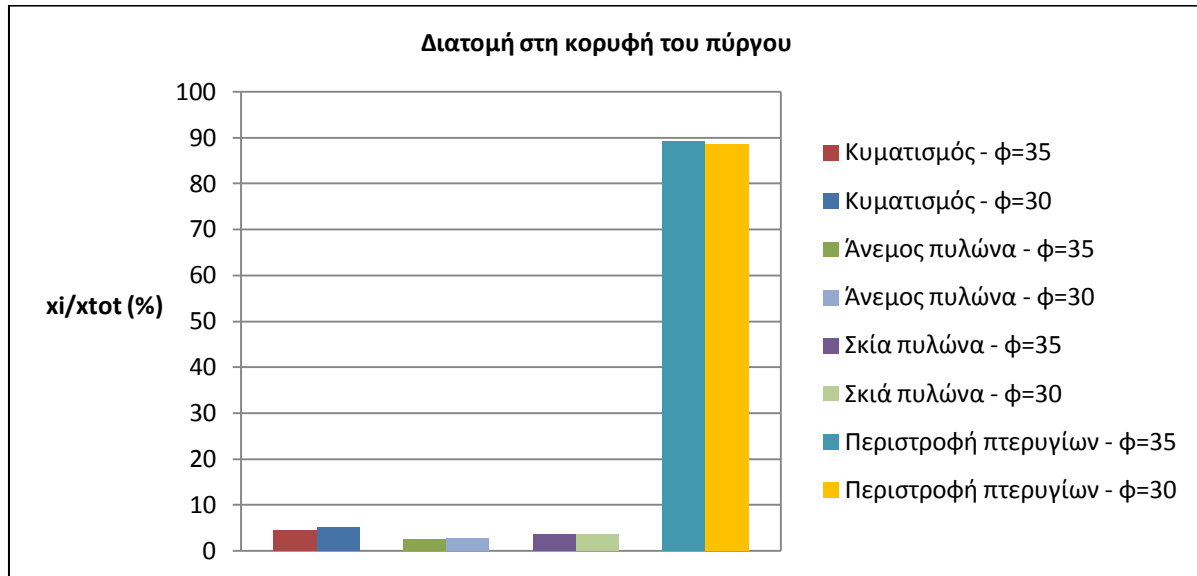
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.89) προκύπτει πως και για τα δύο είδη εδαφών (30° και 35°) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 14% στη συνολική μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση του πασσάλου με ποσοστό 4% (και για τα δύο εδάφη) και του φορτίου του ανέμου στη σκία των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3% (και για τα δύο είδη εδαφών). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 79% και για τα δύο εδάφη.



Σχήμα 5.90 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή της βάσης του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.90) προκύπτει πως και για τα δύο είδη εδαφών τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση της βάσης του πύργου είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας αποτελεί περίπου το

2,5% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο της βάσης του πύργου. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 4% της συνολικής φόρτισης (και για τα δύο εδάφη). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πύργου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 93% και για τα δύο εδάφη.



Σχήμα 5.91 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της κορυφής του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.91) προκύπτει πως και για τα δύο εδάφη δεν διαφέρουν τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλλει κατά 5% στη συνολική μετατόπιση της κορυφής. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση της κορυφής με ποσοστό 2,5% (και για τα δύο εδάφη) και του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3,5% (και για τα δύο εδάφη). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 89% και για τα δύο είδη εδαφών.

5.2.6 Μεταβολή του υψομέτρου του άξονα του δρομέα

Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας παίρνει τις εξής τιμές:

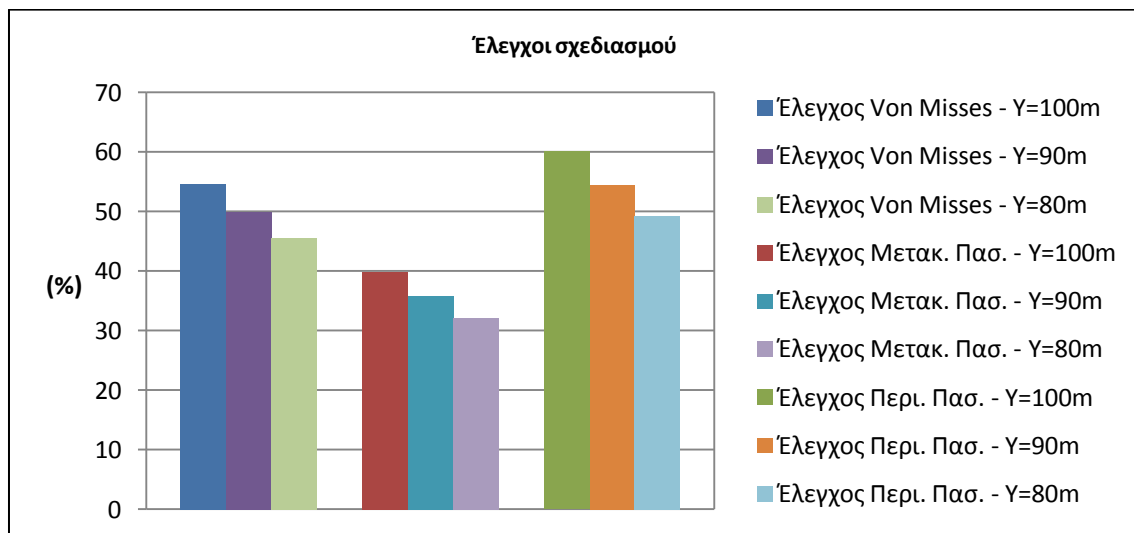
1. $L_2=100\text{m}$ πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
2. $L_2=90\text{m}$ πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
3. $L_2=80\text{m}$ πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

1. Μήκος έμπηξης πασσάλου $L_1=25\text{m}$
2. Διάμετρος πασσάλου $D=4,0\text{m}$
3. Πάχος τοιχωμάτων πασσάλου $t=0,08\text{m}$

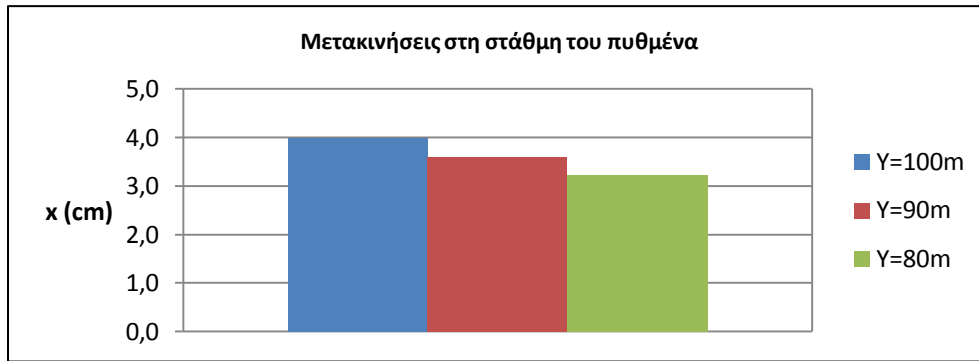
4. Το έδαφος προσομοιώνεται με μη-γραμμικά ελατήρια
5. Εσωτερική γωνία τριβής $\phi=35^\circ$

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου, ο έλεγχος μέγιστης μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα και ο έλεγχος μέγιστης περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα για τις διάφορες τιμές του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Προβάλλονται επίσης οι μετακινήσεις τις κατασκευής στη στάθμη του πυθμένα, στη βάση και στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς μεταβάλλεται το μήκος του πύργου της κατασκευής. Επίσης παρουσιάζονται οι αντιδράσεις των ελατηρίων και τα διαγράμματα ροπών και τεμνουσών κατά μήκος του πασσάλου για τις διάφορες τιμές του μήκους του πύργου. Τέλος προβάλλονται για δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας (100m και 90m πάνω από της επιφάνεια της θάλασσας) τα ποσοστά συμβολής της κάθε φόρτισης ξεχωριστά, στα εντατικά μεγέθη και τις μετατοπίσεις του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 5.92 – Έλεγχοι σχεδιασμού πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.92) προκύπτει πως η καταπόνηση της κατασκευής μεταβάλλεται σημαντικά καθώς αλλάζει το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Συγκεκριμένα όταν το υψόμετρο του άξονα του δρομέα είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, η καταπόνηση του πασσάλου αγγίζει το 54% αντοχής του, όταν είναι 90m πάνω από τη επιφάνεια το 50% ενώ όταν ο άξονας του δρομέα είναι 80m πάνω από της επιφάνεια της θάλασσας η καταπόνηση του πασσάλου αγγίζει το 46% της αντοχής του. Η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται σημαντικά από το 40% στο 36% και από εκεί στο 32% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς μειώνεται το υψόμετρο του άξονα του δρομέα από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 90m και από εκεί στα 80m. Τέλος η περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται σημαντικά από το 60% στο 54% και από εκεί στο 49% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς μειώνεται το υψόμετρο του άξονα του δρομέα από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 90m και από εκεί στα 80m.



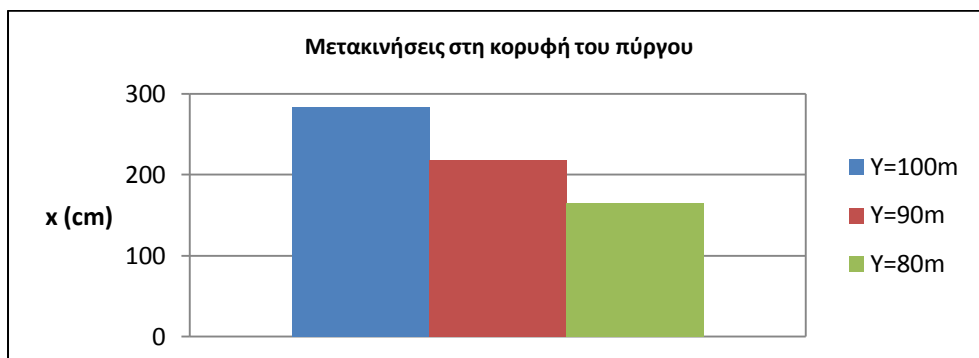
Σχήμα 5.93 – Μετακινήσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.93) είναι προφανές πως η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται από τα 4,0cm στα 3,6cm και από εκεί στα 3,2cm καθώς μειώνεται το υψόμετρο του άξονα του δρομέα από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 90m και από εκεί στα 80m.



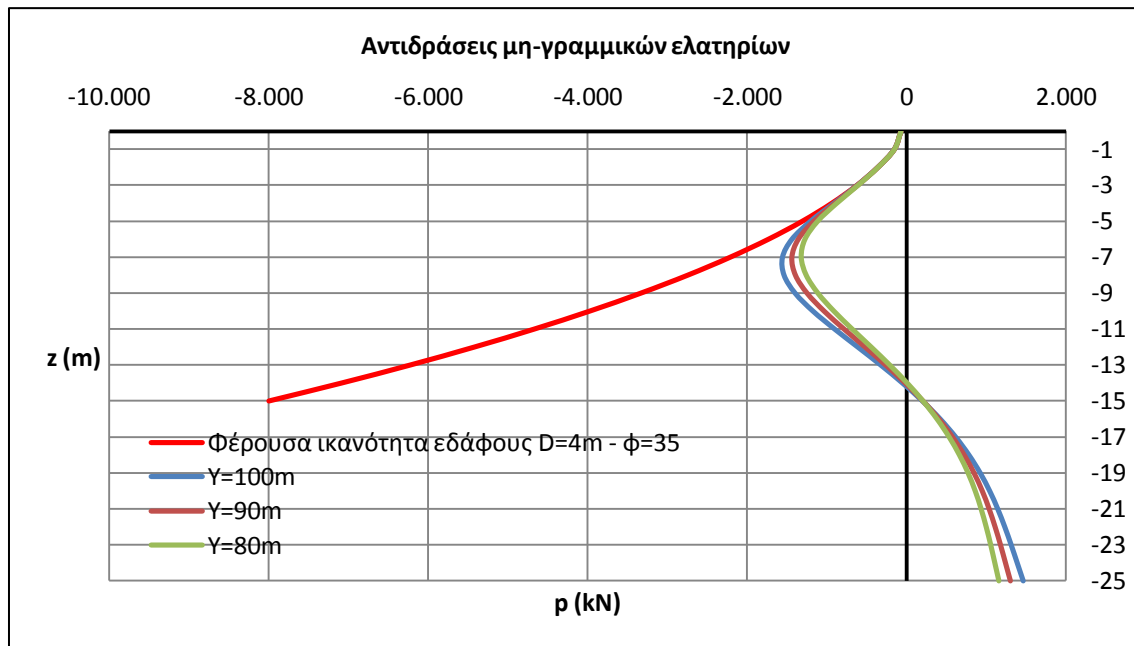
Σχήμα 5.94 – Μετακινήσεις στη βάση του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.94) προκύπτει πως η μετατόπιση της βάσης του πύργου μειώνεται από τα 39,7cm στα 35,8cm και από εκεί στα 32,2cm καθώς μειώνεται το υψόμετρο του άξονα του δρομέα από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 90m και από εκεί στα 80m.



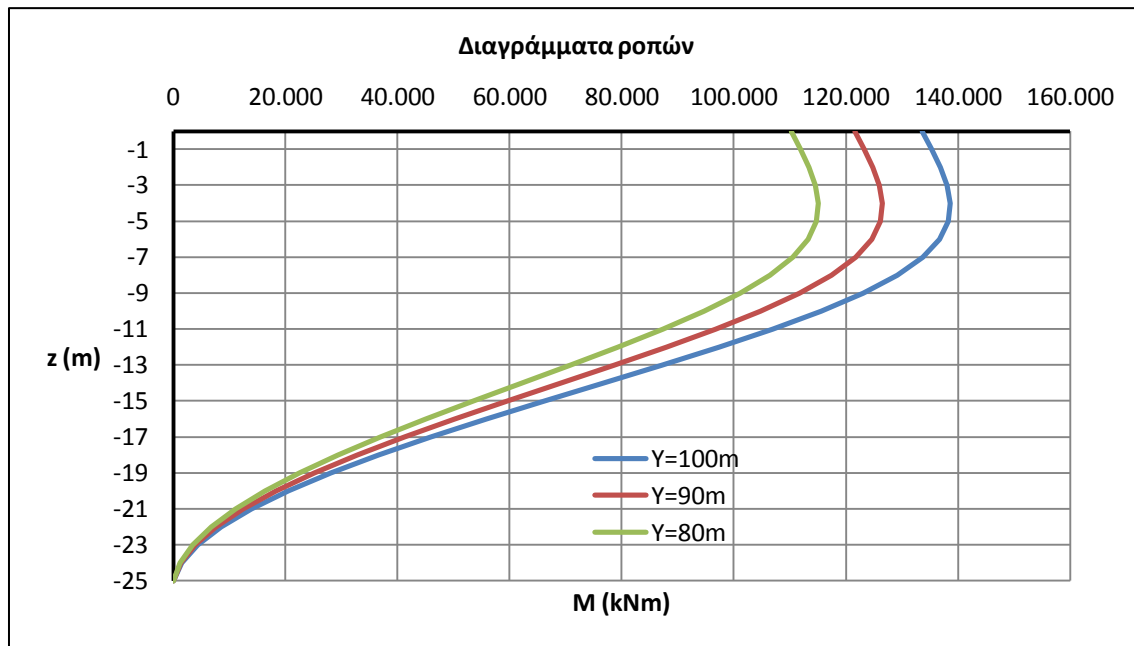
Σχήμα 5.95 – Μετακινήσεις στη κορυφή του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.95) προκύπτει πως η μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής μειώνεται σημαντικά από τα 2,83m στα 2,18m και από εκεί στα 1,65m καθώς μειώνεται το υψόμετρο του άξονα του δρομέα από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 90m και από εκεί στα 80m.



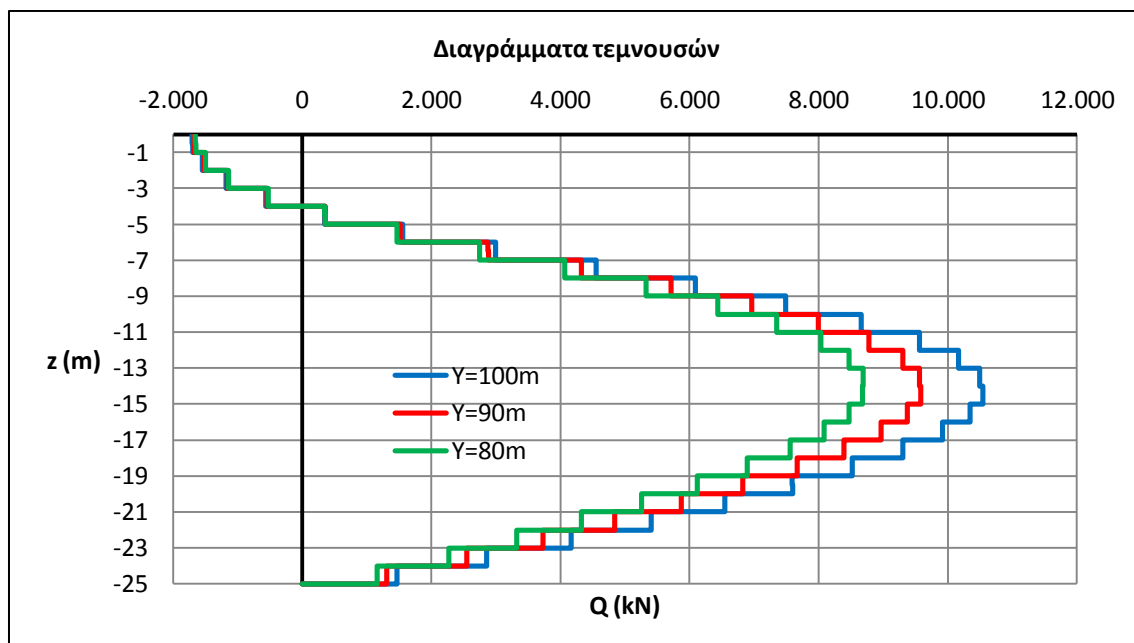
Σχήμα 5.96 – Αντιδράσεις μη-γραμμικών ελατηρίων

Από το Σχήμα 5.96 προκύπτει πως στα πρώτα μέτρα της θεμελίωσης του πασσάλου εξαντλείται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους και για τα τρία υψόμετρα του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας, μιας και οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων ταυτίζονται με την καμπύλη που αντιπροσωπεύει τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται σε αυτή τη περιοχή μια πλαστική ζώνη μέσα στο έδαφος. Παρατηρούμε επίσης πως και για τα τρία υψόμετρα του άξονα του δρομέα, στο βάθος $z=-14\text{m}$ κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, η αντίδραση των ελατηρίων είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει λόγω της μηδενικής μετατόπισης του πασσάλου σε αυτό το σημείο από την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση. Μπορούμε δηλαδή να συμπεράνουμε πως 14m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας είναι το σημείο περιστροφής του πασσάλου μέσα στο έδαφος και για τις τρεις περιπτώσεις. Εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως όσο πιο μικρό είναι το μήκος του πύργου (δηλαδή όσο πιο χαμηλό είναι το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας) τόσο πιο μικρές είναι οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων. Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως και για τα τρία υψόμετρα του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας το μήκος έμπηξης του πασσάλου δεν επαρκεί αφού οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων στην αιχμή του πασσάλου είναι μεγάλες με αποτέλεσμα και τα εντατικά του μεγέθη σε αυτό το σημείο να είναι σημαντικά.



Σχήμα 5.97 – Διαγράμματα ροπών κατά μήκος του πασσάλου

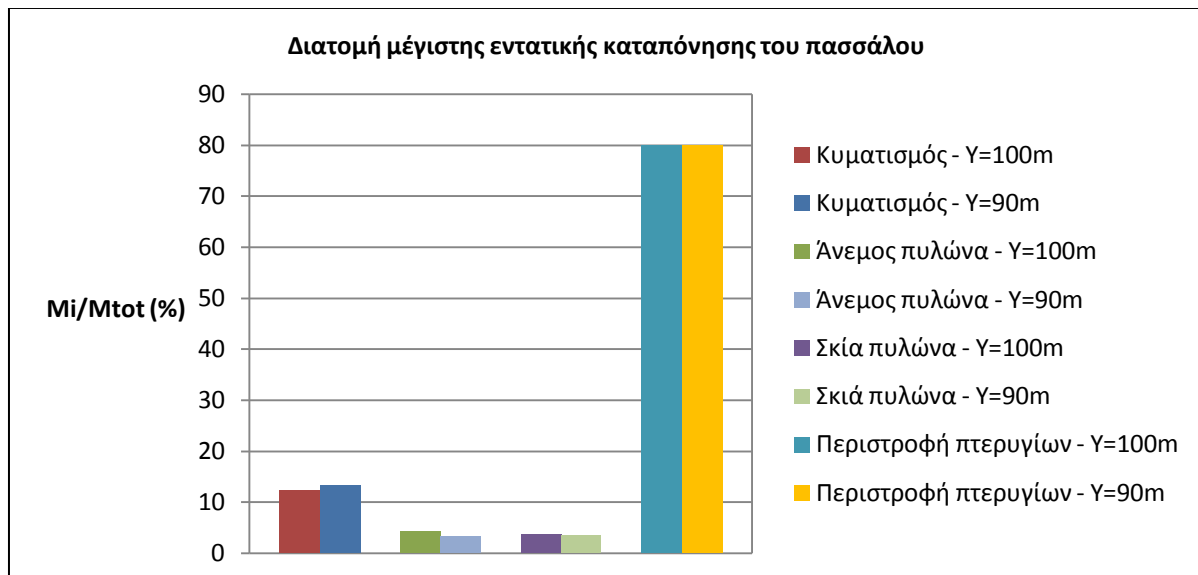
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.97) προκύπτει πως όσο μια χαμηλό είναι το υψόμετρο του άξονα του δρομέα τόσο πιο μικρή ροπή αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου. Διαπιστώνουμε ότι και για τα τρία υψόμετρα του άξονα του δρομέα το “σβήσιμο” των ροπών στο μέγιστο βάθος έμπηξης είναι απότομο. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε πως και στις τρεις περιπτώσεις το μήκος θεμελίωσης των 25m δεν επαρκεί και πρέπει να αυξηθεί.



Σχήμα 5.98 – Διαγράμματα τεμνουσών κατά μήκος του πασσάλου

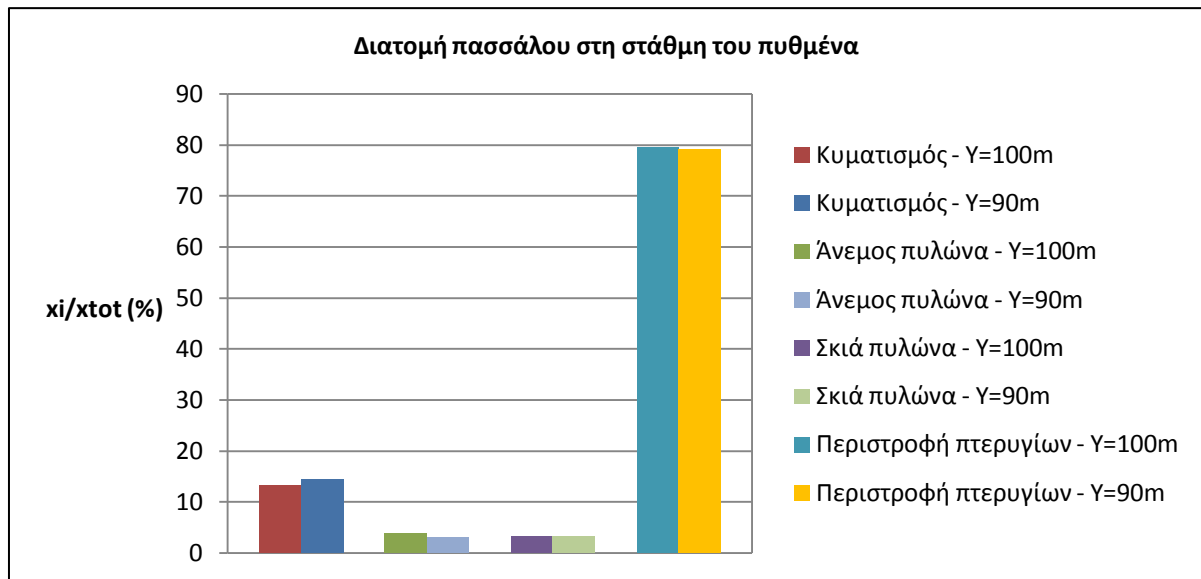
Από τα παραπάνω διαγράμματα τεμνουσών (Σχήμα 5.98) εύκολα μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι όσο πιο μεγάλο είναι το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας τόσο πιο μεγάλες είναι οι τέμνουσες δυνάμεις που αναπτύσσονται σε

αυτόν. Στα μικρότερα υψόμετρα του άξονα οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων είναι μικρότερες (το πλάτος του “πηδήματος” του διαγράμματος των τεμνουσών που γίνεται ανά ένα μέτρο ισούται με την αντίδραση του μη-γραμμικού ελατηρίου που υπάρχει στο αντίστοιχο υψόμετρο). Επιβεβαιώνεται επίσης πως και στις τρεις περιπτώσεις το σημείο περιστροφής του πασσάλου είναι 14m κάτω από τον πυθμένα (το πλάτος του “πηδήματος” του διαγράμματος των τεμνουσών που γίνεται ανά ένα μέτρο ισούται με την αντίδραση του μη-γραμμικού ελατηρίου που υπάρχει στο αντίστοιχο υψόμετρο). Μηδενικό πλάτος σημαίνει και μηδενική αντίδραση ελατηρίου που οδηγεί και σε μηδενική μετατόπιση του πασσάλου σε αυτό το σημείο. Τέλος, προκύπτει ότι όσο πιο μεγάλο είναι το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας τόσο μεγαλύτερες είναι οι αντιδράσεις των ελατηρίων (μεγαλύτερα “πηδήματα”) κοντά στην αιχμή του πασσάλου με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται σε αυτή τη περιοχή μεγαλύτερες τέμνουσες δυνάμεις και ουσιαστικά να μην γίνεται ομαλή απομείωση των εντατικών μεγεθών στην άκρη του πασσάλου.



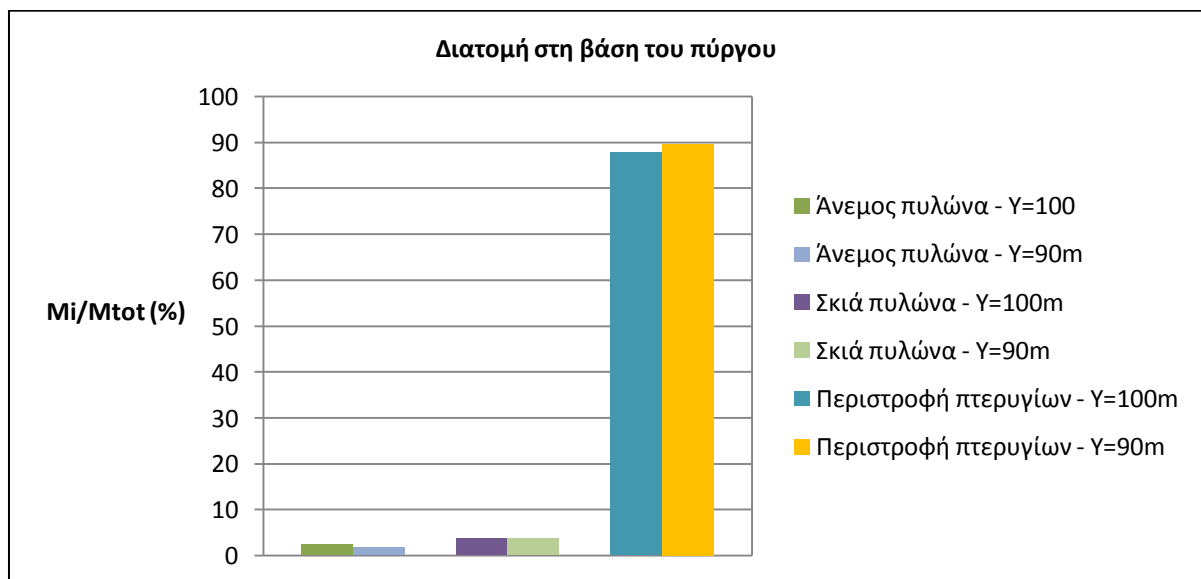
Σχήμα 5.99 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.99) προκύπτει πως και για τα δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα (100m και 90m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση του πασσάλου είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 13% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 4% (και για τα δύο υψόμετρα) και του φορτίου του ανέμου στη σκία των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 4% (και για τα δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πασσάλου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 80% και για τα δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 5.100 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της διατομής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

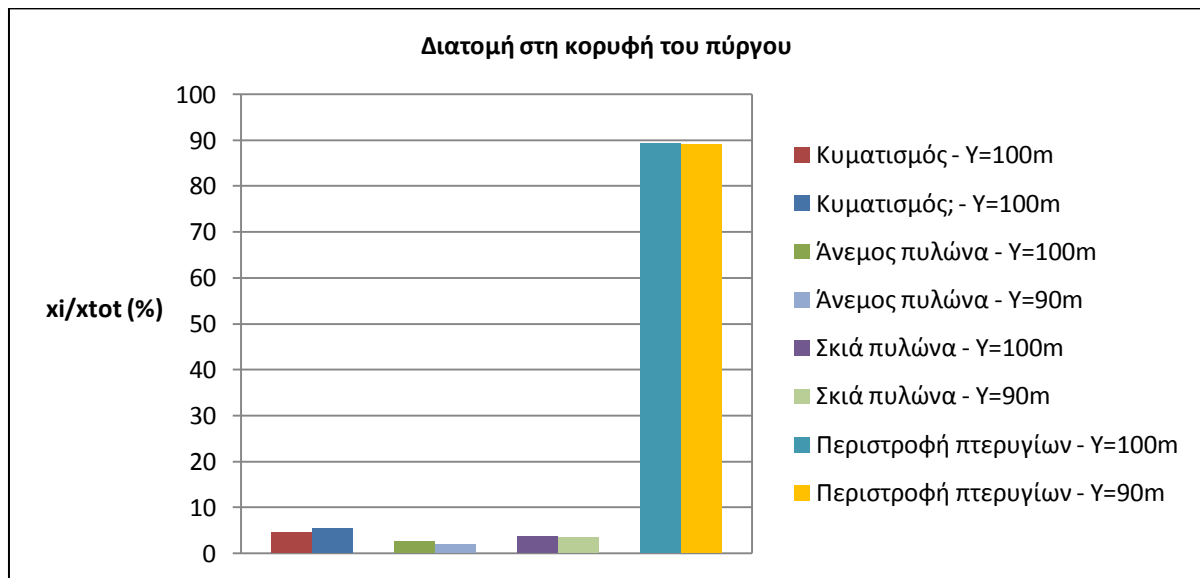
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.100) προκύπτει πως και για τα δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα (100m και 90m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 14% στη συνολική μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση του πασσάλου με ποσοστό 3,5% (και για τα δύο υψόμετρα του άξονα) και του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3% (και για τα υψόμετρα του άξονα). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 79% και για τα δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 5.101 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή της βάσης του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.101) προκύπτει πως και για τα δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα (100m και 90m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική

καταπόνηση της βάσης του πύργου είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας αποτελεί περίπου το 2% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο της βάσης του πύργου. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 4% της συνολικής φόρτισης (και για τα δύο υψόμετρα του άξονα). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πύργου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 88% για υψόμετρο άξονα δρομέα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και 90% για υψόμετρο άξονα 90m πάνω από την επιφάνεια.



Σχήμα 5.102 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της κορυφής του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 5.102) προκύπτει πως και για τα δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα (100m και 90m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 5% στη συνολική μετατόπιση της κορυφής. Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση της κορυφής με ποσοστό 2,5% (για τα δύο υψόμετρα του άξονα) και του φορτίου του ανέμου στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 3,5% (για τα δύο υψόμετρα του άξονα). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 89% για τα δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας.

Βιβλιογραφία

- [5.1] Final report WP 4.2 – Support Structure Concepts for Deep Water Sites, Wybren de Vries, Delf University of Technology
- [5.2] www.vestas.com
- [5.3] www.vestas.com
- [5.4] OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures, September 2011, Sec. 3 – B504 - Page 40
- [5.5] Final report WP 4.2 – Support Structure Concepts for Deep Water Sites, Wybren de Vries, Delf University of Technology

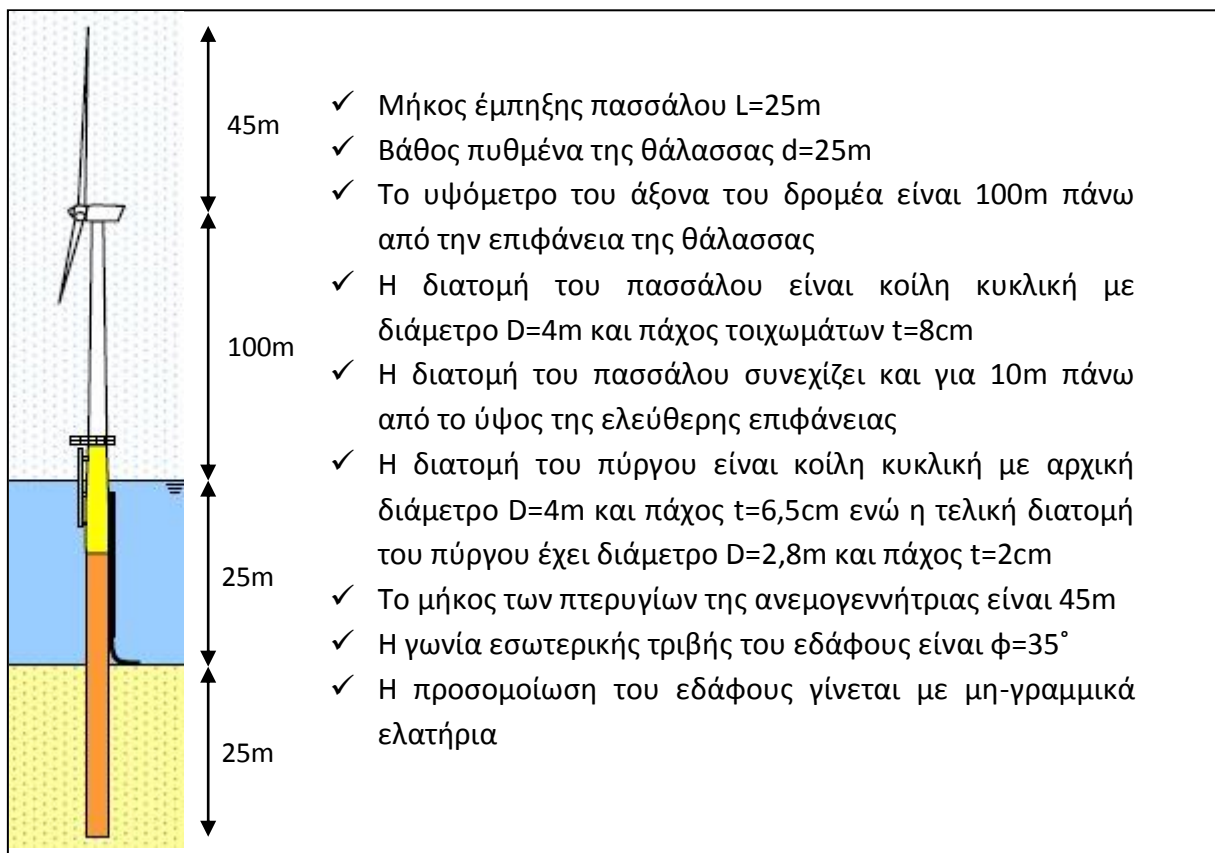
Κεφάλαιο 6^ο

Δυναμικές επιλύσεις θαλάσσιας ανεμογεννήτριας

6.1 Μεμονωμένη δοκιμή δυναμικής ανάλυσης ανεμογεννήτριας

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η διαδικασία εύρεσης των υδροδυναμικών και αεροδυναμικών φορτίων που ασκούνται στη κατασκευή, ο τρόπος προσομοίωσης του φορέα και του περιβάλλοντος εδάφους αλλά και οι έλεγχοι λειτουργικότητας και αστοχίας της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας. Σε αυτό το σημείο τα υδροδυναμικά και τα αεροδυναμικά φορτία που ασκούνται στη κατασκευή επιβάλλονται σαν δυναμικά φορτία.

6.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και προσομοίωση κατασκευής



Σχήμα 6.1 – Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοίωσης της κατασκευής [6.1]

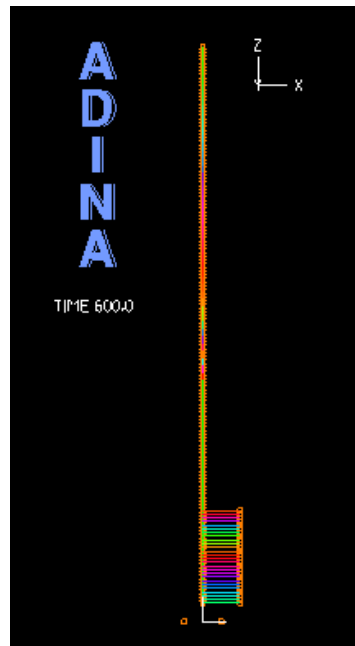
Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 6.1) παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εδάφους της δυναμικής ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί σε αυτή τη παράγραφο.

Για την προσομοίωση και της επίλυση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA 8.5.2 (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis).

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω προσομοίωμα της κατασκευής ο πάσσαλος που αποτελεί ταυτόχρονα την θεμελίωση αλλά και τον φορέα στήριξης της κατασκευής είναι σταθερής κοίλης κυκλικής διατομής με διάμετρο $D=4\text{m}$ και πάχος τοιχωμάτων $t=8\text{cm}$. Το μήκος έμπηξης του πασσάλου μέσα στο πυθμένα της θάλασσας είναι $L=25\text{m}$ ενώ το βάθος της θάλασσας στη συγκεκριμένη τοποθεσία είναι $d=25\text{m}$. Στη προσομοίωση της κατασκευής δεν έχει ληφθεί υπόψη το κομμάτι μετάβασης το οποίο ουσιαστικά εξασφαλίζει τη σύνδεση μεταξύ του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας. Στη περίπτωση μας η διατομή του πασσάλου συνεχίζει για 10m πάνω από την επιφάνεια της ελεύθερης επιφάνειας, ύψος στο οποίο σταματά και αρχίζει ταυτόχρονα η διατομή του πύργου της ανεμογεννήτριας. Ο πύργος της ανεμογεννήτριας έχει μήκος 90m ενώ το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η διατομή του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι κοίλη κυκλική και μειώνεται αναλογικά με το ύψος. Στα πλαίσια της εργασίας έχει επιλεγεί η διατομή του πύργου να μειώνεται γραμμικά ανά 2m ξεκινώντας από αρχική διάμετρο $D=4\text{m}$ με πάχος τοιχωμάτων $6,5\text{cm}$ καταλήγοντας σε διάμετρο $D=2,8\text{m}$ με πάχος $t=2\text{cm}$. Το έδαφος θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας έχει χαρακτηριστικά μη-συνεκτικού εδάφους με γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=35^\circ$ ενώ θεωρούμε ενιαίο εδαφικό προφίλ για όλο το βάθος έμπηξης του πασσάλου.

Στα πλαίσια της εργασίας ο τύπος της ανεμογεννήτριας που επιλέγεται είναι Vestas V90-3.0MW Offshore. Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τύπου ανεμογεννήτριας είναι αυτά που παρουσιάστηκαν και στην περίπτωση της μεμονωμένης στατικής επίλυσης της ανεμογεννήτριας.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.2) απεικονίζεται η προσομοίωση του φορέα της ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina.



Σχήμα 6.2 – Προσομοίωση της κατασκευής στο πρόγραμμα Adina

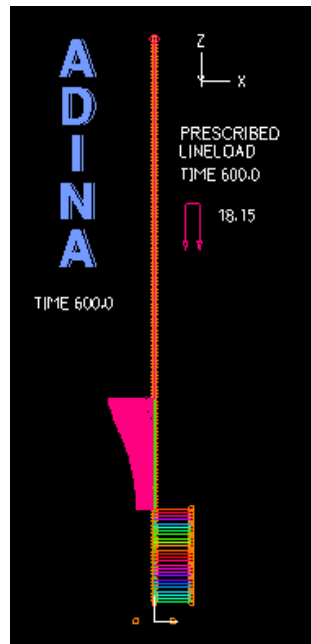
Κατά τη διεύθυνση z η συνοριακή συνθήκη που έχει επιβληθεί στην κατασκευή είναι ο περιορισμός μετακίνησης της κορυφής του πασσάλου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (η κορυφή του πασσάλου δεσμεύεται με άρθρωση κατά τον άξονα z) αφού η πλευρική τριβή που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου είναι αρκετά μεγάλη και άρα οι καθιζήσεις της κατασκευής είναι ελάχιστες. Στη περίπτωση του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι τύπου "Beam Elements" και έχουν μήκος 0,5m.

6.1.2 Υδροδυναμικό φορτίο

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν μια μεμονωμένη δοκιμή εύρεσης του υδροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος ενός κυλινδρικού πασσάλου με τα παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Σε αυτό το κεφάλαιο το υδροδυναμικό φορτίο ασκείται σαν δυναμική φόρτιση στη κατασκευή. Η διάρκεια της υδροδυναμικής φόρτισης, όπως και όλων των φορτίων που ασκούνται στη κατασκευή, είναι 600sec.

Ο προσομοίωση του υδροδυναμικού φορτίου στο πρόγραμμα Adina, μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.3).



Σχήμα 6.3 – Προσομοίωση υδροδυναμικού φορτίου στο πρόγραμμα Adina

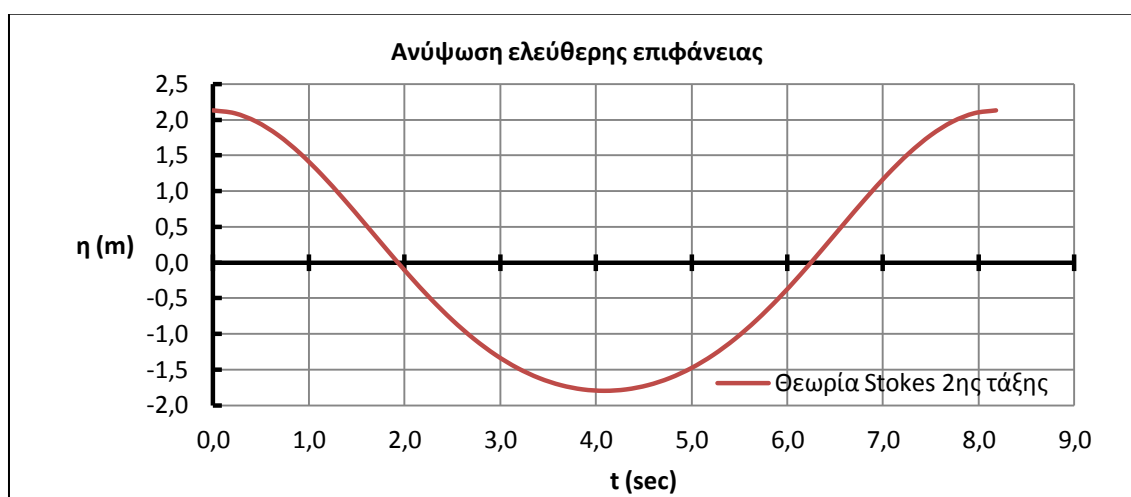
Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Σχήμα 6.4) με τις κυριότερες τιμές των παραμέτρων, που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εύρεσης της υδροδυναμικής φόρτισης. Αρχικά παρουσιάζονται οι τιμές των πέντε παραμέτρων που επιλέχθηκαν. Σαν μέση ταχύτητα του ανέμου σε υψόμετρο 10m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας έχει επιλεγεί αυτή των 18m/s, η οποία προκύπτει αν στο προφίλ της μέσης ταχύτητας του ανέμου απαιτήσουμε μέση ταχύτητα ανέμου 25m/s στο υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Υπενθυμίζεται ότι ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννήτριας παράγει τη μέγιστη ενέργεια για ταχύτητα ανέμου 25m/s ενώ πάνω από αυτή την ταχύτητα διακόπτεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

W (m/s)	18	W - Ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας
F (m)	200.000	F - Μήκος αναπτύγματος του κυματισμού
t_d (hours)	100	t_d - Διάρκεια πνοής του ανέμου
D (m)	4,0	D - Διάμετρος πασσάλου
d (m)	25,00	d - Βάθος πυθμένα
Πρόβλεψη παραμέτρων χαρακτηριστικού κύματος με τη μέθοδο SMB		
Ο κυματισμός είναι περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος		
H_s (m)	4,21	H_s - Χαρακτηριστικό ύψος κυματισμού
T_s (s)	8,18	T_s - Χαρακτηριστική περίοδος κυματισμού
Προσδιορισμός χαρακτηριστικών κυματισμού		
d (m)	25	d - Βάθος πυθμένα
H_o=H_s (m)	4,21	H_o - Ύψος κύματος στα βαθιά
T = T_s (s)	8,18	T - Περίοδος κύματος
L_o (m)	104,4	L_o - Μήκος κύματος στα βαθιά
d/L_o	0,239	d/L_o - Σχετικό βάθος νερού
L/L_o	0,913	
H/H_o	0,000	
L (m)	95,33	L - Μήκος κύματος (που φτάνει στο έργο)
H (m)	3,93	H - Ύψος κύματος (που φτάνει στο έργο)
T (s)	8,18	T - Περίοδος κύματος

Κινηματική θεωρία κυματισμού		
d/L	0,262	d/L - Σχετικό βάθος νερού
Θεωρία Κυματισμού:		Stokes 2ης Τάξης
Κινηματικές Παραμετροί που αντιστοιχούν σε :		Ενδιάμεσα νερά
Χαρακτηριστικά εξίσωσης Morison		
D (m)	4,0	D - Διάμετρος πασσάλου
H (m)	3,93	H - Ύψος κύματος (που φτάνει στο έργο)
H/D	0,98	
$u_{\max}$ (m/s)	2,01	$u_{\max}$ - μέγιστη οριζόντια ταχ. σωματιδίων ($t=0$) στην ελευ. επιφ. ($z=0m$)
ν (m ² /s)	$1,3 \cdot 10^{-6}$	ν - κινηματική συνεκτικότητα
T (s)	8,18	T - Περίοδος κύματος
R_e	$6,2 \cdot 10^6$	R_e - Αριθμός Reynolds
KC	4,10	KC - Αριθμός Keulegan-Carpenter
k (m)	0,05	k - τραχύτητα επιφάνειας
k/D	$1,3 \cdot 10^{-2}$	
C_{Ds}	1,05	C_{Ds} - Συντελεστής αντίστασης
KC/C_{Ds}	3,91	
$\psi(C_{Ds}, KC)$	0,671	
$C_D = C_{Ds} \cdot \psi$	0,704	C_D - Συντελεστής αντίστασης
C_M	1,952	C_M - Συντελεστής αδράνειας
A (m ²)	12,57	A - Εμβαδό διατομής πυλών
ρ (Mg/m ³)	1,0	ρ - Πυκνότητα νερού
$z_{\max}$ (m)	3,93	$z_{\max}$ - Μέγιστο ύψος κύματος

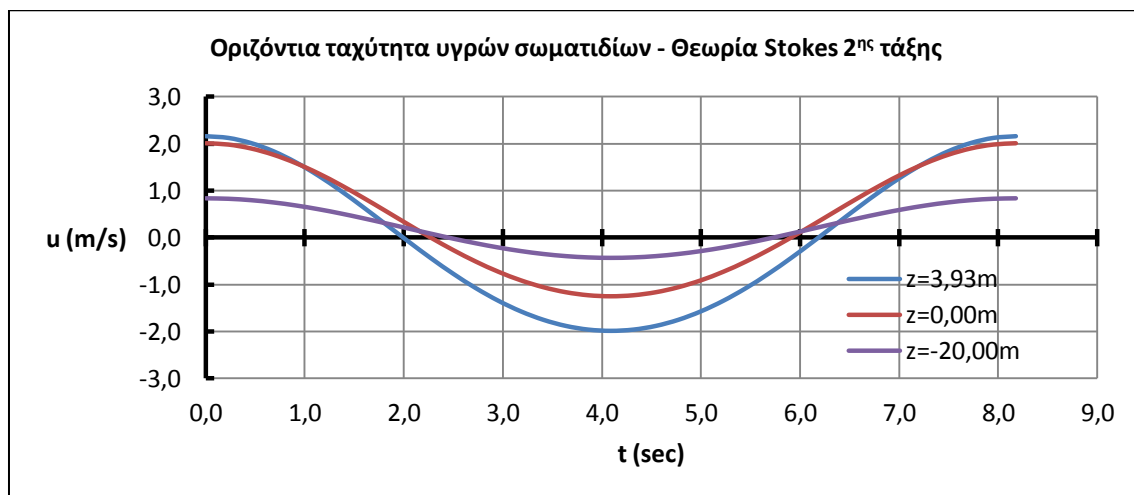
Σχήμα 6.4 – Τιμές των κυριότερων παραμέτρων του κυματισμού

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.5) παρουσιάζεται η ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας σύμφωνα με θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Το ύψος του κύματος είναι $H_s = 3,93m$. Όπως παρατηρούμε, το διάγραμμα δεν είναι συμμετρικό ως προς των άξονα της ελεύθερης επιφάνειας ($\eta=0,00m$) αφού στη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης υπάρχουν κάποιοι πρόσθετοι όροι οι οποίοι ουσιαστικά μετατοπίζουν το διάγραμμα προς τα πάνω. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος και στον κατακόρυφο το υψόμετρο της επιφάνειας.

Σχήμα 6.5 – Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

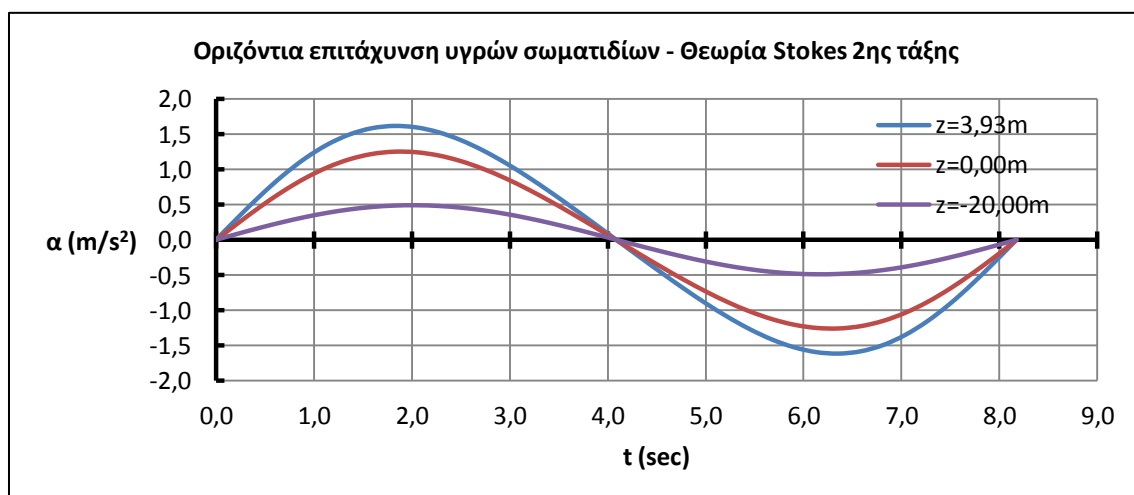
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.6) παρουσιάζεται συνοπτικά η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας των υγρών σωματιδίων σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, για διάφορα

υψόμετρα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Στη περίπτωση που βρισκόμαστε πάνω από το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας η ταχύτητα των υγρών σωματιδίων οφείλεται μόνο στη κίνηση των θαλασσίων κυμάτων και έτσι το διάγραμμα των ταχυτήτων είναι συμμετρικό ως προς τον οριζόντιο άξονα. Στη περίπτωση που βρισκόμαστε κάτω από το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας η ταχύτητα των υγρών σωματιδίων οφείλεται στη κίνηση των θαλασσίων κυμάτων και των θαλασσίων ρευμάτων και έτσι το διάγραμμα των ταχυτήτων είναι μετατοπισμένο προς τα πάνω. Παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στη κορυφή του κύματος τόσο μεγαλύτερο γίνεται το εύρος τιμών της ταχύτητας των υγρών σωματιδίων.



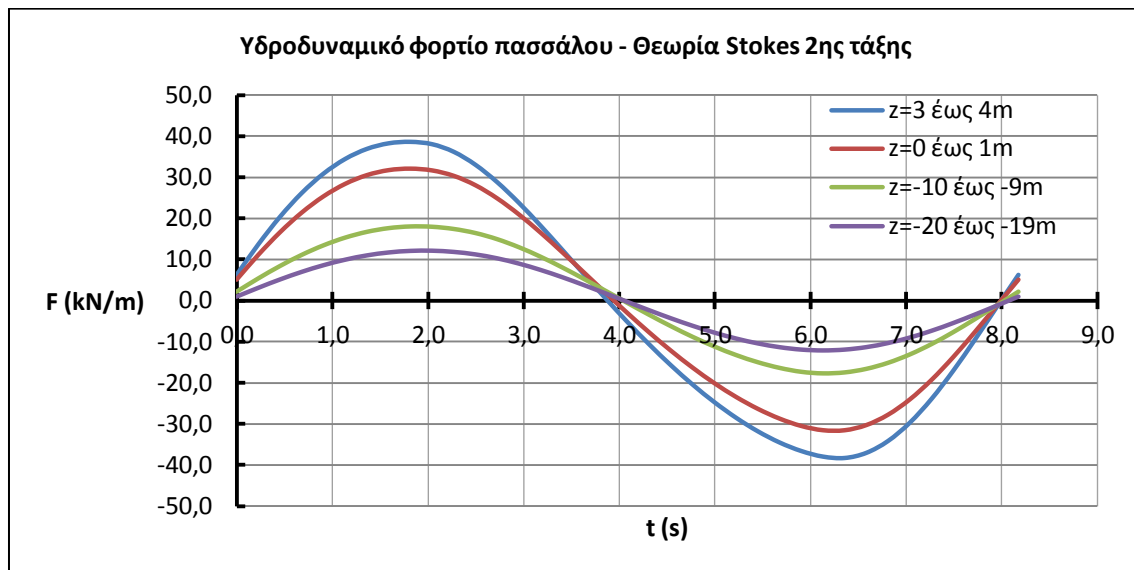
Σχήμα 6.6 – Οριζόντια ταχύτητα υγρών σωματιδίων για διάφορα ύψη σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.7) παρουσιάζεται συνοπτικά η οριζόντια συνιστώσα της επιτάχυνσης των υγρών σωματιδίων σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, για διάφορα υψόμετρα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Η επιτάχυνση των υγρών σωματιδίων οφείλεται μόνο στη κίνηση των θαλασσίων κυμάτων με αποτέλεσμα τα διαγράμματα των επιταχύνσεων να είναι συμμετρικά ως προς τον οριζόντιο άξονα. Παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στη κορυφή του κύματος τόσο μεγαλύτερο γίνεται το εύρος τιμών της επιτάχυνσης των υγρών σωματιδίων.



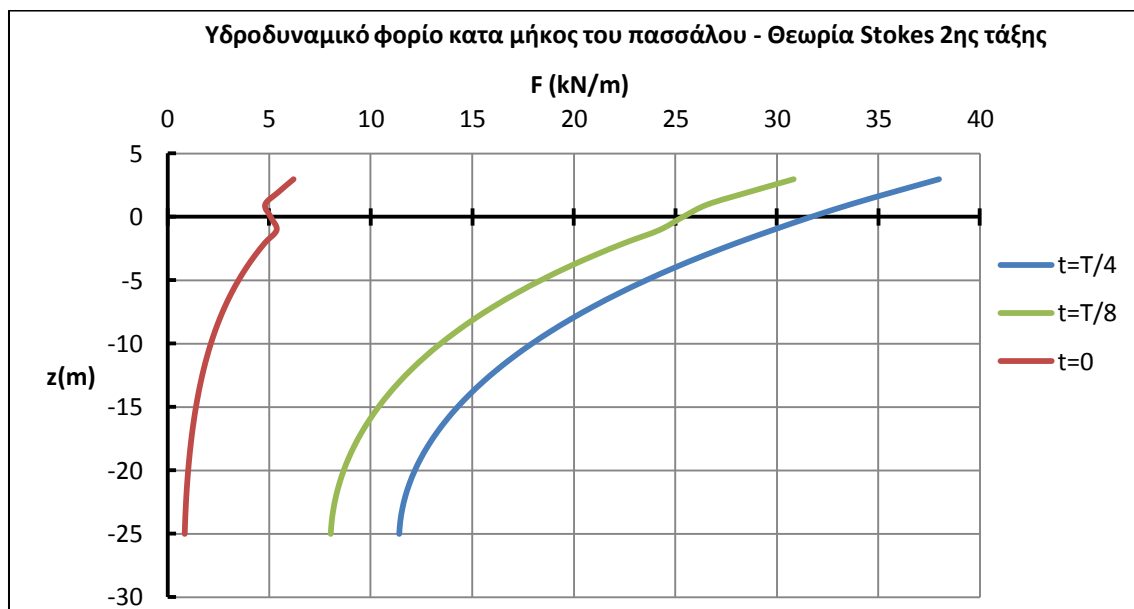
Σχήμα 6.7 – Οριζόντια επιτάχυνση υγρών σωματιδίων για διάφορα ύψη σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.8) παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται στο πάσσαλο στα υψόμετρα 3 έως 4m, 0 έως 1m, -9m έως -10m και -19 έως -20m κατά τη διάρκεια μιας περιόδου.



Σχήμα 6.8 – Υδροδυναμικό φορτίο πασσάλου σε διάφορα υψόμετρα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου

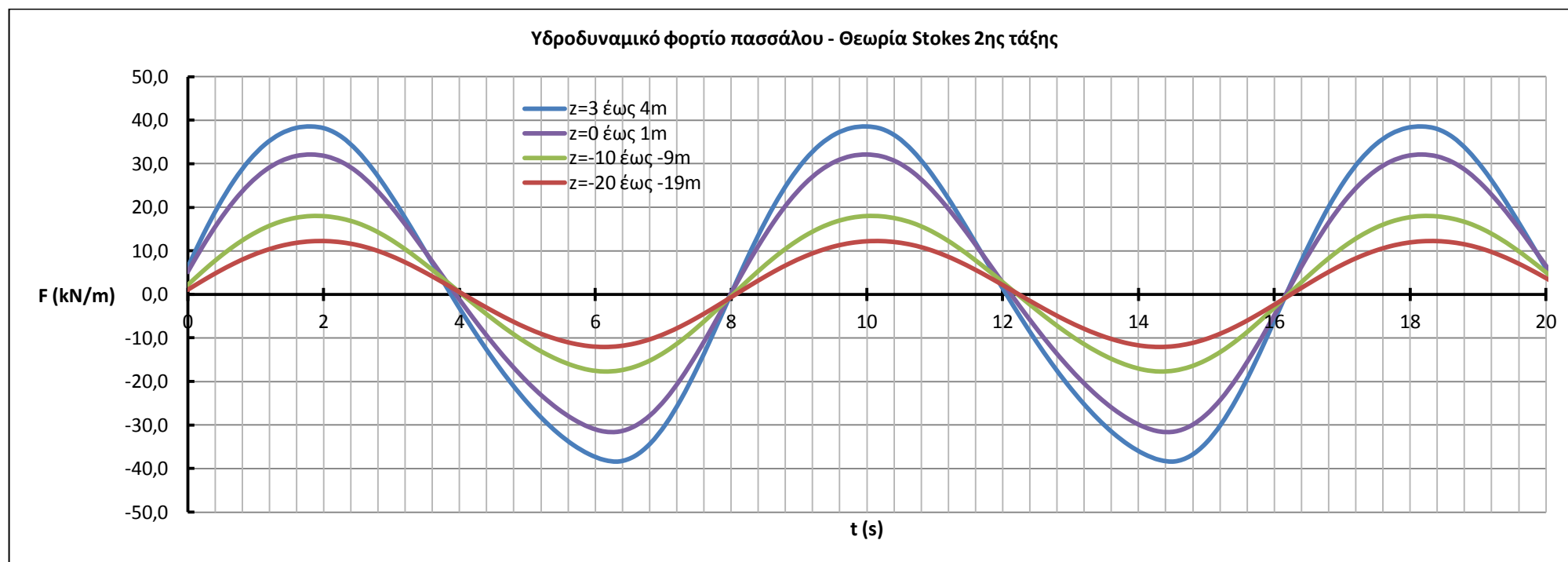
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.9) παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται στο κατά μήκος του πασσάλου (από το πυθμένα μέχρι και τη κορυφή του κυματισμού) τις χρονικές στιγμές $t=0$, $t=T/8$ και $t=T/4$. Παρατηρούμε ότι τη χρονική στιγμή $t=T/4$ ασκείται το μέγιστο φορτίο κατά μήκος της κατασκευής.



Σχήμα 6.9 – Υδροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πασσάλου τις χρονικές στιγμές $t=0$, $t=T/8$, $t=T/4$

Στην προσομοίωση του υδροδυναμικού φορτίου για την επίλυση της κατασκευής έχουν χρησιμοποιηθεί τα χαρακτηριστικά μεγέθη της υδροδυναμικής φόρτισης όπως αυτά παρουσιάζονται στα παραπάνω διαγράμματα.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.10) παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται στο πάσσαλο στα υψόμετρα 3 έως 4m, 0 έως 1m, -9m έως -10m και -19 έως -20m στα πρώτα 20sec άσκησης του υδροδυναμικού φορτίου.



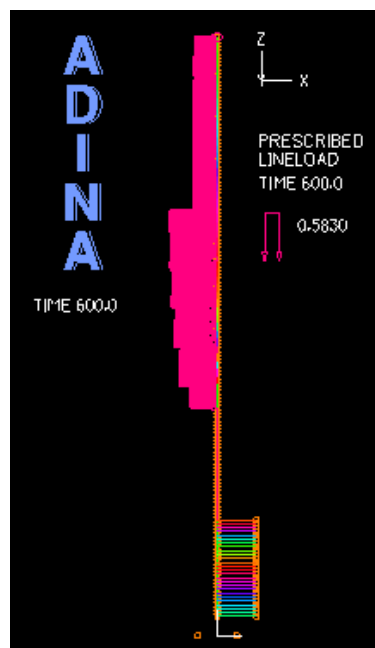
Σχήμα 6.10 – Υδροδυναμικό φορτίο πασσάλου σε διάφορα υψόμετρα στα πρώτα 20sec της υδροδυναμικής φόρτισης

6.1.3 Αεροδυναμικό φορτίο

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν μια μεμονωμένη δοκιμή εύρεσης του αεροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος του πύργου με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν αρχικά.

Σε αυτό το κεφάλαιο το αεροδυναμικό φορτίο ασκείται σαν δυναμική φόρτιση στη κατασκευή. Η διάρκεια της αεροδυναμικής φόρτισης, όπως και όλων των φορτίων που ασκούνται στη κατασκευή, είναι 600sec.

Ο προσομοίωση του αεροδυναμικού φορτίου στο πρόγραμμα Adina, μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.11).



Σχήμα 6.11 – Προσομοίωση αεροδυναμικού φορτίου στο πρόγραμμα Adina

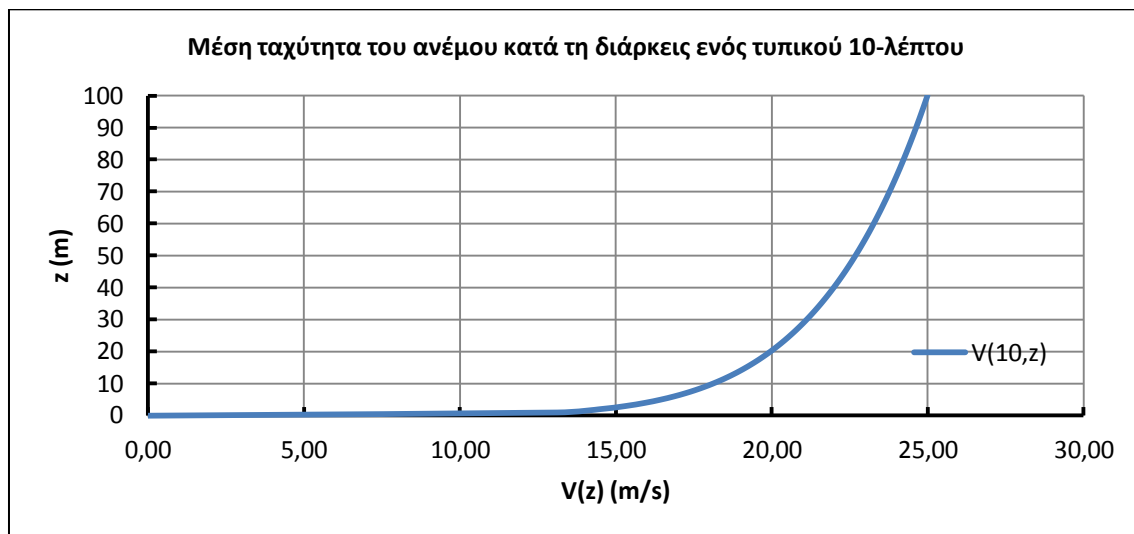
Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Σχήμα 6.12) με τις τιμές και την επεξήγηση των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια υπολογισμού του αεροδυναμικού φορτίου.

$V_{10, hub}$ (m/s)	25	$V_{10, hub}$ - Μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου στο ύψος του άξονα του δρομέα
z_{hub} (m)	100	z_{hub} - Ύψος του άξονα του δρομέα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
z (m)		z - Ύψος πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας
α	0,14	α - εκθέτης που καθορίζεται ανάλογα με τις συνθήκες ανέμου που επικρατούν [(NWP) : 0,14]
$V_{10, z}$ (m/s)		$V_{10, z}$ - Μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου στο ύψος z
ρ_a (kg/m ³)	1,226	ρ_a - Η πυκνότητα του αέρα
q (kg/m·s ²)		q - Πίεση του ανέμου στην επιφάνεια της κατασκευής
D (m)		D - Διάμετρος πύργου
S (m ² /m)		S - Εμβαδό προβαλλόμενης επιφάνειας κάθετη στη διεύθυνση του ανέμου
α (°)	90	α - γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του ανέμου και του άξονα του μέλους
ν_a (m ² /s)	$1,45 \cdot 10^{-5}$	ν - Κινηματική συνεκτικότητα του αέρα : $1,45 \cdot 10^{-5}$ m ² /s

R_e		R_e - Αριθμός Reynolds
k (m)	$5 \cdot 10^{-6}$	k - Επιφανειακή τραχύτητα του μέλους
k/D		
C		C - Συντελεστής σχήματος (εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds, την τραχύτητα της επιφάνειας και την διάμετρο του εξεταζόμενου μέλους)
γ	0,50	γ - Συντελεστής φόρτισης στη σκιά των πτερυγίων

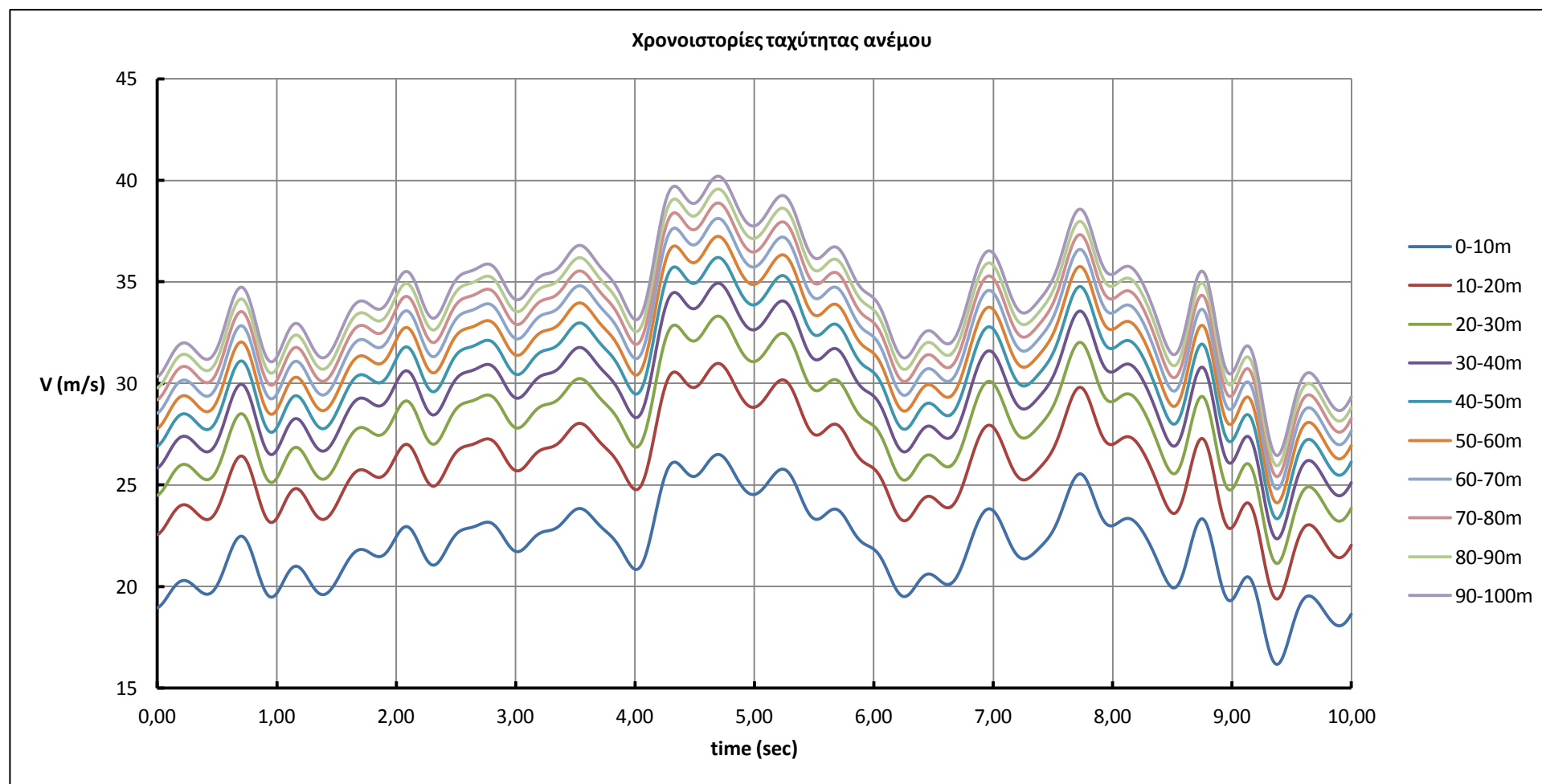
Σχήμα 6.12 – Τιμές και επεξήγηση των κυριότερων παραμέτρων της αεροδυναμικής φόρτισης

Επιλέγοντας μέση ταχύτητα ανέμου 25m/s στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας και χρησιμοποιώντας το προφίλ του ανέμου, η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου στα διάφορα ύψη πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.13).



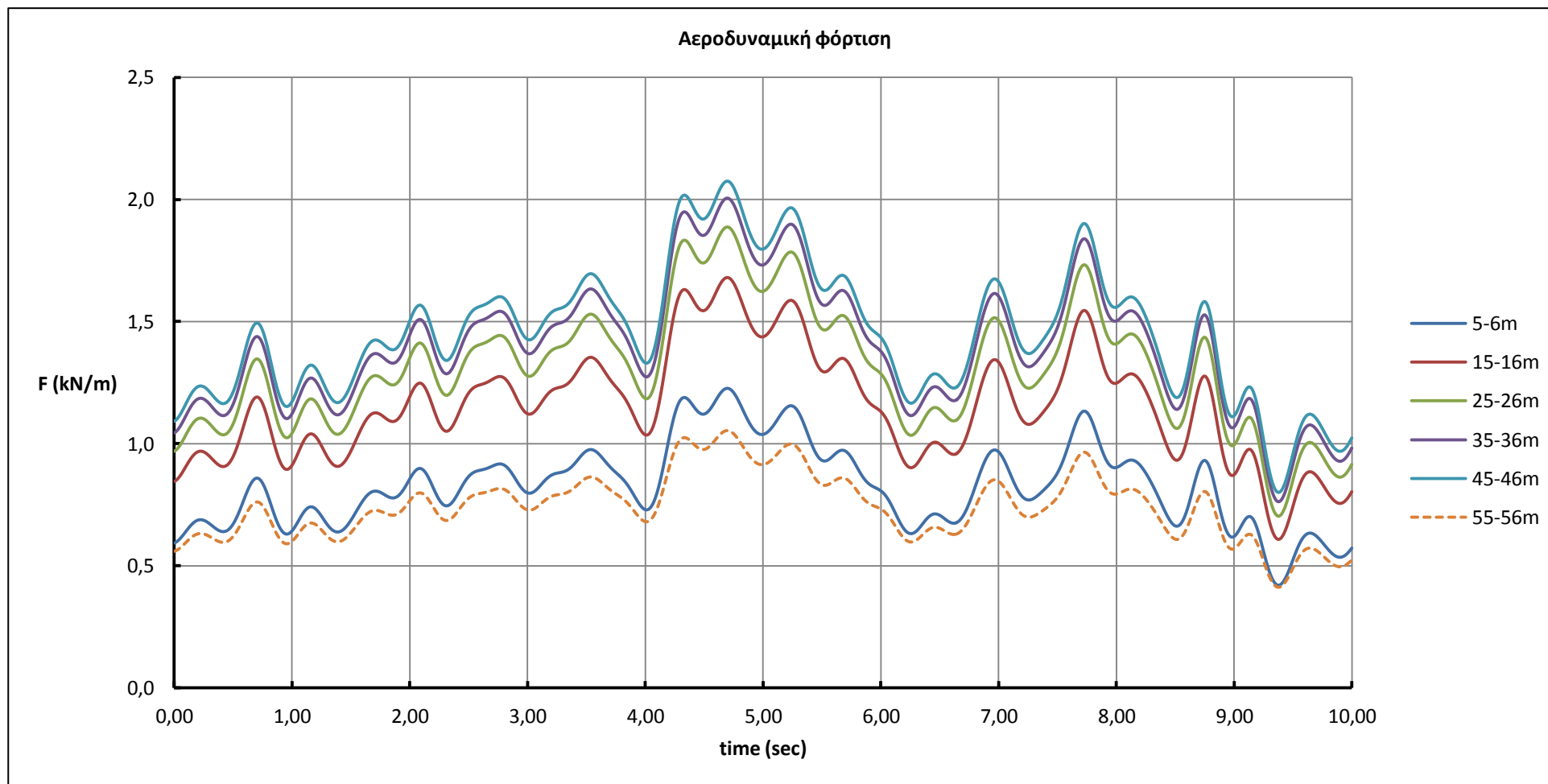
Σχήμα 6.13 – Μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου

Για την εύρεση του αεροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας έγινε η παρακάτω απλοποίηση. Αρχικά η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας μέχρι τον άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας χωρίστηκε σε δέκα ισομερή διαστήματα. Στη συνέχεια έχοντας ως δεδομένη τη μέση ταχύτητα του ανέμου στο μέσο κάθε διαστήματος (η μέση ταχύτητα του ανέμου απεικονίζεται στο παραπάνω διάγραμμα) δόθηκε η αντίστοιχη χρονοϊστορία ταχύτητας ανέμου διάρκειας 600sec. Προέκυψαν δηλαδή δέκα χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου, κάθε μια από τις οποίες έχει τη μέση ταχύτητα ανέμου του αντίστοιχου κομματιού. Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.14) απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου σε κάθε τμήμα στα πρώτα 10sec.



Σχήμα 6.14 – Χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου σε κάθε τμήμα από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι τον άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας

Στη συνέχεια με βάση τη χρονοϊστορία της ταχύτητας του ανέμου κάθε κομματιού υπολογίζεται η αεροδυναμική πίεση που ασκείται σε κάθε κομμάτι του πύργου (το κάθε κομμάτι έχει μήκος 10m) ανάλογα βέβαια και με την διάμετρο του. Η αεροδυναμική δύναμη που ασκείται σε διάφορα υψόμετρα της κατασκευής στα πρώτα 10sec της φόρτισης απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.15).

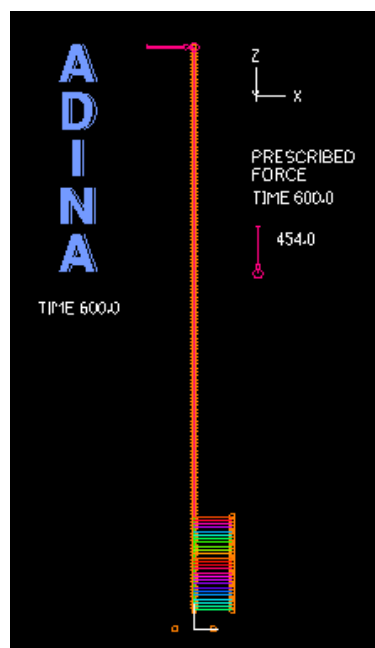


Σχήμα 6.15 – Αεροδυναμική φόρτιση σε διάφορα υψόμετρα της κατασκευής

Όπως μπορεί να γίνει κατανοητό, λόγω της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας το φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πύργου που βρίσκεται στη σκιά των πτερυγίων είναι μικρότερο από αυτό που θα ασκούνταν στο ίδιο μήκος στη περίπτωση που η ανεμογεννήτρια παρέμενε αδρανής. Λόγω της κίνησης των πτερυγίων η ταχύτητα του ανέμου απομειώνεται στο μήκος του πύργου που βρίσκεται πίσω από τα περιστρεφόμενα πτερύγια. Για την αναπαράσταση αυτού του φαινομένου στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας έχουμε επιλέξει έναν μειωτικό συντελεστή για τη φόρτιση του ανέμου στο μήκος του πύργου που βρίσκεται στη σκιά των πτερυγίων ($\gamma=0,50$). Ο συντελεστής αυτός πολλαπλασιάζεται με το αεροδυναμικό φορτίο στο μήκος του πύργου που βρίσκεται στη σκιά των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας (από τα 55m έως τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας).

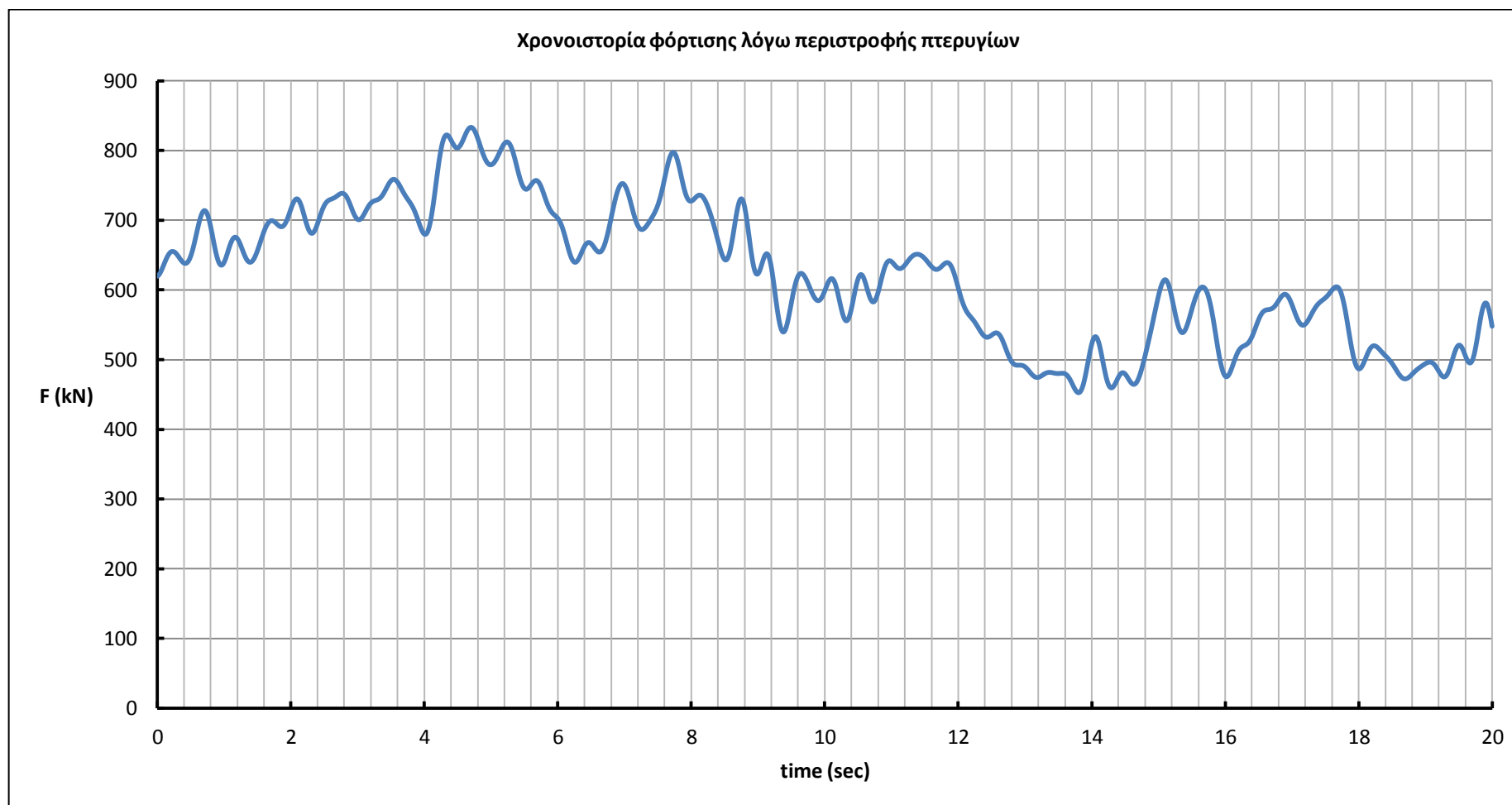
Στην προσομοίωση του αεροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας, έχουν χρησιμοποιηθεί τα χαρακτηριστικά μεγέθη της αεροδυναμικής φόρτισης όπως αυτά παρουσιάζονται στα παραπάνω διαγράμματα.

Η προσομοίωση του φορτίου που ασκείται στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας λόγω της περιστροφής των πτερυγίων, σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.16). Η φόρτιση λόγω της περιστροφής των πτερυγίων προκύπτει επιλέγοντας μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας 25m/s, υψόμετρο άξονα δρομέα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και μήκος πτερυγίων 45m. Η διάρκεια της συγκεκριμένης φόρτισης, όπως και όλων των δυναμικών φορτίων της κατασκευής, είναι 600sec. Στην προσομοίωση του αεροδυναμικού φορτίου που ασκείται στη κορυφή της κατασκευής λόγω της περιστροφής των πτερυγίων, έχουν χρησιμοποιηθεί τα χαρακτηριστικά μεγέθη της φόρτισης.



Σχήμα 6.16 – Προσομοίωση φορτίου λόγω περιστροφής πτερυγίων στο πρόγραμμα Adina

Η αεροδυναμική δύναμη που ασκείται στη κορυφή της κατασκευής λόγω της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, στα πρώτα 20sec της φόρτισης απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.17).

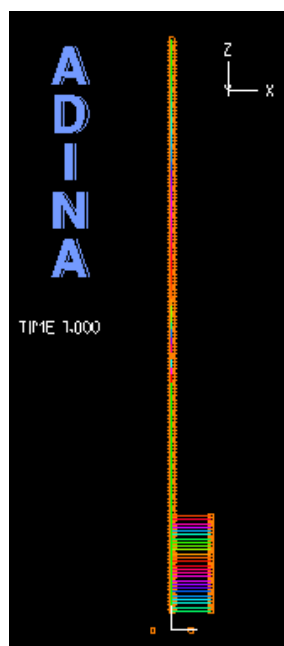


Σχήμα 6.17 – Αεροδυναμική φόρτιση λόγω περιστροφής πτερυγίων

6.1.4 Προσομοίωση εδάφους

Η επιρροή του εδάφους στους πασσάλους προσομοιώνεται με τη χρήση μη-γραμμικών ελατηρίων που τοποθετούνται σε όλες τις διευθύνσεις. Η δυσκαμψία των ελατηρίων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πασσάλου καθώς και από τις ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων. Για το λόγο αυτό υπολογίζονται οι εδαφικές σταθερές στη περιοχή που θα τοποθετηθούν οι πάσσαλοι.

Η προσομοίωση του εδάφους μέσω μη-γραμμικών ελατηρίων στο πρόγραμμα Adina απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.18).



Σχήμα 6.18 – Προσομοίωση μη-γραμμικών ελατηρίων στο πρόγραμμα Adina

Παρότι δεν είναι φυσικώς δυνατό, οι αναλύσεις γίνονται θεωρώντας ενιαίο εδαφικό προφίλ για όλο το βάθος έμπηξης του πασσάλου προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή μόνο της μεταβολής της σταθεράς των ελατηρίων στην απόκριση της κατασκευής. Για το λόγο αυτό, οι αναλύσεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τιμών της δυσκαμψίας των ελατηρίων και μελετάται έτσι η συμπεριφορά του πασσάλου σε όλα τα είδη εδάφους, από το πιο χαλαρό μέχρι αυτό με τη μεγαλύτερη συνοχή που οι συνθήκες στήριξης πλησιάζουν όσο είναι δυνατόν τις συνθήκες πάκτωσης.

Στα πλαίσια της εργασίας δεν τοποθετούνται γραμμικά ελατήρια κατά τη διεύθυνση του άξονα του πασσάλου αφού η πλευρική τριβή που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου είναι αρκετά μεγάλη και άρα οι καθιζήσεις της κατασκευής είναι ελάχιστες (η κορυφή του πασσάλου δεσμεύεται με άρθρωση). Κατά την εγκάρσια διεύθυνση του πασσάλου τοποθετούνται μη-γραμμικά ελατήρια τα οποία προσομοιώνουν τη δυσκαμψία του εδάφους.

Η παραδοχή που γίνεται στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας είναι ότι το εδαφικό προφίλ της περιοχής θεμελίωσης του πασσάλου είναι ενιαίο καθώς επίσης αυτό αποτελείται από αμμώδες (μη-συνεκτικό) έδαφος με σταθερή σχετική πυκνότητα.

Στη περίπτωση των μη-συνεκτικών εδαφών ο δείκτης εδάφους [Σταθερά ελατηρίου (K) = Δείκτης εδάφους (k_h) · Διάμετρος πασσάλου (D) · Επιφάνεια επιρροής ελατηρίου] κατά την οριζόντια διεύθυνση (k_h) είναι ανάλογος με το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους. Στα εδάφη αυτά το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα του εδάφους (D_r) καθώς και την ενεργό πίεση των υπερκειμένων γαιών (σ'_v) με αποτέλεσμα ο δείκτης εδάφους (k_h) να αυξάνει με το βάθος. Έτσι στη περίπτωση των μη-συνεκτικών εδαφών η δυσκαμψία των ελατηρίων (δηλαδή οι σταθερές των ελατηρίων) αυξάνει με το βάθος.

Η μη-γραμμική κατανομή της δυσκαμψίας των ελατηρίων, η οποία προσδιορίζεται από την καμπύλη πιέσεων-υποχωρήσεων “ p - y ” εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως:

- Το τύπο του εδάφους
- Τη σχετική πυκνότητα του εδάφους
- Το βάθος των ελατηρίων
- Την ενεργό πίεση των υπερκειμένων γαιών
- Τη διάμετρο του πασσάλου

Στις αναλύσεις που γίνονται στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας υπολογίζεται για κάθε ελατήριο η καμπύλη πλευρικού φορτίου ανά μέτρο μήκους που ασκείται στον πάσσαλο και πλευρικής μετατόπισης πασσάλου (καμπύλη p - y) για τα χαρακτηριστικά του εδάφους, το αντίστοιχο βάθος του ελατηρίου και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του πασσάλου. Έχοντας τη καμπύλη p - y κάθε ελατηρίου το πρόγραμμα υπολογίζει αυτόματα τη σταθερά του ελατηρίου (δηλαδή τη δυσκαμψία του) για κάθε μετατόπιση του πασσάλου.

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζεται διαδικασία υπολογισμού της σταθεράς των ελατηρίων (K) στη περίπτωση της θεμελίωσης του πασσάλου σε αμμώδες έδαφος με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του επιλεγόμενου πασσάλου (Σχήμα 6.19):

D (m)	4	D - Διάμετρος πασσάλου
t (m)	0,08	t - Πάχος τοιχωμάτων πασσάλου
E_p (MPa)	210.000	E_p - Μέτρο ελαστικότητας πασσάλου
I_p (m⁴)	1,89	I_p - Ροπή αδράνειας πασσάλου
$E_p \cdot I_p$ (MN·m²)	397.565,1	$E_p \cdot I_p$ - Καμπτική δυσκαμψία πασσάλου
L (m)	25,0	L - Βάθος έμπηξης πασσάλου

Σχήμα 6.19 – Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πασσάλου

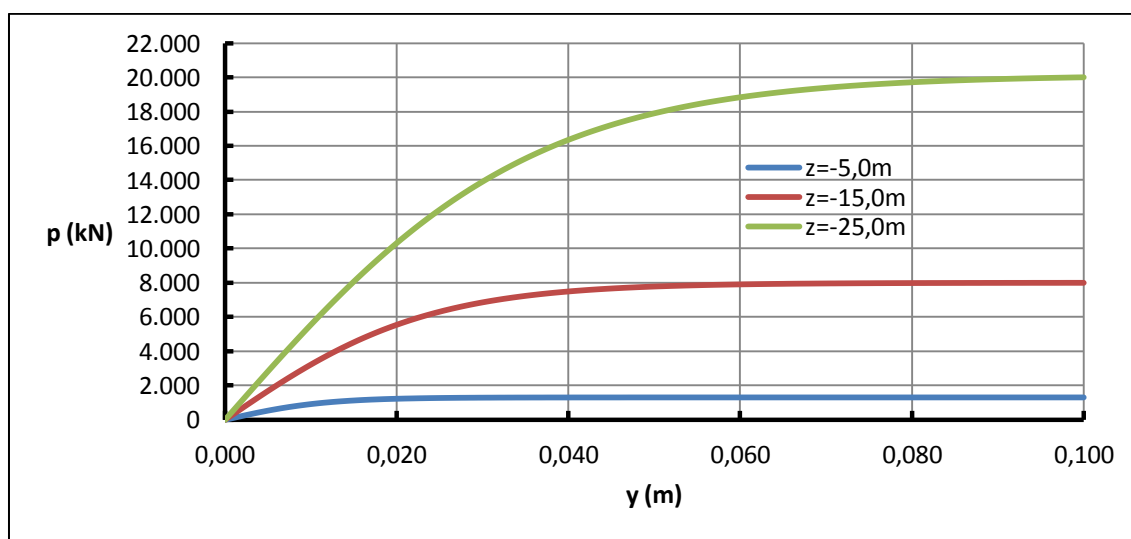
Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της διαδικασίας που ακολουθείται στη περίπτωση των συνεκτικών εδαφών με τελικό σκοπό τον υπολογισμό της δυσκαμψίας των ελατηρίων (Σχήμα 6.20). Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω στη περίπτωση χρήσης μη-

γραμμικών ελατηρίων εισάγεται για κάθε ελατήριο η πραγματική καμπύλη “p-γ” η οποία καθορίζει τη συμπεριφορά του ελατηρίου.

ϕ (°)	35	ϕ - Γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
C_1	3,02	C_1 - Συντελεστής που εξαρτάται από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
C_2	3,49	C_2 - Συντελεστής που εξαρτάται από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
C_3	54,4	C_3 - Συντελεστής που εξαρτάται από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους
γ (kN/m ³)	10	γ - Ενεργό βάρος εδάφους
z (m)		z - Βάθος από τον πυθμένα της θάλασσας
A	0,9	A - Συντελεστής ανακυκλιζόμενης φόρτισης
k (kN/m ³)	22.801,55	k - Σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση
p_{us} (kN/m)		p_{us} - Μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους εδάφους - ρηχά (μεταβάλλεται με το βάθος z)
p_{ud} (kN/m)		p_{ud} - Μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους εδάφους - βαθιά (μεταβάλλεται με το βάθος z)
p (kN/m)		p - Πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκος πασσάλου

Σχήμα 6.20 – Χαρακτηριστικά υπολογισμού δυσκαμψίας ελατηρίων – Αμμώδες έδαφος

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.21) απεικονίζονται οι καμπύλες πλευρικής πίεσης επί του πασσάλου και αντίστοιχης πλευρικής μετατόπισης του πασσάλου (καμπύλες “p-γ”) σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους για τη περίπτωση εδάφους και πασσάλου με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 6.21 – Καμπύλες “p-γ” για διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ($\phi=35^\circ$ – $D=4m$)

6.1.5 Αποτελέσματα μεμονωμένης δοκιμής δυναμικής ανάλυσης

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την δυναμική ανάλυση της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Adina.

Στους παρακάτω πίνακες (Σχήμα 6.22, Σχήμα 6.23 και Σχήμα 6.24) παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της διατομής του πασσάλου και τα χαρακτηριστικά της αρχικής και της τελικής διατομής του πύργου της ανεμογεννήτριας.

D (m)	4,00	D - Διάμετρος διατομής πασσάλου
t (m)	0,08	t - Πάχος διατομής
A (m ²)	0,9852	A - Εμβαδό διατομής
E (MPa)	210.000,0	E - Μέτρο ελαστικότητας υλικού
I (m ⁴)	1,893	I - Ροπή αδράνειας πασσάλου (I=I _y =I _z)
W _{el} (m ³)	0,9466	W _{el} - Ελαστική ροπή αντίστασης διατομής (W _{el} = W _{el,y} = W _{el,z})
W _{pl} (m ³)	1,2295	W _{pl} - Πλαστική ροπή αντίστασης διατομής (W _{pl} = W _{pl,y} = W _{pl,z})
E _p ·I _p (MN·m ²)	397.565,1	E _p ·I _p - Καμπτική δυσκαμψία πασσάλου
A _v (m ²)	0,627	A _v - Επιφάνεια διάτμησης της διατομής
D / t	50,0	D / t - Κατάταξη διατομής
f _y (MPa)	310	f _y - Τάση διαρροής χάλυβα (εξαρτάται από το πάχος t της διατομής)
ε	0,87	ε - Κατάταξη διατομής
	2	Κατηγορία διατομής
γ _{Mo}	1,10	γ _{Mo} - Συντελεστής ασφαλείας για αντοχή διατομών
N _{c,Rd} (kN)	277.648,2	N _{c,Rd} - Θλιπτική αντοχή της διατομής
M _{el,Rd} (kNm)	266.764,4	M _{el,Rd} - Ελαστική ροπή αντοχής της διατομής M _{el,Rd} = M _{el,y,Rd} = M _{el,z,Rd}
M _{pl,Rd} (kNm)	346.490,6	M _{pl,Rd} - Πλαστική ροπή αντοχής της διατομής M _{pl,Rd} = M _{pl,y,Rd} = M _{pl,z,Rd}

Σχήμα 6.22 – Χαρακτηριστικά διατομής πασσάλου θεμελιώσεως της ανεμογεννήτριας

D (m)	4,00	D - Διάμετρος αρχικής διατομής πύργου
t (m)	0,065	t - Πάχος αρχικής διατομής
A (m ²)	0,8035	A - Εμβαδό διατομής
E (MPa)	210.000	E - Μέτρο ελαστικότητας υλικού
I (m ⁴)	1,556	I - Ροπή αδράνειας πασσάλου (I=I _y =I _z)
W _{el} (m ³)	0,7779	W _{el} - Ελαστική ροπή αντίστασης διατομής (W _{el} = W _{el,y} = W _{el,z})
W _{pl} (m ³)	1,0066	W _{pl} - Πλαστική ροπή αντίστασης διατομής (W _{pl} = W _{pl,y} = W _{pl,z})
E _p ·I _p (MN·m ²)	326.697,1	E _p ·I _p - Καμπτική δυσκαμψία πασσάλου
A _v (m ²)	0,512	A _v - Επιφάνεια διάτμησης της διατομής
D / t	61,5	D / t - Κατάταξη διατομής
f _y (MPa)	320	f _y - Τάση διαρροής χάλυβα (εξαρτάται από το πάχος t της διατομής)
ε	0,86	ε - Κατάταξη διατομής
	3	Κατηγορία διατομής
γ _{Mo}	1,10	γ _{Mo} - Συντελεστής ασφαλείας για αντοχή διατομών
N _{c,Rd} (kN)	233.757,3	N _{c,Rd} - Θλιπτική αντοχή της διατομής
M _{el,Rd} (kNm)	226.283,7	M _{el,Rd} - Ελαστική ροπή αντοχής της διατομής M _{el,Rd} = M _{el,y,Rd} = M _{el,z,Rd}
M _{pl,Rd} (kNm)	292.819,2	M _{pl,Rd} - Πλαστική ροπή αντοχής της διατομής M _{pl,Rd} = M _{pl,y,Rd} = M _{pl,z,Rd}

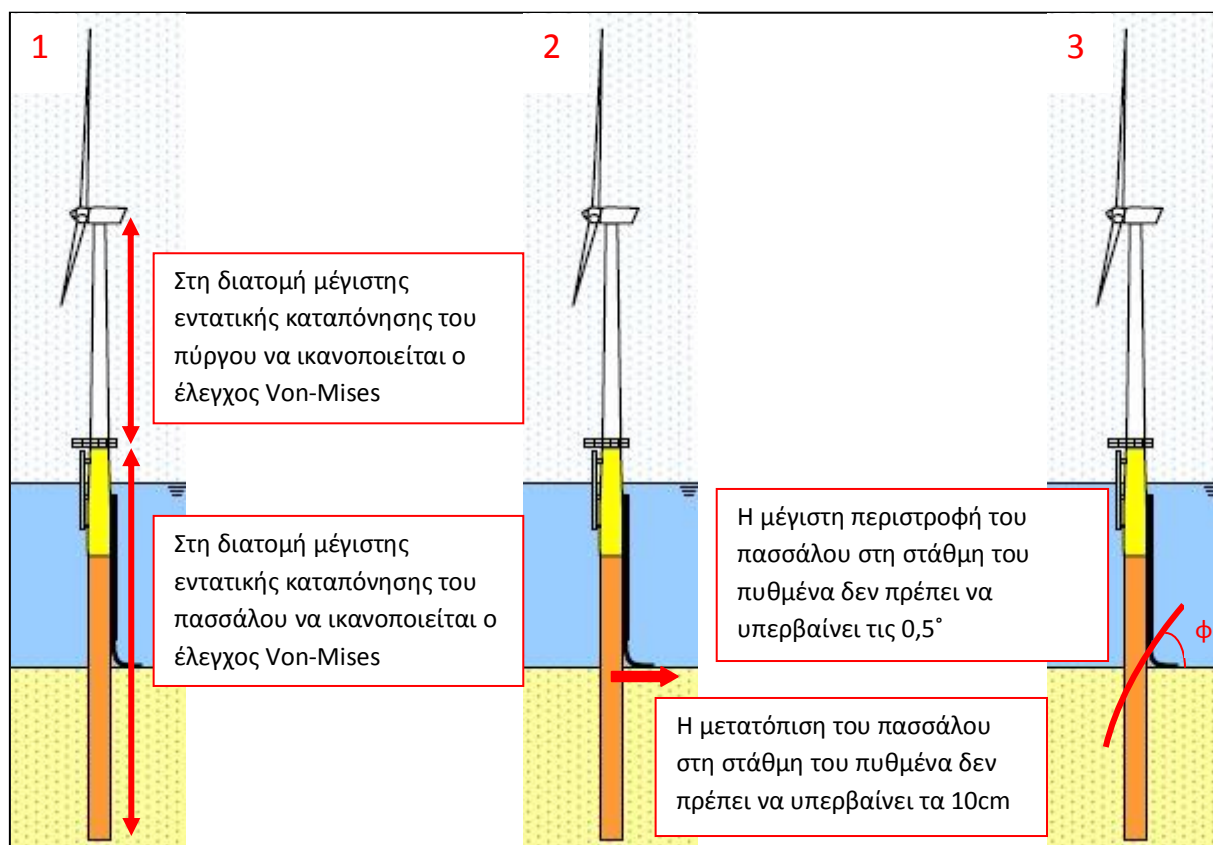
Σχήμα 6.23 – Χαρακτηριστικά αρχικής διατομής του πύργου της ανεμογεννήτριας

D (m)	2,80	D - Διάμετρος τελικής διατομής πύργου
t (m)	0,0200	t - Πάχος τελικής διατομής
A (m ²)	0,1747	A - Εμβαδό διατομής
E (MPa)	210.000	E - Μέτρο ελαστικότητας υλικού
I (m ⁴)	0,169	I - Ροπή αδράνειας πασσάλου (I=I _y =I _z)
W _{el} (m ³)	0,1205	W _{el} - Ελαστική ροπή αντίστασης διατομής (W _{el} = W _{el,y} = W _{el,z})
W _{pl} (m ³)	0,1546	W _{pl} - Πλαστική ροπή αντίστασης διατομής (W _{pl} = W _{pl,y} = W _{pl,z})
E _p ·I _p (MN·m ²)	35.437,7	E _p ·I _p - Καμπτική δυσκαμψία πασσάλου
A _v (m ²)	0,111	A _v - Επιφάνεια διάτμησης της διατομής
D / t	140,0	D / t - Κατάταξη διατομής
f _y (MPa)	355	f _y - Τάση διαρροής χάλυβα (εξαρτάται από το πάχος t της διατομής)
ε	0,81	ε - Κατάταξη διατομής
γ _{Mo}	1,10	γ _{Mo} - Συντελεστής ασφαλείας για αντοχή διατομών
N _{c,Rd} (kN)	56.371,6	N _{c,Rd} - Θλιπτική αντοχή της διατομής
M _{el,Rd} (kNm)	38.900,4	M _{el,Rd} - Ελαστική ροπή αντοχής της διατομής M _{el,Rd} = M _{el,y,Rd} = M _{el,z,Rd}
M _{pl,Rd} (kNm)	49.884,2	M _{pl,Rd} - Πλαστική ροπή αντοχής της διατομής M _{pl,Rd} = M _{pl,y,Rd} = M _{pl,z,Rd}

Σχήμα 6.24 – Χαρακτηριστικά τελικής διατομής του πύργου της ανεμογεννήτριας

Στα πλαίσια της εργασίας τα κριτήρια σχεδιασμού της κατασκευής που έχουν επιλεγεί είναι (Σχήμα 6.25):

1. Έλεγχος φέρουσας ικανότητας πασσάλου και του πύργου. Δηλαδή στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου και του πύργου να ικανοποιείται ο σύνθετος έλεγχος Von-Mises, δηλαδή ο ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη, διαξονική κάμψη και διαξονική διάτμηση
2. Μέγιστη μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα: 0,10m
3. Μέγιστη περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα: 0,5°



Σχήμα 6.25 – Κριτήρια σχεδιασμού της κατασκευής [6.1]

Στο παρακάτω πίνακα (Σχήμα 6.26) παρουσιάζεται η μέγιστη ένταση που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης, όπως επίσης και η μετατόπιση και η στροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα τη στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου.

$M_{z,Ed}$ (kNm)	218.518,0	$M_{z,Ed}$ - Ροπή κάμψης διατομής περί τον άξονα z
$\sigma_{x,Ed}$ (MPa)	230,85	$\sigma_{x,Ed}$ - Ορθές τάσεις σε σημείο διατομής λόγω $M_{z,Ed}$
$V_{y,Ed}$ (kN)	310,705	$V_{y,Ed}$ - Διατμητική δύναμη διατομής
$\tau_{xy,Ed}$ (MPa)	0,50	$\tau_{xy,Ed}$ - Διατμητική τάση σε σημείο διατομής λόγω $V_{y,Ed}$
N_{Ed} (kN)	7.494,82	N_{Ed} - Θλιπτική δύναμη διατομής
$\sigma_{x,Ed}$ (MPa)	7,61	$\sigma_{x,Ed}$ - Ορθές τάσεις σε σημείο διατομής λόγω N_{Ed}
σ_{Ed} (MPa)	238,46	σ_{Ed} - Ορθές τάσεις σε σημείο διατομής λόγω $M_{z,Ed}$ - $M_{y,Ed}$ - N_{Ed}
τ_{Ed} (MPa)	0,50	τ_{Ed} - Διατμητική τάση σε σημείο διατομής λόγω $V_{y,Ed}$ - $V_{z,Ed}$
x_2 (m)	0,07184	x_2 - Μέγιστη μετακίνηση σημείου πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

$x_{2,max}$ (m)	0,10	$x_{2,max}$ - Μέγιστη επιτρ. Μετακ. σημείου πας. στη στάθμη του πυθμένα L_1 - Μήκος έμπηξης πασσάλου x_3 - Μετακ. σημείου πασσάλου 0.5m πάνω από τη στάθμη του πυθμένα $\Delta x = x_2 - x_3$ θ_1 - Γωνία περιστροφής πασσάλου θ_1 - Γωνία περιστροφής πασσάλου $\theta_{1,max}$ - Μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία περιστροφής πασσάλου t - Χρονική στιγμή μέγιστης εντατικής καταπόνησης πασσάλου
L_1 (m)	25	
x_3 (m)	0,0762676	
Δx (m)	0,004423	
Δz (m)	0,50	
θ_1 (rad)	0,00885	
θ_1 (°)	0,50684	
$\theta_{1,max}$ (°)	0,5	
t (sec)	59,28	

Σχήμα 6.26 – Εντατικά μεγέθη και μετακινήσεις πασσάλου

Στο παρακάτω πίνακα (Σχήμα 6.27) παρουσιάζονται οι έλεγχοι εντατικών μεγεθών τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης της διατομής του πασσάλου καθώς και οι έλεγχοι μετατοπίσεων και στροφών του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα την ίδια χρονική στιγμή.

$N_{Ed} / N_{c,Rd}$	0,027	Έλεγχος διατομής σε ομοιόμορφη θλίψη (διατομή υπό καθαρή θλίψη)
$(M_{z,Ed} / M_{el,z,Rd})$	0,8191	Ελαστικός έλεγχος διατομής σε μονοαξονική κάμψη (διατομή υπό καθαρή κάμψη)
$(M_{z,Ed} / M_{el,z,Rd}) + (M_{y,Ed} / M_{el,y,Rd})$	0,8191	Ελαστικός έλεγχος διατομής σε διαξονική κάμψη (διατομή υπό καθαρή κάμψη)
$\tau_{xy,Ed} / (f_y / 3^{0,5} \gamma_{M0})$	0,003	Ελαστικός έλεγχος διατμητικών τάσεων (διατομή υπό καθαρή διάτμηση)
$(N_{Ed} / N_{c,Rd}) + (M_{z,Ed} / M_{el,z,Rd}) + (M_{y,Ed} / M_{el,y,Rd})$	0,846136	Ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη και διαξονική κάμψη
σ_{VM} (Mpa)	238,46	Σύνθετος έλεγχος κατά Von-Mises - Έλεγχος αλληλεπίδρασης λόγω διατμητικών τάσεων
$\sigma_{VM} / (f_y / \gamma_{M0})$	0,846142	Σύνθετος έλεγχος κατά Von-Mises - Έλεγχος αλληλεπίδρασης λόγω διατμητικών τάσεων
$x_2 / x_{2,max}$	0,718	Έλεγχος μετακίνησης πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα
$\theta_1 / \theta_{1,max}$	1,014	Έλεγχος περιστροφής του πασσάλου
$\sigma_{VM} / (f_y / \gamma_{M0})$ (%)	84,61	Σύνθετος έλεγχος κατά Von-Mises - Έλεγχος αλληλεπίδρασης λόγω διατμητικών τάσεων
$x_2 / x_{2,max}$ (%)	71,84	Έλεγχος μετακίνησης πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα
$\theta_1 / \theta_{1,max}$ (%)	101,37	Έλεγχος περιστροφής του πασσάλου

Σχήμα 6.27 – Έλεγχοι εντατικών μεγεθών και μετακινήσεων πασσάλου

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα ο πιο κρίσιμος έλεγχος είναι ο περιορισμός που υπάρχει στη περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα. Συγκεκριμένα ο συγκεκριμένος έλεγχος δείχνει ότι τα χαρακτηριστικά του πασσάλου που έχει επιλεγεί δεν επαρκούν και πρέπει να γίνει ανασχεδιασμός του πασσάλου (εκπληρώνεται κατά 101%). Στη συνέχεια ακολουθεί ο περιορισμός στην αναπτυσσόμενη ένταση του πασσάλου (εκπληρώνεται κατά 85%) και τέλος ο περιορισμός στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα που εκπληρώνεται κατά 72%.

Στο παρακάτω πίνακα (Σχήμα 6.28) παρουσιάζεται η μέγιστη ένταση που αναπτύσσεται στη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας όπως επίσης και η μέγιστη μετατόπιση της κορυφής του πύργου κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης.

$M_{z,Ed}$ (kNm)	134.075,0	$M_{z,Ed}$ - Ροπή κάμψης διατομής περί τον άξονα z
$\sigma_{x,Ed}$ (MPa)	172,37	$\sigma_{x,Ed}$ - Ορθές τάσεις σε σημείο διατομής λόγω $M_{z,Ed}$
$V_{y,Ed}$ (kN)	1.864,67	$V_{y,Ed}$ - Διατμητική δύναμη διατομής
$\tau_{xy,Ed}$ (Mpa)	3,65	$\tau_{xy,Ed}$ - Διατμητική τάση σε σημείο διατομής λόγω $V_{y,Ed}$
N_{Ed} (kN)	7.494,82	N_{Ed} - Θλιπτική δύναμη διατομής
$\sigma_{x,Ed}$ (MPa)	9,33	$\sigma_{x,Ed}$ - Ορθές τάσεις σε σημείο διατομής λόγω N_{Ed}
σ_{Ed} (MPa)	181,69	σ_{Ed} - Ορθές τάσεις σε σημείο διατομής λόγω $M_{z,Ed}$ - $M_{y,Ed}$ - N_{Ed}
τ_{Ed} (Mpa)	3,65	τ_{Ed} - Διατμητική τάση σε σημείο διατομής λόγω $V_{y,Ed}$ - $V_{z,Ed}$
t (sec)	59,28	t - Χρονική στιγμή μέγιστης εντατικής καταπόνησης βάσης πύργου
x_z (m)	4,48	x - Μετακίνηση στη κορυφή του πύργου
t (sec)	59,28	t - Χρονική στιγμή μέγιστης μετακίνησης κορυφής πύργου

Σχήμα 6.28 – Εντατικά μεγέθη και μετακινήσεις του πύργου

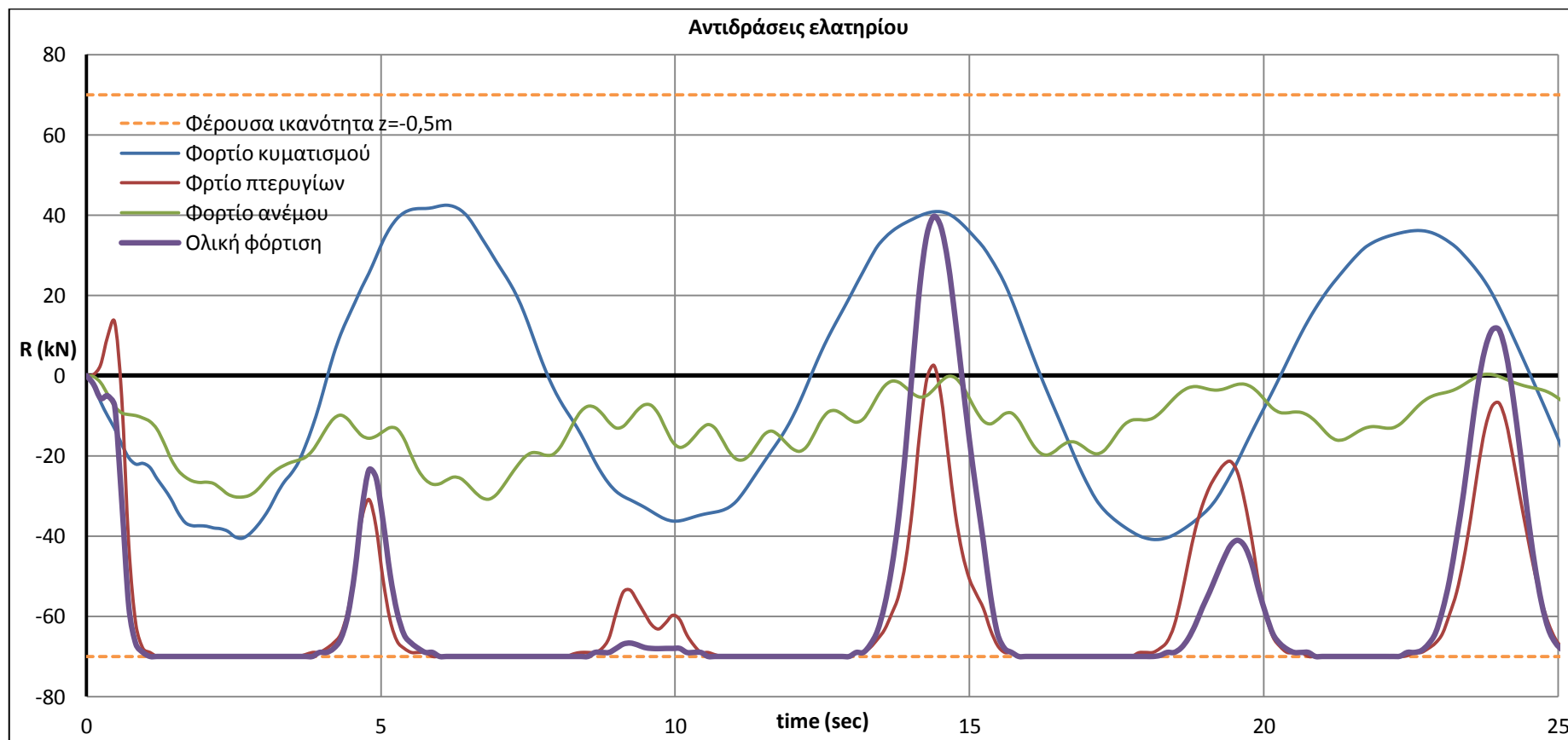
Στο παρακάτω πίνακα (Σχήμα 6.29) παρουσιάζονται οι έλεγχοι εντατικών μεγεθών τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης της διατομής της βάσης του πύργου.

$N_{Ed} / N_{c,Rd}$	0,032	Έλεγχος διατομής σε ομοιόμορφη θλίψη (διατομή υπό καθαρή θλίψη)
$(M_{z,Ed} / M_{el,z,Rd})$	0,5925	Ελαστικός έλεγχος διατομής σε μονοαξονική κάμψη (διατομή υπό καθαρή κάμψη)
$(M_{z,Ed} / M_{el,z,Rd}) + (M_{y,Ed} / M_{el,y,Rd})$	0,5925	Ελαστικός έλεγχος διατομής σε διαξονική κάμψη (διατομή υπό καθαρή κάμψη)
$\tau_{xy,Ed} / (f_y / 3^{0,5} \gamma_{M0})$	0,02	Ελαστικός έλεγχος διατμητικών τάσεων (διατομή υπό καθαρή διάτμηση)
$(N_{Ed} / N_{c,Rd}) + (M_{z,Ed} / M_{el,z,Rd}) + (M_{y,Ed} / M_{el,y,Rd})$	0,62457	Ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη και διαξονική κάμψη
σ_{VM} (Mpa)	181,80	Σύνθετος έλεγχος κατά Von-Mises - Έλεγχος αλληλεπίδρασης λόγω διατμητικών τάσεων
$\sigma_{VM} / (f_y / \gamma_{M0})$	0,62495	Σύνθετος έλεγχος κατά Von-Mises - Έλεγχος αλληλεπίδρασης λόγω διατμητικών τάσεων
$\sigma_{VM} / (f_y / \gamma_{M0})$ (%)	62,49	Σύνθετος έλεγχος κατά Von-Mises - Έλεγχος αλληλεπίδρασης λόγω διατμητικών τάσεων

Σχήμα 6.29 – Έλεγχοι εντατικών μεγεθών πύργου

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα, ο έλεγχος που αφορά τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων στη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας εκπληρώνεται κατά 62%.

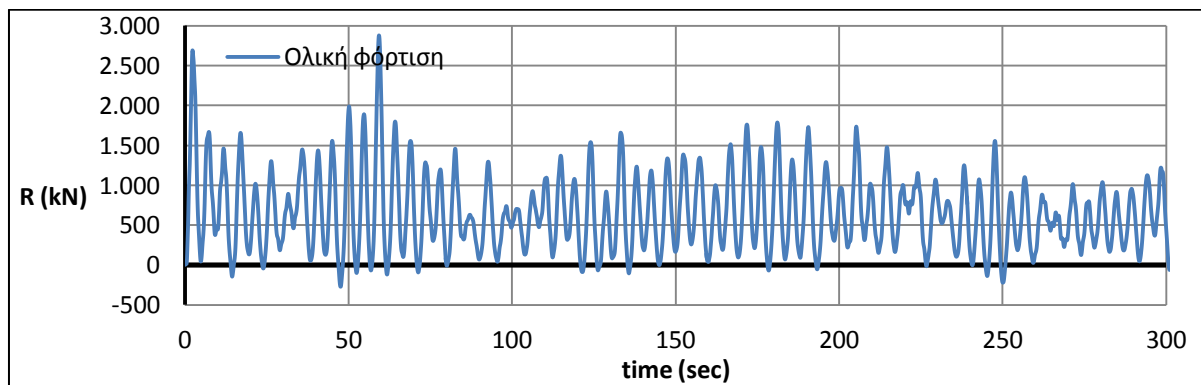
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.30) απεικονίζεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους καθώς και οι αντιδράσεις του μη-γραμμικού ελατηρίου που βρίσκεται 0,5m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας στα πρώτα 25sec της δυναμικής ανάλυσης (στο υψόμετρο $z=0m$ βρίσκεται ο πυθμένας της θάλασσας). Στο διάγραμμα παρουσιάζονται ξεχωριστά οι αντιδράσεις που προκαλεί η κάθε φόρτιση ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση.



Σχήμα 6.30 – Φέρουσα ικανότητα εδάφους και αντιδράσεις μη-γραμμικού ελατηρίου σε βάθος 0,5m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως τις μικρότερες αντιδράσεις προκαλεί το φορτίο του ανέμου πάνω στο πύργο της ανεμογεννήτριας. Συνεπώς το φορτίο αυτό έχει τη μικρότερη επίδραση στη καταπόνηση και τη μετακίνηση της κατασκευής. Το φορτίο του κυματισμού προκαλεί μεγαλύτερες αντιδράσεις χωρίς ωστόσο οι αντιδράσεις αυτές να προσεγγίζουν τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Τη μεγαλύτερη φόρτιση προκαλεί το αεροδυναμικό φορτίο λόγω της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας στο οποίο οι αντιδράσεις του ελατηρίου που βρίσκεται σε βάθος 0,5m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας προσεγγίζουν τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Συμπερασματικά προκύπτει πως το φορτίο που προκαλεί η περιστροφή των πτερυγίων προκαλεί τη μέγιστη μετατόπιση και καταπόνηση της κατασκευής.

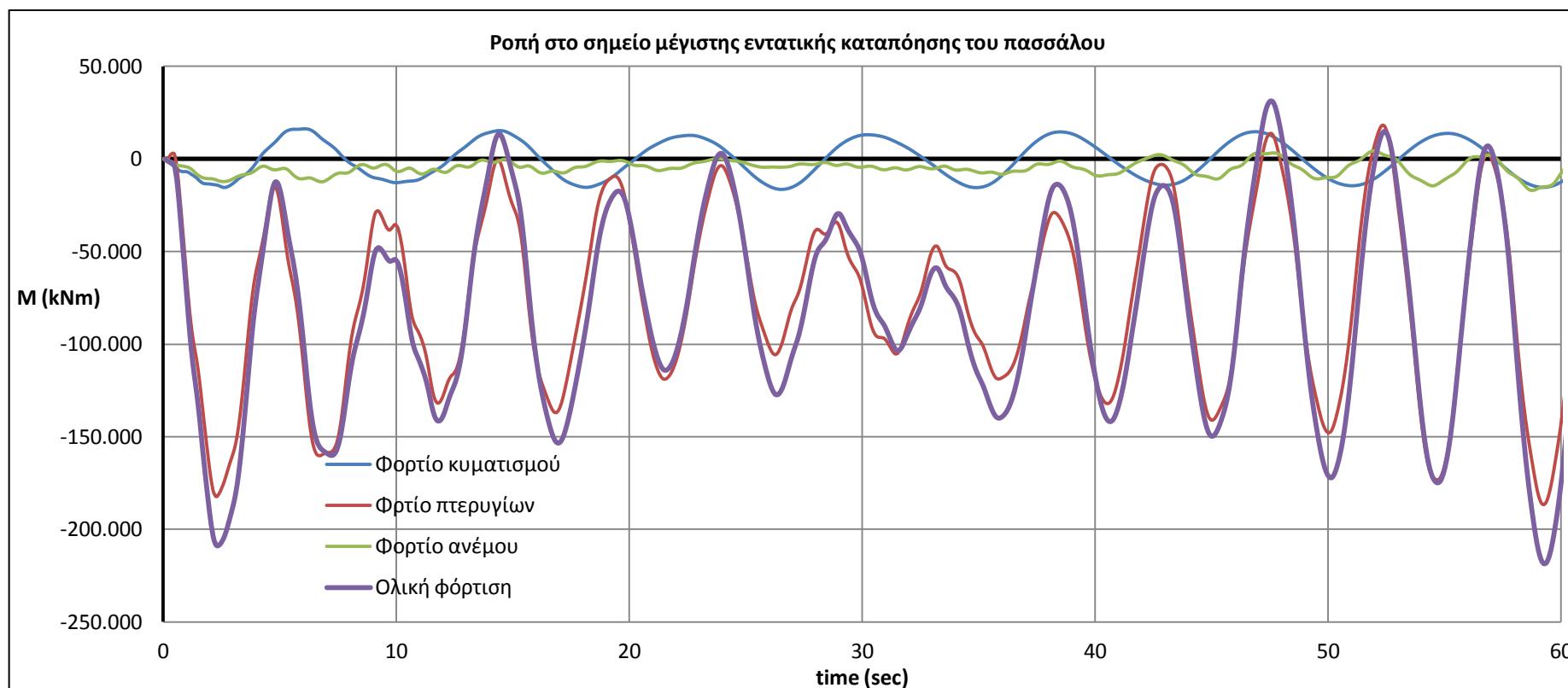
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.31) απεικονίζονται οι αντιδράσεις του μη-γραμμικού ελατηρίου που βρίσκεται στο μέγιστο βάθος του πασσάλου, δηλαδή 25m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας στα πρώτα 300sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.31 –Αντιδράσεις μη-γραμμικού ελατηρίου σε βάθος 25m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας

Γίνεται αντιληπτό πως στο μέγιστο βάθος θεμελιώσεως του πασσάλου οι αντιδράσεις του ελατηρίου δεν είναι μηδενικές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην "σβήνει" η ροπή και η τέμνουσα δύναμη που αναπτύσσεται στο πάσσαλο στο μέγιστο βάθος έμπηξης, πράγμα που σημαίνει ότι τα 25m μήκος θεμελιώσεως δεν επαρκούν και πρέπει αυτό το μήκος να αυξηθεί.

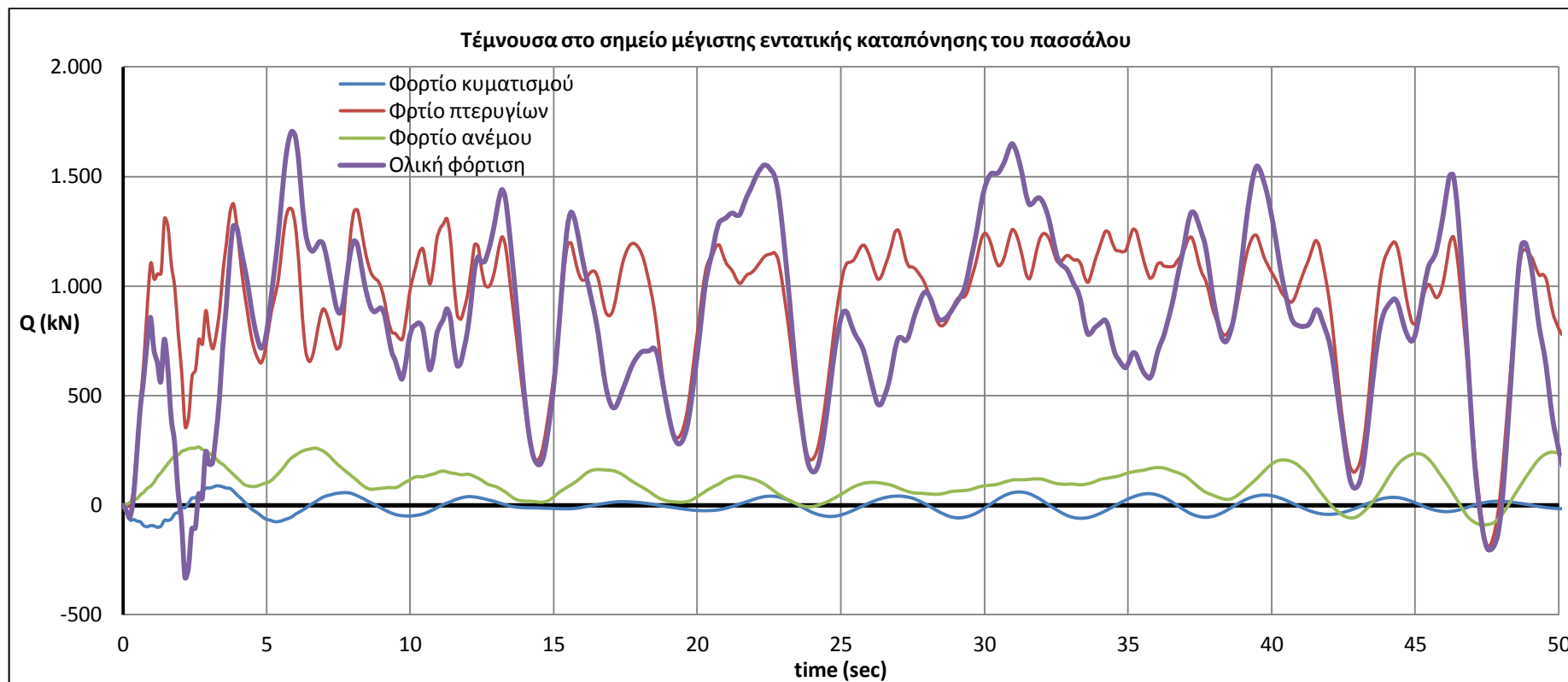
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.32) απεικονίζεται η ροπή που αναπτύσσεται στο σημείο του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση στα πρώτα 60sec της δυναμικής ανάλυσης. Στο διάγραμμα παρουσιάζονται ξεχωριστά οι εντάσεις που προκαλεί η κάθε φόρτιση ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση.



Σχήμα 6.32 – Ροπή κάμψης στο σημείο μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως τη μικρότερη συμβολή στη καμπτική καταπόνηση του πασσάλου έχει το αεροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας. Το φορτίο του κυματισμού ασκεί μεγαλύτερη ένταση στη κατασκευή αφού αποτελεί τη δεύτερη πιο σημαντική φόρτιση. Τη μεγαλύτερη συμβολή στη καταπόνηση του πασσάλου έχει το φορτίο που ασκείται στη κορυφή του πύργου εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Η φόρτιση αυτή προκαλεί τη μέγιστη ένταση και παραμόρφωση του πασσάλου.

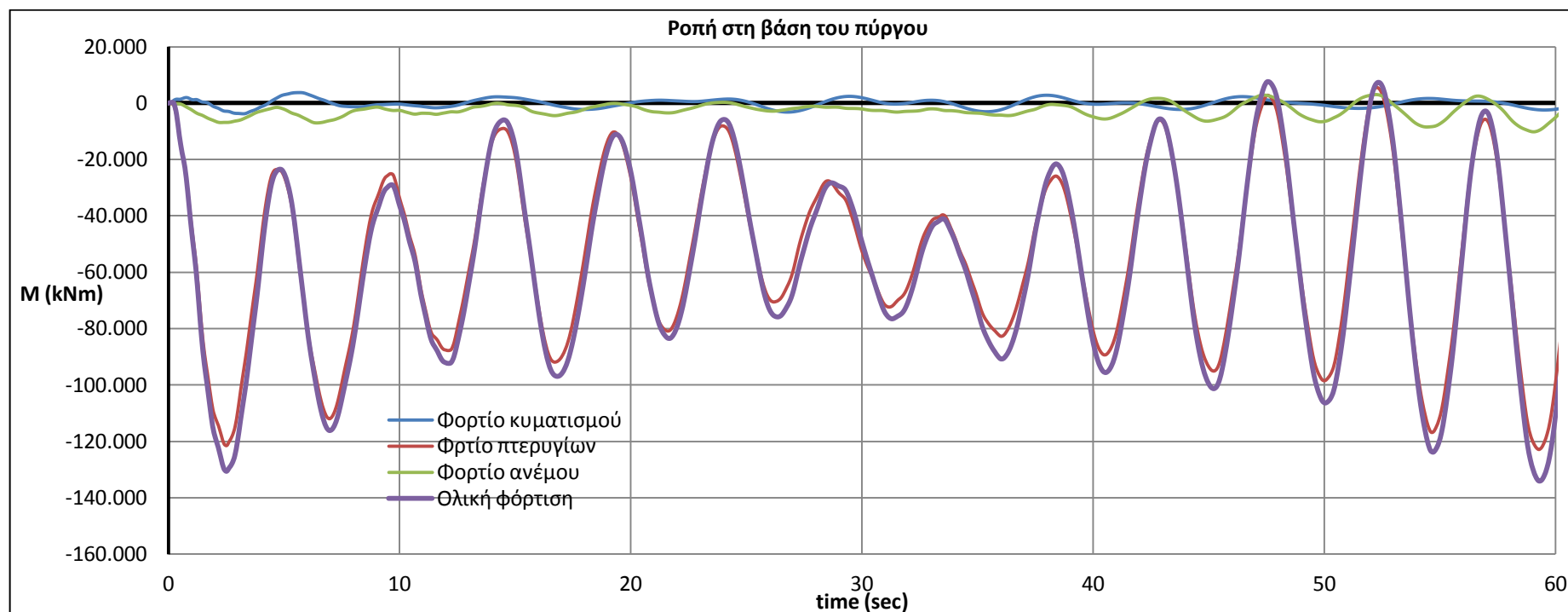
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.33) απεικονίζεται η τέμνουσα που αναπτύσσεται στο σημείο του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση στα πρώτα 50sec της δυναμικής ανάλυσης. Στο διάγραμμα παρουσιάζονται ξεχωριστά η εντάσεις που προκαλεί η κάθε φόρτιση ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση.



Σχήμα 6.33 – Τέμνουσα στο σημείο μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως τη μικρότερη συμβολή στη τέμνουσα που αναπτύσσεται στο σημείο μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου έχει το φορτίο του κυματισμού. Το αεροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας αποτελεί τη δεύτερη πιο σημαντική διατμητική δύναμη. Τέλος τη μεγαλύτερη διατμητική καταπόνηση του πασσάλου προκαλεί το φορτίο που προέρχεται από τη περιστροφή των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.

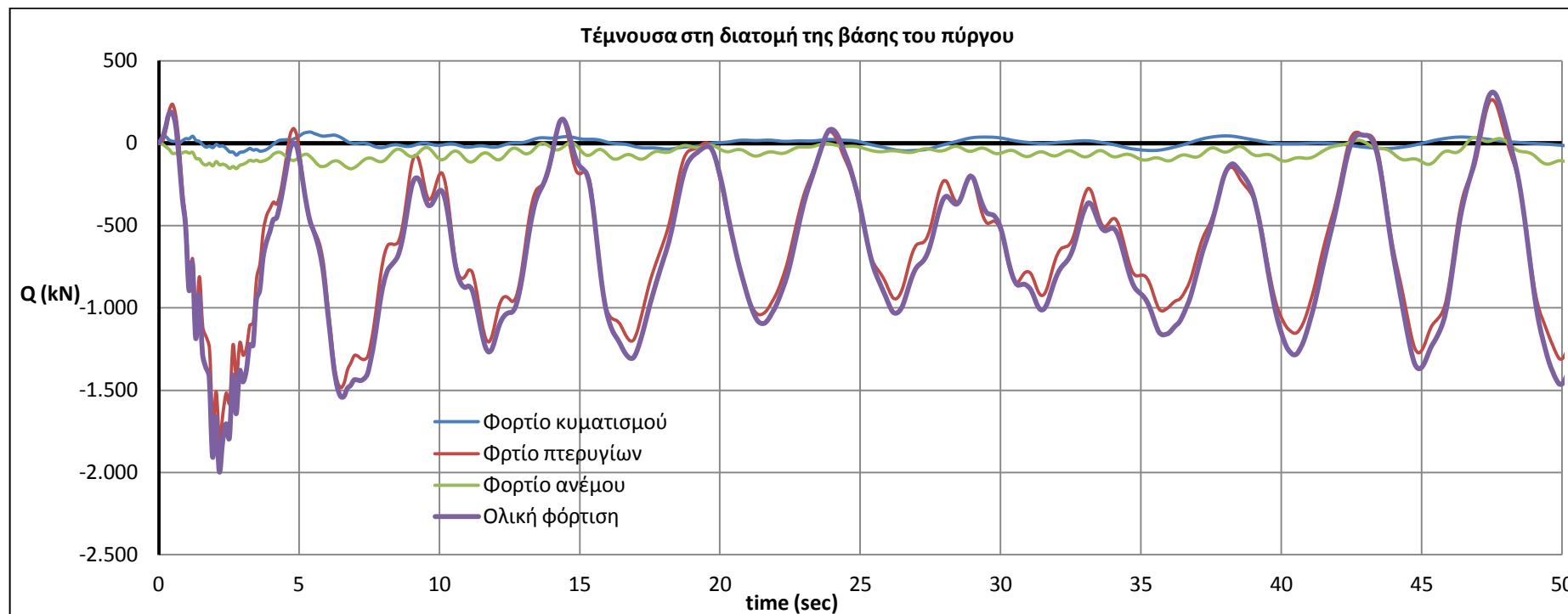
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.34) απεικονίζεται η καμπτική ροπή που αναπτύσσεται στη διατομή της βάσης του πύργου της ανεμογεννήτριας στα πρώτα 60sec της δυναμικής ανάλυσης. Στο διάγραμμα παρουσιάζονται ξεχωριστά η εντάσεις που προκαλεί η κάθε φόρτιση ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση.



Σχήμα 6.34 – Ροπή κάμψης στη διατομή της βάσης του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως τη μικρότερη συμβολή στη καμπτική καταπόνηση της βάσης του πύργου έχει το φορτίο του κυματισμού. Το αεροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας ασκεί μεγαλύτερη καμπτική καταπόνηση στη κατασκευή αφού αποτελεί τη δεύτερη πιο σημαντική φόρτιση. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στην εντατική καταπόνηση του πύργου έχει το φορτίο που ασκείται στη κορυφή του πύργου εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Η φόρτιση αυτή προκαλεί τη μέγιστη ένταση και παραμόρφωση του πύργου της ανεμογεννήτριας.

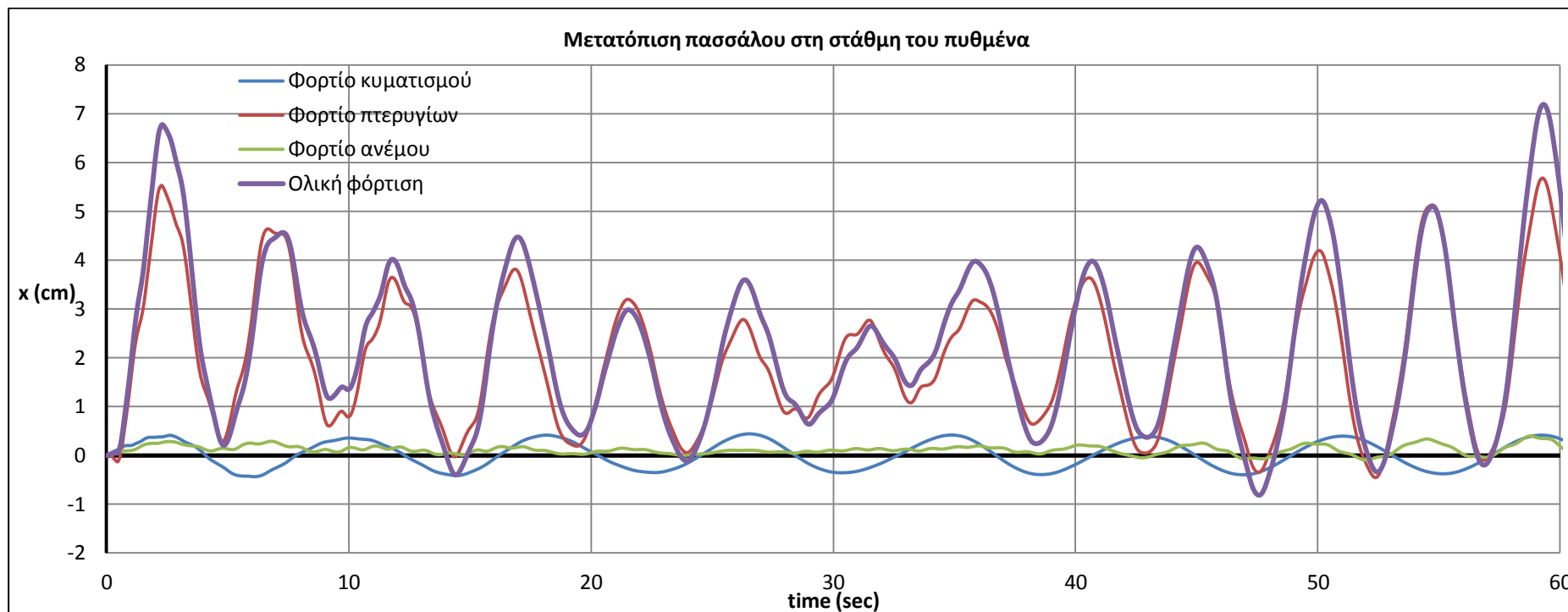
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.35) απεικονίζεται η τέμνουσα που αναπτύσσεται στο σημείο της βάσης του πύργου στα πρώτα 50sec της δυναμικής ανάλυσης. Στο διάγραμμα παρουσιάζονται ξεχωριστά η εντάσεις που προκαλεί η κάθε φόρτιση ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση.



Σχήμα 6.35 – Τέμνουσα στη διατομή της βάσης του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως τη μικρότερη συμβολή στη τέμνουσα που αναπτύσσεται στο σημείο της βάσης του πύργου έχει το φορτίο του κυματισμού. Το αεροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας αποτελεί τη δεύτερη πιο σημαντική διατμητική δύναμη. Τέλος τη μεγαλύτερη διατμητική καταπόνηση του πύργου της ανεμογεννήτριας προκαλεί το φορτίο που προέρχεται από τη περιστροφή των πτερυγίων.

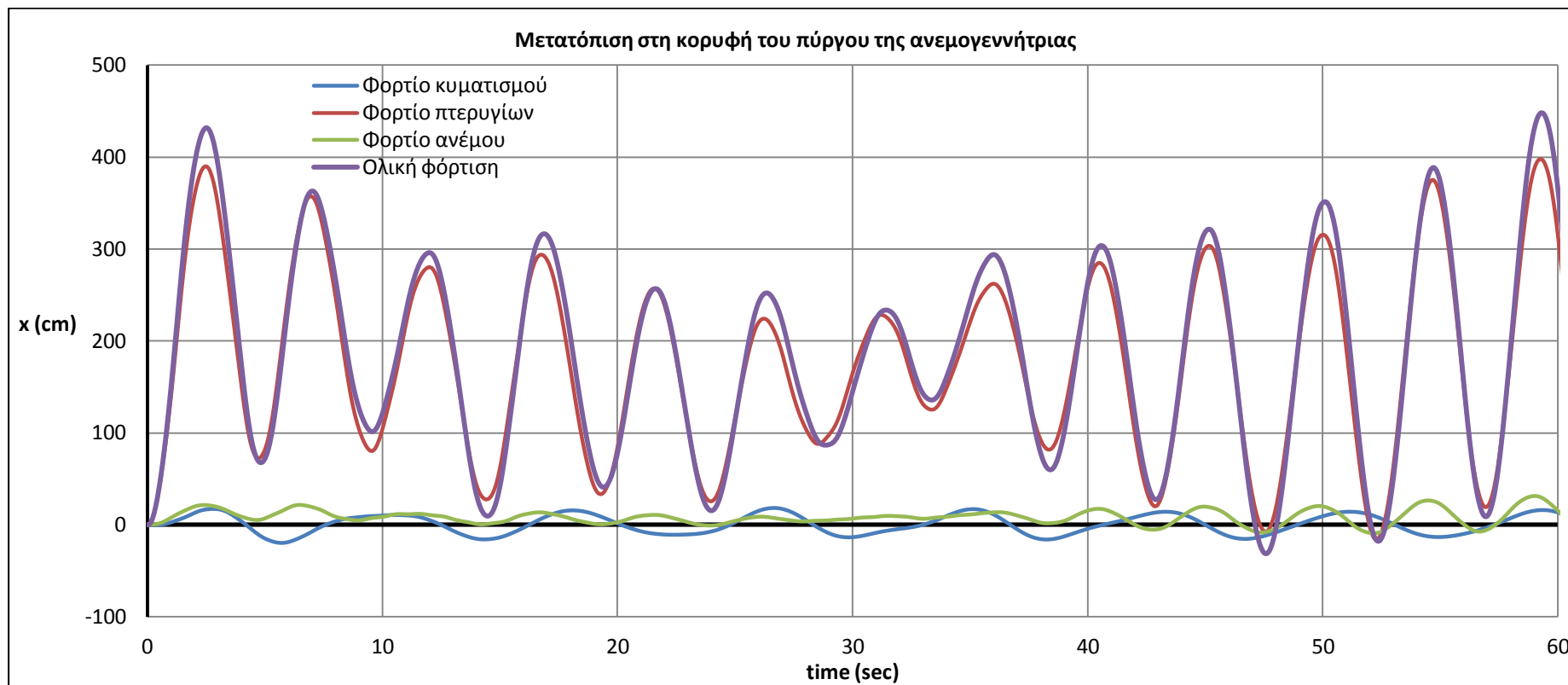
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.36) απεικονίζεται η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα στα πρώτα 60sec της δυναμικής ανάλυσης. Στο διάγραμμα παρουσιάζονται ξεχωριστά οι μετατοπίσεις που προκαλεί η κάθε φόρτιση ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση.



Σχήμα 6.36 – Μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως τη μικρότερη συμβολή στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα έχει το αεροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πύργου. Το φορτίο του κυματισμού ασκεί μεγαλύτερες μετατοπίσεις στον πάσσαλο αφού αποτελεί τη δεύτερη πιο σημαντική φόρτιση. Τη μεγαλύτερη συμβολή στις μετατοπίσεις του πασσάλου έχει το φορτίο που ασκείται στη κορυφή του πύργου εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Η φόρτιση αυτή προκαλεί τη μέγιστη παραμόρφωση του πασσάλου.

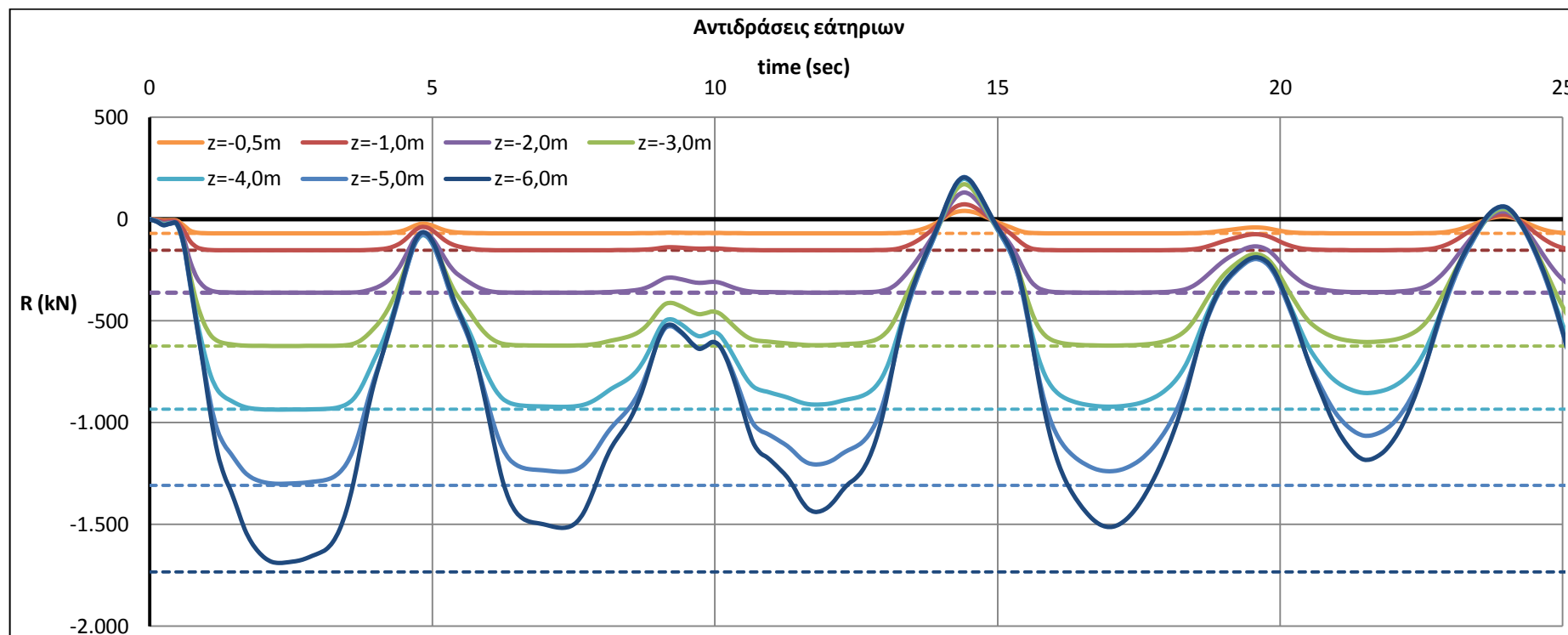
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.37) απεικονίζεται η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας στα πρώτα 60sec της δυναμικής ανάλυσης. Στο διάγραμμα παρουσιάζονται ξεχωριστά οι μετατοπίσεις που προκαλεί η κάθε φόρτιση ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση.



Σχήμα 6.37 – Μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως το φορτίο του κυματισμού και το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πύργου συμβάλλουν εξίσου στη μετατόπιση της κορυφής της ανεμογεννήτριας. Τη μεγαλύτερη συμβολή στις μετατοπίσεις του πασσάλου έχει το φορτίο που ασκείται στη κορυφή του πύργου εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Η φόρτιση αυτή προκαλεί τη μέγιστη παραμόρφωση της κατασκευής.

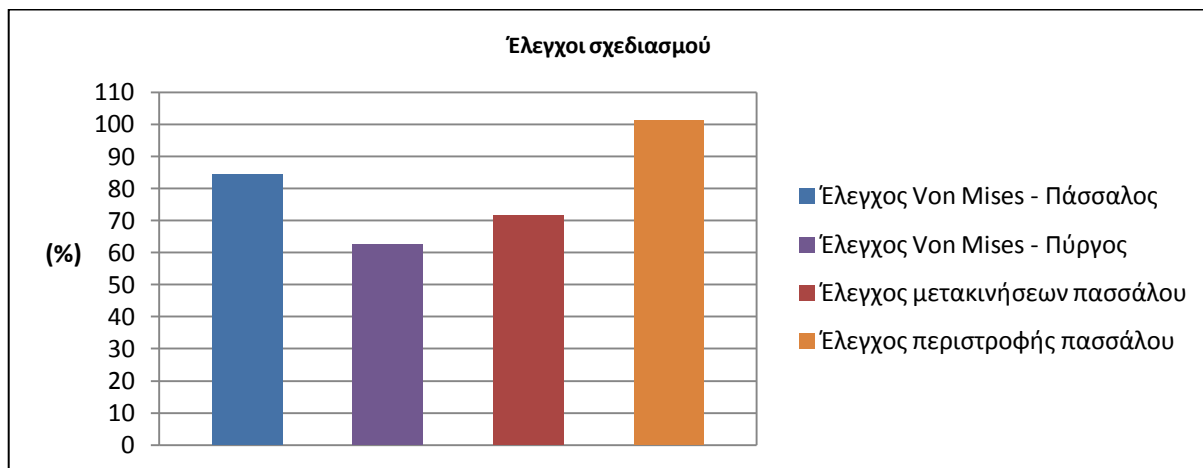
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.38) απεικονίζονται οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων καθώς και η αντίστοιχη φέρουσα ικανότητα του εδάφους (η φέρουσα ικανότητα του εδάφους σε κάθε βάθος απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή ίδιου χρώματος με της αντιδράσεις του ελατηρίου που βρίσκεται στο αντίστοιχο υψόμετρο) των πρώτων μέτρων της θεμελίωσης του πασσάλου στα πρώτα 25sec της δυναμικής ανάλυσης (στο υψόμετρο $z=0\text{m}$ βρίσκεται ο πυθμένας της θάλασσας).



Σχήμα 6.38 – Αντιδράσεις μη-γραμμικών ελατηρίων και αντίστοιχη φέρουσα ικανότητα εδάφους στα πρώτα μέτρα θεμελίωσης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως μέχρι τα πρώτα 4m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας οι αντιδράσεις των ελατηρίων προσεγγίζουν συνεχώς τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους στο αντίστοιχο βάθος. Προκύπτει δηλαδή πως στα πρώτα 4m της θεμελίωσης του πασσάλου δημιουργείται μια πλαστική ζώνη στο έδαφος. Από τα 5m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και πιο βαθιά, αυξάνει το διάστημα μεταξύ αντιδράσεων ελατηρίων και αντίστοιχης φέρουσας ικανότητας εδάφους.

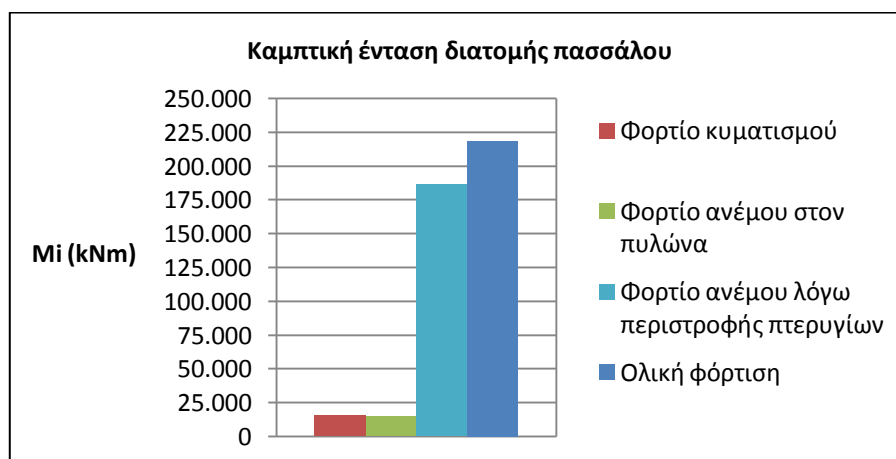
Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 6.39) παρουσιάζεται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας, ο έλεγχος μέγιστης μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα και ο έλεγχος μέγιστης περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου και του πύργου κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.39 – Έλεγχοι σχεδιασμού πασσάλου και πύργου

Σε ότι αφορά τον πάσσαλο, ο πιο κρίσιμος έλεγχος είναι ο περιορισμός που υπάρχει στη περιστροφή του στη στάθμη του πυθμένα. Συγκεκριμένα έλεγχος αυτός δείχνει ότι τα χαρακτηριστικά του πασσάλου που έχει επιλεγεί δεν επαρκούν και πρέπει να γίνει ανασχεδιασμός του. Στη συνέχεια ακολουθεί ο περιορισμός στην αναπτυσσόμενη ένταση του πασσάλου (εκπληρώνεται κατά 85%) και τέλος ο περιορισμός στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα που εκπληρώνεται κατά 72%. Στη περίπτωση του πύργου ο έλεγχος της φέρουσας ικανότητας του εκπληρώνεται κατά 62%.

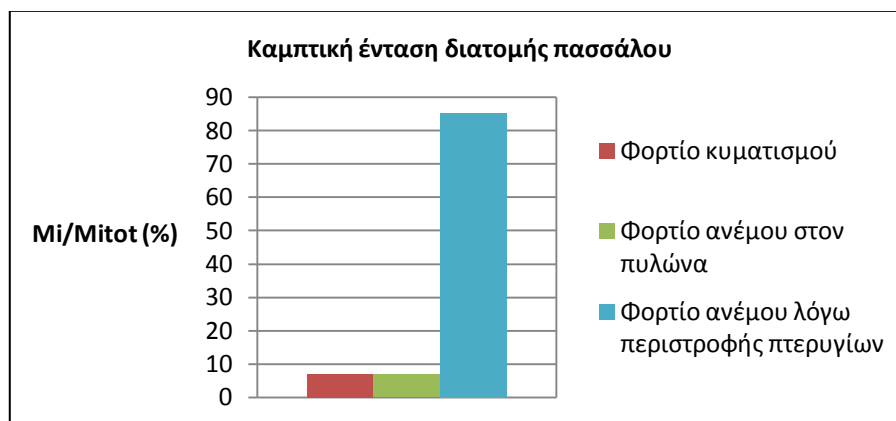
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.40) παρουσιάζεται η καμπτική ένταση της διατομής του πασσάλου, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση, τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.40 – Καμπτική ένταση διατομής πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η συμβολή του φορτίου του κυματισμού (15.394kNm) και του αεροδυναμικού φορτίου κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας (15.033kNm) στη καμπτική καταπόνηση του πασσάλου είναι σχεδόν ίδια. Τη μεγαλύτερη συμβολή στη κάμψη του πασσάλου έχει το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων με 186.577kNm το οποίο κυριαρχεί στη καταπόνηση του πασσάλου. Στη ταυτόχρονη επιβολή όλων των φορτίων η καμπτική ένταση του πασσάλου είναι 218.518kNm.

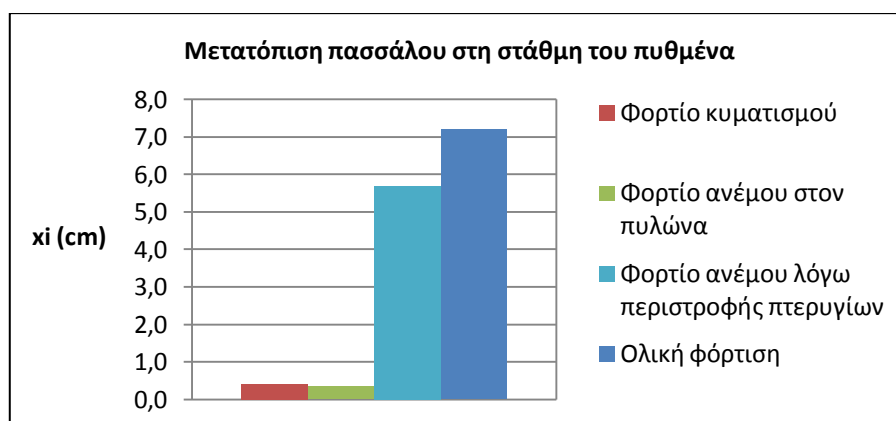
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.41) παρουσιάζεται το ποσοστό της καμπτικής έντασης της διατομής του πασσάλου, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά, τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.41 – Ποσοστά καμπτικής έντασης διατομής πασσάλου

Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 7,0% της συνολικής καμπτικής καταπόνησης του πασσάλου ενώ το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 6,9% της συνολικής φόρτισης. Το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων αποτελεί το 85,4% της συνολικής φόρτισης.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.42) παρουσιάζεται η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση, τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.42 – Μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η συμβολή του φορτίου του κυματισμού (0,4cm) και του αεροδυναμικού φορτίου κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας (0,3cm) στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι περίπου ίδια. Τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση του πασσάλου έχει το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων με 5,7cm. Στη ταυτόχρονη επιβολή όλων των φορτίων η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι 7,2cm.

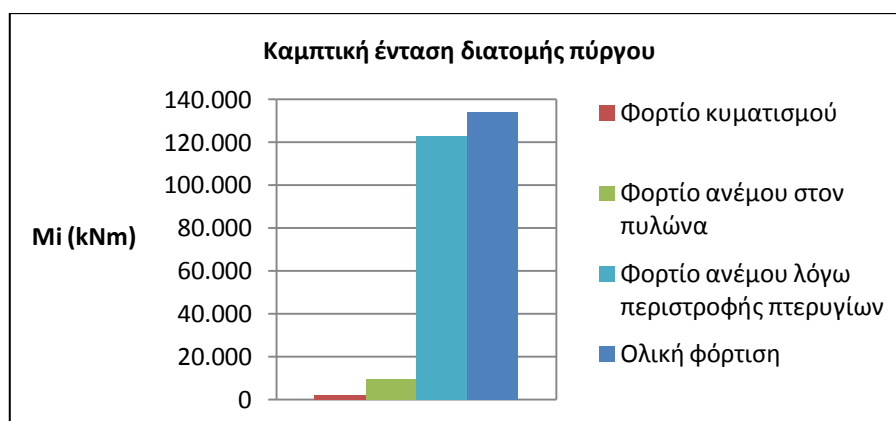
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.43) παρουσιάζεται το ποσοστό της μετατόπισης του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά, τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.43 – Ποσοστά μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα

Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 5,7% της συνολικής μετατόπισης του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα ενώ το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 4,8% της συνολικής μετατόπισης. Το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων αποτελεί το 79,1% της συνολικής μετατόπισης.

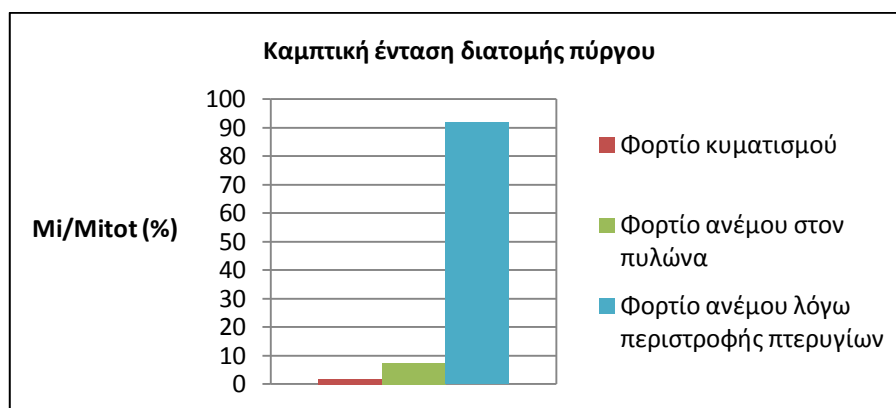
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.44) παρουσιάζεται η καμπτική ένταση της διατομής της βάσης του πύργου, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση, τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πύργου κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.44 – Καμπτική ένταση διατομής πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η συμβολή του φορτίου του κυματισμού στη καμπτική καταπόνηση της βάσης του πύργου είναι πολύ μικρή (2.294kNm). Το αεροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας ασκεί μεγαλύτερη φόρτιση με 9.708kNm. Τη μεγαλύτερη συμβολή στη κάμψη της βάσης του πύργου έχει το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων με 122.984kNm το οποίο κυριαρχεί στη καταπόνηση του πύργου. Στη ταυτόχρονη επιβολή όλων των φορτίων η καμπτική ένταση της βάσης του πύργου είναι 134.075kNm.

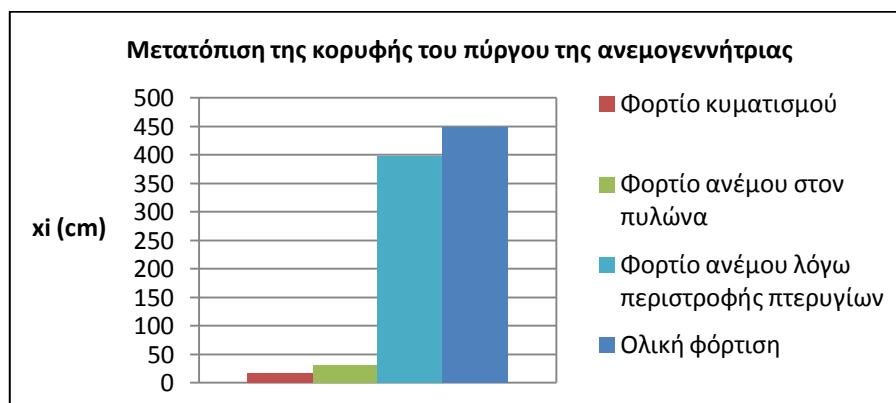
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.45) παρουσιάζεται το ποσοστό της καμπτικής έντασης της διατομής της βάσης του πύργου, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά, τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πυλώνα κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.45 – Ποσοστά καμπτικής έντασης διατομής πύργου

Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 1,7% της συνολικής καμπτικής καταπόνησης της βάσης του πύργου ενώ το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 7,2% της συνολικής φόρτισης. Το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων αποτελεί το 91,7% της συνολικής φόρτισης.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.46) παρουσιάζεται η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά καθώς και η συνολική φόρτιση, τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης της κορυφής κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.46 – Μετατόπιση της κορυφής του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως τη μικρότερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής του πύργου έχει το φορτίο του κυματισμού με 16cm. Μεγαλύτερη μετατόπιση στη κορυφή του πύργου προκαλεί το αεροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας (30cm). Τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας έχει το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων με 398cm. Στη ταυτόχρονη επιβολή όλων των φορτίων η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι 448cm.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.47) παρουσιάζεται το ποσοστό της μετατόπισης της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας, που προκαλεί το κάθε φορτίο κατασκευής ξεχωριστά, τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης της κορυφής κατά τη διάρκεια της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.47 – Ποσοστά μετακίνησης της κορυφής του πύργου

Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 3,6% της συνολικής μετατόπισης της κορυφής του πύργου ενώ το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 6,7% της συνολικής μετατόπισης. Το φορτίο εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων αποτελεί το 88,8% της συνολικής μετατόπισης της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας.

Στο παρακάτω πίνακα (Σχήμα 6.48) παρουσιάζονται οι ιδιοπερίοδοι, οι ιδιοσυχνότητες καθώς και τα ποσοστά της ιδιομορφικής μάζας που ενεργοποιεί η κάθε ιδιομορφή σε κάθε διεύθυνση, στις 20 πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής.

Α.Α.	Ιδιοσυχνότητες	Ιδιοσυχνότητες	Ιδιοπερίοδοι	Ποσοστό ιδιομορφικής μάζας που ενεργοποιεί η κάθε ιδιομορφή στις τρεις διευθύνσεις - X - Y - Z		
	ω (rad/sec)	f (cycles/sec)	T (sec)	M_x (%)	M_y (%)	M_z (%)
1	1,409	0,224	4,46	1,70	19,25	0,00
2	1,409	0,224	4,46	19,25	1,70	0,00
3	6,448	1,026	0,97	10,12	9,36	0,00
4	6,448	1,026	0,97	9,36	10,12	0,00
5	17,930	2,853	0,35	6,52	6,54	0,00
6	17,930	2,853	0,35	6,54	6,52	0,00
7	35,970	5,725	0,17	4,82	4,82	0,00
8	35,970	5,725	0,17	4,82	4,82	0,00

9	56,710	9,026	0,11	0,00	0,00	24,98
10	60,200	9,581	0,10	3,94	3,91	0,00
11	60,200	9,581	0,10	3,91	3,94	0,00
12	90,300	14,370	0,07	3,49	3,49	0,00
13	90,300	14,370	0,07	3,49	3,49	0,00
14	118,900	18,920	0,05	0,00	0,00	13,19
15	125,500	19,970	0,05	3,43	3,43	0,00
16	125,500	19,970	0,05	3,43	3,43	0,00
17	164,300	26,140	0,04	3,71	3,71	0,00
18	164,300	26,140	0,04	3,71	3,71	0,00
19	204,600	32,560	0,03	4,25	4,25	0,00
20	204,600	32,560	0,03	4,25	4,25	0,00

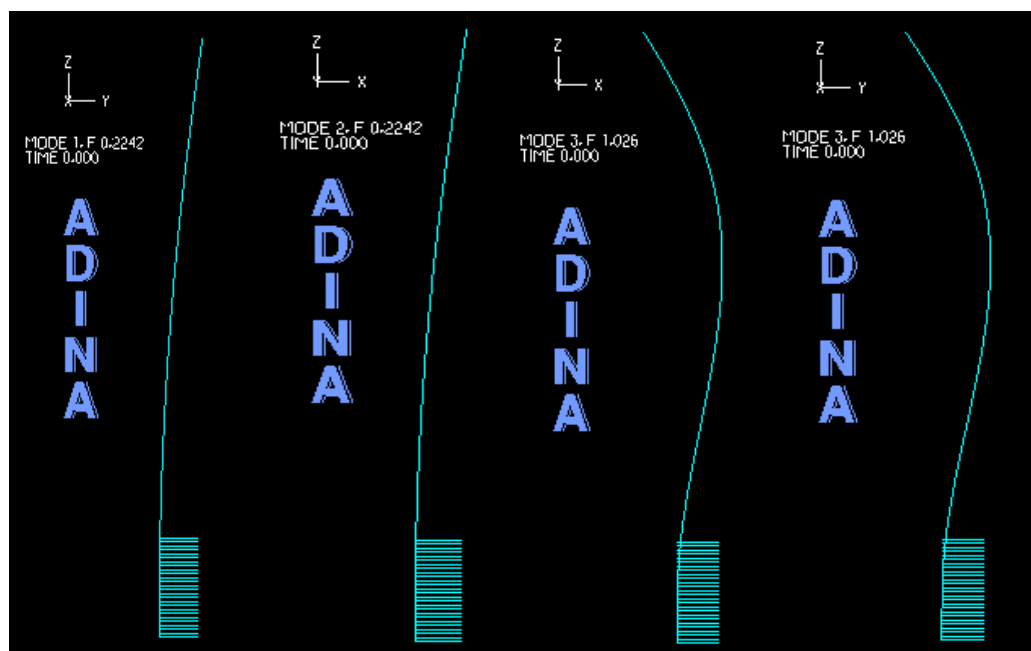
Σχήμα 6.48 – Ιδιοπερίοδοι της κατασκευής

Οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση της απόσβεσης κατά Rayleigh είναι οι ιδιοσυχνότητες της 2^{ης} και της 3^{ης} μεταφορικής ιδιομορφής οι οποίες ενεργοποιούν και την μέγιστη ιδιομορφική μάζα κατά τη διεύθυνση φόρτισης της κατασκευής, δηλαδή τη διεύθυνση x. Έτσι ο πίνακας με τα στοιχεία της απόσβεσης παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 6.48).

ξ	0,02	ξ - Απόσβεση κατασκευής
ω_1 (rad/sec)	1,409	1 ^η κυρίαρχη μετακινησιακή ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση x
ω_2 (rad/sec)	6,448	2 ^η Κυρίαρχη μετακινησιακή ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση x
Alpha	0,0463	Συντελεστής απόσβεσης κατά Rayleigh
Beta	0,0051	Συντελεστής απόσβεσης κατά Rayleigh

Σχήμα 6.49 – Συντελεστές απόσβεσης κατά Rayleigh

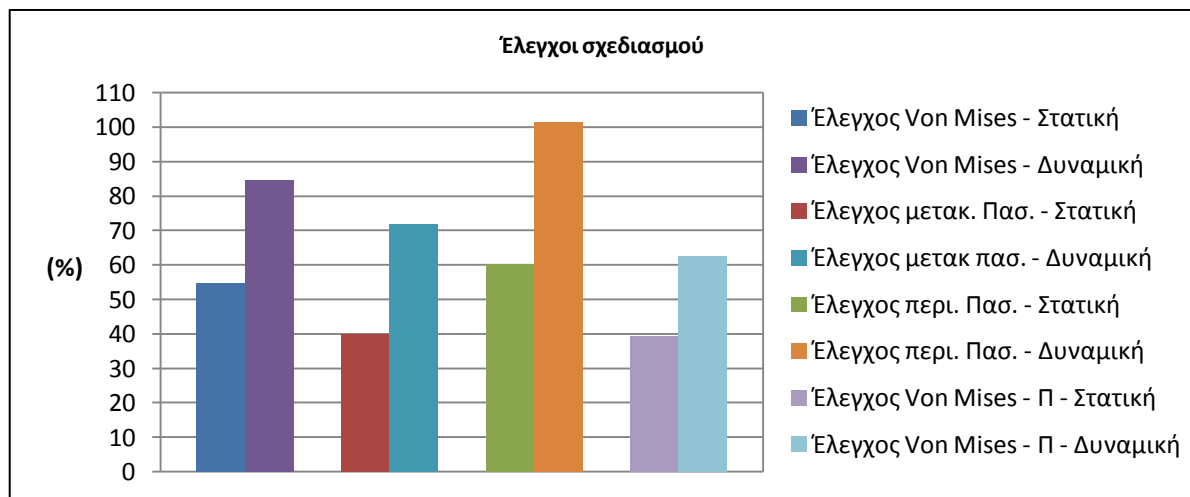
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τέσσερις πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής (Σχήμα 6.50).

Σχήμα 6.50 – 1^η και 2^η Ιδιομορφή (T=4,46sec) – 3^η και 4^η Ιδιομορφή (T=0,97sec)

6.2 Σύγκριση δυναμικής με στατική ανάλυση

Σε αυτή τη παράγραφο γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από μεμονωμένη δοκιμή στατικής ανάλυσης με την αντίστοιχη της δυναμικής ανάλυσης προκειμένου να διερευνηθεί πόσο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την διενέργεια στατικών αναλύσεων σε μια θαλάσσια ανεμογεννήτρια. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής είναι ίδια με αυτά της μεμονωμένης στατικής και της αντίστοιχης δυναμικής ανάλυσης.

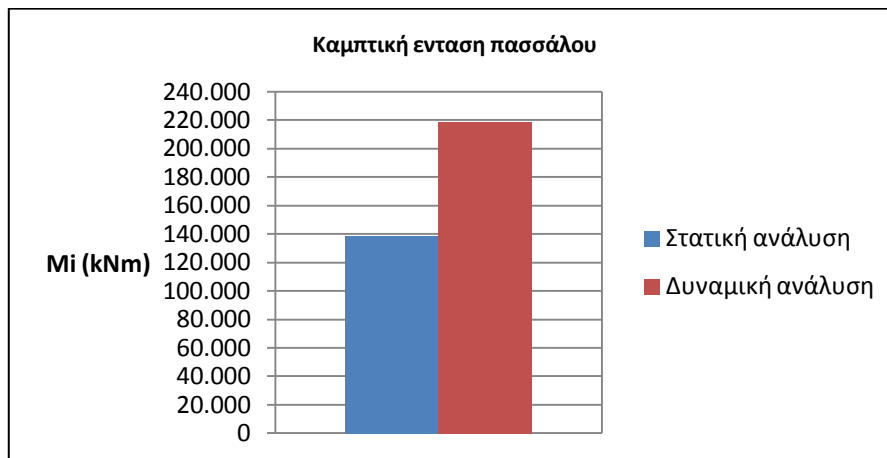
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.51) παρουσιάζονται οι έλεγχοι σχεδιασμού του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας που προέκυψαν από τη στατική και τη δυναμική ανάλυση. Στη περίπτωση της δυναμικής ανάλυσης παρουσιάζονται τα μεγέθη που προέκυψαν τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και μετατόπισης τόσο του πασσάλου όσο και του πύργου της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 6.51 – Έλεγχοι σχεδιασμού πασσάλου και πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η διενέργεια στατικών αναλύσεων χρησιμοποιώντας τις μέγιστες τιμές των φορτίων της κατασκευής (πολλαπλασιασμένες με δυναμικούς συντελεστές ώστε να ληφθεί υπόψη ο δυναμικός χαρακτήρας των φορτίων) σε σχέση με την εφαρμογή δυναμικής ανάλυσης, οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα για τη φέρουσα ικανότητα και τις παραμορφώσεις της κατασκευής. Στη περίπτωση της στατικής ανάλυσης ο πάσσαλος φτάνει το 55% της αντοχής του ενώ στην αντίστοιχη δυναμική ανάλυση το 85%. Στη περίπτωση της στατικής ανάλυσης η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα φθάνει το 40% της μέγιστης επιτρεπόμενης ενώ στη δυναμική ανάλυση το 72%. Η περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα στη περίπτωση της στατικής ανάλυσης αγγίζει το 60% της μέγιστης επιτρεπόμενης ενώ στη δυναμική ανάλυση το 101%. Τέλος στη περίπτωση της στατικής ανάλυσης ο πύργος αγγίζει το 39% της αντοχής του ενώ στην αντίστοιχη δυναμική ανάλυση το 62%.

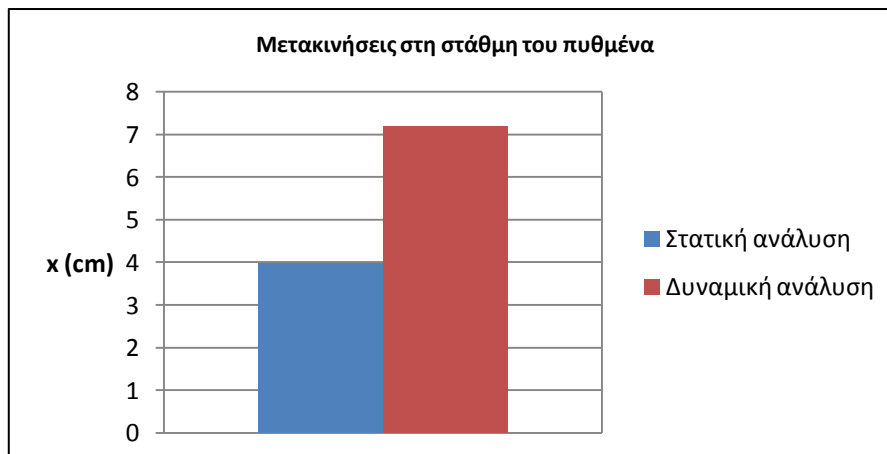
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.52) παρουσιάζει η καμπτική ένταση της διατομής του πασσάλου όπου παρουσιάζει τη μέγιστη εντατική καταπόνηση στη περίπτωση της στατικής και της αντίστοιχης δυναμικής ανάλυσης της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 6.52 – Καμπτική ένταση διατομής πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι στη περίπτωση διενέργειας στατικής ανάλυσης η μέγιστη καμπτική ένταση του πασσάλου είναι 138.564kNm ενώ στη περίπτωση της δυναμικής ανάλυσης είναι 218.518kNm. Βλέπουμε δηλαδή πόσο μεγάλη διαφορά έχει η δυναμική ανάλυση με την ένταση της στατικής ανάλυσης η οποία δεν αναδεικνύει την πραγματική φόρτιση του πασσάλου.

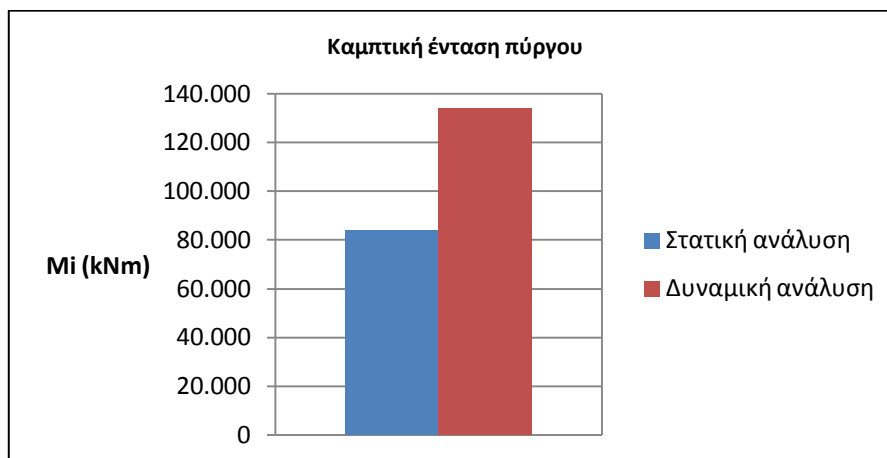
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.53) παρουσιάζει η μετατόπιση της κατασκευής στη στάθμη του πυθμένα, στη περίπτωση της στατικής και της αντίστοιχης δυναμικής ανάλυσης της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 6.53 – Μετακίνηση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει η διαφορά των αποτελεσμάτων μεταξύ στατικής και δυναμικής ανάλυσης αφού στη πρώτη περίπτωση η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα προκύπτει 4,0cm ενώ στη δεύτερη περίπτωση 7,2cm.

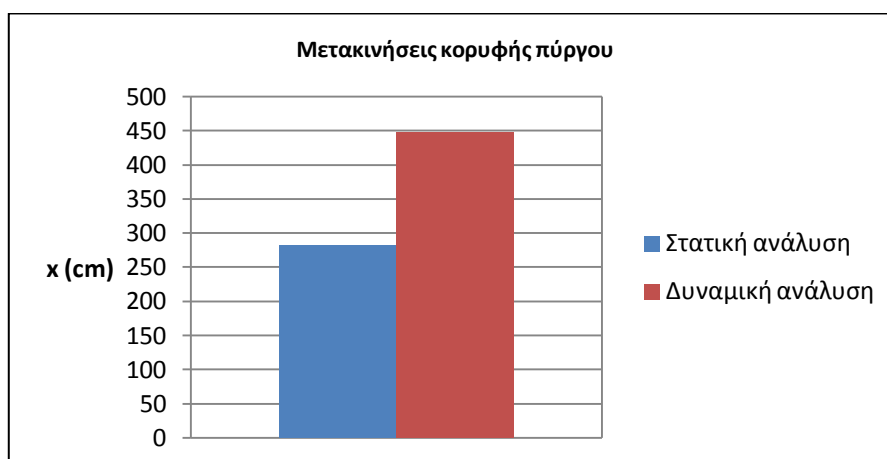
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.54) παρουσιάζει η καμπτική ένταση της διατομής της βάσης του πύργου, στη περίπτωση της στατικής και της αντίστοιχης δυναμικής ανάλυσης της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 6.54 – Καμπτική ένταση διατομής πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι στη περίπτωση διενέργειας στατικής ανάλυσης η μέγιστη καμπτική ένταση της βάσης του πύργου είναι 84.162kNm ενώ στη περίπτωση της δυναμικής ανάλυσης είναι 134.075kNm. Βλέπουμε δηλαδή πόσο μεγάλη διαφορά έχει η ένταση της στατικής ανάλυσης η οποία δεν αναδεικνύει την πραγματική φόρτιση του πύργου της ανεμογεννήτριας.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.55) παρουσιάζει η μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής, στη περίπτωση της στατικής και της αντίστοιχης δυναμικής ανάλυσης της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 6.55 – Μετακίνηση κορυφής της κατασκευής

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει η σημαντική διαφορά των αποτελεσμάτων μεταξύ στατικής και δυναμικής ανάλυσης αφού στη πρώτη περίπτωση η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας προκύπτει 283cm ενώ στη δεύτερη περίπτωση 448cm. Προκύπτει δηλαδή πως η εφαρμογή μόνο στατικών αναλύσεων οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα για την εντατική καταπόνηση και τη παραμόρφωση της κατασκευής.

6.3 Παραμετρικές δυναμικές επιλύσεις

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των παραμετρικών δυναμικών αναλύσεων που έγιναν για να διαπιστωθεί η επιρροή των διάφορων παραμέτρων στην συμπεριφορά της κατασκευής. Συγκεκριμένα οι παράμετροι που μεταβάλλονται είναι οι εξής:

- Το μήκος θεμελιώσεως του πασσάλου
- Η διάμετρος του πασσάλου
- Η φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελιώσεως
- Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας

Τα κριτήρια σχεδιασμού όπως έχουν αναφερθεί και σε παραπάνω κεφάλαιο είναι:

1. Έλεγχος φέρουσας ικανότητας πασσάλου και πύργου
2. Μέγιστη μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα: 0,10m
3. Μέγιστη περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα: 0,5°

6.3.1 Μεταβολή του μήκους θεμελιώσεως του πασσάλου

Το μήκος θεμελίωσης του πασσάλου παίρνει τις εξής τιμές:

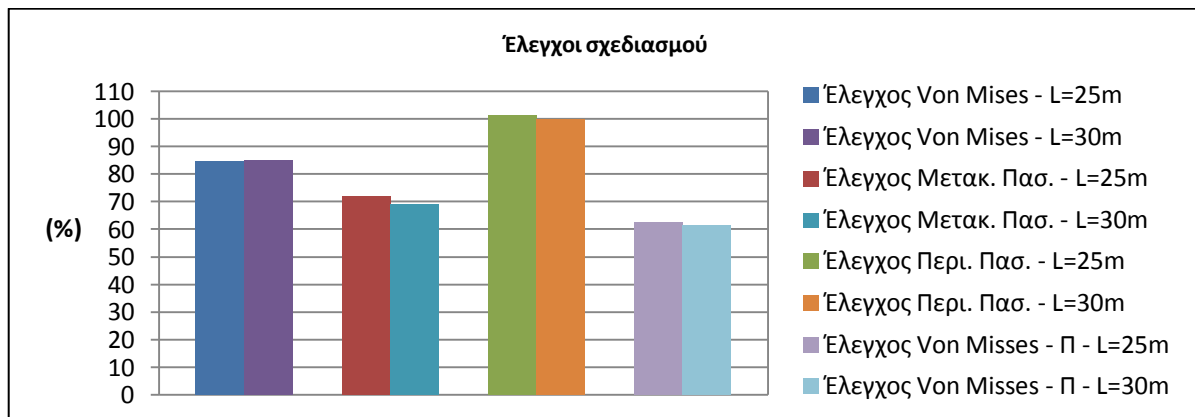
1. $L=25,0\text{m}$
2. $L=30,0\text{m}$

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

1. Διάμετρος πασσάλου $D=4,0\text{m}$
2. Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
3. Εσωτερική γωνία τριβής $\phi=35^\circ$

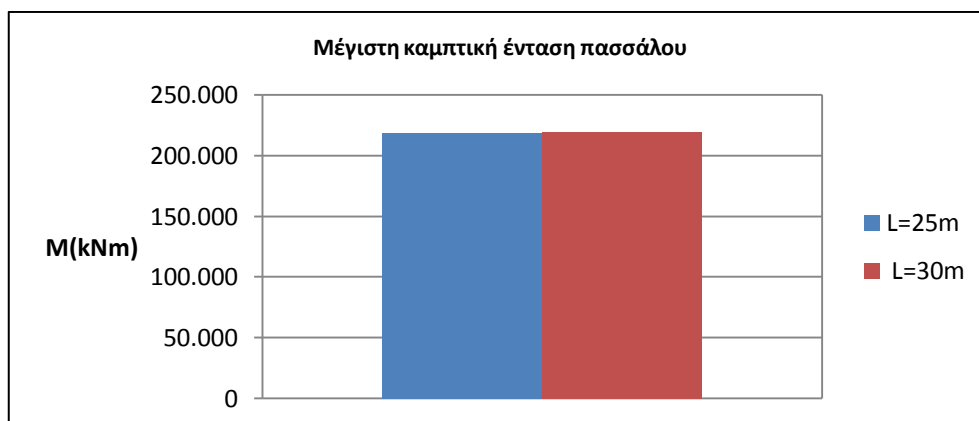
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου και του πύργου, ο έλεγχος μέγιστης μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα και ο έλεγχος μέγιστης περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα, τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και παραμόρφωσης του πασσάλου και του πύργου, για τις διάφορες τιμές του μήκους θεμελιώσεως του πασσάλου. Προβάλλονται επίσης οι μέγιστες καμπτικές καταπονήσεις του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς και οι μετακινήσεις τις κατασκευής στη στάθμη του πυθμένα και στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς μεταβάλλεται το μήκος έμπηξης του πασσάλου. Τέλος προβάλλονται για τα μήκη θεμελιώσεως των 25m και των 30m τα ποσοστά συμβολής της κάθε φόρτισης ξεχωριστά, στα εντατικά μεγέθη και τις μετατοπίσεις του πασσάλου και του

πύργου της ανεμογεννήτριας τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και παραμόρφωσης του πασσάλου και του πύργου.



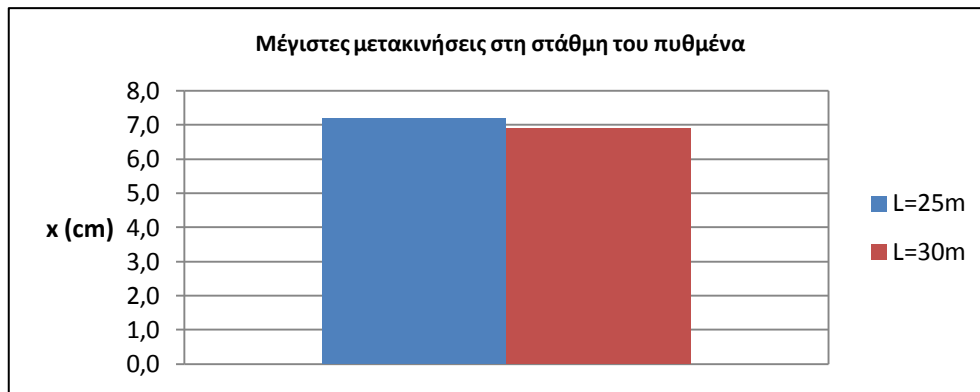
Σχήμα 6.56 – Έλεγχοι σχεδιασμού τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και παραμόρφωσης του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.56) προκύπτει πως η μέγιστη καταπόνηση του πασσάλου μεταβάλλεται ελάχιστα καθώς αλλάζει το μήκος έμπτυξης από τα 25m στα 30m. Συγκεκριμένα και για τις δύο περιπτώσεις βαθών έμπτυξης η καταπόνηση του πασσάλου είναι περίπου στο 85% της αντοχής του. Η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται από το 72% στο 69% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς αυξάνει το μήκος θεμελίωσης από τα 25m στα 30m. Η περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται από το 101% στο 99% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς αυξάνεται το μήκος θεμελίωσης του πασσάλου. Τέλος η μέγιστη καταπόνηση του πύργου και στις δύο περιπτώσεις παραμένει σταθερή στο 62% της αντοχής του.



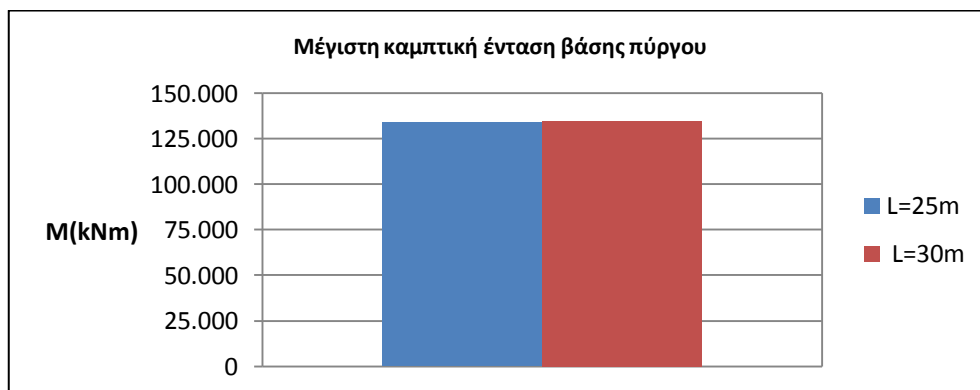
Σχήμα 6.57 – Μέγιστες καμπτικές καταπονήσεις πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.57) προκύπτει πως και στις δύο περιπτώσεις του μηκών έμπτυξης η μέγιστη καταπόνηση του πασσάλου είναι περίπου ίδια. Συγκεκριμένα όταν το μήκος έμπτυξης είναι 25m η μέγιστη ένταση του πασσάλου είναι 218.518kNm ενώ όταν το μήκος έμπτυξης είναι 30m η καταπόνηση του πασσάλου είναι 218.908kNm.



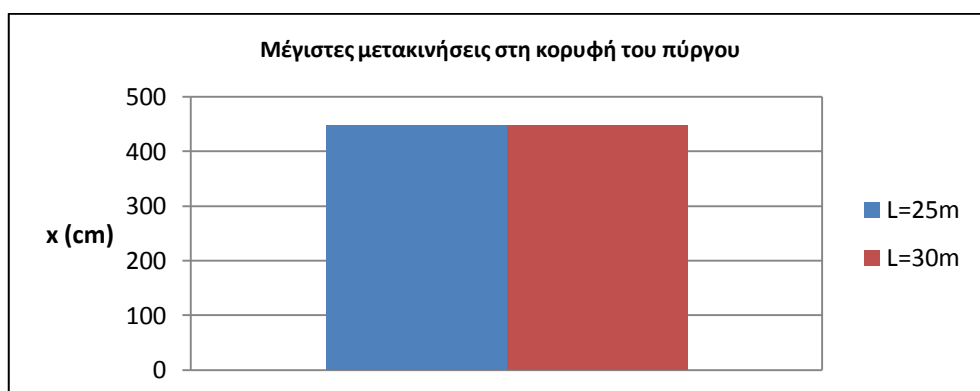
Σχήμα 6.58 – Μέγιστες μετακινήσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.58) είναι προφανές πως η μέγιστη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται από τα 7,2cm στα 6,9cm καθώς το μήκος θεμελίωσης αυξάνεται από τα 25m στα 30m.



Σχήμα 6.59 – Μέγιστες καμπτικές καταπονήσεις της βάσης του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.59) προκύπτει πως και στις δύο περιπτώσεις του μηκών έμπληξης η μέγιστη καταπόνηση της βάσης του πύργου είναι περίπου ίδια. Συγκεκριμένα όταν το μήκος έμπληξης είναι 25m η μέγιστη ένταση του πύργου είναι 134.075kNm ενώ όταν το μήκος έμπληξης είναι 30m η καταπόνηση του πασσάλου είναι 134.585kNm.



Σχήμα 6.60 – Μέγιστες μετακινήσεις στη κορυφή του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.60) προκύπτει πως η μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής και για τις δύο περιπτώσεις βαθών έμπληξης είναι περίπου ίδια στα 448cm.

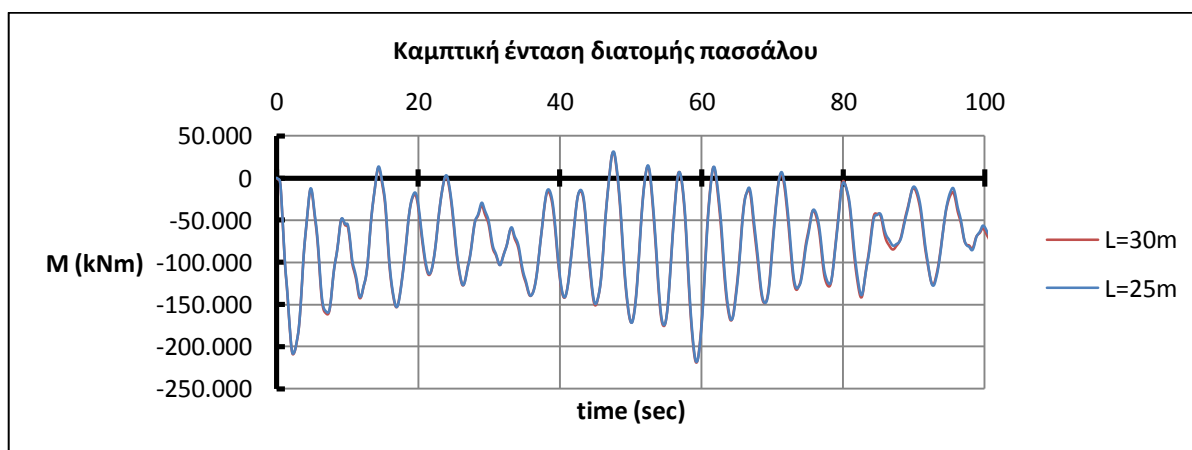
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.61) απεικονίζονται οι αντιδράσεις του μη-γραμμικού ελατηρίου που βρίσκεται στο μέγιστο βάθος του πασσάλου και στις δύο περιπτώσεις βαθών έμπηξης πασσάλου, στα πρώτα 200sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.61 – Αντιδράσεις ελατηρίων στο μέγιστο βάθος έμπηξης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε πόσο μεγαλύτερες είναι οι αντιδράσεις του ελατηρίου που βρίσκεται στην αιχμή του πασσάλου όταν το βάθος έμπηξης είναι 25m σε σχέση με την περίπτωση των 30m. Εύκολα γίνεται κατανοητό πως το μήκος των 25m δεν επαρκεί και πρέπει να αυξηθεί. Ωστόσο βλέπουμε ότι και στη περίπτωση που το βάθος έμπηξης του πασσάλου είναι 30m οι αντιδράσεις του ελατηρίου δεν είναι μηδενικές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην "σβήνει" η ροπή και η τέμνουσα δύναμη που αναπτύσσεται στο πάσσαλο στο μέγιστο βάθος έμπηξης, πράγμα που σημαίνει ότι και τα 30m μήκος θεμελιώσεως δεν επαρκούν και πρέπει αυτό το μήκος να αυξηθεί.

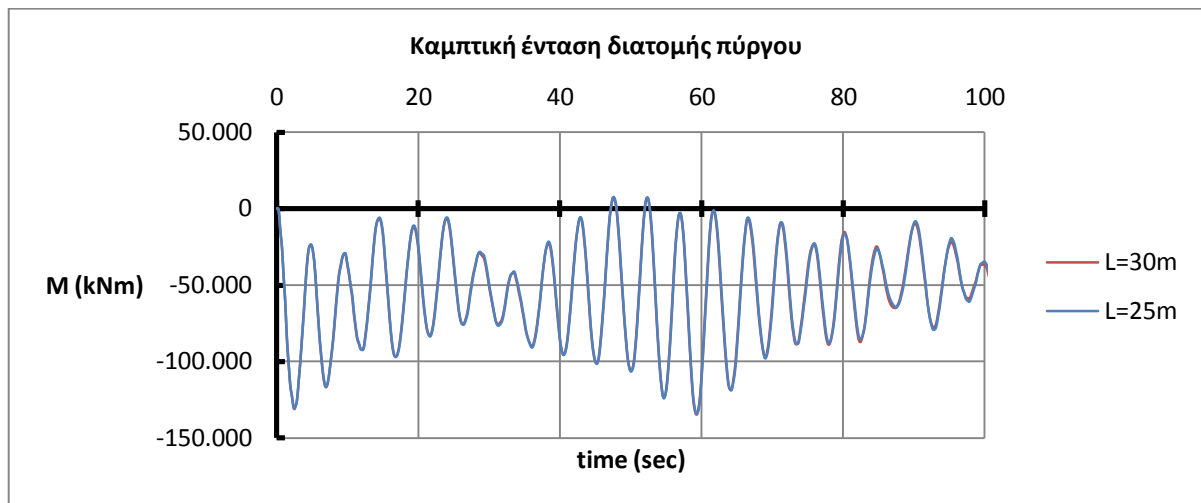
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.62) παρουσιάζεται η καμπτική ένταση της διατομής του πασσάλου που παρουσιάζει τη μέγιστη εντατική καταπόνηση και για τα δύο μήκη έμπηξης πασσάλου, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.62 – Καμπτική ένταση διατομής πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως και στις δύο περιπτώσεις βαθών έμπηξης πασσάλου η καμπτική καταπόνηση, της διατομής του πασσάλου που παρουσιάζει τη μέγιστη εντατική φόρτιση, σχεδόν ταυτίζεται.

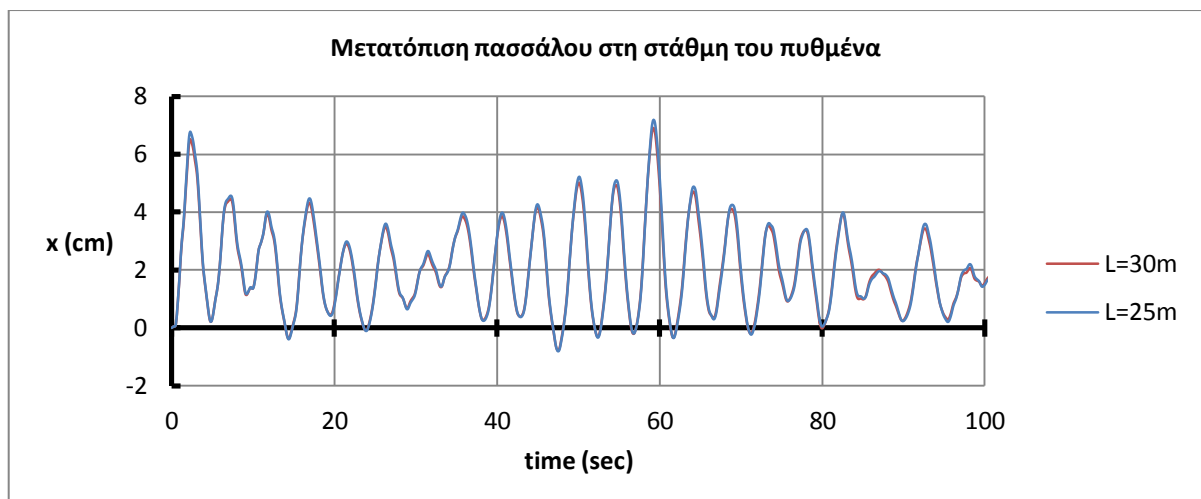
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.63) παρουσιάζεται η καμπτική ένταση της διατομής της βάσης του πύργου και για τα δύο μήκη έμπηξης πασσάλου, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.63 – Καμπτική ένταση διατομής πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως και στις δύο περιπτώσεις βαθών έμπηξης πασσάλου η καμπτική καταπόνηση, της διατομής του πύργου που παρουσιάζει τη μέγιστη εντατική φόρτιση, σχεδόν ταυτίζεται.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.64) παρουσιάζεται η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα και για τα δύο μήκη έμπηξης πασσάλου, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.64 – Μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

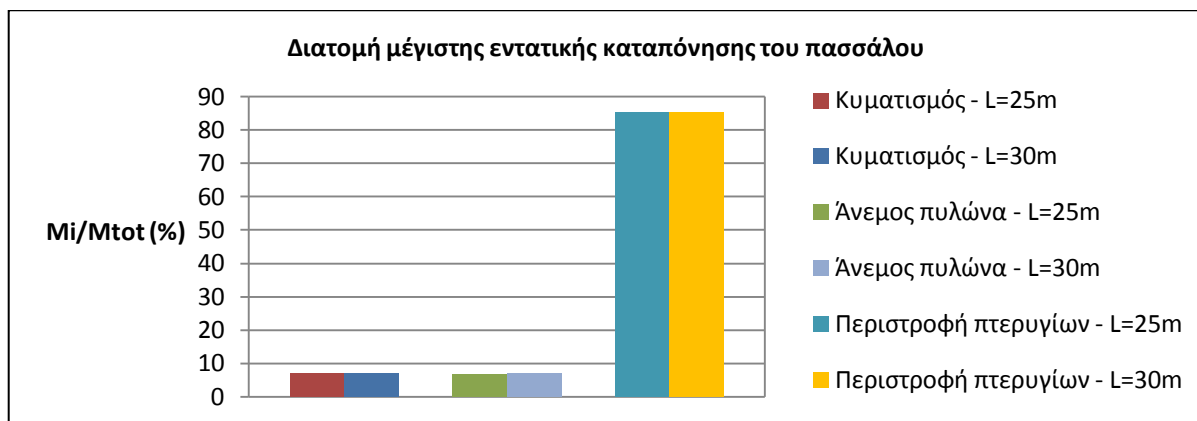
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως και στις δύο περιπτώσεις βαθών έμπηξης πασσάλου η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα σχεδόν ταυτίζεται.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.65) παρουσιάζεται η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας και για τα δύο μήκη έμπηξης πασσάλου, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



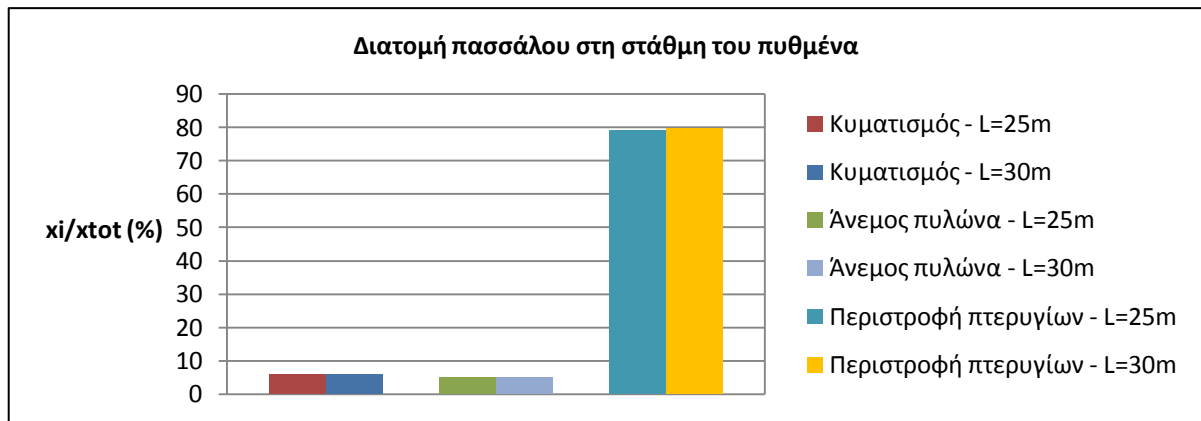
Σχήμα 6.65 – Μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως και στις δύο περιπτώσεις βαθών έμπηξης πασσάλου η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας σχεδόν ταυτίζεται.



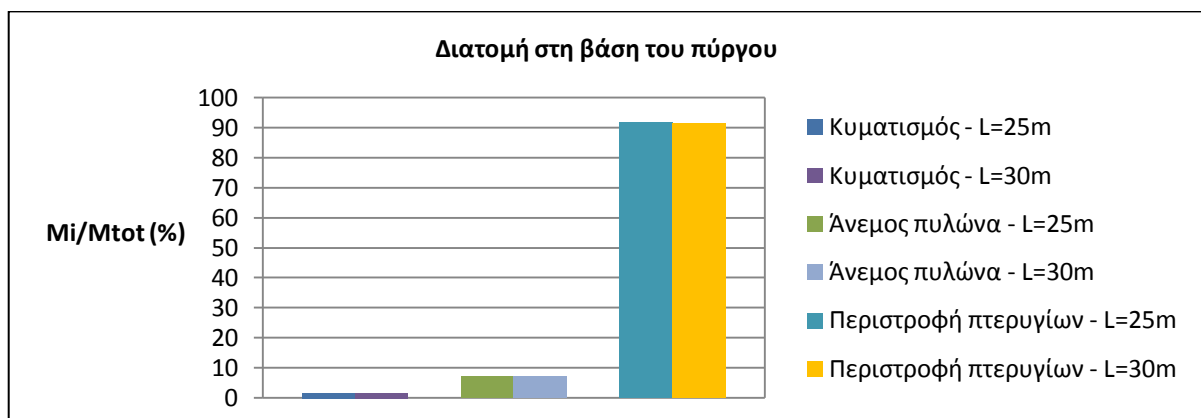
Σχήμα 6.66 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.66) προκύπτει πως και για τα δύο μήκη έμπηξης πασσάλου (25m και 30m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση του πασσάλου, τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου, είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 7% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση. Περίπου ίδια είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας με ποσοστό 7% και για τα δύο μήκη έμπηξης. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πασσάλου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 85% και για τα δύο μήκη έμπηξης του πασσάλου.



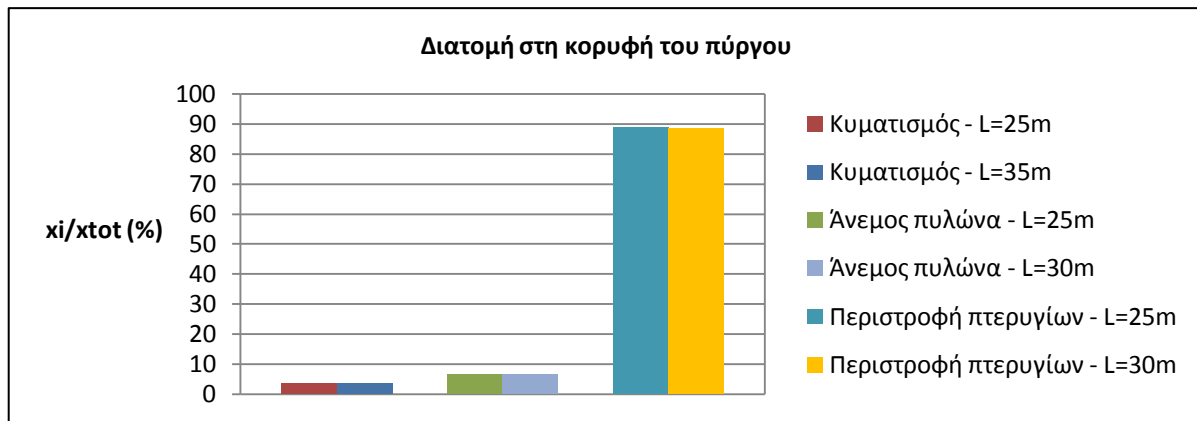
Σχήμα 6.67 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της διατομής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.67) προκύπτει πως και για τα δύο μήκη έμπτυξης πασσάλου (25m και 30m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα, τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης του πασσάλου, είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλλει κατά 6% στη συνολική μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα. Λίγο μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση του πασσάλου με ποσοστό 5% και για τα δύο μήκη έμπτυξης. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 79% και για τα δύο μήκη έμπτυξης.



Σχήμα 6.68 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή της βάσης του πύργου τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.68) προκύπτει πως και για τα δύο μήκη έμπτυξης πασσάλου (25m και 30m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση της βάσης του πύργου, τη χρονική στιγμή της μέγιστης καταπόνησης του πύργου, είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί περίπου το 1,7% της συνολικής φόρτισης. Το φορτίο του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας αποτελεί περίπου το 7,2% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο της βάσης του πύργου. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πύργου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό περίπου 91,5% και για τα δύο μήκη έμπτυξης του πασσάλου.



Σχήμα 6.69 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της κορυφής του πύργου την χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης της κορυφής

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.69) προκύπτει πως και για τα δύο μήκη έμπτυξης τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής, τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης του πύργου, είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 3,5% στη συνολική μετατόπιση της κορυφής. Λίγο μεγαλύτερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση της κορυφής με ποσοστό 6,6% και για τα δύο μήκη έμπτυξης. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 88,7% και για τα δύο μήκη έμπτυξης του πασσάλου.

6.3.2 Μεταβολή της διαμέτρου του πασσάλου

Η διάμετρος του πασσάλου παίρνει τις εξής τιμές:

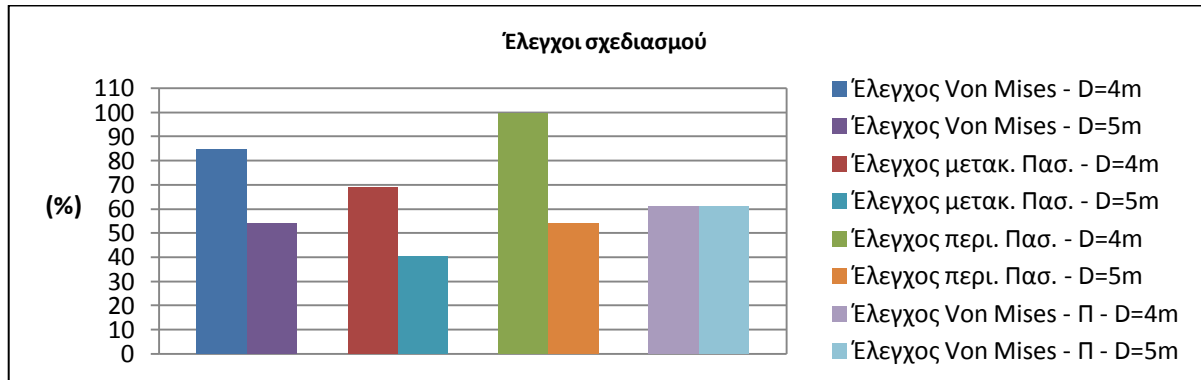
1. $D=4\text{m}$
2. $D=5\text{m}$

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

1. Μήκος έμπτυξης πασσάλου $L=30\text{m}$
2. Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
3. Εσωτερική γωνία τριβής $\phi=35^\circ$

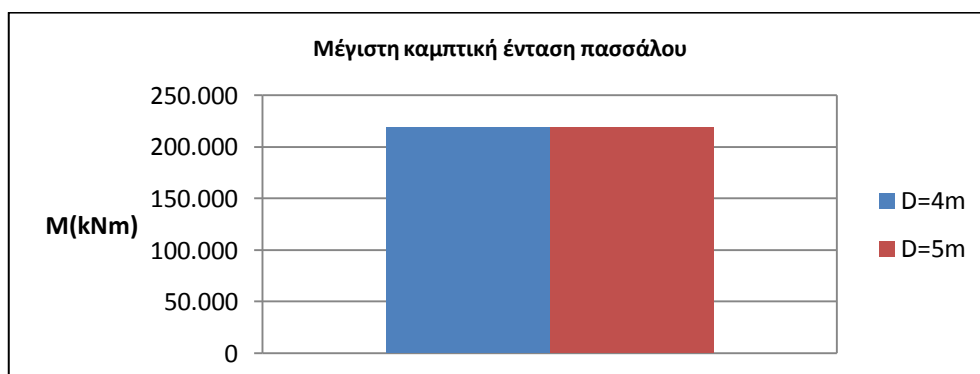
Σε αυτή την παράγραφο επιλέγεται η αύξηση της δυσκαμψίας του πασσάλου μέσω της αύξησης της διαμέτρου του. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου και του πύργου, ο έλεγχος μέγιστης μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα και ο έλεγχος μέγιστης περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα, τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και παραμόρφωσης του πασσάλου και του πύργου, για τις δύο τιμές διαμέτρου του πασσάλου. Προβάλλονται επίσης οι μέγιστες καμπτικές καταπονήσεις του πασσάλου και του πύργου της

ανεμογεννήτριας καθώς και οι μέγιστες μετακινήσεις τις κατασκευής στη στάθμη του πυθμένα και στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς μεταβάλλεται η διάμετρος του πασσάλου. Τέλος προβάλλονται για τις δύο τιμές της διαμέτρου τα ποσοστά συμβολής της κάθε φόρτισης ξεχωριστά, στα εντατικά μεγέθη και τις μετατοπίσεις του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και παραμόρφωσης του πασσάλου και του πύργου.



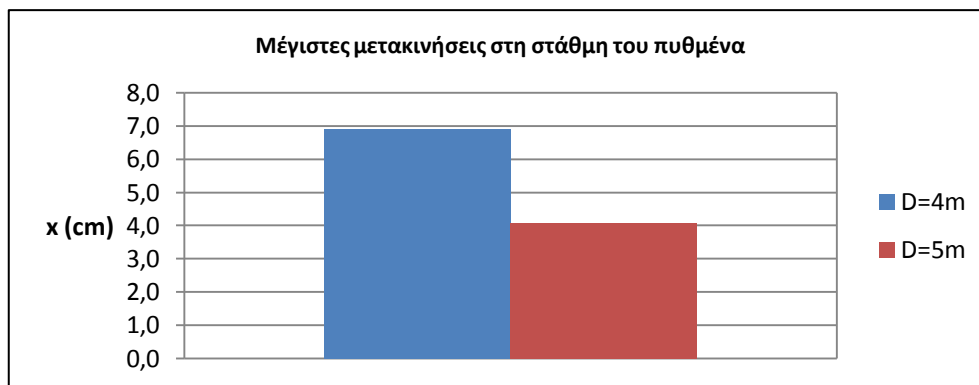
Σχήμα 6.70 – Έλεγχοι σχεδιασμού τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και παραμόρφωσης του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.70) προκύπτει πως ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου μεταβάλλεται σημαντικά καθώς αλλάζει η δυσκαμψία του πασσάλου μέσω της αύξησης της διαμέτρου του. Συγκεκριμένα για διάμετρο πασσάλου 4m η καταπόνηση του πασσάλου αγγίζει το 85% της αντοχής του ενώ στη περίπτωση των 5m το 54% της αντοχής του. Η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται σημαντικά από το 69% στο 40% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς αυξάνει η διάμετρος του πασσάλου από 4m σε 5m. Η περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται σημαντικά από το 99% στο 54% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς αυξάνει η διάμετρος του πασσάλου από 4m σε 5m. Τέλος η μέγιστη καταπόνηση του πύργου και στις δύο περιπτώσεις παραμένει σταθερή στο 61% της αντοχής του.



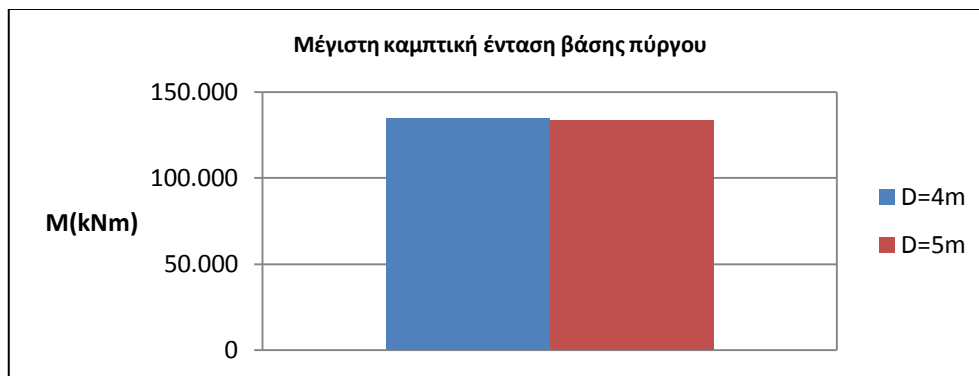
Σχήμα 6.71 – Μέγιστες καμπτικές καταπονήσεις πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.71) προκύπτει πως και στις δύο διαμέτρων πασσάλου η μέγιστη καταπόνηση του πασσάλου είναι περίπου ίδια. Συγκεκριμένα όταν η διάμετρος του πασσάλου είναι 4m η μέγιστη ένταση του πασσάλου είναι 218.908kNm ενώ όταν η διάμετρος του πασσάλου είναι 5m η καταπόνηση του πασσάλου είναι 218.683kNm.



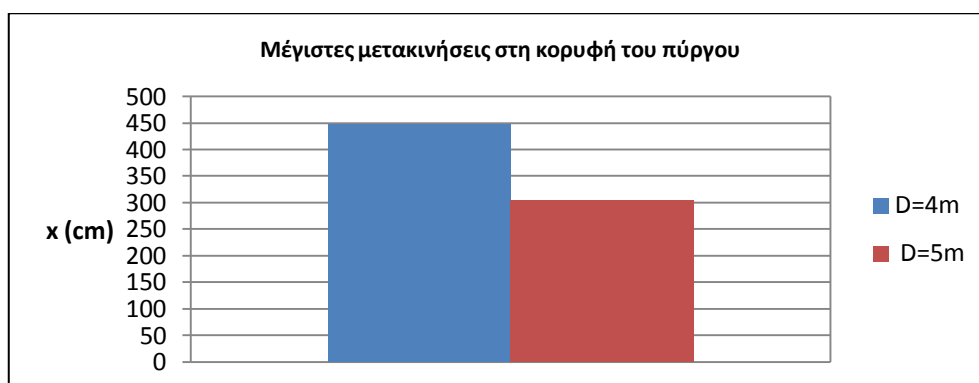
Σχήμα 6.72 – Μέγιστες μετακινήσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.72) είναι προφανές πως η μέγιστη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται σημαντικά από 6,9cm σε 4,1cm καθώς αυξάνεται η διάμετρος του πασσάλου από 4m σε 5m.



Σχήμα 6.73 – Μέγιστες καμπτικές καταπονήσεις της βάσης του πύργου

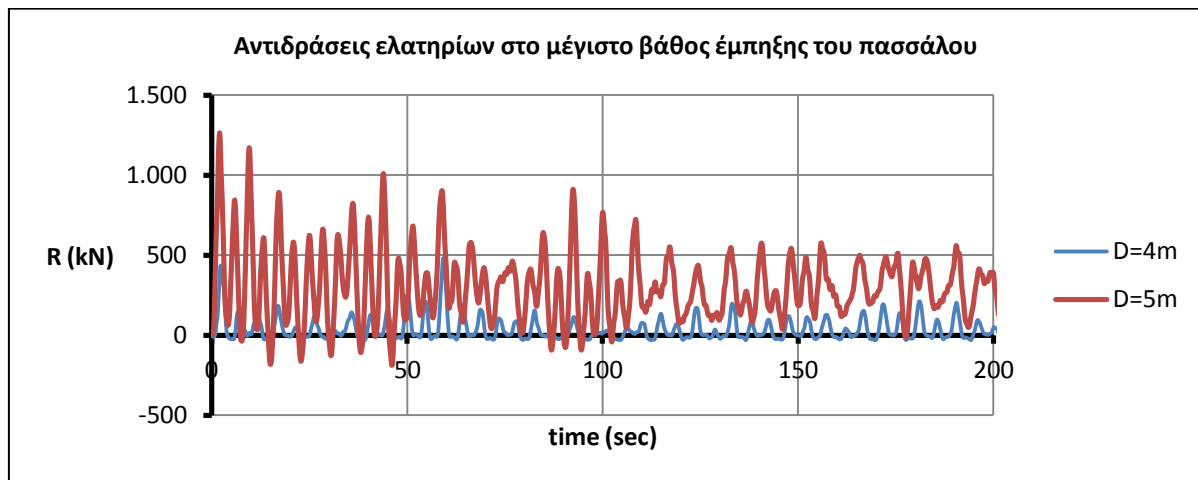
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.73) προκύπτει πως και στις δύο διαμέτρους πασσάλου η μέγιστη καταπόνηση της βάσης του πύργου είναι περίπου ίδια. Συγκεκριμένα όταν η διάμετρος του πασσάλου είναι 4m η μέγιστη ένταση του πύργου είναι 134.585kNm ενώ όταν η διάμετρος του πασσάλου είναι 5m η καταπόνηση του πασσάλου είναι 133.765kNm.



Σχήμα 6.74 – Μέγιστες μετακινήσεις στη κορυφή του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.74) προκύπτει πως η μετατόπιση της κορυφής του πύργου μειώνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται η διάμετρος του πασσάλου, από 448cm για D=4m σε 306cm για D=5m.

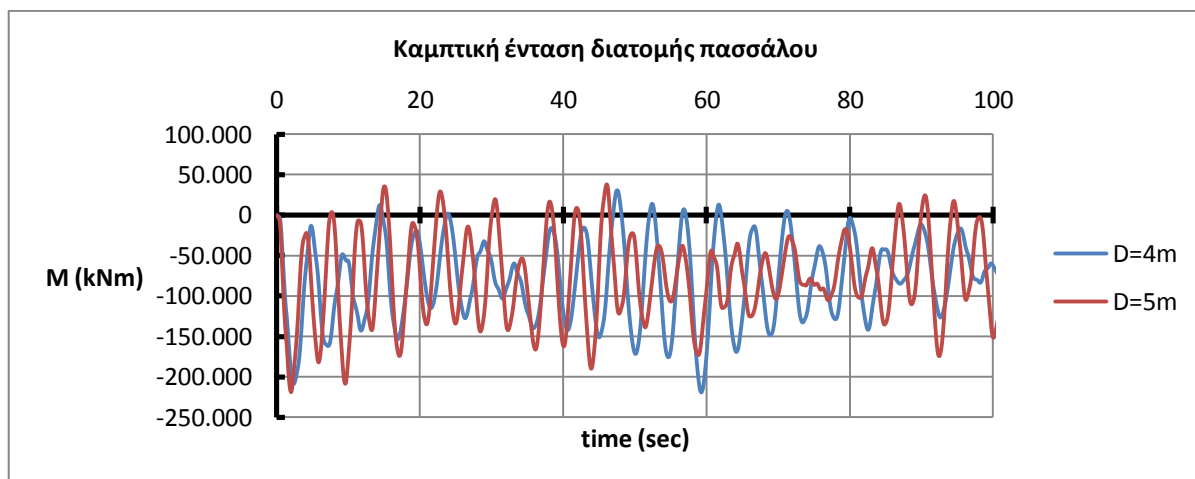
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.75) απεικονίζονται οι αντιδράσεις του μη-γραμμικού ελατηρίου που βρίσκεται στο μέγιστο βάθος του πασσάλου και στις δύο περιπτώσεις διαμέτρου πασσάλου, στα πρώτα 200sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.75 – Αντιδράσεις ελατηρίων στο μέγιστο βάθος έμπηξης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.75) προκύπτει πως στη περίπτωση του πιο δύσκαμπτου πασσάλου (με την μεγαλύτερη διάμετρο) οι αντιδράσεις του ελατηρίου στο μέγιστο βάθος είναι μεγαλύτερες από την περίπτωση της μικρότερης διαμέτρου. Αυτό συμβαίνει διότι ο πιο δύσκαμπτος πάσσαλος δεν μπορεί να ακολουθήσει την απαραμόρφωτη κατάσταση στο μέγιστο βάθος του (δηλαδή παρά το γεγονός ότι το έδαφος σε αυτό το βάθος είναι αρκετά σκληρό, η δυσκαμψία του πασσάλου είναι και αυτή μεγάλη με αποτέλεσμα ο πάσσαλος να μην παραμορφώνεται εύκολα) έτσι ώστε να είναι μικρές οι μετατοπίσεις της αιχμής του πασσάλου. Έτσι στη περίπτωση που ο πάσσαλος έχει διάμετρο 5m οι μετατοπίσεις του πασσάλου στην αιχμή του είναι μεγαλύτερες με αποτέλεσμα και οι αντιδράσεις του ελατηρίου να είναι μεγάλες.

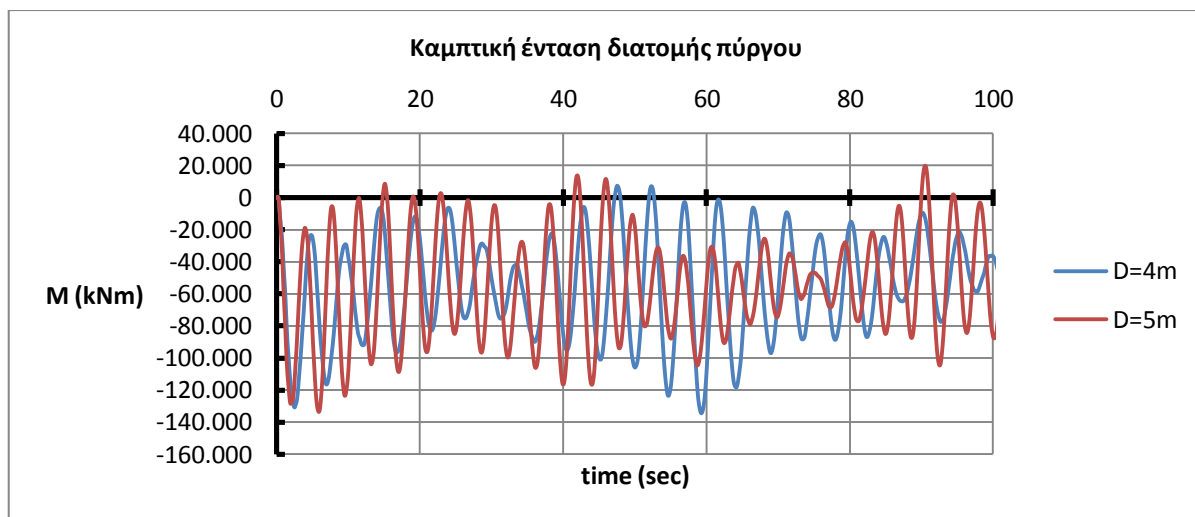
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.76) παρουσιάζεται η καμπτική ένταση της διατομής του πασσάλου που παρουσιάζει τη μέγιστη εντατική καταπόνηση και για τα δύο διαμέτρους πασσάλου, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.76 – Καμπτική ένταση διατομής πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η καμπτική καταπόνηση της διατομής του πασσάλου, που παρουσιάζει τη μέγιστη ένταση, είναι διαφορετική στις δύο περιπτώσεις διατομής πασσάλου. Ωστόσο βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή της έντασης στις δύο περιπτώσεις διατομής πασσάλου είναι παρόμοια.

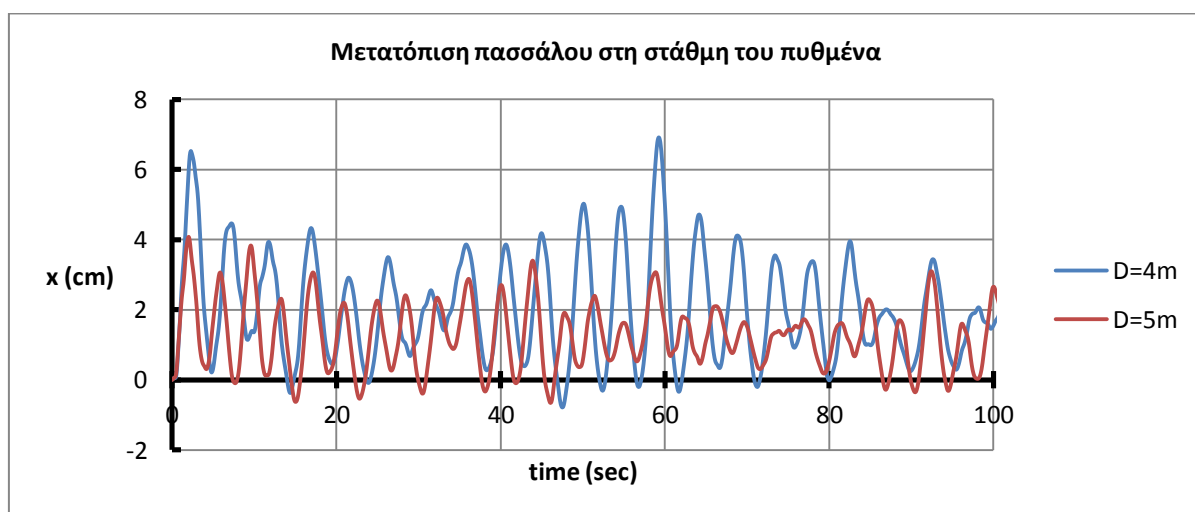
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.77) παρουσιάζεται η καμπτική ένταση της διατομής της βάσης του πύργου και για τις δύο διαμέτρους του πασσάλου, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.77 – Καμπτική ένταση διατομής πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η καμπτική καταπόνηση της διατομής της βάσης του πύργου, που παρουσιάζει τη μέγιστη ένταση, είναι διαφορετική στις δύο περιπτώσεις διατομής πασσάλου. Ωστόσο βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή της έντασης στις δύο περιπτώσεις διατομής του πασσάλου είναι παρόμοια.

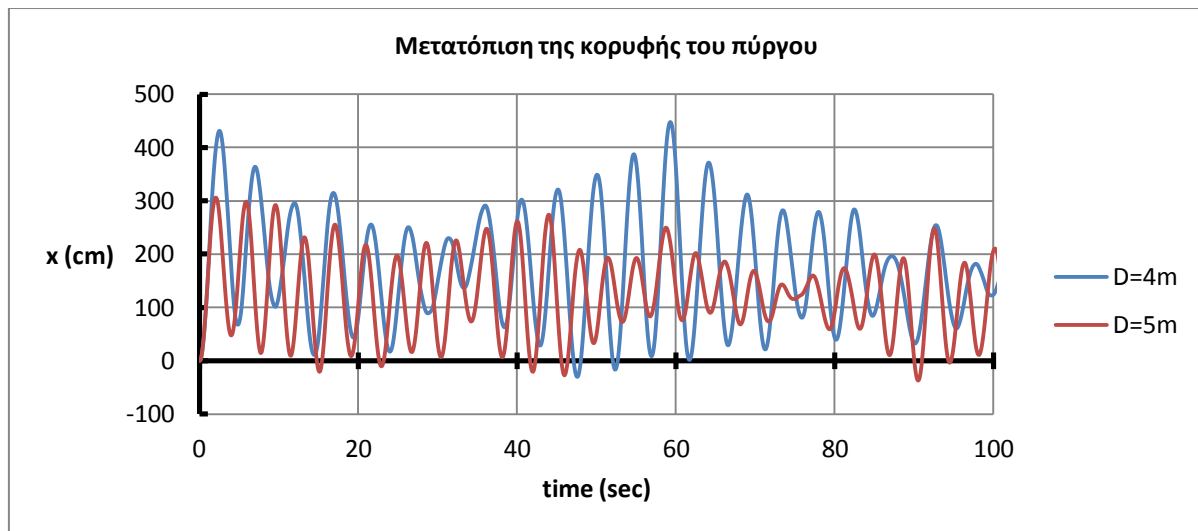
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.78) παρουσιάζεται η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα και για τις δύο τιμές της διαμέτρου του πασσάλου, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.78 – Μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

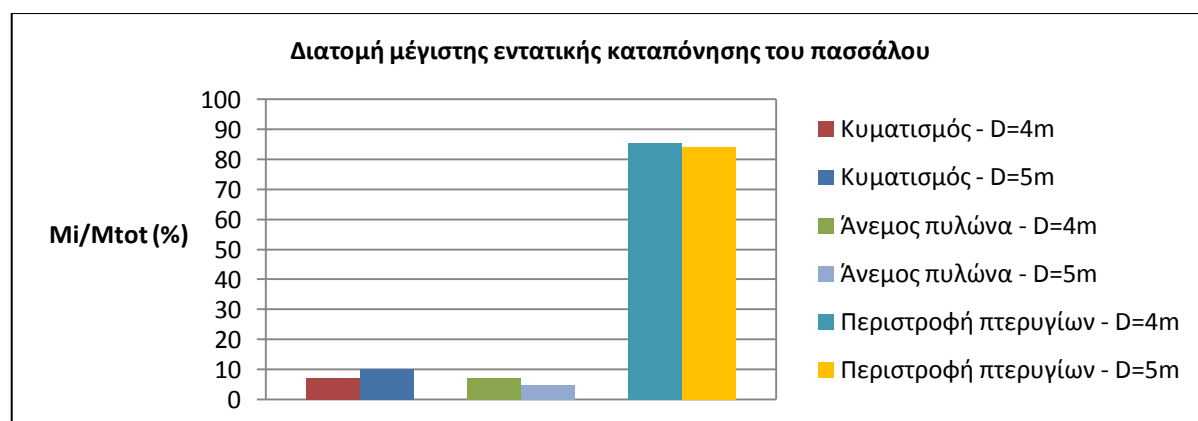
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως στη περίπτωση που η διάμετρος του πασσάλου είναι 4m οι μετατοπίσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι μεγαλύτερες από την περίπτωση που η διάμετρος του πασσάλου είναι 5m. Αυτό είναι λογικό αφού ο πιο δύσκαμπτος πάσσαλος παραμορφώνεται πιο δύσκολα.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.79) παρουσιάζεται η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας και για τις δύο τιμές της διαμέτρου του πασσάλου, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.79 – Μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας

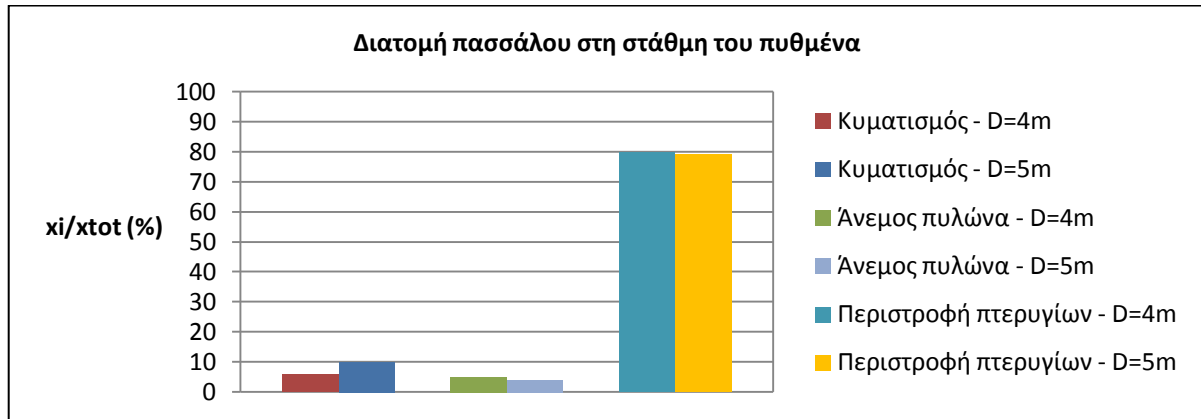
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως στη περίπτωση που η διάμετρος του πασσάλου είναι 4m οι μετατοπίσεις της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι μεγαλύτερες από την περίπτωση που η διάμετρος του πασσάλου είναι 5m. Αυτό είναι λογικό αφού ο πιο δύσκαμπτος πάσσαλος παραμορφώνεται πιο δύσκολα και άρα και οι μετατοπίσεις της κορυφής της κατασκευής θα είναι μικρότερες.



Σχήμα 6.80 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου

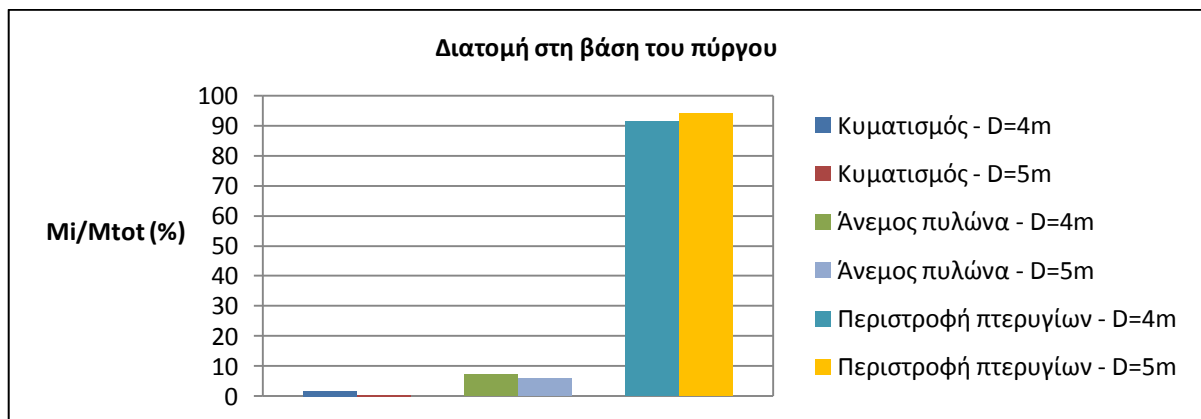
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.80) προκύπτει πως στη περίπτωση που η διάμετρος του πασσάλου είναι D=4m το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 7% της συνολικής φόρτισης ενώ στη περίπτωση D=5m το 10% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο του

πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση τη χρονική στιγμή της μέγιστης φόρτισης του πασσάλου. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας είναι 7% για διάμετρο πασσάλου 4m και 5% για διάμετρο πασσάλου 5m. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πασσάλου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 86% για διάμετρο πασσάλου D=4m και 84% για διάμετρο πασσάλου D=5m.



Σχήμα 6.81 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της διατομής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης του πασσάλου

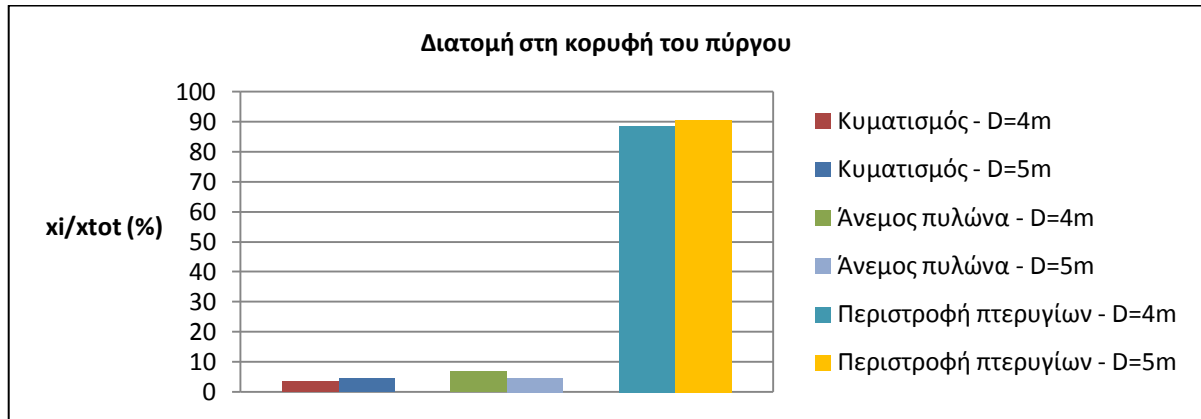
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.81) προκύπτει πως για τη περίπτωση διαμέτρου πασσάλου D=4m το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 6% στη συνολική μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα και 10% για τη περίπτωση D=5m τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση του πασσάλου είναι 5% για διάμετρο πασσάλου 4m και 4% για διάμετρο πασσάλου 5m. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 79% και για τις δύο διαμέτρους του πασσάλου.



Σχήμα 6.82 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή της βάσης του πύργου τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.82) προκύπτει πως και για τις δύο διαμέτρους (4m και 5m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση της βάσης του πύργου είναι περίπου ίδια τη χρονική στιγμή της μέγιστης καταπόνησης της βάσης του πύργου. Το φορτίο του κυματισμού αποτελείτο 1,7% της συνολικής φόρτισης για

διάμετρο πασσάλου 4m και το 0,3% για διάμετρο πασσάλου 5m. Το φορτίο του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας αποτελεί περίπου το 7% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο της βάσης του πύργου και για τις δύο διαμέτρους του πασσάλου. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πύργου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 91% για διάμετρο πασσάλου 4m και 94% για διάμετρο πασσάλου 5m.



Σχήμα 6.83 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της διατομής της κορυφής του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.83) προκύπτει πως και για τις δύο διαμέτρους τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής είναι περίπου ίδια τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης της κορυφής. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 4% στη συνολική μετατόπιση της κορυφής και για τις δύο διαμέτρους. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση της κορυφής είναι 7% για διάμετρο πασσάλου D=4m και 5% για D=5m. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 89% για διάμετρο πασσάλου 4m και 91% για διάμετρο πασσάλου 5m.

6.3.3 Μεταβολή της φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελιώσεως

Η φέρουσα ικανότητα του εδάφους παίρνει τις εξής τιμές:

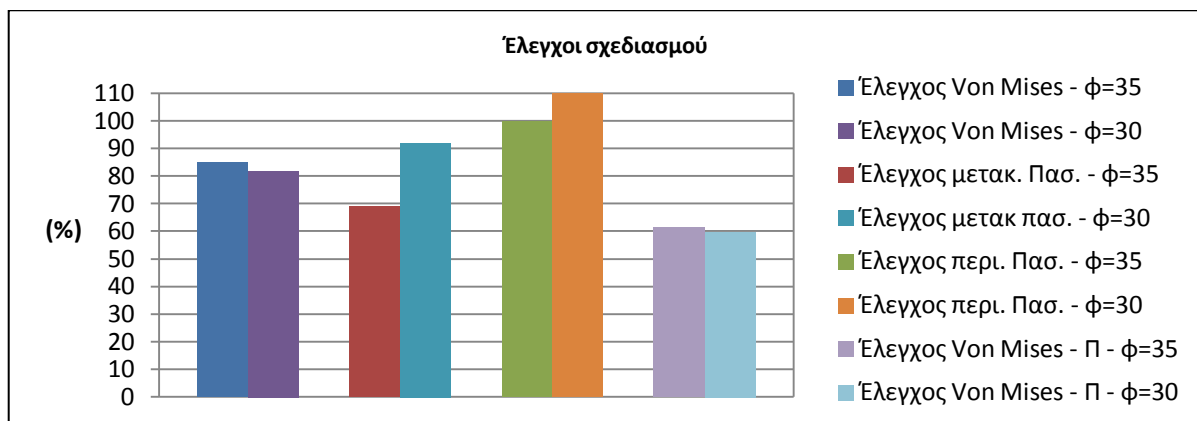
1. Εσωτερική γωνία τριβής $\phi=30^\circ$
2. Εσωτερική γωνία τριβής $\phi=35^\circ$

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

1. Μήκος έμπηξης πασσάλου $L=30m$
2. Διάμετρος πασσάλου $D=4,0m$
3. Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

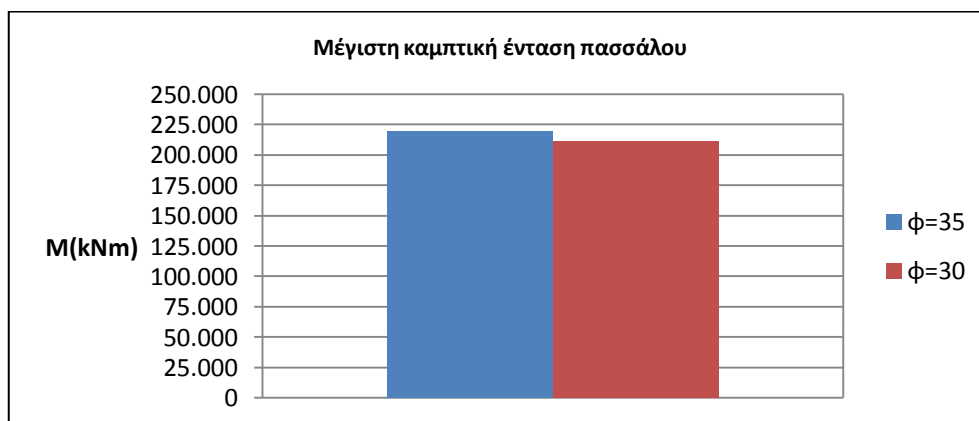
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας, ο έλεγχος μέγιστης μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα και ο έλεγχος μέγιστης περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα τη

χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και παραμόρφωσης του πασσάλου και του πύργου, για τα διάφορα είδη εδάφους του πυθμένα της θάλασσας. Προβάλλονται επίσης οι μέγιστες καμπτικές καταπονήσεις του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς και οι μέγιστες μετακινήσεις τις κατασκευής στη στάθμη του πυθμένα και στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς μεταβάλλεται το έδαφος θεμελίωσης του πασσάλου. Τέλος προβάλλονται για τις δύο περιπτώσεις εδαφών (30° και 35°) τα ποσοστά συμβολής της κάθε φόρτισης ξεχωριστά, στα εντατικά μεγέθη και τις μετατοπίσεις του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και παραμόρφωσης του πασσάλου και του πύργου.



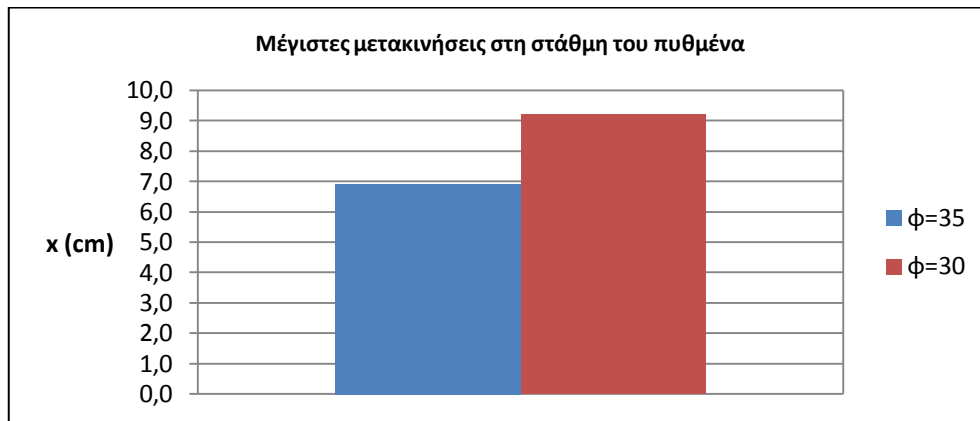
Σχήμα 6.84 – Έλεγχοι σχεδιασμού τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και παραμόρφωσης του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.84) προκύπτει πως ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου μεταβάλλεται ελάχιστα καθώς αλλάζει η φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Συγκεκριμένα για εσωτερική γωνία τριβής 35° ο πάσσαλος αγγίζει το 85% της αντοχής του ενώ για γωνία 30° το 82% της αντοχής του. Η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα αυξάνεται από το 69% στο 92% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Η περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα αυξάνεται από το 99% στο 113% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς μειώνεται η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους από 35° σε 30° . Τέλος και στις δύο περιπτώσεις η καταπόνηση του πύργου αγγίζει το 60% της αντοχής του.



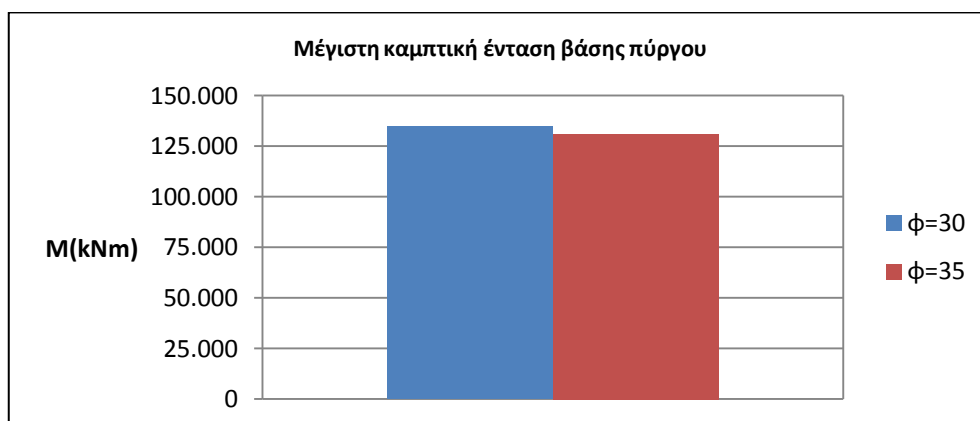
Σχήμα 6.85 – Μέγιστες καμπτικές καταπονήσεις πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.85) προκύπτει πως και στις δύο περιπτώσεις της φέρουσας ικανότητας του εδάφους η μέγιστη καταπόνηση του πασσάλου είναι περίπου ίδια. Συγκεκριμένα όταν η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους είναι 35° η μέγιστη ένταση του πασσάλου είναι 218.908kNm ενώ όταν η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους είναι 30° η καταπόνηση του πασσάλου είναι 211.290kNm.



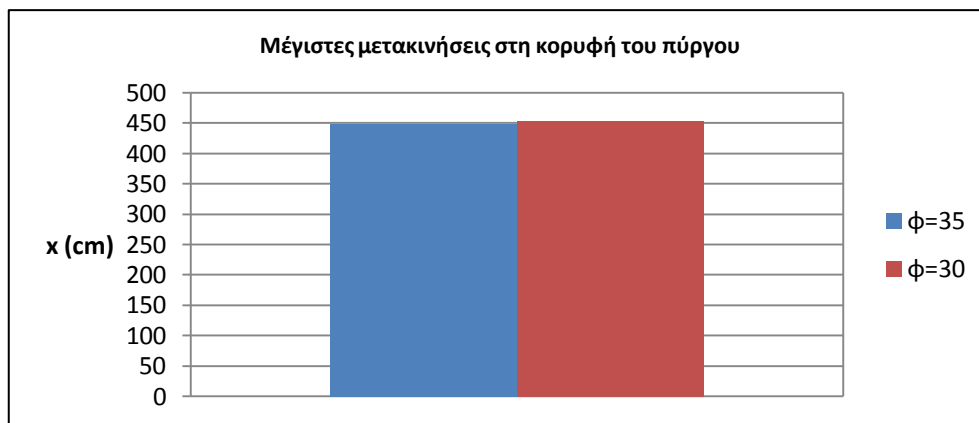
Σχήμα 6.86 – Μέγιστες μετακινήσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.86) είναι προφανές πως η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα αυξάνεται αρκετά από 6,9cm σε 9,2cm καθώς μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους.



Σχήμα 6.87 – Μέγιστες καμπτικές καταπονήσεις της βάσης του πύργου

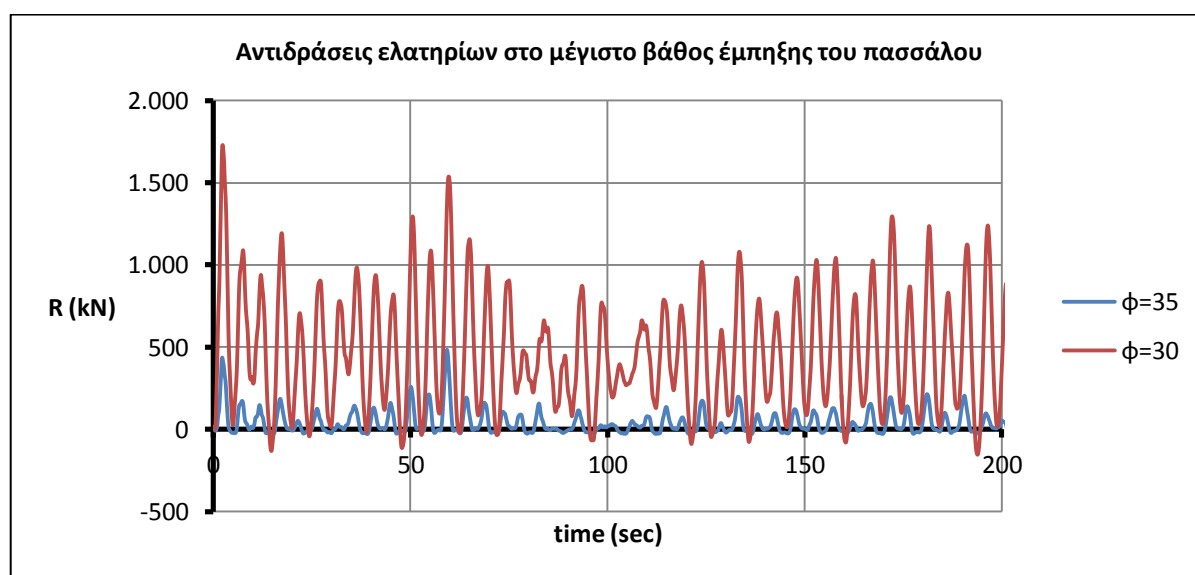
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.87) προκύπτει πως και στις δύο περιπτώσεις της φέρουσας ικανότητας του εδάφους η μέγιστη καταπόνηση της βάσης του πύργου είναι περίπου ίδια. Συγκεκριμένα όταν η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους είναι 35° η μέγιστη ένταση του πασσάλου είναι 134.585kNm ενώ όταν η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους είναι 30° η καταπόνηση του πασσάλου είναι 130.877kNm.



Σχήμα 6.88 – Μέγιστες μετακινήσεις στη κορυφή του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.88) προκύπτει πως η μέγιστη μετατόπιση της κορυφής του πύργου αυξάνεται λίγο καθώς μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους, από 448cm για $\phi=35^\circ$ σε 453cm για $\phi=30^\circ$.

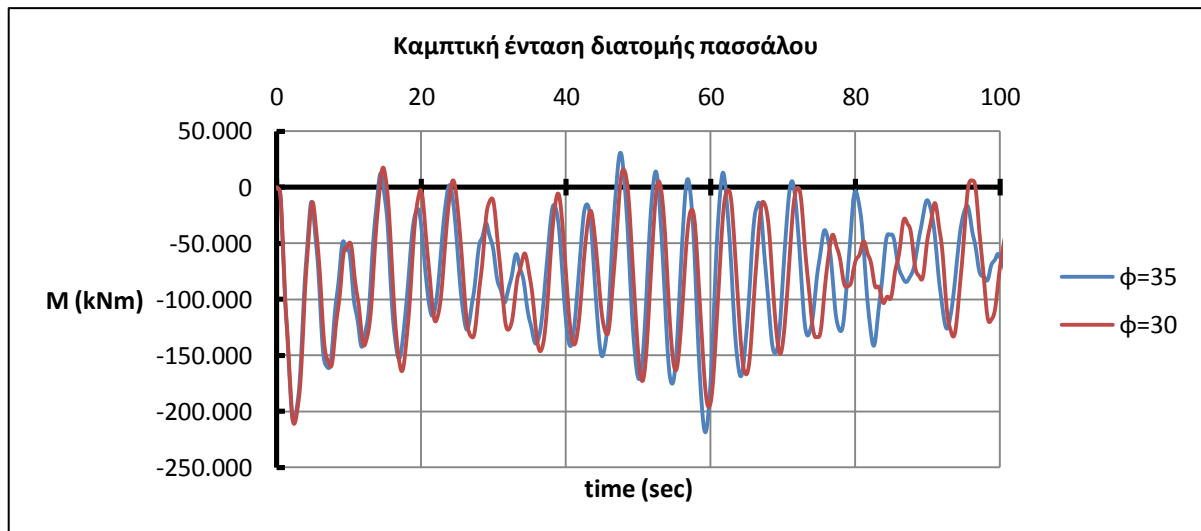
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.89) απεικονίζονται οι αντιδράσεις του μη-γραμμικού ελατηρίου που βρίσκεται στο μέγιστο βάθος του πασσάλου και στις δύο περιπτώσεις φέρουσας ικανότητας του εδάφους, στα πρώτα 200sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.89 – Αντιδράσεις ελατηρίων στο μέγιστο βάθος έμπτυξης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως στη περίπτωση που μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους αυξάνονται οι αντιδράσεις του ελατηρίου στην αιχμή του πασσάλου. Αυτό είναι κατανοητό αφού στη περίπτωση της μικρότερης φέρουσας ικανότητας του εδάφους οι μετατοπίσεις του πασσάλου είναι μεγαλύτερες άρα και οι αντιδράσεις του ελατηρίου της αιχμής θα είναι μεγαλύτερες.

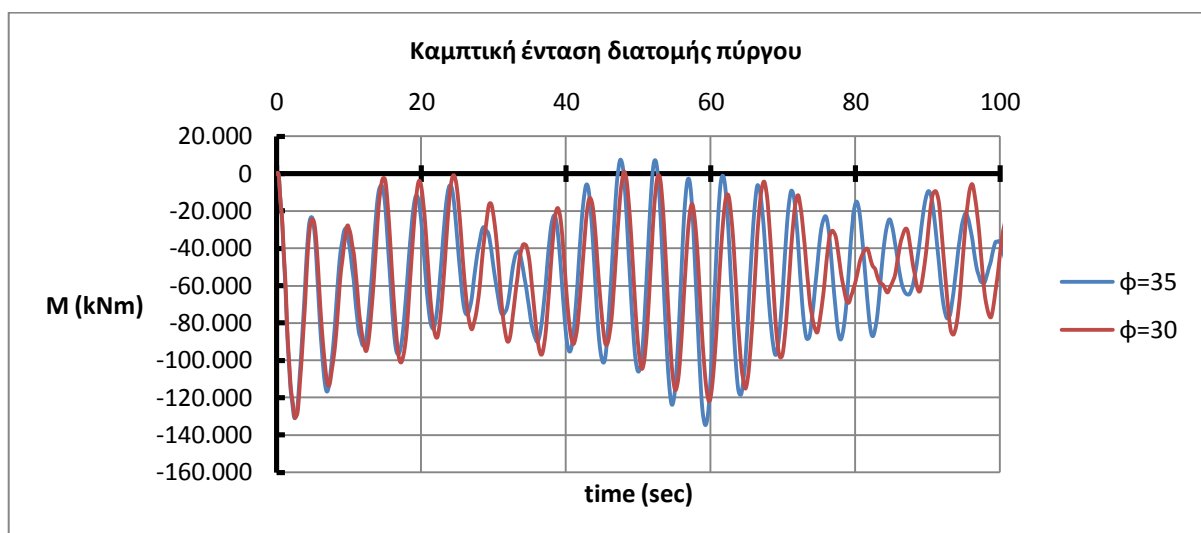
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.90) παρουσιάζεται η καμπτική ένταση της διατομής του πασσάλου που παρουσιάζει τη μέγιστη εντατική καταπόνηση και για τις δύο περιπτώσεις φέρουσας ικανότητας του εδάφους τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.90 – Καμπτική ένταση διατομής πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η καμπτική καταπόνηση της διατομής του πασσάλου, που παρουσιάζει τη μέγιστη καταπόνηση, είναι παρόμοια στις δύο περιπτώσεις φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Μάλιστα στις δύο περιπτώσεις φέρουσας ικανότητας του εδάφους δεν διαφέρουν σημαντικά οι μέγιστες τιμές της καμπτικής έντασης του πασσάλου.

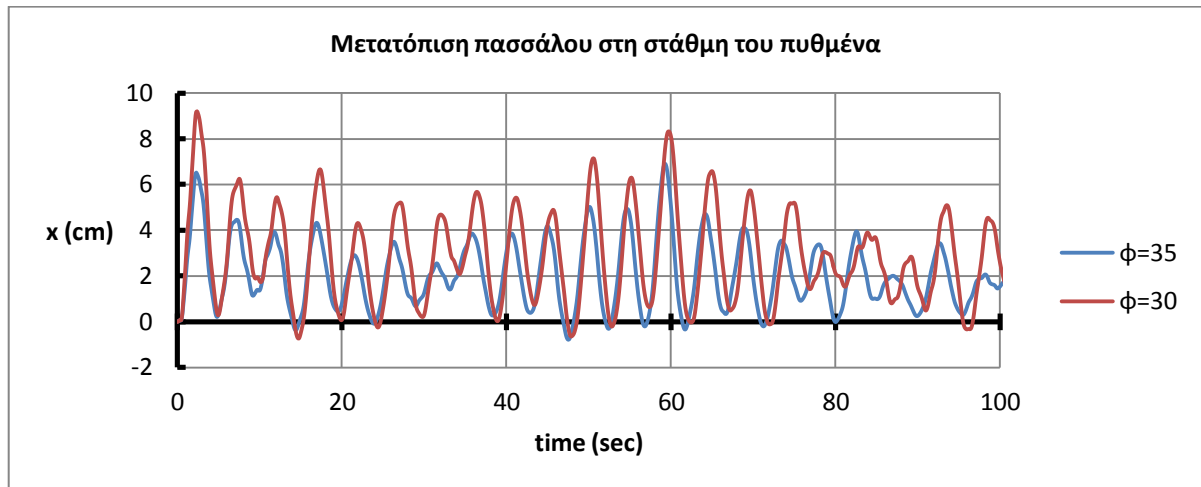
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.91) παρουσιάζεται η καμπτική ένταση της διατομής της βάσης του πύργου και για τις δύο περιπτώσεις φέρουσας ικανότητας του εδάφους, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.91 – Καμπτική ένταση βάσης πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η καμπτική καταπόνηση της διατομής της βάσης του πύργου, που παρουσιάζει τη μέγιστη καταπόνηση, είναι παρόμοια στις δύο περιπτώσεις φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Μάλιστα βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή της έντασης στις δύο περιπτώσεις φέρουσας ικανότητας του εδάφους είναι παρόμοια.

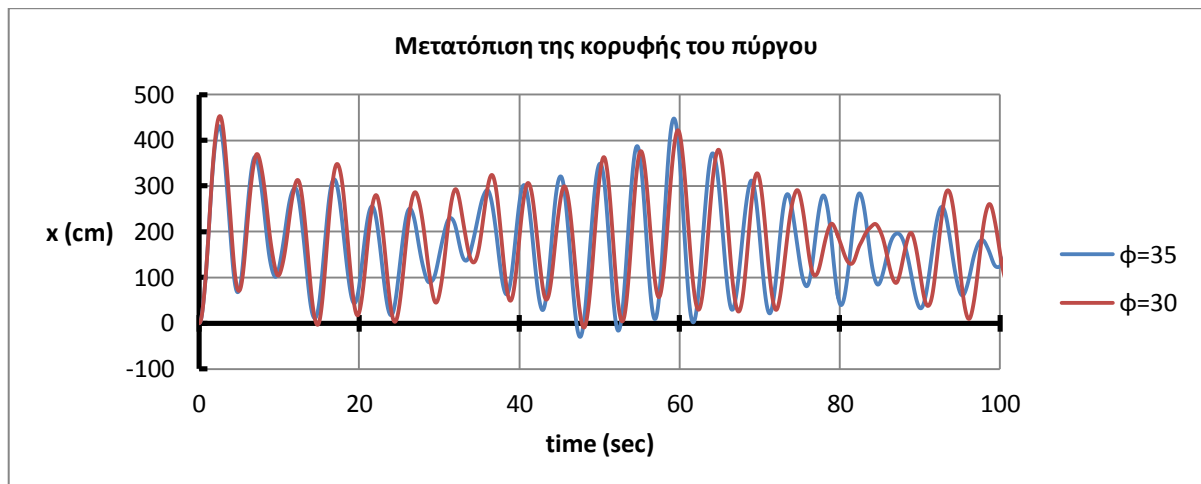
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.92) παρουσιάζεται η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα και για τις δύο περιπτώσεις φέρουσας ικανότητας του εδάφους, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.92 – Μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

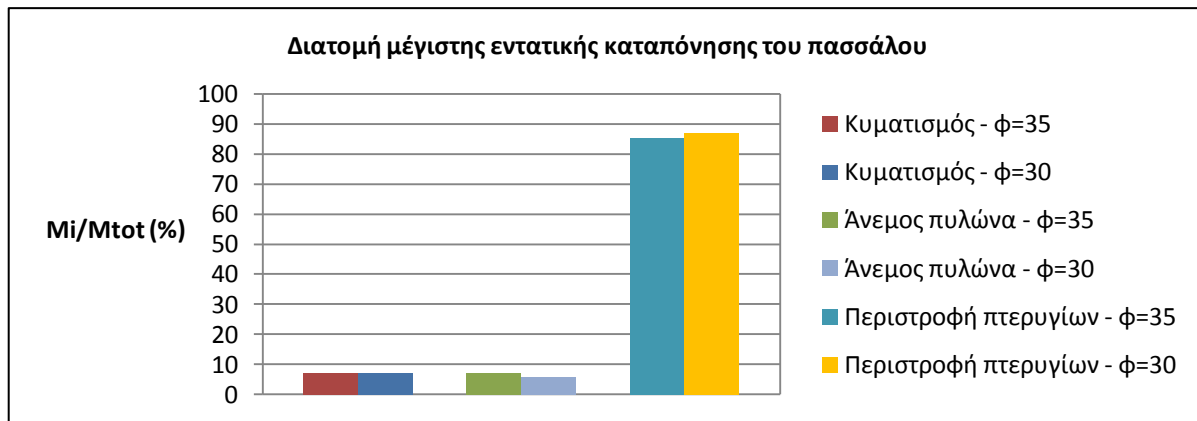
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως στη περίπτωση που η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους είναι 30° οι μετατοπίσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι μεγαλύτερες από την περίπτωση που η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους είναι 35° . Αυτό είναι λογικό αφού όσο μικρότερη είναι η φέρουσα ικανότητα του εδάφους τόσο μεγαλύτερες είναι οι μετατοπίσεις του πασσάλου.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.93) παρουσιάζεται η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας και για τις δύο τιμές της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



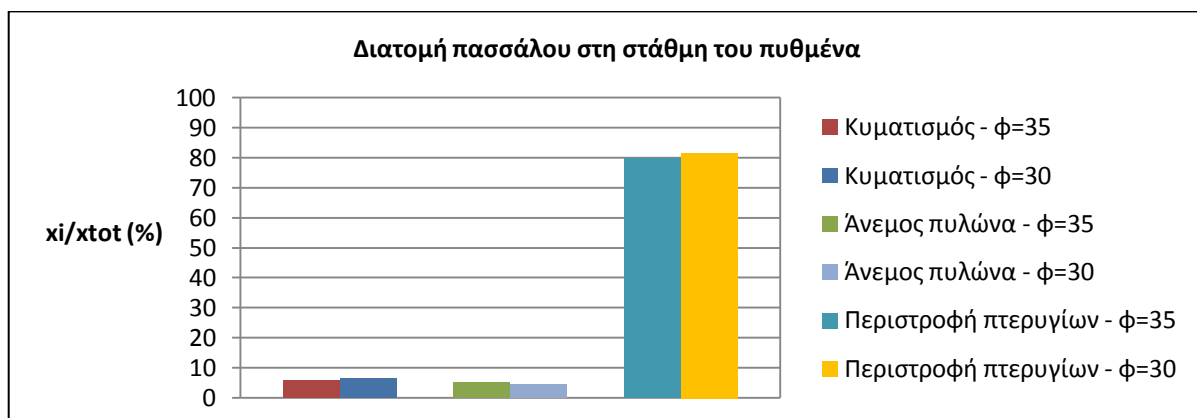
Σχήμα 6.93 – Μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως και στις δύο περιπτώσεις φέρουσας ικανότητας του εδάφους οι μετατοπίσεις της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι παρόμοιες. Μάλιστα και στις δύο περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές της μετατόπισης της κορυφής της κατασκευής δεν διαφέρουν αρκετά.



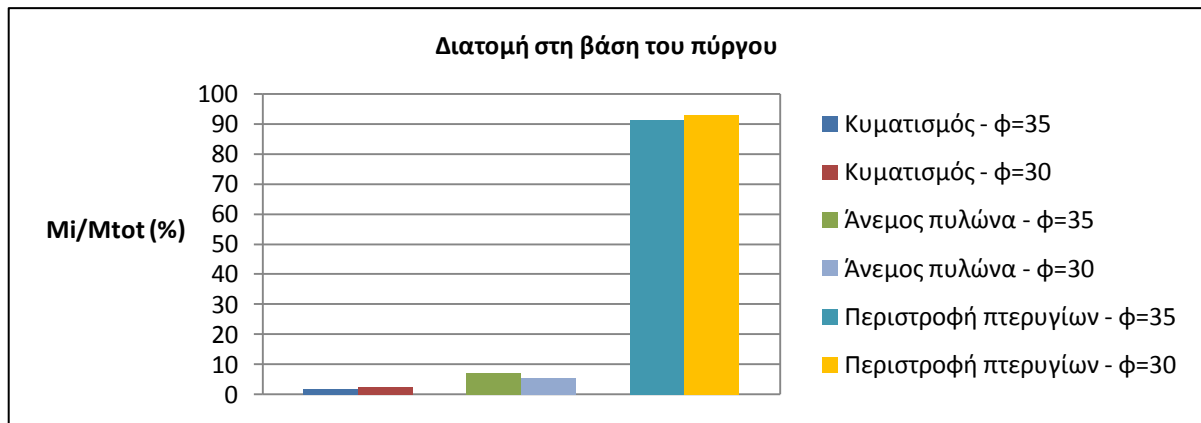
Σχήμα 6.94 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.94) προκύπτει πως και για τις δύο περιπτώσεις εδαφών τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι περίπου ίδια. Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 7% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση, τη χρονική στιγμή της μέγιστης καταπόνησης του πασσάλου. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας είναι 7% για εσωτερική γωνία τριβής 35° και 6% για γωνία 30° . Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πασσάλου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 86% και για τις δύο σχετικές πυκνότητες εδάφους.



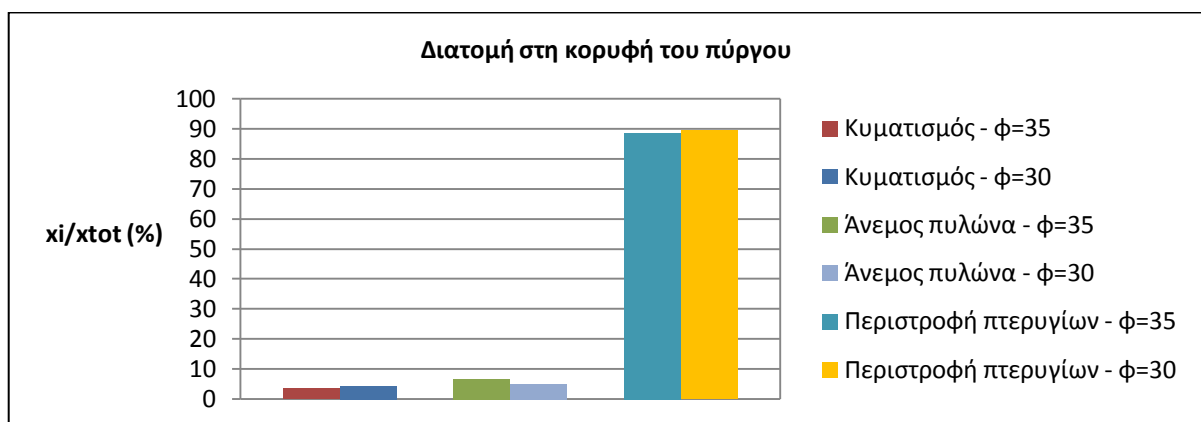
Σχήμα 6.95 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της διατομής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.95) προκύπτει πως και για τα δύο είδη εδαφών (30° και 35°) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι περίπου ίδια τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης του πασσάλου. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 6% στη συνολική μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα. Λίγο μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση του πασσάλου με ποσοστό 4,5% (και για τα δύο εδάφη). Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 80% περίπου και για τα δύο εδάφη.



Σχήμα 6.96 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή της βάσης του πύργου τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.96) προκύπτει πως και για τα δύο είδη εδαφών τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση της βάσης του πύργου είναι περίπου ίδια τη χρονική στιγμή της μέγιστης καταπόνησης της βάσης του πύργου. Το φορτίο του κυματισμού στη περίπτωση της εσωτερικής γωνία τριβής των 35° αποτελεί το 2% της συνολικής φόρτισης ενώ για γωνία 30° το 3%. Το φορτίο του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας αποτελεί περίπου το 7% της συνολικής φόρτισης για γωνία 35° και 5% για γωνία 30° . Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πύργου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 92% και για τα δύο εδάφη.



Σχήμα 6.97 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της κορυφής του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.97) προκύπτει πως και για τα δύο εδάφη δεν διαφέρουν τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης της κορυφής. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 4% στη συνολική μετατόπιση της κορυφής. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση της κορυφής είναι 7% για γωνία εσωτερικής τριβής 35° και 5% για γωνία 30° . Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 89% και για τα δύο είδη εδαφών.

6.3.4 Μεταβολή του υψομέτρου του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας

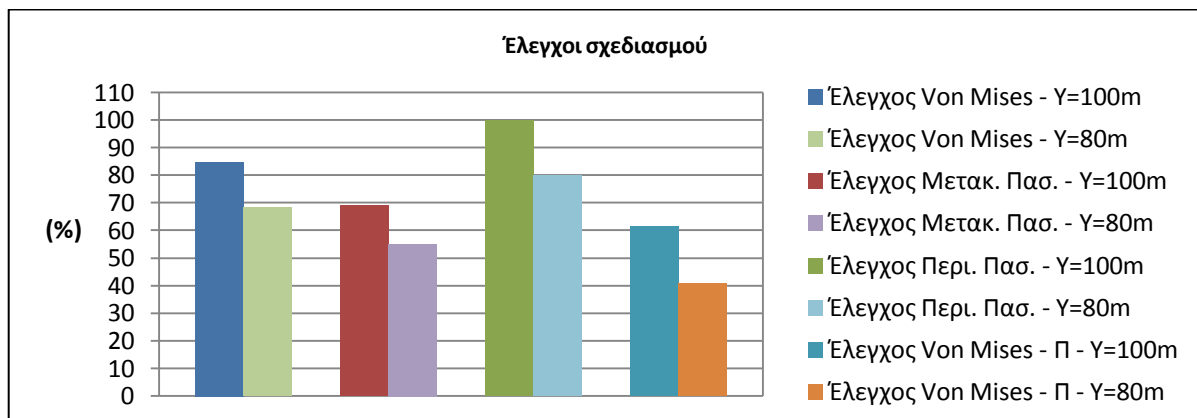
Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας παίρνει τις εξής τιμές:

1. $L_2=100\text{m}$ πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
2. $L_2=80\text{m}$ πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

1. Μήκος έμπτυξης πασσάλου $L_1=30\text{m}$
2. Διάμετρος πασσάλου $D=4,0\text{m}$
3. Εσωτερική γωνία τριβής $\phi=35^\circ$

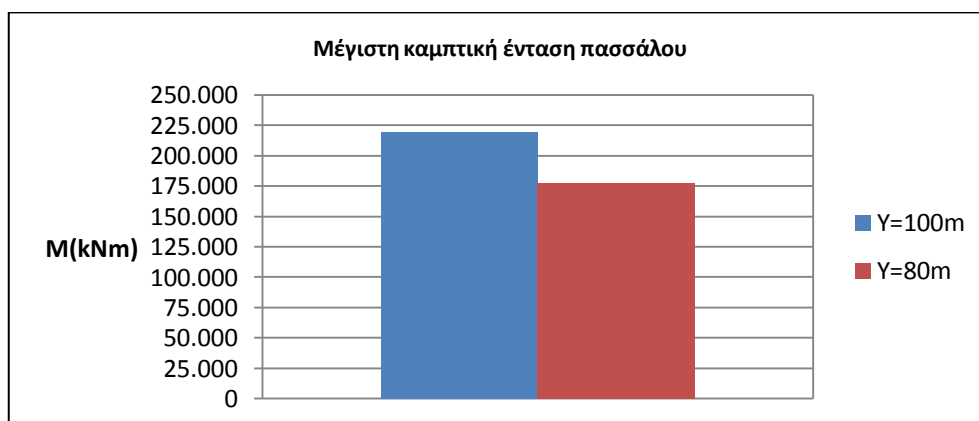
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας, ο έλεγχος μέγιστης μετακίνησης στη στάθμη του πυθμένα και ο έλεγχος μέγιστης περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα, τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και παραμόρφωσης του πασσάλου και του πύργου, για τις διάφορες τιμές υψομέτρου του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Προβάλλονται επίσης οι μέγιστες μετακινήσεις τις κατασκευής στη στάθμη του πυθμένα και στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς μεταβάλλεται το μήκος του πύργου της κατασκευής. Τέλος προβάλλονται για δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας (100m και 80m πάνω από της επιφάνεια της θάλασσας) τα ποσοστά συμβολής της κάθε φόρτισης ξεχωριστά, στα εντατικά μεγέθη και τις μετατοπίσεις του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και παραμόρφωσης του πασσάλου και του πύργου.



Σχήμα 6.98 – Έλεγχοι σχεδιασμού τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης και παραμόρφωσης του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας

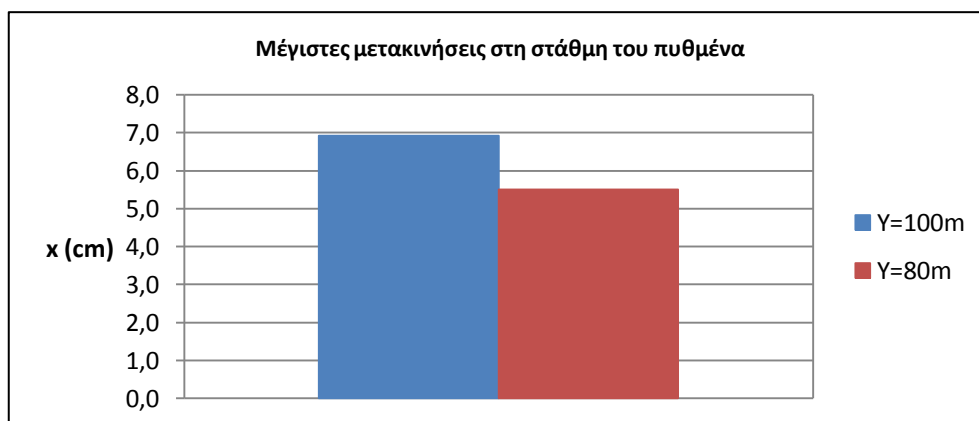
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.98) προκύπτει πως η καταπόνηση της κατασκευής μεταβάλλεται σημαντικά καθώς αλλάζει το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας. Συγκεκριμένα όταν το υψόμετρο του άξονα του δρομέα είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, η καταπόνηση του πασσάλου αγγίζει το 85% της αντοχής του ενώ όταν ο άξονας του δρομέα είναι 80m πάνω από της επιφάνεια της θάλασσας η καταπόνηση του πασσάλου αγγίζει το 68% της αντοχής του. Η μετατόπιση του πασσάλου

στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται σημαντικά από το 69% στο 55% καθώς μειώνεται το υψόμετρο του άξονα του δρομέα από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 80m. Η περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται σημαντικά από το 99% στο 80% της μέγιστης επιτρεπόμενης καθώς μειώνεται το υψόμετρο του άξονα του δρομέα από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 80m. Τέλος η καταπόνηση της βάσης του πύργου μειώνεται σημαντικά από το 61% στο 41% της αντοχής του καθώς μειώνεται το μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας.



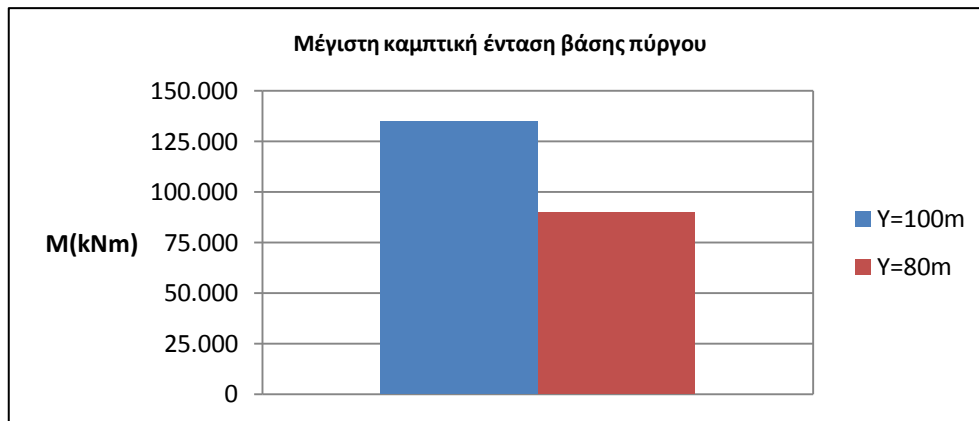
Σχήμα 6.99 – Μέγιστες καμπτικές καταπονήσεις πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.99) προκύπτει πως καθώς μειώνεται το μήκος του πύργου ανεμογεννήτριας μειώνεται και η καμπτική καταπόνηση του πασσάλου. Συγκεκριμένα όταν ο άξονας του δρομέα είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας η μέγιστη ένταση του πασσάλου είναι 218.908kNm ενώ όταν ο δρομέας είναι 80m πάνω από την επιφάνεια η καταπόνηση του πασσάλου είναι 177.298kNm.



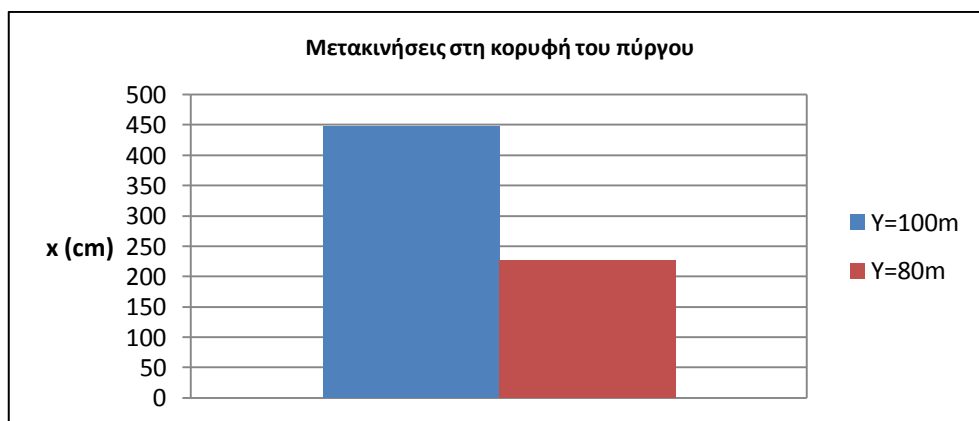
Σχήμα 6.100 – Μετακινήσεις του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.100) είναι προφανές πως η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα μειώνεται από τα 6,9cm στα 5,5cm καθώς μειώνεται το υψόμετρο του άξονα του δρομέα από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 80m.



Σχήμα 6.101 – Μέγιστες καμπτικές καταπονήσεις της βάσης του πύργου

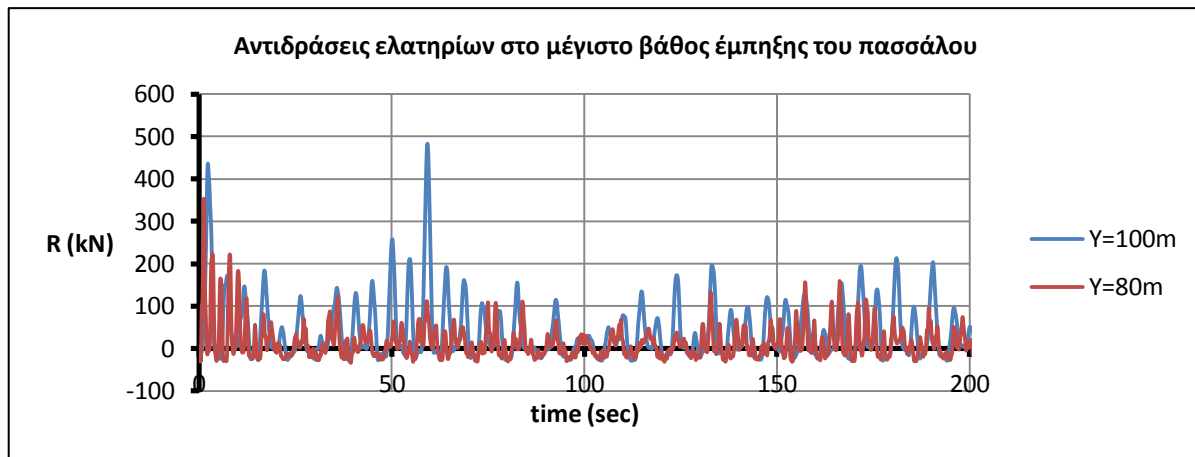
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.101) προκύπτει πως καθώς μειώνεται το μήκος του πύργου ανεμογεννήτριας μειώνεται και η καμπτική καταπόνηση της βάσης του πύργου. Συγκεκριμένα όταν ο άξονας του δρομέα είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας η μέγιστη ένταση της βάσης του πύργου είναι 134.585kNm ενώ όταν ο δρομέας είναι 80m πάνω από την επιφάνεια η καταπόνηση του πασσάλου είναι 89.550kNm.



Σχήμα 6.102 – Μετακινήσεις στη κορυφή του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.102) προκύπτει πως η μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής μειώνεται σημαντικά από τα 448cm στα 226cm καθώς μειώνεται το υψόμετρο του άξονα του δρομέα από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 80m.

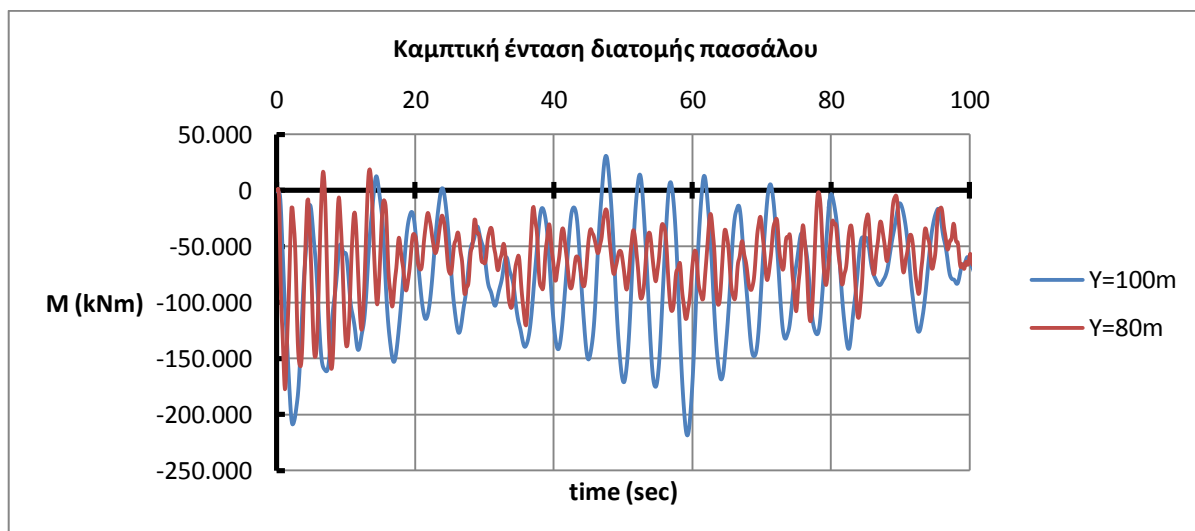
Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6.103) απεικονίζονται οι αντιδράσεις του μη-γραμμικού ελατηρίου που βρίσκεται στο μέγιστο βάθος του πασσάλου και στις δύο περιπτώσεις του μήκους του πύργου της ανεμογεννήτριας, στα πρώτα 200sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.103 – Αντιδράσεις ελατηρίων στο μέγιστο βάθος έμπτυξης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως στη περίπτωση που ο άξονας του δρομέα είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας οι αντιδράσεις του ελατηρίου της αιχμής είναι μεγαλύτερες από την περίπτωση που ο δρομέας είναι 80m πάνω από την επιφάνεια. Αυτό εξηγείται από το γεγονός πως όταν το μήκος του πύργου είναι μεγαλύτερο, είναι μεγαλύτερο και το αεροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πυλώνα με αποτέλεσμα η μεγαλύτερη φόρτιση να δημιουργεί και μεγαλύτερες μετατοπίσεις στο πάσσало άρα και μεγαλύτερες αντιδράσεις στην αιχμή του.

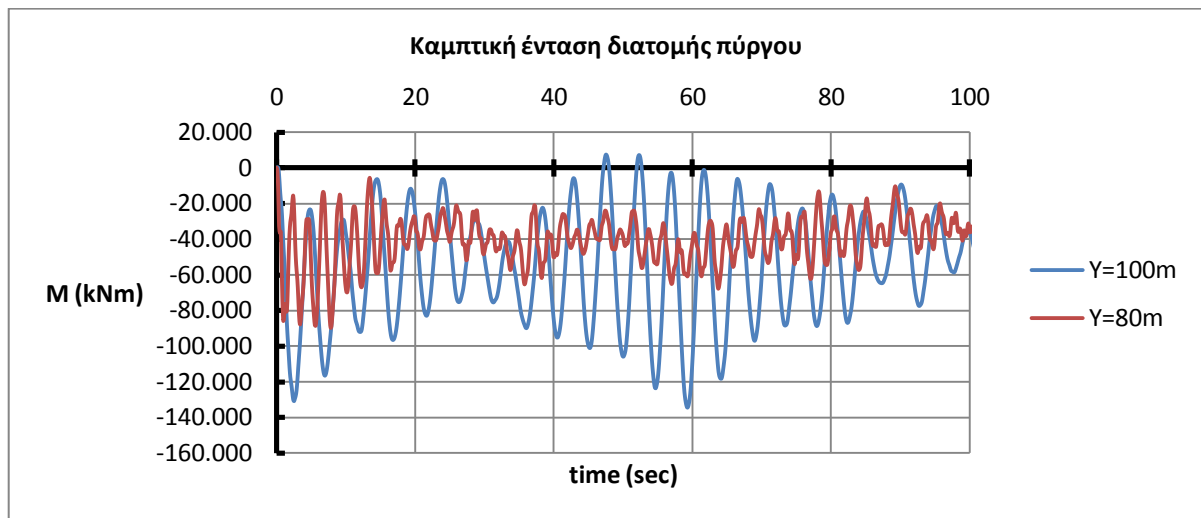
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.104) παρουσιάζεται η καμπτική ένταση της διατομής του πασσάλου που παρουσιάζει τη μέγιστη εντατική καταπόνηση και για τις δύο περιπτώσεις του ύψους του άξονα του δρομέα, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.104 – Καμπτική ένταση διατομής πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως καθώς μειώνεται το μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 80m πάνω από την επιφάνεια μειώνεται και η καμπτική καταπόνηση της διατομής του πασσάλου που παρουσιάζει τη μέγιστη καταπόνηση.

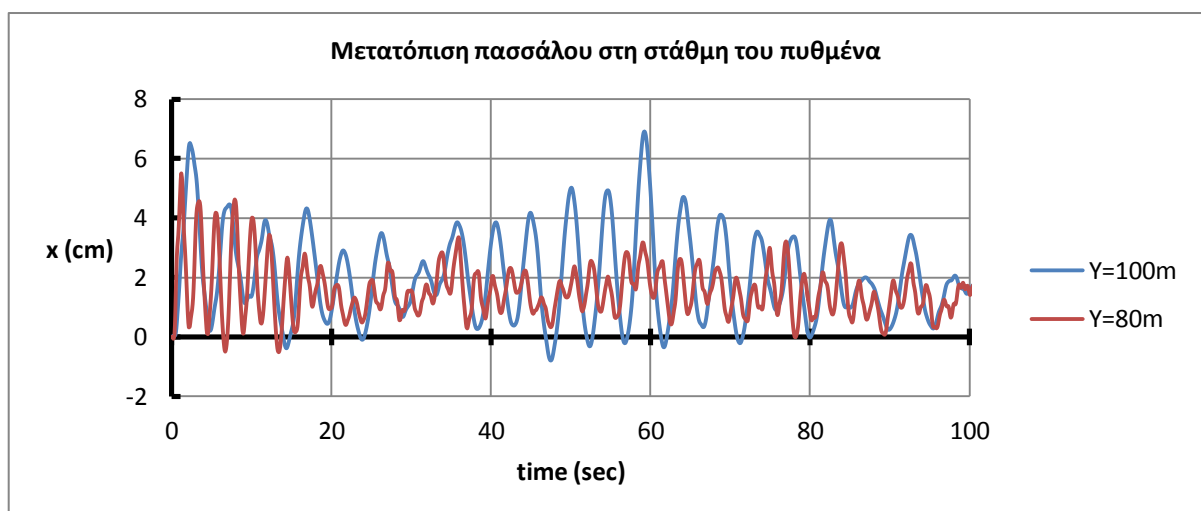
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.105) παρουσιάζεται η καμπτική ένταση της διατομής της βάσης του πύργου και για τις δύο περιπτώσεις του ύψους του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.105 – Καμπτική ένταση βάσης πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως καθώς μειώνεται το μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 80m πάνω από την επιφάνεια, μειώνεται σημαντικά και η καμπτική καταπόνηση της διατομής της βάσης του πύργου.

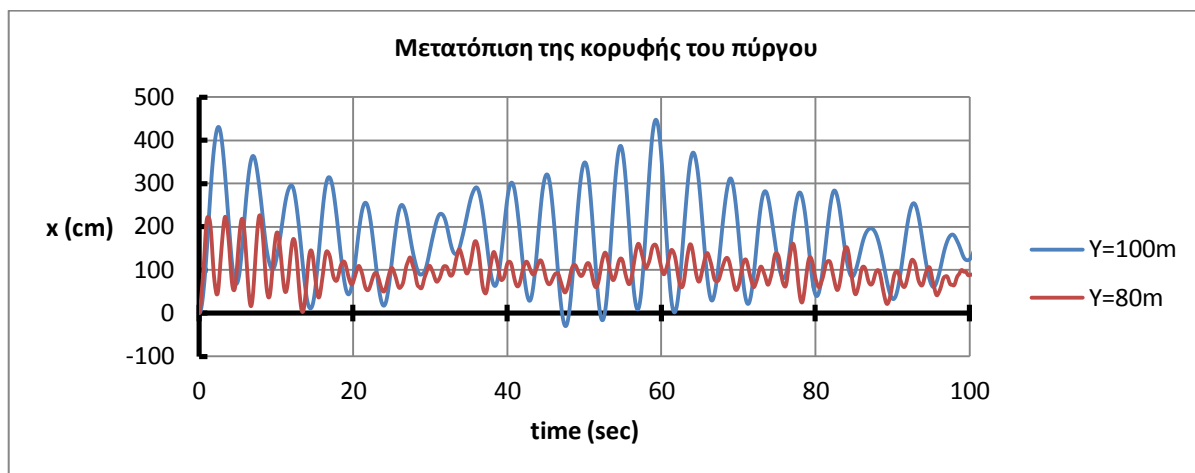
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.106) παρουσιάζεται η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα και για τις δύο περιπτώσεις του ύψους του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.106 – Μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα

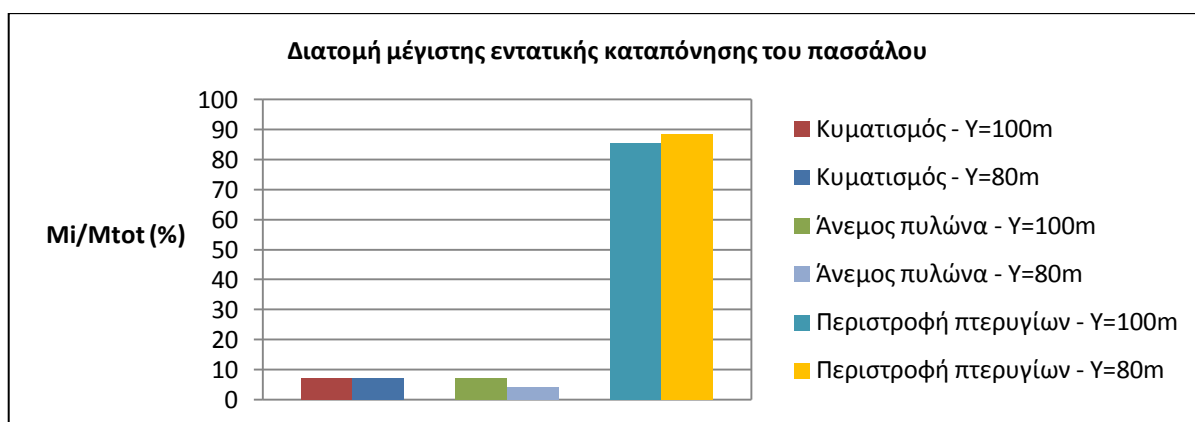
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως καθώς μειώνεται το μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 80m πάνω από την επιφάνεια, μειώνεται σημαντικά και η μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.107) παρουσιάζεται η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας και για τις δύο περιπτώσεις του ύψους του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας, τα πρώτα 100sec της δυναμικής ανάλυσης.



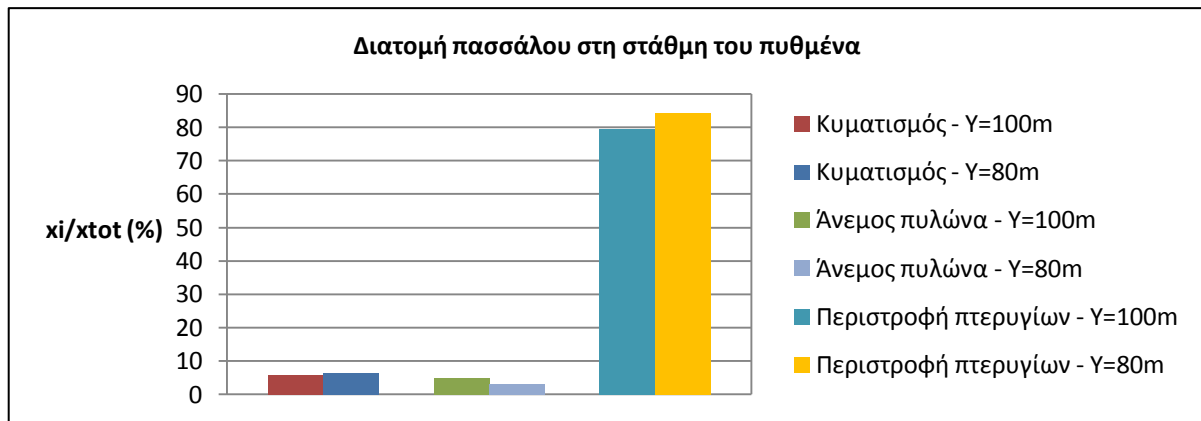
Σχήμα 6.107 – Μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως καθώς μειώνεται το μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας από τα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στα 80m πάνω από την επιφάνεια, μειώνεται σημαντικά και η μετατόπιση της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας.



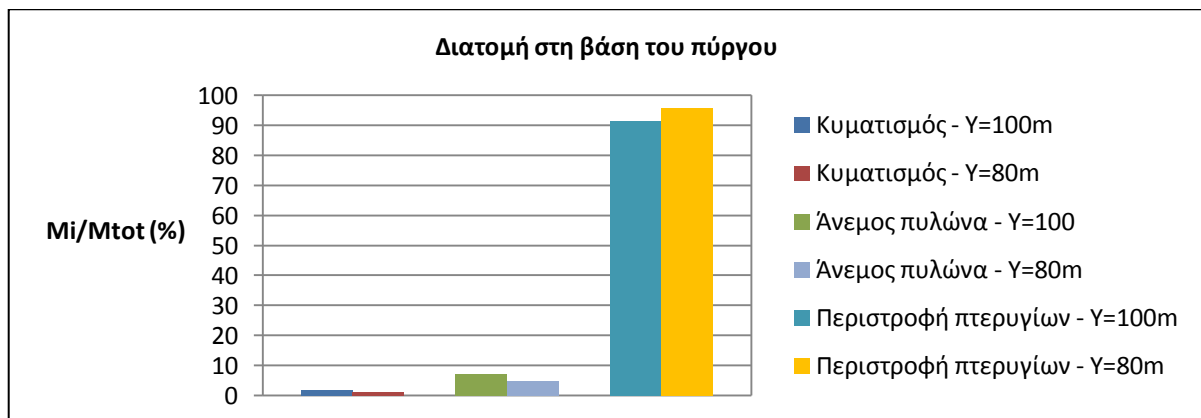
Σχήμα 6.108 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.108) προκύπτει πως και για τα δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα (100m και 80m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση του πασσάλου είναι περίπου ίδια, τη χρονική στιγμή της μέγιστης καταπόνησης του πασσάλου. Το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 7% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας είναι 7% για υψόμετρο δρομέα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και 4% για 80m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πασσάλου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 86% για υψόμετρο άξονα δρομέα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και 88% για 80m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.



Σχήμα 6.109 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της διατομής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης του πασσάλου

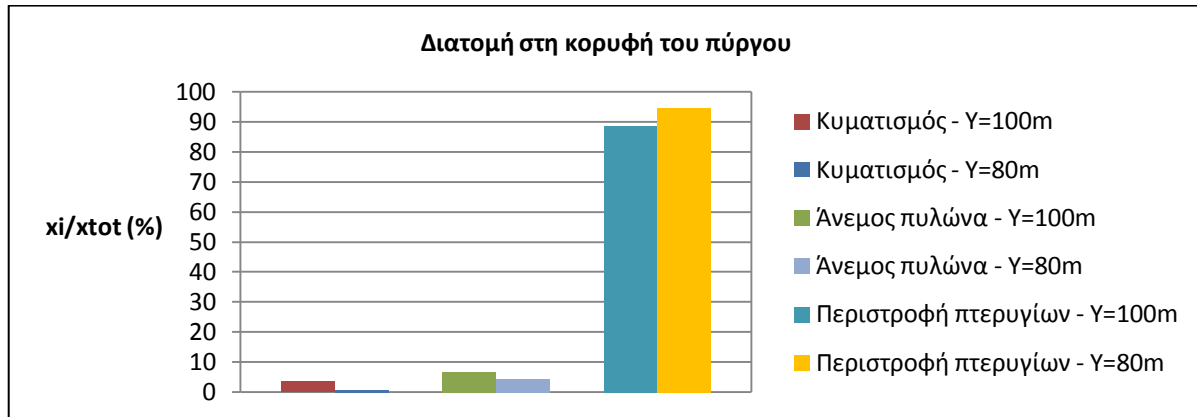
Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.109) προκύπτει πως και για τα δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα (100m και 80m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα είναι περίπου ίδια τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 6% στη συνολική μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση του πασσάλου 5% για υψόμετρο άξονα δρομέα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και 3% για υψόμετρο άξονα δρομέα 80m πάνω από την επιφάνεια. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 80% στην περίπτωση που δρομέας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια και 84% όταν ο δρομέας είναι 80m πάνω από την επιφάνεια.



Σχήμα 6.110 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη διατομή της βάσης του πύργου τη χρονική στιγμή της μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πύργου

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.110) προκύπτει πως και για τα δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα (100m και 80m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση της βάσης του πύργου είναι περίπου ίδια τη χρονική στιγμή της μέγιστης καμπτικής καταπόνησης της βάσης του πύργου. Το φορτίο του κυματισμού και στις δύο περιπτώσεις συμβάλει λιγότερο από 2% στη καταπόνηση της βάσης. Το φορτίο του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας αποτελεί περίπου το 7% της συνολικής φόρτισης στο σημείο της βάσης του πύργου όταν ο δρομέας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια της

θάλασσας και 5% όταν ο δρομέας είναι 80m πάνω από την επιφάνεια. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη φόρτιση του πύργου έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 91% για υψόμετρο άξονα δρομέα 100m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και 96% για υψόμετρο άξονα 80m πάνω από την επιφάνεια.



Σχήμα 6.111 – Ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στη μετατόπιση της κορυφής του πύργου την χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης της κορυφής

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.111) προκύπτει πως και για τα δύο υψόμετρα του άξονα του δρομέα (100m και 80m) τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην μετατόπιση της κορυφής της κατασκευής είναι περίπου ίδια τη χρονική στιγμή της μέγιστης μετατόπισης της κορυφής. Το φορτίο του κυματισμού συμβάλει κατά 4% στη συνολική μετατόπιση της κορυφής όταν ο δρομέας είναι 100m πάνω από την επιφάνεια και 1% όταν ο δρομέας είναι 80m πάνω από την επιφάνεια. Η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στη μετατόπιση της κορυφής είναι 7% στη πρώτη περίπτωση και 4% στη δεύτερη. Τέλος τη μεγαλύτερη συμβολή στη μετατόπιση της κορυφής έχει το φορτίο λόγω περιστροφής των πτερυγίων με ποσοστό 89% για υψόμετρο άξονα δρομέα 100m πάνω από την επιφάνεια και 95% όταν ο άξονα του δρομέα είναι 80m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Βιβλιογραφία

- [6.1] Final report WP 4.2 – Support Structure Concepts for Deep Water Sites, Wybren de Vries, Delf University of Technology

Κεφάλαιο 7^ο

Συμπεράσματα Εργασίας

7.1 Περίληψη μεταπτυχιακής εργασίας

Σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης της συμπεριφοράς των θαλασσίων ανεμογεννητριών μέσα από τον καθορισμό των φορτίων που ασκούνται σε αυτές τις κατασκευές. Σκοπός της εργασίας είναι μέσα από μια σειρά παραμετρικών επιλύσεων να διερευνηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των θαλάσσιων ανεμογεννητριών καθώς και η βαρύτητα τους. Μεταβάλλοντας παραμέτρους που αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τον τρόπο προσομοίωσης του εδάφους αλλά και τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελιώσεως προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τις εντατικές καταπονήσεις και τις παραμορφώσεις της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην υπεράκτια αιολική ενέργεια. Αναφέρονται οι τύποι των θαλάσσιων ανεμογεννητριών και περιγράφονται τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας. Τέλος περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας των πτερυγίων της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας και η εξηγείται η επιλογή της διατομής και του σχήματος των πτερυγίων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού του υδροδυναμικού φορτίου που ασκείται στη κατασκευή. Παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη δοκιμή εύρεσης υδροδυναμικού φορτίου όπου περιγράφονται όλα τα στάδια υπολογισμού της υδροδυναμικής πίεσης. Τέλος πραγματοποιούνται μια σειρά από παραμετρικές επιλύσεις μέσα από τις οποίες διερευνάται ο ρόλος της κάθε παραμέτρου στο υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται στην ανεμογεννήτρια.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα χαρακτηριστικά των πασσάλων που χρησιμοποιούνται για τη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας. Περιγράφεται επίσης η διαδικασία προσομοίωσης του εδάφους θεμελιώσεως της ανεμογεννήτριας μέσω γραμμικών και μη-γραμμικών ελατηρίων. Παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της σταθεράς ελατηρίων τόσο στη περίπτωση των συνεκτικών όσο και των μη-συνεκτικών εδαφών. Τέλος πραγματοποιούνται μια σειρά από παραμετρικές επιλύσεις μέσα από τις οποίες διερευνάται ο ρόλος της κάθε παραμέτρου στη δυσκαμψία των ελατηρίων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού του αεροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Καθορίζονται επίσης τα χαρακτηριστικά της συνολικής φόρτισης της κατασκευής και τα κριτήρια σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας στην οριακή κατάσταση αστοχίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη δοκιμή στατικής ανάλυσης της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας. Πραγματοποιούνται επίσης μια σειρά παραμετρικών στατικών επιλύσεων όπου μεταβάλλονται παράμετροι όπως το μήκος θεμελίωσης του πασσάλου, η διάμετρος του πασσάλου, το πάχος των τοιχωμάτων του πασσάλου, ο τρόπος προσομοίωσης του εδάφους, η φέρουσα ικανότητα του εδάφους, το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας μέσα από τις οποίες προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τις καταπονήσεις και τις παραμορφώσεις της ανεμογεννήτριας.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη δοκιμή δυναμικής ανάλυσης της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας. Πραγματοποιούνται επίσης μια σειρά παραμετρικών δυναμικών επιλύσεων όπου μεταβάλλονται παράμετροι όπως το μήκος θεμελίωσης του πασσάλου, η διάμετρος του πασσάλου, η φέρουσα ικανότητα του εδάφους, το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας, μέσα από τις οποίες προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας.

7.2 Συμπεράσματα μεταπτυχιακής εργασίας

Τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας επισημαίνονται παρακάτω:

Όσον αφορά τις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες:

- Η εκμετάλλευση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας θα έχει τα επόμενα χρόνια κυρίαρχο ρόλο στην αξιοποίηση του ενεργειακού πλούτου κάθε χώρας
- Υπάρχουν διάφοροι τύποι φορέων θαλάσσιων ανεμογεννητριών, όμως ο ποιο διαδεδομένος από όλους είναι αυτός του μονοπασσάλου με ποσοστό 75%
- Η ιδανική τοποθεσία εγκατάστασης μιας θαλάσσιας ανεμογεννήτριας είναι ένα μέρος με σταθερές ταχύτητες ανέμων και μια ανεμογεννήτρια που θα είναι σε θέση να αξιοποιήσει στο έπακρο του "ελαφρύτερους" ανέμους ενώ θα αντέχει σε περιπτώσεις ισχυρών ριπών αέρα
- Η γωνία προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο είναι αυτή που καθορίζει τη ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας ως εξής:

Για μικρές ταχύτητας ανέμου όπου η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι μικρότερη από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας η γωνία προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο είναι η βέλτιστη δυνατή ώστε να παράγεται η μέγιστη ανυψωτική δύναμη και άρα τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας να περιστρέφονται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα παράγοντας έτσι τη μέγιστη δυνατή ενέργεια.

Για μεγάλες ταχύτητες ανέμου όπου η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας η γωνία προσβολής των πτερυγίων είναι μικρότερη από τη βέλτιστη δυνατή παράγοντας έτσι μικρότερη ανυψωτική δύναμη από τη μέγιστη δυνατή. Αυτός ο περιορισμός προστατεύει το

δρομέα και τα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας από τις ισχυρές καταπονήσεις που επιβάλλονται όταν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι αρκετά μεγάλη. Σε αυτή τη περίπτωση η παραγόμενη ενέργεια είναι η μέγιστη δυνατή που μπορεί να παράγει η ανεμογεννήτρια.

Για υπερβολικές ταχύτητες ανέμου όπου ακόμα και για μικρές γωνίες προσβολής των πτερυγίων η ανυψωτικές δυνάμεις που παράγονται είναι αρκετά μεγάλες και ικανές να περιστρέφουν το δρομέα πολύ γρήγορα, η λειτουργία της ανεμογεννήτριας διακόπτεται και ο δρομέας σταματά να περιστρέφεται έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία της ανεμογεννήτριας

Όσον αφορά τα υδροδυναμικά φορτία που ασκούνται στην κατασκευή:

- 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 κοντά βρισκόμαστε στη κορυφή του κύματος τόσο μεγαλύτερο γίνεται το εύρος τιμών της ταχύτητας και της επιτάχυνσης των υγρών σωματιδίων
- Όσο πιο πολύ πλησιάζουμε στη κορυφή του κυματισμού τόσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο που ασκείται στον κυλινδρικό πάσσαλο της ανεμογεννήτριας
- Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας (W), αυξάνεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου
- Καθώς αυξάνεται το μήκος αναπτύγματος του κυματισμού (F), αυξάνεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου μέχρις ότου ο κυματισμός περιοριστεί από τη διάρκεια πνοής του ανέμου (t_d) οπότε το φορτίο παραμένει σταθερό
- Καθώς αυξάνεται η διάρκεια πνοής του ανέμου (t_d), αυξάνεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου μέχρις ότου ο κυματισμός περιοριστεί από το μήκος αναπτύγματος (F) οπότε το φορτίο παραμένει σταθερό
- Καθώς αυξάνεται η διάμετρος του πασσάλου, αυξάνεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου
- Καθώς αυξάνεται το βάθος του πυθμένα της θάλασσας, μειώνεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου

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 κάμψης και λυγισμού
- Η σωστή επιρροή του εδάφους στους πασσάλους προσομοιώνεται με τη χρήση μη-γραμμικών ελατηρίων. Η δυσκαμψία των ελατηρίων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πασσάλου καθώς και από τις ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων
- Στη περίπτωση χρήσης γραμμικών ελατηρίων με τη θεώρηση ότι η δυσκαμψία τους είναι αυτή που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου, η δυσκαμψία των ελατηρίων παραμένει σταθερή με το βάθος στη περίπτωση των προφορτισμένων αργίλων ενώ αυξάνεται με το βάθος στη περίπτωση των κανονικά φορτισμένων αργίλων
- Στη περίπτωση χρήσης γραμμικών ελατηρίων με τη θεώρηση ότι η δυσκαμψία τους είναι αυτή που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου, η δυσκαμψία των ελατηρίων αυξάνεται καθώς αυξάνεται η διάμετρος του πασσάλου και η διατμητική αντοχή του εδάφους στη περίπτωση των συνεκτικών εδαφών
- Στη περίπτωση χρήσης γραμμικών ελατηρίων με τη θεώρηση ότι η δυσκαμψία τους είναι αυτή που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου, η δυσκαμψία των ελατηρίων αυξάνεται με το βάθος στη περίπτωση των μη-συνεκτικών εδαφών
- Στη περίπτωση χρήσης γραμμικών ελατηρίων με τη θεώρηση ότι η δυσκαμψία τους είναι αυτή που αντιστοιχεί στο 50% του οριακού πλευρικού φορτίου, η δυσκαμψία των ελατηρίων παραμένει σταθερή καθώς αυξάνεται η διάμετρος του πασσάλου ενώ αυξάνεται όταν μεγαλώνει η εσωτερική γωνία τριβής του εδάφους στη περίπτωση των μη-συνεκτικών εδαφών
- 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

Όσον αφορά τα αεροδυναμικά φορτία της κατασκευής:

- Στη περίπτωση των "συνηθισμένων" συνθηκών ανέμου ο άνεμος αναπαριστάται από μια μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου (U_{10}) και την αντίστοιχη τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου (σ_U). Η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου (U_{10}) είναι ένα μέτρο της εντάσεως του ανέμου, ενώ η τυπική απόκλιση (σ_U) είναι ένα μέτρο της μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου γύρω από τη μέση ταχύτητα

- Προκειμένου να υπολογιστεί η αεροδυναμική πίεση που ασκείται κατά μήκος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να είναι γνωστή χρονοϊστορία της ταχύτητας του ανέμου σε κάθε σημείο της κατασκευής
- Η χρονοϊστορία της φόρτισης λόγω της περιστροφής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος των πτερυγίων και από τα χαρακτηριστικά και τη θέση των πτερυγίων. Τα πτερύγια μεταβάλλουν συνεχώς των γωνία προσβολής τους από τον άνεμο με αποτέλεσμα να αλλάζει συνεχώς η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων

Τα κριτήρια σχεδιασμού της κατασκευής είναι:

- Έλεγχος φέρουσας ικανότητας πασσάλου και του πύργου. Δηλαδή στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης του πασσάλου και του πύργου να ικανοποιείται ο σύνθετος έλεγχος Von-Mises, δηλαδή ο ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη, διαξονική κάμψη και διαξονική διάτμηση
- Μέγιστη μετατόπιση πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα: 0,10m
- Μέγιστη περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα: 0,5°

Όσον αφορά τις αναλύσεις της κατασκευής που πραγματοποιήθηκαν:

- Από τα τρία κριτήρια σχεδιασμού που αφορούν τον πάσσαλο της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας, ο πιο κρίσιμος έλεγχος είναι αυτός που αφορά τη μέγιστη περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα
- Σχετικά με τις αντιδράσεις των ελατηρίων που προκαλούν τα φορτία της κατασκευής στην οριακή κατάσταση αστοχίας εν ώρα λειτουργίας, τη μεγαλύτερη επίδραση έχει το φορτίο λόγω της περιστροφής των πτερυγίων. Δεύτερο πιο σημαντικό φορτίο είναι αυτό της υδροδυναμικής πίεσης. Τι μικρότερες αντιδράσεις προκαλεί το αεροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πυλώνα
- Στην οριακή κατάσταση αστοχίας δημιουργείται μια πλαστική ζώνη στα πρώτα μέτρα της θεμελίωσης του πασσάλου (στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν το μήκος αυτής της πλαστικής ζώνης περιλάμβανε τα πέντε πρώτα μέτρα της θεμελίωσης του πασσάλου)
- Λόγω των μεγάλων μετατοπίσεων της κατασκευής απαιτείται η διενέργεια μη-γραμμικών αναλύσεων όσων αφορά τη γεωμετρία του φορέα
- Η διενέργεια στατικών αναλύσεων μπορεί να μας δίνει χρήσιμες πληροφορίες για την κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής, ωστόσο δεν παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα για τις μέγιστες καταπονήσεις και παραμορφώσεις του φορέα (ακόμα και αν τα μέγιστα φορτία έχουν πολλαπλασιαστεί με έναν συντελεστή $\gamma=1,4$ ώστε να ληφθεί υπόψη ο δυναμικός χαρακτήρας των φορτίων). Συγκεκριμένα στη

περίπτωση της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου υπάρχει μια διαφορά της τάξης του 30% των δύο αναλύσεων. Όσον αφορά τη μέγιστη μετακίνηση του πασσάλου η διαφορά είναι στο 35% ενώ στη μέγιστη περιστροφή του πασσάλου υπάρχει μια διαφορά 40% μεταξύ των δύο αναλύσεων. Στη φέρουσα ικανότητα του πύργου η διαφορά είναι στο 25% μεταξύ των δύο επιλύσεων

- Στη διατομή της μέγιστης καμπτικής καταπόνησης του πασσάλου, στην οριακή κατάσταση αστοχίας, το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 7% με 11% της συνολικής φόρτισης. Το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 4% με 8% της συνολικής φόρτισης και το φορτίο λόγω της περιστροφής των πτερυγίων το 84% με 89% της συνολικής φόρτισης
- Στη διατομή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα, στην οριακή κατάσταση αστοχίας, το φορτίο του κυματισμού αποτελεί το 5% με 10% της συνολικής μετατόπισης. Το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πυλώνα το 3% με 5% της συνολικής μετατόπισης και το φορτίο λόγω της περιστροφής των πτερυγίων το 78% με 85% της συνολικής μετατόπισης
- Στη διατομή της μέγιστης καμπτικής καταπόνησης του πυλώνα, στην οριακή κατάσταση αστοχίας, το φορτίο του κυματισμού αποτελεί έως και το 3% της συνολικής φόρτισης. Το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πύργου αποτελεί το 4% με 8% της συνολικής φόρτισης και το φορτίο λόγω της περιστροφής των πτερυγίων το 91% με 96% της συνολικής φόρτισης
- Στη διατομή της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας, στην οριακή κατάσταση αστοχίας, το φορτίο του κυματισμού αποτελεί έως και το 5% της συνολικής μετατόπισης. Το φορτίο του ανέμου κατά μήκος του πυλώνα αποτελεί το 4% με 7% της συνολικής φόρτισης και το φορτίο λόγω της περιστροφής των πτερυγίων το 88% με 95% της συνολικής μετατόπισης
- Όταν μεταβάλλεται το μήκος έμπτυξης του πασσάλου:
 - Η μέγιστη καταπόνηση του πασσάλου μεταβάλλεται ελάχιστα
 - Υπάρχει ένα μήκος μέχρι το οποίο η περιστροφή και η μετακίνηση του πασσάλου και της κορυφής του πύργου μεταβάλλονται σημαντικά με την αύξηση του μήκους του πασσάλου. Μετά από αυτό το σημείο η αύξηση του μήκους οδηγεί σε μικρή μείωση της μετακίνησης και της περιστροφής του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα και σε μικρή μείωση της μετακίνησης της κορυφής του πυλώνα της ανεμογεννήτριας
 - Η μέγιστη καταπόνηση του πύργου μεταβάλλεται ελάχιστα
 - Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος έμπτυξης του πασσάλου τόσο μικρότερες είναι οι μετατοπίσεις του πασσάλου και άρα τόσο μικρότερες οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων κατά μήκος του πασσάλου. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του πασσάλου τόσο μικρότερες είναι οι μετατοπίσεις της αιχμής του
 - Όσο πιο μικρό είναι το μήκος του πασσάλου τόσο πιο απότομο είναι το σβήσιμο των ροπών στο μέγιστο βάθος έμπτυξης

- Όσο μικρότερο είναι το μήκος έμπηξης του πασσάλου τόσο μεγαλύτερες είναι οι αντιδράσεις των ελατηρίων και άρα τόσο μεγαλύτερη είναι και οι τέμνουσα που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου
- Όταν μεταβάλλεται η δυσκαμψία του πασσάλου:
 - Όταν αυξάνεται η δυσκαμψία του πασσάλου μειώνεται σημαντικά ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου αλλά και η μέγιστη μετακίνηση και περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα και η μετακίνηση στη κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας
 - Η μέγιστη καταπόνηση του πύργου μεταβάλλεται ελάχιστα
 - Όσο πιο πολύ αυξάνεται η δυσκαμψία του πασσάλου τόσο μεγαλύτερη είναι η μετακίνηση στην αιχμή του και άρα τόσο πιο μεγάλες οι αντιδράσεις στο βάθος της θεμελίωσης. Αυτό προκύπτει λόγω της μεγαλύτερης δυσκαμψίας που έχει ο πάσσαλος με την μεγαλύτερη διάμετρο η οποία δεν τον αφήνει να παραμορφωθεί και να ακολουθήσει την αρχική απαραμόρφωτη θέση (και να περιοριστούν αντίστοιχα η μετατοπίσεις του). Για το ίδιο βάθος μέσα στον πυθμένα της θάλασσας το έδαφος είναι το ίδιο σκληρό, όμως ο πιο δύσκαμπτος πάσσαλος παραμορφώνεται δυσκολότερα από τον πιο εύκαμπτο.
- Όταν μεταβάλλεται ο τρόπος προσομοίωσης του εδάφους:
 - Η προσομοίωση του εδάφους με γραμμικά ελατήρια (σταθερής δηλαδή δυσκαμψίας ανεξάρτητης της παραμόρφωσης του εδάφους) οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα όσων αφορά τη συμπεριφορά της κατασκευής. Η χρήση γραμμικών ελατηρίων οδηγεί σε μη αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για την εντατική καταπόνηση και τις μετατοπίσεις της κατασκευής
 - Η σωστή προσομοίωση του εδάφους γίνεται με τη χρήση μη-γραμμικών ελατηρίων
- Όταν μεταβάλλεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους:
 - Η μέγιστη καταπόνηση του πασσάλου μεταβάλλεται ελάχιστα
 - Όταν μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους αυξάνεται η μέγιστη μετακίνηση και περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα
 - Η μεταβολή της μέγιστης μετακίνησης της κορυφής του πυλώνα είναι μικρή
 - Η μέγιστη καταπόνηση του πύργου μεταβάλλεται ελάχιστα
 - Όσο πιο μικρή είναι η φέρουσα ικανότητα του εδάφους τόσο πιο μεγάλες είναι οι μετατοπίσεις της αιχμής του πασσάλου και άρα τόσο πιο μεγάλες οι αντιδράσεις των ελατηρίων στο βάθος της θεμελίωσης
 - Όσο πιο μικρή είναι η φέρουσα ικανότητα του εδάφους τόσο πιο απότομο είναι το σβήσιμο των ροπών στο μέγιστο βάθος έμπηξης πράγμα που καταδεικνύει ότι όσο χειρότερο είναι το έδαφος τόσο πιο μεγάλο είναι το απαιτούμενο μήκος θεμελίωσης του πασσάλου
- Όταν μεταβάλλεται το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας:

- Όταν μειώνεται το μήκος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας μειώνεται σημαντικά η μέγιστη καταπόνηση του πασσάλου, η μέγιστη μετατόπιση και περιστροφή του πασσάλου στη στάθμη του πυθμένα καθώς και η μέγιστη μετακίνηση της κορυφής του πύργου
- Όσο πιο μικρό είναι το μήκος του πυλώνα τόσο πιο μικρές είναι οι μετατοπίσεις της αιχμής του πασσάλου και άρα τόσο πιο μικρές οι αντιδράσεις των ελατηρίων στο βάθος της θεμελίωσης
- Όσο πιο μικρό είναι το μήκος του πυλώνα τόσο μικρότερη είναι η καμπτική ένταση που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου και του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς και οι μετατοπίσεις της κατασκευής στη στάθμη του πυθμένα και της κορυφής της ανεμογεννήτριας

7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Τώρα που αυτή η μεταπτυχιακή εργασία έφτασε στο τέλος της και έχοντας μια πιο σφαιρική και λεπτομερή άποψη στο θέμα των θαλάσσιων ανεμογεννητριών μπορούν να διατυπωθούν κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα ή μελλοντικές εργασίες:

- Η διερεύνηση διαφορετικών τύπων φορέων στήριξης από αυτόν του μεμονωμένου πασσάλου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία. Ειδικότερα η εύρεση την ιδανικής μορφής και γεωμετρίας των φορέων στήριξης μορφής τριπόδου και δικτυώματος αποτελεί έναν τομέα πρόσφορο για περαιτέρω έρευνα
- Καθώς το βάθος συνεχίζει να αυξάνεται υπάρχει ένα σημείο, μετά το οποίο είναι τεχνολογικά και οικονομικά ανέφικτη η απευθείας θεμελίωση της κατασκευής στο πυθμένα της θάλασσας. Σημαντικό πεδίο έρευνας θα αποτελέσουν οι κατασκευές που θα επιπλέουν μέσα στη θάλασσα, θα διατηρούνται στη θέση τους μέσω καλωδίων και στις οποίες το φορτίο της κατασκευής θα αντισταθμίζεται από τη δύναμη της άνωσης
- Η διερεύνηση της συμπεριφοράς της κατασκευής στη περίπτωση που στο έδαφος θεμελίωσης υπάρχουν διαφορετικά εδαφικά στρώματα τα οποία εναλλάσσονται μεταξύ τους
- Ο υπολογισμός των χρονοϊστοριών ταχύτητας ανέμου σε όλο το μήκος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί επακριβώς η αεροδυναμική πίεση που ασκείται στην ανεμογεννήτρια
- Σημαντικό πεδίο έρευνας αποτελεί και το αεροδυναμικό φορτίο που ασκείται στη κατασκευή λόγω της περιστροφής των πτερυγίων. Παράγοντες όπως το μήκος των

πτερυγίων, η ταχύτητα του ανέμου στη κορυφή και η συνεχής μεταβολή της γωνίας προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο θα πρέπει να ληφθούν υπόψη

- Η διερεύνηση των καταπονήσεων και των παραμορφώσεων της κατασκευής στη περίπτωση που οι διευθύνσεις επιβολής των φορτίων είναι διαφορετικές μεταξύ τους. Συνήθως οι ανεμογεννήτριες υποβάλλονται σε φορτίσεις ανέμου μιας κατευθύνσεως και φορτίσεις κυματισμών διπλής κατευθύνσεως