

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ



Διπλωματική Εργασία:

“ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ
ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ”



Στυλιανού Σπύρος

Επιβλέπων Καθηγητής: Αζοράκος Σαμψών, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους ανθρώπους που συνέβαλαν σ' αυτή την προσπάθεια.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Κύριο Αζοράκο Σαμψών καθηγητή στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών για την καθοριστική βοήθεια και καθοδήγηση του, τις συμβουλές του κατά τη συγγραφή της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε για τη διεκπεραίωση αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την καταλυτική συμβολή τους στην ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας. Τους είμαι ευγνώμων για τη διάθεση και την προθυμία που επεδείκνυαν κάθε φορά που ζητούσα τη βοήθειά τους.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τη διαρκή υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν όλα τα χρόνια των σπουδών μου φροντίζοντας για την καλύτερη δυνατή μόρφωσή μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία και στα πλαίσια ενός παραδείγματος εφαρμογής, μελετάται η συμπεριφορά του φορέα έδρασης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας στα φορτία περιβάλλοντος και λειτουργίας. Κύριος σκοπός της εργασίας είναι ο υπολογισμός των δράσεων από τα φορτία στην ανεμογεννήτρια και το φορέα έδρασης αυτής και η επιλογή του τρόπου θεμελίωσης αυτού.

Στο 1^ο Κεφάλαιο τονίζεται η σημαντικότητα της αιολικής ενέργειας σε υπεράκτιο αιολικό πάρκο στις μέρες μας και συγκεκριμένα στον Ελλαδικό Χώρο. Παρουσιάζονται τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τα μειονεκτήματα της.

Στο 2^ο Κεφάλαιο περιγράφονται οι διάφοροι τύποι υπεράκτιων ανεμογεννητριών ενώ γίνεται αναφορά στα συστατικά μέρη της ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα , αφού στη συνέχεια της εργασίας ένα τέτοιου είδους παράδειγμα εφαρμογής θα αναλυθεί.

Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή της περιοχής μελέτης και παρουσιάζονται τα δεδομένα που λήφθηκαν από αυτή και που είναι αναγκαία κατά το σχεδιασμό της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.

Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού των αεροδυναμικών φορτίων που ασκούνται κατά μήκος του πυλώνα αλλά και του φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται καθώς επίσης και η διαδικασία υπολογισμού των εντατικών μεγεθών στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας.

Στο 6^ο Κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού των υδροδυναμικών φορτίων που ασκούνται στο φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας.

Στο 7^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές διατάξεις θεμελίωσης των εναλλακτικών φορέων έδρασης μίας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας και η διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων σχεδιασμού καθενός από αυτούς.

Στο 8^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της Διπλωματικής Εργασίας που προκύπτουν κυρίως από τη σύγκριση των υπό μελέτη φορέων έδρασης και της θεμελίωσης τους.

ABSTRACT

In this thesis, through the use of an application example, we study the behavior of the bearing structure – foundation- of offshore wind farm due to the influence of environmental and operation loads .The main purpose of this paper is the calculation of the actions of loads acting in an offshore wind turbine and bearing structure and the design process of its foundation.

In the first chapter we focus on the importance of wind energy produced by offshore wind farm nowadays, particularly in Greece. In order to discuss the significance of Coastal Wind Energy we present both its advantages and disadvantages.

Chapter 2 describes the different types of offshore wind turbines while referring to components of the horizontal axis wind turbine, and later on one example of an application is analyzed and discussed.

In the third chapter, there is a comprehensive description of the study area and a presentation of the data obtained from this, which is necessary for the design of an offshore wind turbine.

In Chapter 4 there is a detailed analysis and discussion on the procedure for calculating aerodynamic loads exerted along the pylon as well as the bearing structure of the turbine.

Chapter 5 presents the main characteristics of the wind turbine model used, as well as the process of calculating the internal forces at the base of the pylon of the wind turbine.

Chapter 6 describes in detail the procedure of calculating hydrodynamic loads exerted along the body of the supporting component of the turbine.

Chapter 7 presents the typical layouts of foundation of bearing structures of offshore wind turbine and the process of calculating the design parameters of each of them.

Finally, Chapter 8 presents the conclusions of this thesis which mainly arise from the comparison of the bearing structures and their foundation.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	18
1.1 Γενικά.....	18
1.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα υπεράκτιων αιολικών πάρκων	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	21
2.1 Τύποι ανεμογεννητριών	21
2.1.1 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα	21
2.2 Συστατικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	24
3.1 Γενικά.....	24
3.2 Δεδομένα περιοχής μελέτης.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ.....	27
4.1 Μοντέλο ακραίων συνθηκών ανέμου (EWM).....	27
4.2 Δύναμη και ροπή στη βάση του πύργου ανεμογεννήτριας.....	29
4.3 Δύναμη και ροπή στη στάθμη ελεύθερης επιφάνειας.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟ VESTAS V90 - 3MW	33
5.1 Γενική Περιγραφή.....	33
5.2 Συνολική φόρτιση και εντατικά μεγέθη στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας.....	34
5.3 Σύνθετος έλεγχος κατά Von Mises – Ελαστικός έλεγχος διατομής υπό θλίψη, κάμψη και διάτμηση.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ.....	39
6.1 Χαρακτηριστικά κυματισμού.....	39
6.2 Διαδικασία εκτίμησης ανεμολογικού κυματισμού (Μέθοδος Jonswap)	41
6.3 Κύμα και περίοδος σχεδιασμού	45
6.4 Επίδραση πυθμένα στους κυματισμούς	46
6.5 Τύπος Morison	48
6.5.1 Γενικά	48

6.5.2 Δυνάμεις Αδράνειας – Δυνάμεις Αντίστασης	48
6.5.3 Πεδίο εφαρμογής Τύπου Morison	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ Α/Γ	56
7.1 Γενικά.....	56
7.2 Επιφανειακή θεμελίωση βαρύτητας πυλώνα από σκυρόδεμα	58
7.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά.....	58
7.2.2 Διαστασιολόγηση - Σχεδιασμός	59
7.2.3 Λόγοι επιμέρους φορτίσεων προς τη συνολική φόρτιση στη βάση της κατασκευής	74
7.3 Θεμελίωση με έμπηξη μεταλλικού σωλήνα (Monopile.....	75
7.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά.....	75
7.3.2 Διαστασιολόγηση - Σχεδιασμός	76
7.3.3 Λόγοι επιμέρους φορτίσεων προς τη συνολική φόρτιση στη βάση της κατασκευής	90
7.4 Θεμελίωση με πασσαλοέμπηξη μεταλλικού τετράποδου δικτυώματος (Jacket)	91
7.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά.....	91
7.4.2 Διαστασιολόγηση - Σχεδιασμός	93
7.4.3 Λόγοι επιμέρους φορτίσεων προς τη συνολική φόρτιση στη βάση της κατασκευής	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	112
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	113

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1 : Χάρτης προτεινόμενων υπεράκτιων αιολικών πάρκων του αρμόδιου εθνικού φορέα "Επενδύστε στην Ελλάδα Α.Ε."	19
Σχήμα 2: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα	21
Σχήμα 3: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα	22
Σχήμα 4: Συστατικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα	23
Σχήμα 5 : Ευρύτερη περιοχή μελέτης	24
Σχήμα 6: Περιοχή μελέτης	25
Σχήμα 7: Πίνακας ανεμολογικών δεδομένων Ε.Μ.Υ. σταθμού της Λήμνου (Μέση ετήσια συχνότητα και διάρκεια πνοής ανέμου)	26
Σχήμα 8: Πίνακας κλίμακας ανέμου κατά τη Μετεωρολογική Υπηρεσία.....	28
Σχήμα 9: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή σχήματος C_D	30
Σχήμα 10: Μοντέλο Vestas V90-3MW.....	33
Σχήμα 11: Πίνακες υπολογισμού εντατικών μεγεθών στη βάση του πυλώνα της Α/Γ	35
Σχήμα 12: Πίνακας ελαστικού ελέγχου επάρκειας διατομής.....	38
Σχήμα 13: Χαρακτηριστικά απλού αρμονικού κύματος	40
Σχήμα 14: Σχεδίαση αναπτυγμάτων πελάγους.....	42
Σχήμα 15: Πίνακας υπολογισμού γεωμετρικού αναπτύγματος πελάγους	43
Σχήμα 16: Πίνακας υπολογισμού χαρ/κού ύψους κύματος και ύψους κύματος σχεδιασμού	45
Σχήμα 17: Πίνακας υπολογισμού ύψους κύματος λόγω ρήχωσης.....	48
Σχήμα 18: Παράμετροι υπολογισμού σχετικής ταχύτητας και επιτάχυνσης	50
Σχήμα 19: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή σχήματος C_d	51
Σχήμα 20: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή σχήματος C_m	52
Σχήμα 21: Διάγραμμα ισχύος δυνάμεων για τις διάφορες περιοχές	54
Σχήμα 22: Συστατικά μέρη θαλάσσιας ανεμογεννήτριας	56
Σχήμα 23: Επιφανειακή θεμελίωση βαρύτητας	59
Σχήμα 24: Πίνακας υπολογισμού αεροδυναμικών φορτίων από τη δράση του ανέμου στη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας.....	60
Σχήμα 25: Πίνακες υπολογισμού υδροδυναμικών φορτίων στον πυθμένα	61
Σχήμα 26: Πίνακας υπολογισμού αξονικής δύναμης του φορέα έδρασης.....	62
Σχήμα 27: Πίνακας υπολογισμού εντατικών μεγεθών στον πυθμένα.....	62
Σχήμα 28: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης δακτυλιοειδούς διατομής.....	64
Σχήμα 29: Πίνακας υπολογισμού επάρκειας διατομής φορέα έδρασης σε συνδυασμένη κάμψη και θλίψη.....	65

Σχήμα 30: Πίνακας υπολογισμού εντατικών μεγεθών στη βάση θεμελίωσης.....	66
Σχήμα 31: Προσομοίωση κυκλικού θεμελίου σε ορθογωνικό θεμέλιο	68
Σχήμα 32: Πίνακες υπολογισμού συντελεστών φέρουσας ικανότητας N_c, N_q, N_γ	69
Σχήμα 33: Πίνακες υπολογισμού φέρουσας ικανότητας των εδαφικών σχηματισμών σε κατακόρυφο φορτίο	72
Σχήμα 34: Πίνακες υπολογισμού συντελεστή ασφαλείας της κατασκευής σε ολίσθηση	73
Σχήμα 35: Θεμελίωση με έμπηξη μονού πυλώνα	76
Σχήμα 36: Πίνακας υπολογισμού αεροδυναμικών φορτίων από τη δράση του ανέμου στη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας.....	77
Σχήμα 37: Πίνακες υπολογισμού υδροδυναμικών φορτίων στον πυθμένα	78
Σχήμα 38: Πίνακας υπολογισμού αξονικής δύναμης του φορέα στήριξης.....	79
Σχήμα 39: Πίνακας υπολογισμού εντατικών μεγεθών στον πυθμένα.....	79
Σχήμα 40: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστών φέρουσας ικανότητας N_γ, N_c, N_q	81
Σχήμα 41: Πίνακες υπολογισμού φέρουσας ικανότητας των δύο εδαφικών σχηματισμών σε κατακόρυφη φόρτιση.....	83
Σχήμα 42: Μηχανισμός θραύσεως κοντού πασσάλου με ελεύθερη κεφαλή σε αμμώδες έδαφος.....	84
Σχήμα 43: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή α για αμμώδες έδαφος.....	85
Σχήμα 44: Πίνακας υπολογισμού μέγιστου οριζόντιου οριακού φορτίου θραύσης σε αμμώδες έδαφος	86
Σχήμα 45: Μηχανισμός θραύσεως κοντού πασσάλου με ελεύθερη κεφαλή σε αργιλικό έδαφος.....	86
Σχήμα 46: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή α για αργιλικό έδαφος.....	87
Σχήμα 47: Πίνακας υπολογισμού μέγιστου οριζόντιου οριακού φορτίου θραύσης σε αργιλικό έδαφος.....	88
Σχήμα 48: Πίνακες υπολογισμού επάρκειας διατομής κατά Von Mises	89
Σχήμα 49: Μεταλλικό τετράποδο δικτύωμα (Jacket).....	92
Σχήμα 50: Θεμελίωση με πασσαλοέμπηξη μεταλλικού τετράποδου δικτυώματος (Jacket)	92
Σχήμα 51: Πίνακας υπολογισμού εντατικών μεγεθών στη κορυφή του κατακόρυφου μέλους.....	94
Σχήμα 52: Πίνακας υπολογισμού αεροδυναμικών φορτίων από τη δράση του ανέμου στη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας.....	95
Σχήμα 53: Πίνακες υπολογισμού υδροδυναμικών φορτίων στον πυθμένα	96
Σχήμα 54: Πίνακας υπολογισμού αξονικής δύναμης κατακόρυφου μέλους	97
Σχήμα 55: Πίνακας υπολογισμού εντατικών μεγεθών στον πυθμένα.....	97
Σχήμα 56: Πίνακες υπολογισμού επάρκειας διατομής κατά Von Mises	98

Σχήμα 57: Πίνακες υπολογισμού φέρουσας ικανότητας των δύο εδαφικών σχηματισμών σε κατακόρυφη φόρτιση	98
Σχήμα 58: Πίνακας υπολογισμού μέγιστου οριζόντιου οριακού φορτίου θραύσης σε αμμώδες έδαφος	99
Σχήμα 59 :Πίνακες υπολογισμού επάρκειας διατομής κατά VonMises σε αμμώδες έδαφος.....	99
Σχήμα 60: Μηχανισμός θραύσεως μακρού πασσάλου με ελεύθερη κεφαλή σε αργιλικό έδαφος.....	100
Σχήμα 61: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή α για αργιλικό έδαφος	101
Σχήμα 62: Πίνακας υπολογισμού μέγιστου οριζόντιου οριακού φορτίου θραύσης σε αργιλικό έδαφος.....	101
Σχήμα 63: Πίνακας υπολογισμού επάρκειας διατομής κατά Von Mises σε αργιλικό έδαφος.....	102
Σχήμα 64:Πίνακας κατάταξης εδαφών.....	104
Σχήμα 65 :Σεισμικά χαρακτηριστικά εδάφους.....	105
Σχήμα 66: Κατηγορία σπουδαιότητας κατασκευής	105
Σχήμα 67: Συντελεστής σπουδαιότητας κατασκευής	106
Σχήμα 68 : Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας	107
Σχήμα 69 : Πίνακας υπολογισμού απόσβεσης κατασκευής.....	108
Σχήμα 70 : Σχέσεις υπολογισμού μέγιστης επιτάχυνσης κατασκευής.....	108
Σχήμα 71 :Σεισμικό φάσμα επιτάχυνσης κατασκευής	109
Σχήμα 72: Πίνακας υπολογισμού σεισμικού φορτίου στη κατασκευή με φορέα έδρασης πυλώνα σκυροδέματος.....	110
Σχήμα 73:Πίνακας υπολογισμού σεισμικού φορτίου στη κατασκευή με φορέα έδρασηςχαλύβδινο μονό πυλώνα.....	111
Σχήμα 74: Πίνακας υπολογισμού σεισμικού φορτίου στη κατασκευή με φορέα έδρασης χαλύβδινο χωρικό δικτύωμα (Jacket)	111

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

A(a)

A: η διάμετρος στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας

A': το μειωμένο εμβαδόν του κυκλικού πέδιλου

A_b: η επιφάνεια αιχμής του πασσάλου

A_s: η παράπλευρος επιφάνεια του πασσάλου

A: το εμβαδόν διατομής

A(z): το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση του ανέμου σε ύψος z

A_{εν}: η ενεργός επιφάνεια επί της οποίας εφαρμόζεται η μέση ομοιόμορφη κατακόρυφη τάση εδράσεως

A_v: η επιφάνεια διάτμησης της διατομής

B(b)

B: η διάμετρος του πασσάλου

B: η μικρότερη πλευρά του ορθογωνικού πέδιλου

B: η διάμετρος στην κορυφή του πυλώνα της ανεμογεννήτριας

B': το ισοδύναμο πλάτος του ορθογωνικού πέδιλου

b': η μικρότερη ενεργός πλευρά του ορθογωνικού πέδιλου

C(c)

C_D: ο συντελεστής αντίστασης

C_M: ο συντελεστής αδράνειας

c: η συνοχή του εδάφους

c: η ταχύτητα κύματος

C: ο συντελεστής σχήματος

c' : η ενεργός συνοχή του εδάφους

C_0 : η ταχύτητα διάδοσης κύματος στα βαθειά

c_u : η αστράγγιστη διατμητική αντοχή

D(d)

D: η διάμετρος του πασσάλου

D: η διάμετρος του πέδιλου

d: το βάθος πυθμένα

D: η διάμετρος του πασσάλου έμπηξης

d: η διάμετρος της κοίλης διατομής

d: το βάθος θεμελίωσης

E(e)

E: η μέγιστη μετωπική επιφάνεια της κατασκευής

e: η εκκεντρότητα

e_2 : η εκκεντρότητα

e_b : η εκκεντρότητα της συνισταμένης κατά τη διεύθυνση της πλευρά b

e_a : η εκκεντρότητα της συνισταμένης κατά τη διεύθυνση της πλευρά a

F(f)

F_D : η δύναμη αντίστασης ανά μονάδα μήκους

F_I : η δύναμη αδράνειας ανά μονάδα μήκους

f: η συχνότητα κύματος

F(z): η δύναμη που ασκεί ο άνεμος στη κατασκευή σε ύψος z από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας

f_b : η αντοχή παράπλευρης επιφάνειας πασσάλου ανά μονάδα επιφάνειας

f_{cd} : η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

f_s : η αντοχή αιχμής πασσάλου ανά μονάδα επιφάνειας

f_y : το όριο διαρροής του χάλυβα

G(g)

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

H(h)

H_b : η οριζόντια δύναμη θραύσης που ασκείται στη βάση του θεμελίου

H_{max} : το κύμα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε τρίωρη καταιγίδα και περίοδο επαναφοράς 50 έτη

H_s : το χαρακτηριστικό ύψος κύματος

H : η οριζόντια δρώσα δύναμη που ασκείται στη βάση του θεμελίου

H : το ύψος κύματος

h : το ύψος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας

K(k)

k_c, k_d, k_b : συντελεστές εξαρτώμενοι από τη γωνία κλίσεως δ_s της συνισταμένης δύναμης ως προς την κατακόρυφο υπολογιζόμενοι αναλόγως της φύσης του εδάφους

K : ο αριθμός Keulegan-Carpenter

K : ο συντελεστής οριζόντιας πίεσης γαιών

k : ο αριθμός κύματος

k_p : ο συντελεστής παθητικών ωθήσεων

k_s : ο συντελεστής ωθήσεων γαιών επί της παραπλεύρου επιφάνειας του πασσάλου εντός της περιοχής του μηχανισμού θραύσεως

k_s : ο συντελεστής ρήξεως

L(l)

L : το μήκος κύματος στη περιοχή με βάθος d

L : το βάθος έμπηξης του πασσάλου

L' : το ισοδύναμο μήκος του ορθογωνικού πέδιλου

L_0 : το μήκος κύματος στα βαθειά

M(m)

M : η συγκεντρωμένη ροπή στην κεφαλή του πασσάλου

M : η ροπή στη βάση του πέδιλου

M_{ed} : η δρώσα ροπή στη διατομή μέγιστης καταπόνησης

M_{ed} : η ροπή κάμψης σχεδιασμού

$M_{κατ}$: η συνολική μάζα της κατασκευής

N(n)

N_{ed} : η θλιπτική δύναμη σχεδιασμού

N_c, N_q, N_γ : συντελεστές φέρουσας ικανότητας εξαρτώμενοι από τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ του εδάφους κάτω από την επιφάνεια έδρασης του πέδιλου

n : ο αριθμός των αναπτυγμάτων πελάγους

n : ο συντελεστής απόσβεσης κατασκευής

n : ο καταρχήν άγνωστος αλλά προσδιορίσιμος συντελεστής ασφαλείας έναντι θραύσεως

N_{ed} : η δρώσα αξονική στη διατομή μέγιστης καταπόνησης

P(p)

P : το οριζόντιο σεισμικό φορτίο

Q(q)

$q(z)$: η πίεση του ανέμου στη κατασκευή σε ύψος z από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας

Q_b : το φορτίο που αναλαμβάνεται από την επιφάνεια αιχμής του πασσάλου

Q_s : το φορτίο που αναλαμβάνεται από την παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου

R(r)

r : η ακτίνα της πλήρους διατομής

R : η ακτίνα του κυκλικού πέδλου

Re : ο αριθμός Reynolds

S(s)

S_e : η μέγιστη επιτάχυνση κατασκευής στην οριζόντια διεύθυνση

T(t)

t : η διάρκεια πνοής καταιγίδας πάνω από τη επιφάνεια της θάλασσας

t : το πάχος τοιχώματος ελάσματος

T : η περίοδος κύματος

T_D : η περίοδος σχεδιασμού

T_p : η περίοδος αιχμής

U(u)

u : η ταχύτητα του πεδίου ροής

$\dot{u}(z, t)$: η επιτάχυνση πεδίου ροής σε τυχαία στάθμη

\dot{u} : η επιτάχυνση του πεδίου ροής

u : η ωριαία ταχύτητα αναφοράς

$u(z,t)$: η ταχύτητα πεδίου ροής σε τυχαία στάθμη

U_{max} : η μέγιστη ταχύτητα στη ελεύθερη επιφάνεια

V(v)

V : η κατακόρυφη δύναμη στη βάση του πέδλου

V : η κατακόρυφη δρώσα δύναμη που ασκείται στη βάση του θεμελίου

$V(z)$: η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου

V_b : η κατακόρυφη δύναμη θραύσης που ασκείται στη βάση του θεμελίου

V_b : το κατακόρυφο φορτίο

$V_{b_{max}}$: το οριακό φορτίο διατμητικής αστοχίας του εδάφους

V_{ed} : η τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού

V_{hub} : η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας

V_{ref} : η ταχύτητα αναφοράς σε ύψος 10 m πάνω από τη επιφάνεια της θάλασσας και διάρκεια καταγραφής τα 10 λεπτά

W(w)

W_{el} : η ελαστική ροπή αντίστασης διατομής

X(x)

x : το ανάπτυγμα πελάγους

\bar{x} : το μέσο γεωμετρικό ανάπτυγμα πελάγους

Z(z)

z : το βάθος από την επιφάνεια στο οποίο παρατηρείται η μέγιστη ροπή

z : το ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

z_{hub} : το υψόμετρο του άξονα του δρομέα

A(a)

a_g : η επιτάχυνση σχεδιασμού εδάφους

a_{gR} : η επιτάχυνση εδάφους

α : ο συντελεστής συνοχής

α : η μεγαλύτερη πλευρά του ορθογωνικού πέλδλου

α : ο δυναμικός εκθέτης ο οποίος εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους

α' : η μεγαλύτερη ενεργός πλευρά του ορθογωνικού πέλδλου

$\Gamma(\gamma)$

γ : το υπό άνωση ειδικό βάρος του εδάφους

γ_1 : το υπό άνωση ειδικό βάρος άνωθεν του επιπέδου της βάσης

γ_2 : το υπό άνωση ειδικό βάρος κάτω από το επίπεδο της βάσης

γ_{M0} : ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας της διατομής

$\gamma_{σκ}$: το ειδικό βάρος σκυροδέματος

γ_1 : ο συντελεστής σπουδαιότητας

$\Delta(\delta)$

δ : η γωνία τριβής στη διεπιφάνεια πασσάλου εδάφους

$Z(\zeta)$

ζ : η απόσβεση της κατασκευής

$\Theta(\theta)$

θ : η αδιάστατη διάρκεια πνοής ανέμου

$M(\mu)$

μ : η ανοιγμένη ροπή

$N(v)$

v : η ανοιγμένη αξονική δύναμη

v : η αδιάστατη συχνότητα αιχμής

v_c', v_d', v_b' : συντελεστές εξαρτώμενοι κυρίως από τη μορφή του θεμελίου

$P(\rho)$

ρ : η πυκνότητα του αέρα

ρ_w : η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού

$\Sigma(\sigma)$

σ : η ορθή τάση αντοχής στο σημείο της διατομής

σ_{ed} : η δρώσα ορθή τάση στο σημείο της διατομής σε ύψος z πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

σ_v : η κατακόρυφη ενεργός τάση στο βάθος υπολογισμού στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας

T(τ)

τ_{ed} : η δρώσα διατμητική τάση στο σημείο της διατομής

$\Phi(\varphi)$

φ : η εσωτερική τριβή εδάφους

$\Omega(\omega)$

ω : η κυκλική συχνότητα κύματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1 Γενικά

Η παγκόσμια πληθυσμιακή αύξηση καθώς επίσης και η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια καθιστούν τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας αναγκαία. Η εξασφάλιση αυτής γίνεται και με τη εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από κάθε πηγή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ανανεώνεται μέσω φυσικών φαινομένων μόνιμου κύκλου. Πρόκειται για φιλικές μεθόδους προς το περιβάλλον αφού δεν προκαλούν σημαντική ρύπανση αυτού και ταυτόχρονα συντελούν στην αειφόρο ανάπτυξη της περιοχής. Στις πιο καθαρές μορφές ενέργειας που παρουσιάζουν αισθητή ανάπτυξη και είναι η πλέον διαδεδομένη στην εποχή μας συγκαταλέγεται η αιολική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλους μηχανισμούς όπως είναι οι ανεμογεννήτριες οι οποίες είναι εγκατεστημένες είτε στο χερσαίο είτε στον υπεράκτιο χώρο. Η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική και ακολούθως σε ηλεκτρική μέσω των ανεμογεννητριών. Γενικά είναι αποδεδειγμένο ότι τα υπεράκτια αιολικά πάρκα υπερτερούν σε σχέση με τα χερσαία αιολικά πάρκα (βλ. υποκεφάλαιο Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Υπεράκτιας Αιολικής Ενέργειας).

Η Ελλάδα είναι μία χώρα με μεγάλη ακτογραμμή και πλήθος νησιών. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι περιέχει ένα πλούσιο αιολικό δυναμικό με τους ισχυρούς ανέμους που πνέουν κυρίως στις παράλιες περιοχές, προσδίδει ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα. Η συμβολή της πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέσω επιδοτήσεων για επενδύσεις σε αιολικά πάρκα δίνει επιπλέον κίνητρα εγκατάστασης αιολικών πάρκων. Ήδη στην Ελλάδα μέχρι σήμερα έχουν εγκατασταθεί αιολικά πάρκα σε διάφορες περιοχές όπως στην Κύθνο, στη Λήμνο, στη Λέσβο, στη Χίο, στη Σάμο και στην Κρήτη. Όσο αφορά τα υπεράκτια αιολικά πάρκα που έχουν ήδη προταθεί και μελετώνται παρουσιάζονται στο χάρτη του Σχήματος 1.



Σχήμα 1 : Χάρτης προτεινόμενων υπεράκτιων αιολικών πάρκων του αρμόδιου εθνικού φορέα "Επενδύστε στην Ελλάδα Α.Ε.". Πηγή: (www.startupgreece.gov.gr)

1.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας σε υπεράκτια αιολικά πάρκα σε σχέση με τα χερσαία αιολικά πάρκα είναι:

- Το μεγάλο αιολικό δυναμικό στις υπεράκτιες περιοχές εγκατάστασης ανεμογεννητριών, συμβάλει στη μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η εγκατάσταση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων μειώνει αισθητά ζητήματα αισθητικής, θορύβου και όχλησης.
- Μπορούν να εγκατασταθούν ανεμογεννήτριες χωρίς περιορισμούς μεγέθους αφού η μεταφορά και συναρμολόγηση τους γίνεται στη θάλασσα.

Σημαντικά όμως είναι και τα μειονεκτήματα τους έναντι των χερσαίων αιολικών πάρκων τα οποία αντισταθμίζουν τα παραπάνω και είναι κυρίως:

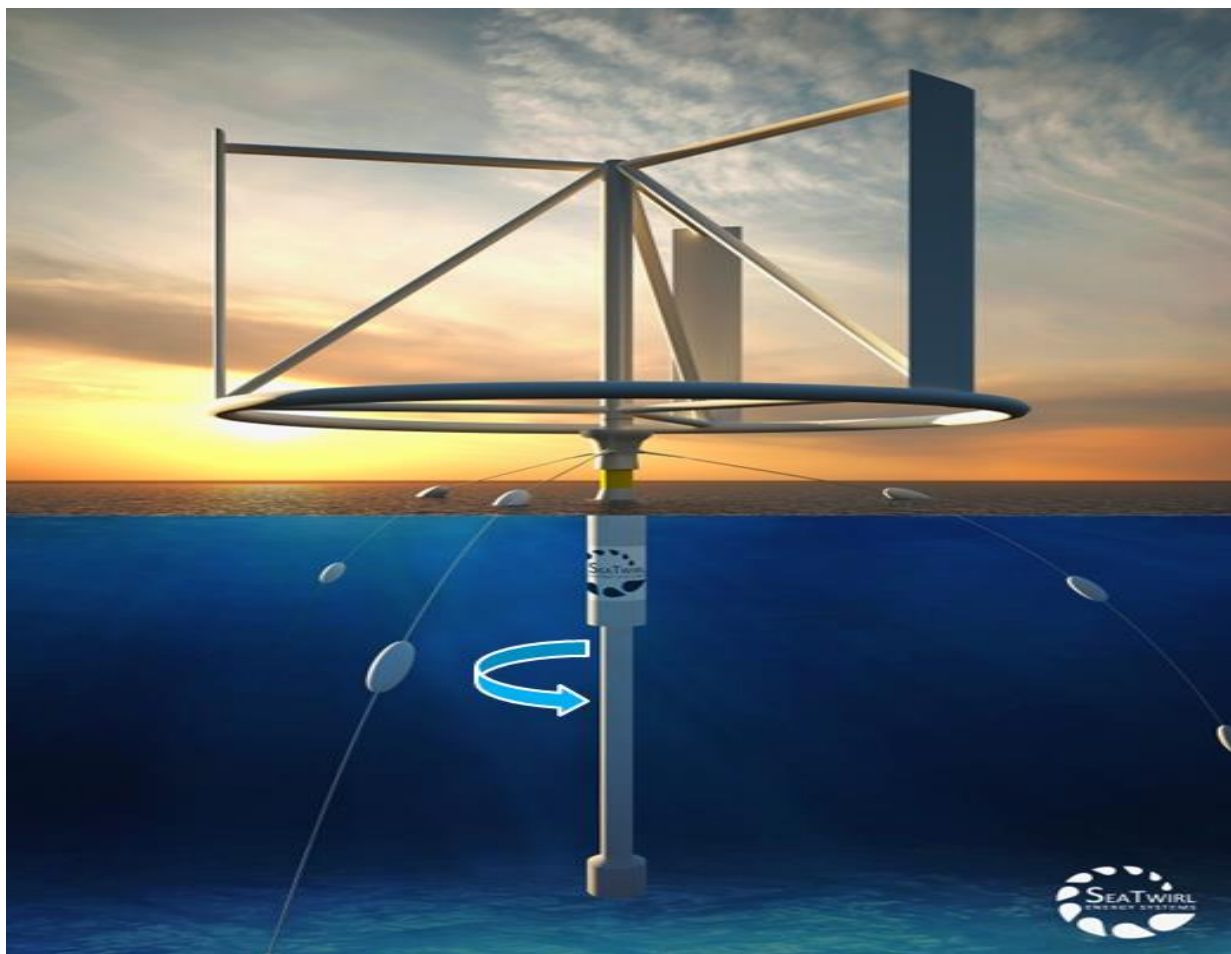
- Το μεγάλο κόστος λόγω της εγκατάστασης της κατασκευής έδρασης της ανεμογεννήτριας, της θεμελίωσης της, των υποβρυχίων καλωδίων αλλά και το μεγάλο κόστος κατά τη συντήρηση και επισκευή τους.
- Η σημαντική επιβάρυνση που δέχεται η κατασκευή λόγω των ακραίων αεροδυναμικών και υδροδυναμικών φορτίσεων από την επίδραση των ακραίων καιρικών φαινομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

2.1 Τύποι ανεμογεννητριών

2.1.1 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα

Πρόκειται για τύπο ανεμογεννήτριας της οποίας ο άξονας περιστροφής είναι κατακόρυφος (Σχήμα 2). Το γεγονός ότι ο άξονας της είναι κατακόρυφος αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα ενώ στα μειονεκτήματα του τύπου αυτού συμπεριλαμβάνονται πέραν των άλλων, είναι η αδυναμία εκκίνησης του χωρίς εξωτερική ηλεκτρική διέγερση από το δίκτυο και ο μικρός βαθμός απόδοσης.



Σχήμα 2: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα

2.1.2 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα

Σε αυτόν τον τύπο ανεμογεννήτριας ο κεντρικός άξονας περιστρέφεται έτσι ώστε να βρίσκεται παράλληλα στη διεύθυνση του ανέμου ενώ ο ρότορας της ανεμογεννήτριας που είναι τύπου “έλικας” , συνήθως αποτελείται από τρία πτερύγια (Σχήμα 3). Σημαντικό του πλεονέκτημα είναι η εκκίνηση από πολύ μικρές ταχύτητες και ο μεγάλος αεροδυναμικός συντελεστής με συνεπακόλουθο τον αυξημένο βαθμό απόδοσης. Παρόλα αυτά η χρήση μηχανισμού περιστροφής για προσανατολισμό στον άνεμο καθώς επίσης και η εγκατάσταση διαφόρων μηχανισμών σε μεγάλη απόσταση από το έδαφος (λόγω της μορφής της ανεμογεννήτριας) αποτελούν μειονεκτήματα της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα. Γενικά όμως στη συντριπτική πλειοψηφία τους τα αιολικά πάρκα διεθνώς αποτελούνται από ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου γι’ αυτό και είναι ιδιαίτερα δημοφιλής.

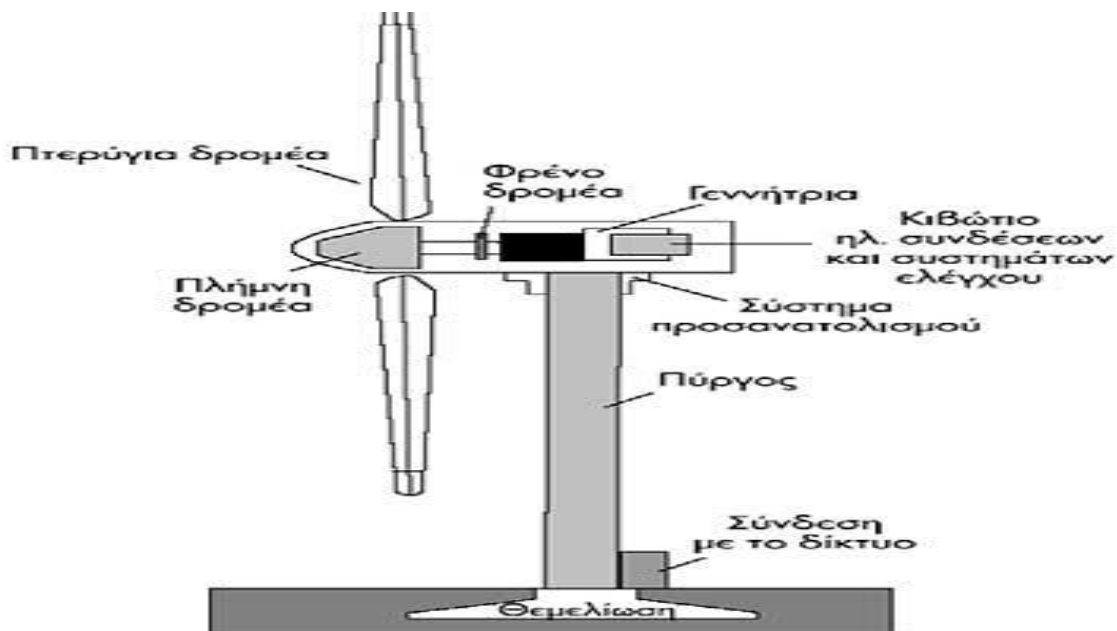


Σχήμα 3: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

2.2 Συστατικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Η ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα αποτελείται κυρίως από τα παρακάτω μέρη (Σχήμα 4):

- Πυλώνας (Tower) : Είναι συνήθως είτε κυλινδρικής είτε κωλουροκωνικής διατομής κατασκευασμένος από χάλυβα και σκυρόδεμα και αποτελεί τη κύρια στήριξη. Πέραν από αυτό έχει και λειτουργικό ρόλο αφού στο εσωτερικό του δίνει τη δυνατότητα εγκατάστασης διαφόρων οργάνων της ανεμογεννήτριας.
- Πτερύγια (Blades) : Είναι συνήθως κατασκευασμένα από αλουμίνιο και fiberglass. Είναι σχεδιασμένα για βέλτιστη απόδοση και ελαχιστοποίηση τόσο του θορύβου όσο και της αντανάκλασης του φωτός.
- Δρομέας (Rotor) : Είναι το σύστημα που αποτελείται από τα πτερύγια και ένα σφαιρικό εξάρτημα (hub) πάνω στο οποίο στηρίζονται τα πτερύγια.
- Θάλαμος (Nacelle): Βρίσκεται στη κορυφή του πυλώνα και είναι κατασκευασμένος από fiberglass. Περιέχει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες υψηλής και χαμηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, το φρένο, το μηχανισμό ψύξης και το υδραυλικό σύστημα.



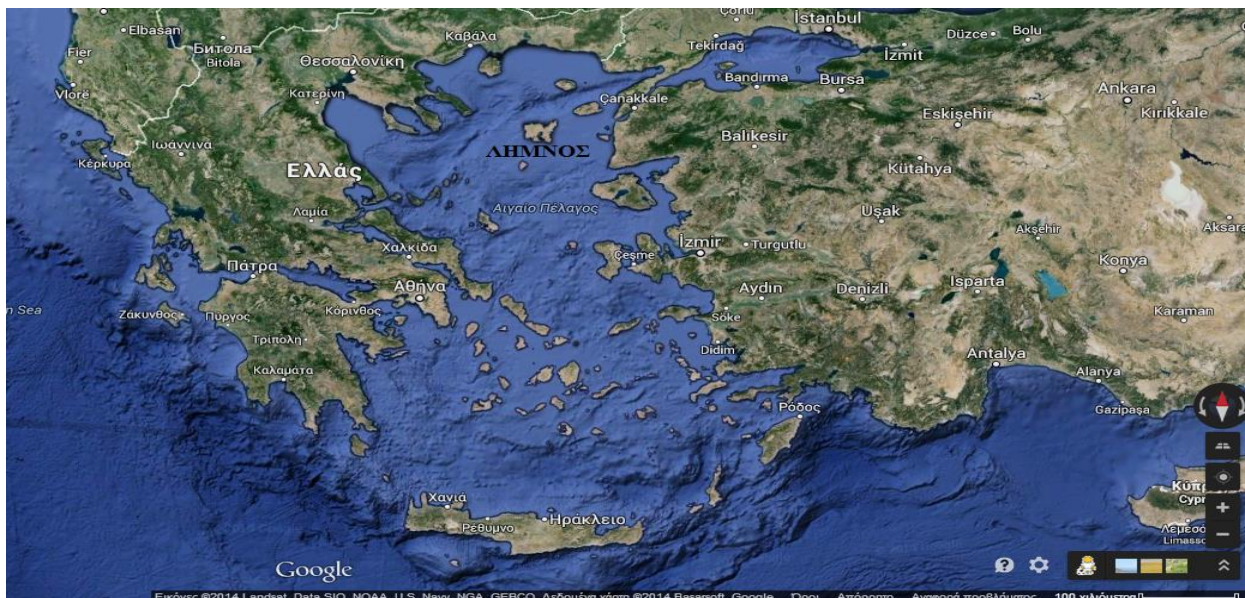
Σχήμα 4: Συστατικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας κρίθηκε σκόπιμη η επιλογή μιας συγκεκριμένης περιοχής μελέτης στον Ελλαδικό χώρο όπως είναι το νησί της Λήμνου, έτσι ώστε οι διαδικασίες που περιγράφονται παρακάτω να γίνονται πιο κατανοητές στον αναγνώστη. Επιπρόσθετα το γεγονός ότι λόγω της ύπαρξης υψηλού αιολικού δυναμικού η κατασκευή αιολικού πάρκου στη περιοχή αποτελεί ήδη μεγάλο προτεινόμενο έργο σύμφωνα με μελέτες, καθιστά αυτόματα και το εν λόγω παράδειγμα εφαρμογής αλληλένδετο με την πραγματικότητα.

3.1 Γενικά

Η Λήμνος που αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα νησιά της Ελλάδας με συνολική έκταση 476 τετραγωνικά χιλιόμετρα, βρίσκεται στο βόρειο Αιγαίο και συγκεκριμένα στο Θρακικό πέλαγος ανάμεσα στο Άγιο Όρος, τη Σαμοθράκη, την Ίμβρο και τη Λέσβο (Σχήμα 5). Πρωτεύουσα της Λήμνου είναι η Μύρινα. Ο πληθυσμός του νησιού ανέρχεται στις 18000 κατοίκους και η κύρια ασχολία των κατοίκων είναι η κτηνοτροφία, η αλιεία και η γεωργία ενώ κατά τις θερινές κυρίως περιόδους ο τουρισμός.



Σχήμα 5 : Ευρύτερη περιοχή μελέτης

Πηγή: (www.google.com/earth)

Η περιοχή μελέτης απέχει περίπου 5 χιλιόμετρα από την ακτή δυτικά της Λήμνου (Σχήμα 6) και συγκεκριμένα σε γεωγραφικό πλάτος φ: 39°56' 25'' N και γεωγραφικό μήκος λ: 025° 28' 45'' A .



Σχήμα 6: Περιοχή μελέτης

Πηγή: (www.google.com/earth/)

3.2 Δεδομένα περιοχής μελέτης

Απαραίτητη προϋπόθεση για το υπολογισμό διαφόρων παραμέτρων κατά τη εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν η συλλογή διαφόρων στοιχείων-δεδομένων που αφορούν τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών και υδροδυναμικών φορτίων καθ' ύψος της κατασκευής χρειάστηκε η συλλογή ανεμολογικών δεδομένων ιστού από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ) για τις ετήσιες ταχύτητες πνοής ανέμου. Συγκεκριμένα τα δεδομένα προέκυψαν από τον μετεωρολογικό σταθμό της Λήμνου και δίνονται στο Σχήμα 7.

HELLENIC NATIONAL METEOROLOGICAL SERVICE
 DIRECTION OF CLIMATOLOGY
 SECTION OF STATISTICAL CLIMATOLOGY
 CLIMATOLOGICAL DATA BASE

D A T A C L I M

STATION AHMNOE 650
 LATITUDE 39° 55' N LONGITUDE 25° 14' E ALTITUDE OF BAROMETER 4.6 METERS
 PERIOD 1974-1997

ANNUAL FREQUENCY (PER CENT) OF WIND DIRECTION AND FORCES IN BEAUFORT SCALE
 FROM OBSERVATIONS 06H-12H-18H GMT
 MONTH -00 YEAR -00

BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	SUM
0									19.473
1	.350	.559	.175	.131	.219	.142	.077	.142	1.755
2	3.965	5.104	1.161	.931	2.114	1.030	.383	1.380	16.068
3	4.556	7.590	1.216	.997	3.647	1.117	.405	1.479	21.007
4	4.326	10.712	.734	.997	3.866	1.073	.329	.602	22.639
5	1.774	6.145	.175	.438	1.424	.329	.110	.197	10.592
6	.778	3.395	.055	.285	.931	.131	.044	.033	5.652
7	.241	1.227	.011	.088	.285	.033	.011	.000	1.896
8	.077	.482	.011	.055	.088	.011	.000	.000	.724
9	.011	.055	.000	.000	.011	.000	.000	.000	.077
10	.011	.033	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.044
11	.011	.022	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.033
12									
SUM	16.100	35.324	3.538	3.922	12.585	3.866	1.359	3.833	19.473

Σχήμα 7: Πίνακας ανεμολογικών δεδομένων Ε.Μ.Υ. σταθμού της Λήμνου (Μέση ετήσια συχρότητα και διάρκεια πνοής ανέμου) Πηγή:(www.hnms.gr)

Στο σημείο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου τα εδάφη είναι κυρίως αλλούβια. Πρόκειται για αποθέσεις που στο γεωλογικό παρελθόν έχουν παρασυρθεί από τρεχούμενο νερό (χείμαρρους) και έχουν αποτεθεί στους πυθμένες των θαλασσών. Παρόλα αυτά λόγω έλλειψης επαρκούς πληροφορίας για τους ακριβής γεωλογικούς σχηματισμούς στην περιοχή επιλέχθηκαν δύο πιθανοί σχηματισμοί:

- Αμμώδες (c=2 kPa , φ=28°)
- Αργιλικός (c=10 kPa , φ=22°)

με ειδικό βάρος $\gamma=17\text{kN/m}^3$

Τα βάθη του πυθμένα στη περιοχή κυμαίνονται από 15 m έως και 20 m. Στους υπολογισμούς επιλέγεται το βάθος των 20 m.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

Ο υπολογισμός των φορτίων που ασκούνται στη ανεμογεννήτρια προϋποθέτει τη γνώση των συνθηκών ανέμου στη περιοχή κατασκευής του έργου. Η αναπαράσταση του ανέμου μπορεί να γίνει είτε για κανονικές συνθήκες ανέμου (normal wind conditions) είτε για ακραίες συνθήκες ανέμου (extreme wind conditions). Οι κανονικές συνθήκες ανέμου αφορούν επαναλαμβανόμενες συνθήκες φόρτισης της κατασκευής και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των φορτίων κόπωσης κατά τη φάση λειτουργίας της κατασκευής. Οι ακραίες συνθήκες ανέμου χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των φορτίων στα μέλη, στην κατασκευή έδρασης και τη θεμελίωση της. Στην παρούσα μελέτη όπου γίνεται σχεδιασμός της θεμελίωσης των φορέων έδρασης της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται το μοντέλο των ακραίων συνθηκών ανέμου.

4.1 Μοντέλο ακραίων συνθηκών ανέμου (EWM)

Το μοντέλο ακραίων συνθηκών ανέμου αναπαριστά ακραίες συνθήκες ανέμου μιας συγκεκριμένης περιόδου επαναφοράς, συνήθως ένα (T=1) ή πενήντα (T=50) χρόνια. Στη μελέτη θεωρήθηκε περίοδος επαναφοράς T=50 έτη.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανεμολογικά στοιχεία από το μετεωρολογικό σταθμό της Ε.Μ.Υ στη Λήμνο (Σχήμα 7) υπολογίζεται η μέγιστη ταχύτητα πνοής στη ευρύτερη περιοχή. Η συσχέτιση της ταχύτητας αυτής με τη δύναμη πνοής ανέμου δίνεται στο Σχήμα 8. Η εν λόγω ταχύτητα έχει σαν ύψος αναφοράς τα 10 m πάνω από τη επιφάνεια της θάλασσας και διάρκεια καταγραφής τα 10 λεπτά και συνήθως καλείται ταχύτητα αναφοράς (V_{ref}).

Η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας (V_{hub}) υπολογίζεται με βάση τη σχέση 4.1:

$$V_{hub} = \frac{V_{ref}}{1.1 * (\frac{10}{z_{hub}})^a} \quad (4.1)$$

όπου:

V_{ref} η ταχύτητα αναφοράς

z_{hub} το υψόμετρο του άξονα του δρομέα

α εκθέτης ο οποίος εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους (προτείνεται η τιμή α=0.14)

Κλίμακα Beaufort	Όνομασία ανέμου	Ταχύτητα ανέμου		
		m/sec	km/hr	miles/hr
0	Νηνεμία	0. – 0.2	0 – 1	0 – 1
1	Υποπνέων	0.3 – 1.5	1 – 5	1 – 3
2	Ασθενής	1.6 – 3.3	6 – 11	4 – 7
3	Λεπτός	3.4 – 5.4	12 – 19	8 – 12
4	Μέτριος	5.5 – 7.9	20 – 28	13 – 18
5	Λαμπρός	8.0 – 10.7	29 – 38	19 – 24
6	Ισχυρός	10.8 – 13.8	39 – 49	25 – 31
7	Σφοδρός	13.9 – 17.1	50 – 61	32 – 38
8	Θυελλώδης	17.2 – 20.7	62 – 74	39 – 46
9	Θύελλα	20.8 – 24.4	75 – 88	47 – 54
10	Ισχυρή θύελλα	24.5 – 28.4	89 – 102	55 – 63
11	Σφοδρή θύελλα	28.5 – 32.6	103 – 117	64 – 72
12	Τυφώνας	32.7 – 36.9	118 - 133	73 - 82

Μονάδες : 1 mile = 1.609 km
 1 knot = 1.151 mile/hr
 = 1.852 km/hr

Σχήμα 8: Πίνακας κλίμακας ανέμου κατά τη Μετεωρολογική Υπηρεσία

Επίσης η ταχύτητα ανέμου μεταβάλλεται καθ' ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου που αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της μέσης ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας δίνεται στην πιο κάτω σχέση 4.2:

$$V(z) = 1.1 * V_{hub} * \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{\alpha} \quad (4.2)$$

όπου:

$V(z)$ η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου σε ύψος z πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

V_{hub} η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 10-λέπτου στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας

z το ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

z_{hub} το υψόμετρο του άξονα του δρομέα

α εκθέτης ο οποίος εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους (προτείνεται η τιμή $\alpha=0.14$)

Οι συντελεστές ασφαλείας σύμφωνα με το μοντέλο ακραίων συνθηκών ανέμου είναι για τα μόνιμα φορτία 1.35 και για τα κινητά φορτία 1.5.

4.2 Δύναμη και ροπή στη βάση του πύργου ανεμογεννήτριας

Τα φορτία του ανέμου ασκούνται στις εξωτερικές επιφάνειες του πυλώνα της ανεμογεννήτριας και κάθετα προς την εξεταζόμενη επιφάνεια. Οι δυνάμεις αντίστασης θεωρούνται σημαντικές ενώ οι δυνάμεις αδράνειας συνήθως αμελούνται λόγω μικρής επιρροής στη κατασκευή.

Η πίεση $q(z)$ που ασκεί ο άνεμος στη κατασκευή δίνεται από τη σχέση 4.3:

$$q(z) = \frac{1}{2} * \rho * V(z)^2 \quad (4.3)$$

όπου:

ρ η πυκνότητα του αέρα ($1,227 \text{ kg/m}^3$)

$V(z)$ η μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος z πάνω από τη επιφάνεια της θάλασσας

Η δύναμη (F) που ασκεί ο άνεμος σε ύψος z από την στάθμη ελεύθερης επιφάνειας στη κατασκευή προκύπτει από τη σχέση 4.4:

$$F(z) = C * q(z) * A(z) \quad (4.4)$$

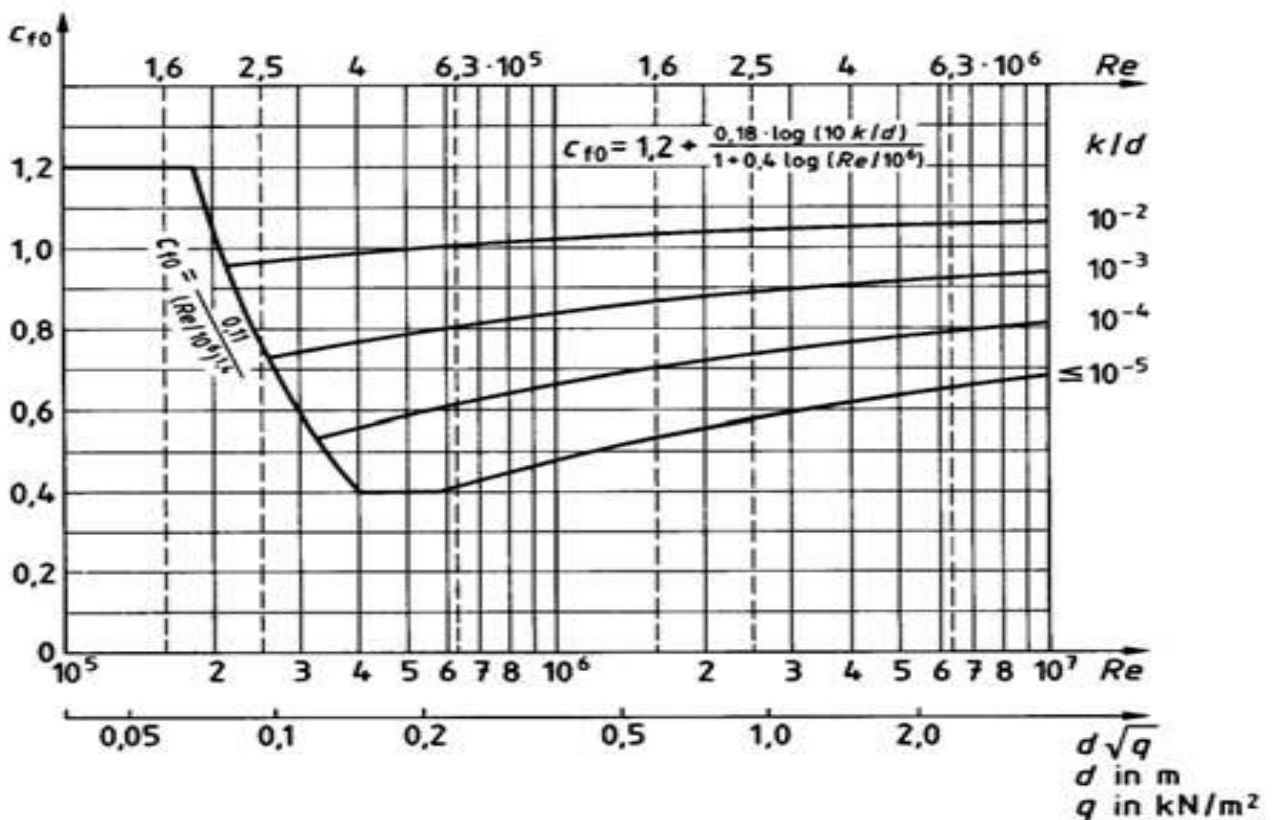
όπου:

$q(z)$ η πίεση του ανέμου

$A(z)$ το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση του ανέμου σε ύψος z

C συντελεστής σχήματος

Ο συντελεστής σχήματος εξαρτάται κυρίως από τη επιφανειακή τραχύτητα της κατασκευής, τη διάμετρο της και τον αριθμό Reynolds και προκύπτει συνήθως από το πιο κάτω διάγραμμα (Σχήμα 9).



Σχήμα 9: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή σχήματος C_D

Στη μελέτη επιλέχθηκε για χάρη απλότητας της διαδικασίας και υπέρ της ασφαλείας επιλέγεται η μέγιστη τιμή του συντελεστή $C=1.2$

Το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου προκύπτει από τη σχέση 4.5:

$$A(z) = \frac{(z-h)*(b-a)}{h-5} + b \quad (4.5)$$

όπου:

h το ύψος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας

b η διάμετρος στη κορυφή του πυλώνα της ανεμογεννήτριας

a η διάμετρος στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας

Παρ/σεις:

- Αρχή του άξονα z λαμβάνεται η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού
- Η μορφή του παρονομαστή κλάσματος προκύπτει τέτοια αφού στη μελέτη θεωρήθηκε ότι η βάση του πύργου βρίσκεται $z_0=5m$ πάνω από την στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού

Η συνολική δύναμη (F) και ροπή (M) στη βάση της ανεμογεννήτριας λόγω αεροδυναμικών φορτίων προκύπτουν με μαθηματική ολοκλήρωση. Συγκεκριμένα :

$$F = \int_{z=z_0}^{z=h} \frac{1}{2} * C * \rho * A(z) * V(z)^2 dz$$

$$= \left[\frac{0.605 * C * \rho * V_{hub}^2 * z * \left(\frac{a*h-5*b}{2a+1} + \frac{(b-a)*z}{2a+2} \right) * \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{2a}}{h-5} \right]_{z=z_0}^{z=h} \quad (4.6)$$

$$M = \int_{z=z_0}^{z=h} \frac{1}{2} * (z - z_0) * C * \rho * A(z) * V(z)^2 dz$$

$$= \left[\frac{0.605 * C * \rho * V_{hub}^2 * z * \left(\frac{-5a*h+25*b}{2a+1} + \frac{((5+h)*a)-10b}{2a+2} * z + \frac{b-a}{3+2a} * z^2 \right) * \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{2a}}{h-5} \right]_{z=z_0}^{z=h} \quad (4.7)$$

4.3 Δύναμη και ροπή στη στάθμη ελεύθερης επιφάνειας

Θα πρέπει να τονισθεί ότι δράσεις λόγω αεροδυναμικών φορτίων παρατηρούνται και στο καθένα από τους τρεις εναλλακτικούς φορείς έδρασης της ανεμογεννήτριας υπό σταθερή διάμετρο που μελετούνται (εκτενέστερη περιγραφή για τους τρεις φορείς θα γίνει στο Κεφάλαιο 7). Έτσι προκύπτουν η δύναμη (F) και η ροπή (M) στη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας λόγω αεροδυναμικών φορτίων πάλι με μαθηματική ολοκλήρωση και συγκεκριμένα :

$$\begin{aligned} F &= \int_{z=0}^{z=z_0} \frac{1}{2} * C * \rho * A * V(z)^2 dz \\ &= \left[\frac{0.605 * C * \rho * V_{hub}^2 * D * z^{(2a+1)}}{z_{hub}^{2a * (2a+1)}} \right]_{z=z_0}^{z=h} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} M &= \int_{z=z_0}^{z=h} \frac{1}{2} * (z - z_0) * C * \rho * A * V(z)^2 dz \\ &= \left[\frac{0.605 * C * \rho * V_{hub}^2 * D * z^{(2a+2)}}{z_{hub}^{2a * (2a+2)}} \right]_{z=z_0}^{z=h} \end{aligned} \quad (4.9)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟ VESTAS V90 - 3MW

5.1 Γενική Περιγραφή

Στη παρούσα εργασία κρίθηκε σκόπιμο να επιλεγθεί το εν λόγω μοντέλο (Σχήμα 10) για χάρη απλοποίησης της διαδικασίας σχεδιασμού της θεμελίωσης αφού χρησιμοποιήθηκαν αριθμητικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια. Σημειώνεται ότι αυτές προέκυψαν από διαφημιστικό φυλλάδιο (prospectus) της συγκεκριμένης Εταιρείας.

1. Πυλώνας (Pylon)

- Ύψος: 105m
- Μάζα: 450 tn
- Διάμετρος βάσης: 4.5m
- Διάμετρος κορυφής: 2.5m
- Πάχος : 0.05m

2. Πτερύγια (blades)

- Μάζα: 6,70tn
- Διάμετρος περιστροφής: 90m

3. Θάλαμος (Nacelle)

- Ύψος: 4m
- Μήκος: 9,65m
- Πλάτος: 3.65m
- Μάζα: 70tn

4. Πλήμνη (Hub)

- Μήκος: 4.4m
- Μάζα: 22 tn



Σχήμα 10: Μοντέλο Vestas V90-3MW

Οι τιμές των τόσο των διαμέτρων του πυλώνα της ανεμογεννήτριας, προέκυψαν από κριτήριο σύμφωνα με το οποίο για πυλώνα ανεμογεννήτριας με ύψος μεγαλύτερο από

90m η μέση διάμετρος πυλώνα είναι περίπου 3m.Ο έλεγχος επάρκειας της συγκεκριμένης διατομής παρουσιάζεται σε επόμενο υποκεφάλαιο του κεφαλαίου αυτού (Κεφάλαιο 5.3).

5.2 Συνολική φόρτιση και εντατικά μεγέθη στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας

Τα φορτία που ασκούνται στη ανεμογεννήτρια και μελετήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα εξής:

- Ίδιο βάρος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας , των πτερυγίων , του θαλάμου και της πλήμνης (Κεφάλαιο 5.1).
- Το αεροδυναμικό φορτίο καθ' ύψος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας

Τα φορτία αυτά προκαλούν την εξής εντατική κατάσταση στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας:

- Αξονική δύναμη λόγω ιδίου βάρους του πυλώνα της ανεμογεννήτριας , των πτερυγίων , του θαλάμου και της πλήμνης.
- Τέμνουσα δύναμη λόγω αεροδυναμικών φορτίων (σχέση 4.6)
- Συνολική ροπή λόγω αλγεβρικού αθροίσματος επιμέρους ροπών από τα αεροδυναμικά φορτία (σχέση 4.7) , τα πτερύγια , το θάλαμο και την πλήμνη.

Παρ/ση: Οι ροπές των πτερυγίων , του θαλάμου και της πλήμνης ως προς τον άξονα του πυλώνα υπολογίσθηκαν ενδεικτικά. Αυτό λόγω έλλειψης στοιχείων όσο αφορά το σημείο εφαρμογής του κέντρου βάρους τους και των μοχλοβραχιόνων τους ως προς τον άξονα του πυλώνα της ανεμογεννήτριας.

Τα αποτελέσματα της μελέτης για τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών στη βάση του πυλώνα μετά από χρήση του προγράμματος Excel παρουσιάζονται πιο κάτω (Σχήμα 11):

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
1		1. Δύναμη (Fed) - Ροπή (Med) στη βάση του πύργου					2. Ροπή (Med) λόγω πτερυγίου, θαλάμου και πλήμνης					4. Αξονική δύναμη (F) λόγω ίδιου βάρους του πύργου									
2		λόγω αεροδυναμικών φορτίων																			
3																					
4		ρ (kg/m ³)	1.227				M(kNm)	704.5542						h(m)	105						
5		zref(m)	10				Med(kNm)	951.1482						d1(m)	4.5						
6		zhub(m)	105											d2(m)	2.5						
7		Vref(m/s)	36.9											t(m)	0.05						
8		Vhub(m/s)	51.285				3. Συνολική ροπή (Med) στη βάση					r1(m)	2.25								
9		c	1.2											r2(m)	1.25						
10		a	0.14				Med (kNm)	40367.37						r1'(m)	2.2						
11		a(m)	4.5											r2'	1.2						
12		b(m)	2.5											γ (KN/m ³)	78.5						
13		zo(m)	5											V1(m ³)	1026.8						
14		h(m)	105											V2(m ³)	970.5						
15		F(KN)	639.78											DV(m ³)	56.305						
16		M(kNm)	26277											F(KN)	4419.9						
17		Fed(KN)	959.68											M (tn)	450.55						
18		Med(kNm)	39416																		
19																					
20																					
21														5. Συνολική αξονική δύναμη							
22		Παρ/ση: Τα εντατικά μεγέθη στα κελιά με έντονο γράμα έχουν πολλαπλασιαστεί με τους αντίστοιχους												(συνυπολογίζοντας τα ίδια βάρη όλων των στοιχείων της Α/Γ)							
23		συντελεστές ασφαλείας και αποτελούν τις δρώσες δυνάμεις και ροπές																			
24														N(KN)	5388.1						
25														Ned(KN)	7273.9						

Σχήμα 11: Πίνακες υπολογισμού εντατικών μεγεθών στη βάση του πυλώνα της Α/Γ

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

Με τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας απαραίτητη προϋπόθεση για τη συνέχεια της διαδικασίας είναι ο έλεγχος επάρκειας της κοίλης διατομής στην κατάσταση αστοχίας κατά Von Mises που αποτελεί το σημαντικότερο κριτήριο σχεδιασμού του πυλώνα . Ο έλεγχος Von Mises γίνεται στη διατομή μέγιστης καταπόνησης του πυλώνα και θα πρέπει να είναι γνωστά τα εξής:

- **Χαρακτηριστικά χάλυβα**

Για το συγκεκριμένο τύπο κατασκευής θαλάσσιων ανεμογεννητριών χρησιμοποιείται κυρίως ποιότητα χάλυβα συνηθισμένης αντοχής (NS) και υψηλής αντοχής (HS) είτε συνηθισμένης συγκολλησιμότητας είτε βελτιωμένης συγκολλησιμότητας.

Παρ/ση: Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ποιότητα χάλυβα υψηλής αντοχής .

- **Κατάταξη διατομής**

Η συνήθης διατομή του πυλώνα της ανεμογεννήτριας είναι κοίλη κυκλική με ταυτόχρονη θλίψη και κάμψη. Με τη κατάταξη της διατομής σε κατηγορίες αναγνωρίζεται το μέγεθος περιορισμού της αντοχής της από την αντοχή της σε πλευρικό λυγισμό. Η διατομή κατατάσσεται στις πιο κάτω κατηγορίες:

Κατηγορία	Διατομή σε κάμψη και θλίψη
1	$d/t < 50\varepsilon^2$
2	$d/t < 70\varepsilon^2$
3	$d/t < 90\varepsilon^2$
$\varepsilon = (235/f_y)^{0.5}$	

όπου:

d η διάμετρος της κοίλης διατομής

t το πάχος τοιχώματος ελάσματος

f_y το όριο διαρροής του χάλυβα

Παρ/ση: Για τη κατηγορία 1 και 2 γίνονται πλαστικοί έλεγχοι ενώ για τη κατηγορία 3 ελαστικοί έλεγχοι (Von Mises)

- **Χαρακτηριστικές ιδιότητες διατομής**

Εμβαδόν διατομής:

$$A = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \pi * \left(\frac{D}{2} - t\right)^2 \quad (5.1)$$

Ελαστική ροπή αντίστασης διατομής:

$$W_{el} = \pi * \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^4 - \left(\frac{D}{2} - t\right)^4}{4 * \frac{D}{2}} \quad (5.2)$$

Επιφάνεια διάτμησης:

$$A_v = \frac{2 * A}{\pi} \quad (5.3)$$

- **Συντελεστές ασφαλείας**

Σύμφωνα με τον αντίστοιχο κανονισμό οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας λαμβάνονται ίσοι με $\gamma_{M0}=1.10$

Γνωρίζοντας τα παραπάνω μπορεί να ελεγχθεί η επάρκεια της διατομής μέσω του ελέγχου Von Mises σύμφωνα με τον οποίο πρέπει να ισχύει:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{ed}^2 + 3 * \tau_{ed}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.4)$$

όπου:

σ η ορθή τάση αντοχής στο σημείο της διατομής

σ_{ed} η δρώσα ορθή τάση στο σημείο της διατομής

τ_{ed} η δρώσα διατμητική τάση στο σημείο της διατομής

f_y το όριο διαρροής του χάλυβα

γ_{M0} ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας της διατομής

με:

$$\sigma_{ed} = \frac{N_{ed}}{A} + \frac{M_{ed}}{W_{el}} \quad (5.5)$$

όπου :

N_{ed} η θλιπτική δύναμη σχεδιασμού

A το εμβαδόν διατομής

M_{ed} η ροπή κάμψης σχεδιασμού

W_{el} η ελαστική ροπή αντίστασης διατομής

και:

$$\tau_{ed} = \frac{V_{ed}}{A_v} \quad (5.6)$$

όπου :

V_{ed} η τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού

A_v η επιφάνεια διάτμησης της διατομής

Με βάση τις πιο πάνω σχέσεις και τα χαρακτηριστικά του μοντέλου Vestas V90-3MW έγινε ο έλεγχος στη διατομή μέγιστης καταπόνησης που είναι η βάση του πυλώνα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πιο κάτω (Σχήμα 12):

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1			Έλεγχος επάρκειας διατομής (Von Mises)						
2									
3			t(m)	0.05					
4			d(m)	4.5					
5			ε	0.9417					
6			e^2	0.8868					
7			d/t	90					
8			fy(kPa)	265000					
9			A(m2)	0.699					
10			Av(m2)	0.445					
11			Wel	0.7691					
12			SF	1.1					
13			σed(kPa)	61656					
14			τed(kPa)	2156.6					
15			σ(kPa)	61769					
16			fy/SF(kPa)	240909					
17									
18			Παρ/ση: Η διατομή ανήκει στη κατηγορία 3						
19									

Σχήμα 12: Πίνακας ελαστικού ελέγχου επάρκειας διατομής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

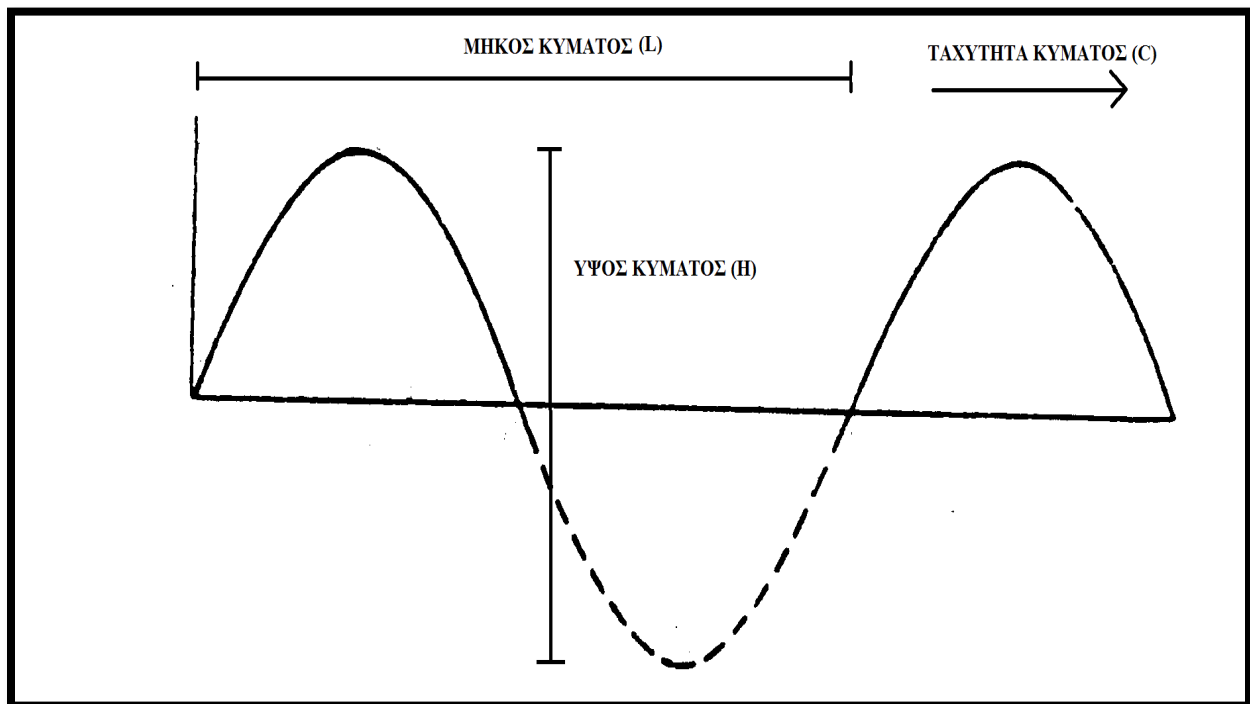
Τα θαλάσσια κύματα και θαλάσσια ρεύματα (τα οποία όμως αμελούνται στη μελέτη) είναι οι κύριες αιτίες που προκαλούν τα υδροδυναμικά φορτία κατά μήκος της κατασκευής έδρασης της ανεμογεννήτριας. Αποτελούν μαζί με τα αεροδυναμικά φορτία τις κύριες φορτίσεις στο θεμέλιο του φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας. Ο υπολογισμός των υδροδυναμικών φορτίων προϋποθέτει τη γνώση του κυματικού σχεδιασμού στη περιοχή. Η ανάπτυξη του κυματισμού εξαρτάται από τη χαρακτηριστική ταχύτητα ανέμου, το αποτελεσματικό μήκος ανάπτυξης και τη διάρκεια πνοής ανέμου. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του κύματος (H,T) λαμβάνεται απεριόριστη διάρκεια πνοής ανέμου επομένως τα χαρακτηριστικά του κύματος εξαρτώνται από το αποτελεσματικό μήκος ανάπτυξης και την ταχύτητα πνοής του ανέμου. Ο υπολογισμός των φορτίων για τη κατάσταση λειτουργίας της κατασκευής γίνεται βάσει των κανονικών συνθηκών ανέμου ενώ ο υπολογισμός των φορτίων για τον σχεδιασμό θεμελίωσης της κατασκευής γίνεται βάσει των ακραίων συνθηκών ανέμου. Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται μόνο η θεμελίωση της κατασκευής έδρασης της ανεμογεννήτριας. Πιο κάτω γίνεται σύντομη αναφορά στους κυματισμούς και στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού των φορτίων.

6.1 Χαρακτηριστικά κυματισμού

Στη παρούσα διπλωματική εργασία ο υπολογισμός του κύματος σχεδιασμού προσεγγίζεται με βάση τη θεωρία του απλού αρμονικού κύματος. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή η ταυτόχρονη δράση των γενεσιουργών δυνάμεων και των δυνάμεων επαναφοράς προκαλεί τη δημιουργία ταλαντώσεων στην επιφάνεια της θάλασσας. Ο θαλάσσιος κυματισμός προκαλείται από τη διαταραχή της θαλάσσιας μάζας λόγω αυτής της ταλάντωσης των σωματιδίων του θαλάσσιου νερού. Ο κυματισμός περιγράφεται πάντα με βάση τα γεωμετρικά και άλλα χαρακτηριστικά του. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του απλού αρμονικού κύματος παρουσιάζονται πιο κάτω (Σχήμα 13):

- Ύψος κύματος (H) είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής και της κοιλιάς του κύματος.
- Μήκος κύματος (L) είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο σωματιδίων που βρίσκονται στην ίδια φάση ταλαντώσεως.

- 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.
- Ταχύτητα κύματος (c) είναι η απόσταση που διανύεται από το μέτωπο του κύματος στη μονάδα του χρόνου. $c = L/T$
- Συχνότητα κύματος $f = 1/T$
- Κυκλική συχνότητα κύματος $\omega = 2\pi/T$
- Αριθμός κύματος $k = 2\pi/L$
- Βάθος πυθμένα (d) είναι η απόσταση ανάμεσα στη ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία και του πυθμένα της θάλασσας



Σχήμα 13: Χαρακτηριστικά απλού αρμονικού κύματος

6.2 Διαδικασία εκτίμησης ανεμολογικού κυματισμού (Μέθοδος Jonswap)

Ο καθορισμός του κύματος σχεδιασμού γίνεται συνήθως με την ανάλυση κυματικών καταγραφών από τις οποίες προκύπτει το χαρακτηριστικό ύψος κύματος το οποίο ισούται με το μέσο όρο των τιμών των υψών κύματος που είναι πάνω από το 1/3 των τιμών καταγραφής. Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος και η χαρακτηριστική περίοδος εξαρτώνται από:

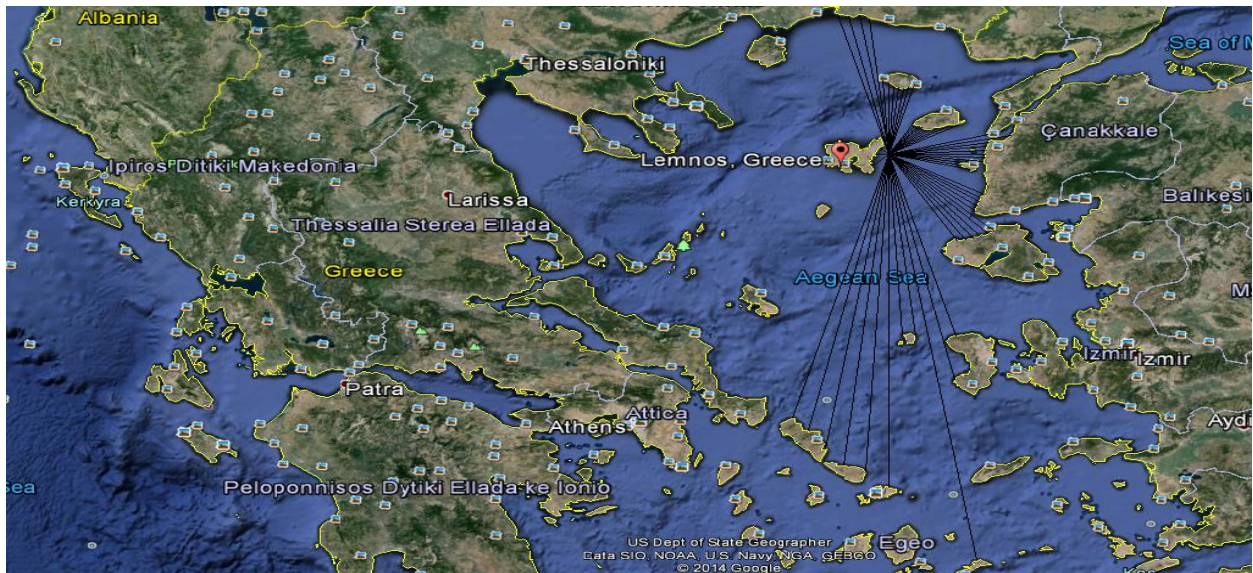
- Τη ταχύτητα αναφοράς του ανέμου
- Το ανάπτυγμα πελάγους του κυματισμού
- Τη διάρκεια πνοής του ανέμου

Για το καθορισμό των πιο πάνω στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο πρόβλεψης Jonswap το οποίο βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη τη μεταφορά ενέργειας από τη πνοή του ανέμου στη θαλάσσια επιφάνεια και έχει εφαρμογή για περιορισμένα αναπτύγματα πελάγους. Η διαδικασία υπολογισμού του χαρακτηριστικού ύψους σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή προϋποθέτει να είναι γνωστές οι πιο κάτω παράμετροι :

- **Ανάπτυγμα πελάγους**

Για τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών υπολογίζεται το γεωμετρικό ανάπτυγμα πελάγους (οριζόντιο μήκος μίας θαλάσσιας επιφάνειας μεταξύ δύο διαδοχικών στερεών ορίων) και όχι το ενεργό ανάπτυγμα πελάγους (η περιοχή στην οποία παράγονται θαλάσσιοι κυματισμοί κάτω από την επίδραση ανέμου σταθερής εντάσεως και ταχύτητας). Ο λόγος είναι ότι με αυτό τον τρόπο καλύπτεται η περίπτωση εμφάνισης ανέμου με σταθερή ταχύτητα σε όλο το γεωμετρικό ανάπτυγμα κατά τη διάρκεια ενός ακραίου καιρικού φαινομένου (παρόλο που η πιθανότητα εμφάνισης του ανέμου σε όλο το ανάπτυγμα είναι πολύ μικρή).

Για όλες τις διευθύνσεις ανέμων με τη χρήση του προγράμματος AutoCAD σχεδιάζονται τα αναπτύγματα πελάγους ανά 3 μοίρες από -15° μέχρι $+15^{\circ}$ σε σχέση με τη κύρια διεύθυνση του κάθε ανέμου (Σχήμα 14).



Σχήμα 14: Σχεδίαση αναπτυγμάτων πελάγους

Παρ/ση: Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 14 για τη περιοχή μελέτης έχουν σχεδιασθεί τα αναπτύγματα πελάγους για όλες τις διευθύνσεις ανέμων εκτός από το δυτικό , βορειοδυτικό και νοτιοδυτικό άνεμο. Το ανάπτυγμα πελάγους για τις διευθύνσεις αυτές είναι μικρό .

Το μέσο γεωμετρικό ανάπτυγμα πελάγους για κάθε μία από τις διευθύνσεις (Σχήμα 15) προκύπτει από τη παρακάτω σχέση 6.1:

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n} \quad (6.1)$$

όπου:

\bar{X} το μέσο γεωμετρικό ανάπτυγμα πελάγους

x το ανάπτυγμα πελάγους

n ο αριθμός των αναπτυγμάτων πελάγους

	S	SE	E	NE	N	NW	W	SW
Angle(°)	Fetch(x)	Fetch(x)	Fetch(x)	Fetch(x)	Fetch(x)	Fetch(x)	Fetch(x)	Fetch(x)
15	225945	80975	49059	47680	56065			
12	229684	83009	43518	42431	55075			
9	254920	84622	43241	35541	53344			
6	256723	85256	56358	30819	54170			
3	273182	87399	57172	29153	55253			
0	273831	87870	57121	28709	57760			
3	146605	69034	57278	28861	59987			
6	315560	66734	58506	28550	110978			
9	339899	66113	59935	27993	113945			
12	186210	64817	74042	27585	114871			
15	152587	65513	60786	29804	118012			
x(m)	241377	76486	56092.36	32466	77224			

Σχήμα 15: Πίνακας υπολογισμού γεωμετρικού αναπτύγματος πελάγους

- **Ωριαία ταχύτητα αναφοράς**

$$u = 0.91 * V_{ref} \quad (6.2)$$

όπου:

u η ωριαία ταχύτητα αναφοράς

V_{ref} η ταχύτητα αναφοράς (ταχύτητα σε υψόμετρο 10m για χρονική διάρκεια πνοής ανέμου ενός τυπικού 10-λέπτου)

Λαμβάνοντας στοιχεία από το Μετεωρολογικό Σταθμό Λήμνου (Σχήμα 7) για κάθε διεύθυνση ανέμου υπολογίζεται η ταχύτητα αναφοράς (ως η μέγιστη ταχύτητα) και στη συνέχεια με εφαρμογή της σχέσης 6.2 η ωριαία ταχύτητα αναφοράς.

Δεδομένων των παραπάνω παραμέτρων εν συνεχεία υπολογίζονται (Σχήμα 16):

- η αδιάστατη διάρκεια πνοής ανέμου

$$\theta = \frac{g}{u} * t \quad (6.3)$$

όπου:

g η επιτάχυνση της βαρύτητας

u η ωριαία ταχύτητα αναφοράς

t η διάρκεια πνοής καταιγίδας πάνω από τη επιφάνεια της θάλασσας (Επιλέγεται συνήθως t=3h ή t=6h)

- το αδιάστατο ανάπτυγμα πελάγους

$$\xi = \frac{g}{u^2} * \bar{X} \quad (6.4)$$

όπου:

g η επιτάχυνση της βαρύτητας

u η ωριαία ταχύτητα αναφοράς

\bar{X} το μέσο γεωμετρικό ανάπτυγμα πελάγους

- η αδιάστατη συχνότητα αιχμής

$$v = \max \left[0.16; 2.84 * \xi^{-0.3}; 16.8 * \theta^{-\frac{3}{7}} \right] \quad (6.5)$$

- η περίοδος αιχμής

$$T_p = \frac{u}{g} * \frac{1}{v} \quad (6.6)$$

- το χαρακτηριστικό ύψος κύματος

$$H_{s,JONSWAP,wind} = 0.0094 * v^{-\frac{5}{3}} * \frac{u^2}{g} \quad (6.7)$$

6.3 Κύμα και περίοδος σχεδιασμού

Σύμφωνα με το μοντέλο ακραίων συνθηκών ανέμου που επιλέχθηκε για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών και υδροδυναμικών φορτίων, το ύψος κύματος σχεδιασμού απλοποιητικά μπορεί να υπολογισθεί ως (Σχήμα 16):

$$H_{\max} = 1.86 * H_S \quad (6.8)$$

όπου:

H_{\max} το κύμα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε τρίωρη καταιγίδα και περίοδο επαναφοράς 50 έτη

H_S το χαρακτηριστικό ύψος κύματος

ενώ η περίοδος σχεδιασμού βρίσκεται στο εξής διάστημα:

$$11.1 * \sqrt{\frac{H_{\max}}{g}} \leq T_D \leq 14.3 * \sqrt{\frac{H_{\max}}{g}} \quad (6.9)$$

	S	SE	E	NE	N
Vref (m/s)	28.4	20.7	20.7	32.6	32.6
Vh(m/s)	25.844	18.837	18.837	29.666	29.666
t (s)	10800	10800	10800	10800	10800
x(m)	241377	76486	56092	32466	77224
Θ	4099.5	5624.5	5624.5	3571.4	3571.4
ξ	3545.2	2114.6	1550.8	361.89	860.8
v	0.4753	0.4151	0.4151	0.5043	0.5043
Tp (s)	5.5424	4.6261	4.6261	5.9969	5.9969
Hs (m)	2.2106	1.4721	1.4721	2.6396	2.6396
Hmax (m)	4.1118	2.7381	2.7381	4.9096	4.9096

Σχήμα 16: Πίνακας υπολογισμού χαρακτηριστικού ύψους κύματος και ύψους κύματος σχεδιασμού

6.4 Επίδραση πυθμένα στους κυματισμούς

Ο θαλάσσιος πυθμένας επιδρά στους κυματισμούς με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η μορφή και η διεύθυνση μετάδοσης τους. Κυριότερες μορφές επίδρασης είναι η ρήγωση και η διάθλαση. Στη παρούσα μελέτη δεν λήφθηκε υπόψη το φαινόμενο της διάθλασης παρά μόνο το φαινόμενο της ρήγωσης.

Οι σημαντικότερες μεταβολές στη διατομή λόγω ρήγωσης είναι η μείωση του μήκους κύματος, η μεταβολή του ύψους κύματος (αρχικά το ύψος κύματος μειώνεται και στη συνέχεια αυξάνεται) ενώ η περίοδος παραμένει σταθερή. Το κύμα σχεδιασμού και η περίοδος σχεδιασμού που υπολογίσθηκαν πιο πάνω αναφέρονται στη περιοχή των βαθέων υδάτων ($d/L \geq 0.5$) άρα και ταυτίζονται με τα αντίστοιχα μεγέθη στα βαθειά (H_0 , T) ενώ το αντίστοιχο μήκος κύματος L_0 προκύπτει σύμφωνα με τη σχέση 6.10:

$$L_0 = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (6.10)$$

Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών κύματος σε περιοχή με συγκεκριμένο βάθος (d) παρουσιάζεται στη συνέχεια σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$L = \left[\frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} * \tanh \left(\frac{2\pi \cdot d}{L_0} \right)^{0.75} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (6.11)$$

$$C_0 = \frac{L_0}{T} \quad (6.12)$$

$$C = \frac{L}{T} \quad (6.13)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (6.14)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (6.15)$$

$$\eta = 0.5 * \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \quad (6.16)$$

$$k_s = \sqrt{\frac{C_0}{2\eta}} \quad (6.17)$$

όπου:

L το μήκος κύματος στη περιοχή με βάθος d

C_0 η ταχύτητα διάδοσης κύματος στα βαθειά

C η ταχύτητα διάδοσης σε τυχαίο βάθος

k ο αριθμός κύματος

ω η κυκλική συχνότητα κύματος

k_s ο συντελεστής ρήχωσης

Με δεδομένες τις τιμές του βάθους (d) , του ύψους κύματος (H_0) και μήκους κύματος (L_0) στα βαθειά προκύπτουν τα εξής:

- Ύψος κύματος στη θέση μελέτης ($H=k_s*H_0$)
- Μήκος κύματος στη θέση μελέτης (L)

Παρ/ση: Για τον υπολογισμό των πιο πάνω χαρακτηριστικών κύματος έγινε η θεώρηση κύματος απειροστού ύψους (Θεωρία Airy) . Σύμφωνα με αυτή το υγρό στρώμα έχει ένα ομοιόμορφο μέσο βάθος και η ροή του ρευστού είναι αστρόβιλη και ασυμπίεστη .Η θεωρία αυτή ισχύει για όλα σχεδόν τα σχετικά βάθη d/L και αποτελεί τη σημαντικότερη από τις μαθηματικές θεωρίες περιγραφής των θαλάσσιων κυματισμών με ικανοποιητικά συνήθως αποτελέσματα.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι υπολογισμοί που έγιναν για το ύψος κύματος στο συγκεκριμένο βάθος μελέτης λόγω επίδρασης και του πυθμένα στο κυματισμό (Σχήμα 17), για διάφορες περιόδους εντός του φάσματος όπως προέκυψε πιο πάνω.

3																				
4	d(m)	20	d(m)	20	d(m)	20	d(m)	20	d(m)	20	d(m)	20	d(m)	20	d(m)	20	d(m)	20	d(m)	20
5	Hmax (m)	4.9096	Hmax (m)	4.9096	Hmax (m)	4.9096	Hmax (m)	4.9096	Hmax (m)	4.9096	Hmax (m)	4.9096	Hmax (m)	4.9096	Hmax (m)	4.9096	Hmax (m)	4.9096	Hmax (m)	4.9096
6	Tl (s)	7.8526	Tl (s)	8.3066	Tl (s)	8.7606	Tl (s)	9.2146	Tl (s)	9.6686	Tl (s)	10.123	Tl (s)	10.577	Tl (s)	11.031	Tl (s)	11.485	Tl (s)	11.939
7	Lo(m)	96.275	Lo(m)	107.73	Lo(m)	119.83	Lo(m)	132.57	Lo(m)	145.95	Lo(m)	159.98	Lo(m)	174.41	Lo(m)	189.34	Lo(m)	204.77	Lo(m)	220.7
8	L	85.71	L	93.488	L	101.23	L	108.9	L	116.52	L	124.05	L	131.67	L	139.29	L	146.91	L	154.53
9	Co(m/s)	12.26	Co(m/s)	12.969	Co(m/s)	13.678	Co(m/s)	14.387	Co(m/s)	15.096	Co(m/s)	15.804	Co(m/s)	16.513	Co(m/s)	17.221	Co(m/s)	17.93	Co(m/s)	18.638
10	C(m/s)	10.915	C(m/s)	11.255	C(m/s)	11.555	C(m/s)	11.819	C(m/s)	12.051	C(m/s)	12.255	C(m/s)	12.421	C(m/s)	12.555	C(m/s)	12.655	C(m/s)	12.721
11	k(rad/m)	0.0733	k(rad/m)	0.0672	k(rad/m)	0.0621	k(rad/m)	0.0577	k(rad/m)	0.0539	k(rad/m)	0.0506	k(rad/m)	0.0477	k(rad/m)	0.0451	k(rad/m)	0.0427	k(rad/m)	0.0405
12	ω (rad/s)	0.8001	ω (rad/s)	0.7564	ω (rad/s)	0.7172	ω (rad/s)	0.6819	ω (rad/s)	0.6499	ω (rad/s)	0.6207	ω (rad/s)	0.5941	ω (rad/s)	0.5699	ω (rad/s)	0.5477	ω (rad/s)	0.5271
13	n	0.6567	n	0.6836	n	0.7088	n	0.7319	n	0.7529	n	0.7719	n	0.7888	n	0.8036	n	0.8163	n	0.8271
14	Ks	0.9248	Ks	0.918	Ks	0.9138	Ks	0.9119	Ks	0.9121	Ks	0.914	Ks	0.9163	Ks	0.9191	Ks	0.9224	Ks	0.9261
15	H(m)	4.5405	H(m)	4.5072	H(m)	4.4865	H(m)	4.4772	H(m)	4.478	H(m)	4.483	H(m)	4.488	H(m)	4.493	H(m)	4.498	H(m)	4.503
16																				
17																				

Σχήμα 17: Πίνακας υπολογισμού ύψους κύματος λόγω ρήχωσης

6.5 Τύπος Morison

6.5.1 Γενικά

Ο τύπος του Morison αποτελεί μία ημιεμπειρική εξίσωση υπολογισμού των δυνάμεων από τους κυματισμούς πάνω σε μικρές κυλινδρικές κατασκευές. Τη σχέση αυτή εισήγαγαν ο Morison και οι O'Brien, Johnson και Schaaf το 1950. Σύμφωνα με τη θεωρία τους, για τον υπολογισμό της δύναμης που ασκείται σ' ένα σώμα που βρίσκεται σε μη μόνιμη ροή πραγματικού ρευστού ο υπολογισμός της δύναμης ανά μονάδα μήκους κατακόρυφου στοιχείου προκύπτει από το συνδυασμό των αδρανειακών δυνάμεων και των δυνάμεων αντίστασης.

6.5.2 Δυνάμεις Αδράνειας – Δυνάμεις Αντίστασης

Η δύναμη αδράνειας είναι η δύναμη που ασκείται λόγω αντίστασης που προβάλλει η κατασκευή λόγω επιταχυνόμενης ροής, είναι ανάλογη στη μάζα της και δίνεται από τη σχέση 6.18:

$$\mathbf{F}_I = C_M * \rho_w * A * \dot{u} \quad (6.18)$$

όπου:

F_I η δύναμη αδράνειας ανά μονάδα μήκους

C_M ο συντελεστής αδράνειας (Σχήμα 20)

ρ_w η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού (1,027 kg/L)

A το εμβαδόν διατομής της κατασκευής

\dot{u} η επιτάχυνση του πεδίου ροής

Η δύναμη αντίστασης είναι η δύναμη που ασκείται στη κατασκευή λόγω αντίστασης που προβάλλει η επιφάνεια της λόγω ρεύματος υπό σταθερή ταχύτητα και δίνεται από τη σχέση 6.19:

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{2} * C_D * \rho_w * E * u^2 \quad (6.19)$$

όπου:

F_D η δύναμη αντίστασης ανά μονάδα μήκους

C_D ο συντελεστής αντίστασης (Σχήμα 19)

ρ_w η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού (1,027 kg/L)

E η μέγιστη μετωπική επιφάνεια της κατασκευής

u η ταχύτητα του πεδίου ροής

Η ταχύτητα πεδίου ροής για μεμονωμένο στοιχείο δίνεται από τη σχέση 6.20:

$$\mathbf{u}(z, t) = \omega * \frac{H}{2} * \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh(kd)} * \cos(\omega t) \quad (6.20)$$

ενώ η επιτάχυνση πεδίου ροής από τη σχέση 6.21:

$$\dot{u}(z, t) = -\omega^2 * \frac{H}{2} * \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh(kd)} * \sin(\omega t) \quad (6.21)$$

όπου:

$u(z,t)$ η ταχύτητα πεδίου ροής σε τυχαία στάθμη

$\dot{u}(z, t)$ η επιτάχυνση πεδίου ροής σε τυχαία στάθμη

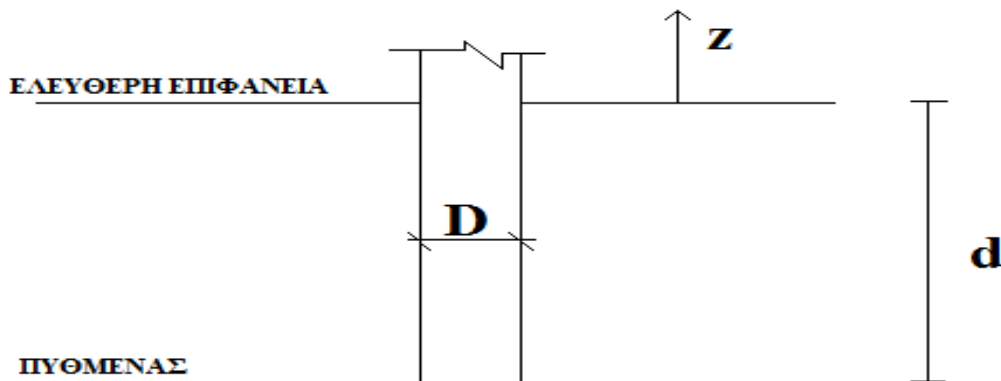
ω η κυκλική συχνότητα κύματος

H το ύψος κύματος σχεδιασμού

k ο αριθμός κύματος

z η τυχαία στάθμη (Σχήμα 18)

d το βάθος του πυθμένα (Σχήμα 18)



Σχήμα 18: Παράμετροι υπολογισμού σχετικής ταχύτητας και επιτάχυνσης

Οι συντελεστές C_D και C_M προκύπτουν πειραματικά όπως φαίνεται στα πιο κάτω διαγράμματα (Σχήμα 19 και 20) και γνωρίζοντας τις παρακάτω παραμέτρους:

$$\mathbf{Re} = \frac{U_{\max}}{\nu} * \mathbf{D} \quad (6.22)$$

$$\mathbf{K} = \frac{U_{\max}}{D} * \mathbf{T} \quad (6.23)$$

όπου:

Re ο αριθμός Reynolds

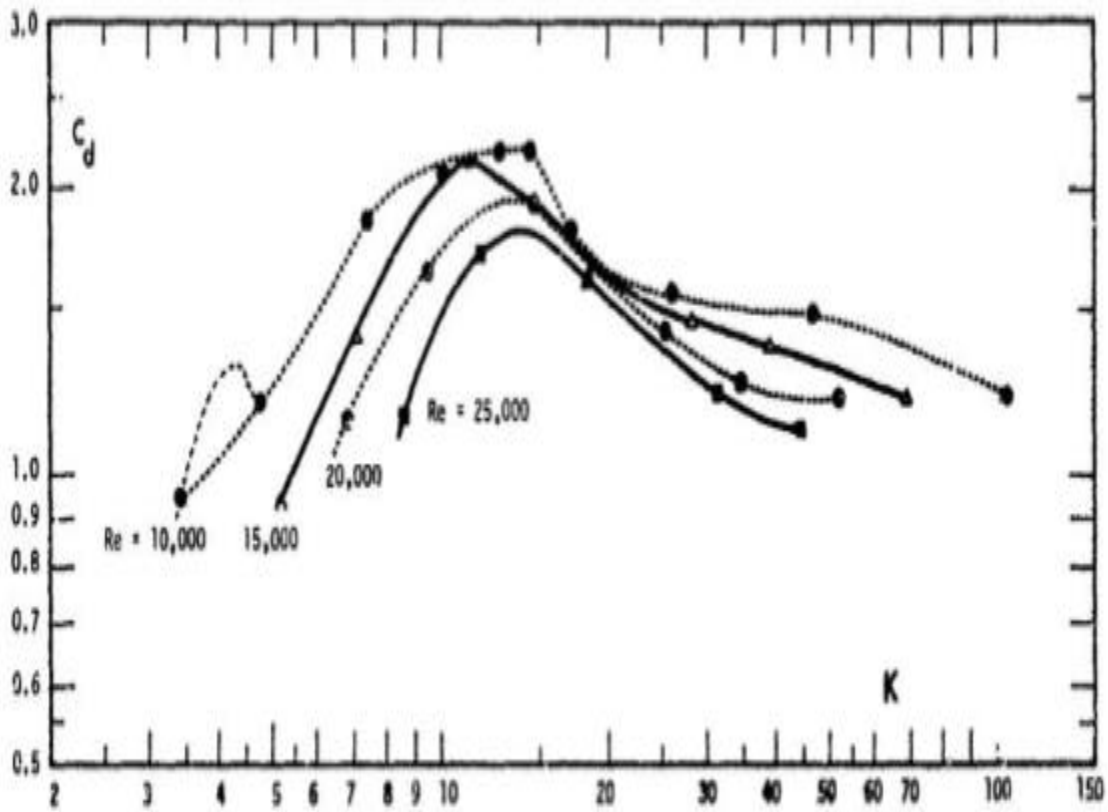
K ο αριθμός Keulegan-Carpenter

U_{\max} η μέγιστη ταχύτητα στη ελεύθερη επιφάνεια

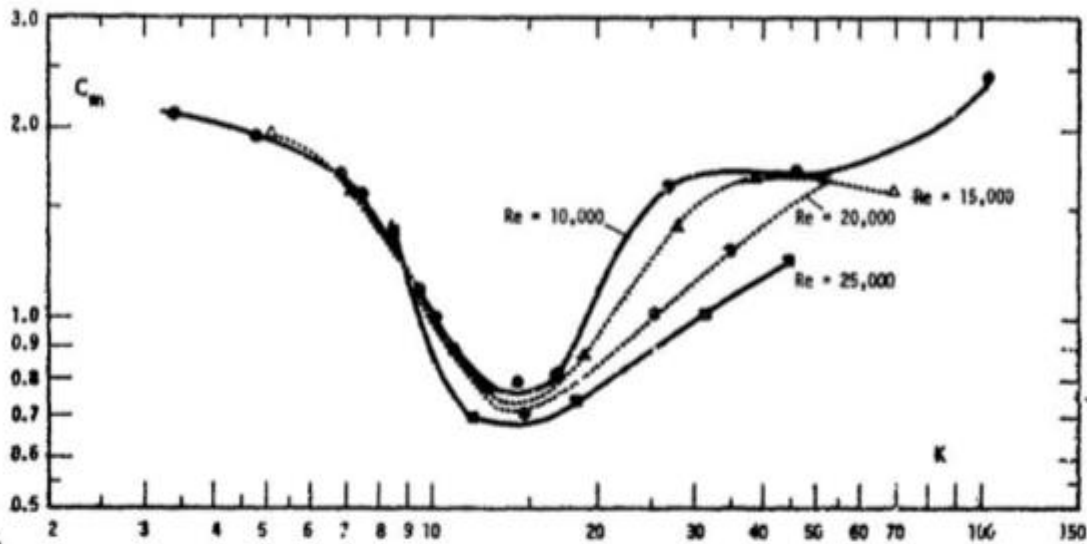
D η διάμετρος του πασσάλου

T η περίοδος του κυματισμού

ν η κινηματική συνεκτικότητα του θαλάσσιου νερού ($\nu=10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)



Σχήμα 19: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή σχήματος C_d



Σχήμα 20: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή σχήματος C_m

Οι δυνάμεις αντίστασης και αδράνειας στο πυθμένα όπως επίσης και οι αντίστοιχες ροπές προκύπτουν με μαθηματική ολοκλήρωση.

Παρ/ση: Η ολοκλήρωση γίνεται από τη στάθμη του πυθμένα μέχρι και τη στιγμιαία στάθμη $\zeta = \frac{H}{2} * \cos \omega t$. Άρα για όλες τις τιμές του όρου ωt και αντίστοιχα του όρου ζ προκύπτουν οι δυνάμεις και οι ροπές στο πυθμένα. Στη παρούσα διπλωματική εργασία ακολουθήθηκε η εν λόγω διαδικασία και προέκυψε ότι η δυσμενέστερη φόρτιση εμφανίζεται για $\omega t = \pi/2$ και αντίστοιχα για $\zeta = 0$.

Έτσι υπολογίζεται:

- Η δύναμη αντίστασης

$$F_D(t) = \int_{z=-d}^{z=\zeta=0} \left[\frac{1}{2} * C_D * \rho_\omega * D * |u(z, t)| * u(z, t) \right] dz \quad (6.24)$$

$$= \frac{1}{2} * C_D * \rho_\omega * D * \frac{H^2}{4} * \omega^2 * \frac{1}{\sinh^2(kd)} * |\cos \omega t| * \cos \omega t * \left[\frac{1}{2k} * \sinh(k(z+d)) * \cosh(k(z+d)) + \frac{1}{2} * (z+d) \right]_{z=-d}^{z=0}$$

- Η ροπή λόγω δύναμης αντίστασης

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_D(t) &= \int_{z=-d}^{z=\zeta=0} (\mathbf{z} + \mathbf{d}) * \left[\frac{1}{2} * \mathbf{C}_D * \rho_\omega * \mathbf{D} * |\mathbf{u}(\mathbf{z}, t)| * \mathbf{u}(\mathbf{z}, t) \right] dz & (6.25) \\
 &= \frac{1}{2} * \mathbf{C}_D * \rho_\omega * \mathbf{D} * \frac{\mathbf{H}^2}{4} * \omega^2 * \frac{1}{\sinh^2(kd)} * |\cos\omega t| * \cos\omega t \\
 &\quad * \left[\frac{\mathbf{z} + \mathbf{d}}{2k} * \sinh(k(\mathbf{z} + \mathbf{d})) * \cosh(k(\mathbf{z} + \mathbf{d})) - \frac{1}{8k^2} \right. \\
 &\quad \left. * \cosh(2k(\mathbf{z} + \mathbf{d})) + \frac{1}{4} * (\mathbf{z} + \mathbf{d})^2 \right]_{z=-d}^{z=0}
 \end{aligned}$$

- Η δύναμη αδράνειας

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_I(t) &= \int_{z=-d}^{z=\zeta=0} \left[\mathbf{C}_M * \rho_\omega * \frac{\pi D^2}{4} * \dot{\mathbf{u}}(\mathbf{z}, t) \right] dz & (6.26) \\
 &= -\mathbf{C}_M * \rho_\omega * \frac{\pi D^2}{4} * \frac{\mathbf{H}}{2} * \omega^2 * \frac{1}{\sinh(kd)} * \sin\omega t * \left[\frac{1}{k} * \sinh(k(\mathbf{z} + \mathbf{d})) \right]_{z=-d}^{z=\frac{\mathbf{H}}{2}}
 \end{aligned}$$

- Ηροπή λόγω δύναμης αδράνειας

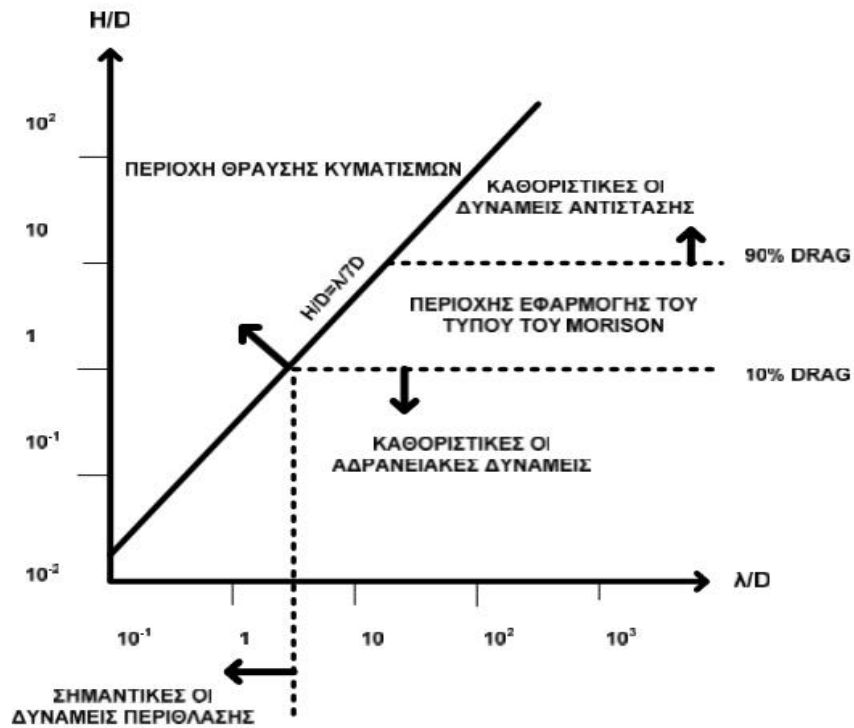
$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_I(t) &= \int_{z=-d}^{z=\zeta=0} (\mathbf{z} + \mathbf{d}) * \left[\mathbf{C}_M * \rho_\omega * \frac{\pi D^2}{4} * \dot{\mathbf{u}}(\mathbf{z}, t) \right] dz & (6.27) \\
 &= -\mathbf{C}_M * \rho_\omega * \frac{\pi D^2}{4} * \frac{\mathbf{H}}{2} * \omega^2 * \frac{1}{\sinh(kd)} * \sin\omega t \\
 &\quad * \left[\frac{1}{k} * (\mathbf{z} + \mathbf{d}) * \sinh(k(\mathbf{z} + \mathbf{d})) - \frac{1}{k^2} * \cosh(k(\mathbf{z} + \mathbf{d})) \right]_{z=-d}^{z=0}
 \end{aligned}$$

Επομένως η συνολική δύναμη κατά Morison προκύπτει $F(t) = F_D(t) + F_I(t)$ και η συνολική ροπή $M(t) = M_D(t) + M_I(t)$

Παρ/ση: Οι συντελεστές ασφαλείας παραμένουν οι ίδιοι όπως και κατά τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών λόγω των αεροδυναμικών φορτίων.

6.5.3 Πεδίο εφαρμογής Τύπου Morison

Στο Σχήμα 21 που ακολουθεί φαίνονται οι περιοχές στις οποίες έχει εφαρμογή ο τύπος Morison:



Σχήμα 21: Διάγραμμα ισχύος δυνάμεων για τις διάφορες περιοχές

Αναλυτικότερα η εφαρμογή του τύπου Morison ισχύει μόνο για τη περίπτωση όπου:

- $1 \leq \frac{H}{D} \leq 10$
- $\frac{\lambda}{D} \geq 5$ (χαρκτηρίζεται η κατασκευή ως "λεπτή")

(Σημείωση: Λεπτή κατασκευή θεωρείται η κατασκευή της οποίας η παρουσία δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τα χαρακτηριστικά του πεδίου)

όπου:

H το ύψος κύματος σχεδιασμού

D η διάμετρος της κατασκευής

λ το μήκος κύματος

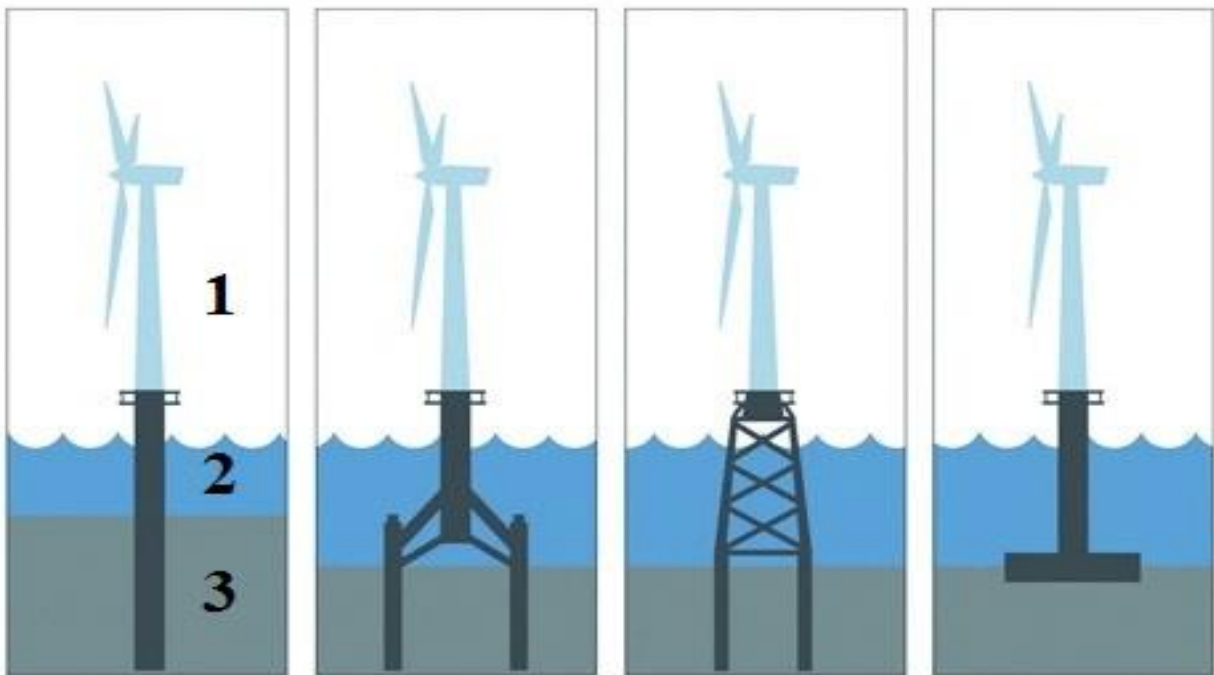
Σε κάθε άλλη περίπτωση τήρησης του δεύτερου κριτηρίου αλλά μη τήρησης του πρώτου κριτηρίου είτε με $1 > \frac{H}{D}$, είτε με $\frac{H}{D} > 10$ καθοριστικές είναι οι δυνάμεις αδράνειας και οι δυνάμεις αντίστασης αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ Α/Γ

7.1 Γενικά

Η συνολική κατασκευή στήριξης του δρομέα της ανεμογεννήτριας (Σχήμα 22) αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Το πυλώνα της ανεμογεννήτριας (1)
- Το φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας (2)
- Τη θεμελίωση του φορέα έδρασης (3)



Σχήμα 22: Συστατικά μέρη θαλάσσιας ανεμογεννήτριας

Οι κυριότεροι φορείς έδρασης στο έδαφος είναι :

- Μεμονωμένος πάσσαλος από σκυρόδεμα ή χάλυβα
- Μεταλλικό Τρίποδο
- Μεταλλικό δικτύωμα (τρίποδο ή τετράποδο)

Τα κυριότερα είδη θεμελιώσεων είναι:

- Μέσω εμπηγνυόμενων μεταλλικών πασσάλων (βαθεία θεμελίωση)
- Μέσω θεμελίων βαρύτητας από σκυρόδεμα (επιφανειακή θεμελίωση)

Στη παρούσα μελέτη θα αναλυθούν και θα διαστασιολογηθούν οι κυριότεροι και πιο διαδεδομένοι φορείς έδρασης υπεράκτιων ανεμογεννητριών και η θεμελίωση τους και είναι:

- Θεμελίωση με έμπηξη χαλύβδινου σωλήνα (Monopile)
- Επιφανειακή θεμελίωση βαρύτητας σωλήνα από σκυρόδεμα
- Θεμελίωση με πασσαλοέμπηξη χαλύβδινου τετράποδου δικτύωματος (Jacket)

Είναι σημαντικό κομμάτι της μελέτης -πέραν της επιλογής του πυλώνα ανεμογεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί και που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας- είναι η κατάλληλη επιλογή του φορέα έδρασης αλλά και του τύπου θεμελίωσης με στόχο τη καλύτερη δυνατή λύση. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη το συνδυασμό κυρίως των παρακάτω παραγόντων:

- Το βάθος της θάλασσας
- Τα χαρακτηριστικά του εδάφους θεμελίωσης
- Το κόστος κατασκευής που αποτελεί και το τελικό κριτήριο επιλογής

Στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας γίνεται εκτενής ανάλυση της διαδικασίας σχεδιασμού των προαναφερθέντων τύπων θεμελίωσης.

7.2 Επιφανειακή θεμελίωση βαρύτητας πυλώνα από σκυρόδεμα

7.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά

- Ο μηχανισμός λειτουργίας της βασίζεται στη μεγάλη μάζα του θεμελίου και στην άμεση μεταφορά φορτίων του πυλώνα και του φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας αλλά και του ιδίου βάρους του στο έδαφος, με σκοπό την αποφυγή της ανατροπής ή ολίσθησης της κατασκευής λόγω των αεροδυναμικών και υδροδυναμικών φορτίων. Θα πρέπει η δυσκαμψία του θεμελίου να είναι μεγάλη έτσι ώστε να προσδίδει σταθερότητα στη κατασκευή.
- Έχει συνήθως κυκλική ή πολυγωνική διατομή και κλειστή οροφή. Προκατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα στη στεριά και στη συνέχεια ρυμουλκείται με τη βοήθεια ειδικού πλωτού εξοπλισμού (εάν το επιτρέπει το βάρος του φορέα) είτε με καθέλκυση στο σημείο εγκατάστασης του. Στη συνέχεια ακολουθείται η διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειας έδρασης του φορέα και τελικά η πόντιση του στη προβλεπόμενη θέση. Τέλος ο φορέας πληρείται συνήθως με αδρανή υλικά κυρίως από άμμο (Σχήμα 23).
- Η μέγιστη αποδεκτή διάμετρος έδρασης του δεν ξεπερνάει τα τριάντα μέτρα (30m) αφού πέραν του ορίου αυτού θεωρείται ως αντιοικονομική λύση ενώ το ίδιο ισχύει για βάθη μεγαλύτερα των είκοσι μέτρων (20m) λόγω απαίτησης ακριβούς εξοπλισμού ρυμούλκησης του.



Σχήμα 23: Επιφανειακή θεμελίωση βαρύτητας

7.2.2 Διαστασιολόγηση - Σχεδιασμός

Για τη διαστασιολόγηση της επιφανειακής θεμελίωσης δηλαδή τον υπολογισμό της διαμέτρου και του ύψους της ακολουθείται η πιο κάτω διαδικασία:

- **Καθορισμός διαστάσεων φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας**

Επιλέγονται οι διαστάσεις του φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας (διάμετρος σωλήνα , πάχος τοιχωμάτων) όπως επίσης η κατηγορία και το ειδικό βάρος του σκυροδέματος από το οποίο είναι κατασκευασμένος. Στη μελέτη επιλέχθηκε :

Διάμετρος φορέα $D=8\text{m}$

Πάχος τοιχωμάτων $t=0.40\text{m}$

Κατηγορία σκυροδέματος C50/60

Ειδικό βάρος σκυροδέματος $\gamma_{\text{σκ}}=24.5\text{kN/m}^3$

- **Υπολογισμός εντατικών μεγεθών λόγω αεροδυναμικών φορτίων στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας**

Η διαδικασία υπολογισμού και τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.2

- **Υπολογισμός τέμνουσας και ροπής λόγω αεροδυναμικών φορτίων -από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας μέχρι τη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας- στο φορέα έδρασης στη στάθμη ελεύθερης επιφάνειας**

Υπολογίζονται με εφαρμογή των σχέσεων που προκύπτουν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.3 τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται πιο κάτω με και χωρίς τους συντελεστές δράσεων (Σχήμα 24):

	F(KN)	31.217
	M(kNm)	87.628
	Fed(KN)	46.826
	Med(kNm)	131.44

Σχήμα 24: Πίνακας υπολογισμού αεροδυναμικών φορτίων από τη δράση του ανέμου στη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας

- **Υπολογισμός τέμνουσας και ροπής στο πυθμένα λόγω υδροδυναμικών φορτίων στο φορέα έδρασης**

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6.5 τα εντατικά μεγέθη λόγω υδροδυναμικών φορτίων συνήθως προκύπτουν σύμφωνα με το τύπο Morison. Παρόλα σύμφωνα με το

κριτήριο που αναφέρεται στο κεφάλαιο 6.5.3 ($H/D < 1$) καθοριστικές είναι οι δυνάμεις αδράνειας οι οποίες ασκούνται στο φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας και αυτές τελικά λαμβάνονται υπόψη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πιο κάτω (Σχήμα 25):

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
20		H(m)	4.54047683		H(m)	4.50720326		H(m)	4.486487841		H(m)	4.477216708		H(m)	4.47797938		H(m)	4.487336436	
21		wt	0.00																
22		D(m)	8.00		D(m)	8.00		D(m)	8.00		D(m)	8.00		D(m)	8.00		D(m)	8.00	
23		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03	
24		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001	
25		Umax(m/s)	2.02		Umax(m/s)	1.95		Umax(m/s)	1.90		Umax(m/s)	1.86		Umax(m/s)	1.84		Umax(m/s)	1.82	
26		Re	16167650.09		Re	15626967.91		Re	15216486.90		Re	14909706.94		Re	14685193.58		Re	14525951.37	
27		Cd	1.10		Cd	1.10		Cd	1.10		Cd	1.10		Cd	1.10		Cd	1.10	
28		Cm	2.00		Cm	2.00		Cm	2.00		Cm	2.00		Cm	2.00		Cm	2.00	
29		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00	
30		ζ (m)	2.27		ζ (m)	2.25		ζ (m)	2.24		ζ (m)	2.24		ζ (m)	2.24		ζ (m)	2.24	
31		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00	
32		Fi(KN)	0.00		Fi(KN)	0.00		Fi(KN)	0.00		Fi(KN)	0.00		Fi(KN)	0.00		Fi(KN)	0.00	
33		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00	
34		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00	
35		Mi(KNm)	0.00		Mi(KNm)	0.00		Mi(KNm)	0.00		Mi(KNm)	0.00		Mi(KNm)	0.00		Mi(KNm)	0.00	
36		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00	
37																			
38		wt	0.52																
39		Ftotal(KN)	-1191.77		Ftotal(KN)	-1141.40		Ftotal(KN)	-1097.22		Ftotal(KN)	-1058.24		Ftotal(KN)	-1023.59		Ftotal(KN)	-992.58	
40		Mtotal(KNm)	-15340.17		Mtotal(KNm)	-14398.04		Mtotal(KNm)	-13611.26		Mtotal(KNm)	-12947.09		Mtotal(KNm)	-12380.05		Mtotal(KNm)	-11890.49	
41																			
42		wt	0.79																
43		Ftotal(KN)	-1654.06		Ftotal(KN)	-1587.28		Ftotal(KN)	-1528.18		Ftotal(KN)	-1475.65		Ftotal(KN)	-1428.67		Ftotal(KN)	-1386.40	
44		Mtotal(KNm)	-20847.30		Mtotal(KNm)	-19615.03		Mtotal(KNm)	-18578.99		Mtotal(KNm)	-17699.22		Mtotal(KNm)	-16944.11		Mtotal(KNm)	-16289.09	
45																			
46		wt	1.05																
47		Ftotal(KN)	-1945.53		Ftotal(KN)	-1871.58		Ftotal(KN)	-1805.35		Ftotal(KN)	-1745.88		Ftotal(KN)	-1692.26		Ftotal(KN)	-1643.68	
48		Mtotal(KNm)	-23870.30		Mtotal(KNm)	-22528.67		Mtotal(KNm)	-21390.46		Mtotal(KNm)	-20416.21		Mtotal(KNm)	-19574.10		Mtotal(KNm)	-18838.97	
49																			
50		wt	1.57																
51		Ftotal(KN)	-2047.35		Ftotal(KN)	-1981.06		Ftotal(KN)	-1919.58		Ftotal(KN)	-1862.86		Ftotal(KN)	-1810.57		Ftotal(KN)	-1762.31	
52		Mtotal(KNm)	-23496.07		Mtotal(KNm)	-22340.19		Mtotal(KNm)	-21334.69		Mtotal(KNm)	-20455.07		Mtotal(KNm)	-19680.05		Mtotal(KNm)	-18991.95	
53		Ftotal(KN)	-3071.03																
54		Mtotal(KNm)	-35244.11																

Σχήμα 25: Πίνακες υπολογισμού υδροδυναμικών φορτίων στον πυθμένα

- Υπολογισμός αξονικής δύναμης λόγω ιδίου βάρους φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας

Η αξονική δύναμη προκύπτει από το ίδιο βάρος του φορέα έδρασης τόσο πάνω όσο και κάτω από τη ελεύθερη επιφάνεια. Επίσης λαμβάνεται υπόψη η αξονική δύναμη λόγω πλήρωσης του φορέα έδρασης στο εσωτερικό με θαλάσσιο νερό με και χωρίς τους συντελεστές δράσεων (Σχήμα 26).

t(m)	0.4
A1(m2)	50.265
A2(m2)	40.715
Atotal(m2)	9.5504
h(m)	20
V(m3)	191.01
γσκ(KN/m3)	14.5
N(KN)	2769.6
γwat(KN/m3)	10
Vwat(KN/m3)	814.3
N(KN)	8143
γσκ(KN/m3)	24.5
h(m)	5
V(m3)	47.752
N(KN)	1169.9
Ntotal(KN)	12083
Ned(KN)	16311

Σχήμα 26: Πίνακας υπολογισμού αξονικής δύναμης του φορέα έδρασης

- Υπολογισμός συνολικών εντατικών μεγεθών στο πυθμένα

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω προκύπτουν η συνολική τέμνουσα και αξονική δύναμη όπως επίσης και η συνολική ροπή στο πυθμένα με και χωρίς τους συντελεστές δράσεων (Σχήμα 27).

F(KN)	2718
M(kNm)	67184
N(KN)	17471
F(KN)	4078
M(kNm)	100671
N(KN)	23585

Σχήμα 27: Πίνακας υπολογισμού εντατικών μεγεθών στον πυθμένα

Παρ/ση: Κατά την επαλληλία των ροπών και δυνάμεων λήφθηκε η απόλυτη τιμή των εντατικών μεγεθών των επιμέρους φορτίσεων

- Έλεγχος επάρκειας διατομής φορέα έδρασης ανεμογεννήτριας σε συνδυασμένη κάμψη και θλίψη

Ο έλεγχος γίνεται στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης (για το φορέα έδρασης του παραδείγματος εφαρμογής η διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης παρουσιάζεται στον πυθμένα) με τη χρήση διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης για δακτυλιοειδή διατομή σκυροδέματος (Σχήμα 28). Αρχικά υπολογίζονται οι εξής παράμετροι:

$$\mu = \frac{M_{ed}}{0.38 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot f_{cd}} \quad (7.1)$$

$$\nu = -\frac{N_{ed}}{0.19 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot f_{cd}} \quad (7.2)$$

όπου:

μ η ανοιγμένη ροπή

ν η ανοιγμένη αξονική

M_{ed} η δρώσα ροπή στη διατομή μέγιστης καταπόνησης

N_{ed} η δρώσα αξονική στη διατομή μέγιστης καταπόνησης

r η ακτίνα της πλήρους διατομής

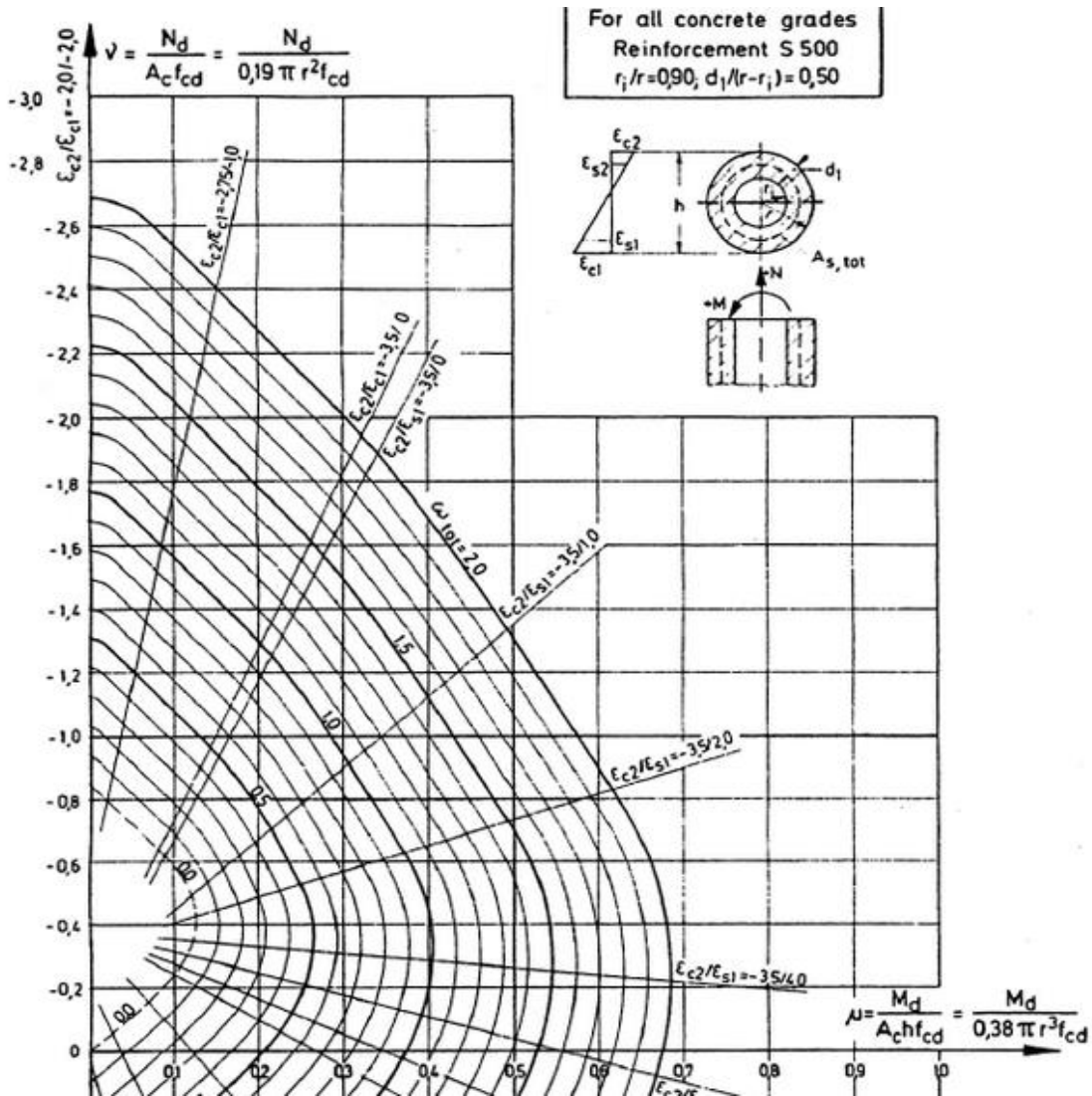
f_{cd} η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Για τις τιμές των όρων d_1/r , $d_1/(r-r_1)$ και κατηγορίας χάλυβα (για κατανόηση των όρων βλ. διατομή στο Σχήμα 28) επιλέγεται το αντίστοιχο διάγραμμα αλληλεπίδρασης και υπολογίζεται ο όρος ω . Στη συνέχεια υπολογίζεται ο απαιτούμενος οπλισμός AS_{total} :

$$AS_{total} = \omega * \frac{0.19 \cdot \pi \cdot r^2}{\frac{f_{yd}}{f_{cd}}} \quad (7.3)$$

όπου:

f_{yd} η τάση διαρροής χάλυβα



Σχήμα 28: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης δακτυλιοειδούς διατομής

Παρ/ση: Στο παράδειγμα εφαρμογής δεν απαιτείται οπλισμός οπότε επαρκεί η διατομή και τοποθετείται ο ελάχιστος οπλισμός.

Ο ελάχιστος οπλισμός δίνεται από τη σχέση $A_{s_{min}} = \min(0.02A_c, 0.10 * N_{ed} / f_{yd})$ όπου:

$$A_c = \pi * r^2 * \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2}\right) \quad (7.4)$$

F(KN)	2718	
M(kNm)	78056	
N(KN)	35683	

Σχήμα 30: Πίνακας υπολογισμού εντατικών μεγεθών στη βάση θεμελίωσης

- **Έλεγχος ανάλυσης ευστάθειας**

Για να βεβαιωθούμε ότι η κατασκευή δεν ανατρέπεται, η εκκεντρότητα του φορτίου θα πρέπει να είναι μέσα στην περίμετρο του πέδιλου:

$$e = \frac{M}{V} \leq \frac{D}{3} \quad (7.5)$$

όπου :

e η εκκεντρότητα

M η ροπή στη βάση του πέδιλου χωρίς τους συντελεστές δράσεων

V η κατακόρυφη δύναμη στη βάση του πέδιλου χωρίς τους συντελεστές δράσεων

D η διάμετρος του πέδιλου

- **Έλεγχος φέρουσας ικανότητας πέδιλου**

Πρόκειται για τον πιο σημαντικό από τους ελέγχους που γίνονται κατά το σχεδιασμό της επιφανειακής θεμελίωσης αφού ελέγχει κατά πόσο το φορτίο μπορεί να προκαλέσει τη διατμητική αστοχία του εδάφους. Για τον υπολογισμό του φορτίου θραύσης του εδάφους και αφού η παρουσία ροπής καθώς επίσης οριζόντιας και κατακόρυφης δύναμης σε πέδιλο παραπέμπουν σε έκκεντρη και λοξή φόρτιση ,γίνεται χρήση της μεθόδου κατά DIN4017, φύλλο 2. Πρόκειται για μία μεθοδολογία υπολογισμού φορτίου σε ορθογωνικό πέδιλο . Επιπλέον βασική παραδοχή της είναι ότι το έδαφος έδρασης του πέδιλου θεωρείται ομοιογενές.

Στη συνέχεια και προτού παρουσιασθεί η μέθοδος κατά DIN4017 αναλύεται η διαδικασία με την οποία το κυκλικό θεμέλιο μπορεί να εκφρασθεί σαν ορθογωνικό σύμφωνα με το American Petroleum Institute 1987(Σχήμα 31):

$$e_2 = \frac{M}{V} \quad (7.6)$$

όπου :

e_2 η εκκεντρότητα

M η ροπή στη βάση του πέδιλου

V η κατακόρυφη δύναμη στη βάση του πέδιλου

$$A' = \pi R^2 - 2 * \left(-R^2 \arccos \left(\frac{e_2}{R} \right) + e_2 * \sqrt{R^2 - e_2^2} \right) \quad (7.7)$$

όπου:

A' το μειωμένο εμβαδόν του κυκλικού πέδιλου

R η ακτίνα του κυκλικού πέδιλου

$$L' = \sqrt{A' * \sqrt{\frac{R+e_2}{R-e_2}}} \quad (7.8)$$

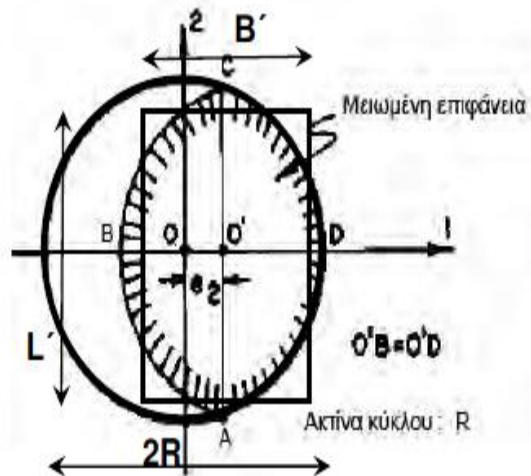
όπου:

L' το ισοδύναμο μήκος του ορθογωνικού πέδιλου

$$B' = \frac{A'}{L'} \quad (7.9)$$

όπου:

B' το ισοδύναμο πλάτος του ορθογωνικού πέδιλου



Σχήμα 31: Προσομοίωση κυκλικού θεμελίου σε ορθογωνικό θεμέλιο

Για να πληρείται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του θεμελίου θα πρέπει :

$$2 * V_b \leq V_{b_{max}} \quad (7.10)$$

όπου:

V_b το κατακόρυφο φορτίο χωρίς τους συντελεστές δράσεων

$V_{b_{max}}$ το οριακό φορτίο διατμητικής αστοχίας του εδάφους

το οποίο υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο DIN4017 ως εξής:

$$V_{b_{max}} = A_{εν} * (c * N_c * k_{c*} v_{c'} + \gamma_1 * d * N_q * k_d * v_d' + \gamma_2 * b' * N_\gamma * k_{b*} v_b') \quad (7.11)$$

όπου:

- $A_{εν}$ η ενεργός επιφάνεια επί της οποίας εφαρμόζεται η μέση ομοιόμορφη κατακόρυφη τάση εδράσεως :

$$A_{εν} = \alpha' * b' \quad (7.12)$$

όπου:

α' η μεγαλύτερη ενεργός πλευρά του ορθογωνικού πέλδλου

b' η μικρότερη ενεργός πλευρά του ορθογωνικού πέδιλου

με:

$$\alpha' = L' - 2 * e_a \quad (7.13)$$

$$b' = B' - 2 * e_b \quad (7.14)$$

όπου:

α η μεγαλύτερη πλευρά του ορθογωνικού πέδιλου

b η μικρότερη πλευρά του ορθογωνικού πέδιλου

e_a η εκκεντρότητα της συνισταμένης κατά τη διεύθυνση της πλευρά α (βλ. σχέση 7.6)

e_b η εκκεντρότητα της συνισταμένης κατά τη διεύθυνση της πλευρά b (βλ. σχέση 7.6)

- c η συνοχή του εδάφους κάτω από την επιφάνεια έδρασης

Στη παρούσα μελέτη εξετάζονται δύο εδαφικές στρώσεις με διαφορετική συνοχή η καθεμία από αυτές όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.

- N_c,N_q,N_γ οι συντελεστές φέρουσας ικανότητας εξαρτώμενοι από τη γωνία εσωτερικής τριβής φ (βλ. κεφάλαιο 3.2) του εδάφους κάτω από την επιφάνεια έδρασης του πέδιλου και υπολογίζονται από τους πιο κάτω πίνακες (Σχήμα 32).

φ	N _c	N _q	N _γ
0	5.142	1.000	0.000
1	5.379	1.094	0.003
2	5.632	1.197	0.014
3	5.900	1.309	0.032
4	6.185	1.433	0.060
5	6.489	1.568	0.099
6	6.813	1.716	0.151
7	7.158	1.879	0.216
8	7.527	2.058	0.297
9	7.922	2.255	0.397
10	8.345	2.471	0.519
11	8.798	2.710	0.665
12	9.285	2.974	0.839
13	9.807	3.264	1.045
14	10.370	3.586	1.289
15	10.977	3.941	1.576
16	11.631	4.335	1.913
17	12.338	4.772	2.307
18	13.104	5.258	2.767
19	13.934	5.798	3.304
20	14.835	6.399	3.930

φ	N _c	N _q	N _γ
20	14.835	6.399	3.930
21	15.815	7.071	4.661
22	16.833	7.821	5.512
23	18.049	8.661	6.504
24	19.324	9.603	7.661
25	20.721	10.662	9.011
26	22.254	11.854	10.558
27	23.942	13.199	12.432
28	25.803	14.720	14.590
29	27.860	16.443	17.121
30	30.140	18.401	20.093
31	32.671	20.631	23.591
32	35.490	23.177	27.715
33	38.638	26.092	32.590
34	42.164	29.440	38.366
35	46.124	33.296	45.228
36	50.586	37.753	53.404
37	55.630	42.920	63.178
38	61.352	48.933	74.899
39	67.867	55.957	89.007
40	75.313	64.195	106.054

Σχήμα 32: Πίνακες υπολογισμού συντελεστών φέρουσας ικανότητας N_c,N_q,N_γ

- v_c', v_d', v_b' οι συντελεστές εξαρτώμενοι κυρίως από τη μορφή του θεμελίου

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$v_c' = \frac{v_d * N_d - 1}{N_d - 1} \quad (7.15)$$

$$v_d' = 1 + \frac{B'}{L'} * \sin\varphi \quad (7.16)$$

$$v_b' = 1 - 0.3 * \frac{B'}{L'} \quad (7.17)$$

- $\kappa_c, \kappa_d, \kappa_b$ οι συντελεστές εξαρτώμενοι από τη γωνία κλίσεως δ_s της συνισταμένης δύναμης ως προς την κατακόρυφο υπολογιζόμενοι αναλόγως της φύσης του εδάφους

Για οριζόντιο φορτίο παράλληλο προς τη μικρότερη πλευρά και για εδάφη με συνοχή και γωνία τριβής όπως στη περίπτωση της μελέτης ισχύουν οι σχέσεις:

$$\kappa_d = \left(1 - 0.7 * \frac{H_b}{V_b + A_{ev} * c * \sigma\varphi\varphi} \right)^3 \quad (7.18)$$

όπου:

A_{ev} η ενεργός επιφάνεια

c η συνοχή του εδάφους

φ η εσωτερική τριβή εδάφους

H_b η οριζόντια δύναμη θραύσης που ασκείται στη βάση του θεμελίου

V_b η κατακόρυφη δύναμη θραύσης που ασκείται στη βάση του θεμελίου

με:

$$H_b = n * H \quad (7.19)$$

$$V_b = n * V \quad (7.20)$$

όπου:

H η οριζόντια δρώσα δύναμη που ασκείται στη βάση του θεμελίου χωρίς τους συντελεστές δράσεων

V η κατακόρυφη δρώσα δύναμη που ασκείται στη βάση του θεμελίου χωρίς τους συντελεστές δράσεων

n ο καταρχήν άγνωστος αλλά προσδιορίσιμος συντελεστής ασφαλείας έναντι θραύσεως

$$\kappa_b = \left(1 - 0.7 * \frac{H_b}{V_b + A_{εν} * C * σφφ} \right)^3 \quad (7.21)$$

$$\kappa_c = \kappa_d - \frac{1 - \kappa_d}{N_d - 1} \quad (7.22)$$

- d το βάθος θεμελίωσης

Θεωρείται ότι το θεμέλιο βρίσκεται ολόκληρο εντός του εδαφικού σχηματισμού γι' αυτό και το ύψος του ταυτίζεται με το βάθος θεμελίωσης

- γ_1 και γ_2 τα φαινόμενα ειδικά βάρη πάνω και κάτω από την επιφάνεια έδρασης του εδάφους αντίστοιχα
- b' η μικρότερη ενεργός πλευρά του ορθογωνικού πέδιλου

Παρ/ση: Στο συντελεστή ασφαλείας έναντι θραύσης (sf) τίθεται αρχικά μια τιμή η οποία στο τέλος της διαδικασίας ελέγχεται εάν είναι μικρότερη από την τιμή του τελικού συντελεστή ασφαλείας (SF) ώστε να θεωρείται ο αρχικός προσδιορισμός του σωστός.

Πιο κάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής των παραπάνω σχέσεων (Σχήμα 33).

Φέρουσα ικανότητα αμμώδους εδάφους		Φέρουσα ικανότητα αργιλικού εδάφους	
c (Kpa)	2	c (Kpa)	10
φ	28	φ	22
φ(rad)	0.48869	φ(rad)	0.38397
d(m)	4	d(m)	4
Nc	26	Nc	17
Nd	14.8	Nd	7.7
Nb	7.6	Nb	2.75
vc	1.3777	vc	1.32296
vd	1.35218	vd	1.28102
vb	0.77495	vb	0.77495
Kc	0.79653	Kc	0.79063
Kd	0.81028	Kd	0.81782
Kb	0.73694	Kb	0.74706
γ1(KN/m3)	7	γ1(KN/m3)	7
γ2(KN/m3)	7	γ2(KN/m3)	7
sf	1.25	SF	1.25
Hb(KN)	5096.35	Hb(KN)	5096.35
Vb(KN)	52258.3	Vb(KN)	52258.3
Vbf(KN)	79914.7	Vbf(KN)	53422.2
SFNEW	1.91153	SFNEW	1.27784

Σχήμα 33: Πίνακες υπολογισμού φέρουσας ικανότητας των εδαφικών σχηματισμών σε κατακόρυφο φορτίο

- Έλεγχος σε ολίσθηση του πέδιλου

Ο έλεγχος αυτός είναι απαραίτητος σε θεμέλια που υπόκεινται σε οριζόντια φόρτιση και γίνεται για το λόγο ότι η δύναμη τριβής μεταξύ πέδιλου και εδαφικού σχηματισμού ενδέχεται να μην είναι ικανή να προσδώσει σταθερότητα στη κατασκευή. Οπότε θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{A' * c + V * \tan \varphi}{H} \geq 1 \quad (7.23)$$

όπου:

A' το μειωμένο εμβαδόν του κυκλικού πέδιλου

c η συνοχή του εδάφους

φ η εσωτερική τριβή εδάφους

H η οριζόντια δρώσα δύναμη που ασκείται στη βάση του θεμελίου χωρίς τους συντελεστές δράσεων

V η κατακόρυφη δρώσα δύναμη που ασκείται στη βάση του θεμελίου χωρίς τους συντελεστές δράσεων

Σημείωση: Προτού τοποθετηθεί το θεμέλιο στη προβλεπόμενη θέση απαιτείται η προετοιμασία του πυθμένα μέσω εκσκαφής και τοποθέτησης στρώσης λιθορριπής. Έτσι ο έλεγχος ολίσθησης γίνεται μεταξύ πέδιλου και της στρώσης λιθορριπής (c,φ λιθορριπής). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμογής θεωρήθηκε ότι το πάχος στρώσης λιθορριπής είναι πολύ μικρό γι' αυτό και κατά τον έλεγχο ολίσθησης λαμβάνονται τα χαρακτηριστικά του φυσικού εδάφους

Τα αποτελέσματα του ελέγχου δίνονται πιο κάτω (Σχήμα 34):

Έλεγχος ολίσθησης αμμώδους εδάφους		Έλεγχος ολίσθησης αργίλικού εδάφους	
c (Kpa)	2	c (Kpa)	10
φ	28	φ	22
φ(rad)	0.488692	φ(rad)	0.38397
A'	203.7113	A'	203.711
H(KN)	2718	H(KN)	2718
V(KN)	35683	V(KN)	35683
Έλεγχος	7.130394	Έλεγχος	6.05371

Σχήμα 34: Πίνακες υπολογισμού συντελεστή ασφαλείας της κατασκευής σε ολίσθηση

Παρ/ση: Η επιλογή της διαμέτρου αλλά και του ύψους θεμελίωσης γίνεται με δοκιμές και εφόσον στη συνέχεια τηρούνται οι ανωτέρω έλεγχοι επιλέγονται οι βέλτιστες τιμές τους. Στο παράδειγμα εφαρμογής ακολουθείται η προαναφερθείσα διαδικασία χωρίς όμως την επιλογή των βέλτιστων διαστάσεων.

7.2.3 Λόγοι επιμέρους φορτίσεων προς τη συνολική φόρτιση στη βάση της κατασκευής

Ο λόγος της οριζόντιας δύναμης που ασκείται στη κατασκευή λόγω ανέμου προς τη συνολική δύναμη στη βάση της κατασκευής προκύπτει:

$$\frac{\Sigma H_{\alpha\epsilon\rho}}{\Sigma H_{\kappa\alpha\tau}} = 0.25$$

Ο λόγος της οριζόντιας δύναμης που ασκείται στη κατασκευή λόγω θαλάσσιων κυματισμών προς τη συνολική δύναμη στη βάση της κατασκευής προκύπτει:

$$\frac{\Sigma H_{\upsilon\delta\rho}}{\Sigma H_{\kappa\alpha\tau}} = 0.75$$

Ο λόγος της ροπής που ασκείται στη κατασκευή λόγω ανέμου προς τη συνολική ροπή στη βάση της κατασκευής προκύπτει:

$$\frac{\Sigma M_{\alpha\epsilon\rho}}{\Sigma M_{\kappa\alpha\tau}} = 0.65$$

Ο λόγος της ροπής που ασκείται στη κατασκευή λόγω θαλάσσιων κυματισμών προς τη συνολική ροπή στη βάση της κατασκευής προκύπτει:

$$\frac{\Sigma M_{\upsilon\delta\rho}}{\Sigma M_{\kappa\alpha\tau}} = 0.35$$

Ο λόγος της συνολικής οριζόντιας δύναμης που ασκείται στην κατασκευή προς τη συνολική κατακόρυφη δύναμη στην κατασκευή προκύπτει:

$$\frac{\Sigma H}{\Sigma V} = 0.17$$

7.3 Θεμελίωση με έμπηξη μεταλλικού σωλήνα (Monopile)

7.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά

- Πρόκειται για προκατασκευασμένο χαλύβδινο κυλινδρικό σωλήνα που μεταφέρεται στο χώρο εναπόθεσης του με τη βοήθεια φορηγίδων. Αποτελεί ταυτόχρονα και τη θεμελίωση αλλά και το φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας (Σχήμα 35). Έχει μεγάλη σχετικά διάμετρο που φτάνει μέχρι και τα 5-6m (με αποτέλεσμα να ασκούνται μεγάλα υδροδυναμικά φορτία σε αυτό) , πάχος τοιχωμάτων μέχρι 150mm ενώ ενδείκνυται για βάθη μέχρι και 30m αφού πέραν του ορίου αυτού το κόστος κατασκευής αυξάνεται σημαντικά.
- Εμπηγνύεται στο έδαφος με δόνηση ή με τη βοήθεια υδραυλικού σφυριού σε βάθος συνήθως αντίστοιχο με το βάθος του πυθμένα.
- Για τη θεμελίωση του πασσάλου στο έδαφος δεν απαιτείται προετοιμασία του πυθμένα της θάλασσας .Παρόλα αυτά όμως είναι απαγορευτική η επιλογή του τύπου αυτού για σκληρά εδάφη αφού η απαίτηση διάτρησης με ειδικά μηχανήματα καθιστά τη λύση ως αντισυμβατική.
- Ο μηχανισμός λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου θεμελίωσης βασίζεται στη δυνατότητα μεταφοράς των φορτίων ανωδομής στο περιβάλλον έδαφος μέσω της βάσης έδρασης (αντίσταση αιχμής) των πασσάλων όπως επίσης και μέσω της πλευρικής τριβής που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους. Κατά τη οριζόντια φόρτιση ενεργοποιούνται τόσο η αντοχή του πασσάλου μέσω κάμψης και πλευρικής μετατόπισης όσο και η αντοχή του εδάφους που περιβάλλει τον πάσσαλο μέσω ενεργοποίησης των παθητικών ωθήσεων.



Σχήμα 35: Θεμελίωση με έμπηξη μονού πυλώνα

7.3.2 Διαστασιολόγηση - Σχεδιασμός

Για τη διαστασιολόγηση της θεμελίωσης του μεταλλικού πασσάλου δηλαδή τον υπολογισμό της διαμέτρου και του βάθους έμπηξης του ακολουθείται η πιο κάτω διαδικασία:

- **Καθορισμός διαστάσεων φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας**

Προεκτιμούνται οι διαστάσεις του μονού πυλώνα (διάμετρος σωλήνα , πάχος τοιχωμάτων) που όπως προαναφέρθηκε αποτελεί και τη θεμελίωση και το φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας. Επίσης επιλέγεται η κατηγορία και το ειδικό βάρος του χάλυβα που χρησιμοποιείται κατά τη κατασκευή του . Στη μελέτη επιλέχθηκε :

Διάμετρος φορέα $D=6\text{m}$

Πάχος τοιχωμάτων $t=0.150\text{m}$

Κατηγορία χάλυβα :S235

Ειδικό βάρος χάλυβα $\gamma_{\text{χαλ}}=78.5\text{kN/m}^3$

- **Υπολογισμός εντατικών μεγεθών λόγω αεροδυναμικών φορτίων στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας**

Η διαδικασία υπολογισμού και τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.2 .

- **Υπολογισμός τέμνουσας και ροπής λόγω αεροδυναμικών φορτίων -από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας μέχρι τη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας- στο φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας στη στάθμη ελεύθερης επιφάνειας.**

Υπολογίζονται με εφαρμογή των σχέσεων που προκύπτουν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.3 τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται πιο κάτω (Σχήμα 36):

F(KN)	23.413
M(kNm)	65.721
Fed(KN)	35.119
Med(kNm)	98.581

Σχήμα 36: Πίνακας υπολογισμού αεροδυναμικών φορτίων από τη δράση του ανέμου στη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας

- **Υπολογισμός τέμνουσας και ροπής στο πυθμένα λόγω υδροδυναμικών φορτίων στο φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας**

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6.5 τα εντατικά μεγέθη λόγω υδροδυναμικών φορτίων συνήθως προκύπτουν σύμφωνα με το τύπο Morison. Παρόλα σύμφωνα με το κριτήριο που αναφέρεται στο κεφάλαιο 6.5.3 ($H/D < 1$) καθοριστικές είναι οι δυνάμεις αδράνειας οι οποίες ασκούνται στο φορέα έδρασης (monopile) και αυτές τελικά λαμβάνονται υπόψη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πιο κάτω (Σχήμα 37):

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
	H(m)	4.54047683		H(m)	4.50720326		H(m)	4.486487841		H(m)	4.477216708		H(m)	4.47797938		H(m)	4.48733644	
	wt	0.00																
	D(m)	6.00		D(m)	6.00		D(m)	6.00		D(m)	6.00		D(m)	6.00		D(m)	6.00	
	ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03	
	v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001	
	Umax(m/s)	2.02		Umax(m/s)	1.95		Umax(m/s)	1.90		Umax(m/s)	1.86		Umax(m/s)	1.84		Umax(m/s)	1.82	
	Re	12125737.57		Re	11720225.93		Re	11412365.17		Re	11182280.21		Re	11013895.19		Re	10894463.53	
	Cd	1.10		Cd	1.10		Cd	1.10		Cd	1.10		Cd	1.10		Cd	1.10	
	Cm	2.00		Cm	2.00		Cm	2.00		Cm	2.00		Cm	2.00		Cm	2.00	
	Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00	
	ζ (m)	2.27		ζ (m)	2.25		ζ (m)	2.24		ζ (m)	2.24		ζ (m)	2.24		ζ (m)	2.24	
	Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00	
	Fi(KN)	0.00		Fi(KN)	0.00		Fi(KN)	0.00		Fi(KN)	0.00		Fi(KN)	0.00		Fi(KN)	0.00	
	Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00	
	Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00	
	Mi(KNm)	0.00		Mi(KNm)	0.00		Mi(KNm)	0.00		Mi(KNm)	0.00		Mi(KNm)	0.00		Mi(KNm)	0.00	
	Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00	
	wt	0.52																
	Ftotal(KN)	-670.37		Ftotal(KN)	-642.04		Ftotal(KN)	-617.19		Ftotal(KN)	-595.26		Ftotal(KN)	-575.77		Ftotal(KN)	-558.32	
	Mtotal(KNm)	-8628.85		Mtotal(KNm)	-8098.90		Mtotal(KNm)	-7656.33		Mtotal(KNm)	-7282.74		Mtotal(KNm)	-6963.78		Mtotal(KNm)	-6688.40	
	wt	0.79																
	Ftotal(KN)	-930.41		Ftotal(KN)	-892.84		Ftotal(KN)	-859.60		Ftotal(KN)	-830.05		Ftotal(KN)	-803.63		Ftotal(KN)	-779.85	
	Mtotal(KNm)	-11726.61		Mtotal(KNm)	-11033.45		Mtotal(KNm)	-10450.68		Mtotal(KNm)	-9955.81		Mtotal(KNm)	-9531.06		Mtotal(KNm)	-9162.61	
	wt	1.05																
	Ftotal(KN)	-1094.36		Ftotal(KN)	-1052.77		Ftotal(KN)	-1015.51		Ftotal(KN)	-982.06		Ftotal(KN)	-951.90		Ftotal(KN)	-924.57	
	Mtotal(KNm)	-13427.04		Mtotal(KNm)	-12672.38		Mtotal(KNm)	-12032.13		Mtotal(KNm)	-11484.12		Mtotal(KNm)	-11010.43		Mtotal(KNm)	-10596.92	
	wt	1.57																
	Ftotal(KN)	-1151.64		Ftotal(KN)	-1114.35		Ftotal(KN)	-1079.77		Ftotal(KN)	-1047.86		Ftotal(KN)	-1018.44		Ftotal(KN)	-991.30	
	Mtotal(KNm)	-13216.54		Mtotal(KNm)	-12566.36		Mtotal(KNm)	-12000.76		Mtotal(KNm)	-11505.97		Mtotal(KNm)	-11070.03		Mtotal(KNm)	-10682.97	
	Ftotal(KN)	-1727.46																
	Mtotal(KNm)	-19824.81																

Σχήμα 37: Πίνακες υπολογισμού υδροδυναμικών φορτίων στον πυθμένα

- **Υπολογισμός αξονικής δύναμης λόγω ιδίου βάρους φορέα έδρασης**

Η αξονική δύναμη που ασκείται στον πυθμένα προκύπτει από το ίδιο βάρος του φορέα έδρασης τόσο πάνω όσο και κάτω από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας.

t	0.15
A1	28.27
A2	25.52
Atotal	2.76
h	20.00
V	55.13
γ γαλ(KN/m3)	68.50
Ned	3776.74
γ γαλ(KN/m3)	78.50
h	5.00
V	13.78
Ned	1082.02
Ned	6559.34

Σχήμα 38: Πίνακας υπολογισμού αξονικής δύναμης του φορέα έδρασης

- **Υπολογισμός συνολικών εντατικών μεγεθών στο πυθμένα**

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω προκύπτουν η συνολική τέμνουσα και αξονική δύναμη όπως επίσης και η συνολική ροπή στο πυθμένα με και χωρίς τους συντελεστές δράσεων (Σχήμα 39).

F(KN)	2390
M(kNm)	40722
N(KN)	11947
F(KN)	2722
M(kNm)	84985
N(KN)	13833

Σχήμα 39: Πίνακας υπολογισμού εντατικών μεγεθών στον πυθμένα

Παρ/ση: Κατά την επαλληλία των ροπών και δυνάμεων λήφθηκε η απόλυτη τιμή των εντατικών μεγεθών των επιμέρους φορτίσεων

- Έλεγχος φέρουσας ικανότητας πασσάλου σε κατακόρυφη φόρτιση

Ο υπολογισμός του οριακού φορτίου (φορτίου θραύσης) ενός μεμονωμένου κατακόρυφου πασσάλου υπό αξονική θλιπτική κατακόρυφη δύναμη πέραν του οποίου το έδαφος θεμελίωσης οδηγείται στην αστοχία, αναλαμβάνεται είτε από την αντοχή αιχμής του πασσάλου είτε από την παράπλευρη επιφάνεια του. Έτσι για αποφυγή της αστοχίας του εδάφους θα πρέπει να ισχύει η σχέση 7.24:

$$P_u = Q_s + Q_b = (\sum f_s) * A_s + f_b * A_b \geq 2 * N_{ed} \quad (7.24)$$

όπου :

Q_s το φορτίο που αναλαμβάνεται από την παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου

Q_b το φορτίο που αναλαμβάνεται από την επιφάνεια αιχμής του πασσάλου

f_s η αντοχή αιχμής πασσάλου ανά μονάδα επιφάνειας

A_s η παράπλευρος επιφάνεια του πασσάλου

f_b η αντοχή παράπλευρης επιφάνειας πασσάλου ανά μονάδα επιφάνειας (τριβή)

A_b η επιφάνεια αιχμής του πασσάλου

N_{ed} το φορτίο που ασκείται στον πάσσαλο συμπεριλαμβανομένου και του ίδιου βάρους αυτού για το αντίστοιχο βάθος έμπτυξης χωρίς τους συντελεστές δράσεων

Το φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας που αναλαμβάνεται από την επιφάνεια αιχμής του εμπηγνυόμενου πασσάλου υπολογίζεται σύμφωνα με τη Μέθοδο Meyerhof της οποίας οι κύριες παραδοχές είναι :

- Η επιφάνεια μηχανισμού ολίσθησης δεν σταματά στο επίπεδο βάσης του θεμελίου αλλά επεκτείνεται και άνωθεν
- Λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά της διατμητικής αντοχής του εδάφους και άνωθεν του επιπέδου της βάσης.

και προκύπτει από τη σχέση 7.25 ως εξής:

$$f_b = c * N_c + k_s * \gamma_1 * L * N_q + \gamma_2 * \frac{1}{2} D * N_\gamma \quad (7.25)$$

όπου :

c η συνοχή του εδάφους

k_s ο συντελεστής ωθήσεων γαιών επί της παραπλεύρου επιφάνειας του πασσάλου εντός της περιοχής του μηχανισμού θραύσεως

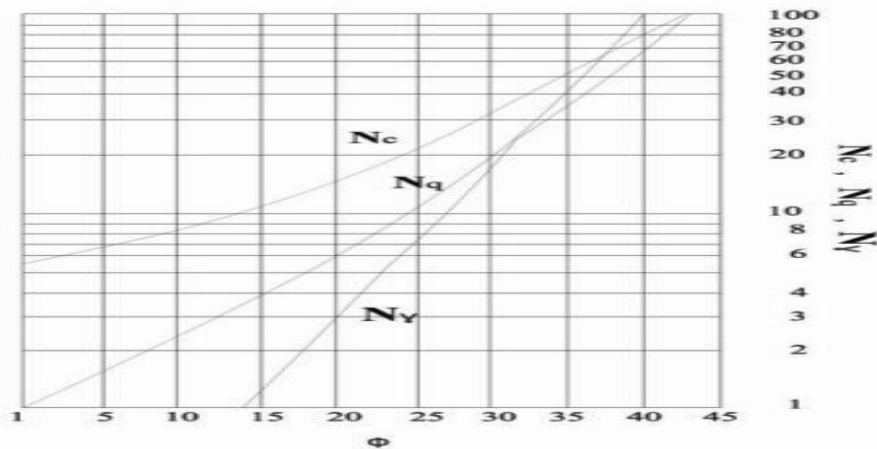
γ_1 το υπό άνωση ειδικό βάρος άνωθεν του επιπέδου της βάσης

γ_2 το υπό άνωση ειδικό βάρος κάτω από το επίπεδο της βάσης

L το βάθος έμπηξης του πασσάλου

D η διάμετρος του πασσάλου έμπηξης

N_γ, N_c, N_q οι συντελεστές φέρουσας ικανότητας εξαρτώμενοι από τη γωνία τριβής, το λόγο D/B και τη μεθοδολογία κατασκευής του πασσάλου και υπολογίζονται από το διάγραμμα του Σχήματος 40:



Σχήμα 40: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστών φέρουσας ικανότητας N_γ, N_c, N_q

Παρ/ση: Το βάθος έμπηξης κατά τη διαδικασία ελέγχου της φέρουσας ικανότητας προεπιλέγεται και μέσω δοκιμών και αφού καλύπτεται ο έλεγχος της φέρουσας ικανότητας σε κατακόρυφη φόρτιση επιλέγεται.

Η αντοχή της παράπλευρης επιφάνειας πασσάλου ανά μονάδα επιφάνειας υπολογίζεται με τη Μέθοδο Tomlinson η οποία ισχύει για εδάφη με συνοχή και γωνία τριβής και δίνεται από τη σχέση 7.26:

$$f_s = a * c' + K * \sigma_v' * \tan \delta \quad (7.26)$$

όπου :

α ο συντελεστής συνοχής

c' η ενεργός συνοχή του εδάφους (συνήθως αμελείται)

K ο συντελεστής οριζόντιας πίεσης γαιών

σ_v' η κατακόρυφη ενεργός τάση στο βάθος υπολογισμού

δ η γωνία τριβής στη διεπιφάνεια πασσάλου εδάφους

οπότε το συνολικό φορτίο που αναλαμβάνεται από την παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου προκύπτει με μαθηματική ολοκλήρωση της σχέσης 7.27 :

$$Q_s = \pi D \int_{z=0}^{z=L} f_s dz \quad (7.27)$$

και ισούται με:

$$Q_s = \pi * \left(\alpha * z * c + \frac{K * (\gamma_1 - \gamma_2)}{2} * z^2 * \tan \delta \right) \Big|_{z=0}^{z=L} \quad (7.28)$$

όπου :

z το βάθος

Τα αποτελέσματα του ελέγχου φέρουσας ικανότητας πασσάλου υπό αξονικό φορτίο για το παράδειγμα εφαρμογής παρουσιάζονται πιο κάτω (Σχήμα 41):

Για να πληρείται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του θεμελίου σε οριζόντια φόρτιση θα πρέπει :

$$2 * F \leq H_u \quad (7.29)$$

όπου:

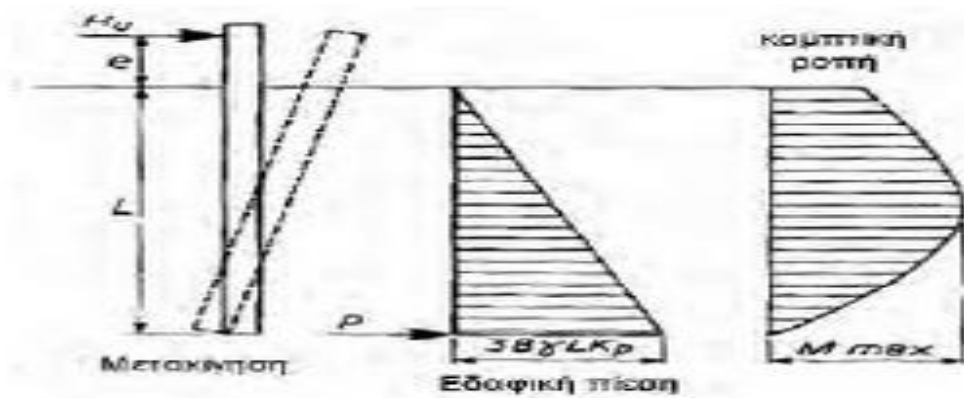
H_u το οριζόντιο οριακό φορτίο θραύσης του εδάφους

F η οριζόντια δύναμη στον πυθμένα χωρίς συντελεστή ασφαλείας δράσεων

Η φέρουσα ικανότητα του περιβάλλοντος εδάφους υπολογίζεται σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο Broms σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται το οριακό οριζόντιο φορτίο για κοντούς ή μακριούς πασσάλους με πακτωμένη ή ελεύθερη κεφαλή ,για όλα τα εδάφη ,έτσι ώστε να αποφεύγεται η αστοχία του εδάφους.

Στα πλαίσια της διπλωματικού εργασίας και όπως φαίνεται πιο κάτω θα παρουσιασθεί η διαδικασία υπολογισμού του οριακού φορτίου μόνο για κοντό πάσσαλο (όπως προκύπτει μέσω ελέγχου $M_y > M_{max}$) με ελεύθερη κεφαλή για τους δύο υπό εξέταση εδαφικούς σχηματισμούς την άμμο και την άργιλο. Πέραν της περίπτωσης κοντού πασσάλου με ελεύθερη κεφαλή μπορεί να γίνει χρήση της βιβλιογραφίας.

Για κοντό πάσσαλο με ελεύθερη κεφαλή σε αμμώδες έδαφος ο μηχανισμός θραύσεως φαίνεται στο Σχήμα 42:



Σχήμα 42: Μηχανισμός θραύσεως κοντού πασσάλου με ελεύθερη κεφαλή σε αμμώδες έδαφος

ενώ το οριακό φορτίο προκύπτει από τη σχέση 7.29:

$$H_u = a * k_p * B^3 * \gamma \quad (7.30)$$

και η μέγιστη ροπή M_{max} από τη σχέση 7.30:

$$M_{max} = M + H * z - \frac{1}{2} * k_p * \gamma * B * z^3 \quad (7.31)$$

όπου :

B η διάμετρος του πασσάλου

γ το υπό άνωση ειδικό βάρος του εδάφους

k_p ο συντελεστής παθητικών ωθήσεων

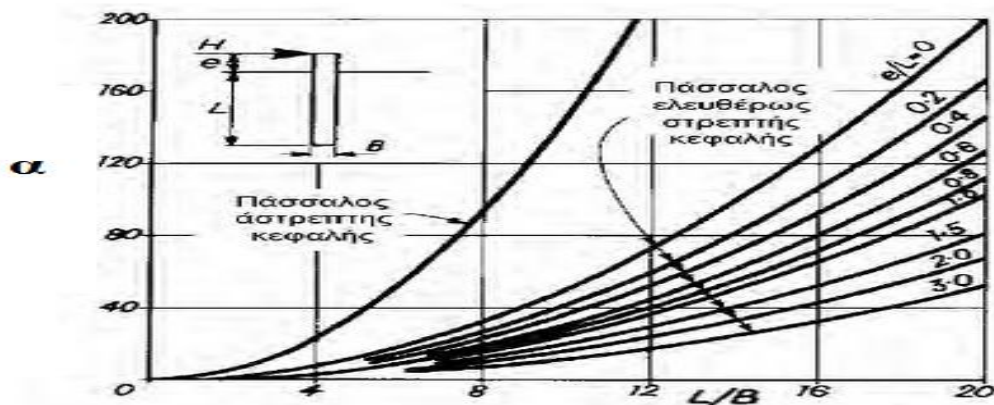
$$k_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (7.32)$$

a ο συντελεστής που προκύπτει από το διάγραμμα στο Σχήμα 43

M η συγκεντρωμένη ροπή στη κεφαλή του πασσάλου χωρίς τους συντελεστές δράσεων

z το βάθος από την επιφάνεια στο οποίο παρατηρείται η μέγιστη ροπή

$$z = \sqrt[3]{\frac{2 * H_u}{3 * \gamma * B * K_p}} \quad (7.33)$$



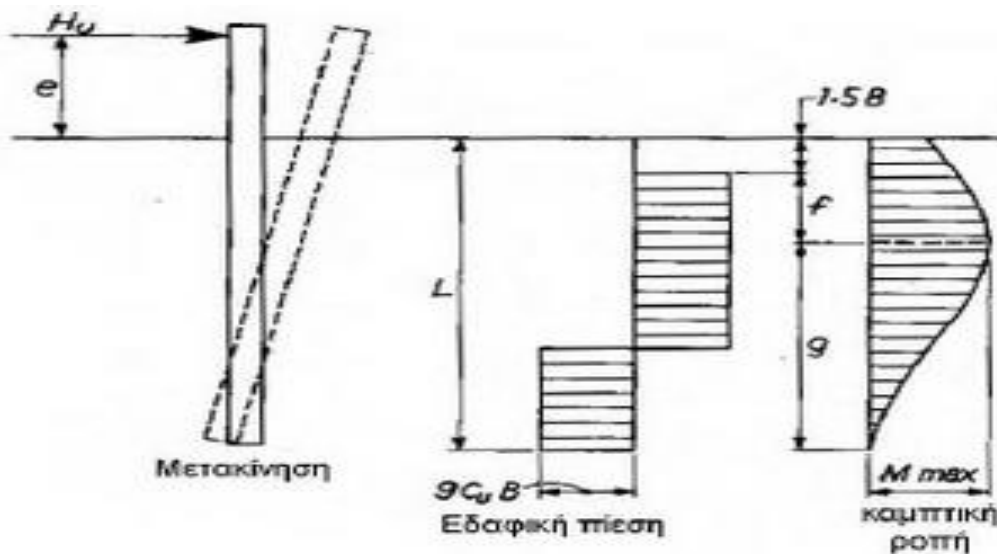
Σχήμα 43: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή α για αμμώδες έδαφος

Τα αποτελέσματα των πιο πάνω υπολογισμών για την εδαφική στρώση άμμου δίνονται στο Σχήμα 44:

	L(m)	20
	My(kNm)	840345.9
	Kp	2.769826
	L/B	3.333333
	α	5
	Hu(kN)	20939.89
	z(m)	10.95445
	Mmax(kNm)	237908.4
	kp	2.769826
	z	3.949732
	M(Z)	92153.18
	N(Z)	14840.18
	V(Z)	1814.834

Σχήμα 44: Πίνακας υπολογισμού μέγιστου οριζόντιου οριακού φορτίου θραύσης σε αμμώδες έδαφος

Για κοντό πάσσαλο με ελεύθερη κεφαλή σε αργιλικό έδαφος ο μηχανισμός θραύσεως φαίνεται στο Σχήμα 45:



Σχήμα 45: Μηχανισμός θραύσεως κοντού πασσάλου με ελεύθερη κεφαλή σε αργιλικό έδαφος

ενώ το οριακό φορτίο προκύπτει από τη σχέση:

$$H_u = a * c_u * B^2 \quad (7.34)$$

και η μέγιστη ροπή M_{max} από τη σχέση:

$$M_{max} = M + H_u * (1.5 * B + 0.5 * f) \quad (7.35)$$

όπου :

B η διάμετρος του πασσάλου

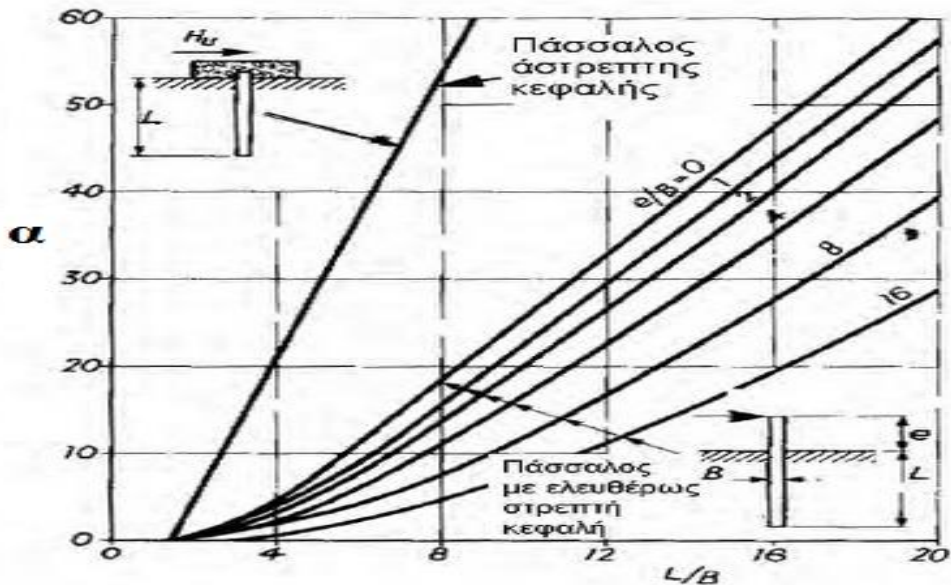
c_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή

a ο συντελεστής που προκύπτει από το διάγραμμα στο Σχήμα 46

M η συγκεντρωμένη ροπή στη κεφαλή του πασσάλου χωρίς τους συντελεστές δράσεων

f το βάθος που προκύπτει από τη σχέση:

$$f = \frac{H}{9 * c_u * B} \quad (7.36)$$



Σχήμα 46: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή α για αργιλικό έδαφος

Τα αποτελέσματα των πιο πάνω υπολογισμών για την εδαφική στρώση αργίλου δίνονται στο Σχήμα 47:

Cu(kPa)	60
L(m)	30
My(kNm)	840346
Kp	2.198
L/B	5
α	10
Hu(kN)	21600
f(m)	6.6667
Mmax(kNm)	351385
f'(m)	0.8402
M(Z)	110629
N(Z)	16162
V(Z)	1361.1

Σχήμα 47: Πίνακας υπολογισμού μέγιστου οριζόντιου οριακού φορτίου θραύσης σε αργιλικό έδαφος

Παρ/ση: Ο καθορισμός της τιμής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής έγινε προσεγγιστικά με βάση τα χαρακτηριστικά της αργίλου (χαλαρή άργιλος)

Ο έλεγχος της αντοχής του πασσάλου ως φέροντος στοιχείου σε κάμψη, θλίψη και διάτμηση λόγω των πλευρικών επιπονήσεων αλλά και των κατακόρυφων φορτίων που ασκούνται σε αυτό γίνεται στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου Von Mises για τον οποίο εκτενέστερη ανάλυση έγινε στο Κεφάλαιο 5.3. Τα εντατικά μεγέθη στη διατομή μέγιστης καταπόνησης δηλαδή στο βάθος όπου εμφανίζεται η μέγιστη ροπή είναι η μέγιστη ροπή M_{max} όπως υπολογίσθηκε πιο πάνω, η τέμνουσα δύναμη που προκύπτει από το αλγεβρικό άθροισμα της οριζόντιας δύναμης σχεδιασμού και των εδαφικών δυνάμεων και η αξονική δύναμη που προκύπτει λόγω ιδίου βάρους κατασκευής μέχρι τη στάθμη της διατομής μέγιστης εντατικής καταπόνησης (Σχήμα 47).

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πιο κάτω και για τις δύο εδαφικές στρώσεις (Σχήμα 48):

Ελεγχος Von Mises για αμμώδες έδαφος		Ελεγχος Von Mises για αργιλικό έδαφος	
t(m)	0.15	t(m)	0.15
d(m)	6	d(m)	6
ε	1	ε	1
e^2	1	e^2	1
d/t	40	d/t	40
I(m ⁴)	11.801	I(m ⁴)	11.8006
f _y (kPa)	235000	f _y (kPa)	235000
A(m ²)	2.7567	A(m ²)	2.756748
A _v (m ²)	1.755	A _v (m ²)	1.755
W _{el} (m ³)	3.9335	W _{el} (m ³)	3.933534
SF	1.1	SF	1.1
σ_{ed} (kPa)	28811	σ_{ed} (kPa)	33987.37
τ_{ed} (kPa)	1034.1	τ_{ed} (kPa)	775.5703
σ (kPa)	28866	σ (kPa)	34013.91
f _y /SF(kPa)	213636	f _y /SF(kPa)	213636.4

Σχήμα 48: Πίνακες υπολογισμού επάρκειας διατομής κατά Von Mises

7.3.3 Λόγοι επιμέρους φορτίσεων προς τη συνολική φόρτιση στη βάση της κατασκευής

Ο λόγος της οριζόντιας δύναμης που ασκείται στη κατασκευή λόγω ανέμου προς τη συνολική δύναμη στη βάση της κατασκευής προκύπτει:

$$\frac{\Sigma H_{\alpha\epsilon\rho}}{\Sigma H_{\kappa\alpha\tau}} = 0.37$$

Ο λόγος της οριζόντιας δύναμης που ασκείται στη κατασκευή λόγω θαλάσσιων κυματισμών προς τη συνολική δύναμη στη βάση της κατασκευής προκύπτει:

$$\frac{\Sigma H_{\upsilon\delta\rho}}{\Sigma H_{\kappa\alpha\tau}} = 0.63$$

Ο λόγος της ροπής που ασκείται στη κατασκευή λόγω ανέμου προς τη συνολική ροπή στη βάση της κατασκευής προκύπτει:

$$\frac{\Sigma M_{\alpha\epsilon\rho}}{\Sigma M_{\kappa\alpha\tau}} = 0.77$$

Ο λόγος της ροπής που ασκείται στη κατασκευή λόγω θαλάσσιων κυματισμών προς τη συνολική ροπή στη βάση της κατασκευής προκύπτει:

$$\frac{\Sigma M_{\upsilon\delta\rho}}{\Sigma M_{\kappa\alpha\tau}} = 0.23$$

Ο λόγος της συνολικής οριζόντιας δύναμης που ασκείται στην κατασκευή προς τη συνολική κατακόρυφη δύναμη στην κατασκευή προκύπτει:

$$\frac{\Sigma H}{\Sigma V} = 0.20$$

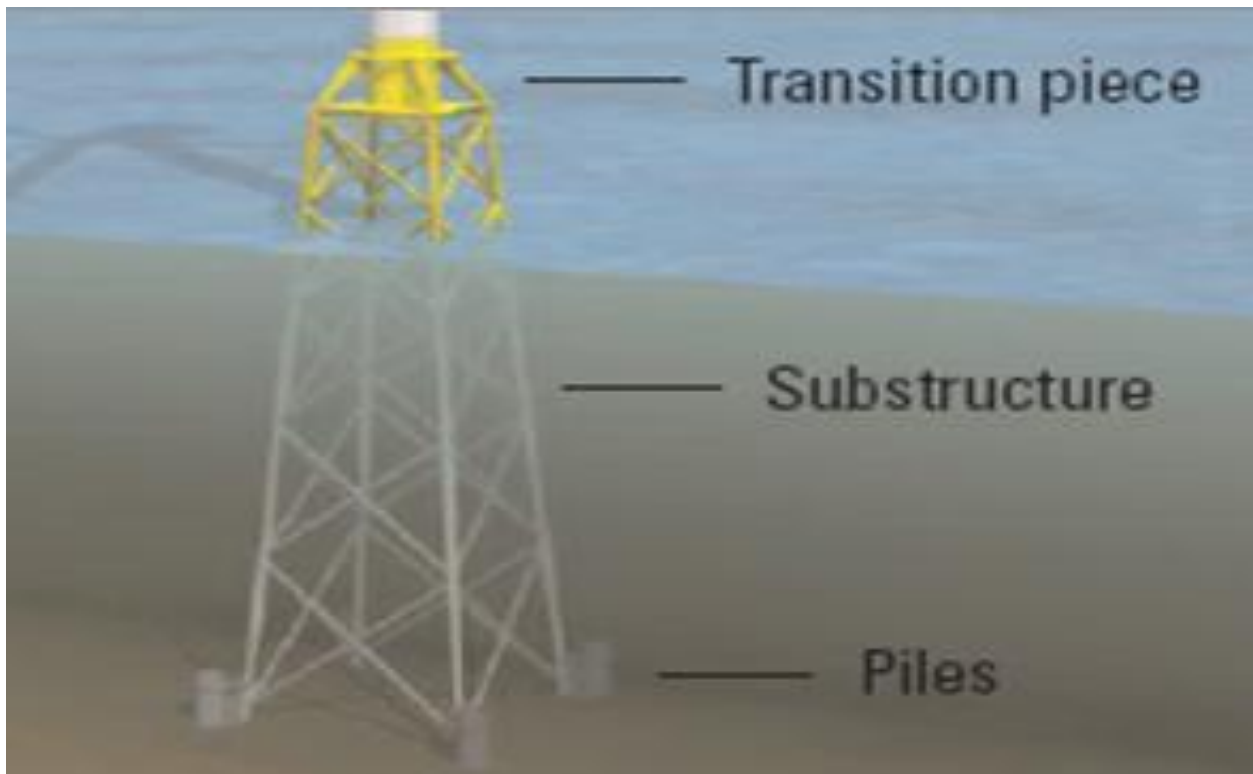
7.4 Θεμελίωση με πασσαλοέμπηξη μεταλλικού τετράποδου δικτυώματος (Jacket)

7.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά

- Πρόκειται για ένα ελαφρύ χωρικό σωληνωτό δικτύωμα που αποτελείται από τέσσερα κύρια μέλη συνήθως διαμέτρου μέχρι 1.5m τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω διαγώνιων στοιχείων με συνήθη διάμετρο όχι πέραν του 1m. Είναι συνήθως κοίλης κυκλικής διατομής και μεγάλης δυσκαμψίας και η μεταφορά του γίνεται μέσω πλωτού εξοπλισμού (Σχήματα 49 και 50). Ο φορέας στηρίζεται σε εμπηγνυόμενους πασσάλους στον πυθμένα μέσω ειδικών στοιχείων σύνδεσης. Περιλαμβάνει επίσης πλατφόρμα εργασίας πάνω στην οποία στηρίζεται και ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας. Ενδείκνυται για βάθη από 20m μέχρι 50m.
- Παρέχει ικανοποιητική σταθερότητα και ανοχή στη διάβρωση του εδάφους επομένως δεν χρειάζεται κατά την εγκατάσταση του ειδική προετοιμασία του πυθμένα. Η διαδικασία έμπηξης των πασσάλων είναι η ίδια με τη περίπτωση θεμελίωσης του Monopile. Παρόλα αυτά το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την πιθανή ύπαρξη βραχώδους υπόβαθρου καθιστά την εγκατάσταση του απαγορευτική από οικονομικής άποψης.
- Ο μηχανισμός λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου θεμελίωσης βασίζεται στη δυνατότητα μεταφοράς των φορτίων μέσω των τεσσάρων μελών στους πασσάλους θεμελίωσης. Στη συνέχεια μέσω της βάσης έδρασης (αντίσταση αιχμής) των πασσάλων όπως επίσης και μέσω της πλευρικής τριβής που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους τα φορτία μεταφέρονται στο έδαφος. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα φορτία λόγω ιδίου βάρους της ανεμογεννήτριας καθώς επίσης και η οριζόντια δύναμη στη βάση του πυλώνα λόγω αεροδυναμικών φορτίων, κατανέμονται ισόποσα στα μέλη του φορέα στήριξης. Από την άλλη η συγκεντρωμένη ροπή στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας μεταφέρεται σαν αξονικό φορτίο στα θλιβόμενα και εφελκυσόμενα μέλη κατά περίπτωση.



Σχήμα 49: Μεταλλικό τετράποδο δικτύωμα (Jacket)



Σχήμα 50: Θεμελίωση με πασσαλοέμπηξη μεταλλικού τετράποδου δικτυώματος (Jacket)

7.4.2 Διαστασιολόγηση - Σχεδιασμός

Για τη διαστασιολόγηση της θεμελίωσης των τεσσάρων πασσάλων δηλαδή τον υπολογισμό της διαμέτρου και του μήκους έμπηξης τους ακολουθείται η πιο κάτω διαδικασία:

- **Καθορισμός διαστάσεων φορέα στήριξης**

Προεκτιμούνται οι διαστάσεις του καθενός από τα τέσσερα κατακόρυφα μέλη του δικτύματος (διάμετρος σωλήνα , πάχος τοιχωμάτων). Επίσης η κατηγορία και το ειδικό βάρος του χάλυβα που χρησιμοποιείται κατά τη κατασκευή του δικτύματος. Στη μελέτη επιλέχθηκε :

1. Διάμετρος φορέα $D=1.6\text{m}$
2. Πάχος τοιχωμάτων $t=0.10\text{m}$
3. Κατηγορία χάλυβα :S235
4. Ειδικό βάρος χάλυβα $\gamma_{\text{χαλ}}=78.5 \text{ kN/m}^3$

- **Υπολογισμός εντατικών μεγεθών λόγω αεροδυναμικών φορτίων στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας**

Η διαδικασία υπολογισμού και τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.2 .

- **Υπολογισμός των εντατικών μεγεθών που ασκούνται στη κορυφή καθενός από τα τέσσερα μέλη του δικτύματος**

Όπως προαναφέρθηκε τα φορτία λόγω ιδίου βάρους της ανεμογεννήτριας καθώς επίσης και η οριζόντια δύναμη στη βάση του πύργου λόγω αεροδυναμικών φορτίων, κατανέμονται ισόποσα στα μέλη του φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας. Από την άλλη η συγκεντρωμένη ροπή στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας μεταφέρεται σαν αξονικό φορτίο στα θλιβόμενα και εφελκύμενα μέλη κατά περίπτωση. Για τον υπολογισμό του δυσμενέστερου αξονικού φορτίου στα μέλη λόγω ροπής στην παρούσα μελέτη εξάτασθηκαν τα δύο δυσμενέστερα σενάρια φόρτισης στη κορυφή του δικτύματος . Το φορτίο κατά τη διεύθυνση της διχοτόμου της γωνίας μεταξύ των κατόψει πλευρών της κατασκευής και το φορτίο κατά τη διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση των κατόψει πλευρών της κατασκευής. Για τη πρώτη φόρτιση προκύπτει η θλιβόμενη αξονική δύναμη ως:

$$N_{\max} = \frac{M_{ed}}{1.41 \cdot a} \quad (7.37)$$

ενώ για τη δεύτερη φόρτιση προκύπτει η θλιβόμενη αξονική δύναμη ως:

$$N_{\max} = \frac{M_{ed}}{2 \cdot a} \quad (7.38)$$

όπου :

M_{ed} η συνολική ροπή στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας λόγω αεροδυναμικών φορτίων

a το μήκος των πλευρών στη κορυφή της πλατφόρμας

Επιλέγεται ως δυσμενέστερη η πρώτη φόρτιση αφού αναπτύσσει μεγαλύτερη θλιπτική αξονική δύναμη. Η συνολική αξονική δύναμη που ασκείται σε καθένα από τα κατακόρυφα μέλη ισούται με το άθροισμα της αξονικής δύναμης που κατανέμεται ισόποσα λόγω ιδίου βάρους και της αξονικής δύναμης N_{\max} που υπολογίσθηκε πιο πάνω.

Τα εντατικά μεγέθη στη κορυφή του κατακόρυφου μέλους και η διαδικασία υπολογισμού τους δίνονται πιο κάτω (Σχήμα 51):

		Fed(KN)	959.68		
		Med(kNm)	40367		
		Ned(KN)	7273.9		
		a(m)	8		
		Nmax(KN)	3568.5		
		N(KN)	5387		
		F(KN)	239.92		

Σχήμα 51: Πίνακας υπολογισμού εντατικών μεγεθών στη κορυφή του κατακόρυφου μέλους

- Υπολογισμός τέμνουσας και ροπής λόγω αεροδυναμικών φορτίων -από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας μέχρι τη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας- στο φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας , στη στάθμη ελεύθερης επιφάνειας.

Υπολογίζονται με εφαρμογή των σχέσεων που προκύπτουν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.3 τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται πιο κάτω (Σχήμα 52):

$\rho(\text{kg/m}^3)$	1.227
$z_{\text{hub}}(\text{m})$	105
$V_{\text{hub}}(\text{m/s})$	51.2853
c	1.2
a	0.14
$z_0(\text{m})$	5
$F(\text{kN})$	6.24346
$M(\text{kNm})$	17.5255
$F_{\text{ed}}(\text{KN})$	9.36519
$M_{\text{ed}}(\text{kNm})$	26.2883

Σχήμα 52: Πίνακας υπολογισμού αεροδυναμικών φορτίων από τη δράση του ανέμου στη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας

- Υπολογισμός τέμνουσας και ροπής στο πυθμένα λόγω υδροδυναμικών φορτίων στο φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6.5 τα εντατικά μεγέθη λόγω υδροδυναμικών φορτίων (αφού τηρείται το κριτήριο) προκύπτουν σύμφωνα με το τύπο Morison. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πιο κάτω:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
	H(m)	4.54047683		H(m)	4.50720326		H(m)	4.486487841		H(m)	4.477216708		H(m)	4.47797938		H(m)	4.48733644	
	wt	0.00																
	D(m)	1.60		D(m)	1.60		D(m)	1.60		D(m)	1.60		D(m)	1.60		D(m)	1.60	
	ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03		ρ (kg/L)	1.03	
	v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001		v (m ² /s)	0.000001	
	Umax(m/s)	2.02		Umax(m/s)	1.95		Umax(m/s)	1.90		Umax(m/s)	1.86		Umax(m/s)	1.84		Umax(m/s)	1.82	
	Re	3233530.02		Re	3125393.58		Re	3043297.38		Re	2981941.39		Re	2937038.72		Re	2905190.27	
	Cd	1.10		Cd	1.10		Cd	1.10		Cd	1.10		Cd	1.10		Cd	1.10	
	Cm	2.00		Cm	2.00		Cm	2.00		Cm	2.00		Cm	2.00		Cm	2.00	
	Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00		Zo(m)	-20.00	
	ζ (m)	2.27		ζ (m)	2.25		ζ (m)	2.24		ζ (m)	2.24		ζ (m)	2.24		ζ (m)	2.24	
	Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00		Fd(KN)	0.00	
	Fl(KN)	0.00		Fl(KN)	0.00		Fl(KN)	0.00		Fl(KN)	0.00		Fl(KN)	0.00		Fl(KN)	0.00	
	Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00		Ftotal(KN)	0.00	
	Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00		Md(KNm)	0.00	
	Ml(KNm)	0.00		Ml(KNm)	0.00		Ml(KNm)	0.00		Ml(KNm)	0.00		Ml(KNm)	0.00		Ml(KNm)	0.00	
	Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00		Mtotal(KNm)	0.00	
	wt	0.52																
	Ftotal(KN)	-47.67		Ftotal(KN)	-45.66		Ftotal(KN)	-43.89		Ftotal(KN)	-42.33		Ftotal(KN)	-40.94		Ftotal(KN)	-39.70	
	Mtotal(KNm)	-613.61		Mtotal(KNm)	-575.92		Mtotal(KNm)	-544.45		Mtotal(KNm)	-517.88		Mtotal(KNm)	-495.20		Mtotal(KNm)	-475.62	
	wt	0.79																
	Ftotal(KN)	-66.16		Ftotal(KN)	-63.49		Ftotal(KN)	-61.13		Ftotal(KN)	-59.03		Ftotal(KN)	-57.15		Ftotal(KN)	-55.46	
	Mtotal(KNm)	-833.89		Mtotal(KNm)	-784.60		Mtotal(KNm)	-743.16		Mtotal(KNm)	-707.97		Mtotal(KNm)	-677.76		Mtotal(KNm)	-651.56	
	wt	1.05																
	Ftotal(KN)	-77.82		Ftotal(KN)	-74.86		Ftotal(KN)	-72.21		Ftotal(KN)	-69.84		Ftotal(KN)	-67.69		Ftotal(KN)	-65.75	
	Mtotal(KNm)	-954.81		Mtotal(KNm)	-901.15		Mtotal(KNm)	-855.62		Mtotal(KNm)	-816.65		Mtotal(KNm)	-782.96		Mtotal(KNm)	-753.56	
	wt	1.57																
	Ftotal(KN)	-81.89		Ftotal(KN)	-79.24		Ftotal(KN)	-76.78		Ftotal(KN)	-74.51		Ftotal(KN)	-72.42		Ftotal(KN)	-70.49	
	Mtotal(KNm)	-939.84		Mtotal(KNm)	-893.61		Mtotal(KNm)	-853.39		Mtotal(KNm)	-818.20		Mtotal(KNm)	-787.20		Mtotal(KNm)	-759.68	
	Ftotal(KN)	-122.84																
	Mtotal(KNm)	-1409.76																

Σχήμα 53: Πίνακες υπολογισμού υδροδυναμικών φορτίων στον πυθμένα

- Υπολογισμός αξονικής δύναμης λόγω ιδίου βάρους φορέα έδρασης ανεμογεννήτριας

Η αξονική δύναμη που ασκείται στον πυθμένα προκύπτει από το ίδιο βάρος του φορέα έδρασης τόσο πάνω όσο και κάτω από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας.

	t(m)	0.10
	A1(m2)	2.01
	A2(m2)	1.54
	Atotal(m2)	0.47
	h(m)	20.00
	V(m3)	9.42
	γ χαλ(KN/m3)	68.50
	Ned(kN)	645.60
	γ χαλ(KN/m3)	78.50
	h(m)	5.00
	V(m3)	2.36
	Ned(kN)	184.96
	Nedtotal(kN)	830.56

Σχήμα 54: Πίνακας υπολογισμού αξονικής δύναμης κατακόρυφου μέλους

Παρ/ση: Αγνοούνται τα ίδια βάρη των διαγώνιων στοιχείων του φορέα έδρασης της ανεμογεννήτριας

- Υπολογισμός συνολικών εντατικών μεγεθών στο πυθμένα

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω προκύπτουν η συνολική τέμνουσα και αξονική δύναμη όπως επίσης και η συνολική ροπή στο πυθμένα για το κάθε κατακόρυφο μέλος (Σχήμα 55).

	F(KN)	250
	M(kNm)	5610
	N(KN)	5530
	F(KN)	372
	M(kNm)	7620
	N(KN)	6508

Σχήμα 55: Πίνακας υπολογισμού εντατικών μεγεθών στον πυθμένα

Παρ/ση: Κατά την επαλληλία των ροπών και δυνάμεων λήφθηκε η απόλυτη τιμή των εντατικών μεγεθών των επιμέρους φορτίσεων

- Έλεγχος επάρκειας διατομής του πυλώνα σε συνδυασμένη κάμψη , διάτμηση θλίψη

Ο έλεγχος γίνεται στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης δηλαδή στον πυθμένα σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 5.3 και τα αποτελέσματα του ελέγχου παρουσιάζονται πιο κάτω (Σχήμα 56):

t(m)	0.10
d(m)	1.60
ε	1.00
e^2	1.00
d/t	16.00
I(m⁴)	0.13
fy(kPa)	235000.00
A(m²)	0.47
Av(m²)	0.30
Wel(m³)	0.17
SF	1.10
σed(kPa)	167741.04
red(kPa)	1240.36
σ(kPa)	167754.80
fy/SF(kPa)	213636.36

Σχήμα 56: Πίνακες υπολογισμού επάρκειας διατομής κατά Von Mises

- Έλεγχος φέρουσας ικανότητας πασσάλου σε κατακόρυφη φόρτιση

Η διαδικασία υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας πασσάλου σε κατακόρυφη φόρτιση για την περίπτωση θεμελίωσης του jacket είναι η ίδια με την περίπτωση του μονού πυλώνα που αναλύθηκε πιο πάνω. Τα αποτελέσματα αυτής δίνονται πιο κάτω:

Φ.Ι σε αμμώδες έδαφος		Φ.Ι σε αργιλικό έδαφος		Αξονικό φορτίο λαμβάνοντας υπόψιν το ίδιο βάρος του πασσάλου στη βάση του πασσάλου έμπηξης	
D(m)	2.00	D(m)	2.00		
t(m)	0.15	t(m)	0.15		
A1(m ²)	3.14	A1(m ²)	3.14	Ned(kN) σε αμμώδες στρώμα	8523.76
A2(m ²)	2.27	A2(m ²)	2.27	Ned(kN) σε αργιλικό στρώμα	9491.18
Ab(m ²)	0.87	Ab(m ²)	0.87		
c(kPa)	2.00	c(kPa)	10.00		
φ	28.00	φ	22.00		
γ1(kN/m ³)	7.00	γ1(kN/m ³)	7.00		
γ2(kN/m ³)	7.00	γ2(kN/m ³)	7.00		
γκορ(kN/m ³)	17.00	γκορ(kN/m ³)	17.00		
L(m)	25.00	L(m)	37.00		
Nq	46.00	Nq	20.00		
Nc	350.00	Nc	100.00		
Nγ	20.00	Nγ	4.60		
ks	0.50	ks	0.50		
fb(kPa)	4865.00	fb	3622.20		
Qb(kN)	4241.27	Qb(kN)	3157.80		
a	1.00	a	1.00		
k	0.80	k	0.50		
δ	20.00	δ	15.00		
δ	0.35	δ	0.26		
Qs(kN)	4316.22	Qs(kN)	6358.20		
Pu(kN)	8557.49	Pu(kN)	9516.01		

Σχήμα 57: Πίνακες υπολογισμού φέρουσας ικανότητας των δύο εδαφικών σχηματισμών σε κατακόρυφη φόρτιση

- Έλεγχος φέρουσας ικανότητας πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση

Η διαδικασία υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση για την περίπτωση θεμελίωσης του jacket είναι η ίδια με την περίπτωση του μονού πυλώνα αφού και στις δύο περιπτώσεις πρόκειται για θεμελίωση εμπηγνυόμενων πασσάλων .

Για τον αμμώδη σχηματισμό ακολουθείται η συγκεκριμένη διαδικασία που περιγράφεται για κοντό πάσσαλο (αφού προκύπτει τελικά ότι $M_y > M_{max}$). Τα αποτελέσματα υπολογισμού του οριζόντιου φορτίου αντοχής του εδάφους δίνονται πιο κάτω:

L(m)	25.00
M_y(kNm)	80202.38
K_p	2.77
L/B	12.50
α	15.00
H_u(kN)	581.66
z(m)	3.16
M_{max}(m)	8847.23
k_p	2.77
z(m)	2.53
M(Z)	8248.42
N(Z)	6712.19
V(Z)	248.07

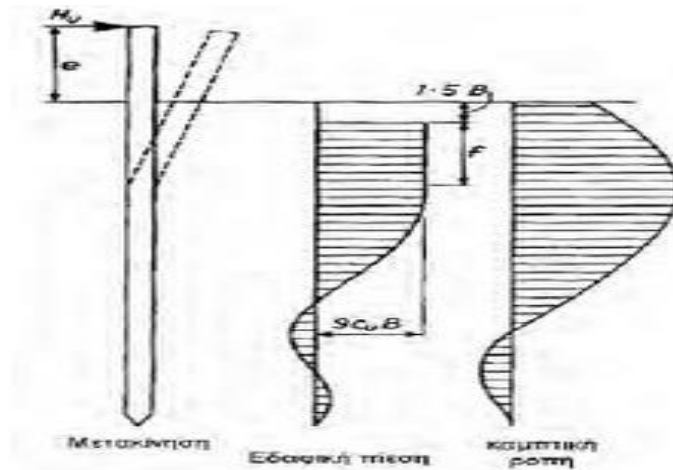
Σχήμα 58: Πίνακας υπολογισμού μέγιστου οριζόντιου οριακού φορτίου θραύσης σε αμμώδες έδαφος

και ο έλεγχος Von Mises στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης (Σχήμα 58) για την εδαφική στρώση προκύπτει (Σχήμα 59):

t(m)	0.15
d(m)	2.00
ε	1.00
e²	1.00
d/t	13.33
I(m⁴)	0.38
f_y(kPa)	235000.00
A(m²)	0.87
A_v(m²)	0.56
W_{el}(m³)	0.38
SF	1.10
σ_{ed}(kPa)	29670.75
τ_{ed}(kPa)	446.98
σ(kPa)	29680.85
f_y/SF(kPa)	213636.36

Σχήμα 59 :Πίνακες υπολογισμού επάρκειας διατομής κατά Von Mises σε αμμώδες έδαφος

Για τον αργλικό σχηματισμό με ελεύθερη κεφαλή ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφει τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας για μακρύ πάσσαλο (ελέγχθηκε εάν λειτουργεί ο μηχανισμός κοντού και δια της ατόπου απαγωγής τελικά προέκυψε ότι λειτουργεί ο μηχανισμός μακρού πασσάλου). Ο μηχανισμός θραύσεως για μακρύ πάσσαλο φαίνεται στο Σχήμα 60 :



Σχήμα 60: Μηχανισμός θραύσεως μακρού πασσάλου με ελεύθερη κεφαλή σε αργλικό έδαφος

Κρίσιμη είναι η καμπτική αντοχή του πασσάλου αφού η παθητική αντίσταση του εδάφους είναι πολύ μεγάλη ενώ το οριακό φορτίο προκύπτει από τη σχέση:

$$H_u = a * c_u * B^2 \quad (7.39)$$

και η μέγιστη ροπή M_{max} από τη σχέση:

$$M_{max} = M + H * (1.5 * B + 0.5 * f) \quad (7.40)$$

όπου :

B η διάμετρος του πασσάλου

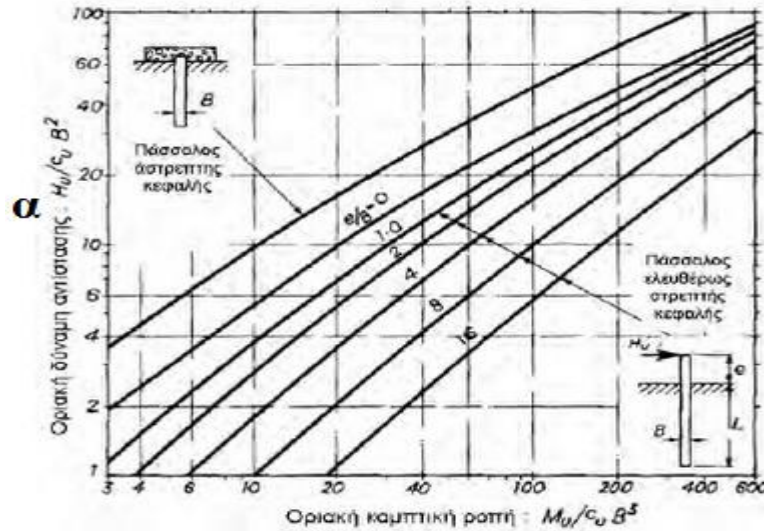
c_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή

a ο συντελεστής που προκύπτει από το διάγραμμα στο Σχήμα 61

M η συγκεντρωμένη ροπή στη κεφαλή του πασσάλου χωρίς τους συντελεστές δράσεων

f το βάθος που προκύπτει από τη σχέση 7.40:

$$f = \frac{H}{9 \cdot c_u \cdot B} \quad (7.41)$$



Σχήμα 61: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή α για αργιλικό έδαφος

Τα αποτελέσματα των πιο πάνω υπολογισμών για την εδαφική στρώση αργίλου δίνονται στο Σχήμα 62:

Cu	60.00
L(m)	37.00
My(kNm)	80202.38
Kp	2.20
My/(c*b^3)	167.09
α	42.00
Hu	10080.00
f(m)	9.33
Mmax	84900.98
f'(m)	0.34
M(Z)	8801.40
N(Z)	6764.03
V(Z)	186.05

Σχήμα 62: Πίνακας υπολογισμού μέγιστου οριζόντιου οριακού φορτίου θραύσης σε αργιλικό έδαφος

Ο έλεγχος Von Mises γίνεται στη διατομή μέγιστης εντατικής καταπόνησης (Σχήμα 62) για την εδαφική στρώση , με τα αποτελέσματα αυτού να δίνονται στο Σχήμα 63:

t(m)	0.15
d(m)	2.00
ε	0.84
e^2	0.70
d/t	13.33
I(m⁴)	0.38
f_y(kPa)	235000.00
A(m²)	0.87
A_v(m²)	0.56
W_{el}(m³)	0.38
SF	1.10
σ_{ed}(kPa)	31203.20
τ_{ed}(kPa)	335.23
σ(kPa)	31208.60
f_y/SF(kPa)	213636.36

Σχήμα 63: Πίνακας υπολογισμού επάρκειας διατομής κατά Von Mises σε αργιλικό έδαφος

Σημείωση: Για την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας έγινε η παραδοχή ότι οι δυνάμεις και ροπές που ασκούνται λόγω υδροδυναμικών φορτίων στα συνδεδεκά στοιχεία (οριζόντια και διαγώνια στοιχεία) είναι αμελητέες.

Παρ/ση: Στο εν λόγω παράδειγμα εφαρμογής και για τους τρεις τύπους θεμελίωσης οι τιμές των διαστάσεων δεν αποτελούν και τη βέλτιστη λύση για τη κατασκευή αλλά πρόκειται για πραγματικές τιμές που σκοπό έχουν να δείξουν τη αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων σχεδιασμού.

7.4.3 Λόγοι επιμέρους φορτίσεων προς τη συνολική φόρτιση στη βάση της κατασκευής

Ο λόγος της οριζόντιας δύναμης που ασκείται στη κατασκευή λόγω ανέμου προς τη συνολική δύναμη στη βάση της κατασκευής προκύπτει:

$$\frac{\Sigma H_{\alpha\epsilon\rho}}{\Sigma H_{\kappa\alpha\tau}} = 0.67$$

Ο λόγος της οριζόντιας δύναμης που ασκείται στη κατασκευή λόγω θαλάσσιων κυματισμών προς τη συνολική δύναμη στη βάση της κατασκευής προκύπτει:

$$\frac{\Sigma H_{\upsilon\delta\rho}}{\Sigma H_{\kappa\alpha\tau}} = 0.33$$

Ο λόγος της συνολικής οριζόντιας δύναμης που ασκείται στην κατασκευή προς τη συνολική κατακόρυφη δύναμη στην κατασκευή προκύπτει:

$$\frac{\Sigma H}{\Sigma V} = 0.06$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Η σεισμική φόρτιση υπολογίζεται με βάση τον Ευρωκώδικα 8 (Περί αντισεισμικού σχεδιασμού κατασκευών). Περιγράφεται στη συνέχεια η διαδικασία εύρεσης του σεισμικού φορτίου στην κατασκευή:

- **Κατάταξη εδάφους**

Από τον πίνακα που φαίνεται πιο κάτω (Σχήμα 64), κατατάσσεται το έδαφος του πυθμένα της περιοχής σε μια κατηγορία. Όπως έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3.2, πρόκειται για αλλουβιακές αποθέσεις οπότε το έδαφος στην περιοχή κατατάσσεται στη κατηγορία E.

Κατάταξη εδαφών

- A** Βραχώδη
- B** Αποθέσεις από πολύ πυκνά αμμοχάλικα ή πολύ σκληρές αργίλους μεγάλου πάχους
- C** Αποθέσεις από πυκνά αμμοχάλικα ή σκληρές αργίλους μεγάλου πάχους
- D** Αποθέσεις από χαλαρά έως μέτρια, μη συνεκτικά εδάφη ή μαλακά έως σκληρά συνεκτικά εδάφη
- E** Επιφανειακό αλλουβιακό στρώμα πάχους 5-20m με τιμή v_s αντίστοιχη των εδαφών C ή D, που υπέρκειται σκληρού εδάφους
- S1** Αποθέσεις που αποτελούνται ή περιλαμβάνουν στρώμα πάχους τουλάχιστον 10 m από μαλακές αργίλους και ιλύες με μεγάλο δείκτη πλαστικότητας ($PI > 40$) και μεγάλο ποσοστό υγρασίας
- S2** Αποθέσεις από εδάφη επικίνδυνα για ρευστοποίηση ή ευαίσθητες αργίλους και εδάφη που δεν υπάγονται στις παραπάνω κατηγορίες

Σχήμα 64: Πίνακας κατάταξης εδαφών

- **Επιλογή χαρακτηριστικών εδάφους**

Εφόσον το έδαφος, ανήκει στην κατηγορία Ε, έχει τις πιο κάτω χαρακτηριστικές τιμές (Σχήμα 65) όπου S είναι ο συντελεστής εδάφους και T_B , T_C , T_D είναι χαρακτηριστικές τιμές περιόδων του φάσματος απόκρισης.

Έδαφος	S	T_B (sec)	T_C (sec)	T_D (sec)
A	1.00	0.15	0.40	2.50
B	1.20	0.15	0.50	2.50
C	1.15	0.20	0.60	2.50
D	1.35	0.20	0.80	2.50
E	1.40	0.15	0.50	2.50

Σχήμα 65 :Σεισμικά χαρακτηριστικά εδάφους

πηγή: EC 8

- **Κατηγοριοποίηση αναλόγως της σπουδαιότητας του έργου**

Ακολουθως, αναλόγως της σπουδαιότητας της κατασκευής, αυτή κατατάσσεται σε άλλη μια κατηγορία. Οι κατηγορίες φαίνονται πιο κάτω (Σχήμα 66). Η κατασκευή που περιγράφεται στη μελέτη αυτή θα είναι κατηγορίας Σ4, δηλαδή πολύ μεγάλης οικονομικής σημασίας.

Κατηγορία Σπουδαιότητας	
Σ1	Κτίρια μικρής σπουδαιότητας ως προς την ασφάλεια του κοινού, π.χ. αγροτικά οικήματα, υπόστεγα, στάβλοι κλπ.
Σ2	Συνήθη κτίρια κατοικιών και γραφείων, βιομηχανικά κτίρια, ξενοδοχεία κλπ.
Σ3	Εκπαιδευτικά κτίρια, κτίρια δημόσιων συναθροίσεων, αίθουσες αεροδρομίων και γενικώς κτίρια στα οποία ευρίσκονται πολλοί άνθρωποι κατά μεγάλο μέρος του 24ώρου. Κτίρια τα οποία στεγάζουν εγκαταστάσεις πολύ μεγάλης οικονομικής σημασίας (π.χ. κτίρια που στεγάζουν υπολογιστικά κέντρα, ειδικές βιομηχανίες) κλπ.
Σ4	Κτίρια των οποίων η λειτουργία, τόσο κατά την διάρκεια του σεισμού, όσο και μετά τους σεισμούς, είναι ζωτικής σημασίας, όπως κτίρια τηλεπικοινωνίας, παραγωγής ενέργειας, νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, κτίρια δημόσιων επιτελικών υπηρεσιών. Κτίρια που στεγάζουν έργα μοναδικής καλλιτεχνικής αξίας (π.χ. μουσεία κλπ.).

Σχήμα 66: Κατηγορία σπουδαιότητας κατασκευής

πηγή: EC 8

- **Επιλογή συντελεστή σπουδαιότητας**

Εφόσον το έργο ανήκει στην κατηγορία Σ4 (IV), θα λαμβάνει την αντίστοιχη τιμή από τον πίνακα πιο κάτω (Σχήμα 67):

Κατηγορία σπουδαιότητας	I	II	III	IV
γ_I	0.80	1.00	1.20	1.40

Σχήμα 67: Συντελεστής σπουδαιότητας κατασκευής

πηγή: EC 8

- **Εύρεση ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας**

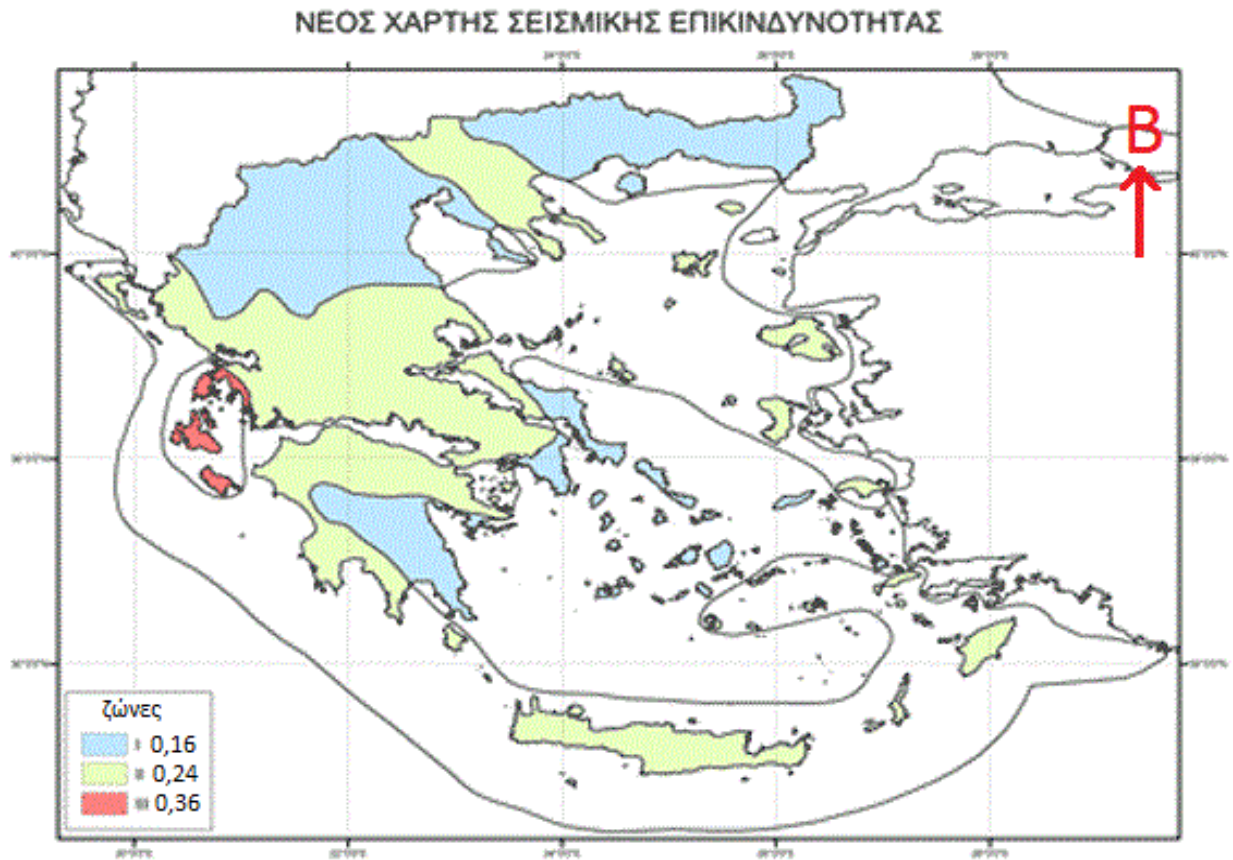
Το σημείο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου ανοικτά της Λήμνου βρίσκεται στη 2^η ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας όπως φαίνεται στο χάρτη του Σχήματος 68 . Επομένως η επιτάχυνση εδάφους δίνεται από τη σχέση 8.1:

$$\alpha_{gR} = 0,24g \quad (8.1)$$

όπου:

α_{gR} η επιτάχυνση εδάφους

g η επιτάχυνση της βαρύτητας (λαμβάνεται ως $9,81 \text{ m/s}^2$)



Σχήμα 68 : Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας

πηγή: <http://www.oasp.gr/node/87>

- **Εύρεση επιτάχυνσης σχεδιασμού εδάφους**

Υπολογίζεται από τη σχέση 8.2:

$$\alpha_g = \gamma_I \cdot \alpha_{gR} \quad (8.2)$$

όπου:

α_g η επιτάχυνση σχεδιασμού εδάφους

α_{gR} η επιτάχυνση εδάφους

γ_I ο συντελεστής σπουδαιότητας

- **Εύρεση συντελεστή απόσβεσης n**

Υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση 8.3:

$$n = \sqrt{\frac{10}{5+\zeta}} \geq 0.55 \quad (8.3)$$

όπου:

n ο συντελεστής απόσβεσης κατασκευής

ζ η απόσβεση της κατασκευής (βλ. Σχήμα 69)

Είδος Κατασκευής		ζ%
Μεταλλική:	με συγκολλήσεις	2
	με κοχλιώσεις	4
Σκυρόδεμα:	άοπλο	3
	οπλισμένο	5
	προεντεταμένο	4
Τοιχοποιία:	οπλισμένη	6
	διαζωματική	5
Ξύλινη:	κολλητή	4
	κοχλιωτή	4
	ηλωτή	5

Σχήμα 69 : Πίνακας υπολογισμού απόσβεσης κατασκευής

- **Εύρεση μέγιστης επιτάχυνσης κατασκευής στην οριζόντια διεύθυνση**

Υπολογίζεται από τις πιο κάτω σχέσεις (Σχήμα 70) αναλόγως της ιδιοπεριόδου της κατασκευής:

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_B$$

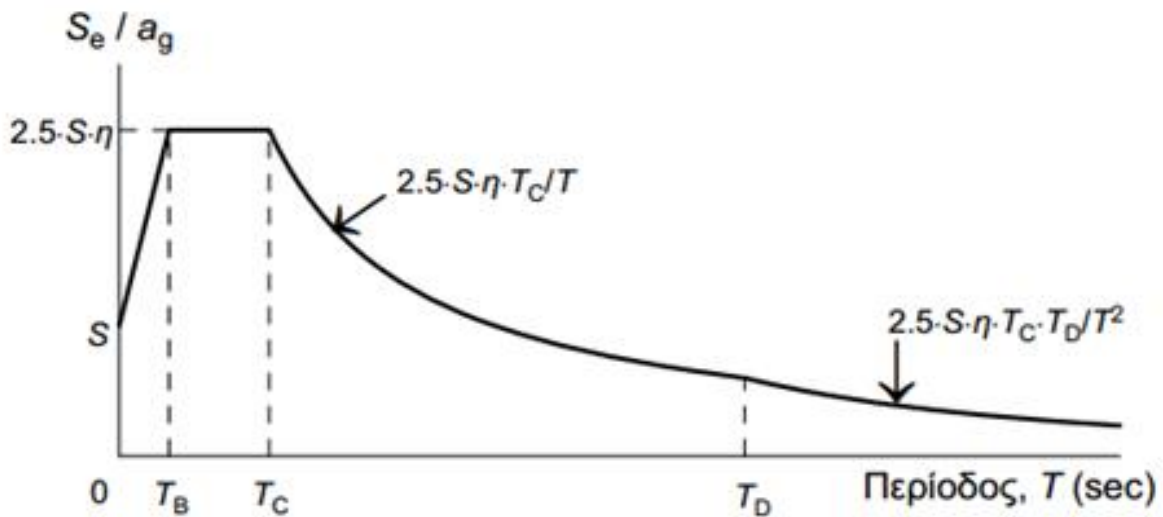
$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \quad \text{για } T_B \leq T \leq T_C$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C}{T} \quad \text{για } T_C \leq T \leq T_D$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \quad \text{για } T_D \leq T \leq 4\text{sec}$$

Σχήμα 70 : Σχέσεις υπολογισμού μέγιστης επιτάχυνσης κατασκευής

Παρ/ση: Στο εν λόγω παράδειγμα εφαρμογής όπου σκοπός είναι η ποιοτική σύγκριση μεταξύ των σεισμικών φορτίων που δέχονται οι τρεις εναλλακτικές κατασκευές, δεν υπολογίζεται αναλυτικά η ιδιοπερίοδος της κατασκευής και γίνεται η παραδοχή ότι η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση της κατασκευής προκύπτει από τη 2^η σχέση του Σχήματος 70. Η εν λόγω οριζόντια επιτάχυνση κατασκευής αποτελεί και τη δυσμενέστερη τιμή όπως φαίνεται και στο πιο κάτω διάγραμμα σεισμικού φάσματος επιτάχυνσης της κατασκευής (Σχήμα 71).



Σχήμα 71 :Σεισμικό φάσμα επιτάχυνσης κατασκευής

- **Εύρεση οριζόντιου σεισμικού φορτίου**

Το οριζόντιο σεισμικό φορτίο στη κατασκευή προκύπτει από τη σχέση 8.4:

$$P = M_{\text{κατ}} * S_e \quad (8.4)$$

όπου:

P το οριζόντιο σεισμικό φορτίο

$M_{\text{κατ}}$ η συνολική μάζα της κατασκευής

S_e η μέγιστη επιτάχυνση κατασκευής στην οριζόντια διεύθυνση

Παρ/ση: Για τον υπολογισμό του σεισμικού φορτίου στη κάθε κατασκευή όπως παρουσιάζεται πιο κάτω, γίνεται η παραδοχή ότι η κατασκευή λειτουργεί σαν μονοβάθμιος ταλαντωτής.

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας υπολογισμού του οριζόντιου σεισμικού φορτίου που ασκείται στη κατασκευή με φορέα έδρασης πυλώνα σκυροδέματος δίνονται στο πίνακα του Σχήματος 72:

	S	1.40
	$agR(m/s^2)$	2.35
	γ_i	1.40
	$ag(m/s^2)$	3.30
	$\zeta(\%)$	4.00
	η	1.05
	$Se(m/s^2)$	12.16
	$Ned(kN)$	23585.00
	$Mκατ(tn)$	2404.18
	$P(kN)$	29236.27

Σχήμα 72: Πίνακας υπολογισμού σεισμικού φορτίου στη κατασκευή με φορέα έδρασης πυλώνα σκυροδέματος

Παρ/ση: Η κατασκευή αποτελείται από χαλύβδινο πυλώνα ανεμογεννήτριας και φορέα έδρασης από οπλισμένο σκυρόδεμα με αντίστοιχες τιμές απόσβεσης $\zeta=4\%$ και $\zeta=5\%$. Στο παράδειγμα εφαρμογής γίνεται για απλοποίηση της διαδικασίας η παραδοχή κοινής τιμής απόσβεσης $\zeta=4\%$.

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας υπολογισμού του οριζόντιου σεισμικού φορτίου που ασκείται στη κατασκευή με φορέα έδρασης χαλύβδινο μονό πυλώνα δίνονται στον πίνακα του Σχήματος 73:

S	1.40
agR(m/s²)	2.35
γi	1.40
ag(m/s²)	3.30
ζ(%)	4.00
η	1.05
Se(m/s²)	12.16
Ned(kN)	13833.00
Μικατ(tn)	1410.09
P(kN)	17147.56

Σχήμα 73: Πίνακας υπολογισμού σεισμικού φορτίου στη κατασκευή με φορέα έδρασης χαλύβδινο μονό πυλώνα

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας υπολογισμού του οριζόντιου σεισμικού φορτίου που ασκείται στη κατασκευή με φορέα έδρασης χαλύβδινο χωρικό δικτύωμα (Jacket) δίνονται στο πίνακα του Σχήματος 74:

S	1.40
agR(m/s²)	2.35
γi	1.40
ag(m/s²)	3.30
ζ(%)	4.00
η	1.05
Se(m/s²)	12.16
Ned(kN)	10595.00
Μικατ(tn)	1080.02
P(kN)	13133.70

Σχήμα 74: Πίνακας υπολογισμού σεισμικού φορτίου στη κατασκευή με φορέα έδρασης χαλύβδινο χωρικό δικτύωμα (Jacket)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία όπως προαναφέρθηκε με τη χρήση ενός παραδείγματος εφαρμογής μελετήθηκαν οι διάφοροι πιθανοί τύποι θεμελίωσης μίας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας για δύο πιθανούς σχηματισμούς στη περιοχή της Λήμνου. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το εν λόγω παράδειγμα εφαρμογής μπορούν τελικά να γενικευθούν και να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης.

Στη περίπτωση επιφανειακής θεμελίωσης και κατά τον έλεγχο φέρουσας ικανότητας του πέδιλου ο συντελεστής ασφαλείας για τον αμμώδη σχηματισμό είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από το συντελεστή ασφαλείας για τον αργιλικό σχηματισμό. Όσο αφορά τη θεμελίωση με πασσάλους τόσο στη περίπτωση του μονού πυλώνα όσο και του jacket, το απαιτούμενο μήκος έμπηξης έτσι ώστε να πληρείται ο έλεγχος φέρουσας ικανότητας του πασσάλου σε κατακόρυφη φόρτιση για τον αμμώδη σχηματισμό είναι μικρότερο σε σχέση με το μήκος έμπηξης για τον αργιλικό σχηματισμό. Από την άλλη κατά τον έλεγχο φέρουσας ικανότητας του πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση, η τιμή του οριακού οριζόντιου φορτίου θραύσης είναι μεγαλύτερη στη περίπτωση παρουσίας αργιλικού στρώματος.

Επιπρόσθετα όπως έχει ήδη προαναφερθεί το βάθος του νερού στο σημείο εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους θεμελίωσης και αυτά σε συνδυασμό με το κόστος κατασκευής αποτελούν τους τις σημαντικότερες παραμέτρους κατά την επιλογή του κατάλληλου τύπου θεμελίωσης. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμογής δεν έχει γίνει ανάλυση κόστους για τη μεταφορά και κατασκευή των ανωτέρω φορέων έδρασης της ανεμογεννήτριας και της θεμελίωσης τους, παρόλα αυτά κρίνεται ότι το βάθος εγκατάστασης στη περίπτωση της επιφανειακής θεμελίωσης είναι αρκετά μεγάλο που δεν την καθιστά ως τη πλέον οικονομική λύση. Αυτό σε συνδυασμό με την παρουσία μαλακών στρωμάτων (όπως είναι η άμμος και η άργιλος) ευνοεί τη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας μέσω εμπυγνύμενων πασσάλων. Τόσο το monopile όσο και το jacket προτείνονται για αυτής της τάξης βάθη οπότε και αποτελούν τις επικρατέστερες λύσεις.

Τέλος λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του υπολογισμού των εντατικών μεγεθών στον πυθμένα και για τους τρεις φορείς έδρασης εύκολα συμπεραίνουμε ότι το jacket αποτελεί τον πιο ελαφρύ από τους τρεις φορείς έδρασης. Επίσης η οριζόντια δύναμη και η ροπή λόγω υδροδυναμικών φορτίων που ασκούνται στη κατασκευή είναι κατά πολύ μικρότερες από τα αντίστοιχα μεγέθη της κατασκευής με φορέα έδρασης μονού πυλώνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

(Α) ΒΙΒΛΙΑ

- A.1.Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines**– Germanicher Lloyd, Edition 2005
- A.2.Dynamics of Offshore Structures** – Minoos H Patel , January 1989
- A.3.Gründung von Offshore-Windenergieanlagen – Entscheidungshilfen für Entwurf und Bemessung**– Kerstin Lesny , August 2008
- A.4.Σημειώσεις θεμελιώσεων τεχνικών έργων** – Μ. Καββαδά , 2005
- A.5.Θαλάσσια υδραυλική** – Κ.Ι. Μουτζούρη, 2009
- A.6. Θεμελιώσεις Τεχνικών Έργων**- Καββαδάς Μ., Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου, 2008
- A.7. Επιφανειακές Θεμελιώσεις και Θεμελιώσεις με Πασσάλους** – Α.Γ. Αναγνωστόπουλος, Β.Π. Παπαδόπουλος , 2011
- A.8. Σιδηρές κατασκευές– Ανάλυση και διαστασιολόγηση** – Βάγιας Ιωάννης Κ , 2003

(Β) ΑΡΘΡΑ – ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

- B.1. ΦΟΡΤΙΑ, ΑΝΑΛΥΣΗ, ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ** - Ανδρέας Μπέντας, 2013
- B.2.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΚΥΜΑΤΑ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΕΔΡΑΣΗΣ ΠΛΩΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΤΟΥ MORISON**– Κ.Μακρή , 2013
- B.3.ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ, ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ**– Λιανός Νικόλαος , 2011
- B.4.ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ Ι** – Παναγόπουλος Γεώργιος, Κίρτας Εμμανουήλ, Νοέμβριος 2005

(Γ) ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΣ ΧΩΡΟΣ

Γ.1 <http://en.wikipedia.org/wiki/Lemnos>

Γ.2 <https://www.google.com/earth/>

Γ.3 <http://www.startupgreece.gov.gr/>

Γ.4 http://www.hnms.gr/hnms/greek/index_html

Γ.5 http://library.tee.gr/digital/m2546/m2546_hatziannelis.pdf

Γ.6 http://en.wikipedia.org/wiki/Airy_wave_theory

Γ.7 http://lee.civil.ntua.gr/pdf/mathimata/antiseismiki_texnologia_2/simeioseis/EC8.pdf

Γ.8 <http://www.oasp.gr/userfiles/EAK2000.pdf>

Γ.9 <http://www.oasp.gr/node/87>

