

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Π.Μ.Σ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

ΑΡΧΕΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

υπό

ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΥ ΤΑΓΚΑ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού
2019

© 2019 Ελευθέριος Τάγκας

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου
Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Αντιγόνη Βράννα
Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής εργασίας μου, Λέκτορα Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή Δρ. Γεώργιο Εφραιμίδη και Δρ. Πολιτικό Μηχανικό Αντιγόνη Βράννα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύ σημαντικές υποδείξεις τους. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Θεόδωρο και Αφροδίτη Τάγκα και στην αδερφή μου Γλυκερία Τάγκα για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένεια μου.

Ελευθέριος Τάγκας

ΑΡΧΕΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2019

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου, Λέκτορας

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT.....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1. Η αιολική ενέργεια.....	13
1.1.1. Ενεργειακό ζήτημα στην Ελλάδα	14
1.1.2. Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα	15
1.1.3. Αιολική ενέργεια στην Ευρώπη	18
1.1.4. Αιολική ενέργεια στην Αμερική.....	19
1.1.5. Αιολική ενέργεια σε άλλες χώρες (π.χ. Κίνα).....	19
1.1.6. Το μέλλον και οι προοπτικές της αιολικής ενέργειας.....	19
1.1.7. Ο ρόλος του Πολιτικού Μηχανικού στο σχεδιασμό και την κατασκευή ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων.....	20
1.2. Αντικείμενο, σκοπός και οργάνωση της διπλωματικής εργασίας.....	22
1.2.1. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	22
1.2.2. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	23
1.2.3. Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας.....	23
2. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	25
2.1. Ιστορικά στοιχεία.....	25
2.1.1. Αρχαιότητα	25
2.1.2. Πρώιμος Μεσαίωνα-Μέση Ανατολή	25
2.1.3. Οι πρώτοι ανεμόμυλοι στην Ευρώπη	26
2.1.4. Ο ελληνικός ανεμόμυλος	27
2.1.5. Η γένεση της ανεμογεννήτριας	28
2.2. Αρχές φυσικής του ανέμου	33

2.2.1.	Η Γένεση των ανέμων στη γη.....	33
2.2.2.	Χαρακτηριστικά του ανέμου	34
2.2.3.	Δυνάμεις δημιουργίας των ανέμων.....	36
2.2.4.	Είδη ανέμων.....	37
2.3.	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο – Αρχές φυσικής και αρχές λειτουργίας των ανεμογεννητριών – Αεροδυναμική Ανάλυση	45
2.3.1.	Ταχύτητα του ανέμου.....	45
2.3.2.	Συντελεστής απόδοσης ανεμογεννήτριας-Το όριο Betz	51
2.3.3.	Αντωση (Lift Force) και Αντίσταση (Drag Force) πτερυγίων.....	54
2.3.4.	Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου.....	57
2.3.5.	Μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος και βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου.....	58
2.3.6.	Μέγιστη παραγόμενη ισχύς	60
2.3.7.	Γωνία βήματος πτερυγίου.....	61
2.3.8.	Απώλεια στήριξης.....	62
2.3.9.	Οριακές ταχύτητες ανέμου στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας.....	63
2.3.10.	Αδυναμίες ανεμογεννητριών στην «παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	64
2.4.	Τύποι ανεμογεννητριών	64
2.5.	Ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα.....	65
2.5.1.	Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα	66
2.5.2.	Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.....	68
2.6.	Δομή ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα.....	70
2.7.	Κριτήρια επιλογής θέσης κατασκευής ανεμογεννήτριας	76
2.8.	Επίδραση στο περιβάλλον.....	77
2.9.	Θεσμικό πλαίσιο. Εθνική & Ευρωπαϊκή πολιτική.....	80
2.10.	Οικονομικά στοιχεία.....	84
3.	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	86
3.1.	Θεμελίωση χερσαίων (on shore) ανεμογεννητριών	86
3.1.1.	Επιφανειακή θεμελίωση	86
3.1.2.	Θεμελίωση με πασσάλους.....	88
3.2.	Θεμελίωση υπεράκτιων (off shore) ανεμογεννητριών.....	91
3.2.1.	Κατασκευές σταθερής έδρασης	91
3.2.2.	Πλωτές-αγκυρωμένες κατασκευές.....	99
4.	ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ.....	105
4.1.	Κανονιστικό πλαίσιο	105
4.2.	Ίδιο βάρος.....	105
4.3.	Άνεμος.....	106
4.4.	Λειτουργία ανεμογεννήτριας	116

4.5. Θαλάσσιοι κυματισμοί & ρεύματα	119
4.6. Πάγος	121
4.7. Σεισμός	122
5. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ	132
6. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΣΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ	138
6.1. Επιφανειακή θεμελίωση.....	138
6.2. Θεμελίωση με πασσάλους.....	162
7. ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΡΕΥΝΕΣ – ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ.....	178
8. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΟΠΑΣΣΑΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΥΠΕΡΚΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΓΕΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΑΡΓΙΑΙΚΑ ΕΔΑΦΗ – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ (CASE STUDY)	202
8.1. Παραδοχές σχεδιασμού.....	202
8.2. Αποτελέσματα.....	208
8.3. Συμπεράσματα.....	219
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	221
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	223

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν ένα πολύ σημαντικό μέσο για την «παραγωγή» ενέργειας καθώς συμβάλουν στην επίλυση του παγκοσμίου ενεργειακού προβλήματος αλλά ταυτόχρονα αποτελούν μια λύση για παραγωγή ενέργειας άκρως φιλική προς το περιβάλλον. Οι ανεμογεννήτριες αποτελούν την κορωνίδα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ο βασικός τους διαχωρισμός γίνεται ανάλογα τη θέση εγκατάστασης τους, σε χερσαίες ανεμογεννήτριες και υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Επιπρόσθετος διαχωρισμός γίνεται ανάλογα τον άξονα περιστροφής των πτερυγίων, τρόπο εγκατάστασης και θεμελίωσης κλπ. Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι περιοχές εγκατάστασης των ανεμογεννητριών επιλέγονται βάση του πλούσιου αιολικού δυναμικού τους και όχι την ποιότητα του εδάφους, τυχαίνει αυτές οι περιοχές να παρουσιάζουν δυσμενής καταστάσεις θεμελίωσης. Για αυτό το λόγο είναι επιτακτική η ανάγκη του σωστού γεωτεχνικού σχεδιασμού και της επιλογής της κατάλληλης θεμελίωσης.

ABSTRACT

Renewable energy sources are a very important mean of «producing» energy as it helps to solve the global energy problem but at the same time it is a solution for environmentally friendly energy production. Wind turbines constitute the crown of renewable energy sources and their basic separation is made according to their location, onshore wind turbines and offshore wind turbines. Additional separation is made depending on the axis of rotation of the fins, the way of installation and foundation, etc. Due to the fact that, the areas of installation of the wind turbines are selected on the basis of their rich wind potential and not the quality of the soil, these areas present unfavorable foundation situations. For this reason, it is necessary to have the appropriate geotechnical design and the choice of the appropriate foundation.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Κατευθύνσεις μόνιμων πλανητικών ανέμων ((www.hmga.gr))	40
Πίνακας 2.2 Οι πραγματικές κατευθύνσεις των μόνιμων πλανητικών ανέμων (www.hmga.gr)	41
Πίνακας 2.3 Τιμές τραχύτητας ανάλογα την κατηγορία εδάφους (ape.chania.teicrete.gr)	50
Πίνακας 2.4 Ταξινόμηση μεγεθών ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα	70
Πίνακας 2.5 Βασικό νομοθετικό πλαίσιο-Χρονοδιάγραμμα έκδοσης άδειας (www.tee.gr)	89
Πίνακας 2.6 Τιμολόγιο MWh για ανεμογεννήτριες (Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΛΑΓΗΕ)	91
Πίνακας 4.1 Παράμετροι z_0 και z_{min} σύμφωνα με την τραχύτητα της περιοχής, EC1 Part:1-4	112
Πίνακας 4.2 Τυπικές τιμές κατανομής πίεσης για διάφορα εύρη του αριθμού Reynolds, EC1 Part:1-4	115
Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή πάγου $f_{u,c}$, Det Norske Veritas: Design of offshore wind turbine structures	128
Πίνακας 4.4 Κατηγορίες εδάφους κατά EC8	130
Πίνακας 4.5 Συντελεστής σπουδαιότητας κατασκευών κατά EC8	131
Πίνακας 4.6 Σεισμική επιτάχυνση εδάφους $A = \alpha * g$ κατά EC8	132
Πίνακας 4.7 Συντελεστές σπουδαιότητας κατά EC8	133
Πίνακας 4.8 Τιμές παραμέτρων που περιγράφουν τα συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης τύπου 1 κατά EC8	135
Πίνακας 4.9 Τιμές παραμέτρων που περιγράφουν τα συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης τύπου 2 κατά EC8	135
Πίνακας 4.10 Συνιστώμενες τιμές παραμέτρων που περιγράφουν τα φάσματα κατακόρυφης φασματικής απόκρισης κατά EC8	137
Πίνακας 5.1 Τιμές συντελεστή ασφαλείας υλικού γ_m κατά EC0	139
Πίνακας 5.2 Τιμές συντελεστή μόνιμων δράσεων γ_g κατά EC0	140
Πίνακας 5.3 Τιμές συντελεστή μεταβλητών δράσεων γ_q κατά EC0	140
Πίνακας 5.4 Τιμές συνδυαστικού συντελεστή δευτερευουσών μεταβλητών δράσεων κατά EC0	141
Πίνακας 6.1 Συντελεστές Φ.Ι κατά DIN 4017	147
Πίνακας 6.2 Συντελεστές μορφής κατά DIN 4017 – τετραγωνικό θεμέλιο	147
Πίνακας 6.3 Τιμές Παραμέτρων	158
Πίνακας 6.4 Συντελεστές F_1 και F_2 (Κρίτας, 2010)	159
Πίνακας 6.5 Ελαστικές παράμετροι αμμωδών εδαφών (Das,1999)	166
Πίνακας 6.6 Ελαστικές παράμετροι αργιλικών εδαφών (Bowles,1997)	167
Πίνακας 6.7 Όρια επιτρεπτών καθιζήσεων (Bjerrum, 1963)	167
Πίνακας 6.8 Όρια επιτρεπτών καθιζήσεων (Barnes,2000)	168
Πίνακας 6.9 Τιμές συντελεστή ωθήσεων K σε πασσάλους	175
Πίνακας 6.10 Δείκτης εδάφους k κατά Broms για συνεκτικά εδάφη	182
Πίνακας 7.1 Εφαρμογές επι τόπου συνθηκών για φάσεις έργου υπεράκτιου αιολικού πάρκου (Westgate and DeJong, 2005)	185
Πίνακας 7.2 Πρόγραμμα υπεράκτιας διερεύνησης	187

Πίνακας 8.1 Γεωμετρία πασσάλων	209
Πίνακας 8.2 Γεωτεχνικές ιδιότητες αργίλων.....	212
Πίνακας 8.3 Μέγιστα φορτία εφαρμογής.....	213

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Ακαθάριστη κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα 1990-2015 (www.district-energy.gr).....	15
Σχήμα 1.2 Εγκαταστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα 1997-2017 (www.ewea.org).....	18
Σχήμα 1.3 Εγκαταστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας το 2017 (www.ewea.org).....	18
Σχήμα 1.4 Αιολικό δυναμικό της Ελλάδας (www.energyproject.gr).....	19
Σχήμα 1.5 Παραγόμενη αιολική ισχύς ανά τον κόσμο (www.wwindea.org).....	21
Σχήμα 2.1 Μηχανή του Ήρωνα (egpaid.blogspot.com).....	26
Σχήμα 2.2 Περσικός ανεμόμυλος τύπου κάθετου άξονα (www.amusingplanet.com).....	27
Σχήμα 2.3 Ευρωπαϊκός ανεμόμυλος 15 ^{ου} -16 ^{ου} αιώνα (www.atlasobscura.com).....	28
Σχήμα 2.4 Κλασικός ελληνικός ανεμόμυλος (www.123rf.com).....	29
Σχήμα 2.5 Η ανεμογεννήτρια του James Blyth, η πρώτη στον κόσμο (www.wikipedia.com).....	30
Σχήμα 2.6 Η ανεμογεννήτρια αυτόματης λειτουργίας του Charles F. Brush (www.cleantechnica.com).....	31
Σχήμα 2.7 Ανεμογεννήτρια της Porsche (Πανίδης, 2013).....	32
Σχήμα 2.8 Η πρωτοποριακή ανεμογεννήτρια 200 KW του Johannes Juul (www.drømstørre.dk).....	33
Σχήμα 2.9 Ανεμογεννήτρια μάρκας Bonus με ισχύ 30 KW δεκαετίας 1980 (www.slideshare.net).....	33
Σχήμα 2.10 Η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια στον κόσμο (www.pinterest.com).....	34
Σχήμα 2.11 Εξέλιξη μεγέθους ανεμογεννητριών με το πέρασμα του χρόνου (www.researchgate.net).....	34
Σχήμα 2.12 Σχηματική απεικόνιση διεύθυνσης ανέμου.....	36
Σχήμα 2.13 Πορεία ανέμων στον πλανήτη Γη (www.hmga.gr).....	40
Σχήμα 2.14 Κυκλωνικός άνεμος (www.hmga.gr).....	42
Σχήμα 2.15 Αντικυκλωνικός άνεμος (www.hmga.gr).....	42
Σχήμα 2.16 Θαλάσσια αύρα (www.hmga.gr).....	43
Σχήμα 2.17 Απόγειος αύρα (www.hmga.gr).....	44
Σχήμα 2.18 Αύρα της κοιλάδας (www.hmga.gr).....	44
Σχήμα 2.19 Αύρα του βουνού (www.hmga.gr).....	45
Σχήμα 2.20 Κατεβατός άνεμος (www.hmga.gr).....	46
Σχήμα 2.21 Διεύθυνση σπουδαιότερων τοπικών ανέμων.....	46
Σχήμα 2.22 Επίδραση εμποδίων στο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου (ape.chania.teicrete.gr).....	50
Σχήμα 2.23 Επίδραση της τραχύτητας στο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου (ape.chania.teicrete.gr).....	51
Σχήμα 2.24 Κατανομή Weibull για διάφορους παραμέτρους μορφής περιοχής k και παράμετρο κλίμακας c=1 (www.wikipedia).....	53
Σχήμα 2.25 Σωλήνας ροής ανεμογεννήτριας (Κοπελιάς, 2014).....	55
Σχήμα 2.26 Διάγραμμα δυνάμεων και ταχυτήτων σε τμήμα πτερυγίου ανεμογεννήτριας (Κάραλης, 2013).....	57

Σχήμα 2.27 Διάγραμμα του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος με τον λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου (Αλεξανδρίδης, 2010).....	60
Σχήμα 2.28 Διάγραμμα του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p με τον λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου λ , για διαφορετικές γωνίες βήματος περυγίου, β	62
Σχήμα 2.29 Βασικοί τύποι ανεμογεννητριών (www.saltireserver.com)	67
Σχήμα 2.30 Τύποι ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα	68
Σχήμα 2.31 Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα τύπου Savonius (www.mwps.world).....	70
Σχήμα 2.32 Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα τύπου Darrieus (www.researchgate.net).....	71
Σχήμα 2.33 Δομή ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (www.e-education.psu.edu)...	73
Σχήμα 2.34 Πύργος ανεμογεννήτριας κυλινδρικού τύπου και δικτυωτού τύπου (www.windfarmbop.com)	75
Σχήμα 2.35 Εσωτερικό πύργου ανεμογεννήτριας (www.windfarmbop.com)	76
Σχήμα 2.36 Άτρακτος ανεμογεννήτριας (www.researchgate.net)	76
Σχήμα 2.37 Πλήμνη ανεμογεννήτριας (www.pinterest.com).....	77
Σχήμα 2.38 Τρόπος περιστροφής περυγίων (www.researchgate.net).....	78
Σχήμα 2.39 Μηχανικό φρένο ανεμογεννήτριας (www.wikipedia.com)	79
Σχήμα 3.1 Εργασίες κατασκευής επιφανειακού θεμελίου (www.buildipedia.com) ...	94
Σχήμα 3.2 Επιφανειακή θεμελίωση και θεμελίωση βαρύτητας (www.astanks.com) .	94
Σχήμα 3.3 Κατηγοριοποίηση πασσάλων με βάση το μηχανισμό μεταφοράς των φορτίων στο περιβάλλον έδαφος: (α) πάσσαλοι τριβής, (β), (γ), (δ) πάσσαλοι αιχμής	96
Σχήμα 3.4 Εργασίες κατασκευής πασσάλων (www.civiltoday.com).....	96
Σχήμα 3.5 Θεμελίωση βαρύτητας (gravity based) (www.4coffshore.com)	98
Σχήμα 3.6 Μεταλλικός πύργος (jacket) (www.4coffshore.com)	99
Σχήμα 3.7 Μονός πυλώνας (monopile) (www.4coffshore.com).....	101
Σχήμα 3.8 Τρόποι εγκατάστασης μονοπάσσαλου (www.4coffshore.com).....	101
Σχήμα 3.9 Τριπλός πυλώνας (triple pile) (www.4coffshore.com)	102
Σχήμα 3.10 Τρίποδο (tripod) (www.4coffshore.com).....	103
Σχήμα 3.11 Πόντιση κατασκευής με έδραση κενού/αναρροφήσεως (www.4coffshore.com).....	105
Σχήμα 3.12 Spar buoy (www.4coffshore.com)	106
Σχήμα 3.13 Semi-submersible (www.4coffshore.com).....	108
Σχήμα 3.14 Tension leg platform (www.4coffshore.com).....	109
Σχήμα 4.1 Κατεύθυνση πρόσπτωσης ανέμου	112
Σχήμα 4.2 Κατηγορίες τραχύτητας, EC1 Part:1-4.....	113
Σχήμα 4.3 Διάγραμμα ψ_l σε συνάρτηση με τη λυγηρότητα λ και συντελεστή πληρότητας ϕ , EC1 Part:1-4.....	115
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα συντελεστή C_{p0} -γωνίας ανέμου, EC1 Part:1-4.....	116
Σχήμα 4.5 Γεωμετρικές παράμετροι πύργου.....	120
Σχήμα 4.6 Μεταβολή του συντελεστή δύναμης C_D με την ισοδύναμη τραχύτητα k/b , EC1 Part:1-4.....	121
Σχήμα 4.7 Αδιάστατη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας, EC1 Part:1-4.....	122
Σχήμα 4.8 Συντελεστής διεύρυνσης, Det Norske Veritas: Design of offshore wind turbine structures.....	127

Σχήμα 4.9 Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδος (ΕΑΚ 2003).....	132
Σχήμα 4.10 Μορφή ελαστικού φάσματος κατά EC8	134
Σχήμα 4.11 Συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης Τύπου 1 για κατηγορίες εδάφους Α έως Ε (5% απόσβεση) κατά EC8	136
Σχήμα 4.12 Συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης Τύπου 1 για κατηγορίες εδάφους Α έως Ε (5% απόσβεση) κατά EC8	136
Σχήμα 6.1 Πιέσεις επαφής θεμελίου για έκκεντρη φόρτιση (Παναγιώτου, 2003).....	146
Σχήμα 6.2 Βάθος επιρροής επιβαλλόμενων τάσεων (Καββαδάς, 2005).....	152
Σχήμα 6.3 Διάγραμμα υπολογισμού J_s (Γραμματικόπουλος, 1994).....	153
Σχήμα 6.4 Διάγραμμα υπολογισμού $J_{s,c}$ (Γραμματικόπουλος, 1994).....	154
Σχήμα 6.5 Καθιζήσεις επιφανειακής θεμελίωσης (Κρίτας,2010)	156
Σχήμα 6.6 Διάγραμμα υπολογισμού I_z (Κρίτας, 2010).....	157
Σχήμα 6.7 Νομογράφημα υπολογισμού I_F (Κρίτας, 2010).....	160
Σχήμα 6.8 Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή μ_0 (Καββαδάς,2005).....	162
Σχήμα 6.9 Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή μ_1 (Καββαδάς, 2005).....	162
Σχήμα 6.10 Διάγραμμα προσδιορισμού περίπτωσης στερεοποίησης (Μαραγκός,2009)	165
Σχήμα 6.11 Διάγραμμα προσδιορισμού βαθμού στερεοποίησης U (Μαραγκός, 2009)	165
Σχήμα 6.12 Συντελεστές φέρουσας ικανότητας κατά Terzaghi (www.civilfoundation.com)	171
Σχήμα 6.13 Πάσσαλοι εμπηγνυόμενοι σε μαλακή άργιλο: Συσχέτιση συνάφειας πασσάλου, fs και βάθους (http://users.ntua.gr/kavvadas/Books/Foundations/08b-piles.pdf)	173
Σχήμα 6.14 Διάγραμμα υπολογισμού οριζόντιου οριακού φορτίου κοντών πασσάλων σε συνεκτικό έδαφος (Παναγιώτου, 2003).....	178
Σχήμα 6.15 Διάγραμμα υπολογισμού οριζόντιου οριακού φορτίου μακρών πασσάλων σε συνεκτικό έδαφος (Παναγιώτου, 2003).....	180
Σχήμα 6.16 Μηχανισμοί θράυσεως με πακτωμένη κεφαλή σε συνεκτικό έδαφος α) Κοντών β) Ενδιάμεσων γ) Μακρών (Παναγιώτου, 2003).....	180
Σχήμα 6.17 Απλουστευτική κατανομή φορτίων σε ομάδα πασσάλων (https://slideplayer.gr/slide/2770296/).....	183
Σχήμα 8.1 3D Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.....	210
Σχήμα 8.2 K_c για αργίλους	211
Σχήμα 8.3 Τριβή διεπαφής μ πασσάλου-αργίλου	212
Σχήμα 8.4 Προφίλ καμπικής ροπής για πασσάλους μικρής διαμέτρου για μέγιστο πλευρικό φορτίο	216
Σχήμα 8.5 Προφίλ καμπικής ροπής για πασσάλους μεγάλης διαμέτρου για μέγιστο πλευρικό φορτίο	216
Σχήμα 8.6 α) r-peak συναρτήσει της διαμέτρου του πασσάλου β) x-peak συναρτήσει της διαμέτρου του πασσάλου	217
Σχήμα 8.7 Προφίλ διατμητικής δύναμης για πασσάλους μικρής διαμέτρου για μέγιστο πλευρικό φορτίο	218
Σχήμα 8.8 Προφίλ διατμητικής δύναμης για πασσάλους μεγάλης διαμέτρου για μέγιστο πλευρικό φορτίο.....	219

Σχήμα 8.9 Προφίλ πλευρικής μετατόπισης για πασσάλους μικρής διαμέτρου για μέγιστο πλευρικό φορτίο.....	221
Σχήμα 8.10 Προφίλ πλευρικής μετατόπισης για πασσάλους μεγάλης διαμέτρου για μέγιστο πλευρικό φορτίο.....	222
Σχήμα 8.11 Παραμορφωμένο σχήμα πασσάλου ($C_u=50\text{kPa}$)	222
Σχήμα 8.12 Εδαφική τάση κατά μήκος του πασσάλου για μέγιστο πλευρικό φορτίο ($D=7.5\text{m}$, $c_u=50\text{kPa}$).....	223
Σχήμα 8.13 Πλαστική παραμόρφωση εδάφους κατά μήκος του πασσάλου για μέγιστο πλευρικό φορτίο ($D=7.5\text{m}$, $c_u=50\text{kPa}$).....	223
Σχήμα 8.14 Εδαφική τάση κατά μήκος του πασσάλου για μέγιστο πλευρικό φορτίο ($D=2.0\text{m}$, $c_u=50\text{kPa}$).....	224
Σχήμα 8.15 Μηχανισμοί παραμόρφωσης πασσάλων βασιζόμενοι στο κρίσιμο μήκος πασσάλου	225

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής άνοδος του πληθυσμού της Γης, η αύξηση των κατοίκων των πόλεων και η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχουν προκαλέσει ιδιαίτερα αυξημένη κατανάλωση ενεργειακών πόρων με κίνδυνο την πολυσυζητημένη εξάντληση των φυσικών πόρων/ορυκτών κοιτασμάτων.

1.1. Η αιολική ενέργεια

Τις τελευταίες δεκαετίες, το ενδιαφέρον για τα φαινόμενα κλιματικής αλλαγής όπως αυτό του Θερμοκηπίου, εξαιτίας των επιπτώσεων από των εκπομπών αερίων ρύπων στην ατμόσφαιρα, οδήγησε στην αναζήτηση καθαρών και «ήπιων» πηγών ενέργειας, όπως η αιολική. Αιολική ενέργεια ορίζεται ως η κινητική ενέργεια η οποία παράγεται από τη δύναμη του ανέμου, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε απολήψιμη μηχανική ενέργεια ή/και σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται ως «ήπια μορφή ενέργειας» και ανήκει στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής, καθώς ο άνεμος ως «καύσιμο» είναι άφθονος σε πολλές περιοχές και δωρεάν. Επίσης, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η έκλυση αερίων και ρύπων κατά την εκμετάλλευση της ανανεώσιμης αυτής ενέργειας είναι μικρές συγκριτικά με τις επιπτώσεις των εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα. Τέλος, τα οικονομικά οφέλη από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας σε μια περιοχή είναι σημαντικά (Global Wind Energy Council, 2014).

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας επιτυγχάνεται με τη βοήθεια βιομηχανικών εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, γνωστές με τον όρο αιολικά πάρκα, και αποτελούνται από (α) τις ανεμογεννήτριες, (β) τα καλώδια μεταφοράς ρεύματος, (γ) τους μετεωρολογικούς ιστούς, (δ) τους σταθμούς μετασχηματισμού, (ε) τις βοηθητικές υποδομές.

Τα αιολικά πάρκα διαχωρίζονται σε χερσαία και υπεράκτια ανάλογα με την τοποθεσία τους.

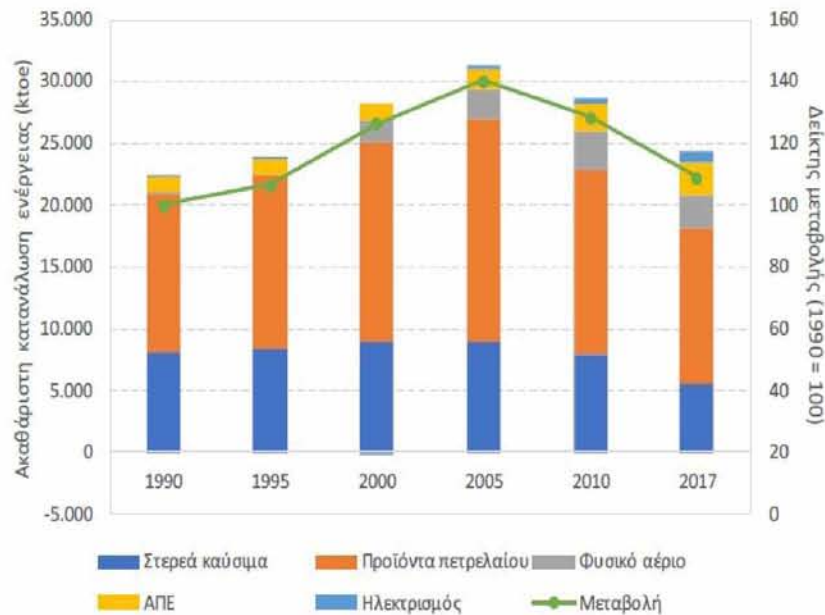
1.1.1. Ενεργειακό ζήτημα στην Ελλάδα

Στο πλαίσιο της οικονομίας, η ενέργεια αποτελεί έναν σημαντικό συντελεστή σε κάθε αναπτυσσόμενη οικονομική δραστηριότητα. Συνεπώς, ο τρόπος οργάνωσης, δόμησης, και ανάπτυξης του ενεργειακού συστήματος να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην οικονομική ανάπτυξη και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων.

Όσον αφορά την Ελλάδα, το ενεργειακό της σύστημα χαρακτηρίζεται σχετικά απομονωμένο σε σχέση με εκείνα των υπόλοιπων κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αποτελείται από μεγάλο αριθμό αυτόνομων νησιωτικών συστημάτων, μεγάλους ρυθμούς αύξησης της ζήτησης ενέργειας μέχρι την αρχή της οικονομικής κρίσης, καθώς και από σημαντική εξάρτηση από τις εισαγωγές συμβατικών καυσίμων. Το κύριο παραγόμενο ορυκτό καύσιμο της χώρας είναι ο λιγνίτης, ο οποίος χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ελλάδα, η ακαθάριστη κατανάλωση ενέργειας (Σχήμα 1.1) αυξήθηκε κατά 42,5% κατά τα έτη 1990 έως 2008, κατά το οποίο παρουσιάστηκε η υψηλότερη κατανάλωση (31,8 Mtoe). Μετέπειτα, κατά τα χρόνια της οικονομικής κρίσης, η κατανάλωση μειώθηκε. Το 2017 η κατανάλωση ήταν 24,4 Mtoe, στα επίπεδα των ετών 1995 με 2000 (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 2017).

Όπως προκύπτει και από τα παραπάνω, η ενεργειακή πολιτική της Ελλάδας, έως τώρα, είναι μη φιλική προς το περιβάλλον. Σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η συνολική αύξηση των εκπομπών καυσαερίων στην Ελλάδα, είναι η τέταρτη υψηλότερη στην Ευρώπη, με αύξηση 15% το διάστημα 1990-1998. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην Ελλάδα και που φθάνει το 93% προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο). Το υπόλοιπο

7% προέρχεται από τη συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Πεκόπουλος, 2000).



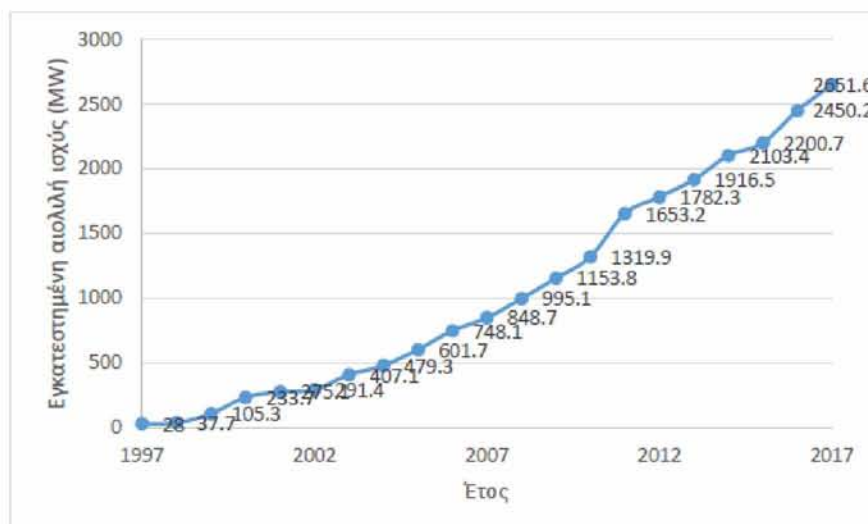
Σχήμα 1.1 Ακαθάριστη κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα 1990-2015 (www.district-energy.gr)

1.1.2. Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

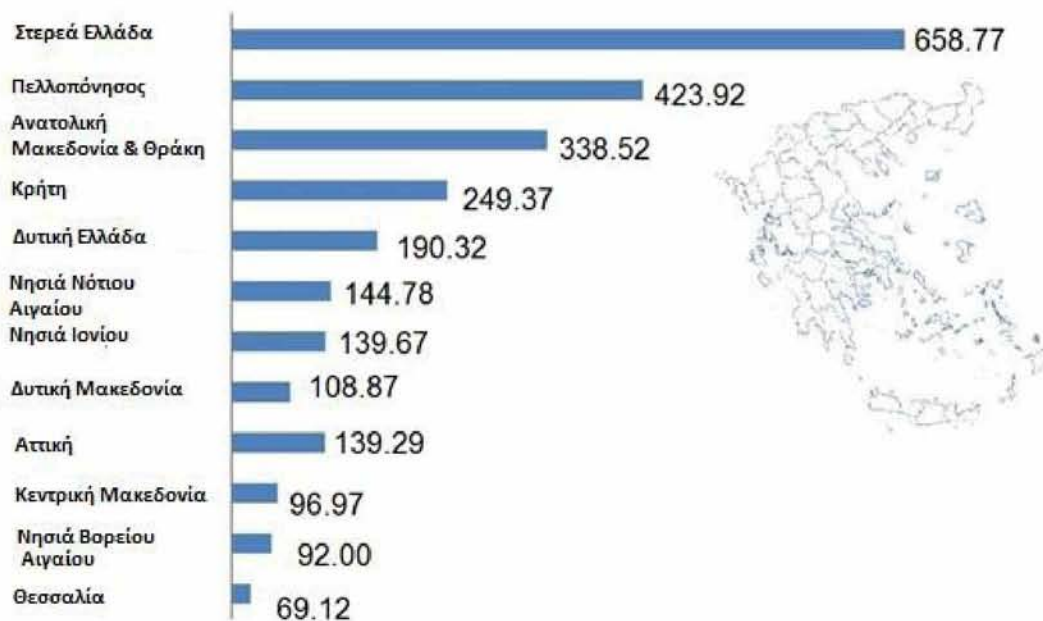
Στην Ελλάδα, εξαιτίας του εξαιρετικού αιολικού δυναμικού που τη χαρακτηρίζει και το οποίο μπορεί να υπερβεί τα 8 m/s ως μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου, η αιολική ενέργεια έχει πρωταγωνιστικό ρόλο μεταξύ των ΑΠΕ (Σχήμα 1.4). Ενδεικτικά αναφέρεται πως το 2017, η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων έφθασε τα 2651,6 MW (Σχήμα 1.2). Από αυτά, περίπου τα 376,42 MW χρησιμοποιήθηκαν στην παροχή ενέργεια στα μη διασυνδεδεμένα ελληνικά νησιά (Σχήμα 1.3). (www.enikonomia.gr). Σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (EWEA) για τα εγκατεστημένα αιολικά πάρκα, η Ελλάδα βρίσκεται στη δέκατη θέση της κατάταξης μεταξύ των 27 κρατών μελών της Ε.Ε. (www.ewea.org).

Ωστόσο, παρά την ανοδική εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας που καταγράφεται στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια (Σχήμα 1.2), συγκριτικά με το εξαιρετικό αιολικό δυναμικό της η αύξηση αυτή θεωρείται μικρή. Κύρια αίτια θεωρούνται τόσο το

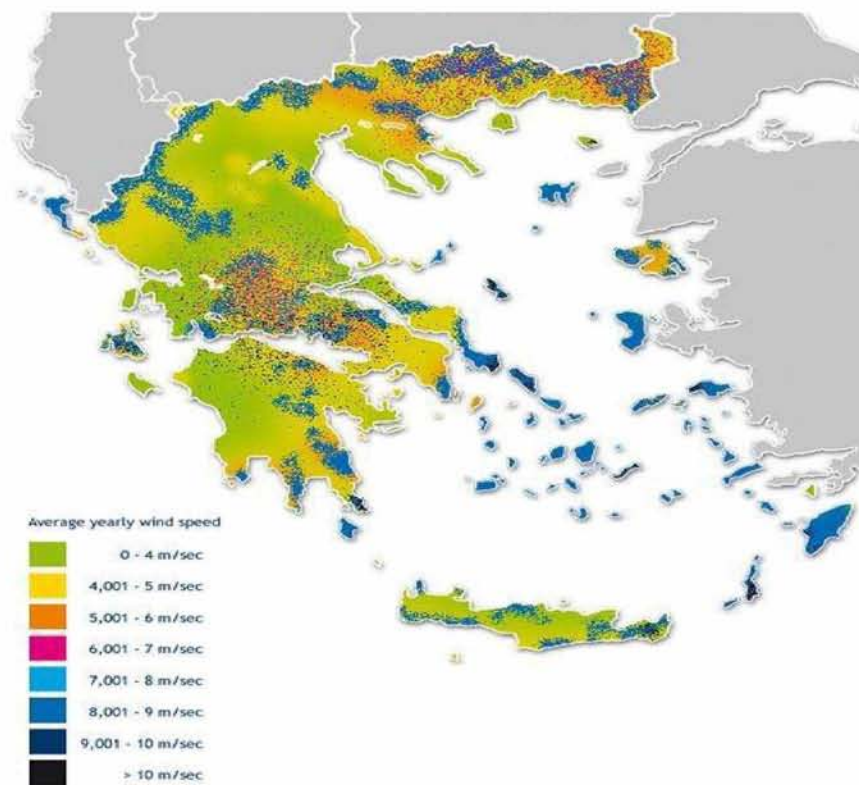
μονοπωλιακό όσο και το νομοθετικό καθεστώς της χώρας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2001. Οι νομοθετικές αλλαγές που ακολούθησαν στο χώρο της ηλεκτρικής ενέργειας και των ΑΠΕ προκάλεσαν την άνοδο στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή του συστήματος feed-in (υψηλές τιμές πώλησης της παραγόμενης ενέργειας) καθώς και το νέο νομοθετικό πλαίσιο προσφέρουν ικανοποιητικά κίνητρα για τους ενδιαφερόμενους επενδυτές και στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, ο στόχος των 3500MW εγκατεστημένης ισχύος ως στο τέλος του 2010 από την ηλεκτροπαραγωγή με τη χρήση αιολικής ενέργειας δεν επετεύχθη, καθώς έφθασε μόλις στα 1320 MW. Ο νέος στόχος έχει τεθεί ψηλά και αφορά σε εγκατεστημένη ισχύ 7500 MW μέχρι το τέλος του 2020. Τα στοιχεία μέχρι σήμερα δείχνουν αδυναμία εκπλήρωσης του στόχου κυρίως λόγω (α) της πολυπλοκότητας της αδειοδοτικής διαδικασίας, (β) των καθυστερήσεων στην έκδοση αδειών παραγωγής και εγκατάστασης των μονάδων, (γ) της αδυναμίας υποστήριξης πρόσθετης ισχύος από το δίκτυο σε αρκετές περιπτώσεις όπως ή Κρήτη και η Εύβοια, (δ) οι κοινωνικές αντιδράσεις για θέματα οπτικής όχλησης και προστασίας του περιβάλλοντος, και (ε) η έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού (Hatziaargyriou, 2006). Στην κατεύθυνση της επίλυσης των προβλημάτων αυτών λειτούργησε η δημιουργία των νόμων 3468/2006 και 3851/2010, με σημαντική απλοποίηση της διαδικασίας και της ταχύτητας αδειοδότησης ιδιαίτερα στο ζήτημα των περιβαλλοντικών όρων, χωρίς ωστόσο να εκλείψουν τα προβλήματα από τις συγκρουόμενες αρμοδιότητες των διαφόρων κρατικών υπηρεσιών (www.ypeka.gr). Επίσης, έχουν προγραμματιστεί έργα επέκτασης και ενίσχυσης του δικτύου μεταφοράς ρεύματος. Τα προβλήματα των κοινωνικών αντιδράσεων λόγω της οπτικής όχλησης ή για αισθητικούς λόγους δεν μπορούν ουσιαστικά να αντιμετωπιστούν λόγω της υποκειμενικής τους φύσης.



Σχήμα 1.2 Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα 1997-2017 (www.ewea.org)



Σχήμα 1.3 Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας το 2017 (www.ewea.org)



Σχήμα 1.4 Αιολικό δυναμικό της Ελλάδας (www.energyproject.gr)

1.1.3. Αιολική ενέργεια στην Ευρώπη

Η χρήση της αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη είναι ευρεία. Σύμφωνα με την EWEA, ο αριθμός των ανεμογεννητριών το 2017 ξεπέρασε τις 15,000 με συνολική απόδοση 169,957 MW. Η ισχύς αυτή επαρκεί για την κάλυψη του 6,3% του ηλεκτρισμού της Ε.Ε, υπό φυσιολογικές καιρικές συνθήκες. Τα στατιστικά στοιχεία σε ό,τι αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε. αναφέρουν πως το 10.5% αυτής καλύπτεται από την αιολική ενέργεια, με τις Γερμανία, Ισπανία και Γαλλία να έχουν την πρωτιά, ενώ η Δανία έχει το μεγαλύτερο ποσοστό (20%) βάσει του πληθυσμού της. Οι υπολογισμοί δηλώνουν πως το αιολικό δυναμικό της Ευρώπης επαρκεί για την κάλυψη όλων των αναγκών της. Σύμφωνα με την EWEA εκτιμάται πως μέχρι το τέλος του 2030 θα έχουν εγκατασταθεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση ανεμογεννήτριες με συνολική απόδοση 323 GW. (www.ewea.org).

1.1.4. Αιολική ενέργεια στην Αμερική

Σύμφωνα με την Αμερικανική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (AWEA), η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς στις ΗΠΑ το 2017 ήταν 88927 MW. Δεδομένου όμως ότι από το 2004 σταμάτησαν οι φορολογικές απαλλαγές, παρουσιάζεται σημαντική ύφεση στην εγκατάσταση νέων αιολικών πάρκων στις ΗΠΑ (www.awea.org).

1.1.5. Αιολική ενέργεια σε άλλες χώρες (π.χ. Κίνα)

Τέλος η Κίνα, ως μία μεγάλη οικονομική υπερδύναμη είναι πρώτη όσον αφορά την παραγόμενη αιολική ενέργεια, με 187730 MW συνολική παραγωγή αιολικής ενέργειας για το έτος 2017. Τα δημοσιευμένα στοιχεία της Παγκόσμιας Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (WWEA) αναδεικνύουν την Κίνα σε ηγετική δύναμη στον τομέα της αιολικής ενέργειας (με παραγωγή 50% της ηλεκτρικής), ενώ ακολουθούν οι ΗΠΑ και Γερμανία.

(Σχήμα 1.5)

Country/ Region	Total capacity end 2017	Added capacity 2017	Total capacity end 2016	Total capacity end 2015	Total capacity end 2014	Total capacity end 2013
China*	187730	19000	168730	148000	114763	91413
United States	88927	6894	82033	73867	65754	61108
Germany	56164	6145	50019	45192	40468	34658
Rest of the World*	48500	5600	42822	37522	32219	26493
India**	32879	4600	28279	24759	22465	20150
Spain	23026	6	23020	22987	22987	22959
United Kingdom	17852	3340	14512	13614	12440	10531
France	13760	1695	12065	10293	9296	8254
Brazil	12763	1963	10800	8715	5962	3399
Canada	12239	341	11898	11205	9694	7698
Italy*	9700	443	9257	8958	8663	8551
Turkey*	6981	900	6081	4718	3763	2958
Sweden*	6721	228	6493	6029	5425	4470
Poland*	6534	752	5782	5100	3834	3390
Denmark	5320	93	5227	5064	4883	4772
Portugal*	5316	0	5316	5050	4953	4724
Australia*	4879	553	4326	4186	3806	3049
Grand Total	539291	52552	486661	435259	371374	318577

Σχήμα 1.5 Παραγόμενη αιολική ισχύς ανά τον κόσμο (www.wwindea.org).

1.1.6. Το μέλλον και οι προοπτικές της αιολικής ενέργειας

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας σε χώρες με πλούσιο αιολικό δυναμικό, όπως η Ελλάδα, μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη της οικονομίας τους και να συμβάλλει στην προστασία του φυσικού περιβάλλοντος. Είναι λογικό λοιπόν να κερδίζει διαρκώς

θερμούς υποστηρικτές και να προκαλεί το επενδυτικό ενδιαφέρον, καθώς δεν αποτελεί μόνο καθαρή και φιλική προς το περιβάλλον μορφή ενέργειας, αλλά και μία οικονομική λύση για την «παραγωγή» ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης. Επίσης, συμβάλλει στην ενεργειακή ανεξαρτητοποίηση από άλλες χώρες και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.

Επιπρόσθετα, σε χώρες με υψηλή σεισμικότητα, όπως η Ελλάδα, η ικανοποίηση των κριτηρίων ασφαλείας υδροηλεκτρικών και πυρηνικών εγκαταστάσεων απαιτεί ιδιαίτερα συντηρητικό σχεδιασμό που συνεπάγεται αυξημένο οικονομικό κόστος. Επιπρόσθετα, οπουδήποτε ατύχημα σε πυρηνικό εργοστάσιο μπορεί να οδηγήσει σε ανεπανόρθωτες συνέπειες όπως για παράδειγμα το πυρηνικό ατύχημα στο Σταθμό Φουκοσίμα 1 το 2011. Συνεπώς συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας όπως τα αιολικά πάρκα συνιστώνται σε αυτές τις χώρες.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη εξεύρεσης νέων και πιο οικονομικών τρόπων κατασκευής, εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης αιολικών πάρκων. Συνεπώς η επιστημονική κοινότητα έρχεται αντιμέτωπη με βασικές τεχνολογικές προκλήσεις, όπως είναι η εξεύρεση πιο οικονομικών τρόπων στήριξης και θεμελίωσης ανεμογεννητριών, κατασκευή μεγαλύτερων ανεμογεννητριών, μείωση των αναπτυσσόμενων φορτίων, αύξηση της απόδοσης, μείωση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης.

1.1.7. Ο ρόλος του Πολιτικού Μηχανικού στο σχεδιασμό και την κατασκευή ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων

Ο ρόλος του πολιτικού μηχανικού στον τομέα της αιολικής ενέργειας είναι ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η συντήρηση των δομικών έργων, στα οποία στηρίζονται οι εγκαταστάσεις της αιολικής ενέργειας, όπως ο πυλώνας και τα θεμέλια των ανεμογεννητριών. Εμπλέκεται επίσης σε όλα τα στάδια των έργων από τη προκαταρκτική

μελέτη έως τον τελικό λεπτομερή σχεδιασμό όσον αφορά τόσο στα νέα έργα όσο και στην αναβάθμιση των υφιστάμενων εγκαταστάσεων και ως εκ τούτου περνάει τον χρόνο του μεταξύ των γραφείων σχεδιασμού/υποστήριξης και της επιτόπιας επίβλεψης της κατασκευής ή επιθεώρησης των υπαρχουσών εγκαταστάσεων. Το επάγγελμα του πολιτικού μηχανικού στον τομέα της αιολικής ενέργειας απαιτεί εκτέλεση εργασιών σε μία υψηλής ποιότητας πολυτομεακή ομάδα μηχανικών και τεχνολόγων. Απαιτούνται συνεπώς ανεπτυγμένες δεξιότητες επικοινωνίας και διαπροσωπικά προσόντα όπως π.χ. ικανότητα αποτελεσματικής επικοινωνίας με τα μέλη της ομάδας και άσκηση επιρροής στις πράξεις τους. Επίσης απαιτούνται καλή ικανότητα τήρησης του προγράμματος ώστε να εκτελούνται τα έργα χωρίς να ξεφεύγουν από τον οικονομικό προϋπολογισμό και εντός του καθορισμένου χρονοδιαγράμματος. Επιπλέον είναι απαραίτητες δεξιότητες τεχνολογίας πληροφοριών περιλαμβανομένης της ικανότητας να εργάζεται με μοντέλα υπολογιστών. Τέλος οφείλει να έχει ευελιξία μετακίνησης στις διάφορες τοποθεσίες που εκτελούνται τα έργα πολλές φορές σε απομακρυσμένες περιοχές.

Συνοπτικά κάποια από τα βασικά καθήκοντα ενός πολιτικού μηχανικού που εμπλέκεται με τον τομέα της αιολικής ενέργειας παρατίθενται παρακάτω:

- Εκπόνηση μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατασκευής αιολικού πάρκου.
- Γεωτεχνικός σχεδιασμός. Σχεδιασμός και διαστασιολόγηση θεμελίωσης ανεμογεννητριών.
- Δομικός σχεδιασμός και διαστασιολόγηση του πυλώνα των ανεμογεννητριών.
- Σχεδιασμός οδικού δικτύου εντός αιολικού πάρκου και πλατειών τοποθέτησης των ανεμογεννητριών. Το οδικό δίκτυο πρέπει να είναι κατάλληλο να υποδεχτεί οχήματα βαρέως τύπου, που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά και την

ανέγερση των ανεμογεννητριών.

- Σχεδιασμός κατάλληλων υδραυλικών έργων αποχέτευσης/αποστράγγισης εντός αιολικού πάρκου.
- Υπολογισμός της επίδρασης των υδροδυναμικών φαινομένων
- Σχεδιασμός υποδομών για το απαραίτητο ηλεκτρομηχανολογικό δίκτυο.
- Χειρισμό της διαδικασίας υποβολής προσφορών για τη σύγκριση των προσφορών των εργολάβων (αυτό μπορεί να περιλαμβάνει λεπτομερή έλεγχο των σχεδίων, και των συγγραφών υποχρεώσεων αναθεώρησης και έγκρισης).
- Επιτήρηση κατασκευής και οργάνωση συνεργείων.
- Συντονισμός λειτουργίας και συντήρησης ανεμογεννητριών.

1.2. Αντικείμενο, σκοπός και οργάνωση της διπλωματικής εργασίας

1.2.1. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι παρουσίαση των ανεμογεννητριών, καθώς αποτελούν λύση στο παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα αλλά και ένα ακόμη μέσο για την αντιμετώπιση της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Γίνεται αναφορά για τις διάφορες κατηγορίες των ανεμογεννητριών, των μηχανισμών μέσω των οποίων λειτουργούν και αναφορά των μερών που τις απαρτίζουν τους. Βαθύτερη ανάλυση πραγματοποιείται για του διάφορους τρόπους θεμελίωσης των ανεμογεννητριών τόσο στην ξηρά όσο και στην θάλασσα. Επιπρόσθετα, στην παρούσα εργασία αναγράφεται σε βάθος η επιλογή και υπολογισμός των διαφόρων φορτίων που ασκούνται στις ανεμογεννήτριες καθώς και οι διάφοροι συνδυασμοί φορτίσεων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και σχεδιασμό των ανεμογεννητριών. Επιπλέον, αναγράφεται ο τρόπος διαστασιολόγησης της θεμελίωσης των ανεμογεννητριών τόσο με θεμελίωση βαρύτητάς όσο και με θεμελίωση με πασσάλους. Ακόμα, αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού των καθιζήσεων για τις

επιφανειακές θεμελιώσεις και τα επιτρεπτά όρια των καθιζήσεων αυτών. Γίνεται ξεχωριστή μνεία για τις επί τόπου γεωτεχνικές έρευνες που πρέπει να πραγματοποιηθούν για τον προσδιορισμό των εδαφικών παραμέτρων. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση διάφορων αναλύσεων με τρισδιάστατά πεπερασμένα στοιχεία, θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών με μονοπάσσαλο σε αργιλικά εδάφη.

1.2.2. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα έχει προκαλέσει την ανάγκη εξεύρεσης εναλλακτικών τρόπων «παραγωγής» ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας εξ αυτών είναι οι ανεμογεννήτριες. Το γεγονός ότι ο βασικός παράγοντας επιλογής περιοχής εγκατάστασης των ανεμογεννητριών είναι το αιολικό δυναμικό και όχι η ποιότητα του εδάφους θεμελίωσης πολλές φορές υπάρχει η ανάγκη θεμελίωσης σε δυσμενής επί τόπου συνθήκες. Για αυτό το λόγο κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός ο ορθός γεωτεχνικός σχεδιασμός. Συνεπώς, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παραθέσει τις βασικές αρχές ενός σωστού γεωτεχνικού σχεδιασμού.

1.2.3. Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά για το ενεργειακό ζήτημα τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε εγχώριο επίπεδο. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται διάφορα ιστορικά στοιχεία που αφορούν τις ανεμογεννήτριες. Επίσης, αναφέρονται διάφορα ανεμολογικά στοιχεία που αφορούν τον τρόπο λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Στο τρίτο πραγματοποιείται ανάλυση των διάφορων τρόπων θεμελίωσης ανεμογεννητριών τόσο στην ξηρά όσο και στην θάλασσα. Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά τα φορτία σχεδιασμού των ανεμογεννητριών και το πέμπτο τους συνδυασμούς φορτίσεων που λαμβάνονται υπόψιν στον σχεδιασμό των ανεμογεννητριών. Στο έκτο κεφάλαιο αναγράφεται με λεπτομέρεια ο τρόπος διαστασιολόγησης της θεμελίωσης ανεμογεννητριών τόσο με θεμελίωση βαρύτητας όσο και με πασσάλους. Επιπρόσθετα, αναγράφεται ο τρόπος υπολογισμού

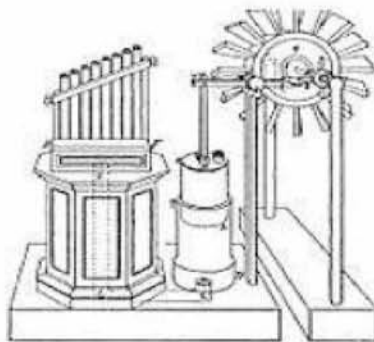
των καθιζήσεων επιφανειακών θεμελιώσεων. Το έβδομο κεφάλαιο αφορά τις επί τόπου γεωτεχνικές έρευνες για τον προσδιορισμό των εδαφικών παραμέτρων. Στο όγδοο κεφάλαιο παρατίθεται η σύγκριση διάφορων αναλύσεων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που αφορούν τη θεμελίωση υπεράκτιων ανεμογεννητριών με μονοπάσσαλους σε αργιλικά εδάφη. Το τελευταίο κεφάλαιο περιέχει όλα τα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

2.1. Ιστορικά στοιχεία

2.1.1. Αρχαιότητα

Η αιολική ενέργεια, εδώ και 5.500 έτη, χρησιμοποιείται ευρέως στα πλέοντα πλοία. Επίσης στην αρχαιότητα, έχει χρησιμοποιηθεί από αρχιτέκτονες ως φυσικός εξαερισμός σε κτήρια, ενώ η εφαρμογή της στην την παροχή μηχανικού έργου ανακαλύφθηκε. Χρήση της αιολικής ενέργειας για αρδευτικούς σκοπούς έγινε από τον αυτοκράτορα Χαμουραμί το 17ο αιώνα π.Χ. Όσον αφορά την Ελλάδα, η πρώτη μηχανή στον κόσμο της οποίας η λειτουργία πραγματοποιήθηκε μέσω κινούμενου από αέρα τροχού κατασκευάστηκε από τον Ήρωνα της Αλεξάνδρειας (Σχήμα 2.1). Επίσης, στο Θιβέτ όσο και στην Κίνα κατά τον 4ο αιώνα, ο αέρας χρησιμοποιείτο για την κίνηση ενός τροχού είχε τη λειτουργία μιας ρόδας προσευχής (www.wikipedia.com).



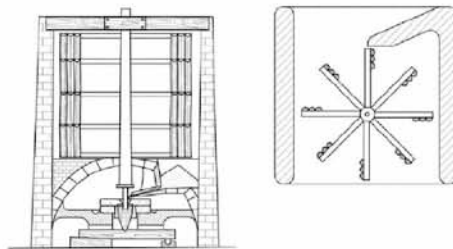
Σχήμα 2.1 Μηχανή του Ήρωνα (egpaid.blogspot.com)

2.1.2. Πρώιμος Μεσαίωνας-Μέση Ανατολή

Η αρχή της ανεμογεννήτριας βασίστηκε στον ανεμόμυλο, ο οποίος χρησιμοποιείται για εργασίες όπως η άντληση του νερού και η άλεση των σιτηρών από την αρχαιότητα. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται ένα συγκρότημα ανεμόμυλων οριζοντίου τύπου του 644 μ.Χ. εγκατεστημένο στο Σειστάν, που βρίσκεται στα σύνορα Περσίας και Αφγανιστάν. Το συγκρότημα αυτό αποτελεί την πρώτη ιστορική αναφορά (www.amusingplanet.com).

Όπως φαίνεται, ο άξονας του ανεμόμυλου στηρίζεται σε μια μόνιμη κατασκευή και τα ανοίγματα είναι σε αντιδιαμετρικά σημεία για την είσοδο και την έξοδο του αέρα. Κάθε μύλος δίνει απευθείας κίνηση σε ένα ζεύγος από μυλόπετρες. Οι πρώτοι μύλοι είχαν τα ιστία κάτω από τις μυλόπετρες, όπως δηλαδή συμβαίνει και στους μετέπειτα οριζόντιους νερόμυλους. Χαρακτηριστικό είναι ότι σε μερικούς μύλους που σώζονται μέχρι και σήμερα, τα ιστία είναι τοποθετημένα πάνω από τις μυλόπετρες.

Τον 13ο αιώνα, στη Βόρεια Κίνα, οι μύλοι τέτοιου τύπου ήταν γνωστοί και τους χρησιμοποιούσαν για την εξάτμιση του θαλασσινού νερού και την παραγωγή αλατιού. (www.wikipedia.com; egpaid.blogspot.com)



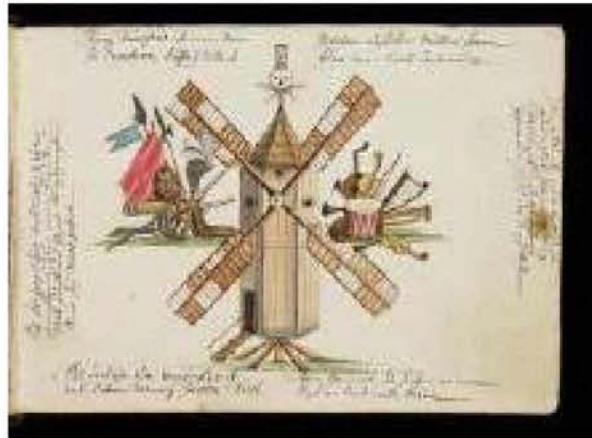
Σχήμα 2.2 Περσικός ανεμόμυλος τύπου κάθετου άξονα (www.amusingplanet.com)

2.1.3. Οι πρώτοι ανεμόμυλοι στην Ευρώπη

Η διάδοση του ανεμόμυλου στην Ευρώπη έγινε από τους Άραβες. Ο ανεμόμυλος αυτός είχε κατακόρυφα φτερά, στη θέση του τροχού, τα οποία μετέφεραν την κίνηση στις μυλόπετρες μέσω ενός ζεύγους οδοντωτών τροχών. Οι περιστρεφόμενοι ανεμόμυλοι πρωτοεμφανίστηκαν στη Γαλλία το 1180. Έπειτα, το 1911 κατασκευάστηκαν στην Αγγλία το 1191 κατά την εποχή των Σταυροφοριών.

Στις αρχές του 14ου αιώνα στη Γαλλία, ο ανεμόμυλος είχε σχήμα πύργου, δηλαδή οι μυλόπετρες και οι τροχοί ήταν τοποθετημένοι σε ένα σταθερό πύργο με κινητή οροφή. Στην οροφή στηρίζονταν τα ιστία. Η οροφή μπορούσε να στραφεί επάνω σε ειδική τροχιά στην κορυφή του πύργου.

Στις Κάτω Χώρες, στις αρχές του 15ου αιώνα αναπτύχθηκε ο περιστρεφόμενος ανεμόμυλος του Σχήματος 2.3. Ο ανεμόμυλος αυτός διέθετε έναν κατακόρυφο άξονα στου οποίου τα άκρα ήταν τοποθετημένα γρανάζια, και οποίος διερχόταν από το εσωτερικό ενός κοίλου άξονα., και προκαλούσε την κίνηση ενός τροχού. Ο τροχός έφερε διαταγμένα σκαφίδια, τα οποία μετέφεραν το νερό σε υψηλότερη στάθμη.



Σχήμα 2.3 Ευρωπαϊκός ανεμόμυλος 15ου-16ου αιώνα (www.atlasobscura.com)

Οι ανεμόμυλοι μαζί με τους νερόμυλους ήταν αυτοί που περιόρισαν και στη συνέχεια αντικατέστησαν τη χρήση ζώων. Στο 1800, υπήρχαν 100.000 ευρωπαϊκοί ανεμόμυλοι από τους οποίους 18.000 βρίσκονται στη Γερμανία, ενώ από 10.000 βρίσκονται στην Αγγλία και στην Ολλανδία. Εκτός από τις βασικές εργασίες όπως το άλεσμα του σιταριού, του κριθαριού και του καλαμποκιού, οι ανεμόμυλοι αξιοποιήθηκαν για την άντληση νερού, για την κίνηση μηχανικών πριονιών, ενώ χρησιμοποιήθηκαν στην παραγωγή ελαιόλαδου και στη διαδικασία πολτοποίησης κυτταρίνης προκειμένου να παραχθεί το χαρτί. (www.wikipedia.com; egpaid.blogspot.com)

2.1.4. Ο ελληνικός ανεμόμυλος

Στην Ελλάδα και λόγω του ισχυρού δυναμικού της, η χρήση των ανεμόμυλων ήταν εκτεταμένη, αν και καθιερώθηκε μόλις κατά τους Βυζαντινούς χρόνους. Οι ελληνικοί ανεμόμυλοι στεγάζονταν σε κυλινδρικά, πέτρινα, δώροφα κτίρια (Σχήμα 2.4). Ο άξονας και το σύστημα μετάδοσης κίνησης βρισκόταν στον πάνω όροφο. Η άλεση και η αποθήκευση των σιτηρών γινόταν στον κάτω όροφο. Η απόδοση του ανεμόμυλου

κυμαινόταν μεταξύ των 20 και 70 κιλών σιτηρών ανά ώρα. Τα πτερύγια αυτών των ανεμόμυλων ήταν πάνινα και είχαν μήκος που κυμαινόταν από 5 έως 15 μέτρα και πλάτος ίσο με το 1/5 του μήκους τους (www.wikipedia.com; egpaid.blogspot.com).

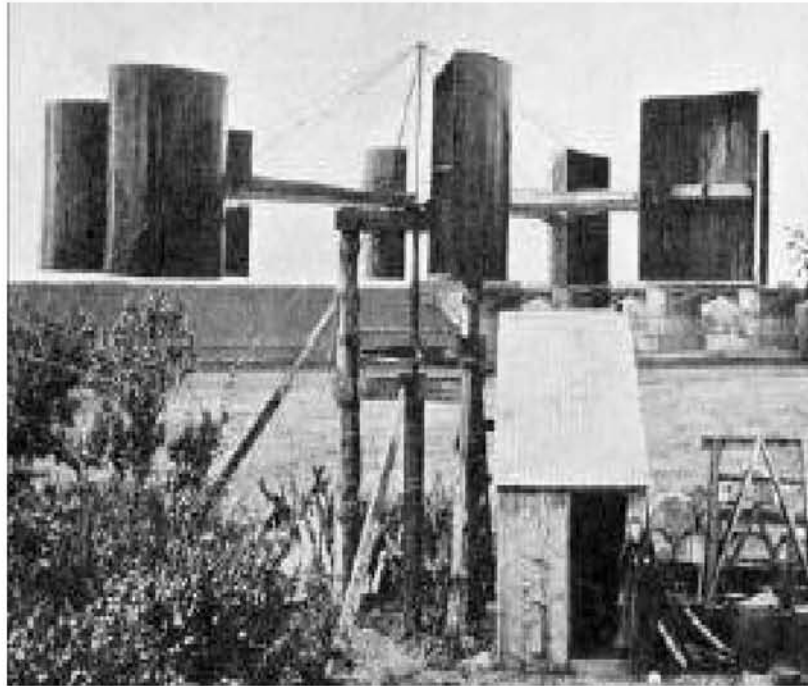


Σχήμα 2.4 Κλασσικός ελληνικός ανεμόμυλος (www.123rf.com)

2.1.5. Η γένεση της ανεμογεννήτριας

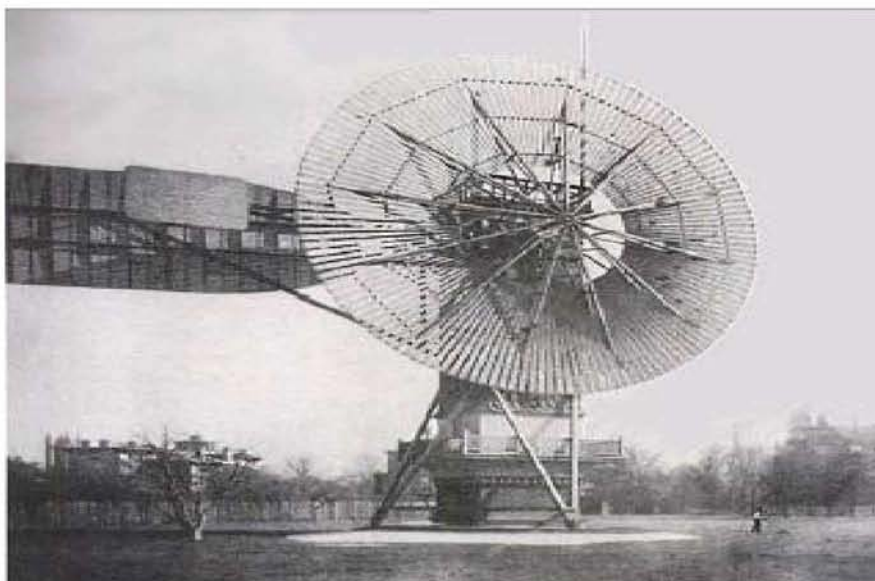
Την πρώτη ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε για την μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική αποτελούσε ουσιαστικά μία μηχανή η οποία φόρτιζε μια μπαταρία. Η εγκατάστασή της πραγματοποιήθηκε τον Ιούλιο του 1887, από τον Σκωτσέζο James Blyth, στο Μέρυκηρκ της Σκωτίας, στην εξοχική του κατοικία (Σχήμα 2.5).

Λίγους μήνες μετά τον James Blyth, ο Αμερικανός εφευρέτης Charles F. Brush, κατασκεύασε, στο Κλήβελαντ του Οχάιο, την πρώτη αιολική μηχανή για την μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω αυτόματης λειτουργίας της και η οποία τροφοδοτούσε μια γεννήτρια 12 KW (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.5 Η ανεμογεννήτρια του James Blyth, η πρώτη στον κόσμο (www.wikipedia.com)

Όσον αφορά τη βιομηχανία, το 1890 κατασκευάστηκε η πρώτη ανεμογεννήτρια βιομηχανικής χρήσης, η οποία ουσιαστικά αποτελούσε μια μετατροπή του κλασσικού ανεμόμυλου. Η πρώτη χρήση του ηλεκτρισμού που προήλθε από εκείνες τις ανεμογεννήτριες βρήκε εφαρμογή στο φωτισμό σχολείων μέσω της παραγωγής υδρογόνου από ηλεκτρόλυσης και τη δημιουργία φυσικού αερίου.



Σχήμα 2.6 Η ανεμογεννήτρια αυτόματης λειτουργίας του Charles F. Brush (www.cleantechnica.com)

Μετά τη λήξη του Α' Παγκόσμιου πολέμου, τα πτερύγια της αεροπορικής έλικας έδωσαν τη μορφή τους στα ισχία αεροτομής των ανεμόμυλων. Ένα παράδειγμα εγκατάστασης μιας τέτοιας ανεμογεννήτριας, αναφέρεται το 1931 στην Κριμαία για την παροχή ηλεκτρικής ισχύς στο τμήμα χαμηλής τάσης του τοπικού δικτύου. Ακολούθησαν ανεμογεννήτριες με δύο πτερύγια στις ΗΠΑ κατά τη δεκαετία του 1940, καθώς στην Αγγλία και την Γαλλία την δεκαετία του 1950.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1940, μηχανικοί της αυτοκινητοβιομηχανίας Porsche για λογαριασμό της Εταιρίας ερευνών αιολικής ενέργειας (EWEA) της Γερμανίας ανέπτυξαν τρεις τύπους ανεμογεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Πανίδης, 2013, Σχήμα 2.7). Οι τρεις αυτοί τύποι ανεμογεννητριών είχαν ισχύ εξόδου 130W, 736W και 4.500 W, αντίστοιχα. Οι ανεμογεννήτριες αυτές ήταν εξοπλισμένες με ελεγχόμενες ταχύτητες και πτερύγια μεταβαλλόμενου βήματος, προκειμένου να πραγματοποιείται πλήρης έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής καθώς και της ποσότητας του παραγόμενου ρεύματος. Έπειτα από δοκιμές, το 1945, η πειραματική αυτή εγκατάσταση παρήγαγε ρεύμα ικανό να τροφοδοτήσει πλήρως μια αγροτική επιχείρηση.

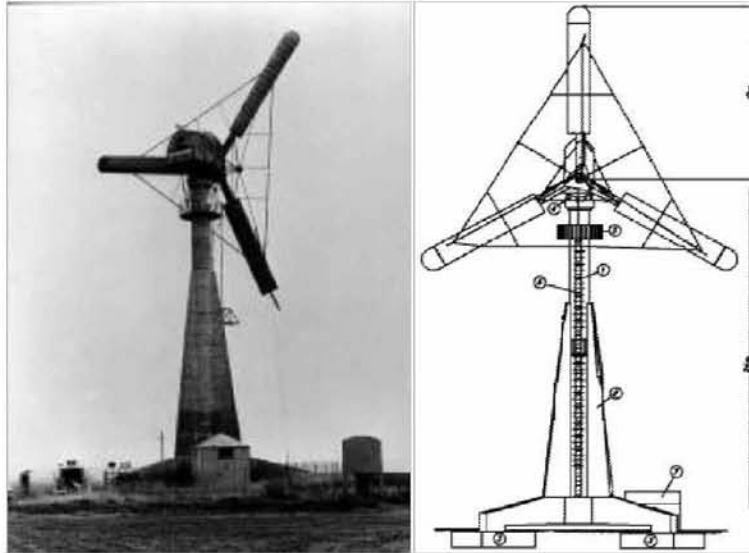


Σχήμα 2.7 Ανεμογεννήτρια της Porsche (Πανίδης, 2013)

Στη Δανία πραγματοποιήθηκε, από τον Johannes Juul, η κατασκευή της πιο πετυχημένης ανεμογεννήτριας με τρία πτερύγια. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8, τα πτερύγια συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός προβόλου στο μπροστινό μέρος του άξονα περιστροφής.

Στην Ολλανδία, ο F.G. Pigeaud πειραματίστηκε στη μετατροπή των ανεμόμυλων σιτηρών σε ανεμογεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιήθηκε ένας ασύγχρονος ηλεκτροκινητήρας, ο οποίος σε περιπτώσεις άπνοιας, κινούσε τον ανεμόμυλο. Όταν υπήρχε αέρας είχε τη λειτουργία γεννήτριας. Ο μηχανισμός για τη μετάδοση της κίνησης αποτελούνταν από έναν συμπλέκτη παράκαμψης, έτσι ώστε να εμποδίζει τον ηλεκτροκινητήρα να δημιουργεί άσκοπη κίνηση των ιστίων, αλλά να παράγει μόνο χρήσιμο έργο. Για τη στροφή της οροφής χρησιμοποιήθηκε ένας σερβοκινητήρα, ο οποίος ελεγχόταν από έναν ανεμοδείκτη.

Παρά την κυριαρχούσα μετά το Β' Παγκόσμιο πόλεμο αντίληψη πως η αιολική ενέργεια θα μπορούσε να συμβάλει ουσιαστικά στο θέμα της παραγωγής του ηλεκτρισμού, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970 δεν υπήρξαν πρακτικά αποτελέσματα. Οι προσπάθειες εντάθηκαν κατά τη διάρκεια και την ολοκλήρωση της πρώτης πετρελαϊκής κρίσης το 1973, ενώ στηρίχθηκαν, κατά ένα μεγάλο ποσοστό, στη σύγχρονη αεροδιαστημική τεχνολογία. Τούτο οδήγησε στην ανάπτυξη διαφόρων τύπων ανεμογεννητριών και τελικά στις αρχές της δεκαετίας του 1980 τη διάθεση συγκροτημάτων ανεμογεννητριών μικρής ισχύος (μέχρι 20-25 KW). Την ίδια περίοδο κατασκευάστηκαν και ανεμογεννήτριες μεγαλύτερης ισχύος (3-4 MW) (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.8 Η πρωτοποριακή ανεμογεννήτρια 200 KW του Johannes Juul (www.dromstorre.dk)



Σχήμα 2.9 Ανεμογεννήτρια μάρκας Bonus με ισχύ 30 KW δεκαετίας 1980 (www.slideshare.net)

Το 2012, η εταιρία Siemens κατασκευάζει τη μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια στον κόσμο, με ονομαστική ισχύ 6 MW και με μέγεθος πτερυγίων που άγγιζε τα 75 μέτρα (τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας αυτής ήταν μεγαλύτερα από το μεγαλύτερο πολιτικό αεροπλάνο εκείνης της περιόδου) (Σχήμα 2.10).

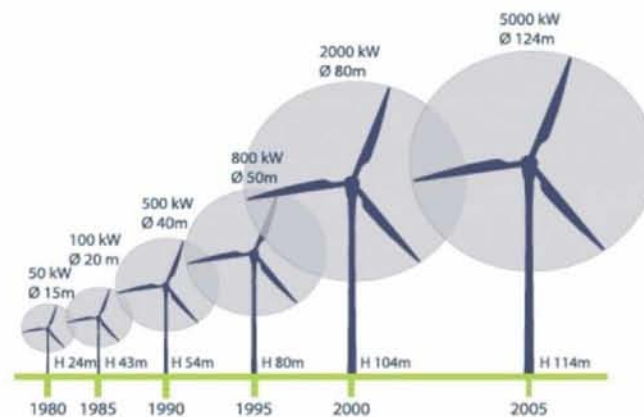
Η κατασκευάστρια εταιρία ενημερώνει ότι οι ανεμογεννήτριες αυτές θα τοποθετούνταν σε διάφορα αιολικά πάρκα της Μεγάλης Βρετανίας από το 2014 έως και το 2017 και υποστηρίζει τότε ότι αρκεί μια μόνο ανεμογεννήτρια από αυτές ώστε να προμηθεύσει με

ρεύμα περίπου 6000 κατοικίες (Πανίδης Α., 2013).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εξέλιξη του μεγέθους των ανεμογεννητριών στο πέρασμα του χρόνου. Από διάμετρο ρότορα 15μ και ύψος ανεμογεννήτριας 24μ το 1980 καταλήγουμε το 2005 σε διάμετρο ρότορα 124μ και ύψος ανεμογεννήτριας 114μ. Αντίστοιχα, οι συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες το 1980 αντιστοιχούσαν σε «παραγωγή» ηλεκτρικής ενέργειας 50kW ενώ το 2005 σε 5MW. (Σχήμα 2.11)



Σχήμα 2.10 Η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια στον κόσμο (www.pinterest.com)



Σχήμα 2.11 Εξέλιξη μεγέθους ανεμογεννητριών με το πέρασμα του χρόνου (www.researchgate.net)

2.2. Αρχές φυσικής του ανέμου

2.2.1. Η Γένεση των ανέμων στη γη

Ο άνεμος, στη Γη, αποτελείται από τη μαζική μετακίνηση των αερίων, που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα κατά την οριζόντια διεύθυνση σε μεγάλες αποστάσεις. Η ταξινόμηση των ανέμων συνήθως γίνεται βάσει: (α) της ταχύτητά τους, (β) το είδος των

δυνάμεων που προκαλούν τους ανέμους, (γ) τη χωρική κλίμακά τους, (δ) τις περιοχές στις οποίες εκδηλώνονται, και (ε) των αποτελεσμάτων της δράσης τους.

Οι βασικές αιτίες γένεσης και διαμόρφωσης των ανέμων είναι οι εξής:

- Η περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονα της.
- Η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια του εδάφους.
- Η ανομοιομορφία του ανάγλυφου της γης.

Εξαιτίας της διαφοράς της ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια της γης, που οφείλονται στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας του ηλίου σε κινητική ενέργεια, προκαλείται κίνηση των αέριων μαζών. Ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα της μετεωρολογίας είναι αυτή ακριβώς η μετατροπή (Kira, 2013).

2.2.2. Χαρακτηριστικά του ανέμου

Η διεύθυνση και η ταχύτητα με την οποία κινείται η αέρια μάζα είναι τα δυο βασικά στοιχεία που προσδιορίζουν τον άνεμο. Η διεύθυνση ορίζεται με βάση το σημείο του ορίζοντα από το οποίο έρχεται/πνέει ο άνεμος. Στις συνομιλίες μεταξύ αεροσκαφών και πύργου ελέγχου καθώς και στα μετεωρολογικά τηλεγραφήματα, η διεύθυνση περιγράφεται σε μοίρες (τρία ψηφία) και η ένταση σε κόμβους (π.χ. άνεμος 038°/ 7 κόμβοι σημαίνει ότι ο άνεμος πνέει από διεύθυνση 38 μοιρών με ένταση 7 κόμβων).

Σε όλους τους μετεωρολογικούς χάρτες ο άνεμος απεικονίζεται σαν ένα βέλος, πάνω στο οποίο η ένταση του συμβολίζεται με κάθετες γραμμές. Όσον αφορά τις κάθετες αυτές γραμμές, κάθε μια γραμμή παριστά 10 κόμβους, κάθε μισή γραμμή 5 κόμβους και κάθε μαύρο τριγωνάκι συμβολίζει τον άνεμο 50 κόμβων. Η διεύθυνση του ανέμου φαίνεται μέσω των κάθετων γραμμών οι οποίες εκτείνονται προς το σταθμό, ο οποίος είναι ο μικρός κύκλος. Στο σχήμα που ακολουθεί ο άνεμος πνέει από διεύθυνση 240 μοιρών και έχει ένταση 65 κόμβων.



Σχήμα 2.12 Σχηματική απεικόνιση διεύθυνσης ανέμου

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η διεύθυνση του ανέμου είτε μπορεί να μεταβάλλεται μεταξύ δυο τιμών είτε ασφαλώς να είναι σταθερή. Ως διεύθυνση ορίζεται η μέση τιμή που προκύπτει από τις δύο ακραίες τιμές του τελευταίου δεκαλέπτου. Ως προς τη διεύθυνση, οι άνεμοι διακρίνονται σε:

- Μεταβλητός άνεμος, όταν η διαφορά των ακραίων τιμών από τη μέση τιμή του τελευταίου δεκαλέπτου είναι μεγαλύτερη του 60..
- Ριπαίος άνεμος, όταν η ένταση υπερβαίνει κατά τουλάχιστον 10 κόμβους τη μέση τιμή του τελευταίου δεκάλεπτου.

Όσον αφορά την ταχύτητα του ανέμου, αυτή ορίζεται ως το διάστημα που διανύει η αέρια μάζα στη μονάδα του χρόνου. Ωστόσο, εξαιτίας της δυσκολίας εκτίμησης της πραγματικής ταχύτητας των μορίων του αέρα, προσδιορίζεται η ταχύτητα που προσδίνει ο άνεμος στα διάφορα ελαφρά σώματα τα οποία μπορεί να παρασύρει (π.χ. φτερά, καπνό, κτλ).

Ο προσδιορισμός της ταχύτητας του ανέμου πραγματοποιείται είτε εμπειρικά είτε με τη βοήθεια ειδικών οργάνων (ανεμόμετρα). Η ταχύτητα εμπειρικά προσδιορίζεται, από την παρατήρηση της κίνησης διάφορων ειδών αντικειμένων ή από τις καταστροφές που προκαλεί ο άνεμος με τη σφοδρότητά του. Στην εμπειρική παρατήρηση είναι στηριγμένη και η ανεμομετρική κλίμακα μποφόρ. (www.forward.gr)

Οι μονάδες μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου είναι σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/sec), χιλιόμετρα ανά ώρα (km/h), μίλια (1.609 μ.) ανά ώρα (m.p.h.), αγγλικά πόδια ανά δευτερόλεπτο (ft/sec) και κόμβοι (1.852 m/h).

2.2.3. Δυνάμεις δημιουργίας των ανέμων

Οι δυνάμεις οι οποίες προκαλούν τους ανέμους είναι:

1. Η δύναμη της βαροβαθμίδας, η οποία εμφανίζεται όταν υπάρχει διαφορά πιέσεων μεταξύ γειτονικών περιοχών και λαμβάνει χώρα μετακίνηση των μορίων του αέρα προς την περιοχή της χαμηλότερης πίεσης με ταχύτητα ανάλογη με τη διαφορά των πιέσεων.

2. Η δύναμη Coriolis η οποία είναι η οριζόντια εκτροπική δύναμη που οφείλεται στην περιστροφή της Γης. Κατά την επιβολή της δύναμης αυτής, ο ατμοσφαιρικός αέρας που κινείται δέχεται φαινομενικά μια εκτροπή σε σχέση με την επιφάνεια του πλανήτη. Η εκτροπή αυτή, οφείλεται στην περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της, ενώ η δύναμη που προκαλεί αυτήν την εκτροπή, είναι η δύναμη Coriolis.

Κάθε μόριο του αέρα (ισχύει το ίδιο και στο νερό) που κινείται στο βόρειο ημισφαίριο δέχεται μια συνεχή εκτροπή της κίνησής του προς τα δεξιά ενώ στο νότιο ημισφαίριο η εκτροπή αυτή είναι προς τα αριστερά.

Η δύναμη Coriolis, για τον άνεμο είναι:

$$F=2*\omega*\sigma\eta\phi \quad (\text{Εξίσωση 2.1})$$

Όπου:

ω , γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της Γης ϕ , το πλάτος του τόπου.

3. Η φυγόκεντρη δύναμη κατά την οποία τα μόρια του αέρα, εφόσον ακολουθούν την κίνηση της Γης, συμμετέχουν στην κυκλική κίνηση με αποτέλεσμα να ενεργεί πάνω τους η φυγόκεντρη δύναμη:

$$F = \frac{m*U^2}{r} \quad (\text{Εξίσωση 2.2})$$

Όπου:

m , η μάζα του κινούμενου μορίου

v , η ταχύτητα του μορίου

r , η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του μορίου

4. Η δύναμη της τριβής η οποία εμφανίζεται όταν ο ατμοσφαιρικός αέρας που κινείται βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια της Γης. Η δύναμη αυτή ενεργεί αντίθετα στην κίνηση του αέρα και το μέγεθός της εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και από την ταχύτητα της περιστροφής της επιφάνειας του εδάφους.

Εκτός από το παραπάνω, οι δυνάμεις τριβής αναπτύσσονται και όταν τα αλληπάλληλα στρώματα αέρα κινούνται, με διαφορετικές ταχύτητες, πάνω από την επιφάνεια της Γης (Stathopoulos and Blocken, 2018).

2.2.4. Είδη ανέμων

Οι άνεμοι διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

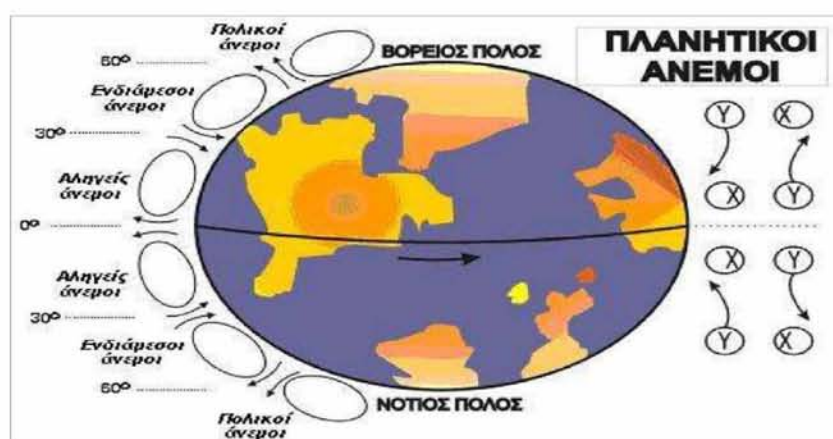
1. Άνεμοι γενικής κυκλοφορίας

Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας στους πόλους της γης και της συνεπακόλουθης αύξησης του βάρους του αέρα, πραγματοποιείται κίνηση των αέριων μαζών προς τα χαμηλότερα στρώματα. Κατά τη μετακίνησή τους με κατεύθυνση προς τον Ισημερινό, η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται, το βάρος του μειώνεται και πραγματοποιείται κίνηση των αερίων μαζών προς τα υψηλότερα στρώματα. Τούτο οδηγεί στη δημιουργία δύο μόνιμων πολικών ανέμων, οι οποίοι κοντά στην επιφάνεια της γης καταγράφουν κίνηση από τους πόλους προς το Ισημερινό (Σχήμα 2.13).

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας στον Ισημερινό και της συνεπακόλουθης μείωσης του βάρους του αέρα, πραγματοποιείται κίνηση των αέριων μαζών προς τα υψηλότερα

στρώματα. Κατά τη μετακίνησή τους με κατεύθυνση προς τους πόλους, η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται, το βάρος του αυξάνεται και πραγματοποιείται κίνηση των αερίων μαζών προς τα χαμηλότερα στρώματα. Τούτο οδηγεί στη δημιουργία δύο μόνιμων αληγών ανέμων, οι οποίοι κοντά στην επιφάνεια της γης καταγράφουν κίνηση από τον Ισημερινό προς τους πόλους (Σχήμα 2.13).

Οι κατευθύνσεις των παραπάνω ανέμων κοντά στην επιφάνεια της Γης είναι οι εξής:



Σχήμα 2.13 Πορεία ανέμων στον πλανήτη Γη (www.hmga.gr)

Πίνακας 2.1 Κατευθύνσεις μόνιμων πλανητικών ανέμων ((www.hmga.gr))

	ΒΟΡΕΙΟ ΗΜΙΣΦΑΙΡΙΟ	ΝΟΤΙΟ ΗΜΙΣΦΑΙΡΙΟ
Αληγείς άνεμοι	Βόρεια κατεύθυνση	Νότια κατεύθυνση
Ενδιάμεσοι άνεμοι	Νότια κατεύθυνση	Βόρεια κατεύθυνση
Πολικοί άνεμοι	Βόρεια κατεύθυνση	Νότια κατεύθυνση

Ωστόσο, λόγω του φαινομένου Coriolis, δηλαδή την κατεύθυνση των ανέμων από τα δυτικά προς τα ανατολικά λόγω της περιστροφής της Γης, οι αέριες μάζες στον Ισημερινό ακολουθούν την περιστροφή της Γης και κινούνται με την ίδια ταχύτητα (περίπου με 1.674 Km/h). Αντίθετα η ταχύτητα των αερίων μαζών στους πόλους

μηδενίζεται, καθώς και η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται καθώς προσεγγίζουν τον πόλο.

Επομένως, οι πραγματικές κατευθύνσεις των μόνιμων πλανητικών ανέμων κοντά στην επιφάνεια της Γης είναι οι εξής:

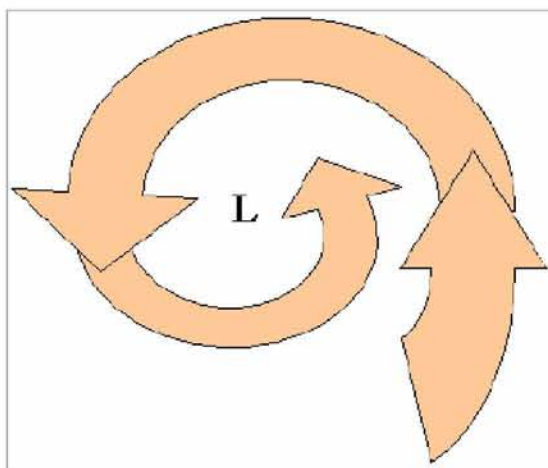
Πίνακας 2.2 Οι πραγματικές κατευθύνσεις των μόνιμων πλανητικών ανέμων (www.hmga.gr)

	ΒΟΡΕΙΟ ΗΜΙΣΦΑΙΡΙΟ	ΝΟΤΙΟ ΗΜΙΣΦΑΙΡΙΟ
Αληγείς άνεμοι	ΒόρειοΑνατολική	ΝότιοΑνατολική
Ενδιάμεσοι άνεμοι	ΝότιοΔυτική	ΒόρειοΔυτική
Πολικοί άνεμοι	ΒόρειοΑνατολική	ΝότιοΑνατολική

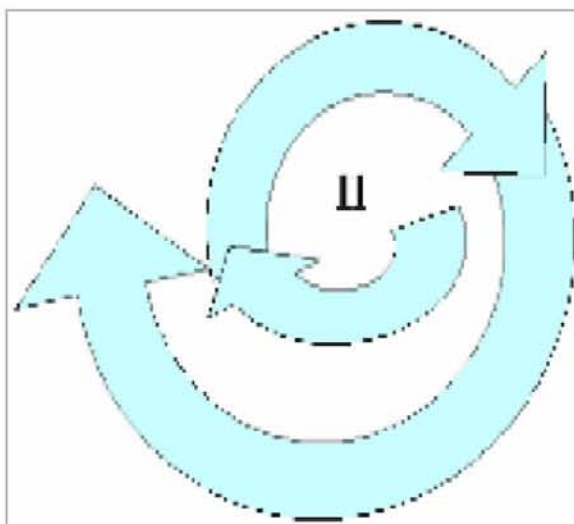
Σφοδρότεροι όλων των μόνιμων ανέμων ακόμη και πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, είναι οι δυτικοί άνεμοι που εκδηλώνονται μεταξύ του 30ου και 60ου παράλληλου. Οι πολικοί ανατολικοί άνεμοι λόγω του μεγάλου βάρους τους κινούνται προς τον Ισημερινό. Τα δύο αυτά δυτικά και ανατολικά ρεύματα συγκρούονται προκαλώντας μια μόνιμη κατάσταση ατμοσφαιρικής αστάθειας και αναπτύσσοντας διάφορα συστήματα ανέμων που χαρακτηρίζονται ως κυκλώνες. Τα συστήματα με κίνηση από δυτικά προς τα ανατολικά χαρακτηρίζονται ως αντικυκλώνες.

2. Κυκλώνες και αντικυκλώνες

Οι κυκλωνικοί άνεμοι είναι περιστροφικοί άνεμοι, οι οποίοι συγκλίνουν προς ένα κέντρο χαμηλής πίεσης. Η περιστροφή γίνεται αριστερόστροφα στο βόρειο ημισφαίριο και δεξιόστροφα στο νότιο (Σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14 Κυκλωνικός άνεμος (www.hmga.gr)



Σχήμα 2.15 Αντικυκλωνικός άνεμος (www.hmga.gr)

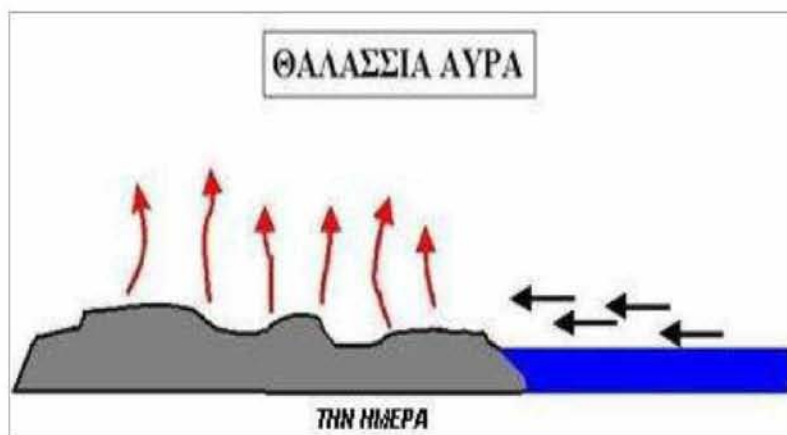
Οι αντικυκλωνικοί άνεμοι είναι και αυτοί περιστροφικοί άνεμοι, οι οποίοι όμως αποκλίνουν από ένα κέντρο χαμηλής πίεσης. Η περιστροφή γίνεται αντίθετα με τη φορά των κυκλωνικών ανέμων, δηλαδή δεξιόστροφα στο βόρειο ημισφαίριο και αριστερόστροφα στο νότιο (Σχήμα 2.15).

Σημαντικοί αντικυκλώνες που επηρεάζουν τον Ελλαδικό χώρο είναι ο Σιβηρικός αντικυκλώνας και ο αντικυκλώνας των Αζόρων. (Σχήμα 2.15)

3. Τοπικοί άνεμοι

Θαλάσσια Αύρα(Μπάτης)

Όπως είναι γνωστό, η στεριά απορροφά και αποβάλλει θερμότητα με γρηγορότερο ρυθμό από το ρυθμό της θάλασσας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η θερμοκρασία της στεριάς ανεβαίνει γρηγορότερα από της θάλασσας. Οι αέριες μάζες πάνω από τη στεριά κινούνται ανοδικά δημιουργώντας ανοδικά ρεύματα. Τη θέση αυτών αερίων μαζών κοντά στην επιφάνεια της γης καταλαμβάνουν τα ρεύματα του αέρα από τη θάλασσα τα οποία είναι και βαρύτερα και ψυχρότερα, δημιουργώντας έτσι την θαλάσσια αύρα. (Σχήμα 2.16)

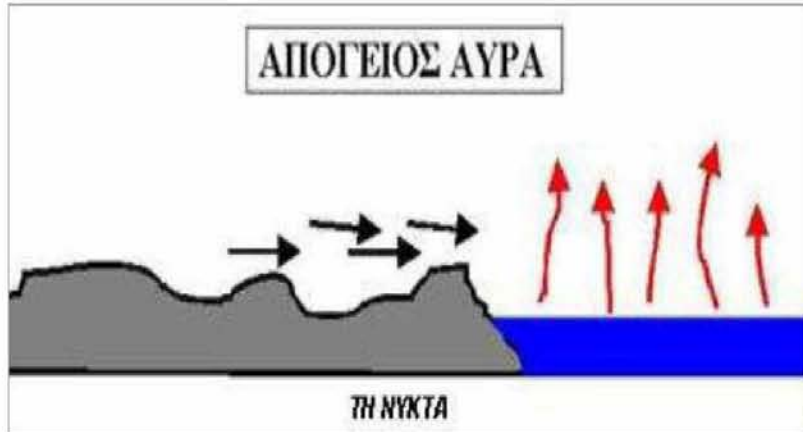


Σχήμα 2.16 Θαλάσσια αύρα (www.hmga.gr)

Απόγειος Αύρα

Αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της νύχτας, η θερμοκρασία της στεριάς κατεβαίνει γρηγορότερα από της θάλασσας. Οι ψυχρές αέριες μάζες από τη στεριά κινούνται προς τη θάλασσα δημιουργώντας την απόγειο αύρα, η ένταση της οποίας είναι μικρότερη της θαλάσσιας αύρας καθώς οι διαφορές είναι μικρότερες τη νύκτα από ότι την ημέρα.

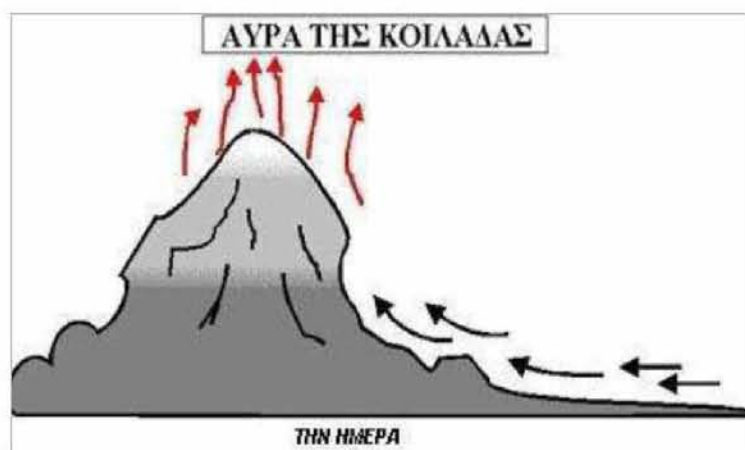
(Σχήμα 2.17)



Σχήμα 2.17 Απόγειος αύρα (www.hmga.gr)

Αύρα της κοιλάδας

Όσον αφορά τις βουνοπλαγιές και τις κοιλάδες, κατά τη διάρκεια της ημέρας οι βραχώδεις βουνοπλαγιές ανεβάζουν γρηγορότερα θερμοκρασία από τις κοιλάδες. Οι αέριες μάζες πάνω από τις βουνοπλαγιές δημιουργούν ανοδικά ρεύματα λόγω του μικρότερου βάρους τους, και τη θέση τους καλύπτουν οι ψυχρότερες αέριες μάζες των κοιλάδων, δημιουργώντας έτσι, την αύρα της κοιλάδας (Σχήμα 2.18). Η ύπαρξη του ανέμου αυτού είναι σημάδι σταθερότητας του καιρού. Ο άνεμος αυτός είναι εντονότερος μέσα στις χαράδρες, στα λούκια και στις βάσεις των ορθοπλαγιών.



Σχήμα 2.18 Αύρα της κοιλάδας (www.hmga.gr)

Αύρα του βουνού

Αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της νύχτας και μετά το ηλιοβασίλεμα, η θερμοκρασία

στις βουνοπλαγιές κατεβαίνει γρηγορότερα από στις κοιλάδες. Οι ψυχρές αέριες μάζες από τις βουνοπλαγιές κινούνται προς τις κοιλάδες δημιουργώντας την αύρα του βουνού (Σχήμα 2.19). Και σε αυτή την περίπτωση, ο άνεμος αυτός είναι πιο έντονος μέσα στις χαράδρες, στα λούκια και στις βάσεις των ορθοπλαγιών.



Σχήμα 2.19 Αύρα του βουνού (www.hmga.gr)

Κατεβατός άνεμος

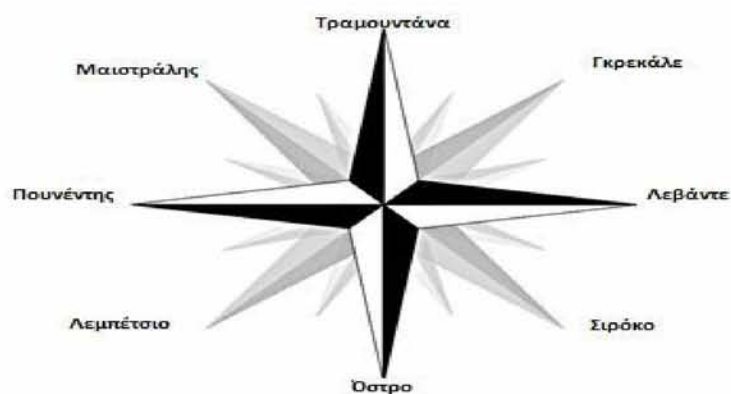
Όταν οι υγρές μάζες αέρα συναντούν τις πλαγιές ενός βουνού, ανεβαίνουν προς τα πάνω, ψύχονται και συμπυκνώνονται, σχηματίζοντας μαύρα σύννεφα τα οποία προκαλούν βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις. Επομένως, στις πλαγιές αυτές αναπτύσσεται περισσότερη βλάστηση και εμφανίζεται αρκετό χιόνι. Έπειτα, οι μάζες του αέρα, αφού έχουν απαλλαχθεί από την υγρασία τους, κατεβαίνουν από τις πλαγιές του βουνού. Οι άνεμοι αυτοί όπως κατεβαίνουν, όντας ξηροί, στεγνώνουν τις βρεγμένες πλαγιές και λιώνουν τα υπάρχοντα χιόνια (Σχήμα 2.20).



Σχήμα 2.20 Κατεβατός άνεμος (www.hmga.gr)

Στη συνέχεια αναφέρονται οι σημαντικότεροι τοπικοί άνεμοι (Σχήμα 2.21):

- Τραμουντάνα
- Μαιστράλης
- Γκρεκάλε
- Πουνέντης
- Λεβάντε
- Λεμπέτσιο
- Όστρο
- Σιρόκο



Σχήμα 2.21 Διεύθυνση σπουδαιότερων τοπικών ανέμων

Οι περισσότερο γνωστοί άνεμοι που εκδηλώνονται στην ελληνική περιφέρεια είναι ο Λίβας και ο Βαρδάρης:

Λίβας: πολύ ξερός και θερμός άνεμος που δημιουργείται από τις νότιες αέριες μάζες, οι οποίες καθώς διέρχονται πάνω από την Πίνδο χάνουν όλους τους υδατμούς τους.

Βαρδάρης: δυνατός, ψυχρός και ξερός άνεμος που προέρχεται από τα Βαλκάνια και εισέρχεται στον ελλαδικό χώρο μέσω της κοιλάδας του Αξιού. Είναι άνεμος ψυχρός και ξερός. (Πανίδης, 2013)

2.3. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο – Αρχές φυσικής και αρχές λειτουργίας των ανεμογεννητριών – Αεροδυναμική Ανάλυση

2.3.1. Ταχύτητα του ανέμου

Η χαμηλότερη περιοχή της ατμόσφαιρας, στην οποία βρίσκονται και οι περισσότερες κατασκευές, ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Εκεί, η κίνηση του ανέμου επηρεάζεται από δυνάμεις τριβής και μεγάλα εμπόδια στην επιφάνεια της γης καθώς και από φαινόμενα που οφείλονται στο στροβιλισμό. Ο στροβιλισμός, ο οποίος μπορεί να είναι μηχανικής ή και θερμικής προέλευσης, προκαλεί απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και πλατών, γνωστές ως ριπές.

Από μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου σε διάφορα ύψη από το έδαφος, διαπιστώνουμε ότι:

- η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται συναρτήσει του ύψους από το έδαφος
- στην περιοχή υπάρχουν διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή στροβιλισμός
- ο στροβιλισμός διαδίδεται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

Η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται συνήθως από 0 έως 33 m/s, και εμφανίζει έντονη μεταβλητότητα σε σχετικά μικρές χρονικές κλίμακες. Επομένως, μπορεί να μοντελοποιηθεί ως άθροισμα δύο συνιστωσών σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$V_w(z, t) = \overline{V_w(z)} + v(z, t) \quad (\text{Εξίσωση 2.3})$$

Όπου:

$V_w(z, t)$ η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου

$\overline{V_w(z)}$ η μέση ταχύτητα του ανέμου

$v(z, t)$ η τυρβώδης ταχύτητα

Η μέση ταχύτητα ανέμου, αντιστοιχεί στα μακρομετεωρολογικά φαινόμενα, θεωρείται συνήθως ως η μέση ωριαία τιμή (μπορεί όμως να υπολογίζεται και σε διαστήματα δεκαλέπτου) και καθορίζει την ενεργειακή απόδοση του αιολικού συστήματος, ενώ μπορεί να εκφραστεί μέσω πιθανοτικής κατανομής θεωρώντας ότι ακολουθεί την κατανομή Weibull.

Όσον αφορά την τυρβώδη συνιστώσα, αυτή αναπαριστά την μεγάλη μεταβλητότητα που εμφανίζεται σε μικρές χρονικές κλίμακες (δευτερολέπτων-λεπτών) και αναφέρεται ως τύρβη. Αυτές οι ταχείες διακυμάνσεις του ανέμου έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη λειτουργία των ανεμογεννητριών και των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία συνδέονται αυτές, λόγω του ότι αυξάνουν τα κοπωτικά φορτία της ανεμογεννήτριας (αυξημένες καταπονήσεις στον άξονα) αλλά και επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα της παραγόμενης ισχύος. Τα αίτια δημιουργίας της τύρβης φαίνεται να συνδέονται με την τριβή που προκαλείται σε Εξίσωση με την επιφάνεια της γης και με θερμικά φαινόμενα που προκαλούν κάθετες μετακινήσεις αέριων μαζών. Επιπλέον η συνιστώσα της τύρβης μπορεί να περιγραφεί από το φάσμα τύπου von Karman. (Stanton and Arthur, 1983).

Προφίλ της Ταχύτητας του Ανέμου

Σύμφωνα με τη θεωρία οριακού στρώματος, το προφίλ πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας της (χρονικά μέσης ταχύτητας ανέμου, μπορεί να θεωρηθεί ως λογαριθμικής μορφής (Schlichting and Gersten, 2000):

$$\overline{V_w(z)} = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{Εξίσωση 2.4})$$

Όπου:

u_* , είναι η λεγόμενη ταχύτητα τριβής ή αλλιώς διατμητική ταχύτητα

κ , είναι η λεγόμενη σταθερά Karman (παγκόσμια σταθερά για τυρβώδη οριακά στρώματα) που λαμβάνει την τιμή $\kappa = 0.41$

z , είναι το ύψος του θεωρουμένου σημείου πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

z_0 , είναι παράμετρος που εκφράζει την τραχύτητα επιφανείας (Πίνακας 2.3)

Η ταχύτητα τριβής εκφράζει τον ρυθμό διάτμησης και διασποράς της ροής. Ορίζεται ως:

$$\overline{V_w(z)} = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{Εξίσωση 2.4})$$

Όπου:

u_* , είναι η λεγόμενη ταχύτητα τριβής ή αλλιώς διατμητική ταχύτητα

κ , είναι η λεγόμενη σταθερά Karman (παγκόσμια σταθερά για τυρβώδη οριακά στρώματα) που λαμβάνει την τιμή $\kappa = 0.41$

z , είναι το ύψος του θεωρουμένου σημείου πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

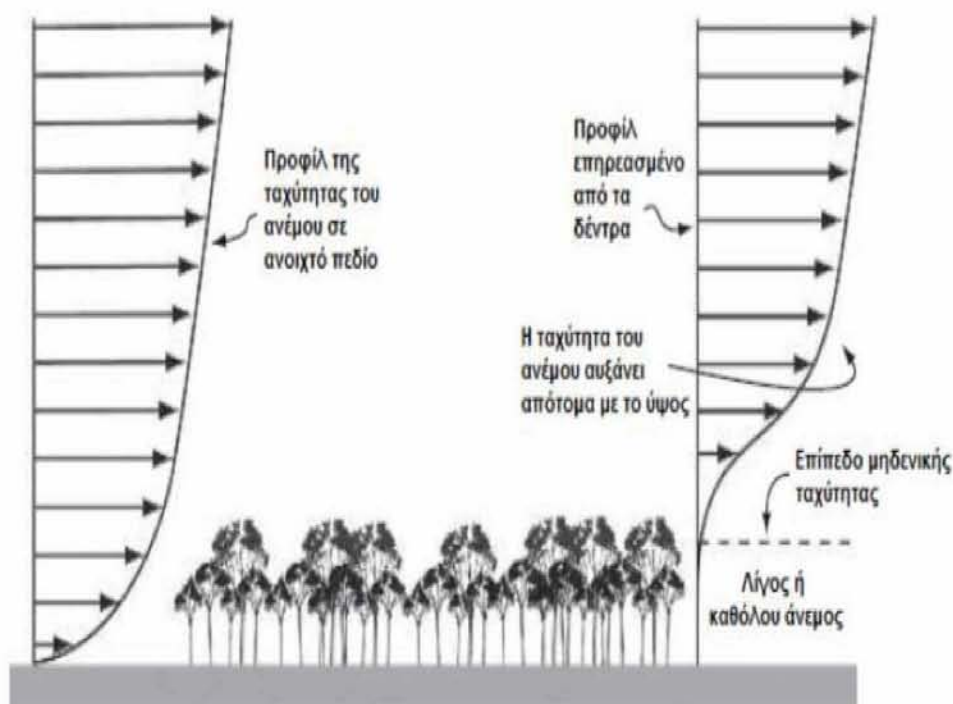
z_0 , είναι παράμετρος που εκφράζει την τραχύτητα επιφανείας (Πίνακας 2.3)

Το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου επηρεάζεται ανάλογα στο πεδίο στο οποίο επιδρά.

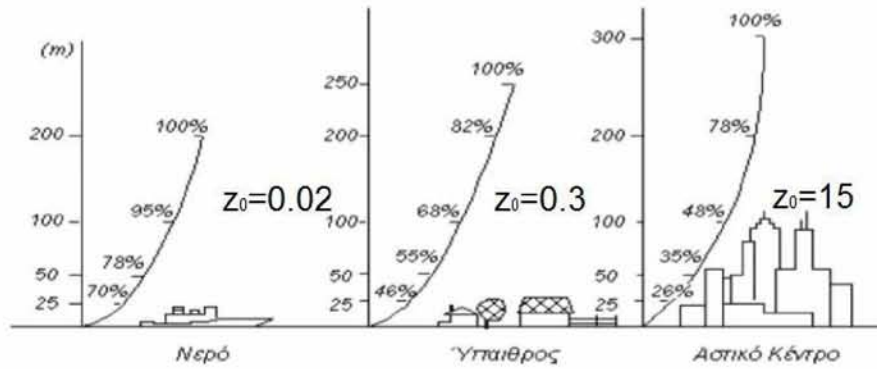
Σε πεδία με ψηλά δέντρα ή κτήρια τα φαινόμενα τύρβης είναι έντονα. (Σχήμα 2.22).

Πίνακας 2.3 Τιμές τραχύτητας ανάλογα την κατηγορία εδάφους (ape.chania.teicrete.gr)

Κατηγορία τραχύτητας	Είδος εδάφους	zo(m)
0	Εξομαλυμένο (θάλασσα, χιόνι, άμμος)	0.001-0.02
1	Μέτρια βλάστηση (χαμηλή βλάστηση, καλλιεργημένες αγροτικές περιοχές)	0.02-0.30
2	Τραχύ έδαφος (δάση, προάστια πόλεων)	0.30-2.0
3	Πολύ τραχύ έδαφος (αστικές περιοχές, υψηλά κτίρια)	2.0-15.0



Σχήμα 2.22 Επίδραση εμποδίων στο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου (ape.chania.teicrete.gr)



Σχήμα 2.23 Επίδραση της τραχύτητας στο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου (ape.chania.teicrete.gr)

Ταχύτητα λόγω τύρβης

Η ταχύτητα λόγω τύρβης για μία χρονική περίοδο $[t_0, T]$ είναι η διακύμανση γύρω από την μέση τιμή του ανέμου της συγκεκριμένης περιοχής. Το μέτρο της ταχύτητας λόγω τύρβης δίνεται από τον τύπο (Σταυρακάκη, 2010):

$$v(z,t) = \sigma_v^2 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (V_w(z,t) - \overline{V_w(z)})^2 dt \quad (\text{Εξίσωση 2.6})$$

Και η ένταση της τύρβης δίνεται από την κατανομή του Karman (Σταυρακάκη, 2010):

$$I = \frac{\sigma_v}{\overline{V_w(z)}} \quad (\text{Εξίσωση 2.7})$$

Κατανομή της ταχύτητας του Ανέμου

Για υψόμετρα κάτω των 100m η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να περιγραφεί πολύ ικανοποιητικά μέσω της κατανομής Weibull. Η κατανομή Weibull μας δίνει την ακόλουθη πυκνότητα πιθανότητας:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (\text{Εξίσωση 2.8})$$

Όπου:

$f(v)$, η πυκνότητα πιθανότητας

v , η ταχύτητα του ανέμου

k, η παράμετρος μορφής της περιοχής

c, η παράμετρος κλίμακας

Έτσι η μέση ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\overline{V_w(z)} = \int_0^{\infty} v * f(v) dv = \frac{c}{k} \Gamma\left(\frac{1}{k}\right) \quad (\text{Εξίσωση 2.9})$$

Όπου Γ είναι η εξίσωση του Euler

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} * e^{-t} dt \quad (\text{Εξίσωση 2.10})$$

Αν η παράμετρος k ισούται με 2, τότε η κατανομή Weibull ισούται με την κατανομή Rayleigh. Το πλεονέκτημα της κατανομής Rayleigh είναι ότι εξαρτάται μόνο από την παράμετρο c, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται μόνο από τη μέση ταχύτητα του ανέμου.

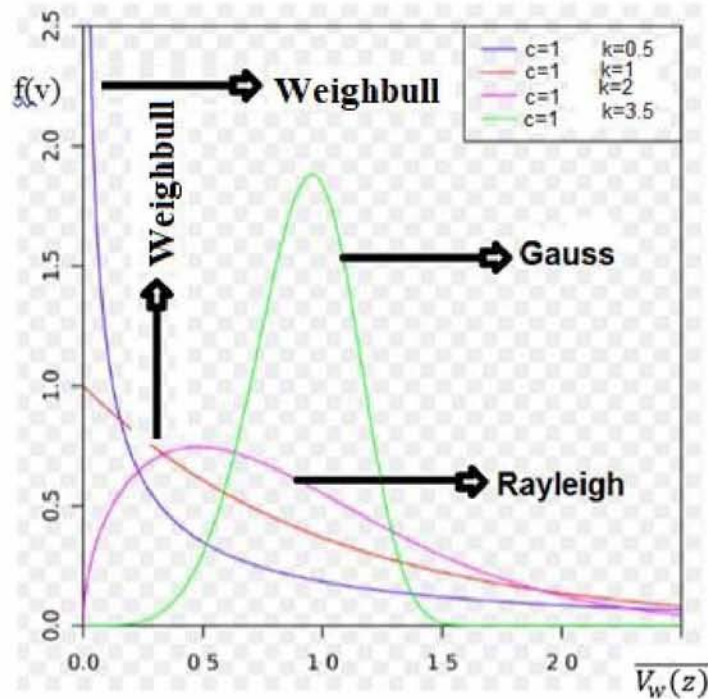
Η παράμετρος c μπορεί να υπολογιστεί με βάση μια δεδομένη μέση ταχύτητα ανέμου ως εξής:

$$c = \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \overline{V_w(z)}, \text{ για } k=2 \quad (\text{Εξίσωση 2.11})$$

$$\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi} \quad (\text{Εξίσωση 2.12})$$

Για k=3,5 η κατανομή Weibull προσεγγίζει την κατανομή Gauss.

Ενδεικτικές τιμές της παραμέτρου k για την ελληνική επικράτεια είναι οι εξής: για τα νησιά του Αιγαίου η τιμή της k κυμαίνεται από 1,4 μέχρι 2, ενώ σε μερικά νησιά όπως η Κρήτη, η τιμή κυμαίνεται γύρω στο 2,2. (Λευθεριώτης, 2012)



Σχήμα 2.24 Κατανομή Weibull για διάφορους παραμέτρους μορφής περιοχής k και παράμετρο κλίμακας $c=1$
(www.wikipedia)

2.3.2. Συντελεστής απόδοσης ανεμογεννήτριας-Το όριο Betz

Η κινητική ενέργεια μιας αέριας μάζας m που κινείται με ταχύτητα v η οποία δίνεται από τη Εξίσωση:

$$E(z,t) = \frac{1}{2} * m * V_w(z, t)^2 \quad (\text{Εξίσωση 2.13})$$

Θεωρώντας μια συγκεκριμένη διατομή εμβαδού A την οποία διαπερνά η αέρια μάζα με ταχύτητα $V_w(z, t)$, ο όγκος που διαπερνά τη συγκεκριμένη διατομή για μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή αποκαλείται ροή όγκου και δίνεται από τη Εξίσωση:

$$\frac{dV(z,t)}{dt} = V_w(z, t) * A \quad (\text{Εξίσωση 2.14})$$

Η ροή της αέριας μάζας πυκνότητας ρ δίνεται από τη Εξίσωση:

$$\frac{dm(z,t)}{dt} = \rho * V_w(z, t) * A \quad (\text{Εξίσωση 2.15})$$

Συνεπώς η ισχύς του ανέμου (ενέργεια στη μονάδα του χρόνου) προκύπτει:

$$P(z, t)_w = \frac{1}{2} \rho A V_w(z, t)^3 \quad (\text{Εξίσωση 2.16})$$

Από την τελευταία Εξίσωση φαίνεται ποσοτικά η σπουδαιότητα της αξιοποίησης της ενέργειας του ανέμου σε Εξίσωση προς την ταχύτητά του καθώς η ισχύς είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας. Όμως στην πραγματικότητα μόνο ένα κλάσμα της διαθέσιμης ισχύος μπορεί να δεσμευτεί από μία ανεμογεννήτρια, διότι αφενός ο άνεμος απομακρύνεται από την ανεμογεννήτρια με κάποια ταχύτητα, αφετέρου τα πτερύγια της προκαλούν εκτροπή μέρους του αέρα τον οποίο παρακάμπτει την ανεμογεννήτρια χωρίς να την διαπεράσει. Έτσι ορίζουμε τον συντελεστή ισχύος μίας ανεμογεννήτριας ως εξής:

C_p μίας ανεμογεννήτριας ως εξής:

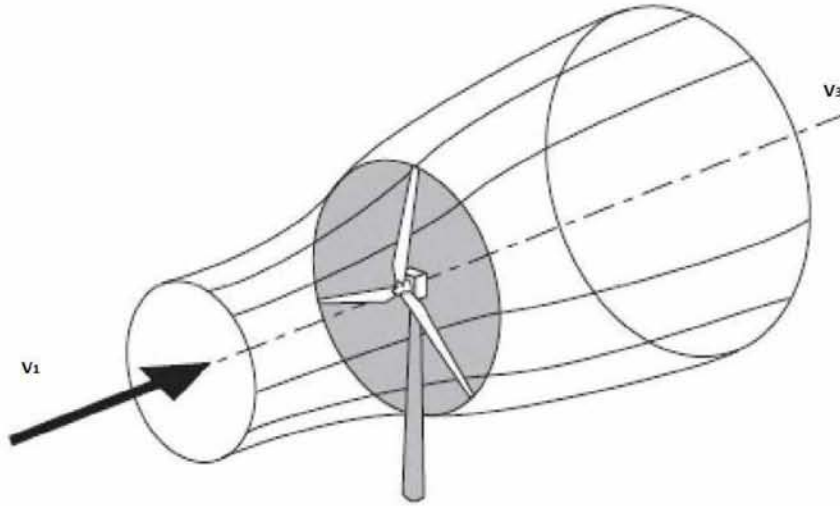
$$C_p = \frac{P_m}{P_w} \quad (\text{Εξίσωση 2.17})$$

Όπου P_m είναι η μηχανική ισχύς που παράγεται.

Σύμφωνα με τη θεωρία του δίσκου ενέργειας ο μηχανισμός δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου από το δρομέα μιας ανεμογεννήτριας θεωρείται ιδανικός. Ο ρότορας θεωρείται ως δίσκος που ενεργεί πάνω στον άνεμο μειώνοντας την στατική του πίεση. Το Σχήμα (2.25) εικονίζει το σωλήνα ροής της ανεμογεννήτριας που ορίζεται από τη διάμετρο του δρομέα.

Ο αέρας σε μεγάλη απόσταση πριν από τον δίσκο έχει κάποια στατική πίεση και πλησιάζει το δίσκο με ταχύτητα $V_w(z, t)_1$ ή αλλιώς ταχύτητα V_1 . Ο δίσκος μειώνει την ταχύτητα του αέρα και επομένως σε μεγάλη απόσταση μετά από το δίσκο όπου η πίεση του αέρα θα έχει αποκατασταθεί στην πίεση του περιβάλλοντος (στατική πίεση), η

ταχύτητα του ανέμου $V_w(z,t)_3$ ή αλλιώς ταχύτητα V_3 . θα είναι μικρότερη από την ταχύτητα V_1 .



Σχήμα 2.25 Σωλήνας ροής ανεμογεννήτριας (Κοπελιάς, 2014)

Για να ισχύει η αρχή διατήρησης της μάζας μέσα στον σωλήνα ροής θα πρέπει η διάμετρος του σωλήνα να μεγαλώνει μετά τον δρομέα.

Ο άνεμος μετά την διέλευση του από το δίσκο έχει μικρότερη ενέργεια από αυτήν που είχε αρχικά. Η διαφορά της κινητικής ενέργειας του ανέμου πριν και μετά από το δίσκο δεσμεύεται από τον ιδανικό δρομέα του ανεμοκινητήρα και ισούται με:

$$E = \frac{1}{2} * m * (v_1^2 - v_3^2) \quad (\text{Εξίσωση 2.18})$$

Η ισχύς της ενέργειας αυτής είναι:

$$P_m = \frac{1}{2} * \frac{dm}{dt} * (v_1^2 - v_3^2) = \frac{1}{2} * \rho * \pi * R^2 * v_2 \quad (\text{Εξίσωση 2.19})$$

Όπου R η ακτίνα του δρομέα και v_2 η ταχύτητα της αέριας μάζας διαμέσου του δρομέα.

Όμως, η ενέργεια W ισούται με το γινόμενο της ορμής της αέριας μάζας επί την ταχύτητα της, δηλαδή:

$$E = m * (v_1 - v_3) * v_2 \quad (\text{Εξίσωση 2.20})$$

Συνεπώς προκύπτει:

$$v_2 = \frac{1}{2} * (v_1 + v_3) \quad (\text{Εξίσωση 2.21})$$

Και

$$P_m = \frac{1}{4} * \rho * \pi * R^2 * (v_1 + v_3) * (v_1^2 + v_3^2) = \frac{1}{4} * \rho * \pi * R^2 * v_1^3 * \left[1 + \frac{v_3}{v_1} - \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^2 - \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^3 \right] \quad (\text{Εξίσωση 2.22})$$

Επομένως προκύπτει ότι τελικά για το C_p ισχύει:

$$C_p = \frac{P_m}{P_w} = \frac{1}{2} * \left[1 + \frac{v_3}{v_1} - \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^2 - \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^3 \right] \quad (\text{Εξίσωση 2.23})$$

Για την εύρεση του μεγίστου συντελεστή C_p παίρνουμε την παράγωγο της τελευταίας

Εξίσωσης ως προς $\frac{v_3}{v_1}$ ίση με το μηδέν οπότε προκύπτει.

$$\frac{dC_p}{d\left(\frac{v_3}{v_1}\right)} = 0 \Rightarrow 1 - 2 * \left(\frac{v_3}{v_1}\right) - 3 * \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^2 = 0 \Rightarrow \frac{v_3}{v_1} = \frac{1}{3} \quad (\text{Εξίσωση 2.24})$$

Οπότε με αντικατάσταση καταλήγουμε στο θεωρητικό μέγιστο του C_p ,

$$C_p \max = \frac{16}{27} = 0.593. \quad (\text{Εξίσωση 2.25})$$

Η τιμή αυτή είναι η μέγιστη θεωρητική τιμή του συντελεστή ισχύος C_p και ονομάζεται όριο του Betz. Στην πράξη όμως λόγω μηχανικών τριβών, στροβίλων και αεροδυναμικών ατελειών, η τιμή του C_p δεν ξεπερνά το 0.5. (Hau, 2012)

2.3.3. Άντωση (Lift Force) και Αντίσταση (Drag Force) πτερυγίων

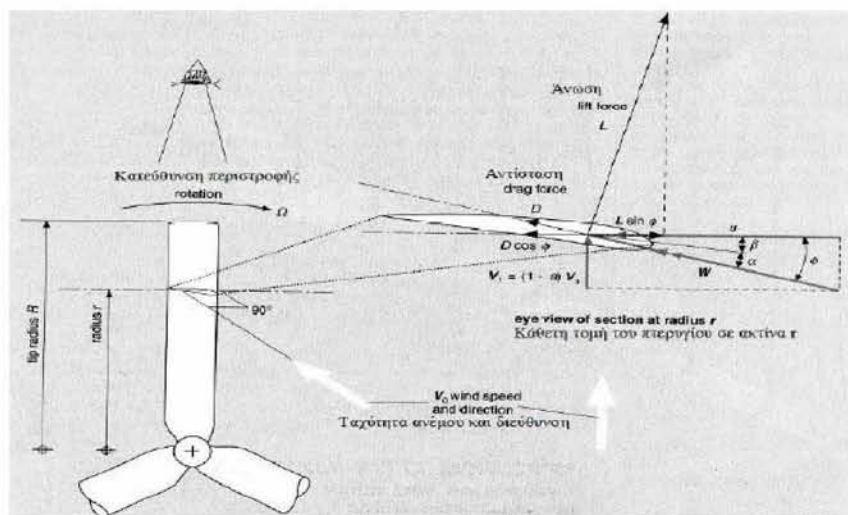
Για την κατανόηση της λειτουργίας των ανεμογεννητριών απαιτείται η επεξήγηση των αεροδυναμικών μεγεθών της άντωσης και της αντίστασης. Γενικά, όταν μια επιφάνεια βρίσκεται εντός μιας ροής αέρα ασκείται σε αυτό μια δύναμη F . Μπορεί να θεωρηθεί ότι η δύναμη αυτή αναλύεται σε δύο συνιστώσες κάθετες μεταξύ τους, την άντωση L και την αντίσταση D . Οπότε, η άντωση είναι η δύναμη που δέχεται η επιφάνεια και είναι κάθετη στη κατεύθυνση του ανέμου και η αντίσταση η αντίστοιχη δύναμη παράλληλη στην κατεύθυνση του ανέμου. Η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια με τη

διεύθυνση του αέρα ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης. Μεταβάλλοντας τη γωνία πρόσπτωσης σε μία επιφάνεια επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της άντωσης. Οι δυνάμεις της άντωσης και της αντίστασης περιγράφονται από τους αδιάστατους συντελεστές, C_L για την άντωση και C_D για την αντίσταση. Αν θεωρηθεί ότι σε επιφάνεια εμβαδού A προσπίπτει άνεμος ταχύτητας V_w και πυκνότητας ρ με γωνία πρόσπτωσης α τότε για τα μέτρα της άντωσης L και της αντίστασης D ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$L = \frac{1}{2} \rho A V_w^2 C_L \quad (\text{Εξίσωση 2.26})$$

$$D = \frac{1}{2} \rho A V_w^2 C_D \quad (\text{Εξίσωση 2.27})$$

Οι δυνάμεις της άντωσης και της αντίστασης βρίσκουν εφαρμογή και στα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Στο Σχήμα 2.26 φαίνεται το τμήμα ενός περιστρεφόμενου πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα με αναπαράσταση των δυνάμεων και των ταχυτήτων που ασκούνται σε ένα ορισμένο σημείο του πτερυγίου μια τυχαία χρονική στιγμή:



Σχήμα 2.26 Διάγραμμα δυνάμεων και ταχυτήτων σε τμήμα πτερυγίου ανεμογεννήτριας (Κάραλης, 2013)

Τα ιδανικά πτερύγια για τις ανεμογεννήτριες είναι εκείνα που εκμεταλλεύονται την άντωση ώστε οι ανεμογεννήτριες να στρέφονται με υψηλή ταχύτητα και μικρή ροπή. Η κατεύθυνση με την οποία βλέπει το πτερύγιο τον άνεμο είναι αποτέλεσμα της ταχύτητας του ανέμου και της επαπτόμενης ταχύτητας του πτερυγίου στη συγκεκριμένη θέση. Η επαπτόμενη ταχύτητα κατά μήκος του πτερυγίου v (m/sec) μεταβάλλεται ανάλογα με την τοπική ακτίνα r (m) σύμφωνα με τη Εξίσωση, $v=r*\omega$ όπου η γωνιακή ταχύτητα του πτερυγίου ω (rad/sec) παραμένει σταθερή. Η ταχύτητα του ανέμου στο πτερύγιο είναι η επ' άπειρον ταχύτητα του ανέμου μειωμένη κατά ένα συντελεστή α που υπολογίζει την επιβράδυνση της ροής λόγω της ανταλλαγής ενέργειας που λαμβάνει χώρα. Η σχετική γωνία πρόσπτωσης φ είναι η γωνία που σχηματίζει η σχετική ταχύτητα W με συγκεκριμένο σημείο του πτερυγίου και μετριέται από το επίπεδο περιστροφής του πτερυγίου. Η γωνία πρόσπτωσης α στο σημείο αυτό σχηματίζεται από τη χορδή του πτερυγίου και τη σχετική ταχύτητα W . Η γωνία βήματος β ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της σχετικής γωνίας πρόσπτωσης φ από τη γωνία πρόσπτωσης α , δηλαδή $\beta=\varphi-\alpha$. Η πτέρυγα είναι σχεδιασμένη ώστε να περιστρέφεται σε ένα επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση του ανέμου. Αφού αναλυθούν σε ένα σημείο του πτερυγίου την άντωση και την αντίσταση, στη συνέχεια αφαιρούνται και η διαφορά τους δίνει την προωστική δύναμη που είναι η αιτία περιστροφής του πτερυγίου. Ομοίως, υπολογίζεται η συνολική δύναμη που ασκείται κατά την αξονική διεύθυνση. Δηλαδή έχουμε (Κάραλης, 2013):

$$F_{\text{προωστ}} = L * \sin\varphi - D * \cos\varphi \quad (\text{Εξίσωση 2.28})$$

$$F_{\text{αξον}} = L * \cos\varphi + D * \sin\varphi \quad (\text{Εξίσωση 2.29})$$

2.3.4. Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου

Μια άλλη σπουδαία παράμετρος που αφορά την παραγόμενη ισχύ των ανεμογεννητριών είναι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου που ορίζεται ως ο λόγος της γραμμικής ταχύτητας λόγω περιστροφής των ακροπτερυγίων προς την ταχύτητα του ανέμου. Ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου λ δίνεται από τη εξίσωση:

$$\lambda = \frac{u}{V_w} = \frac{\omega r * R}{V_w} \quad (\text{Εξίσωση 2.30})$$

Όπου:

V_w , ταχύτητα του ανέμου

u , γραμμική περιστροφική ταχύτητα

ω , γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ακροπτερυγίου

R , ακτίνα του ακροπτερυγίου

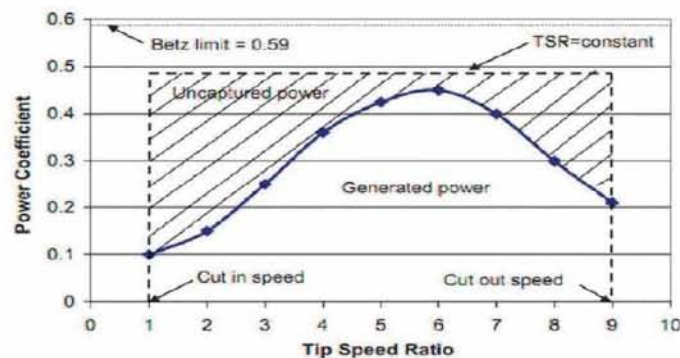
Εάν ο ρότορας περιστρέφεται με πολύ μικρή ταχύτητα επιτρέπει μεγάλη ποσότητα ανέμου να περάσει ανενόχλητη και έτσι δεν επιτρέπει τη δέσμευση της μέγιστης ισχύος από το ρότορα μέσα στα όρια του ορίου του Betz. Από την άλλη πλευρά, εάν ο ρότορας περιστρέφεται με πολύ μεγάλες ταχύτητες γίνεται για τον άνεμο ένας μεγάλος πλατύς δίσκος που δημιουργεί μεγάλη αντίσταση. Η τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου εξαρτάται από τον τύπο της ανεμογεννήτριας, τον αριθμό των πτερυγίων και το είδος της αεροτομής. Γενικά, ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου των τριπτέρυγων ανεμογεννητριών κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών μεταξύ 6 και 8, ενώ η πιο ευρέως αναφερόμενη τιμή είναι κοντά στο 7.

Εκτός από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω και κάποια άλλα θέματα επηρεάζουν την τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου, με τον οποίο πρέπει να

σχεδιασθεί μια ανεμογεννήτρια. Γενικά, μια υψηλή τιμή του λόγου αυτού είναι επιθυμητή δεδομένου ότι βοηθά στην επίτευξη μιας υψηλής ταχύτητας για τον άξονα του ρότορα η οποία επιτρέπει την καλή απόδοση της γεννήτριας. Όμως, πολύ υψηλές τιμές του λόγου αυτού προκαλούν προβλήματα όπως μείωση της απόδοσης του ρότορα λόγω αύξησης της αντίστασης του ανέμου και των απωλειών στα ακροπερυγία (Ragheb and Ragheb, 2011).

2.3.5. Μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος και βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου

Στο Σχήμα 2.27 παρουσιάζεται το διάγραμμα του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος σαν συνάρτηση του λόγου ταχύτητας ακροπερυγίου για μια ανεμογεννήτρια.



Σχήμα 2.27 Διάγραμμα του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος με τον λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου (Αλεξανδρίδης, 2010)

Παρατηρείται ότι η δέσμευση της μέγιστης ισχύος συμβαίνει για μια βέλτιστη τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπερυγίου και συγκεκριμένα στο σημείο όπου η διαφορά ανάμεσα στον πραγματικό λόγο λειτουργίας (μπλε γραμμή) και στο σταθερό θεωρητικό λόγο (διακεκομμένη γραμμή) ελαχιστοποιείται. Η διαφορά αυτή ουσιαστικά παριστάνει την ισχύ που δε δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια και οφείλεται στις απώλειες λόγω τριβών, στο πεπερασμένο μέγεθος των περυγίων, στα κατασκευαστικά λάθη και στο γεγονός ότι η ανεμογεννήτρια δε λειτουργεί με το

βέλτιστο λόγο για κάθε τιμή της ταχύτητας του αέρα.

Όμως, ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος δεν είναι μόνο συνάρτηση του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίων καθώς επηρεάζεται και από τη γωνία βήματος του πτερυγίου. Οπότε πρέπει η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα για οποιαδήποτε ταχύτητα ανέμου να παίρνει τιμές που να βελτιστοποιούν το λόγο ταχύτητα και τη γωνία βήματος με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης παραγόμενης ισχύος. Για συγκεκριμένες τιμές των λ και β υπολογίζεται η τιμή του $C_p(\lambda, \beta)$ από τον παρακάτω εκθετικό τύπο:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 * \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4 * \beta - 5 \right) * e^{\left(-\frac{12.5}{\lambda_i} \right)} \quad (\text{Εξίσωση 2.31})$$

Όπου:

C_p , αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

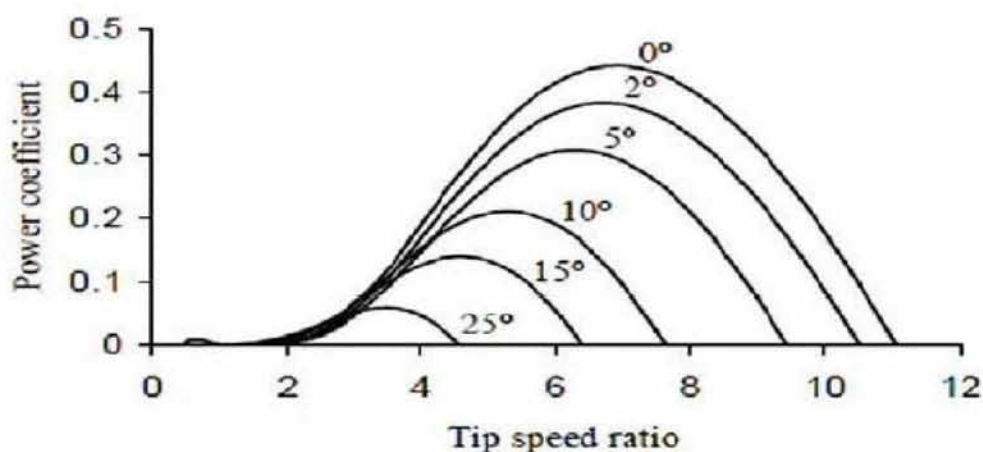
λ , λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου

β , γωνία βήματος ακροπτερυγίου

Το λ_i υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 * \beta} - \frac{0.035}{\beta^2 + 1} \quad (\text{Εξίσωση 2.32})$$

Στο γράφημα του Σχήματος 2.28 παρουσιάζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος $C_p(\lambda, \beta)$ ως συνάρτηση του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ και της γωνίας βήματος πτερυγίου β . Από το γράφημα διαπιστώνεται εύκολα πως η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος αντιστοιχεί για γωνία βήματος πτερυγίου $\beta=0$. Από τη βέλτιστη αυτή τιμή του β βρίσκουμε τις βέλτιστες τιμές για τα $C_{p, \text{lopt}}$ και λ_i που είναι $C_p=0.4832$, $\lambda_{\text{opt}}=0.6325$ και $\lambda_i=8.12$ (Αλεξανδρίδης, 2010)



Σχήμα 2.28 Διάγραμμα του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p με τον λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ , για διαφορετικές γωνίες βήματος πτερυγίου, β

2.3.6. Μέγιστη παραγόμενη ισχύς

Προηγουμένως αναφέρθηκε πως ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p εξαρτάται από την ταχύτητα ακροπτερυγίου λ . Επίσης, είδαμε ότι το C_p αντιστοιχεί σε ένα λ_{opt} , το οποίο μπορεί να βρεθεί με βάση τη διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως. Όπως είναι προφανές από τη Εξίσωση (2.30) το λ_{opt} που υπολογίστηκε νωρίτερα μπορεί να ορίσει ένα ω_{r_opt} , το οποίο πλέον θα εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα του ανέμου, δηλαδή:

$$\omega_{r_opt} = \frac{\lambda_{opt} * V_w}{R} \quad (\text{Εξίσωση 2.33})$$

Η μηχανική ισχύς P_M που παράγεται από τον άνεμο είναι:

$$P_M = \frac{1}{2} * \pi * \rho * C_p * R^2 * V_w^3 \quad (\text{Εξίσωση 2.34})$$

Η μηχανικής ισχύς που δεσμεύεται από μια στρεφόμενη μηχανή ισούται με:

$$P_M = T_M * \omega_T \quad (\text{Εξίσωση 2.35})$$

Οπότε με αντικατάσταση προκύπτει η εξίσωση για τη ροπή T_M :

$$T_M = \frac{1}{2} \pi \rho C_T(\lambda) R^3 V_w^2 \quad (\text{Εξίσωση 2.36})$$

Όπου:

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} \quad (\text{Εξίσωση 2.37})$$

Όπως γίνεται προφανές από την παραπάνω Εξίσωση ένα C_{p_opt} και ένα λ_{opt} ορίζουν επίσης και ένα T_{M_opt} , το οποίο και αυτό είναι εξαρτώμενο μόνο από την ταχύτητα του ανέμου όπως και το ω_{r_opt} :

$$T_{M_opt} = \frac{1}{2} \pi \rho C_T(\lambda_{opt}) R^2 V_w^3 \quad (\text{Εξίσωση 2.38})$$

Όπου:

$$C_T(\lambda_{opt}) = C_{p_opt} / \lambda_{opt} \quad (\text{Εξίσωση 2.39})$$

Επομένως ισχύει:

$$T_{M_opt} = \frac{1}{2} \pi \rho \frac{C_{p_opt}}{\lambda_{opt}^3} R^5 V_w^3 \omega_{r_opt}^2 \quad (\text{Εξίσωση 2.40})$$

Από την τελευταία Εξίσωση και επιστρέφοντας στη Εξίσωση (2.35) καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως για να επιτευχθεί P_{M_max} πρέπει να έχουμε λειτουργία στο μέγιστο ω_{r_opt} . (Αλεξανδρίδης, 2010)

2.3.7. Γωνία βήματος πτερυγίου

Στις ανεμογεννήτριες που εφαρμόζουν έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων (pitch control), τα πτερύγια θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται, περιστρέφοντας είτε ολόκληρο το πτερύγιο είτε κάποιο τμήμα του γύρω από τον άξονα τους. Η περιστροφή αυτή θα πρέπει να γίνεται στην κατεύθυνση όπου πραγματοποιείται μείωση της γωνίας πρόσπτωσης της ροής

του αέρα στην αεροτομή του πτερυγίου. Στην περίπτωση που παραγωγή ενέργειας ξεπεράσει ένα ασφαλές επίπεδο, ο μηχανισμός ελέγχου της γωνίας των πτερυγίων αρχίζει να στρίβει τα πτερύγια με αργό ρυθμό έτσι ώστε να μειώνεται ο άνεμος που προσπίπτει πάνω τους. Στη συνέχεια όταν ελαττωθεί η ένταση του ανέμου τα πτερύγια επαναφέρονται στην αρχική τους θέση προκειμένου να γίνεται μεγαλύτερη πρόσπτωση του πάνω τους και άρα να επιτευχθεί μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας. Αναφέρεται ότι για τον έλεγχο βήματος πτερυγίου χρησιμοποιούνται υδραυλικοί ή ηλεκτρικοί ενεργοποιητές (Ευαγγέλου, 2015).

2.3.8. Απώλεια στήριξης

Στις ανεμογεννήτριες με παθητική απώλεια στήριξης τα πτερύγια είναι τοποθετημένα στον άξονα σε μια σταθερή γωνία. Η γεωμετρία των πτερυγίων είναι τέτοια ώστε να διασφαλίζεται από αεροδυναμική άποψη ότι σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου θα εμφανιστούν στα πλάγια των πτερυγίων από την αντίθετη πλευρά πρόσπτωσης του ανέμου κάποιες αεροδυναμικές διαταραχές. Οι διαταραχές αυτές, δηλαδή δίνες και στροβιλισμοί του αέρα, αντισταθμίζουν τις δυνάμεις άντωσης στα πτερύγια και εμποδίζουν την αρνητική επίδραση τους στο ρότορα. Το αεροδυναμικό αυτό φαινόμενο ονομάζεται απώλεια στήριξης (stall control). Οι αεροδυναμικές διαταραχές που προκαλούν την απώλεια στήριξης έχουν ως τελική συνέπεια τις διαρκείς αρνητικές ολισθήσεις στην ταχύτητα περιστροφής που περιγράφονται με τον όρο "στολάρισμα" (stalling). Κατά την απώλεια στήριξης το πτερύγιο στρέφεται με αργό ρυθμό κατά μήκος του άξονα του ώστε να είναι σίγουρο ότι όταν η ταχύτητα του ανέμου φθάσει την καθορισμένη ταχύτητα τα πτερύγια θα χάσουν την απώλεια στήριξης σταδιακά και όχι απότομα. Το βασικό πλεονέκτημα των

ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούν έλεγχο απώλειας στήριξης είναι ότι πάνω στο ρότορα τους δεν παρατηρούνται κινούμενα μέρη. Κύριας σημασίας είναι το γεγονός ότι η μεταβολή της γωνίας στην απώλεια στήριξης γίνεται αντίθετα προς αυτή της γωνίας βήματος πτερυγίου. Τέλος, η στρέψη των πτερυγίων στην απώλεια στήριξης γίνεται με χρήση υδραυλικών ή ηλεκτρικών μηχανισμών (Ευαγγέλου, 2015).

2.3.9. Οριακές ταχύτητες ανέμου στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας

- Η ταχύτητα ένταξης (Cut in speed):

Είναι η ταχύτητα του ανέμου στην οποία η ανεμογεννήτρια θα αρχίσει την «παραγωγή» ενέργειας με τυπικές ταχύτητες ανέμου από 3 έως 5 m/s, ανάλογα τον τύπο της ανεμογεννήτριας.

- Η ονομαστική ταχύτητα (Nominal speed):

Αυτή πρόκειται για την κατώτερη ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια φτάνει την ονομαστική της ισχύ εξόδου. Υπάρχει η δυνατότητα να έχουμε μεγαλύτερη ισχύ εξόδου στις μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου αλλά μόνο με τον έλεγχο του στροφέα για να διατηρηθεί μια σταθερή ισχύς εξόδου, να περιορίσει η κόπωση των πτερυγίων και να αποφευχθεί η υπερφόρτωση.

- Η ταχύτητα αποκοπής (Cut-out speed):

Πρόκειται για την υψηλότερη ταχύτητα του ανέμου που μπορεί να λειτουργήσει η ανεμογεννήτρια. Πάνω από αυτήν την ταχύτητα η γεννήτρια σταματάει, για να αποτραπεί πιθανή βλάβη στα πτερύγια. Συνήθως η τιμή αυτή είναι άνω των 20 m/s αλλά ποικίλει ανάλογα τον τύπο της ανεμογεννήτριας. (people.bu.edu/dew11/windturbine.html)

2.3.10. Αδυναμίες ανεμογεννητριών στην «παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών είναι η διακύμανση στην απόδοση ισχύος λόγω του περιοδικού χαρακτήρα του φαινομένου (χρονικά μεταβαλλόμενη ένταση του ανέμου). Αυτό σε συνδυασμό με τη μεγάλη πιθανότητα σύμπτωσης υψηλών αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας με περιόδους άπνοιες, είναι μεγάλο πρόβλημα. Επίσης, ο μόνος τρόπος αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας είναι μέσω της χρήσης μπαταριών, οι οποίες όμως αυξάνουν σημαντικά το κόστος. Η αιολική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί (εκτός αν χρησιμοποιηθούν μπαταρίες που όμως αυξάνουν κατά πολύ το κόστος). Ως μορφή ενέργειας παρουσιάζει χαμηλή πυκνότητα και έχει αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτούνται πολλές ανεμογεννήτριες για την παραγωγή αξιόλογης ισχύος και αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια γης (www.sigmalive.com).

2.4. Τύποι ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες. Η διακριτοποίηση αυτή γίνεται βασισμένη σε πολλούς παράγοντες. Ένας από τους βασικότερους παράγοντες είναι ο προσανατολισμός του άξονα της ανεμογεννήτριας και ο διαχωρισμός γίνεται σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Επιπρόσθετα άλλοι παράγοντες διακριτοποίησης είναι το μέγεθος της ανεμογεννήτριας (micro, μικρό, μεσαίο, μεγάλο μικρό). Ένας ακόμα παράγοντας διαχωρισμού του τύπου των ανεμογεννητριών είναι ανάλογα τη δυνατότητα μετακίνησης (φορητή, σταθερή,) ισχύς (μικρή μεγάλη), προσανατολισμός αξόνων σε σχέση με τη ροή του ανέμου, αριθμό και θέση πτερυγίων ως προς τον πύργο, υλικό κατασκευής πύργου (χάλυβας, ενισχυμένος

χάλυβας, σκυρόδεμα κλπ), θέση εγκατάστασης (έδαφος, θάλασσα, κτήρια, πλοία). Βασικός όμως παράγοντας για τον διαχωρισμό των ανεμογεννητριών όσον αφορά την επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού είναι ο τρόπος θεμελίωσης. Ο τρόπος θεμελίωσης διαχωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες: θεμελίωση στην ξηρά και θεμελίωση στη θάλασσα. Η θεμελίωση στην ξηρά γίνεται είτε με θεμελίωση βαρύτητας είτε με πασσάλους, ενώ στην θάλασσα είτε με κατασκευές σταθερής έδρασης είτε με πλωτές κατασκευές. Οι κατασκευές σταθερής έδρασης διακρίνονται σε θεμελίωση βαρύτητας, μεταλλικού πύργου, μονού πυλώνα, τριπλού πυλώνα, τρίποδο και έδραση κενού

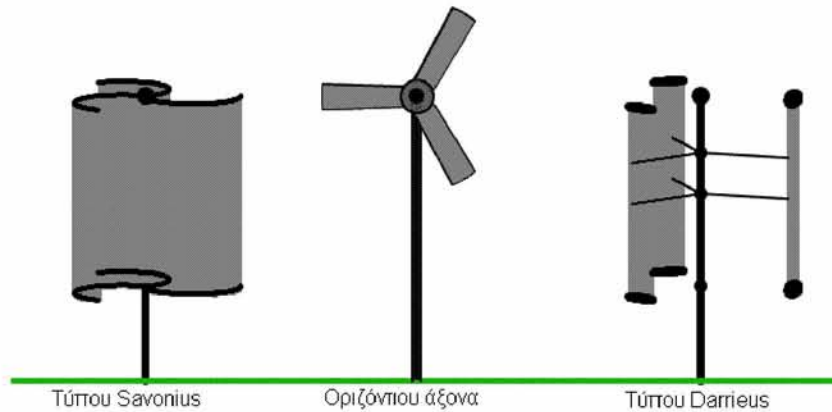
αναρροφήσεως. Οι πλωτές κατασκευές διακρίνονται σε spar buoy, semi-submersible και tension leg platform. Όλες οι παραπάνω κατηγορίες παρουσιάζονται αναλυτικά στα παρακάτω κεφάλαια.

2.5. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα
- Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Ενώ οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, τις ανεμογεννήτριες τύπου Savonius και τις ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus.



Σχήμα 2.29 Τύποι ανεμογεννητριών (www.saltireserver.com)

2.5.1. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα ο ρότορας (δρομέας) και η ηλεκτρογεννήτρια είναι τοποθετημένα στην κορυφή του πύργου και πρέπει να είναι στραμμένες προς τον άνεμο. Η στροφή των μικρών ανεμογεννητριών προς τον άνεμο πραγματοποιείται με έναν απλό δείκτη κατεύθυνσης άνεμου, ενώ η στροφή των μεγάλων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ένα αισθητήρα ανέμου σε συνδυασμό με ένα σερβομοτέρ.

Στις περισσότερες ανεμογεννήτριες υπάρχει ένα κιβώτιο ταχυτήτων, με το οποίο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων για την λειτουργία της ηλεκτρικής γεννήτριας. Η τοποθέτηση του συστήματος της γεννήτριας γίνεται έμπροσθεν του πύργου ώστε να προσπίπει πάνω σε αυτό ο άνεμος. Η κατασκευή των πτερυγίων γίνεται από ανθεκτικό υλικό για την αποτραπή της πιθανότητας λυγισμού τους ή ακόμα και θραύσης τους λόγω των δυνατών ανέμων. Οι λεπίδες τοποθετούνται σε σημαντική απόσταση μπροστά από τον πύργο και μερικές φορές έχουν μικρή κλίση προς τα εμπρός μέσα στον άνεμο. Ως προς την κατεύθυνση του προσπίπτοντος ανέμου, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ταξινομούνται σε ανάντη και κατάντη. Οι περισσότερες είναι ανάντη, δεδομένου ότι οι επαναλαμβανόμενες αναταραχές μπορεί να οδηγήσουν σε κόπωση και σε

αστοχία του υλικού. Οι κατάντη μηχανές, παρά το πρόβλημα της αναταραχής λόγω ανέμου, έχουν κατασκευαστεί επειδή δεν χρειάζονται έναν επιπλέον μηχανισμό για τη διατήρησή τους στην κατεύθυνση του ανέμου και επειδή σε δυνατούς ανέμους τα πτερύγια μπορούν να υποστούν κάμψη που μειώνει την περιβάλλουσα περιοχή τους (Σχήμα 2.30).



Σχήμα 2.30 Τύποι ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες, οριζοντίου άξονα, που χρησιμοποιούνται στα αιολικά πάρκα, έχουν συνήθως τρία πτερύγια και στρέφονται προς τον άνεμο με μοτέρ τα οποία ελέγχονται μέσω υπολογιστή. Έχουν τη δυνατότητα να αναπτύσσουν υψηλές ταχύτητες περιστροφής, πάνω από 320 km/h, ενώ έχουν υψηλή απόδοση και χαμηλή μέση ροπή, με όλα αυτά να τις καθιστούν αξιόπιστες. Τα πτερύγια έχουν συνήθως λευκό χρώμα ώστε κατά διάρκεια της ημέρας να είναι ορατότητα από αεροσκάφη. Το μήκος τους κυμαίνεται από 20 έως 50 m. Το ύψος του πύργου της ανεμογεννήτριας έχει εύρος 60 - 90 m. Ο ρυθμός περιστροφής των πτερυγίων είναι 10 - 22 στροφές/min. Κατά τις 22 στροφές/min λεπτό η ταχύτητα υπερβαίνει τα 90m/s. Για την αύξηση της ταχύτητας της γεννήτριας χρησιμοποιείται ένα κιβώτιο ταχυτήτων, αν και κάποιες ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής να γίνεται απευθείας στην γεννήτρια. Όλες οι ανεμογεννήτριες είναι εξοπλισμένες με συστήματα προστασίας για την αποφυγή βλάβης κατά την

επιβολή μεγάλων ταχυτήτων ανέμου, γεγονός που αυξάνει ακόμη περισσότερο την αξιοπιστία τους. Τέλος, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ταξινομούνται ανάλογα με το μέγεθος τους, την παραγόμενη ισχύ, το ύψος του ρότορα ή τη διάμετρο των πτερυγίων.

Πίνακας 2.4 Ταξινόμηση μεγεθών ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

Μέγεθος Α/Γ	Ισχύς εξόδου (kW)	Ύψος πύργου (m)	Διάμετρος ρότορα (m)	Επιφάνεια σάρωσης (m ²)
micro	Μικρότερη από 1	-	Μικρότερη από 1	Μικρότερη από 1
Μικρό	1 με 50	5 με 30	1 με 16	1 με 200
Μεσαίο	50 με 1000	30 με 70	16 με 55	200 με 2400
Μεγάλο	Πάνω από 1000	Πάνω από 50	Πάνω από 55	Πάνω από 2400

2.5.2. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, όπως και οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα, ο άξονας του ρότορα είναι κάθετος προς το έδαφος και όλα τα εξαρτήματα που αποτελούν την ανεμογεννήτρια βρίσκονται στην βάση της. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα είναι δυο τύπων: Τύπος Savonius (Σχήμα 2.31) και τύπος Darrieus (Σχήμα 2.32), ωστόσο, μπορούν να συνδυαστούν οι δύο αυτοί τύποι σε μία κατασκευή.



Σχήμα 2.31 Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα τύπου Savonius
(www.mwps.world)



Σχήμα 2.32 Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα τύπου Darrieus (www.researchgate.net)

Τα πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα συγκριτικά με αυτές του οριζόντιου άξονα είναι τα εξής:

- Δεν απαιτείται σύστημα προσανατολισμού, καθώς η κίνηση της έλικας μπορεί να προκληθεί υπό οποιασδήποτε διεύθυνσης ανέμου.
- Μεταφορά του παραγόμενου έργου απ' ευθείας στο έδαφος και στην ηλεκτρογεννήτρια μέσω του κατακόρυφου άξονα.
- Η κατασκευή του πύργου στήριξης είναι απλή, σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα όπου ο πύργος στήριξης έχει απαιτήσεις.
- Δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί ρύθμιση του βήματος της πτερωτής, για τον έλεγχο της ισχύος της μηχανής
- Μπορούν να εκμεταλλευτούν μικρότερες ταχύτητες ανέμου, εφόσον βρίσκονται κοντά στο έδαφος.
- Το κέντρο βάρους τους είναι χαμηλότερο και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με χαμηλότερο κόστος.
- Η κατασκευή τους είναι πιο απλή και η συντήρησή τους ευκολότερη.

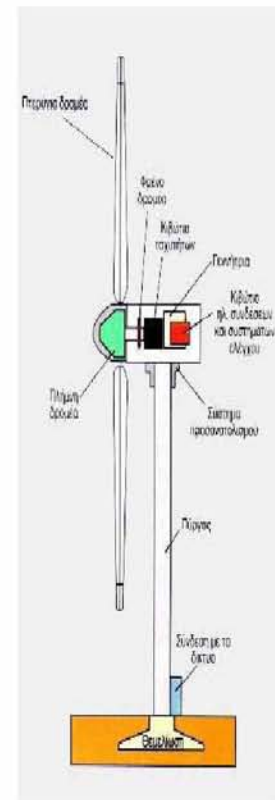
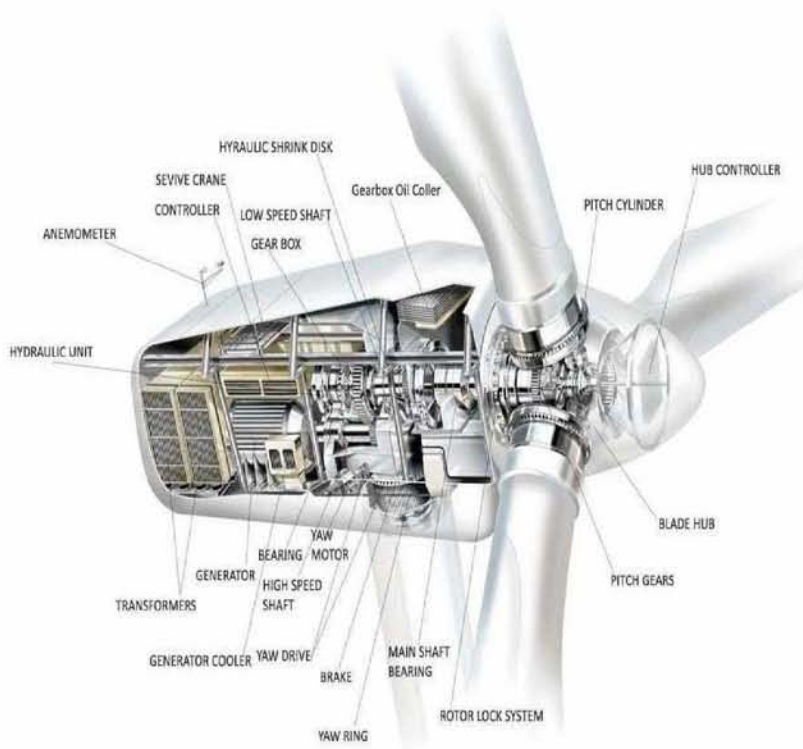
Ωστόσο, οι ανεμογεννήτριες αυτές:

- Έχουν μεγάλο μέγεθος
- Μη ομαλή ροπή στρέψης
- Χαμηλό συντελεστή απόδοσης

Οι τελευταίες ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα κατασκευάστηκαν τη δεκαετία του 1980, ενώ δεν υπάρχει τεχνολογικές εξελίξεις από τότε (Anca, 2017).

2.6. Δομή ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

Στο σημείο αυτό θα αναλυθούν τα επιμέρους μέρη από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, η οποία είναι και ο πιο διαδεδομένος τύπος ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.33 Δομή ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (www.e-education.psu.edu)

Ακολουθεί η επεξήγηση του Σχήματος 2.33 και στη συνέχεια η ανάλυση των βασικότερων μερών από τα οποία αποτελείται η ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.

- Tower (Πύργος ανεμογεννήτριας)
- Nacelle (Ατρακτος ανεμογεννήτριας)
- Rotor (Δρομέας)
- Blades (Πτερύγια)
- Pitch cylinder (Κύλινδρος στροφέα πτερυγίων)
- Pitch gears (Γρανάζια στροφέα πτερυγίων)
- Blade hub (Κέλυφος έδρασης πτερυγίων)
- Hub controller (Ελεγκτήρας κελύφους)
- Rotor lock system (Σύστημα στήριξης δρομέα)
- Anemometer (Ανεμόμετρο)
- Service crane (Σημείο πρόσδεσης με γερανό για την ανύψωση)
- Controller (Ελεγκτήρας)
- Hydraulic shrink disk (Συσκευή ένωσης κελύφους με τον άξονα)
- Low speed shaft (Άξονας χαμηλής ταχύτητας)
- Gear box(Κιβώτιο ταχυτήτων)
- Gearbox oil cooler (Ψήκτρα λαδιού κιβωτίου ταχυτήτων)
- Hydraulic unit (Υδραυλική μονάδα)
- Transformers (Μετασχηματιστές τάσεως ρεύματος)
- Generator (Γεννήτρια)
- Generator cooler (Ψήκτρα γεννήτριας)
- Bearing (Έδρανο κύλισης-Ρουλεμάν)
- Yaw motor (Μοτέρ οδηγού αποφυγής εκτροπής)

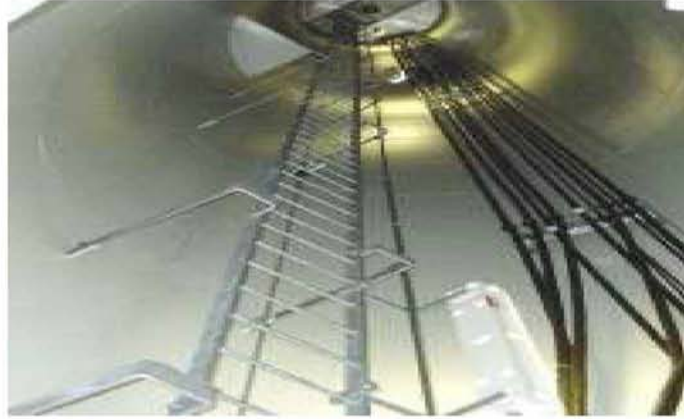
- Yaw drive (Οδηγός για την αποφυγή εκτροπής)
- Yaw ring (Μετάδοση κίνησης οδηγού αποφυγής εκτροπής)
- High speed shaft (Άξονας υψηλής ταχύτητας)
- Brake (Φρένο)
- Main shaft bearing (Εδρανο κύλισης-Ρουλεμάν κυρίου άξονα περιστροφής)

Tower (Πύργος ανεμογεννήτριας)

Ο πύργος στις ανεμογεννήτριες είναι αυτός που αποτελεί τον κορμό της όλης κατασκευής. Είναι συνήθως μεταλλικός (από χάλυβα) και σπανιότερα από οπλισμένο σκυρόδεμα (Σχήμα 2.34). Έχει σχήμα κωνικό για την αύξηση της αντοχής και μείωσης του κόστους (Σχήμα 2.35). Στην κορυφή του φέρει το κέλυφος και τον ρότορα. Η θεμελίωση του πύργου γίνεται συχνά σε βάση από οπλισμένο σκυρόδεμα με κοχλίες. Τα τυπικά ύψη των πύργων των ανεμογεννητριών κυμαίνονται από 60-80 μέτρα. Στο εσωτερικό του πύργου υπάρχουν καλώδια προκειμένου να πραγματοποιείται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και για τη γείωση της κατασκευής καθώς επίσης και σκάλες ή ανελκυστήρες έτσι ώστε να μπορεί το προσωπικό να προχωρήσει στη συντήρηση του κελύφους. (Τζάφος, 2015)



Σχήμα 2.34 Πύργος ανεμογεννήτριας κυλινδρικού τύπου και δικτυωτού τύπου (www.windfarmbop.com)



Σχήμα 2.35 Εσωτερικό πύργου ανεμογεννήτριας (www.windfarmbop.com)

Nacelle (Άτρακτος ανεμογεννήτριας)

Η άτρακτος μιας ανεμογεννήτριας βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και συνδέεται με το ρότορα. Στην άτρακτο βρίσκεται όλος ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, η γεννήτρια, το κύριο πλαίσιο κ.λπ. Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η άτρακτος είναι το ανθρακόνημα (fiberglass) το οποίο προστατεύει τα εσωτερικά στοιχεία από το περιβάλλον (Σχήμα 2.36) (Τζάφος, 2015).



Σχήμα 2.36 Άτρακτος ανεμογεννήτριας (www.researchgate.net)

Rotor (Δρομέας)

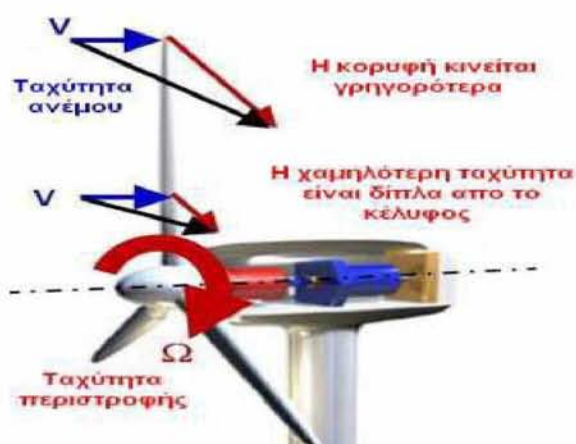
Ο ρότορας αποτελείται από την πλήμνη και τα πτερύγια. Πάνω στην πλήμνη πραγματοποιείται η έδραση των πτερυγίων (Σχήμα 2.37) (Τζάφος, 2015).



Σχήμα 2.37 Πλήμνη ανεμογεννήτριας (www.pinterest.com)

Blades (Πτερύγια)

Ο αριθμός των πτερυγίων κυμαίνεται μεταξύ του ένα και του τρία και έχουν σχήμα αεροδυναμικό (ενιαίο ή με ακροπτερύγια). Συνήθως οι ανεμογεννήτριες έχουν τρία πτερύγια. Η περιστροφή των πτερυγίων οφείλεται στη συνδυασμένη δύναμη άνωσης και πίεσης η οποία ασκείται, όταν οι μάζες του αέρα προσπίπτουν στα πτερύγια (Σχήμα 2.38). Το σχήμα των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας έχουν αεροδυναμικό σχήμα και μπορεί να είναι είτε ενιαία είτε να διαθέτουν ακροπτερύγια. Το υλικό κατασκευής των πτερυγίων είναι συνήθως από ανθρακόνημα, λόγω του μικρού βάρους κατασκευής και της αντοχής τους. (Τζάφος, 2015)



Σχήμα 2.38 Τρόπος περιστροφής πτερυγίων (www.researchgate.net)

Στροφέας πτερυγίων (Pitch)

Κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας, το βήμα περιστροφής του πτερυγίου για τη διατήρηση της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα εντός των ορίων λειτουργίας κατά την συνεχόμενη αλλαγή ταχύτητας του ανέμου, ρυθμίζεται από το σύστημα ελέγχου στροφέα των πτερυγίων. (Ταβουλάρης, 2017)

Σύστημα μετάδοσης κίνησης

Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης αποτελείται από (α) τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας με τα έδρανα τους, και (β) το κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο πολλαπλασιάζει τις στροφές και προσαρμόζει την ταχύτητα του δρομέα στην ταχύτητα περιστροφής που χρειάζεται η ηλεκτρογεννήτρια για την παραγωγή του ρεύματος. (Ταβουλάρης, 2017)

Ηλεκτρογεννήτρια

Η ηλεκτρική γεννήτρια η οποία είναι είτε σύγχρονη είτε επαγωγική, συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω υδραυλικού ή ελαστικού συνδέσμου με σκοπό τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Οι τυπικές ηλεκτρογεννήτριες λειτουργούν με περιστροφική ταχύτητα από 1000 έως 3600 στροφές/δευτερόλεπτο. (Ταβουλάρης, 2017)

Μηχανικό φρένο (Brake)

Το μηχανικό φρένο χρησιμοποιείται για το σταμάτημα της περιστροφής του ρότορα σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όπως δυνατούς ανέμους ή υψηλές ταχύτητες περιστροφής (Σχήμα 2.39). Ακόμα, το φρένο χρησιμοποιείται σε περίπτωση συντήρησης όπου ο ρότορας πρέπει να κρατηθεί ακίνητος. (Ταβουλάρης, 2017)



Σχήμα 2.39 Μηχανικό φρένο ανεμογεννήτριας (www.wikipedia.com)

2.7. Κριτήρια επιλογής θέσης κατασκευής ανεμογεννήτριας

Τα κριτήρια τα οποία λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της θέσης εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου είναι:

- Διαθεσιμότητα αιολικού δυναμικού. Στην ενότητα 2.3 «Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο – Αρχές φυσικής και αρχές λειτουργίας των ανεμογεννητριών – Αεροδυναμική Ανάλυση» αναλύεται ενδελεχώς πως επηρεάζεται η ταχύτητα του ανέμου και συνεπώς το αιολικό δυναμικό αναλόγως την περιοχή, το υψόμετρο καθώς και τα φυσικά η τεχνητά εμπόδια που υπάρχουν στην περιοχή.
- Συμμόρφωση σύμφωνα με το ειδικό χωροταξικό πλαίσιο για τις Α.Π.Ε. (περιοχές Natura, αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, οπτική ακουστική όχληση κλπ.).
- Εξασφάλιση απαραίτητου σε μέγεθος χώρου για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών και επίλυση θεμάτων ιδιοκτησίας γης.
- Δυνατότητα πρόσβασης στην περιοχή ή κατασκευή των απαιτούμενων έργων υποδομής
- Η υπό μελέτη περιοχή να βρίσκεται κατά το δυνατόν πιο κοντά σε υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

2.8. Επίδραση στο περιβάλλον

Οι ανεμογεννήτριες, αιολικά πάρκα και οι άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας βοηθούν ιδιαίτερα στην προστασία του περιβάλλοντος. Παρόλαυτα, όπως κάθε τεχνητή κατασκευή έχουν και κάποιες αρνητικές επιδράσεις στο περιβάλλον:

Όγληση θορύβου

Είναι από τα σημαντικότερα προβλήματα, αλλά ταυτόχρονα και από τα πιο εύκολα όσον αφορά τον έλεγχο και την πρόληψη. Ο θόρυβος που εκπέμπεται από τις ανεμογεννήτριες χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την προέλευση του σε μηχανικό και αεροδυναμικό θόρυβο. Ο μηχανικός θόρυβος προέρχεται από τα περιστρεφόμενα μηχανικά τμήματα (κιβώτιο ταχυτήτων, ηλεκτρογεννήτρια, έδρανα κλπ.) ενώ ο αεροδυναμικός από την περιστροφή των πτερυγίων.

Οι καινούργιες ανεμογεννήτριες είναι μηχανισμοί πολύ ήσυχοι σε σχέση με την ισχύ τους. Οι μηχανικοί θόρυβοι έχουν ελαχιστοποιηθεί με εξαρχής σχεδίαση (γρανάζια πλάγιας οδόντωσης), ή με εσωτερική ηχομονωτική επένδυση στο κέλυφος της κατασκευής. Επιπλέον, ο μηχανικός θόρυβος αντιμετωπίζεται με χρήση ηχομονωτικών πετασμάτων και αντικραδασμικών πελμάτων στήριξης. Επιπρόσθετα, ο αεροδυναμικός θόρυβος αντιμετωπίζεται με ιδιαίτερα λεπτομερή σχεδίαση των πτερυγίων.

Το επίπεδο του αντιληπτού θορύβου από μία ανεμογεννήτρια σύγχρονων προδιαγραφών σε απόσταση 200 μέτρων, είναι ιδιαίτερα μικρό σε σχέση με το επίπεδο θορύβου που εκλύεται από μια μικρή επαρχιακή πόλη και βεβαίως δεν αποτελεί πηγή ενόχλησης. Με δεδομένη δε τη νομοθετημένη απαίτηση να εγκαθίστανται οι ανεμογεννήτριες σε ελάχιστη απόσταση 500 μέτρων από τους οικισμούς.

Επιπρόσθετα, για τις ταχύτητες ανέμου για τις οποίες είναι σε λειτουργία οι

ανεμογεννήτριες ο φυσικός θόρυβος (θόρυβος ανέμου σε δένδρα και θάμνους) είναι πολύ μεγαλύτερος από κάθε θόρυβο που προκαλείται από αυτές.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη τη θέση των αιολικών πάρκων, προκειμένου οι ανεμογεννήτριες για να έχουν καλύτερη απόδοση, προκύπτει με βεβαιότητα ότι τα αιολικά πάρκα δεν προκαλούν:

- αύξηση της υπάρχουσας στάθμης θορύβου εκτός των ορίων τους και ακόμη περισσότερο σε κατοικημένες περιοχές
- έκθεση ανθρώπων σε υψηλή στάθμη θορύβου.

Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές αφορούν προβλήματα που προκαλούνται λόγω της θέσης των ανεμογεννητριών σε σχέση με υπάρχοντες σταθμούς τηλεόρασης ή ραδιοφώνου καθώς και σε ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές από τις ίδιες.

Είναι πραγματικότητα ότι, η διάδοση των εκπομπών στις συχνότητες της τηλεόρασης ή του ραδιοφώνου επηρεάζεται από εμπόδια που υπάρχουν μεταξύ πομπού και δέκτη. Το βασικότερο πρόβλημα από τις ανεμογεννήτριες έχει προέλευση από τα κινούμενα πτερύγια που καθίστανται υπεύθυνα για την αυξομείωση σήματος λόγω αντανακλάσεων. Το φαινόμενο αυτό συνέβαινε πολύ περισσότερο στην πρώτη γενιά ανεμογεννητριών οι οποίες είχαν μεταλλικά πτερύγια. Τα πτερύγια των συγχρόνων ανεμογεννητριών κατασκευάζονται αποκλειστικά από συνθετικά υλικά, τα οποία έχουν ελάχιστη επίπτωση στη μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η Ελληνική νομοθεσία που αφορά την αδειοδότηση ενός αιολικού πάρκου, καθιστά δυνατή την έκδοση άδειας για αυτό, μόνο εάν υφίστανται ελάχιστες αποστάσεις από τηλεπικοινωνιακούς ή ραδιοτηλεοπτικούς σταθμούς. Κάθε πιθανό πρόβλημα παρεμβολών μπορεί να προληφθεί με σωστό σχεδιασμό και χωροθέτηση ή να

διορθωθεί με μικρό κόστος από τον επενδυτή του αιολικού πάρκου με μια σειρά από απλές τεχνικές και μέτρα, όπως π.χ. η εγκατάσταση επιπλέον αναμεταδοτών. Όσον αφορά την συμβατότητα και τις παρεμβολές στις τηλεπικοινωνίες, στις υπόλοιπες ευρωπαϊκές χώρες οι πύργοι των ανεμογεννητριών όχι μόνον δεν δημιουργούν εμπόδια, αλλά χρησιμοποιούνται ήδη για την εγκατάσταση κεραιών προς διευκόλυνση υπηρεσιών επικοινωνιών, όπως η κινητή τηλεφωνία.

Οπτική όχληση

Η οπτική όχληση είναι ένα θέμα υποκειμενικό και υπάρχει δυσκολία στην θέσπιση κανονισμών. Από έρευνες που διεξάχθηκαν σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης προέκυψε ότι κάποιος που είναι ευνοϊκά διατεθειμένος απέναντι στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, αποδέχεται τις ανεμογεννήτριες και οπτικά πολύ πιο εύκολα από κάποιον που είναι αρνητικός εξ αρχής. Επίσης, προέκυψε ότι τα αιολικά πάρκα είναι πιο αποδεκτά από αισθητικής άποψης σε ανθρώπους που είναι ενημερωμένοι για τα οφέλη που προέρχονται από την χρήση τους.

Επιπτώσεις στον πληθυσμό πουλιών

Ένα σύνθετο πρόβλημα που προκύπτει όχι μόνο στις ανεμογεννήτριες αλλά και σε άλλες σταθερές κατασκευές είναι ότι τα πουλιά καθώς πετούν μπορούν να συγκρουστούν με αυτές. Ωστόσο η σύγκρουση των πουλιών με τις ανεμογεννήτριες δεν προκαλεί ιδιαίτερο πρόβλημα όπως συμβαίνει με άλλες κατασκευές. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες, υπολογίστηκε ότι στον συνολικό αριθμό πουλιών που σκοτώνονται ετησίως, μόνο 20 θάνατοι είναι αυτοί που προκαλούνται από ανεμογεννήτριες. Παρά το μικρό ποσοστό θανάτων, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός αιολικού πάρκου το θέμα της προστασίας του πληθυσμού των πουλιών σε ευαίσθητες οικολογικά και προστατευόμενες περιοχές.

Με βάση όλα τα παραπάνω, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι οι οποιοσδήποτε επιπτώσεις από τις ανεμογεννήτριες έχουν τη δυνατότητα να περιορισθούν ή και να εξαλειφτούν, με σωστή αντιμετώπιση και προσχεδιασμό. Επομένως, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να πραγματοποιείται με τρόπο που να προκαλεί τη μικρότερη δυνατή επιβάρυνση στο περιβάλλον. (Μπινόπουλος και Χαβιαρόπουλος, 2015).

2.9. Θεσμικό πλαίσιο. Εθνική & Ευρωπαϊκή πολιτική

Όσον αφορά την εθνική πολιτική των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αυτή προσδιορίζεται κυρίως από δεσμεύσεις που αφορούν τον περιορισμό των ρύπων και τη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης.

Διάκριση του εθνικού χώρου σε κατηγορίες: (Μπινόπουλος και Χαβιαρόπουλος, 2015)

Όσον αφορά το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό και τα χωροταξικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της Ελλάδας, διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες:

- Η ηπειρωτική χώρα, συμπεριλαμβανομένης της Εύβοιας.
- Η Αττική, που λόγω του μητροπολιτικού χαρακτήρα της αποτελεί ειδικότερη κατηγορία της ηπειρωτικής χώρας.
- Τα νησιά του Ιονίου και του Αιγαίου Πελάγους, συμπεριλαμβανομένης της Κρήτης.
- Ο υπεράκτιος θαλάσσιος χώρος και οι νησίδες.

Ειδικά κριτήρια χωροθέτησης για την κάθε παραπάνω κατηγορία:

Για τη χωροθέτηση των αιολικών εγκαταστάσεων στα νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου

Πελάγους και της Κρήτης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα εξής κριτήρια (Μπινόπουλος και Χαβιαρόπουλος, 2015):

- Το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό κάλυψης εδαφών σε επίπεδο πρωτοβάθμιου Ο.Τ.Α. δεν πρέπει να υπερβαίνει το 4% ανά ΟΤΑ δηλαδή 0,53 τυπικές ανεμογεννήτριες / 1000 στρέμματα.
- Ιδιαίτερα στα μη διασυνδεδεμένα με το σύστημα και το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της ηπειρωτικής χώρας νησιά και μέχρι τη διασύνδεσή τους η συνολική ισχύς των αιολικών σταθμών ανά νησί δεν πρέπει να ξεπερνά το διπλάσιο του επιπέδου αιχμής της ζήτησης που αυτό εμφανίζει σε μεσομακροπρόθεσμο ορίζοντα (δεκαετία). Εξαιρέση από το όριο αυτό, αποτελούν οι προτάσεις εγκατάστασης αιολικών πάρκων που περιλαμβάνουν την κατασκευή επαρκούς διασύνδεσης με το σύστημα και το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της ηπειρωτικής χώρας καθώς και τα αιολικά πάρκα που είναι τμήμα της πρότασης υβριδικών σταθμών.
- Κριτήρια ένταξης των αιολικών εγκαταστάσεων στο τοπίο

Νομοθεσία - Διαδικασία αδειοδότησης αιολικού πάρκου στην Ελλάδα

Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία (Ν. 2244/94 και 2773/99) η ΔΕΗ είναι υποχρεωμένη να αγοράζει την «παραγόμενη» ενέργεια από ανεξάρτητο παραγωγό. Η τιμή πώλησης της kwh συνδέεται με τα τιμολόγια των καταναλωτών. Όσον αφορά, για το διασυνδεδεμένο δίκτυο και για τον κάποιον ανεξάρτητο παραγωγό, η τιμή πώλησης καθορίζεται στο 90% του τιμολογίου Β2. Επιπρόσθετα, περιβάλλον παρέχεται ένα σταθερό επιχειρησιακό, αφού υπογράφονται μακροχρόνιες συμβάσεις πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας(20-25 έτη).

Επιπλέον, μέσω του νόμου ανάπτυξης 2601/98, τα αιολικά πάρκα χρηματοδοτούνται

με ένα ποσοστό 40% που βοηθά στην ολική απόσβεση της επένδυσης από 2 έως 7 έτη, ανάλογα με το αιολικό δυναμικό της περιοχής και την ονομαστική ισχύ του σταθμού. Κάποια άλλη πηγή χρηματοδότησης μπορεί να είναι τα κοινοτικά προγράμματα (ενεργειακά επιχειρησιακά προγράμματα). Απαραίτητες προϋποθέσεις για την έκδοση της άδειας εγκατάστασης για τον αιολικό σταθμό αποτελούν η χωροθέτηση, η άδεια εγκατάστασης η άδεια λειτουργίας και άδειας παραγωγής. Για να ληφθεί η άδεια εγκατάστασης απαιτείται αναμονή 1 με 2 έτη, ενώ η άδεια λειτουργίας εκδίδεται αμέσως μετά την εγκατάσταση του σταθμού (Πίνακας 2.5). Όσον αφορά τη λήψη της άδειας παραγωγής, βάσει του νόμου 2773/99, ιδρύθηκε μια ανεξάρτητη αρχή ενέργειας (ΡΑΕ), όπου οι ενδιαφερόμενοι επενδυτές-εταιρείες-κοινοπραξίες μπορούν να καταθέτουν μια αίτηση και ένα φάκελο μελέτης. Έπειτα η ΡΑΕ εξετάζει κάθε αίτηση και διαμορφώνει μια εισήγηση η οποία κοινοποιείται στον Υπουργό Ανάπτυξης, από τον οποίο λαμβάνεται και η τελική απόφαση για την έκδοση άδειας παραγωγής ή όχι.

Πίνακας 2.5 Βασικό νομοθετικό πλαίσιο-Χρονοδιάγραμμα έκδοσης άδειας (www.tee.gr)

Βασικό Νομοθετικό Πλαίσιο		
α/α	Νομοθέτημα	Περιγραφή
1	Ν.3468/2006	Βασικός Νόμος περί ΑΠΕ
2	Υ.Α Δ6/Φ1/οικ5707/03.04.2007	Κανονισμός Αδειών Παραγωγής
3	Υ.Α Δ6/Φ1/οικ. 13310/10.07.2007	Κανονισμός Αδειών Εγκατάστασης
4	Υ.Α 104247/ΕΥΠΕ/ΥΠΕΧΩΔΕ/26.05.2006	Περιβαλλοντική Αδειοδότηση ΑΠΕ
5	Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού σχεδιασμού & αειφόρου ανάπτυξης για τις ΑΠΕ	Θέτει τους βασικούς κανόνες για τις επιτρεπτές περιοχές εγκατάστασης ΑΠΕ
6	Ν.998/1979	Περί προστασίας δασών
7	Εγκύκλιος 97800/3094/04.08.2006 του Υ.Α.Α.Τ.	Διαδικασία έγκρισης επέμβασης
Χρονοδιάγραμμα - έκδοσης απαιτούμενων αδειών		
Απαιτούμενες Εγκρίσεις	Θεωρητική Διάρκεια	Ελληνική πραγματικότητα
Επιμέρους εγκρίσεις Υπηρεσιών (Αρχαιολογίες, ΥΠΑ, ΓΕΕΘΑ, ΕΟΤ, ΥΜΕΤ, Δασαρχεία κ.α)	15 - 30 μέρες	2 μήνες - 3 χρόνια
Πράξη Χαρακτηρισμού	-	6 μήνες - 3 χρόνια
Θετική ΠΠΕΑ	60 μέρες	6 μήνες - 2 χρόνια
Άδεια παραγωγής	8 - 9 μήνες	1,5 - 4 χρόνια
Έγκριση περιβαλλοντικών όρων	2-3 μήνες	6 μήνες - 5 χρόνια
Όροι σύνδεσης από ΔΕΣΜΗΕ	-	3 μήνες - 5 χρόνια
Άδεια εγκατάστασης	15-30 μέρες	1 μήνας - 2 χρόνια
ΣΥΝΟΛΟ	2 έτη	5 χρόνια

2.10. Οικονομικά στοιχεία

Το συνολικό κόστος για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών εμπορικής κλίμακας, (περίπου MW), διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τη ζήτηση των παραγγελιών που έχουν παραγγελθεί, το κόστος χρηματοδότησης, πότε χρονικά εκτελείται η σύμβαση αγοράς της ανεμογεννήτριας, τις συμβάσεις κατασκευής, την τοποθεσία του έργου και άλλους παράγοντες. Τα στοιχεία κόστους για έργα αιολικής ενέργειας περιλαμβάνουν και άλλα θέματα εκτός των ανεμογεννητριών, όπως η εκτίμηση των αιολικών πόρων και τα έξοδα ανάλυσης τοποθεσίας, έξοδα κατασκευής, μελέτες αδειοδότησης και διασύνδεσης, αναβαθμίσεις του συστήματος κοινής ωφέλειας, μετασχηματιστές, εξοπλισμός προστασίας και μέτρησης, ασφάλιση, λειτουργία, εγγύηση, συντήρηση και επισκευή, νομικά έξοδα και έξοδα διαβούλευσης. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την οικονομία ενός έργου εγκατάστασης ανεμογεννητριών περιλαμβάνουν φόρους και κίνητρα.

Κατά μέσο όρο υπολογίζεται ότι η εγκατάσταση ενός MW κοστίζει 3 εκ. ευρώ. Στο συγκεκριμένο ποσό περιλαμβάνονται η προμήθεια της ανεμογεννήτριας, το κόστος θεμελίωσης, οι δρόμοι πρόσβασης και οι πλατείες εγκατάστασης, το κόστος ανέγερσης και τοποθέτησης όλα τα ηλεκτρομηχανολογικά δίκτυα και εγκαταστάσεις και όλα τα γενικά έξοδα που αναφέρονται και παραπάνω. Δηλαδή ένα αιολικό πάρκο 10 ανεμογεννητριών, 2 MW η κάθε μία υπολογίζεται ότι θα κοστίσει περίπου 60 εκ. ευρώ.

Όσον αφορά τη συντήρηση και επισκευή των ανεμογεννητριών, οι ανεμογεννήτριες εμπορικής κλίμακας σχεδιάζονται για διάρκεια ζωής περίπου 20 με 25 χρόνια. Το κόστος συντήρησης και επισκευής μιας ανεμογεννήτριας υπολογίζεται περίπου στο 1,5% του κόστους εγκατάστασης της το χρόνο. Επομένως, για την συντήρηση και επισκευή και ενός εγκατεστημένου MW απαιτούνται περίπου 45 χιλ. ευρώ. Δηλαδή, για τη συντήρηση και επισκευή ενός αιολικού πάρκου 10 ανεμογεννητριών 2 MW η

κάθε μία η συντήρηση και επισκευή τους κάθε χρόνο θα κοστίζει 900 χιλ. ευρώ. Εδώ περιλαμβάνονται όχι μόνο η συντήρηση των ανεμογεννητριών αλλά και των δρόμων πρόσβασης, δικτύων και οποιονδήποτε γενικών εξόδων. Στον Πίνακα 2.6 αναγράφονται οι τιμές MWh για τιμές ισχύος κάτω των 50kW και άνω των 50kW τόσο στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα όσο και στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά.

Πίνακας 2.6 Τιμολόγιο MWh για ανεμογεννήτριες (Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΛΑΓΗΕ)

Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από:	Τιμή Ενέργειας (€/MWh)	
	Διασυνδεδεμένο Σύστημα	Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά
Αιολική ενέργεια που αξιοποιείται με χειραίες εγκαταστάσεις ισχύος > 50 kW	87,85	99,45
Αιολική ενέργεια που αξιοποιείται με εγκαταστάσεις ισχύος ≤ 50 kW	250	
Αιολική ενέργεια που αξιοποιείται από υπεράκτιες εγκαταστάσεις (άρθ.42,§20, Ν.4030/25-11-2011/ΦΕΚ.Α'249)	108,30	

3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

3.1. Θεμελίωση χερσαίων (on shore) ανεμογεννητριών

Οι θεμελίωση των χερσαίων (on shore) ανεμογεννητριών διακρίνεται στην επιφανειακή θεμελίωση και την θεμελίωση με πασσάλους.

3.1.1. Επιφανειακή θεμελίωση

Η πιο απλή μορφή είναι η εκτεταμένη θεμελίωση (spread foundation ή slab foundation) που αποτελεί κυρίως ένα πέδιλο βαρύτητας. Το υπερκείμενο έδαφος μαζί με την πλάκα σκυροδέματος για να παρέχει επαρκές βάρος, ώστε το θεμέλιο να αντιστέκεται στην ανατροπή από τη δύναμη του ανέμου και να διανέμει τα φορτία σε μία μεγάλη περιοχή του εδάφους. Συνήθως η πλάκα είναι κυλινδρικής ή τετραγωνικής μορφής και είναι κατασκευασμένη από σιδηροπαγές σκυρόδεμα. Όσο πιο μεγάλη είναι η επιφάνεια της βάσης τόσο πιο μικρή η τάση που επιβάλλεται στο έδαφος, οπότε πρέπει να περιορίζονται οι διαστάσεις του πεδίου, χωρίς να γίνεται υπέρβαση της επιτρεπόμενης τάσης εδάφους. Επιπλέον, το πλάτος του πρέπει να είναι επαρκές για να μην ανατραπεί ο πύργος. Οι καθιζήσεις δε πρέπει να είναι πολύ μεγάλες, αλλά το πιο σημαντικό είναι οι διαφορικές καθιζήσεις να διατηρούνται μικρές, ώστε να παραμένει κατακόρυφος ο πύργος.

Αυτού του τύπου θεμελίωση είναι κατάλληλη για σε εδάφη που δε δίνουν μεγάλες καθιζήσεις, δηλαδή σε εδάφη σκληρά και όχι σε μαλακή άργιλο ή ιλυώδη άργιλο, οργανικά εδάφη ή άλλα εδάφη με μικρό μέτρο ελαστικότητας και αντοχή. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις επιφανειακής θεμελίωσης (Αναγνωστόπουλος και Παπαδόπουλος, 2011) :

- επιφανειακή θεμελίωση (shallow foundation): εδράζεται στην επιφάνεια του εδάφους σε μικρό βάθος. Απαιτείται μεγάλο εμβαδό για να αποφεύγεται η

ανατροπή. Μια μεγάλου πάχους βαριά κατασκευή εμποδίζει την ανατροπή καθώς η αντίδραση από το έδαφος είναι πιο κοντά στο κέντρο. Το πλεονέκτημα της επιφανειακής θεμελίωσης είναι ότι κατασκευάζεται εύκολα και χρειάζεται μικρή εκσκαφή και επίχωση (Σχήμα 3.1).

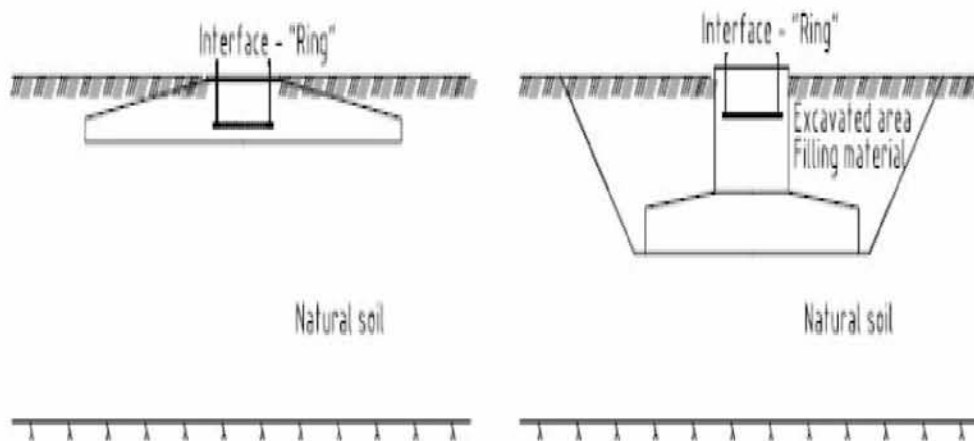
- θεμελίωση βαρύτητας (gravity foundation): εδράζεται σε μεγαλύτερο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους που σημαίνει ότι κάποια ποσότητα εδάφους πρέπει να εκσκαφτεί και ένα υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται πάνω από την θεμελίωση αφού κατασκευαστεί. Θεωρείται καλή εφαρμογή της όταν υπάρχει μια στρώση μαλακού εδάφους επιφανειακά και συνεπώς με την εκσκαφή απομακρύνεται, οπότε η θεμελίωση εδράζεται σε ένα καλύτερο έδαφος.

Τρόπος κατασκευής (εγκατάστασης):

Ο τρόπος κατασκευής επιφανειακών θεμελίων για τις ανεμογεννήτριες δεν διαφέρει από τον τρόπο κατασκευής θεμελίων για οποιοδήποτε άλλη υποδομή. Πρώτο βήμα είναι η απομάκρυνση των φυτικών γαιών και μετέπειτα η εκσκαφή του θεμελίου. Στη συνέχεια τοποθετείται μια εξυγιαντική στρώση με κατάλληλα διαβαθμισμένο εδαφικό υλικό και έπειτα λαμβάνει χώρα η απαραίτητη συμύκνωση αυτού του υλικού. Σε επόμενη φάση γίνεται η διαμόρφωση του δαπέδου εργασίας με σκυρόδεμα καθαριότητας και στη συνέχεια η τοποθέτηση του σιδηρού οπλισμού. Σημαντικό βήμα σε αυτή τη φάση κατασκευής είναι η σωστή και ακριβής τοποθέτηση του κλωβού αγκυρίων όπου θα εδραστεί ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας. Έπειτα ακολουθεί η τοποθέτηση των καλουπιών και η σκυροδέτηση του θεμελίου (Σχήμα 3.1)



Σχήμα 3.1 Εργασίες κατασκευής επιφανειακού θεμελίου (www.buildipedia.com)



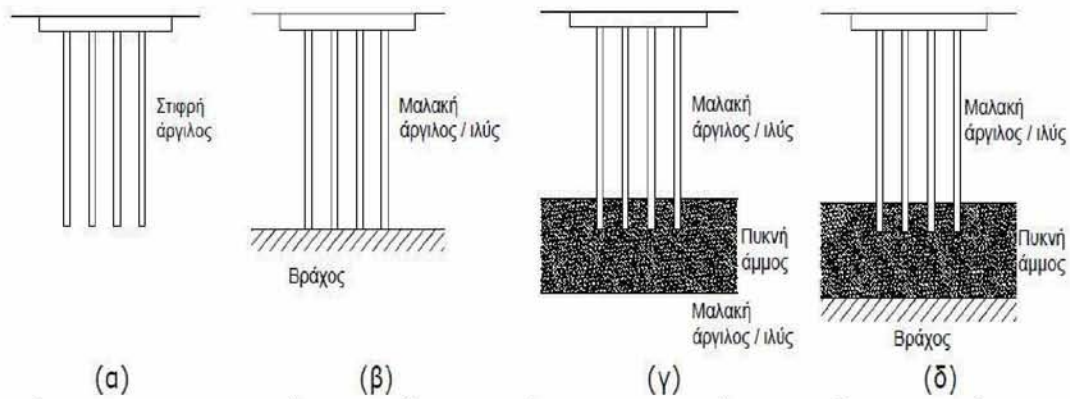
Σχήμα 3.2 Επιφανειακή θεμελίωση και θεμελίωση βαρύτητας (www.astanks.com)

3.1.2. Θεμελίωση με πάσσάλους

Οι πάσσαλοι ως στοιχεία θεμελιώσεων χρησιμοποιούνται συνήθως όταν μαλακά εδάφη υπέρκεινται στιφρών, για μεταβίβαση στο έδαφος υψηλών φορτίων με ταυτόχρονο περιορισμό καθιζήσεων, για την ανάληψη υψηλών φορτίων με τρόπο που να μην

επιηρεάζουν υφιστάμενες κατασκευές με επιφανειακή θεμελίωση, για την ανάληψη οριζόντιων φορτίων κ.λπ. Αν οι ιδιότητες του εδάφους δεν επαρκούν για να εδρασθεί η θεμελίωση επιφανειακά, μία καλή λύση είναι η τοποθέτηση πασσάλων οι οποίοι οδηγούν το φορτίο σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα αυξημένης αντοχής και δυστημσίας. Από άποψη λειτουργίας, η μεταφορά των φορτίων στο περιβάλλον έδαφος πραγματοποιείται τόσο μέσω της βάσης έδρασης των πασσάλων όσο και (κυρίως) μέσω της παράπλευρης επιφάνειάς τους, γεγονός το οποίο αποτελεί και τη βασική διαφορά σε σύγκριση με τις επιφανειακές θεμελιώσεις. Κατά συνέπεια οι πάσσαλοι είναι δυνατόν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες με βάση το μηχανισμό μεταφοράς των φορτίων στο περιβάλλον έδαφος:

Στην περίπτωση κατά την οποία το έδαφος θεμελίωσης αποτελείται κυρίως από στιφρή άργιλο σημαντικού πάχους οι "πάσσαλοι τριβής" μεταβιβάζουν τα φορτία μέσω της πλευρικής τριβής που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους, ενώ στις περιπτώσεις κατά τις οποίες ένα στρώμα μαλακής αργίλου / ιλύος υπέρκειται ενός στρώματος πυκνής άμμου, αμμοχάλικου ή βράχου οι πάσσαλοι μεταφέρουν τα φορτία μέσω της αιχμής τους και κατά συνέπεια ονομάζονται "πάσσαλοι αιχμής". Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εδαφικής διαστρωμάτωσης στις οποίες ενδείκνυται η χρησιμοποίηση πασσάλων δίνονται στο Σχήμα 3.3 (Αναγνωστόπουλος και Παπαδόπουλος, 2011).



Σχήμα 3.3 Κατηγοριοποίηση πασσάλων με βάση το μηχανισμό μεταφοράς των φορτίων στο περιβάλλον έδαφος: (α) πάσσαλοι τριβής, (β), (γ), (δ) πάσσαλοι αιχμής



Σχήμα 3.4 Εργασίες κατασκευής πασσάλων (www.civiltoday.com)

Τρόπος κατασκευής (εγκατάστασης):

Αρχικά πραγματοποιείται τοπογραφική αποτύπωση του κέντρου του φρεατοπασσάλου και στήσιμο του εξοπλισμού διάτρησης πασσάλων. Αμέσως μετά ξεκινάει η διαδικασία της διάτρησης. Για τα πρώτα μέτρα χρησιμοποιείται περιμετρικός σωλήνας ως οδηγός. Αν το έδαφος δεν είναι σε θέση να αυτοποστηριχθεί γίνεται χρήση μπετονίτη. Αναλόγως το έδαφος εκσκαφής επιλέγεται και το κατάλληλο κοπτικό άκρο. Συνήθως για τα πρώτα μέτρα που είναι πιο χαλαρά χρησιμοποιείται αρίδα ενώ στα σκληρότερα χρησιμοποιείται κουβάς. Κατά τη διάρκεια εκσκαφής υπάρχει η ανάγκη ύπαρξης ενός

μικρού φορτωτή για την απομάκρυνση των προϊόντων εκσκαφής. Μετά τη διάτρηση γίνεται τοποθέτηση του κλωβού σιδηρού οπλισμού (Σχήμα 3.4). Ο κλωβός δένεται με συρματόσχοινο στην κορυφή του μηχανήματος διάτρησης και τοποθετείται. Στη συνέχεια γίνεται η σκυροδέτηση του πασσάλου. Αν ο χώρος το επιτρέπει η σκυροδέτηση μπορεί να γίνει μόνο με βαρέλα αλλιώς χρειάζεται και πρέσα. Η σκυροδέτηση πραγματοποιείται από πάνω προς τα κάτω. Ο σωλήνας σκυροδέτησης δεν είναι ενιαίος αλλά τμηματικός (τμήματα των 1,5μ-2μ) για να αποσπώνται καθώς ανεβαίνει το σκυρόδεμα προς τα πάνω. Η σκυροδέτηση συνεχίζει περίπου 0,5μ πάνω από το θεωρητικό υψόμετρο του πασσάλου γιατί θα ακολουθήσει το σπάσιμο της κεφαλής ώστε να απομακρυνθούν οι προσμίξεις του σκυροδέματος με το χώμα ή το μπετονίτη.

3.2. Θεμελίωση υπεράκτιων (off shore) ανεμογεννητριών

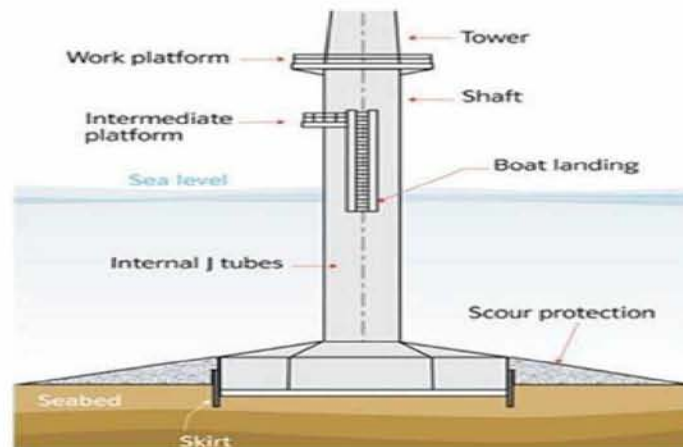
Οι θεμελίωση υπεράκτιων (off shore) διακρίνονται στις κατασκευές σταθερής έδρασης και στις πλωτές.

3.2.1. Κατασκευές σταθερής έδρασης

3.2.1.1. Βαρύτητας (gravity based)

Αυτές οι κατασκευές βασίζονται στη χρήση της δύναμης της βαρύτητας και αποτελούνται από σκυρόδεμα ή χάλυβα (Σχήμα 3.5). Έχουν ένα κεντρικό άξονα, είτε από χάλυβα είτε από σκυρόδεμα, στον οποίο στηρίζεται ο πύργος και αυτός με τη σειρά του στηρίζεται σε μια μεγάλη επίπεδη βάση από σκυρόδεμα και σίδηρο. Το έρμα που απαιτείται για να αποκτήσει η βάση την αναγκαία στιβαρότητα αποτελείται από άμμο, σιδηρομετάλλευμα ή πέτρα. Όπως είναι κατανοητό απαιτείται μια σχετικά επίπεδη βάση ώστε να τοποθετηθεί και απαιτούνται μέτρα προστασίας κατά της αποσάθρωσης του εδάφους τα οποία καθορίζονται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού.

Η κατασκευή της δομής αυτής γίνεται στην ξηρά, σε ειδικές λιμενικές εγκαταστάσεις, συνήθως σε χερσαίες δεξαμενές. Όταν είναι έτοιμη η κατασκευή, η δεξαμενή πλημμυρίζει και η τσιμεντένια βάση σύρεται στην περιοχή που θα τοποθετηθεί επωφελούμενη της δικής της πλευστότητας (ή με πρόσθετη αν απαιτείται). Η συγκεκριμένη κατασκευή έχει καλή εφαρμογή σε βάθος έως 40m. (Lee, 2004)



Σχήμα 3.5 Θεμελίωση βαρύτητας (gravity based) (www.4coffshore.com)

Τρόπος κατασκευής (εγκατάστασης):

Οι εργασίες τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού ξεκινούν στην ξηρά σε χερσαίες δεξαμενές. Στη συνέχεια ανάλογα με το μέγεθος του θεμελίου οι φάσεις ενδέχεται να διαφέρουν. Αν πρόκειται για σχετικά μικρό θεμέλιο ρυμουλκείται και τοποθετείται στη θέση θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας. Σε αντίθετη περίπτωση αν πρόκειται για μεγαλύτερο θεμέλιο που η ρυμούλκηση του είναι αδύνατη οι εργασίες τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού και σκυροδέτησης λαμβάνουν χώρα σε πλωτές κατασκευές στη θάλασσα. Τέτοιου είδους μεγάλα θεμέλια βαρύτητας κατασκευάζονται σε πλωτές δεξαμενές που διαθέτουν θέσεις να παραλάβουν νερό έτσι ώστε να επιταχυνθεί η πόντιση τους όταν το θεμέλιο είναι έτοιμο. Πριν τη πόντιση του θεμελίου γίνεται διαμόρφωση του πυθμένα με κατάλληλα διαβαθμισμένο εδαφικό υλικό. Στα μικρότερα βάθη η διαμόρφωση του πυθμένα γίνεται μέσω της μεθόδου dragline ενώ για

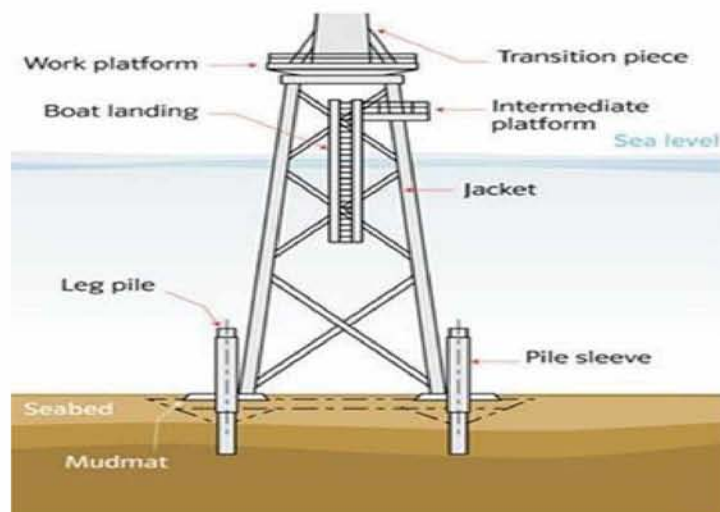
μεγαλύτερα βάθη γίνεται χρήση ειδικού εξοπλισμού που τοποθετεί το εδαφικό υλικό μέσω «χωνιού».

3.2.1.2. Μεταλλικός πύργος/δικτύωμα (jacket)

Πρόκειται για μεταλλικούς πύργους τριών ή τεσσάρων πασσάλων οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στο πυθμένα της θάλασσας σε τέτοιο βάθος ώστε να προσδίδουν σταθερότητα στην κατασκευή. Πρόκειται για μία χωροδικτυωμένη κατασκευή. Έχουν καλή εφαρμογή σε βάθος νερού από 20 έως 50 μέτρα. Το μικρότερο βάθος που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι 3,5 μέτρα στο αιολικό πάρκο Tamra της Νότιας Κορέας. Υπάρχει προοπτική χρησιμοποίησής τους και σε μεγαλύτερα βάθη ως 60-70 μέτρα. (Lee K.H., 2004)

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: ο μικρός θόρυβος, κατάλληλη μέθοδος για μεγάλες και βαριές ανεμογεννήτριες.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι: το μεγάλο κόστος, τα κύματα έχουν μεγάλες επιπτώσεις σε τέτοιου είδους θεμελιώσεις, η ανάπτυξη κοποτικών φορτίων, και ο μεγάλος χρόνος εγκατάστασης.



Σχήμα 3.6 Μεταλλικός πύργος (jacket) (www.4coffshore.com)

Τρόπος κατασκευής (εγκατάστασης):

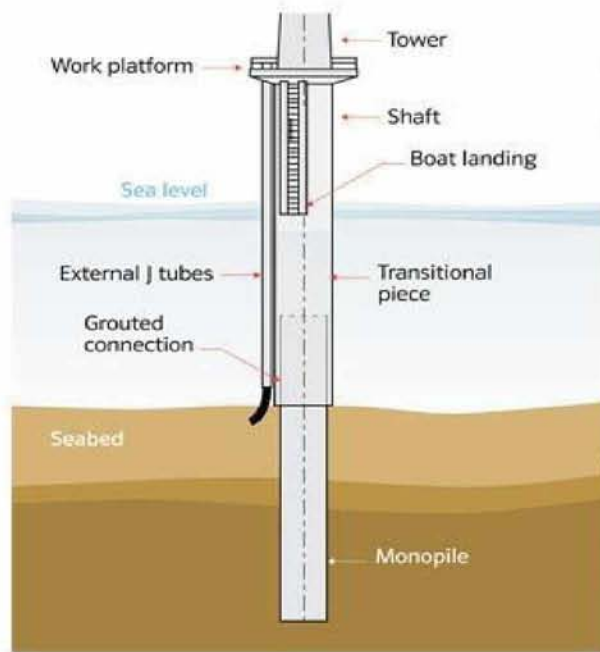
Προκατασκευάζονται και ρυμουλκούνται μέχρι το σημείο πόντισης τους όπου και εδράζονται στο βυθό. Αρχικά τοποθετείται στο βυθό μια τυποποιημένη μεταλλική βάση με αναμονές ώστε να τοποθετηθούν οι μικροπάσσαλοι αγκύρωσης στο έδαφος. Μόλις τοποθετηθούν οι μικροπάσσαλοι αφαιρείται η μεταλλική βάση με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση της και στην συνέχεια γίνεται εγκατάσταση του μεταλλικού πύργου.

3.2.1.3. Μονός πυλώνας (monopile)

Η κατασκευή αποτελείται από ένα χαλύβδινο κυλινδρικό σωλήνα με διάμετρο μεταξύ 3 m και 4.5 m, μάζας από 100 ως 400 t (Σχήμα 3.7). Η δομή στήριξης αυτών των κατασκευών, είναι σχετικά απλού σχεδιασμού. Ο πύργος της πλατφόρμας υποστηρίζεται από τον πυλώνα, είτε άμεσα είτε μέσω ενός μεταβατικού τεμαχίου. Ο πυλώνας είναι καρφωμένος στο βυθό της θάλασσας. Το βάθος διείδυσης του πυλώνα είναι ρυθμιζόμενο για την καλύτερη απόκριση της κατασκευής στις συνθήκες περιβάλλοντος. Οι κατασκευές μονού πυλώνα είναι κατάλληλες για βάθη από 0 ως 30 μέτρα και είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες για την τοποθέτηση υπεράκτιων ανεμογεννητριών λόγω της ευκολίας τοποθέτησής τους. (Nihei, 2011)

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: η εύκολη κατασκευή, η μεγάλη εμπειρία στις ανεμογεννήτριες

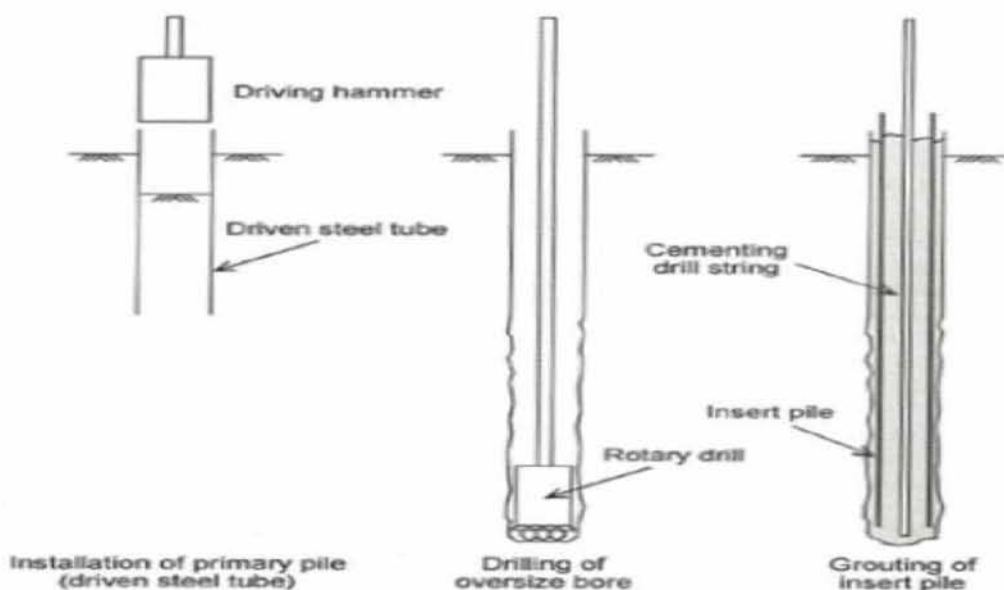
Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι: ο θόρυβος, ο περιορισμός από το είδος του βυθού και το βάρος της ανεμογεννήτριες



Σχήμα 3.7 Μονός πυλώνας (monopile) (www.4coffshore.com)

Τρόπος κατασκευής (εγκατάστασης):

Η μέθοδος εγκατάστασης του μονοπασάλου διαφοροποιείται ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες μπορεί να είναι: με έμπηξη με ειδική σφύρα (driven piles), με εκσκαφή και ενίσχυση (drilling and grouting), ή με συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων (Σχήμα 3.8). Για την θεμελίωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών προτιμάται η πρώτη μέθοδος τοποθέτησης (driven steel piles) στην πλειοψηφία των περιπτώσεων.



Σχήμα 3.8 Τρόποι εγκατάστασης μονοπάσσαλου (www.4coffshore.com)

3.2.1.4. Τριπλός πυλώνας (triple pile)

Αυτής της κατηγορίας οι κατασκευές ακολουθούν τη λογική σχεδίασης αυτών των μονοπάσσων, με τη διαφορά ότι ο πύργος στηρίζεται σε τρεις πυλώνες αντί για έναν (Σχήμα 3.9). Οι πάσσαλοι καρφώνονται στον πυθμένα και μετά συνδέονται μεταξύ τους. Το μήκος των πασσάλων κυμαίνεται μεταξύ 65 και 90 μέτρων και η διάμετρός τους από 1,5 έως και 3 μέτρα. Τα βάθη που χρησιμοποιούνται είναι 25-40 μέτρα. (Nihei, 2011)

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: η εύκολη κατασκευή, η μεγάλη εμπειρία στις ανεμογεννήτριες, η παραλαβή μεγαλύτερων φορτίων από μονό πυλώνα (monopile)

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η: ο θόρυβος, ο περιορισμός από το είδος του βυθού και το βάρος της ανεμογεννήτριας



Σχήμα 3.9 Τριπλός πυλώνας (triple pile) (www.4coffshore.com)

Τρόπος κατασκευής (εγκατάστασης):

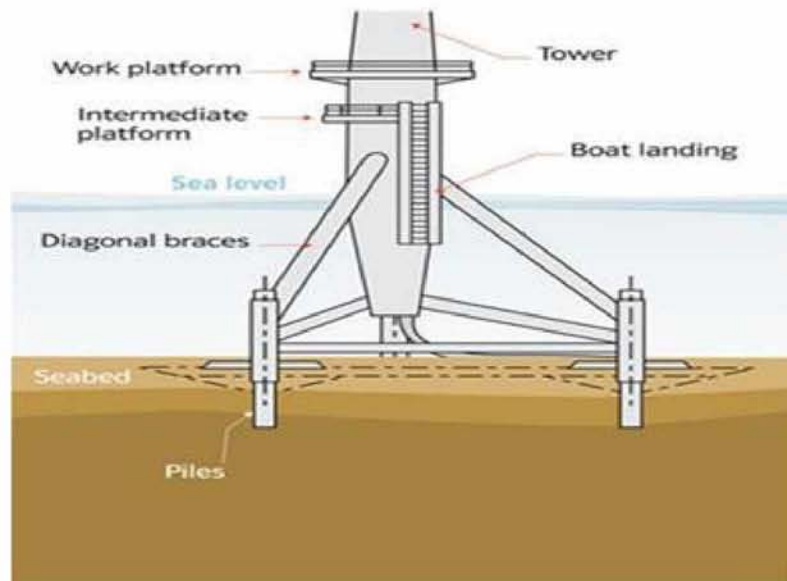
Η διαδικασία κατασκευής (εγκατάστασης) είναι παρόμοια με αυτή της μονοπάσσων, όπου η θεμελίωση μόνο που αντί για ένα πάσσαλο εγκαθίστανται τρεις πάσσαλοι που στο τέλος συνδέονται μεταξύ τους.

3.2.1.5. Τρίποδο (tripod)

Οι κατασκευή τριπόδου θεωρείται μια ελαφριά jacket κατασκευή τριών χαλύβδινων ποδιών (Σχήμα 3.10). Κάτω από την κεντρική στήλη χάλυβα, η οποία είναι κάτω από την ανεμογεννήτρια, υπάρχει ένα χαλύβδινο πλαίσιο το οποίο μεταφέρει τις δυνάμεις από τον πύργο στα τρία χαλύβδινα πόδια. Η κατασκευή τριπόδου έχει καλή σταθερότητα και συνολική ακαμψία. Ωστόσο, δεν είναι κατάλληλη σε βάθη νερού μικρότερα των 6-7m, καθώς αυτό προκαλεί προβλήματα στα πλοία που προσεγγίζουν τη βάση. Είναι κατάλληλη για βάθη πάνω από 30 μέτρα. (Peygard, 2015)

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: η μεγάλη αντοχή, κατάλληλη για μεγάλες βαριές ανεμογεννήτριες.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι: η δύσκολη κατασκευή, οι δυσκολίες λόγω βάρους στη μεταφορά.



Σχήμα 3.10 Τρίποδο (tripod) (www.4coffshore.com)

Τρόπος κατασκευής (εγκατάστασης):

Προκατασκευάζονται και ρυμουλκούνται μέχρι το σημείο πόντισης τους όπου και εδράζονται στο βυθό. Η φιλοσοφία μοιάζει αρκετά με την εγκατάσταση των

μεταλλικών δικτυωτών πύργων αλλά υπάρχουν και κάποιες βασικές διαφορές. Αρχικά τοποθετείται στον πυθμένα το τρίποδο χωρίς να έχει αγκυρωθεί στο έδαφος. Κάθε πόδι όμως είναι κενό εσωτερικά και κατά την πόντιση γεμίζει με νερό. Μόλις το τρίποδο έχει φτάσει στον πυθμένα γίνεται αφαίρεση του νερού με αντλίες προς τα πάνω με αποτέλεσμα την διαφορά πίεσης και την έμπηξη των ποδιών στο έδαφος.

3.2.1.6. Έδραση κενού/αναρροφήσεως (suction/bucket)

Οι κατασκευές αυτές συγκαταλέγονται στην κατηγορία του μονού πυλώνα, αλλά διαφέρει ο τρόπος θεμελίωσής τους. Αποτελούνται από ένα κύριο, χαλύβδινο άξονα κωνικής μορφής, με το κάτω μέρος του να αποτελείται από κοιλότητες, δημιουργώντας διαμερίσματα περιμετρικά του άξονα (Σχήμα 3.11). Όταν εγκαθίσταται, και το κάτω άκρο του κωνικού άξονα ακουμπά τον πυθμένα, αντλείται το νερό από την εσωτερική κοιλότητα. Έτσι, εμφανίζεται διαφορά πίεσης η οποία δημιουργεί μια δύναμη προς τα κάτω. Μόλις γίνει η εγκατάσταση της κατασκευής αφαιρούνται οι αντλίες και κάθε έξοδος σφραγίζεται με βαλβίδες. Η συμπεριφορά αυτών των κατασκευών μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός έδρασης βαρύτητας και θεμελίωσης πασσάλων. Η διαφορά αυτών των κατασκευών από όλες τις υπόλοιπες είναι πως δεν χρειάζεται να γίνει διάτρηση ή κάποια ειδική προετοιμασία του εδάφους. Επίσης, μπορεί να μετακινηθεί ή να αφαιρεθεί εύκολα αφήνοντας νερό να κατακλύσει τα διαμερίσματα δημιουργώντας διαφορά πίεσης που έχει σαν αποτέλεσμα δημιουργία ανωστικής δύναμης. Τοποθετείται σε βάθη έως 25m. (Γράψας, 2015)

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: δεν χρειάζεται διάτρηση και ειδική επεξεργασία εδάφους

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι: η μικρή εμπειρία, ο ειδικός εξοπλισμός



Σχήμα 3.11 Πόντιση κατασκευής με έδραση κενού/αναρροφήσεως (www.4coffshore.com)

Τρόπος κατασκευής (εγκατάστασης):

Όπως αναφέρεται και παραπάνω ο συγκεκριμένος τρόπος θεμελίωσης είναι ένας συνδυασμός μονοπάσσαλης θεμελίωσης και θεμελίωσης βαρύτητας. Ο πυλώνας θεμελίωσης έχει κενά διαμερίσματα τα οποία γεμίζουν με νερό κατά την πόντιση του σωλήνα. Μετέπειτα γίνεται άντληση προς τα πάνω αυτού του νερού με αποτέλεσμα την δημιουργία διαφοράς πίεσης και δημιουργία δύναμης προς τα κάτω που διατηρεί τον πυλώνα στην θέση του.

3.2.2. Πλωτές-αγκυρωμένες κατασκευές

3.2.1.1. Spar buoy

Αποτελούνται από έναν κατακόρυφο κύλινδρο μεγάλης διαμέτρου που υποστηρίζει την ανεμογεννήτρια. Αυτός ο κύλινδρος επιπλέει λόγω του αέρα που βρίσκεται στην κορυφή του και του έρματος στο κάτω μέρος του (Σχήμα 3.12). Είναι σχετικά μια καινούρια κατασκευή και για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε το 1997. Το κέντρο πλευστότητας τους είναι πολύ πιο πάνω από το κέντρο βάρους τους κάνοντάς αυτές τις κατασκευές αρκετά σταθερές. Αγκυρώνονται είτε με συμβατικούς κλάδους αγκύρωσης είτε με συρματόσχοινα υπό προένταση. Να σημειωθεί ότι είναι κατάλληλες και για

πολύ μεγάλα βάθη. Η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε χρησιμοποιούσε πλωτή κατασκευή τύπου Spar. Η Hywind είναι σχέδιο της Statoil και εγκαταστάθηκε στη δυτική ακτή της Νορβηγίας το Σεπτέμβριο του 2009. Είναι εξοπλισμένη με μια ανεμογεννήτρια 2.3MW από τη Siemens Wind Power. (www.statoil.com)

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: κατάλληλο για μεγάλα βάθη, λιγότερος χάλυβας.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι: το μεγάλο κόστος, η μικρή εμπειρία στις ανεμογεννήτριες.



Σχήμα 3.12 Spar buoy (www.4coffshore.com)

Τρόπος κατασκευής (εγκατάστασης):

Αρχικά πραγματοποιείται πόντιση του κυλινδρικού μέλους το οποίο επιπλέει λόγω του αέρα που υπάρχει στο άνω μέρος του κυλίνδρου και των σκύρων που υπάρχουν στο

κάτω μέρος του. Μετέπειτα γίνεται η αγκύρωση του κυλίνδρου είτε με συμβατικούς κλάδους αγκύρωσης είτε με προεντεταμένα συρματόσχοινα.

3.2.2.1. Semi-submersible

Όπως λέει και το όνομά τους πρόκειται για ημιβυθισμένες πλατφόρμες (Σχήμα 3.13). Αποτελούνται από μία ημιβυθισμένη φορηγίδα αγκυρωμένη με συμβατικούς κλάδους αγκύρωσης. Αποκτούν την πλευστότητά τους από ποντόνια με έρμα που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του νερού. Η υποστηριζόμενη κατασκευή μπορεί να τοποθετηθεί σε αρκετά μεγάλο ύψος σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας λόγω της καλής ευστάθειας που προσδίδει μια Semi Submersible, κρατώντας την μακριά από τα θαλάσσια κύματα. Όμως, λόγω της μικρής επιφάνειας που έχει με το νερό μια Semi Submersible, είναι αρκετά ευάλωτη σε απότομες αλλαγές φορτίου. Κατασκευάζονται και συναρμολογούνται πλήρως στην ξηρά και μετά ρυμουλκούνται μέχρι την περιοχή χρήσης τους. (www.4coffshore.com)

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: κατάλληλο για μεγαλύτερα βάθη, η μικρότερη ποσότητα χάλυβα

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι: το μεγάλο κόστος, η μικρή εμπειρία στις ανεμογεννήτριες



Σχήμα 3.13 Semi-submersible (www.4coffshore.com)

Τρόπος κατασκευής (εγκατάστασης):

Ο τρόπος αγκύρωσης είναι ίδιος όπως και στην περίπτωση της Spar buoy. Η διαφορά έγκειται στο κυρίως σώμα της πλωτής κατασκευής από τα ποντόνια με έρμα που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του νερού και προσδίδουν την κατάλληλη πλευστότητα στην κατασκευή.

3.2.2.2. Tension leg platform (TLP)

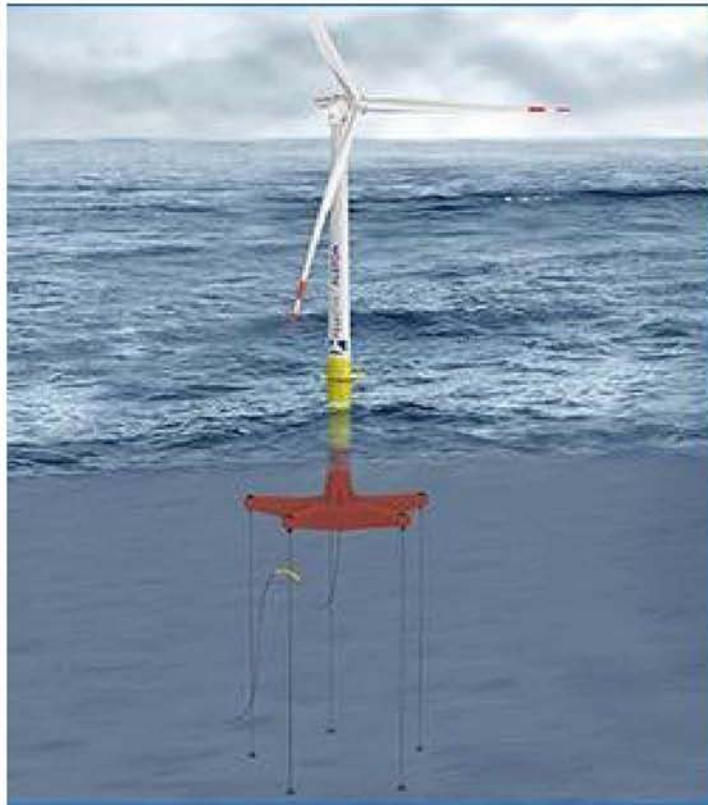
Οι TLP είναι πλωτές κατασκευές δεμένες στον πυθμένα της θάλασσας με κυρίως με κάθετους σωλήνες από χάλυβα καθώς (αν και σε μικρότερη έκταση) από συρματόσχοινα ή αλυσίδες (Σχήμα 3.14). Αυτή η δομή τους προσδίδει πολύ ακαμψία στο κάθετο επίπεδο και ευελιξία στο οριζόντιο, κάνοντάς τις ιδιαίτερα ανθεκτικές στις επιπτώσεις των κυμάτων. Οι TLP έχουν περίσσεια πλευστότητα κρατώντας τα συρματόσχοινα υπό προένταση συνέχεια. Είναι ευαίσθητες όταν φέρουν μεγάλα φορτία στην κορυφή καθώς επηρεάζονται τα υπό προένταση συρματόσχοινα. Ο βασικός σχεδιασμός μιας TLP περιλαμβάνει τέσσερις κολώνες γεμάτες με αέρα

σχηματίζοντας ένα τετράγωνο. Αυτές οι κολώνες υποστηρίζονται και συνδέονται από ποντόνια.

Να σημειωθεί επίσης ότι λόγω της ιδιότυπης αγκύρωσης τους, δεν προκαλούν τόσες συνέπειες στο τοπικό οικοσύστημα που τοποθετούνται αλλά ούτε σε τυχόν περαστικά πλοία σε Εξίσωση με τις άλλες κατασκευές αυτής της κατηγορίας. (Zhao, 2012)

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: κατάλληλο για μεγάλα βάθη, η μικρότερη ποσότητα χάλυβα.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι: το μεγάλο κόστος, η μικρή εμπειρία στις ανεμογεννήτριες.



Σχήμα 3.14 Tension leg platform (www.4coffshore.com)

Τρόπος κατασκευής (εγκατάστασης):

Αρχικά, πραγματοποιείται η εγκατάσταση των πασσάλων θεμελίωσης η οποίοι είναι ενιαίοι και συνεπώς για μεγάλο βάθος απαιτείται πολύ καλός εξοπλισμός. Μετά την έμπηξη τους στο έδαφος τοποθετείται ο φορέας ανόδου που είναι έτοιμος να δεχθεί τους τένοντες. Οι τένοντες τοποθετούνται τμηματικά ο ένας πάνω στον άλλον μέχρι να φτάσουν στο βάθος του φορέα ανόδου και να συνδεθούν σε αυτόν μέσω των κατάλληλων αναμονών. Στη συνέχεια μέσα από στους τένοντες τοποθετούνται τα προεντεταμένα συρματόσχοινα. Μόλις ολοκληρωθεί και αυτή η ενέργεια γίνεται η τοποθέτηση της πλατφόρμας στους τένοντες.

4. ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

4.1. Κανονιστικό πλαίσιο

Οι κανονισμοί οι οποίοι εφαρμόζονται για τον υπολογισμό φορτιών σε άκτιες (onshore) και υπεράκτιες (offshore) είναι οι παρακάτω:

Eurocode 0: Basis of structural design

Eurocode 1: Action on structures – Part 1-1: General actions - Densities, self-weights and loads of building exploitation

Eurocode 1: Action on structures – Part 1-3: Actions included by cranes and machinery

Eurocode 1: Action on structures – Part 1-4: General actions – Wind loads

Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Ελληνικός Αντισεισμικός

Κανονισμός – ΕΑΚ 2003

Det Norske Veritas: Design of offshore wind turbine structures

4.2. Ίδιο βάρος

Τα ίδια βάρη υπολογίζονται σύμφωνα με τον Eurocode 1: Action on structures – Part 1-1: General actions - Densities, self-weights and loads of building exploitation.

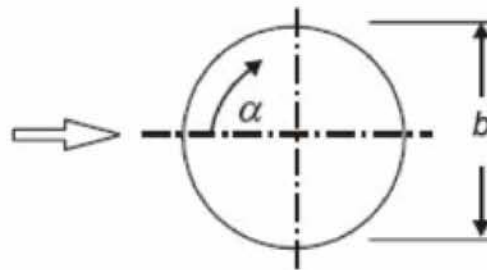
Στο ίδιο βάρος μιας ανεμογεννήτριας συμπεριλαμβάνεται ο πυλώνας και η κελυφωτή κεφαλή. Για συγκεκριμένη διατομή πυλώνα ανεμογεννήτριας εμβαδού A , πολλαπλασιάζουμε με το μήκος του για να υπολογίσουμε τον συνολικό όγκο του. Για πυλώνες μεταβλητής διατομής η διαδικασία πραγματοποιείται σταδιακά. Στη συνέχεια έχοντας υπολογίσει τον όγκο του στοιχείου πολλαπλασιάζουμε με την πυκνότητα ρ του υλικού και στην συνέχεια με την επιτάχυνση της βαρύτητας g . Στο μεγαλύτερο ποσοστό τους οι πυλώνες των ανεμογεννητριών είναι από χάλυβα συνεπώς

λαμβάνουμε $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ και φυσικά $g=9.81 \text{ m/s}$. Ίδια διαδικασία πραγματοποιείται και για τον υπολογισμό του ίδιου βάρους της κεφαλής (άτρακτος, ρότορας και πτερύγια) της ανεμογεννήτριας.

4.3. Άνεμος

Για τον υπολογισμό τα των φορτίων λόγω της δράσης του ανέμου χρησιμοποιείται ο Eurocode 1: Action on structures – Part 1-4: General actions – Wind loads.

Αρχικά θεωρούμε ότι ο άνεμος προσπίπτει μόνο από μία κατεύθυνση (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Κατεύθυνση πρόσπτωσης ανέμου

Για τον υπολογισμό της ανεμοπίεσης αρχικά πρέπει να καθοριστεί η ταχύτητα σχεδιασμού του ανέμου $V_{b,0}$ με βάση την περιοχή. Για την Ελλάδα ισχύει:

- Για τα νησιά και παράλια μέχρι 10km από την ακτή $v_{b,0} = 33 \text{ m/s}$.
- Για την υπόλοιπη χώρα $v_{b,0} = 27 \text{ m/s}$.

Συνεπώς για υπεράκτιες κατασκευές πέρα των 10km από την ακτή η ταχύτητα σχεδιασμού προκύπτει από επιτόπου μετρήσεις.

Στη συνέχεια καθορίζεται η τραχύτητα της περιοχής του έργου που στη συνέχεια καθορίζει τις παραμέτρους z_0 και z_{min} . (Πίνακας 4.1), (Σχήμα 4.2)

Table 4.1 — Terrain categories and terrain parameters

Terrain category		z_0 m	z_{min} m
0	Sea or coastal area exposed to the open sea	0,003	1
I	Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0,01	1
II	Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2
III	Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0,3	5
IV	Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1,0	10

NOTE: The terrain categories are illustrated in A.1.

Κατηγορία 0 : Θάλασσα ή ανοιχτές παραθαλάσσιες περιοχές

Κατηγορία I :

Λίμνες, επίπεδες οριζόντιες επιφάνειες με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια



Κατηγορία II :

Περιοχές με χαμηλή βλάστηση και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτήρια) σε μεταξύ τους απόσταση τουλάχιστον 20πλάσια του ύψους



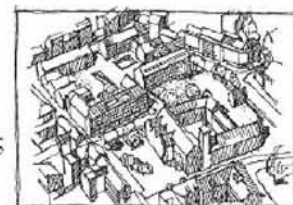
Κατηγορία III :

Περιοχές με κανονική κάλυψη από βλάστηση ή κτήρια ή μεμονωμένα εμπόδια σε μεταξύ τους απόσταση το πολύ 20πλάσια του ύψους



Κατηγορία IV :

Περιοχές με κατασκευές σε τουλάχιστον 15% της επιφανείας τους με κτήρια μέσου ύψους 15 μέτρων τουλάχιστον



Σχήμα 4.2 Κατηγορίες τραχύτητας, EC1 Part:1-4

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής τραχύτητας:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ για } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

ή

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \text{ για } z \leq z_{min} \quad (\text{Εξίσωση 4.2})$$

Όπου z θεωρείται το ύψος της ανεμογεννήτρια και $z_{max} = 200m$

Όπου:

$$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,H}} \right)^{0.07} \quad (\text{Εξίσωση 4.3})$$

Όπου $z_{0,H} = 0.05\text{m}$ σύμφωνα με πίνακα 4.1.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση ταχύτητα του ανέμου:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot V_{b,0} \quad (\text{Εξίσωση 4.4})$$

Όπου $c_0(z) = 1$ για περιπτώσεις ήπιας μεταβολής του ανάντη ανάγλυφου.

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής έντασης τύρβης:

$$I_v(z) = \frac{K_I}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} = 200\text{m} \quad (\text{Εξίσωση 4.5})$$

ή

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{για } z \leq z_{\min} \quad (\text{Εξίσωση 4.6})$$

Όπου συντελεστής έντασης τύρβης $K_I = 1$.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η βασική τιμή της ανεμοπίεσης:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m(z)^2 \quad (\text{Εξίσωση 4.7})$$

Όπου $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ η πυκνότητα του αέρα.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η πίεση στις εξωτερικές επιφάνειες:

$$W_e = q_p(z) \cdot c_{pe} \quad (\text{Εξίσωση 4.8})$$

Όπου c_{pe} είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης (αεροδυναμικός συντελεστής).

Για τον υπολογισμό του υπολογίζουμε αριθμό Reynolds:

$$Re = \frac{b + v(z_0)}{\nu} \quad (\text{Εξίσωση 4.9})$$

Όπου $\nu=15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ το κινηματικό ιξώδες του αέρα .

Όπου $v(z)$ η ταχύτητα αιχμής:

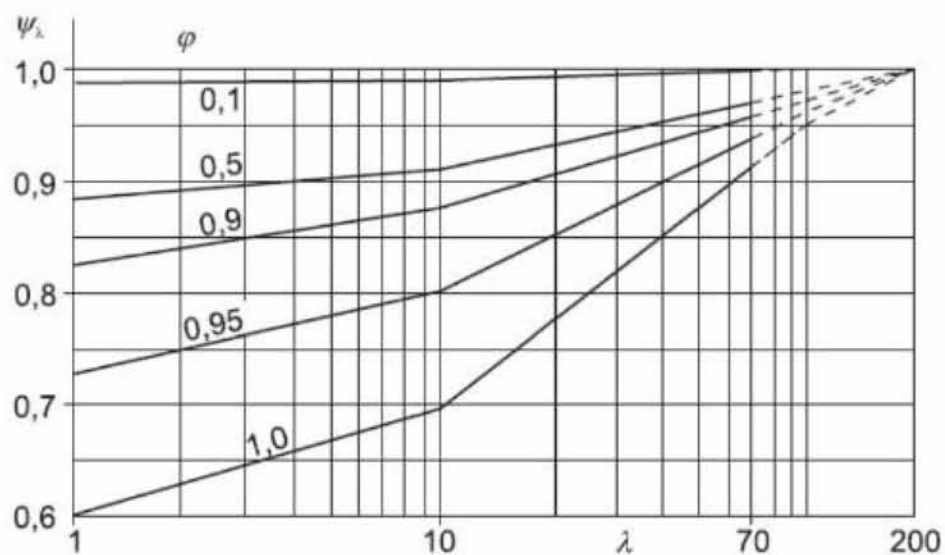
$$v(z) = \sqrt{2 \frac{\rho}{\rho_p(z)}} \quad (\text{Εξίσωση 4.10})$$

Από τον αριθμό Reynolds καταλήγουμε μέσω του παρακάτω πίνακα στις χαρακτηριστικές τιμές, που αφορούν την γωνία του ανέμου ως προς την ανεμογεννήτρια μας (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2 Τυπικές τιμές κατανομής πίεσης για διάφορα εύρη του αριθμού Reynolds, EC1 Part:1-4

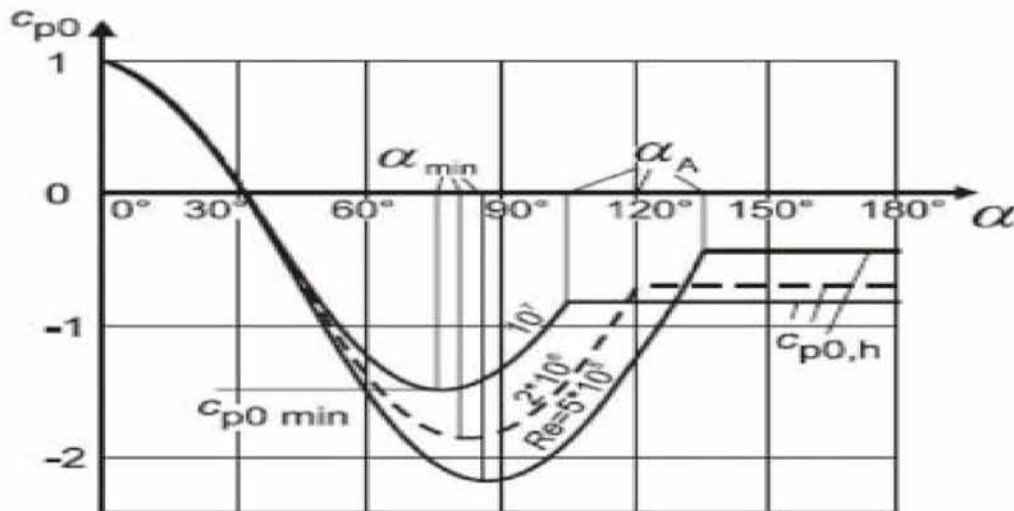
Re	α_{\min}	$C_{p0,\min}$	α_A	$C_{p0,h}$
$5 \cdot 10^5$	85	-2,2	135	-0,4
$2 \cdot 10^6$	80	-1,9	120	-0,7
10^7	75	-1,5	105	-0,8

Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός συντελεστή επίδρασης άκρων ψ_λ συναρτήσει της λυγηρότητας $\lambda = \max(H/D, 70)$ όπου H το ύψος της ανεμογεννήτριας και D η διάμετρος της, και του συντελεστή πληρότητας φ (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα ψ_λ σε συνάρτηση με τη λυγηρότητα λ και συντελεστή πληρότητας φ , EC1 Part:1-4

Στη συνέχεια πρέπει να υπολογιστεί ο δείκτης C_{p0} οι τιμές του οποίου λαμβάνονται από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα συντελεστών C_{p0} -γωνίας ανέμου, EC1 Part: 1-4

Για την εύρεση του συντελεστή $\psi_{\lambda\alpha}$ χρησιμοποιούμε τις παρακάτω σχέσεις.

$$\psi_{\lambda\alpha} = 1 \text{ για } 0 \leq \alpha \leq \alpha_{min} \quad (\text{Εξίσωση 4.11})$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = \psi_{\lambda} + (1 - \psi_{\lambda}) \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\alpha - \alpha_{min}}{\alpha_A - \alpha_{min}}\right) \text{ για } \alpha_{min} < \alpha < \alpha_A = 105 \quad (\text{Εξίσωση 4.12})$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = \psi_{\lambda} \text{ για } \alpha_A \leq \alpha < 180 \quad (\text{Εξίσωση 4.13})$$

Επομένως,

$$c_{pe} = \psi_{\lambda\alpha} * C_{p0} \quad (\text{Εξίσωση 4.14})$$

Επομένως η κατανομή της πίεσης του ανέμου είναι της παρακάτω μορφής, (Σχήμα 4.5)



Διάγραμμα 4.1 Κατανομή πίεσης ανέμου ανάλογα την γωνία πρόσπτωσης του

Η εξίσωση κατανομής πίεσης για γωνίες από 0° έως 105° περιγράφεται από την εξίσωση $w_e = A\alpha^3 - B\alpha^2 - \Gamma\alpha + \Delta$ και από 105° έως 180° η τιμή είναι σταθερή $w_e = \Delta$

Προκειμένου να μην ληφθεί υπόψη ο δυναμικός χαρακτήρας του ανέμου υπολογίζεται ο δυναμικός συντελεστής $c_s c_d$ και έτσι η δράση του ανέμου ως στατικό φορτίο.

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 * k_p * I_v(z_s) * \sqrt{(B^2 + R^2)}}{1 + 7 * I_v(z_s)} \quad (\text{Εξίσωση 4.15})$$

Όπου:

z_e , είναι το ύψος αναφοράς, λαμβάνεται ίσο με h , το ύψος της κατασκευής

k_p , είναι ο συντελεστής αιχμής οριζόμενος ως ο λόγος της μέγιστης τιμής του κυμαινόμενου μέρους της απόκρισης προς τη τυπική του απόκλιση

I_v , είναι η ένταση του στροβιλισμού (Σχήματα 4.5 & 4.6)

B^2 , είναι ο συντελεστής βασικής απόκρισης, που λαμβάνει υπόψη την έλλειψη πλήρους συσχέτισης των πιέσεων στην επιφάνεια της κατασκευής

R^2 , είναι ο συντελεστής απόκρισης συντονισμού, που λαμβάνει υπόψη στροβιλισμό σε συντονισμό με την ιδιομορφή ταλάντωσης

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.9 * (\frac{b+h}{L(z_s)})^{0.63}} \quad (\text{Εξίσωση 4.16})$$

Όπου:

b, διάμετρος κατασκευής

η, ύψος κατασκευής

$L(z_e)$, μήκος στροβιλισμού

Το μήκος στροβιλισμού $L(z)$ αντιπροσωπεύει το μέγεθος της μέσης ανεμορριπής για φυσικούς ανέμους. Για ύψη z κάτω των 200 m το μήκος στροβιλισμού μπορεί να υπολογίζεται:

$$L(z) = L_t * (\frac{z}{z_t})^\alpha \quad \text{για } z \geq z_{\min} = 1\text{m} \quad (\text{Εξίσωση 4.17})$$

$$L(z) = L(z_{\min}) \quad \text{για } z \leq z_{\min} = 1\text{m} \quad (\text{Εξίσωση 4.18})$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 * \delta} * s_L(z_e, \Omega_{1x}) * R_h(\eta_h) * R_b(\eta_b) \quad (\text{Εξίσωση 4.19})$$

Όπου:

δ , ολική λογαριθμική μείωση της απόσβεσης

s_L , αδιάστατη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας π

R_h , αεροδυναμική συνάρτηση επαγωγής

R_b , αεροδυναμική συνάρτηση επαγωγής

Ο συντελεστής αιχμής k_p δίνεται από τη Εξίσωση:

$$k_p = \max\left(\sqrt{2 * (\ln(v * T))} + \frac{0,6}{\sqrt{2 * (\ln(v * T))}}, 3\right) \quad (\text{Εξίσωση 4.20})$$

Όπου:

v , θεμελιώδης συχνότητα

T , χρονικό διάστημα στο οποίο υπολογίζεται η μέση ταχύτητα του ανέμου

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \quad (\text{Εξίσωση 4.21})$$

Όπου:

$n_{1,x}$ θεμελιώδης καμπτική ιδιοσυχνότητα

$$n_{1,x} = \frac{\varepsilon_1 * b_*}{h_{eff}^2} \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} \quad (\text{Εξίσωση 4.22})$$

Όπου:

$n_{1,x}$ θεμελιώδης καμπτική ιδιοσυχνότητα

$$n_{1,x} = \frac{\varepsilon_1 * b_*}{h_{eff}^2} \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} \quad (\text{Εξίσωση 4.22})$$

Όπου:

b , διάμετρος πύργου στο άνω άκρο

h_{eff} ενεργό ύψος ανεμογεννήτριας

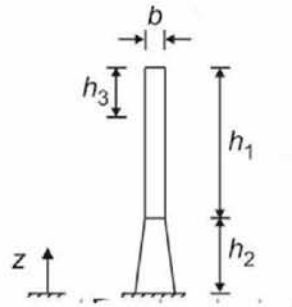
W_s , βάρος κατασκευαστικών στοιχείων που συνεισφέρουν στην δυσκαμψία της ανεμογεννήτριας

W_t , συνολικό βάρος ανεμογεννήτριας

ε_1 , ίσο με 1000 ανεμογεννήτριες από χάλυβα

$$h_{eff} = h_1 + \frac{h_2}{3} \quad (\text{Εξίσωση 4.23})$$

Όπου h_1 και h_2 (Σχήμα 4.5):



Σχήμα 4.5 Γεωμετρικές παράμετροι πύργου

Η λογαριθμική μείωση της απόσβεσης δ για θεμελιώδη καμπτική ιδιομορφή μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (\text{Εξίσωση 4.24})$$

Όπου:

δ_s , η λογαριθμική μείωση της δομικής απόσβεσης της κατασκευής

δ_a , η λογαριθμική μείωση της αεροδυναμικής απόσβεσης για τη θεμελιώδη ιδιομορφή

δ_d είναι η λογαριθμική μείωση της απόσβεσης λόγω ειδικών διατάξεων

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot v_m(Z_g)}{2 \cdot n_1 \cdot \mu_g} \quad (\text{Εξίσωση 4.25})$$

c_f είναι ο συντελεστής δύναμης για δράση ανέμου στη διεύθυνση αυτού

$$c_f = c_{f0} \cdot \psi_\lambda \quad (\text{Εξίσωση 4.26})$$

$$c_{f0} = \frac{1.2 + 0.18 \cdot \log\left(10 \cdot \frac{k}{b}\right)}{1 + 0.4 \cdot \log\left(\frac{Re}{10^6}\right)} \quad (\text{Εξίσωση 4.27})$$

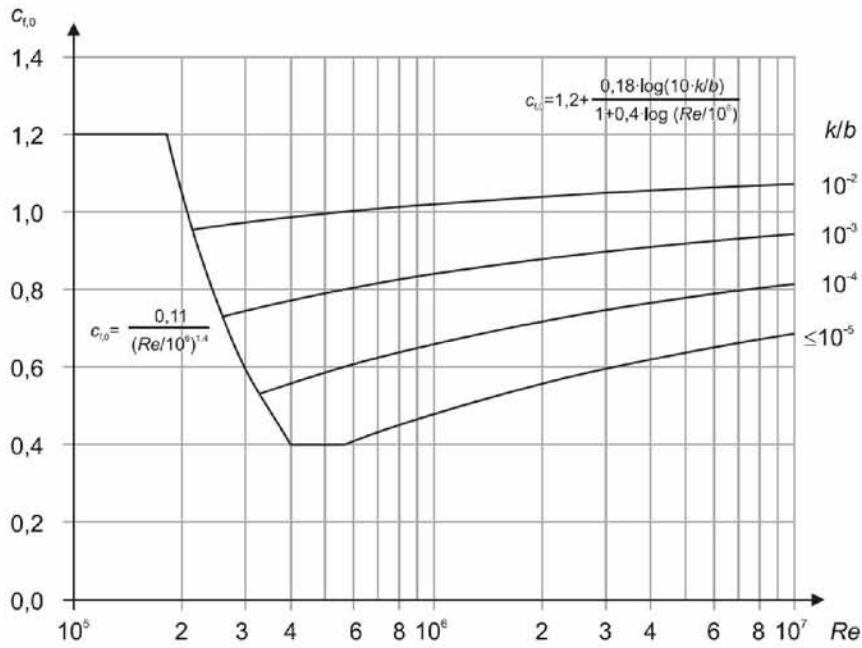


Figure 7.28 — Force coefficient $c_{t,0}$ for circular cylinders without free-end flow and for different equivalent roughness k/b

Σχήμα 4.6 Μεταβολή του συντελεστή δύναμης C_D με την ισοδύναμη τραχύτητα k/b , EC1 Part:1-4 με, ισοδύναμη μάζα ανα μονάδα επιφάνειας

$$\mu_e = \frac{\int_0^h \int_0^b \mu(y,z) \cdot \Phi_1^2(y,z) dydz}{\int_0^h \int_0^b \Phi_1^2(y,z) dydz}$$

(Εξίσωση 4.28)

$\mu(y,z)$, η μάζα ανά μονάδα επιφάνειας της κατασκευής $\Phi_1(y,z)$, ιδιομορφή

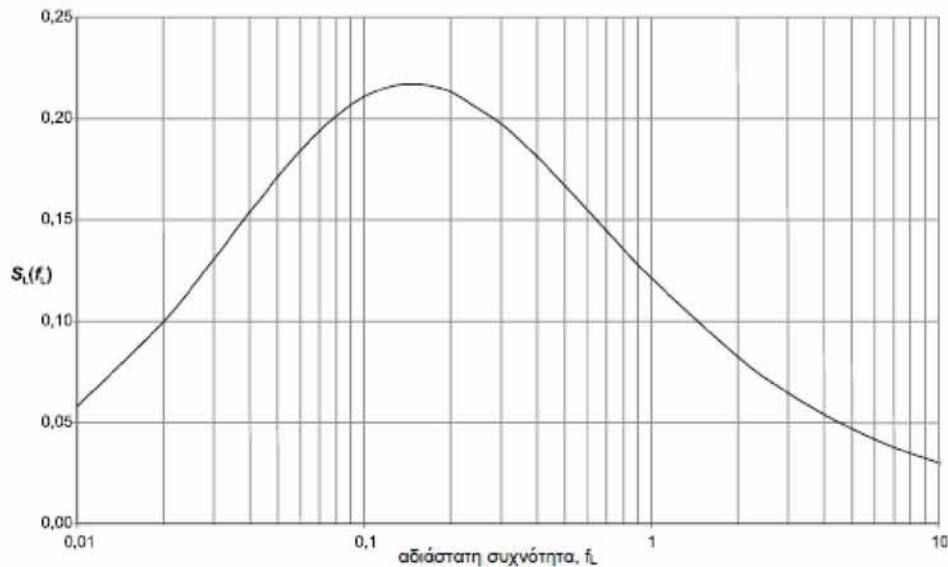
Υπολογισμός SL αδιάστατης συνάρτησης φασματικής πυκνότητας. Η κατανομή του ανέμου συναρτήσει των συχνοτήτων εκφράζεται από την αδιάστατη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας $S_L(z,n)$, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$S_L(z, n_{1,x}) = \frac{n * S_V(z, n_{1,x})}{\sigma_v^2} \quad (\text{Εξίσωση 4.29})$$

$S_V(z, n)$, το μονόπλευρο φάσμα διασποράς

$f_L(z, n)$ η αδιάστατη συχνότητα υπολογιζόμενη από την $n = n_{1,x}$, την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής σε Hz, από τη μέση ταχύτητα $v_m(z)$ και από το μήκος στροβιλισμού $L(z)$

$$f_L(z, n) = \frac{n * L(z)}{v_m(z)} \quad (\text{Εξίσωση 4.30})$$



Σχήμα 4.7 Αδιάστατη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας, EC1 Part: 1-4

4.4. Λειτουργία ανεμογεννήτριας

Για τον υπολογισμό των δυναμικών φορτίων που προκύπτουν λόγω της λειτουργίας του ρότορα είτε δύναται να παρθούν από τον προμηθευτή της ανεμογεννήτριας είτε να προσομοιωθούν σε υπολογιστικό πρόγραμμα σύμφωνα με τη θεωρία πτερυγίων που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2. Σε κάθε άλλη περίπτωση δύναται να χρησιμοποιηθεί

Eurocode 1: Action on structures – Part 1-3: Actions included by cranes and machinery. Οι πίνακες και τα σχήματα που ακολουθούν βρίσκονται στο συγκεκριμένο παράρτημα.

Η δυναμική φόρτιση που προκύπτει από τον περιστρεφόμενο ρότορα δίνεται από τη Εξίσωση:

$$F_s = m_R * \omega_r^2 * e_M = m_R * \omega_r * (\omega_r * e_M) \quad (\text{Εξίσωση 4.33})$$

Όπου:

F_s , η ελεύθερη δύναμη του ρότορα

m_R , η μάζα του ρότορα

ω_r , η κυκλική συχνότητα του ρότορα (rad/s)

e_M , η εκκεντρότητα της μάζας του ρότορα

$\omega_r * e_M$, ακρίβεια ισορροπίας του ρότορα, εκφραζόμενη σε εύρος ταχύτητας

Για απλές περιπτώσεις μπορεί να ληφθεί ως στατική η φόρτιση λόγω της κίνησης του ρότορα.

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 * \eta_h^2} (1 - e^{-2 * \eta_h}) \quad \text{με } \eta_h = \frac{4.6 * h}{L(z_e)} * f_L(z_e, n_{1,X}) \quad (\text{Εξίσωση 4.31})$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 * \eta_b^2} (1 - e^{-2 * \eta_b}) \quad \eta_b = \frac{4.6 * b}{L(z_e)} * f_L(z_e, n_{1,X}) \quad (\text{Εξίσωση 4.32})$$

$$F_{eq} = F_s * \varphi_M \quad (\text{Εξίσωση 4.34})$$

Όπου:

φ_M , είναι ο δυναμικός συντελεστής που εξαρτάται από το λόγο της φυσικής συχνότητας

n_e (ή ω_e) της κατασκευής προς το τη συχνότητα της υφιστάμενης δύναμης n_s (ή ω_s) και

τον λόγο απόσβεσης ζ .

Για αρμονικές φορτίσεις (δυνάμεις περιστρεφόμενου ρότορα) ο συντελεστής μεγέθυνσης μπορεί να υπολογιστεί με τους εξής τρόπους:

A) για μικρή απόσβεση ή μακριά από την απήχηση

$$\varphi_M = \frac{\omega_e^2}{\omega_e^2 - \omega_s^2} \quad (\text{Εξίσωση 4.35})$$

B) σε περιπτώσεις απήχησης $\omega_e = \omega_s$ και λόγο απόσβεσης ζ

$$\varphi_M = \left(\left(1 - \frac{\omega_s^2}{\omega_e^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega_s}{\omega_e}\right)^2 \right)^{-1/2} \quad (\text{Εξίσωση 4.36})$$

Ως χρονοϊστορία της κυκλικής ροπής $M_k(t)$ δίνεται η Εξίσωση:

$$M_k(t) = 10 * M_0 * \left(e^{\frac{t}{m^{0.4}}} \sin \Omega_N * t - \frac{1}{2} * e^{\frac{t}{m^{0.4}}} \sin 2 * \Omega_N * t \right) - M_0 * \left(1 - e^{\frac{t}{m^{0.15}}} \right) \quad (\text{Εξίσωση 4.37})$$

Όπου:

M_0 , είναι η ονομαστική ροπή που προκύπτει από την πραγματική ισχύ.

Ω_N , είναι γωνιακή συχνότητα του ρότορα (rad/s)

t , είναι ο χρόνος (s)

Για φυσικές συχνότητες στην περιοχή $0,95 * \Omega_N$ έως $1,05 * \Omega_N$ οι υπολογιζόμενες συχνότητες του ρότορα πρέπει να είναι ταυτόσημες με αυτές τις φυσικές συχνότητες.

Ως απλοποίηση ισοδύναμη στατική ροπή μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$M_{k,eq} = 1,7 * M_{k,max} \quad (\text{Εξίσωση 4.38})$$

Όπου:

$M_{k,max}$, είναι η μέγιστη τιμή της κυκλικής ροπής $M_k(t)$

Εάν δεν δίνονται στοιχεία από τον προμηθευτή για τη συγκεκριμένη τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

$$M_{k,max} = 12M_o \quad (\text{Εξίσωση 4.39})$$

4.5. Θαλάσσιοι κυματισμοί & ρεύματα

Η οριζόντια δύναμη που ασκείται από κυματισμούς η ρεύματα σε κυλινδρικούς σωλήνες υπολογίζεται σύμφωνα με τις εμπειρικές εξισώσεις του Morison και τις διατάξεις του Det Norske Veritas: Design of offshore wind turbine structures. Οι πίνακες και τα σχήματα που ακολουθούν βρίσκονται στο συγκεκριμένο παράρτημα.

$$F_W = F_I + F_D \quad (\text{Εξίσωση 4.40})$$

Όπου:

F_W , οριζόντια δύναμη λόγω κυματισμών και ρευμάτων F_I είναι η αδρανειακή δύναμη

F_D , είναι η οπισθέλκουσα δύναμη

$$F_W = C_M * \rho * \frac{\pi * D^2}{4} * \frac{du}{dt} + C_D * \frac{1}{2} * \rho * D * |u| * u \quad (\text{Εξίσωση 4.41})$$

Όπου:

C_M , ο συντελεστής αδράνειας C_D , συντελεστής αντίστασης ρ , η πυκνότητα του ρευστού

D , η διάμετρος του πυλώνα

u , η ταχύτητα του κυματισμού ή του ρεύματος.

Ο συντελεστής αδράνειας C_M υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$C_M = \max \{2 - 0.044 * (KC - 3) ; 1.6 - (C_{DS} - 0.65)\} \quad (\text{Εξίσωση 4.42})$$

KC είναι ο αριθμός Keulegan – Carpenter και ορίζεται ως:

$$KC = U_{\max} * T_i / D \quad (\text{Εξίσωση 4.43})$$

Όπου:

U_{\max} , η μέγιστη οριζόντια ταχύτητα του κυματισμού

T_i , η ιδιοπερίοδος του κυματισμού

D , η διάμετρος του πυλώνα

Ο συντελεστής C_{DS} εξαρτάται από την τραχύτητα και τη διάμετρο του πυλώνα και υπολογίζεται από τη εξίσωση:

$$C_{DS} = \begin{cases} 0.65 \text{ για } \frac{k}{D} < 10^{-4} \text{ (λεία επιφάνεια)} \\ \frac{29+4+\log_{10}(\frac{k}{D})}{20} \text{ για } 10^{-4} < \frac{k}{D} < 10^{-2} \\ 1.05 \text{ για } \frac{k}{D} > 10^{-2} \text{ (τραχεία επιφάνεια)} \end{cases} \quad (\text{Εξίσωση 4.44})$$

Όπου:

για νέο χάλυβα χωρίς επάλειψη μπορεί να θεωρηθεί λεία επιφάνεια

για σκυρόδεμα και σκουριασμένο χάλυβα μπορεί να θεωρηθεί $k = 0.003$ για μαρίνες

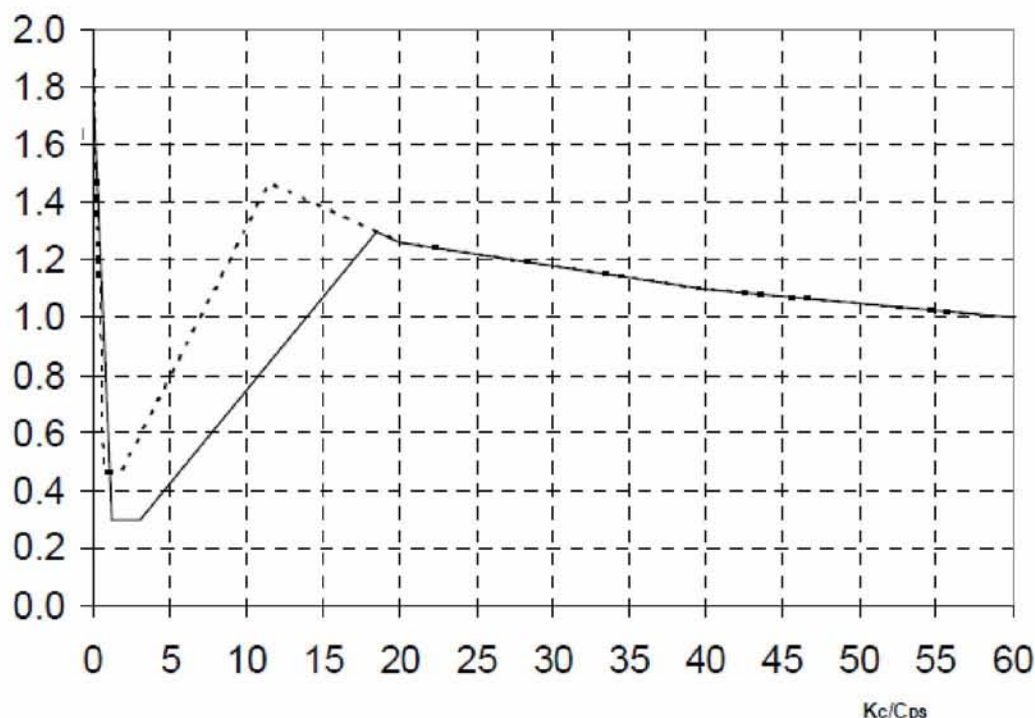
μπορεί να θεωρηθεί $k = 0.005$

Ο συντελεστής αντίστασης C_D υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$C_D = C_{DS} * \psi (C_{DS}, KC) \quad (\text{Εξίσωση 4.45})$$

Όπου:

ψ , ο συντελεστής διεύρυνσης και δίδεται από το παρακάτω σχήμα



Σχήμα 4.8 Συντελεστής διεύρυνσης, Det Norske Veritas: Design of offshore wind turbine structures

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του κυματισμού πρέπει πρώτα να γίνει επιλογή της θεωρίας κυματισμού:

Οι δυο πιο κοινές θεωρίες είναι η γραμμική θεωρία κυματισμού Airy και η θεωρία δεύτερης τάξης κατά Stokes.

Κατά Airy η ταχύτητα υπολογίζεται από την εξής εξίσωση:

$$u = \frac{\pi \cdot H}{T} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (z+d)]}{\sinh(kd)} \cdot \cos\theta \quad (\text{Εξίσωση 4.46})$$

Κατά Stokes δεύτερης τάξης η ταχύτητα υπολογίζεται από την εξής εξίσωση:

$$u = \frac{\pi \cdot H}{T} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (z+d)]}{\sinh(kd)} \cdot \cos\theta + \frac{3}{4} \cdot \frac{\pi \cdot H}{T} \cdot \left(\frac{\pi \cdot H}{\lambda}\right) \cdot \cosh\left(\frac{2k \cdot (z+d)}{\sin^4(kd)}\right) \cdot \sin 2\theta \quad (\text{Εξίσωση 4.47})$$

4.6. Πάγος

Σε περιοχές όπως η Βόρειος Θάλασσα ή η Βαλτική Θάλασσα που σημειώνονται ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες είναι πολύ συχνή η εμφάνιση πάγου στις

ανεμογεννήτριες. Το μεγαλύτερο πρόβλημα δημιουργείται όταν ένα συγκεκριμένο τμήμα πάγου αρχίζει και μετακινείται πάνω στην ανεμογεννήτρια. Η πίεση λόγω της κίνησης του πάγου δίνεται μέσω του κανονισμού Det Norske Veritas: Design of offshore wind turbine structures. Οι πίνακες και τα σχήματα που ακολουθούν βρίσκονται στο συγκεκριμένο παράρτημα.

$$r_{local,C} = r_{u,C} * \sqrt{1 + 5 * \frac{\tau_c^2}{A_{local}}} \quad (\text{Εξίσωση 4.48})$$

Όπου:

$r_{u,C}$, η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του πάγου

τ_c , το πάχος του πάγου

A_{local} , η επιφάνεια που έχει πιάσει πάγο

Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή πάγου $r_{u,c}$, Det Norske Veritas: Design of offshore wind turbine structures

Θλιπτική Αντοχή Πάγου	
Περίοδος επαναφοράς (χρόνια)	Θλιπτική αντοχή πάγου (MPa)
	5
10	1.5
50	1.9
100	2.1

4.7. Σεισμός

Για τον υπολογισμό των σεισμικών φορτίων χρησιμοποιείται ο Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance και ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός – ΕΑΚ 2003. Στο κεφάλαιο 3 του Ευρωπαϊκού Κανονισμού 8, ορίζεται με σαφήνεια πως για τον καθορισμό της σεισμικής δράσης θα πρέπει να εκτελούνται εδαφικές έρευνες ή/και γεωλογικές μελέτες, ανάλογα με την κατηγορία σπουδαιότητας του φορέα και τις ειδικές συνθήκες του έργου.

Βάσει του EC8, και προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη σεισμική δράση, τα εδάφη διαχωρίζονται σε επτά κατηγορίες A, B, C, D, E, S₁ και S₂, καθοριζόμενες από την στρωματογραφία και τις παραμέτρους που δίνονται στον Πίνακα 4.4 και που περιγράφονται παρακάτω. Σημειώνεται πως το τελευταίο θα μπορούσε επίσης να γίνει λαμβάνοντας υπ' όψιν την επιρροή της γεωλογίας των βαθύτερων στρωμάτων στη σεισμική δράση. Η θέση του έργου πρέπει να κατατάσσεται σε κατηγορία εδάφους σε συνάρτηση προς την μέση τιμή της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων, $V_{s,30}$, εφόσον αυτή είναι διαθέσιμη. διαφορετικά πρέπει να χρησιμοποιείται η τιμή N_{SP7} (κρούσεις ανά 30cm) ή η τιμή της C_u . Η μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_{s,30}$ θα υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}} \quad (\text{Εξίσωση 4.49})$$

Όπου:

h_i , το πάχος του στρώματος

v_i , η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (σε τιμή ανηγμένης

διατμητικής παραμόρφωσης ίση με 10^{-5} ή μικρότερη) του στρώματος -ή σχηματισμού

από n συνολικά στρώματα που συναντώνται στα πρώτα 30 m από την επιφάνεια

N , το πλήθος των στρωμάτων στα ανώτερα 30 μέτρα του εδάφους.

Τέλος σημειώνεται πως για περιοχές με εδαφικές συνθήκες που εμπίπτουν σε οποιαδήποτε από τις δύο ειδικές εδαφικές κατηγορίες S₁ ή S₂, απαιτείται ειδική μελέτη για τον καθορισμό της σεισμικής δράσης. Για τις κατηγορίες αυτές, και ειδικότερα για την S₂, θα λαμβάνεται υπ' όψιν η πιθανότητα αστοχίας του εδάφους υπό την σεισμική δράση.

Πίνακας 4.4 Κατηγορίες εδάφους κατά EC8

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		
		$V_{s,30}$	N_{STP}	C_u
A	Βράχος ή άλλος βραχύδης γεωλογικός σχηματισμός, που περιλαμβάνει το πολύ 5 m ασθενέστερου επιφανειακού υλικού.	>800	~	~
B	Αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος	360-800	>50	>250
C	Βαθιές αποθέσεις πυκνής ή μετρίως πυκνής άμμου, χαλίκων ή σκληρής αργίλου πάχους από δεκάδες έως πολλές εκατοντάδες μέτρων.	180-360	15-50	70-250
D	Αποθέσεις χαλαρών έως μετρίως χαλαρών μη συνεκτικών υλικών (με ή χωρίς κάποια μαλακά στρώματα συνεκτικών υλικών), ή κυρίως μαλακά έως μετρίως σκληρά συνεκτικά υλικά.	<180	<15	<70
E	Εδαφική τομή που αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα ύψους με τιμές v_s κατηγορίας C ή D και πάχους που ποικίλλει μεταξύ περίπου 5m και 20m, με υπόστρωμα από πιο σκληρό υλικό με $v_s > 800$ m/s.	~	~	~
S₁	Αποθέσεις που αποτελούνται, ή που περιέχουν ένα στρώμα πάχους τουλάχιστον 10 m μαλακών αργίλων/ύλων με υψηλό δείκτη πλαστικότητας ($PI > 40$) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό.	<100 (ενδεικτικό)	~	10 - 20
S₂	Στρώματα ρευστοποιήσιμων εδαφών, ευαίσθητων αργίλων, ή οποιαδήποτε άλλη εδαφική τομή που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους A – E ή S1	~	~	~

Στο πλαίσιο του EC8, η σεισμική κίνηση σε ένα δεδομένο σημείο στην επιφάνεια του εδάφους προσομοιώνεται με ένα ελαστικό φάσμα απόκρισης εδαφικής επιτάχυνσης, αποκαλούμενο εφεξής "ελαστικό φάσμα απόκρισης". Η οριζόντια σεισμική δράση περιγράφεται από δύο ορθογώνιες συνιστώσες που θεωρούνται ανεξάρτητες μεταξύ τους και που εκφράζονται από το ίδιο φάσμα απόκρισης. Για την τρίτη κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής δράσης, μπορούν να υιοθετηθούν μια ή περισσότερες

εναλλακτικές μορφές φασμάτων απόκρισης, ανάλογα με τις σεισμικές πηγές και τα σεισμικά μεγέθη. Όταν οι σεισμοί που έχουν επιρροή σε μια θέση προέρχονται από πηγές που έχουν σημαντικές διαφορές, πρέπει να εξετάζεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν φάσματα με περισσότερες από μία μορφή με στόχο να καταστήσουν δυνατή επαρκώς αντιπροσωπευτική προσομοίωση της σεισμικής δράσης σχεδιασμού. Σε τέτοιες περιπτώσεις, απαιτούνται διαφορετικές τιμές του a^*g για κάθε τύπο φάσματος και σεισμού. Τέλος σημειώνεται πως για φορείς με μεγάλη σπουδαιότητα ($\gamma_i > 1,0$) πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν επιδράσεις τοπογραφικής ενίσχυσης.

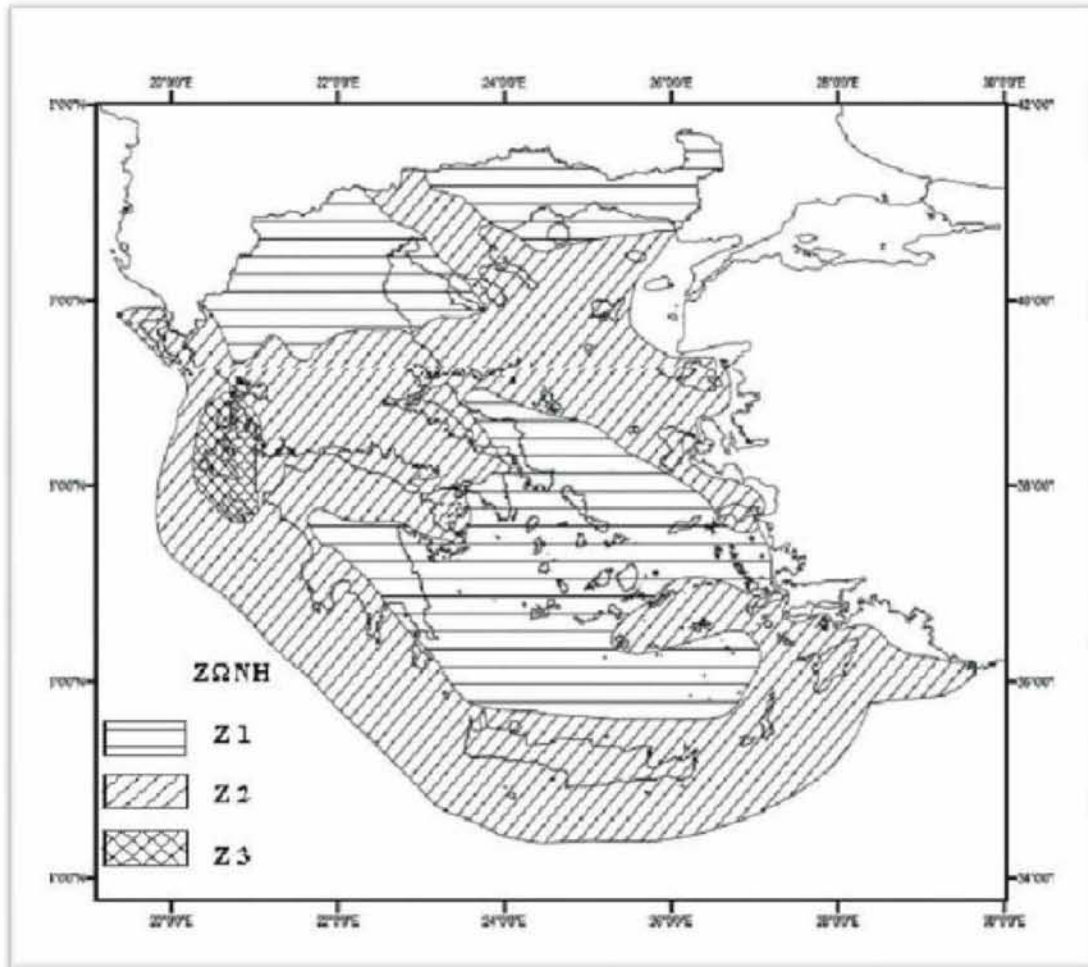
Πίνακας 4.5 Συντελεστής σπουδαιότητας κατασκευών κατά EC8

Κατηγορία Σπουδαιότητας	Κτίριο	Τιμή γ_i
I	Μικρής σπουδαιότητας για τη δημόσια ασφάλεια	0.8
II	Σύνηθες	1
III	Με μεγάλες συνέπειες κατάρρευσης (σχολεία, χώροι συγκέντρωσης κοινού, πολιτιστικά ιδρύματα κ.λ.π.)	1.2
IV	Ζωτικής σημασίας για την Πολιτική Προστασία (νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, σταθμοί παραγωγής ενέργειας.)	1.4

Η επιλογή των Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας στις οποίες υποδιαιρείται η εκάστοτε χώρα, αφέθηκε από τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό στην ευχέρεια του εκάστοτε κράτους. Στην περίπτωση της χώρας μας, μέσω του Εθνικού Προσαρτήματος υιοθετήθηκαν οι σχετικές προδιαγραφές του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού, όπως αυτές ορίστηκαν στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.6 Σεισμική επιτάχυνση εδάφους $A = a^*g$ κατά EC8

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας	I	II	III
a	0,16	0,24	0,36



Σχήμα 4.9 Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδος (ΕΑΚ 2003)

Σε κάθε σεισμική Ζώνη (Σχήμα 4.9), ορίζεται μία τιμή αναφοράς a_{gR} της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης σε έδαφος κατηγορίας Α, η οποία αντιστοιχεί στην τιμή αναφοράς για περίοδο επαναφοράς $T_{NCR} = 475$ έτη (10% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια).

Για διαφορετικές περιόδους επανάληψης ορίζεται συντελεστής σπουδαιότητας γ_I και η επιτάχυνση σχεδιασμού για έδαφος Α είναι:

$$a_{gR} = \gamma_I * a_{gR} \quad (\text{Εξίσωση 4.50})$$

Πίνακας 4.7 Συντελεστές σπουδαιότητας κατά EC8

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑΣ	I	II	III	IV
γ_I	0,80	1,00	1,20	1,40

Οριζόντιο Ελαστικό Φάσμα

Για τις οριζόντιες συνιστώσες της σεισμικής ορασης, το ελαστικό φάσμα απόκρισης $S_e(T)$ καθορίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$0 \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1)\right] \quad (\text{Εξίσωση 4.51})$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (\text{Εξίσωση 4.52})$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C}{T}\right] \quad (\text{Εξίσωση 4.53})$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T}\right] \quad (\text{Εξίσωση 4.54})$$

Όπου:

η ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης, με τιμή αναφοράς $\eta = 1$ για 5% ιζώδη απόσβεση

$S_e(T)$, το ελαστικό φάσμα απόκρισης

T , η περίοδος ταλάντωσης ενός γραμμικού μονοβάθμιου συστήματος

a_g , η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σε έδαφος κατηγορίας A ($a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$)

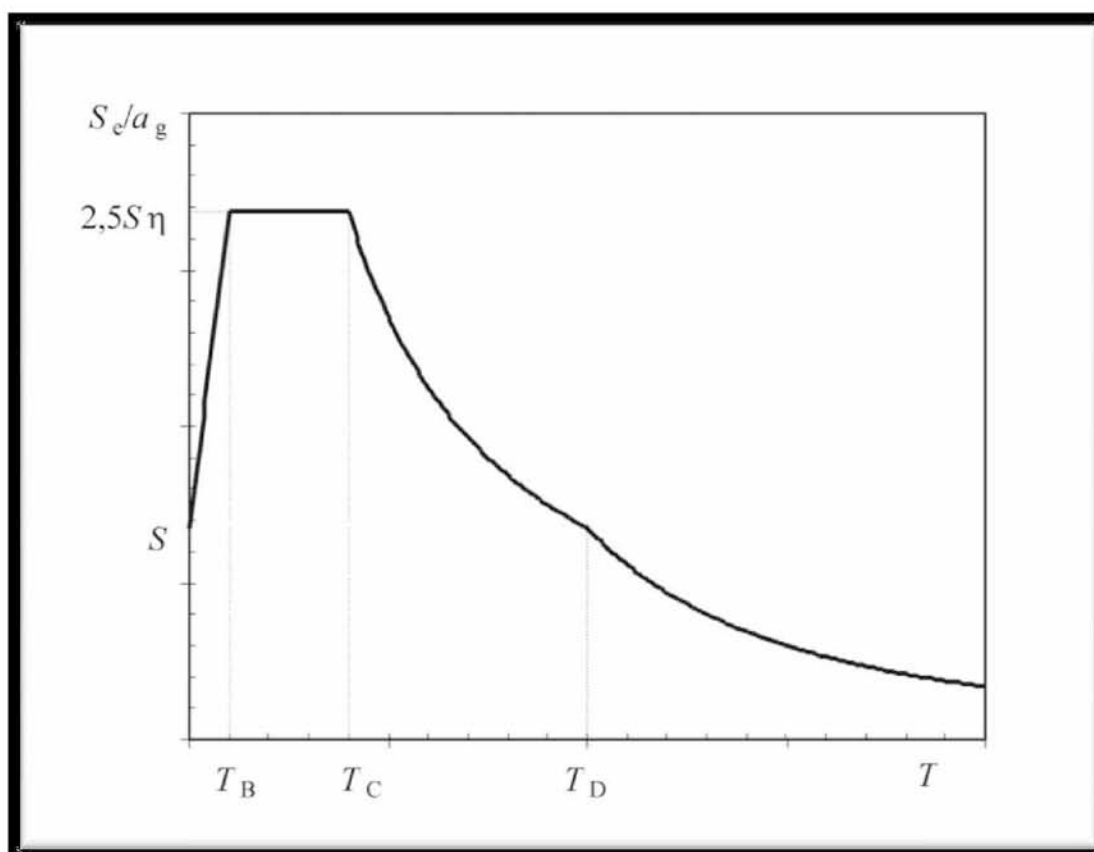
T_B η περίοδος κάτω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

T_C η περίοδος άνω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης

T_D η τιμή της περιόδου που ορίζει την αρχή της περιοχής σταθερής

μετακίνησης του φάσματος

S ο συντελεστής εδάφους



Σχήμα 4.10 Μορφή ελαστικού φάσματος κατά EC8

Οι τιμές των περιόδων T_B , T_C και T_D καθώς και αυτή του συντελεστή εδάφους S , που περιγράφουν την μορφή του ελαστικού φάσματος απόκρισης (Σχήμα 4.11) εξαρτώνται από την κατηγορία του εδάφους και δίνονται στους πίνακες που ακολουθούν. Εάν δεν είναι διαθέσιμη η γεωλογία των βαθύτερων στρωμάτων, η συνιστώμενη επιλογή είναι η χρήση δύο τύπων φασμάτων: Τύπος 1 και Τύπος 2. Εάν οι σεισμοί που συμβάλλουν περισσότερο στη σεισμική επικινδυνότητα που καθορίζεται για την περιοχή με σκοπό την πιθανολογική αξιολόγηση της διακινδύνευσης έχουν μέγεθος κύματος επιφανείας, M_s , όχι μεγαλύτερο από 5,5, συνιστάται η υιοθέτηση φάσματος τύπου 2. Για τους πέντε εδαφικούς τύπους A, B, C, D και E οι συνιστώμενες τιμές των παραμέτρων S , T_B , T_C και T_D δίνονται στον Πίνακα 4.7 για τον Τύπο Φάσματος 1 και στον Πίνακα 4.8 για

τον Τύπο Φάσματος 2. Το Σχήμα 4.11 και το Σχήμα 4.12 παρουσιάζουν τις μορφές του συνιστώμενου Τύπου Φάσματος 1 και του συνιστώμενου Τύπου Φάσματος 2, αντίστοιχα, ανηγμένες σε a_g , για απόσβεση 5%. Διαφορετικά φάσματα μπορούν να καθοριστούν στο Εθνικό Προσάρτημα, εάν απαιτείται από την γεωλογία των βαθύτερων στρωμάτων.

Πίνακας 4.8 Τιμές παραμέτρων που περιγράφουν τα συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης τύπου 1 κατά

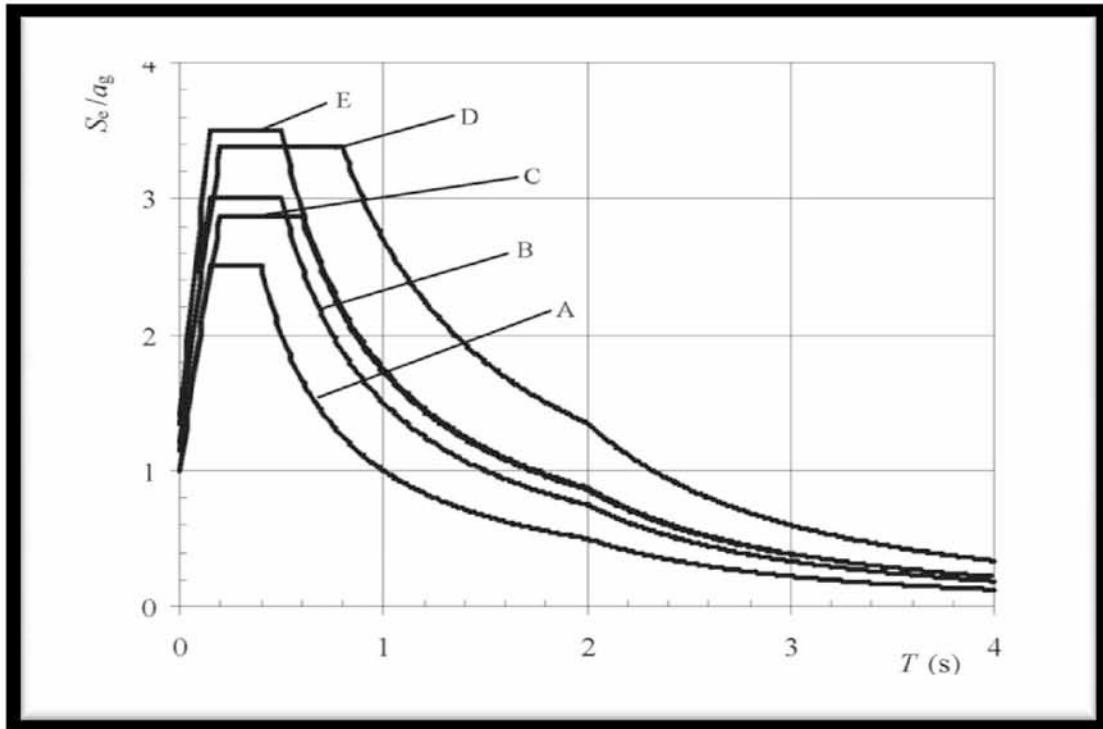
EC8

ΕΛΑΦΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	S	T_B	T_C	T_D
A	1,0	0,2	0,4	2,0
B	1,2	0,2	0,5	2,0
C	1,2	0,2	0,6	2,0
D	1,4	0,2	0,8	2,0
E	1,4	0,2	0,5	2,0

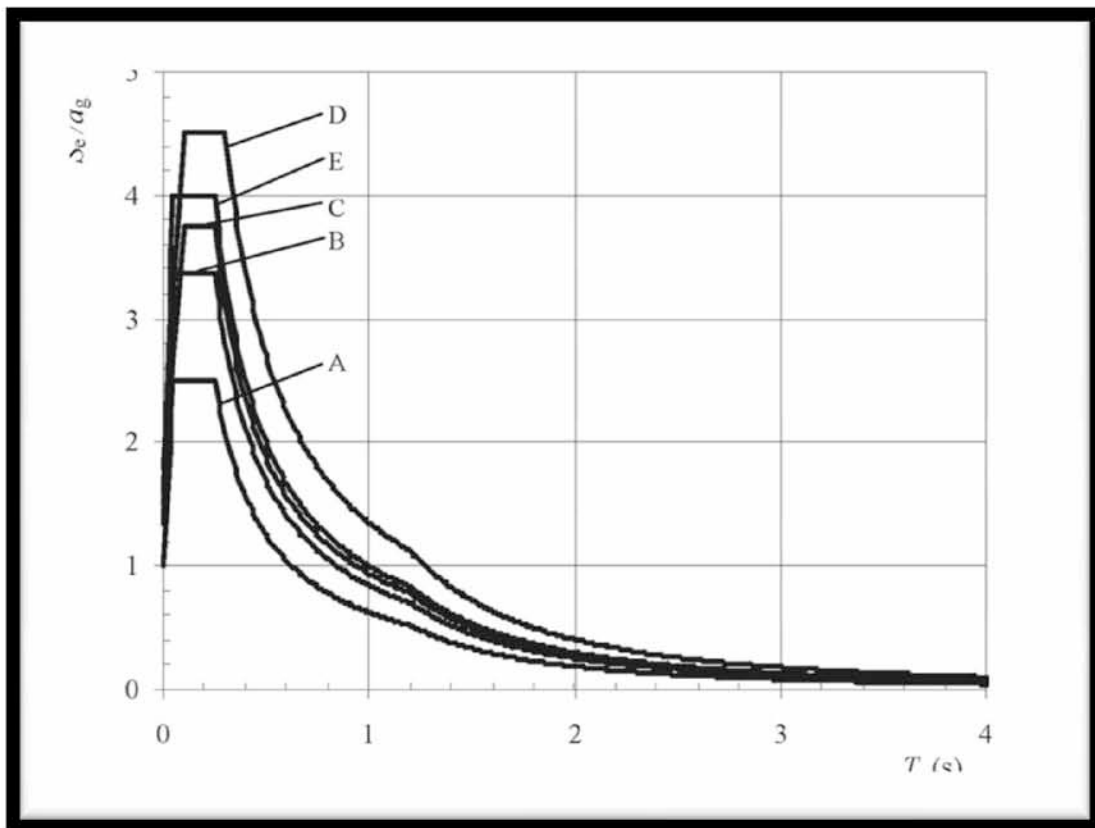
Πίνακας 4.9 Τιμές παραμέτρων που περιγράφουν τα συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης τύπου 2 κατά

EC8

ΕΛΑΦΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	S	T_B	T_C	T_D
A	1,00	0,05	0,25	1,20
B	1,35	0,05	0,25	1,20
C	1,50	0,10	0,25	1,20
D	1,80	0,10	0,30	1,20
E	1,60	0,05	0,25	1,20



Σχήμα 4.11 Συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης Τύπου 1 για κατηγορίες εδάφους Α έως Ε (5% απόσβεση) κατά EC8



Σχήμα 4.12 Συνιστώμενα φάσματα ελαστικής απόκρισης Τύπου 1 για κατηγορίες εδάφους Α έως Ε (5% απόσβεση) κατά EC8

Η τιμή του διορθωτικού συντελεστή απόσβεσης η μπορεί να ληφθεί από την έκφραση:

$$\eta = \sqrt{10 / (5 + \xi)} \geq 0,55 \quad (\text{Εξίσωση 4.55})$$

όπου ξ είναι ο λόγος της ιζώδους απόσβεσης του φορέα, εκφρασμένος σαν ποσοστό επί τοις εκατό.

Κατακόρυφο Ελαστικό Φάσμα

Η κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής δράσης θα προσομοιώνεται από ένα φάσμα ελαστικής απόκρισης $S_{ve}(T)$, που ορίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$0 \leq T \leq T_B: S_{ve}(T) = a_{vg} * S * [1 + \frac{T}{T_B} * (\eta * 3,0 - 1)] \quad (\text{Εξίσωση 4.56})$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_{ve}(T) = a_{vg} * S * \eta * 3,0 \quad (\text{Εξίσωση 4.57})$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_{ve}(T) = a_{vg} * \eta * 3,0 * [\frac{T_C}{T}] \quad (\text{Εξίσωση 4.58})$$

$$T_D \leq T \leq 4s: S_{ve}(T) = a_{vg} * S * \eta * 3,0 * [\frac{T_C * T_D}{T}] \quad (\text{Εξίσωση 4.59})$$

Πίνακας 4.10 Συνιστώμενες τιμές παραμέτρων που περιγράφουν τα φάσματα κατακόρυφης φασματικής απόκρισης κατά EC8

ΕΛΑΦΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	a_{vg} / a_g	T_B	T_C	T_D
ΤΥΠΟΥ 1	0,90	0,05	0,15	1,00
ΤΥΠΟΥ 2	0,45	0,05	0,15	1,00

5. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

Σύμφωνα με τον Eurocode 0: Basis of Structural Design, τα Κριτήρια Σχεδιασμού βασίζονται στη θεώρηση των Οριακών Καταστάσεων. Μία Οριακή κατάσταση θεωρείται ως η κατάσταση του δομήματος κατά την οποία το δόμημα παύει να επιτελεί τον σκοπό τον οποίο σχεδιάστηκε να εξυπηρετεί. Στον Κανονισμό καθορίζονται σήμερα οι Οριακές Καταστάσεις :

- Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ)
- Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ)

Υπό την επιρροή των φορτίων Αστοχίας δεν πρέπει να επέλθει αστοχία από :

- Ευστάθεια (ανατροπή, ανύψωση, ολίσθηση).
- Μετασχηματισμός του δομήματος / στοιχείου σε μηχανισμό.
- Καθολικός και τοπικός λυγισμός (φορέα ή στοιχείου)
- Κόπωση

Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

Υπό την επιρροή των φορτίων Λειτουργικότητας δεν πρέπει να επέλθει αστοχία από :

- Υπερβολική ρηγμάτωση
- Υπερβολικό βέλος
- Υπερβολική ταλάντωση από κραδασμό – ταλάντωση.

Η βασική ανίσωση ασφαλείας η οποία πρέπει να ικανοποιείται είναι η εξής:

$$S_d \leq R_d = \frac{R_k}{\gamma_m} \quad (\text{Εξίσωση 5.1})$$

Όπου:

S_d , η δράση σχεδιασμού

R_d , η αντίσταση σχεδιασμού

γ_m , συντελεστής ασφαλείας υλικού

Πίνακας 5.1 Τιμές συντελεστή ασφαλείας υλικού γ_m κατά EC0

Οριακή Κατάσταση	Συνδυασμός	Σκυρόδεμα γ_{mc}	Χάλυβας γ_{ms}
ΟΚΑ	Βασικός	1,5	1,15
	Τυχηματικός	1,3	1,0
	Τυχηματικός σεισμού	1,5	1,15
ΟΚΛ	Βασικός	1,0	1,0

Οι δράσεις σε μια κατασκευή ταξινομούνται σε:

Μόνιμες G_k : π.χ. το ίδιο βάρος (IB) ενός στοιχείου

Μεταβλητές (χωρικά και/ή χρονικά) Q_k : π.χ. το ωφέλιμο φορτίο μίας πλάκας, η χιονοφόρτιση στην επικάλυψη, ο άνεμος

Τυχηματικές: π.χ. φορτία με συνδυασμό πυρκαγιάς, κρούσης και ο σεισμός Προέκταση: λογίζεται με χωριστό γ .

Η δράση σχεδιασμού υπολογίζεται από την εξής εξίσωση:

$$S_d = \gamma_g * G_k + \gamma_q * Q_{k1} + \Psi_{1,2}(\gamma_q * Q_{k2} + \gamma_q * Q_{k3} + \dots) + \gamma_p * P_k \quad (\text{Εξίσωση 5.2})$$

Όπου:

G_k , μόνιμες δράσεις (ίδιο βάρος)

Q_{k1} , κύριες μεταβλητές δράσεις (χωρικά ή χρονικά)

$Q_{k2,3,\dots}$ δευτερεύουσες μεταβλητές δράσεις (χωρικά ή χρονικά)

R_k , δύναμη προέντασης

γ_g , συντελεστής μονίμων δράσεων, (Πίνακας 5.2)

γ_q , συντελεστής μεταβλητών δράσεων, (Πίνακας 5.3)

γ_p , συντελεστής προέντασης

$\Psi_{1,2}$ συνδυαστικός συντελεστής για δευτερεύουσες μεταβλητές δράσεις, (Πίνακας 5.4)

Πίνακας 5.2 Τιμές συντελεστή μονίμων δράσεων γ_g κατά EC0

Οριακή Κατάσταση	Συνδυασμός	Δυσμενής επιρροή	Ευμενής επιρροή
OKA	Βασικός	1,35	1,0
	Τυχηματικός σεισμού	1,0	1,0
OKL	Βασικός	1,0	1,0

Πίνακας 5.3 Τιμές συντελεστή μεταβλητών δράσεων γ_q κατά EC0

Οριακή Κατάσταση	Συνδυασμός	Δυσμενής επιρροή	Ευμενής επιρροή
OKA	Βασικός	1,5	0,0
	Τυχηματικός σεισμού	1,0	0,0
OKL	Βασικός	1,0	0,0

Πίνακας 5.4 Τιμές συνδυαστικού συντελεστή δευτερευούσων μεταβλητών δράσεων κατά EC0

Δράσεις	Βραχυχρόνιος συνδυασμός Ψ_1	Μακροχρόνιος συνδυασμός Ψ_2 (και στο συνδυασμό με τυχηματικό σεισμό)
Κατοικίες	0,6	0,3
Γραφεία, καταστήματα, ξενοδοχεία, νοσοκομεία	0,7	0,4
Χώροι συνάθροισης (στάδια, σχολεία, θέατρα)	0,8	0,5
Χώροι μακροχρόνιας αποθήκευσης (δεξαμενές, σιλό, αποθήκες, βιβλιοθήκες)	1,0	0,8
Χώροι στάθμευσης	0,9	0,6
Άνεμος, χιόνι σε βατές στέγες	0,6	0,0

Ο συντελεστής προέντασης λαμβάνεται ίσος με $\gamma_p = 0,7$ για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας και $\gamma_p = 1$ για την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας.

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο τα κυριότερα φορτία που ασκούνται στις ανεμογεννήτριες είναι τα εξής:

Μόνιμα φορτία (ίδιο βάρος πύργου και ρότοτρα): G_{dead} Φορτία ανέμου: Q_{wind}

Φορτία κυμάτων & ρευμάτων: Q_{water} Φορτία λειτουργίας ανεμογεννήτριας: Q_{rotor}

Φορτία πάγου: Q_{ice}

Φορτία σεισμού: E

Οπότε προκύπτουν οι εξής συνδυασμούς φορτίσεων για έλεγχο σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας των ανεμογεννητριών. Οι συνδυασμοί για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας θα είναι οι ίδιοι αλλά οι συντελεστές θα έχουν τιμή μονάδα:

Περίπτωση φόρτισης Α1:

$$S_d = 1,35 * G_{dead} + 1,5 * Q_{wind} + 1,2 * Q_{water} \quad (\text{Εξίσωση 5.3})$$

Περίπτωση φόρτισης Α2:

$$S_d = 1,35 * G_{dead} + 1,5 * Q_{wind} + 1,2 * Q_{rotor} \quad (\text{Εξίσωση 5.4})$$

Περίπτωση φόρτισης Α3:

$$S_d = 1,35 * G_{dead} + 1,5 * Q_{wind} + 1,2 * Q_{ice} \quad (\text{Εξίσωση 5.5})$$

Περίπτωση φόρτισης Β1:

$$S_d = 1,35 * G_{dead} + 1,5 * Q_{water} + 1,2 * Q_{wind} \quad (\text{Εξίσωση 5.6})$$

Περίπτωση φόρτισης Β2:

$$S_d = 1,35 * G_{dead} + 1,5 * Q_{water} + 1,2 * Q_{rotor} \quad (\text{Εξίσωση 5.7})$$

Περίπτωση φόρτισης Β3:

$$S_d = 1,35 * G_{dead} + 1,5 * Q_{water} + 1,2 * Q_{ice} \quad (\text{Εξίσωση 5.8})$$

Περίπτωση φόρτισης Γ1:

$$S_d = 1,35 * G_{dead} + 1,5 * Q_{rotor} + 1,2 * Q_{wind} \quad (\text{Εξίσωση 5.9})$$

Περίπτωση φόρτισης Γ2:

$$S_d = 1,35 * G_{dead} + 1,5 * Q_{rotor} + 1,2 * Q_{water} \quad (\text{Εξίσωση 5.10})$$

Περίπτωση φόρτισης Γ3:

$$S_d = 1,35 * G_{dead} + 1,5 * Q_{rotor} + 1,2 * Q_{ice} \quad (\text{Εξίσωση 5.11})$$

Περίπτωση φόρτισης Δ1:

$$S_d = 1,35 * G_{dead} + 1,5 * Q_{ice} + 1,2 * Q_{wind} \quad (\text{Εξίσωση 5.12})$$

Περίπτωση φόρτισης Δ2:

$$S_d = 1,35 * G_{dead} + 1,5 * Q_{ice} + 1,2 * Q_{water} \quad (\text{Εξίσωση 5.13})$$

Περίπτωση φόρτισης Δ3:

$$S_d = 1,35 * G_{dead} + 1,5 * Q_{ice} + 1,2 * Q_{rotor} \quad (\text{Εξίσωση 5.14})$$

Περίπτωση φόρτισης Ε1:

$$S_d = G_{dead} + E + 0,8 * Q_{wind} \quad (\text{Εξίσωση 5.15})$$

Περίπτωση φόρτισης Ε2:

$$S_d = G_{dead} + E + 0,8 * Q_{water} \quad (\text{Εξίσωση 5.16})$$

Περίπτωση φόρτισης Ε3:

$$S_d = G_{dead} + E + 0,8 * Q_{rotor} \quad (\text{Εξίσωση 5.17})$$

Περίπτωση φόρτισης Ε4:

$$S_d = G_{dead} + E + 0,8 * Q_{ice} \quad (\text{Εξίσωση 5.18})$$

6. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΣΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

6.1. Επιφανειακή θεμελίωση

Ο συνήθης τρόπος επιφανειακής θεμελίωσης πύργων ανεμογεννητριών είναι με θεμελιώσεις βαρύτητας από σκυρόδεμα. Το σχήμα των θεμελίων είναι τετραγωνικό ή εξαγωνικό με ύψος 1,5μ έως 2,5μ (Γκαζέτας, 2000).

Υπολογισμός εκκεντρότητας – πιέσεων επαφής:

Βασική παράμετρος για την ευστάθεια του θεμελίου είναι η εκκεντρότητα της φορτίσεως. Υπενθυμίζεται ότι η έκκεντρη φόρτιση θεμελίου ισοδυναμεί με κεντρικά φορτιζόμενο θεμέλιο απομειωμένης όμως επιφάνειας. Για ορθογωνική επιφάνεια θεμελίωσης η εκκεντρότητα της φορτίσεως κατά τη διεύθυνση x δίνεται από την εξίσωση (Γκαζέτας, 2000):

$$e_x = \frac{M_{ytotal}}{F_z} \quad (\text{Εξίσωση 6.1})$$

Όπου:

M_{ytotal} , η συνολική τιμή της ροπής $M_{ytotal} = F_x * d + M_y$

F_x , η συνολική οριζόντια δύναμη στον άξονα x

d , το ύψος του θεμελίου

F_z το συνολικό κατακόρυφο φορτίο (μαζί με τη μάζα του θεμελίου)

Σε περίπτωση διπλής εκκεντρότητας της φόρτισης εκτός από την e_x έχουμε αντίστοιχα και την e_y . Η μέγιστη τιμή της εκκεντρότητας κατά τη μία διάσταση ενός τετραγωνικού θεμελίου σύμφωνα με τον κανονισμό DIN 4017 δεν πρέπει να ξεπερνάει το 1/3 της πλευράς αυτής, δηλαδή απαιτείται το ήμισυ της επιφάνειας του θεμελίου να είναι ενεργό.

Όσον αφορά τώρα τις πιέσεις επαφής είναι οι πιέσεις που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια φορτιζόμενου θεμελίου και εδάφους και εξισορροπούν την εξωτερική φόρτιση. Παράλληλα προκαλούν παραμορφώσεις στο έδαφος συμβιβαστές με τις παραμορφώσεις του θεμελίου. Συνδέονται άμεσα τόσο με τον υπολογισμό των καθιζήσεων όσο και με τον υπολογισμό των στοιχείων ως δομικών στοιχείων. Οι συνήθεις θεωρητικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των πιέσεων επαφής θεωρούν γραμμική κατανομή των πιέσεων. Η παραδοχή αυτή με βάση την οποία αντιστοιχεί στην αρχή της επιπεδότητας της Τεχνικής Μηχανικής.

Για την περίπτωση ορθογωνικής επιφάνειας θεμελιώσεως και μονή εκκεντρότητα (Σχήμα 6.1) με $e < b/6$ οι πιέσεις επαφής έχουν διάγραμμα τραπεζοειδές:

$$P_{\max} = \frac{P \cdot (1 + \frac{6 \cdot e}{I_x})}{I_x \cdot I_y} \quad (\text{Εξίσωση 6.1})$$

$$P_{\min} = \frac{P \cdot (1 - \frac{6 \cdot e}{I_x})}{I_x \cdot I_y} \quad (\text{Εξίσωση 6.2})$$

Όπου:

P_{\max} , μέγιστη πίεση επαφής

P_{\min} , ελάχιστη πίεση επαφής

I_x , ροπή αδρανείας κατά x

I_y , ροπή αδρανείας κατά y

Για τιμές της εκκεντρότητας $e > b/6$ το διάγραμμα των πιέσεων έχει τριγωνική μορφή με μέγιστη τιμή πίεσεως επαφής:

$$P_{\max} = \frac{2 \cdot P}{3 \cdot \xi \cdot I_y} \quad (\text{Εξίσωση 6.3})$$

Όπου:

$$\xi = \frac{I_x}{2} - e \quad (\text{Εξίσωση 6.4})$$

Στην περίπτωση ορθογωνικής επιφάνειας φορτιζόμενης υπό διπλή εκκεντρότητα οι πιέσεις επαφής δίνονται αναλόγως στις γωνίες του θεμελίου από τη σχέση:

$$p = \frac{P}{I_x \cdot I_y} \pm \frac{M_y}{W_y} \pm \frac{M_x}{W_x} \quad (\text{Εξίσωση 6.5})$$

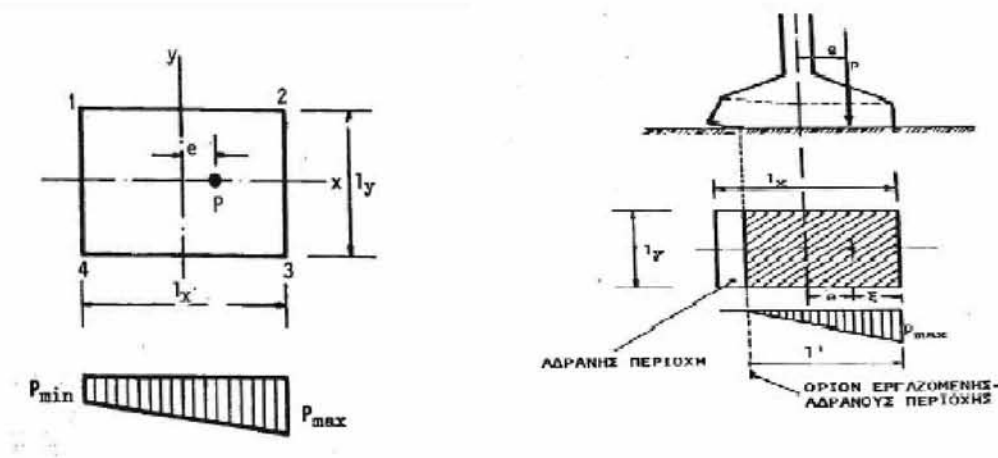
Όπου:

$$M_y = P \cdot e_x \quad (\text{Εξίσωση 6.6})$$

$$M_x = P \cdot e_y \quad (\text{Εξίσωση 6.7})$$

W_x , ροπή αντίστασης της διατομής κατά x

W_y , ροπή αντίστασης της διατομής κατά y



Σχήμα 6.1 Πιέσεις επαφής θεμελίου για έκκεντρη φόρτιση (Παναγιώτου, 2003)

Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας κατά DIN4017

Στην περίπτωση κεντρικής και κατακόρυφης φόρτισης ορθογωνικού θεμελίου $a \cdot b$ με $b < a$ η μέγιστη τάση κατά τη θραύση, $\sigma_{of} = q_u$ δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{of} = c \cdot N_c \cdot v_c + \gamma_1 \cdot d \cdot N_d \cdot v_d + \gamma_2 \cdot b \cdot N_b \cdot v_b \quad (\text{Εξίσωση 6.8})$$

Όπου:

v_c, v_d, v_b : συντελεστές μορφής, εξαρτώμενοι κυρίως από την μορφή του θεμελίου

γ_1, γ_2 : το φαινόμενο βάρος του εδάφους επάνω και κάτω από το επίπεδο εδράσεως

d : το βάθος θεμελίωσης

Πίνακας 6.1 Συντελεστές Φ.Ι κατά DIN 4017

ϕ	N_c	N_d	N_b
0	5	1	0
5	6,5	1,5	0
10	8,5	2,5	0,5
15	11	4	1
20	15	6,5	2
22,5	17,5	8	3
25	20,5	10,5	4,5
27,5	25	14	7
30	30	18	10
32,5	37	25	15
35	46	33	23
37,5	58	46	34
40	75	64	53
42,5	99	92	83

Πίνακας 6.2 Συντελεστές μορφής κατά DIN 4017 – τετραγωνικό θεμέλιο

$v_c (\phi \neq 0)$	$v_c (\phi = 0)$	v_d	v_b
$(v_d * N_d - 1) / (N_d - 1)$	1.20	$1 + \sin\phi$	0.70

$V_b = a' * b' * (c * N_c * k_c * v_c + \gamma_1 * d * N_d * k_d + \gamma_2 * b * N_b * k_b * v_b)$ (Εξίσωση 6.9)

$\sigma_{of} = \frac{V_b}{a' * b'}$, η μέση κατακόρυφη τάση εδράσεως επί της ενεργού επιφάνειας $A' = a' * b'$

του θεμελίου με $a' = a - 2e_a$ και $b' = b - 2e_b$

Όπου:

e_a, e_b , εκκεντρότητα της συνισταμένης δύναμης κατά τη διεύθυνση των πλευρών a και b αντιστοίχως.

k_c, k_d, k_b , συντελεστές εξαρτώμενοι από τη γωνία κλίσεως δ_s της τελικής συνισταμένης δύναμης R , ως προς την κατακόρυφο, υπολογιζόμενη αναλόγως της φύσης του υπεδάφους.

Όλοι οι άλλοι συντελεστές είναι ίδιοι μόνο που τώρα αναφέρονται στα b' και a' με $b' < a'$.

Εάν n είναι ο καταρχήν άγνωστος αλλά προσδιορίσιμος συντελεστής ασφαλείας έναντι θραύσεως και H_b, V_b οι συνιστώσες της δυνάμεως θραύσεως ενώ H, V οι συνιστώσες του πραγματικού έκκεντρου και υπό κλίσεως φορτίου R ενεργούντος επί του θεμελίου, τότε ισχύουν οι εξισώσεις:

$$H_b = n * H \quad (\text{Εξίσωση 6.10})$$

$$V_b = n * V \quad (\text{Εξίσωση 6.11})$$

Οι συντελεστές k_c, k_d, k_b υπολογίζονται κατά περίπτωση ως εξής:

Οριζόντιο φορτίο παράλληλο προς την μικρότερη πλευρά b' .

Μη συνεκτικά εδάφη ($c = 0, \varphi \neq 0$)

$$k_d = (1 - 0,7 * \tan\delta_s)^3 \text{ και } k_b = (1 - \tan\delta_s)^3, \quad (\text{Εξίσωση 6.12})$$

Όπου:

$$\delta_s = \arctan\left(\frac{H_b}{V_b}\right) \quad (\text{Εξίσωση 6.13})$$

Συνεκτικά εδάφη ($c \neq 0, \varphi_u = 0$)

$$k_c = 0,5 + 0,5 * \left(1 - \frac{H_b}{A' * c_u}\right)^{1/2}$$

Η επιφάνεια A' θα πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να ισχύει $\frac{H_b}{A' * c_u} < 1$

Εδάφη με ($c \neq 0, \varphi \neq 0$)

$$k_c = k_d - \frac{1 - k_d}{N_d - 1} \quad (\text{Εξίσωση 6.15})$$

$$k_d = \left(1 - \frac{0.7 * H_b}{V_b + A' * \cos \varphi}\right)^3 \quad (\text{Εξίσωση 6.16})$$

$$k_b = \left(1 - \frac{H_b}{V_b + A' * \cos \varphi}\right)^3 \quad (\text{Εξίσωση 6.17})$$

Οριζόντιο φορτίο παράλληλο προς την μεγαλύτερη πλευρά α'.

Μη συνεκτικά εδάφη ($c = 0, \varphi \neq 0$)

$$k_d = (1 - 0.7 * \tan \delta_s)^3 \text{ και } k_b = (1 - \tan \delta_s)^3, \quad (\text{Εξίσωση 6.18})$$

Όπου

$$\delta_s = \arctan\left(\frac{H_b}{V_b}\right) \quad (\text{Εξίσωση 6.19})$$

Συνεκτικά εδάφη ($c \neq 0, \varphi_u = 0$)

$$k_c = 0.5 + 0.5 * \left(1 - \frac{H_b}{A' + c_u}\right)^{1/2} \quad (\text{Εξίσωση 6.20})$$

Η επιφάνεια Α' θα πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να ισχύει $\frac{H_b}{A' + c_u} < 1$

Εδάφη με ($c \neq 0, \varphi \neq 0$)

$$k_c = k_d - \frac{1 - k_d}{N_d - 1} \quad (\text{Εξίσωση 6.21})$$

Για την εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης πρέπει να ισχύει $a/b > 2$

$$k_d = k_b = \left(1 - \frac{H_b}{V_b + A' \cdot \cos \varphi}\right)^3 \quad (\text{Εξίσωση 6.22})$$

Ο συντελεστής ασφαλείας n εξάγεται με διαδοχικές προσεγγίσεις. Επιλέγεται δοκιμαστικά καταρχάς συντελεστής ασφαλείας n_1 , οπότε $H_b = n_1 \cdot H$ και $V_b = n_1 \cdot V$ και επαναυπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας βάση των αντίστοιχων τιμών k_c , k_d , k_b και της παραπάνω σχέσεως και προκύπτει $n = \frac{V_b}{V}$ τιμή γενικώς διάφορη του n_1 . Επιλέγεται νέα τιμή του συντελεστή ασφαλείας $n_2 = \frac{V_b}{V}$ (σύμφωνα με την προηγούμενη υπολογισθείσα τιμή v_b) και επαναυπολογίζεται νέα τιμή συντελεστή ασφαλείας, κ.ο.κ., μέχρις ότου η απόκλιση μεταξύ επιλεγμένης και υπολογισμένης τιμή n να είναι ανεκτή.

Σύμφωνα με τον DIN4017 το όριο θραύσης του εδάφους δίνεται από την εξίσωση:

$$q_{επ} = \frac{q_u}{F_s} \quad (\text{Εξίσωση 6.23})$$

Όπου:

F_s , συντελεστής ασφαλείας έναντι θραύσεως του εδάφους $F_s = 2,5 - 3$

Καθιζήσεις επιφανειακών θεμελιώσεων

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό θέμα που αφορά τη μελέτη και τη διαστασιολόγηση των επιφανειακών θεμελιώσεων είναι οι καθιζήσεις που αναπτύσσονται στο έδαφος κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός τεχνικού έργου (π.χ ανεμογεννήτριας.) Οι αναπτυσσόμενες καθιζήσεις είναι συνάρτηση τόσο της φόρτισης που επιβάλλεται όσο και των χαρακτηριστικών του εδάφους θεμελίωσης. Γενικά, η διαδικασία υπολογισμού των καθιζήσεων αφορά τον προσδιορισμό των τάσεων στο έδαφος λόγω της υπερκείμενης φόρτισης, και στη συνέχεια (βάσει και των εδαφικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών) η χρησιμοποίηση της κατάλληλης μεθόδου προσδιορισμού των τιμών της καθίζησης. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο μηχανισμός ανάπτυξης των καθιζήσεων και η τιμή τους είναι διαφορετικός στα αμμώδη εδάφη σε σχέση με τα συνεκτικά εδάφη (Κίρτας, 2010).

Καθιζήσεις σε αμμώδη εδάφη (Αναγνωστόπουλος, 1994) :

- Τα αμμώδη εδάφη παρουσιάζουν μεγάλη διαπερατότητα.
- Η εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων γίνεται αμέσως μετά την επιβολή της φόρτισης.
- Το φορτίο παραλαμβάνεται πρακτικά άμεσα από τον εδαφικό σκελετό.
- Οι καθιζήσεις στα αμμώδη εδάφη είναι άμεσες και ελαστικές.

Καθιζήσεις σε συνεκτικά εδάφη (Αναγνωστόπουλος, 1994) :

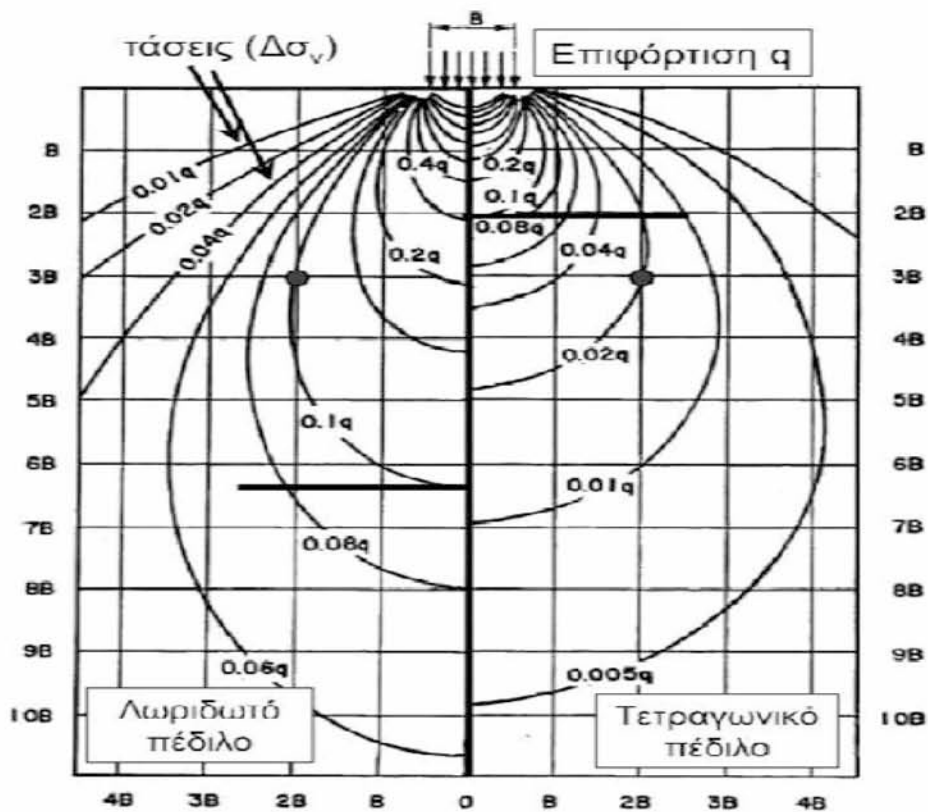
- Τα συνεκτικά εδάφη παρουσιάζουν πολύ μικρή διαπερατότητα.
- Η αναπτυσσόμενη λόγω φορτίων υπερπίεση του νερού των πόρων αργεί πολύ να εκτονωθεί.
- Η διαδικασία ανάληψης του φορτίου από τον εδαφικό σκελετό εξελίσσεται με αργό ρυθμό.

- Οι καθιζήσεις στα συνεκτικά εδάφη εξελίσσονται στο χρόνο με αργό ρυθμό.

Βάθος ανάπτυξης καθιζήσεων :

Το βάθος ανάπτυξης καθιζήσεων εξαρτάται από τις αναπτυσσόμενες τάσεις σε σχέση με το βάθος (Σχήμα 6.2). Το βάθος επιρροής σε θεμελιολωρίδα (μήκος $(L) \gg$ πλάτος (B)) είναι μεγαλύτερο από ότι σε τετράγωνο πέδιλο.

- Βάθος επιρροής φόρτισης σε θεμελιολωρίδα $z_{\max} = 5B - 6B$
- Βάθος επιρροής φόρτισης σε τετραγωνικό θεμέλιο $z_{\max} = 2B$



Σχήμα 6.2 Βάθος επιρροής επιβαλλόμενων τάσεων (Καβαδάς, 2005)

Υπολογισμός τάσεων επιφόρτισης :

Οι πρόσθετες τάσεις στο έδαφος (εύκαμπτο πέδιλο) λόγω της επιφόρτισης μπορούν να υπολογιστούν σε σχέση με το βάθος σύμφωνα με την Εξίσωση:

$$\Delta\sigma = J_s * q_0$$

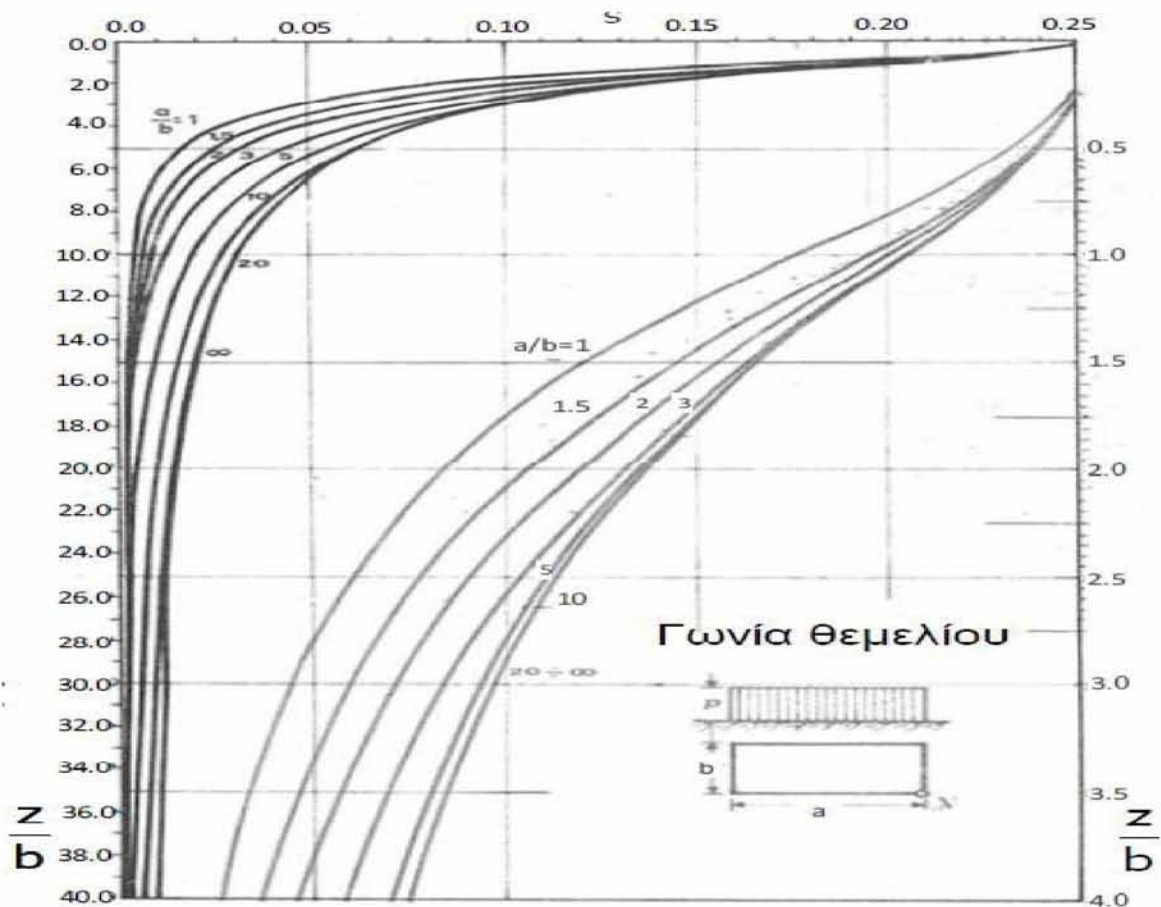
(Εξίσωση 6.24)

Όπου:

J_s , τασικός συντελεστής στη γωνία του θεμελίου (Σχήμα 6.3)

$q_0 = q_\theta - \sigma'_{v,Df}$, η τιμή της πρόσθετης τάσης (με επίχωση $q_0 = q_\theta$) στη στάθμη θεμελίωσης

Για την εύρεση της $\Delta\sigma$ στο κέντρο του θεμελίου αυτό χωρίζεται νοητά σε 4 ίσα ορθογώνια και προστίθενται οι επιμέρους $\Delta\sigma$.



Σχήμα 6.3 Διάγραμμα υπολογισμού J_s (Γραμματικόπουλος, 1994)

Οι πρόσθετες τάσεις ($\Delta\sigma$) στο έδαφος (δύσκαμπτο πέδιλο) λόγω επιφόρτισης ισούνται με αυτές στο χαρακτηριστικό σημείο C εύκαμπτου πεδύλου.

$$\Delta\sigma = J_{s,C} * q_0$$

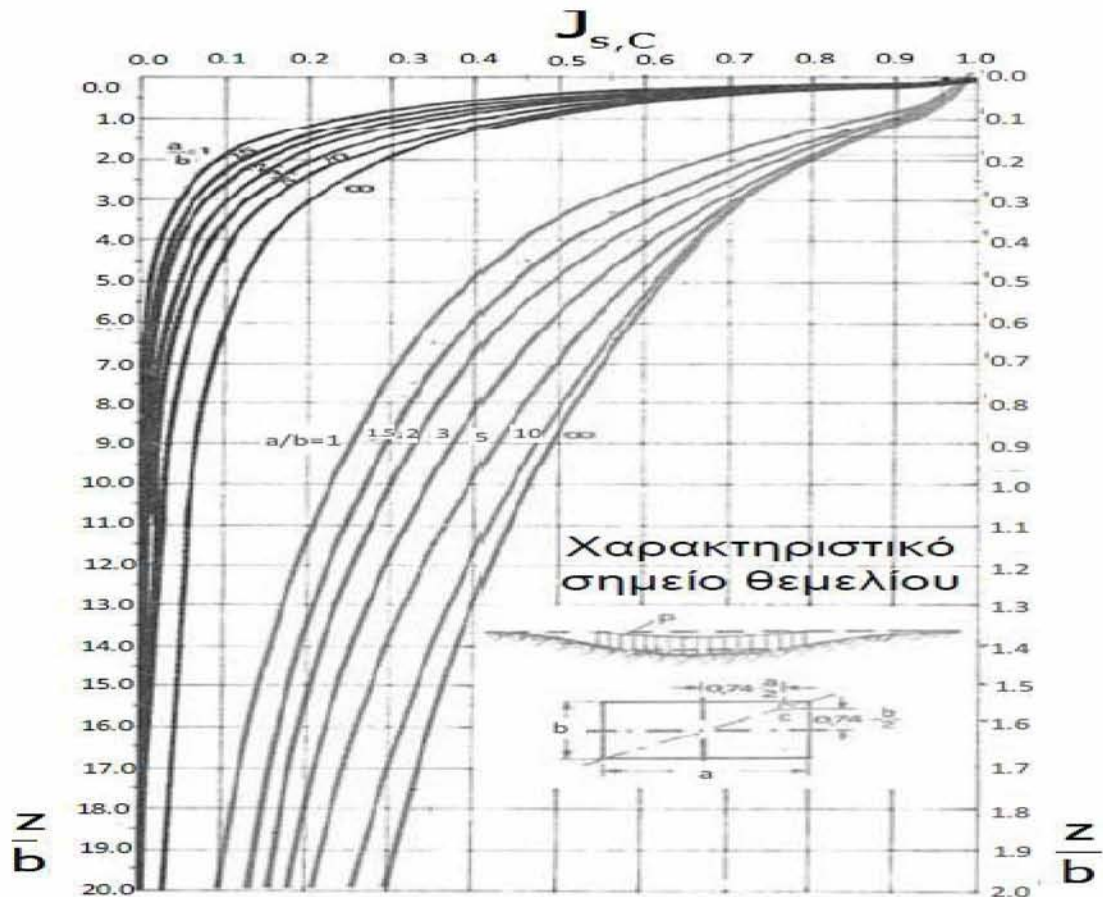
(Εξίσωση 6.25)

Όπου:

$J_{s,C}$, τασικός συντελεστής στο χαρακτηριστικό σημείο C του θεμελίου (Σχήμα 6.4)

$q_0 = q_\theta - \sigma'_{v,Df}$, η τιμή της πρόσθετης τάσης (με επίχωση $q_0 = q_\theta$) στη στάθμη θεμελίωσης.

Η τιμή αυτής της $\Delta\sigma$ στο χαρακτηριστικό σημείο C χρησιμοποιείται συχνά για τον υπολογισμό καθίζησης δύσκαμπτου πεδύλου (Τσότσος, 1991)



Σχήμα 6.4 Διάγραμμα υπολογισμού $J_{s,C}$ (Γραμματικόπουλος, 1994)

Αναπτυσσόμενες καθιζήσεις:

Η γενική εξίσωση των αναπτυσσόμενων καθιζήσεων είναι η Εξίσωση 6.26.

$$\Delta H_{ολ} = \Delta H_i + \Delta H_c + \Delta H_s \quad (\text{Εξίσωση 6.26})$$

Όπου:

$\Delta H_{ολ}$, ολική καθίζηση

ΔH_i , άμεσες ελαστικές καθιζήσεις (αμμώδη αργιλικά).

ΔH_c , καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης (κορεσμένα αργιλικά).

ΔH_s , δευτερεύουσες ερπυστικές καθιζήσεις (κορεσμένα αργιλικά).

Οι άμεσες-αρχικές καθιζήσεις αναπτύσσονται άμεσα κατά την επιβολή του φορτίου (δηλαδή κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου). Στα κορεσμένα αργιλικά εδάφη αναπτύσσονται δίχως μεταβολή του όγκου και αφαιρούνται κατά την απομάκρυνση του φορτίου.

Οι καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης συμβαίνουν λόγω της απομάκρυνσης του νερού των πόρων σε μεγάλο χρόνο μετά την επιβολή του φορτίου, λόγω της μικρής διαπερατότητας του εδάφους.

Οι δευτερεύουσες ερπυστικές καθιζήσεις δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες σε τιμή και αναπτύσσονται μετά την ολοκλήρωση της πρωτογενούς στερεοποίησης.

Καθιζήσεις σε αμμώδη εδάφη:

- Αναπτύσσονται μόνο άμεσες καθιζήσεις ($\Delta H_c = \Delta H_s = 0$)
- Υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες προσδιορισμού καθιζήσεων σε αμμώδη εδάφη (ελαστικές σχέσεις και εμπειρικές μέθοδοι). Επειδή το μέτρο ελαστικότητας E δεν είναι σταθερό με το βάθος δεν ενδείκνυνται πάντα οι σχέσεις ελαστικής μορφής και προτιμώνται οι εμπειρικές σχέσεις. (Κρίτας, 2010)
- Όταν χρησιμοποιούνται σχέσεις ελαστικής μορφής δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή κατάλληλων τιμών E και ν («στραγγισμένες» τιμές.)

Μέθοδος Schmertmann (εμπειρική σχέση):

Για άκαμπτα θεμέλια σε αμμώδη εδάφη ισχύει:

$$\Delta H_i = C_1 * C_2 * \Delta q * \sum_{i=1}^n \frac{I_{z,i} * \Delta z_i}{E_{s,i}} \quad (\text{Εξίσωση 6.27})$$

Όπου :

$$C_1 = 1 - 0.5 * \frac{\sigma'_{v,Df}}{\Delta q} \geq 0.5$$

$$C_2 = 1 + 0.2 * \log(10t), \quad (\text{άμεση καθίζηση } C_2 = 1)$$

$\sigma'_{v,Df} = \gamma' * D_f$, ενεργός τάση στη στάθμη θεμελίωσης D_f

q_θ , τάση φορτίου θεμελίου $\Delta q = q_\theta - \sigma'_{v,Df}$ ($\Delta q = q_\theta$)

t, ο χρόνος t σε έτη (>0.1)

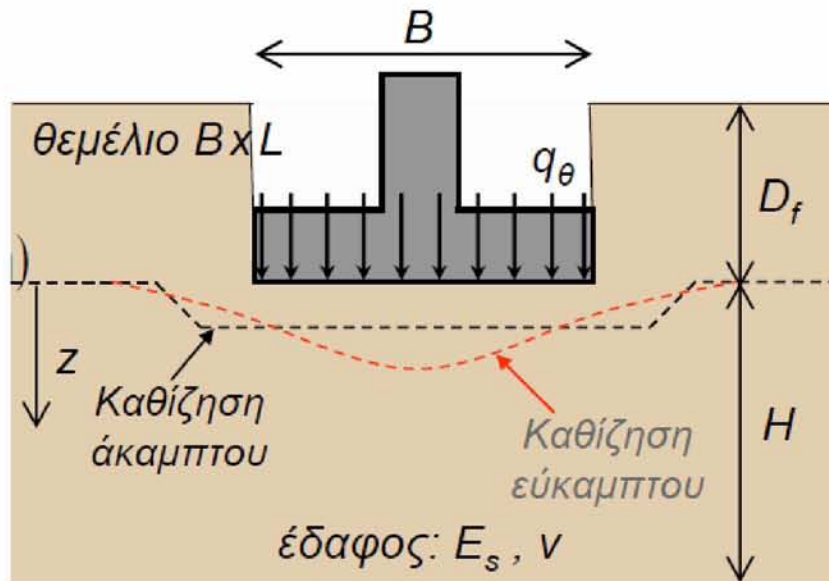
Δz_i , πάχος στρώσης που επιλέγεται

E_s , μέτρο ελαστικότητας εδάφους

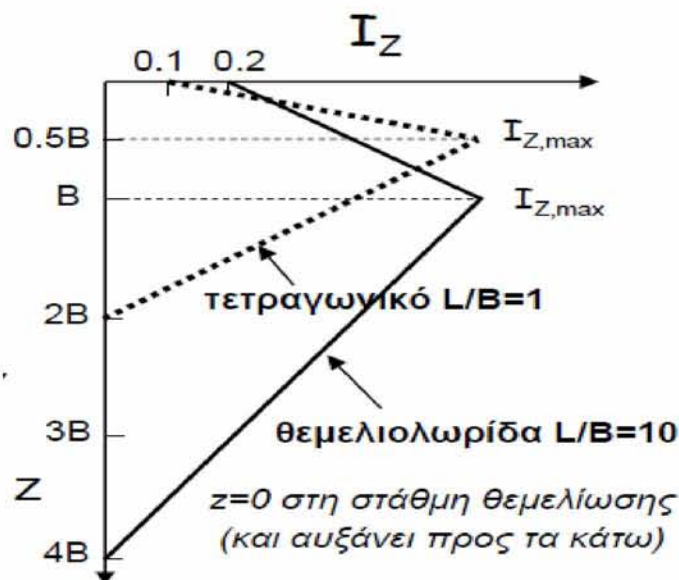
$$I_z = 0.5 + 0.1 \sqrt{\frac{\Delta q}{\sigma'_{v'}}}$$
 συντελεστής επιρροής στρώσης (Σχήμα 6.6)

$\sigma'_{v'}$, σε βάθος $B/2$ για τετραγωνικό θεμέλιο και B για θεμελιολωρίδα (κάτω από τη στάθμη θεμελίωσης).

Γίνεται διαχωρισμός του εδάφους σε στρώσεις πάχους Δz κάτω από το θεμέλιο και για κάθε στρώση χρησιμοποιείται το E_s και υπολογίζεται το I_z .



Σχήμα 6.5 Καθιζήσεις επιφανειακής θεμελίωσης (Κρίτας, 2010)



Σχήμα 6.6 Διάγραμμα υπολογισμού I_z (Κρίτας, 2010)

Μέθοδος Steinbrenner (άμμοι – άργιλοι), (ελαστική σχέση):

Η συγκεκριμένη ελαστική σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

- Για τον υπολογισμό των συνολικών καθιζήσεων σε αμμώδη και ξηρά αργιλικά εδάφη καθώς σε αυτά οι καθιζήσεις στερεοποίησης και οι ερπυστικές καθιζήσεις αποτελούν αμελητέες ποσότητες. Καθώς το E μεταβάλλεται με το

βάθος απαιτείται προσεκτική επιλογή των τιμών που θα χρησιμοποιηθούν (Ε΄και ν΄). Επιπρόσθετα, οι καθιζήσεις δεν είναι πλήρως αντιστρεπτές αν αφαιρεθεί το φορτίο.

- Για τον υπολογισμό της άμεσης καθίζησης ΔH_i σε κορεσμένα συνεκτικά – αργιλικά εδάφη ($\Delta H_i < \Delta H_{ολ}$) θεωρούνται αστράγγιστες συνθήκες $E = E_u$ και $\nu = \nu_u = 0.5$ (χωρίς μεταβολή όγκου). Οι καθιζήσεις αυτές θεωρούνται αντιστρεπτές μετά την αφαίρεση το φορτίου.

Θεωρώντας το έδαφος ως ελαστικό μπορεί να υπολογιστεί η καθίζηση εύκαμπτου θεμελίου με τη γενική σχέση :

$$\Delta H_i = q_o * a * B^* * I_s * I_F * \frac{1-\nu^2}{E_s} \quad (\text{Εξίσωση 6.28})$$

Όπου:

q_o , πρόσθετη τάση λόγω επιφόρτισης

B , το πλάτος του θεμελίου

L , το μήκος του θεμελίου

E_s , σταθμισμένο μέτρο ελαστικότητας εδάφους από τη στάθμη θεμελίωσης έως βάθος $4B$ κάτω από αυτή (για κορεσμένα αργιλικά εδάφη $E_s = E_u$)

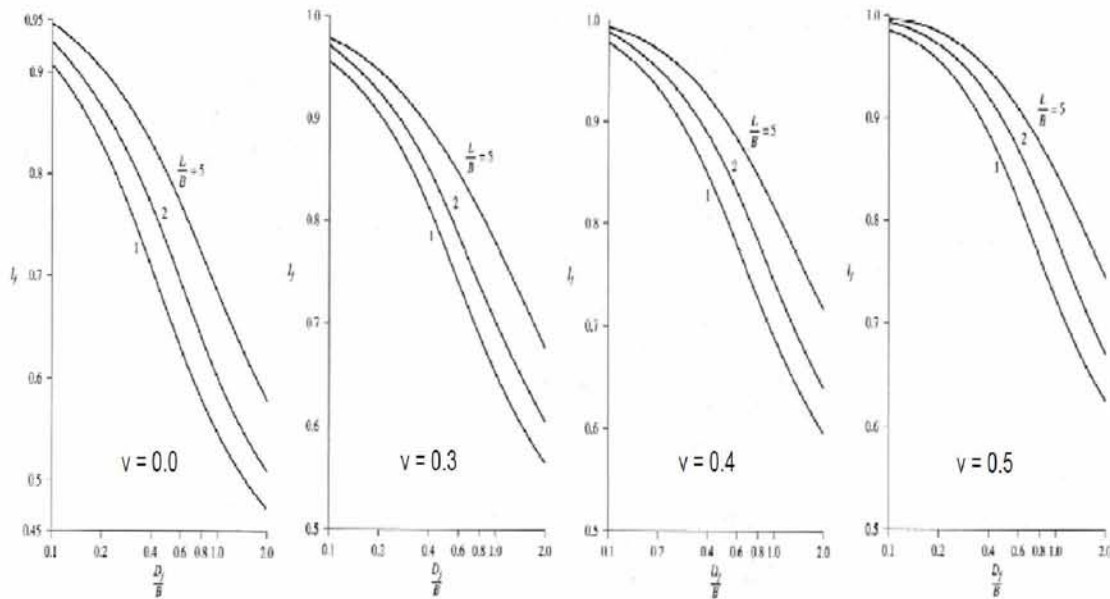
ν , λόγος Poisson (για κορεσμένα αργιλικά εδάφη $\nu = \nu_u$)

$I_s = F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu} * F_2$, συντελεστής σχήματος (F_1 , F_2 Πίνακας 6.4)

I_F , συντελεστής βάθους θεμελίωσης

Πίνακας 6.3 Τιμές Παραμέτρων

Παράμετρος	Κέντρο	Γωνία
α	4	1
B^*	$B/2$	B
m	L/B	L/B
n	$2H/B$	H/B



Σχήμα 6.7 Νομογράφημα υπολογισμού I_F (Κρίτας, 2010)

Για $D_f = 0$ τότε $I_F = 1$

Για άκαμπτο θεμέλιο χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις του Bowles:

$$\Delta H_{ak} = 0.93 * \Delta H_{ευκαμπτο κέντρο} \quad (\text{Εξίσωση 6.29})$$

$$E_s = \frac{E_1 \Delta z_1 + E_2 \Delta z_2 + \dots + E_n \Delta z_n}{\bar{z}} \quad (\text{Εξίσωση 6.30})$$

Όπου:

E_s , σταθμισμένο μέτρο ελαστικότητας κατά Bowles

E_i , μέτρο ελαστικότητας στη στρώση Δz_i

\bar{z} , $\min\{H, 5B\}$

Καθιζήσεις σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη:

Αναπτύσσονται και οι τρεις μορφές καθίζησης:

- Άμεσες καθιζήσεις ΔH_i . Μπορούν να υπολογιστούν είτε με τις σχέσεις του Steinbrenner (Εξίσωση 6.28) είτε με τις σχέσεις του Janbu (Εξίσωση 6.31).

- Καθιζήσεις στερεοποίησης ΔH_c (Εξισώσεις 6.32, 6.33, 6.34, 6.35, 6.36, 6.37, 6.38)
- Καθιζήσεις ερπυστικού τύπου ΔH_s (Εξίσωση 6.39). Συνήθως δεν έχουν μεγάλη τιμή.

Όταν χρησιμοποιούνται σχέσεις ελαστικής μορφής δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή κατάλληλων τιμών E και ν . «Στραγγισμένες» τιμές για ολικές καθιζήσεις μη-κορεσμένων αργιλικών εδαφών και «αστράγγιστες τιμές» για τις άμεσες καθιζήσεις κορεσμένων αργιλικών εδαφών.

Άμεσες καθιζήσεις σε αργιλικά εδάφη:

Σύμφωνα με τον Janbu για εδαφική απόθεση πάχους H η τιμή της άμεσης καθιζήσης άκαμπτου θεμελίου σε κορεσμένες αργίλους είναι:

$$\Delta H_i = \mu_0 * \mu_1 * \frac{q_0 * B}{E_u} \quad (\text{Εξίσωση 6.31})$$

Όπου:

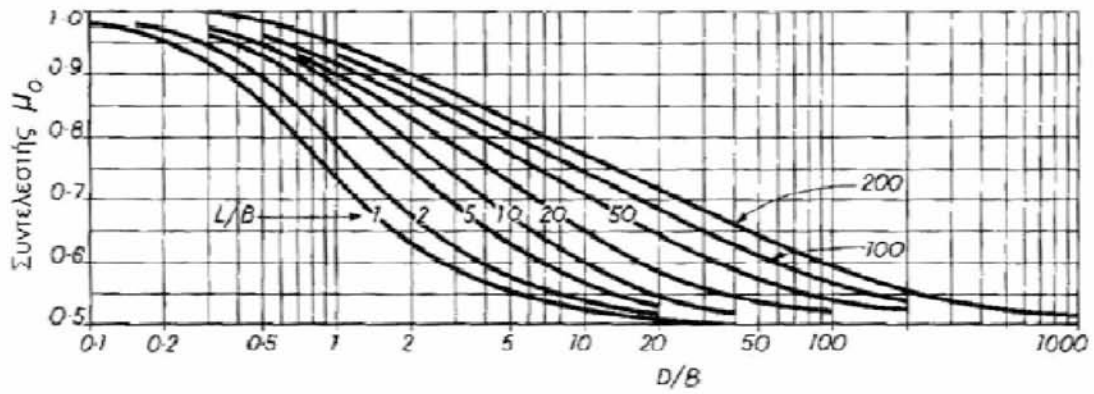
q_0 , καθαρή τάση θεμελίου

B , πλάτος θεμελίου

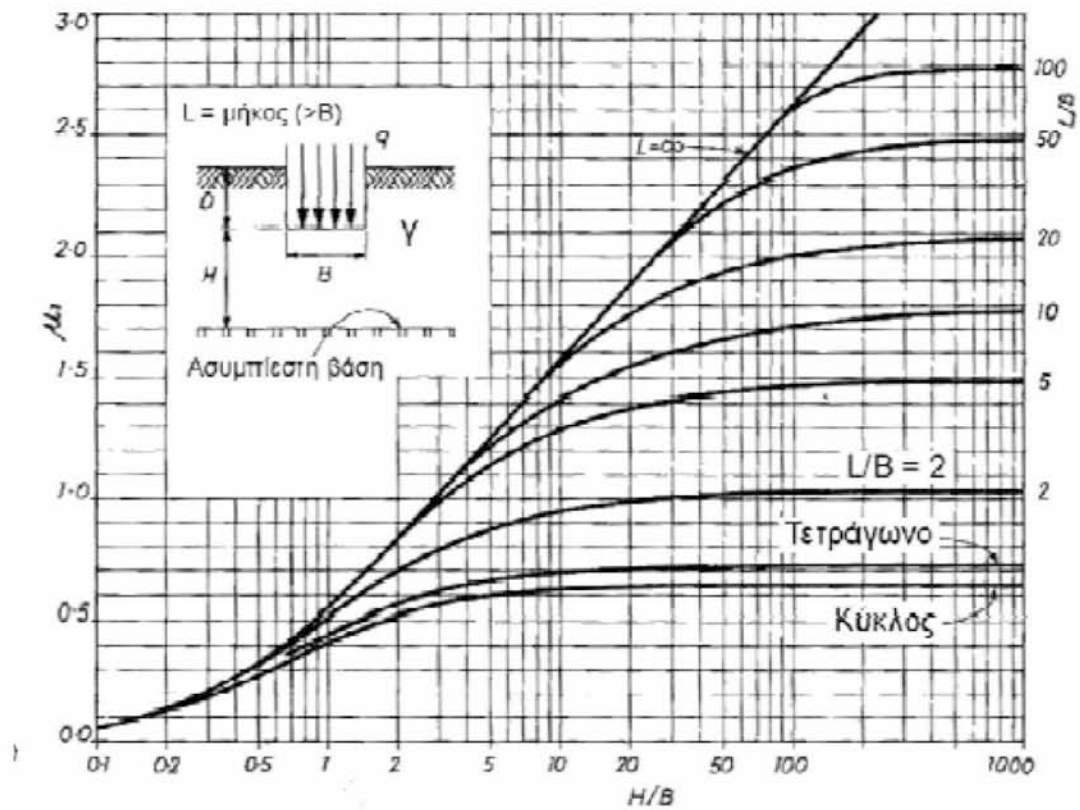
E_u , «αστράγγιστο» μέτρο ελαστικότητας εδάφους

μ_0 , συντελεστής βάθους θεμελίωσης

μ_1 , συντελεστής πάχους εδαφικής στρώσης



Σχήμα 6.8 Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή μ_0 (Καβαδάς, 2005)



Σχήμα 6.9 Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή μ_1 (Καβαδάς, 2005)

Καθιζήσεις στερεοποίησης σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη:

Οι καθιζήσεις στερεοποίησης οφείλονται στην αργή απομάκρυνση του νερού των πόρων και την προοδευτική μείωση του πορώδους των αργιλικών εδαφών. Ο υπολογισμός της καθίζησης στερεοποίησης γίνεται με την χρήση των παραμέτρων συμπιεστότητας C_c , C_r (από τη λογαριθμική σχέση τάσης-συμπίεσης στη δοκιμή

οιδημέτρου.) Είναι επίσης δυνατή η εκτίμηση της χρονικής εξέλιξης της καθίζησης λόγω στερεοποίησης, δηλαδή ο υπολογισμός της μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα από την έναρξη της στερεοποίησης.

Μια σημαντική διάκριση μεταξύ των αργιλικών εδαφών που επηρεάζει τον υπολογισμό καθιζήσεων είναι:

- Κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι: Εδάφη τα οποία δεν έχουν δεχτεί στο παρελθόν φορτία μεγαλύτερα από αυτά που τώρα δρουν πάνω τους.
- Υπερστερεοποιημένες άργιλοι: Εδάφη στα οποία η κατακόρυφη ενεργός τάση που αναπτύχθηκε στο παρελθόν υπήρξε μεγαλύτερη από αυτή που παρατηρείται σήμερα.

Κανονικά στερεοποιημένα εδάφη:

$$\Delta H_c = \sum_{i=1}^n \left(H_i \frac{C_{c,i}}{1+e_{o,i}} * \log\left(\frac{\sigma'_{vo,i} + \Delta\sigma'_{v,i}}{\sigma'_{vo,i}}\right) \right) \quad (\text{Εξίσωση 6.32})$$

Υπερστεροποιημένα εδάφη με $\sigma'_{vo} < \sigma'_c < \sigma'_{vo} + \Delta\sigma'$:

$$\Delta H_c = \sum_{i=1}^n \left(H_i \frac{C_{r,i}}{1+e_{o,i}} * \log\left(\frac{\sigma'_{c,i}}{\sigma'_{vo,i}}\right) \right) + \sum_{i=1}^n \left(H_i \frac{C_{c,i}}{1+e_{o,i}} * \log\left(\frac{\sigma'_{vo,i} + \Delta\sigma'_{v,i}}{\sigma'_{c,i}}\right) \right) \quad (\text{Εξίσωση 6.33})$$

Υπερστεροποιημένα εδάφη με $\sigma'_{vo} + \Delta\sigma' < \sigma'_c$:

$$\Delta H_c = \sum_{i=1}^n \left(H_i \frac{C_{r,i}}{1+e_{o,i}} * \log\left(\frac{\sigma'_{vo,i} + \Delta\sigma'_{v,i}}{\sigma'_{vo,i}}\right) \right) \quad (\text{Εξίσωση 6.34})$$

Όπου:

C_c , C_r δείκτες συμπίεστικότητας και επανασυμπίεστικότητας

H_i , $e_{o,i}$, πάχος και δείκτης πόρων της εξεταζόμενης στρώσης i

$\sigma'_{vo,i}$, $\sigma'_{c,i}$ αρχική ενεργός τάση και τάση προστεροποίησης στρώσης i

$\Delta\sigma'_i$, αύξηση τάσης λόγω επιφόρτισης στη στρώση i

Οι εξισώσεις δίνονται θεωρώντας το έδαφος χωρισμένο σε στρώσεις (συστήνεται $H_i \leq B/3$).

Για εύκαμπτο πέδιλο το $\Delta\sigma'$ υπολογίζεται στο κέντρο του πεδίου ενώ για άκαμπτο πέδιλο το $\Delta\sigma'$ υπολογίζεται στο χαρακτηριστικό σημείο.

Ο συντελεστής C_c μπορεί να ληφθεί ίσος με: (Nishida, 1956)

$$C_c = 0.54(e_o - 0.35) \quad (\text{Εξίσωση 6.35})$$

Ο συντελεστής C_r μπορεί να ληφθεί ίσος με: (Αναγνωστόπουλος, 1994)

$$C_r = 0.10 * C_c \quad (\text{Εξίσωση 6.36})$$

Είναι δυνατό να εκτιμηθεί η χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων στερεοποίησης με τη χρήση της εξίσωσης:

$$\Delta H_{c,t} = U * \Delta H_{c,\infty} \quad (\text{Εξίσωση 6.37})$$

Όπου:

U , βαθμός στερεοποίησης

$\Delta H_{c,\infty}$, τελική τιμή καθίζησης στερεοποίησης

Για τον υπολογισμό το U χρησιμοποιείται η Εξίσωση 6.38 και τα Σχήματα 6.10 και 6.11.

$$\Delta H_{c,t} = U * \Delta H_{c,\infty} \quad (\text{Εξίσωση 6.37})$$

Όπου:

U , βαθμός στερεοποίησης

$\Delta H_{c,\infty}$, τελική τιμή καθίζησης στερεοποίησης

Για τον υπολογισμό το U χρησιμοποιείται η Εξίσωση 6.38 και τα Σχήματα 6.10 και 6.11.

$$T_v = \frac{c_{vst}}{H_s^2} \quad (\text{Εξίσωση 6.38})$$

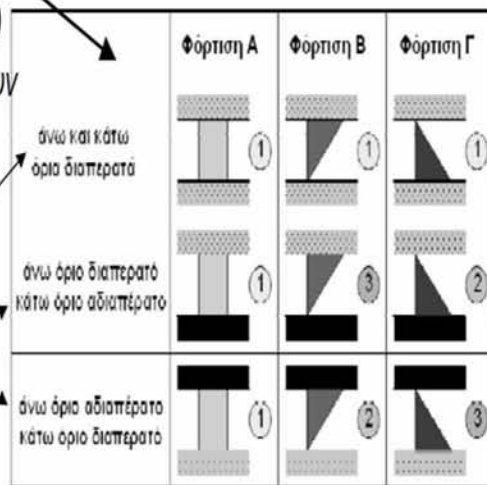
Όπου:

c_v , συντελεστής στρεοποίησης

Προσδιορίζεται η περίπτωση στερεοποίησης (1 ή 2 ή 3) βάση των διαπερατών ορίων και του τύπου φόρτισης

$$H_s = \frac{H}{2}$$

$$H_s = H$$

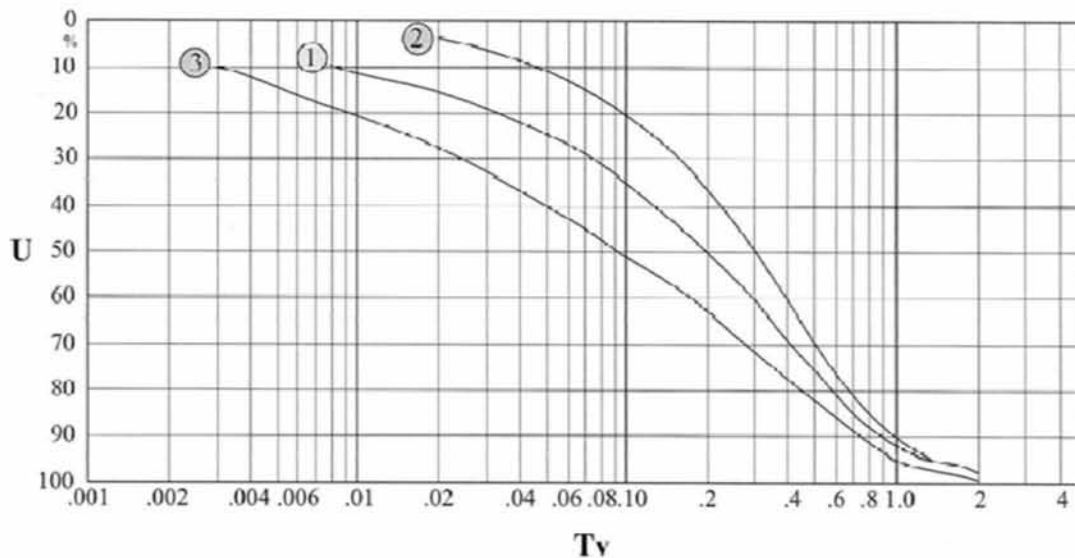


Φόρτιση Α: Οι τάσεις επιφόρτισης δεν μειώνονται με το βάθος. Περίπτωση ειτεταμένης φόρτισης σε σχέση με το πάχος της εδαφικής στρώσης. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις φόρτισης επιχώματος ή γενικής πτώσης υδροφόρου ορίζοντα

Φόρτιση Β: Οι τάσεις επιφόρτισης μειώνονται με το βάθος. Περίπτωση φόρτισης σε μικρή έκταση όπως για παράδειγμα θεμελίωση σε πέδιλα.

Φόρτιση Γ: Οι τάσεις επιφόρτισης αυξάνονται με το βάθος. Περίπτωση στραγγίξης επιχώματος (στερεοποίηση από το ίδιο βάρος του).

Σχήμα 6.10 Διάγραμμα προσδιορισμού περίπτωσης στερεοποίησης (Μαραγκός, 2009)



Σχήμα 6.11 Διάγραμμα προσδιορισμού βάθος στερεοποίησης U (Μαραγκός, 2009)

Ερπυστικές καθιζήσεις σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη:

Οι ερπυστικές καθιζήσεις (δευτερεύουσες καθιζήσεις) λαμβάνουν χώρα μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης και μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση:

$$\Delta H_s(t) = \sum_{i=1}^n \Delta H_i(t) = \sum_{i=1}^n \left(H_i * \frac{C_{a,i}}{1+e_{c,i}} * \log \frac{t}{t_{c,i}} \right) \quad (\text{Εξίσωση 6.39})$$

Όπου:

$C_{a,i}$ συντελεστής δευτερεύουσας στερεοποίησης στη στρώση i $C_{a,i} = 0.025-0.06C_c$

H_i πάχος στρώσης i

$e_{c,i}$ δείκτης πόρων μετά το πέρας της στερεοποίησης της στρώσης i

$t_{c,i}$ χρόνος πρωτεύουσας στερεοποίησης στρώσης i

t χρόνος υπολογισμού δευτερεύουσας στερεοποίησης

Για τα αμμώδη εδάφη οι ελαστικές παράμετροι μπορούν να ληφθούν από τον Πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.5 Ελαστικές παράμετροι αμμοδών εδαφών (Das,1999)

Είδος εδάφους	Μέτρο Ελαστικότητας E_s (KN/m ²)	Λόγος Poisson ν
Χαλαρή άμμος	10500-24000	0.20-0.40
Μέτριας πυκνότητας άμμος	17250-27600	0.25-0.40
Πυκνή άμμος	34500-55200	0.30-0.45
Πλωδής άμμος	10350-17250	0.20-0.40
Αμμογάλικο	69000-172500	0.15-0.35

Το μέτρο ελαστικότητας E υπό «στραγγισμένες» συνθήκες συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας υπό «αστράγγιστες» συνθήκες με την Εξίσωση (6.40) (Καβαδάς,2005)

$$E_u = \frac{3}{2(1+\nu)} * E \quad (\text{Εξίσωση 6.40})$$

Το ν στην συγκεκριμένη εξίσωση είναι στην «στραγγισμένη» τιμή.

Για τα αργιλικά εδάφη οι ελαστικές παράμετροι λαμβάνονται από τον Πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6 Ελαστικές παράμετροι αργιλικών εδαφών (Bowles, 1997)

Είδος εδάφους	Μέτρο Ελαστικότητας E_s (KN/m ²)	Λόγος Poisson ν
Μαλακή άργιλλος	4100-20700	0.20-0.50
Μέτριας στιφρότητας άργιλος	20700-41400	0.25-0.50
Στιφρή άργιλος	41400-96600	0.20-0.50

Στους πίνακες 6.7 και 6.8 παρουσιάζονται οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές μεγεθών που σχετίζονται με την καθίζηση. Ενδιαφέρουν περισσότερο η μέγιστη καθίζηση και η μέγιστη διαφορική καθίζηση $\Delta H/L$ ιδιαίτερα μεταξύ γειτονικών θεμελίων.

Πίνακας 6.7 Όρια επιτρεπτόν καθιζήσεων (Bjertum, 1963)

Βαθμός βλάβης με τον λόγο διαφορικής καθίζησης $\Delta\Delta H/\ell$	
Περιγραφή βλάβης	Όριο $\Delta\Delta H/\ell$
Όριο για μηχανολογικό εξοπλισμό ευαίσθητο σε καθιζήσεις	1/750
Όριο για πλαίσια με διαγώνιους συνδέσμους	1/600
Ασφαλές όριο για κτίρια που δεν επιτρέπεται η εμφάνιση ρηγματώσεων	1/500
Όριο εμφάνισης πρώτων ρωγμών σε τοίχους πλήρωσης	1/300
Όριο για εμφάνιση απόκλισης από την κατακόρυφο ψηλών και δύσκαμπτων κτιρίων	1/250
Σημαντικές ρηγματώσεις σε οπτοπλινθοδομές	1/150
Ασφαλές όριο για εύκαμπτες οπτοπλινθοδομές με $H/L < 1/4$	
Όριο για εμφάνιση δομικών αστοχιών γενικά σε κτίρια	

Πίνακας 6.8 Όρια επιτρεπτών καθιζήσεων (Barnes,2000)

Όρια επιτρεπτών καθιζήσεων			
Καθίζηση	Άμμος		Άργιλος
	Terzaghi and Peck (1948)	Skempton and MacDonald (1956)	Skempton and MacDonald (1956)
Μέγιστη διαφορική καθίζηση ΔΔΗ	2.0 cm	2.5 cm	4.0 cm
Μέγιστη καθίζηση ΔΗ (μεμονωμένα πέδιλα)	2.5 cm	4.0 cm	6.5 cm
Μέγιστη καθίζηση ΔΗ (κοιτόστρωση)	5.0 cm	4.0 - 6.5 cm	6.5 – 10 cm

6.2. Θεμελίωση με πασσάλους

Πάσσαλος είναι ένα μεμονωμένο στοιχείο βαθιάς θεμελιώσεως που τα φορτία της ανωδομής μέσα στο έδαφος, με ασφάλεια τόσο έναντι θραύσεως όσο και έναντι υπερβολικών καθιζήσεων.

Κατά τον ποσοτικό προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας P_u ενός πασσάλου θεωρείται ότι το φορτίο της ανωδομής μεταβιβάζεται στο έδαφος μέσω του πασσάλου δια της αντοχής της αιχμής του, (Q_b), και της αντοχής εκ των πλευρικών τριβών, (Q_s), οπότε ισχύει η σχέση:

$$P_u = Q_b + Q_s \quad (\text{Εξίσωση 6.41})$$

Η φέρουσα ικανότητα ενός πασσάλου εξαρτάται όμως από πολλούς παράγοντες όπως το υλικό, τη μορφή και τον τρόπο κατασκευής του πασσάλου καθώς και το είδος του περιβάλλοντος εδάφους.

Τα συνήθη συστήματα λειτουργίας πασσάλων-εδάφους χαρακτηρίζονται ως α) πασσάλου αιχμής, β) πάσσαλοι τριβής, γ) πάσσαλοι αιχμής-τριβής, ανάλογα με τον τρόπο μεταβίβασης των φορτίων στο έδαφος και τον τρόπο αναπτύξεως της αντοχής

των πασσάλων. Οι κύριες κατηγορίες πασσάλων είναι σύμφωνα με τον τρόπο κατασκευής οι πάσσαλοι εκσκαφής και οι εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι.

Για την ανάπτυξη όμως της αντοχής δηλαδή φέρουσας ικανότητας απαιτείται μια μετακίνηση-υποχώρηση του πασσάλου λόγω της φορτίσεως. Έτσι η πλήρης ανάπτυξη της αντοχής αιχμής, (Q_b) απαιτεί μια σημαντική κατακόρυφη μετακίνηση, 5% έως 10% της διαμέτρου B του πασσάλου. Η αντοχή λόγω πλευρικών τριβών (Q_s) αναπτύσσεται πλήρως για μικρές κατακόρυφες μετακινήσεις του πασσάλου, 0,5% της διαμέτρου του πασσάλου δηλαδή 0,5-2cm.

Έτσι μικρά φορτία επί του πασσάλου επί του πασσάλου αναλαμβάνονται κυρίως από τις πλευρικές τριβές, ενώ υψηλά φορτία αναλαμβάνονται συνήθως κατά το μεγαλύτερο μέρος τους από την αντίσταση αιχμής (Παναγιώτου, 2003).

Υπολογισμός φέρουσας ικανότητας πασσάλων

Ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας των πασσάλων εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο σχεδιασμού μιας θεμελίωσης με πασσάλους.

Τα βασικά κριτήρια σχεδιασμού είναι (Αναγνωστόπουλος, 1990):

- A) Να μην υπάρξει υπέρβαση αυτής καθ' εαυτής της αντοχής του πασσάλου ως φέροντος στοιχείου.
- B) Να μην υπάρξει υπέρβαση της φέρουσας ικανότητας του συστήματος πάσσαλος-έδαφος.
- Γ) Οι παραμορφώσεις (π.χ καθιζήσεις) να είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων για την ανωδομή.

Εκτίμηση Φέρουσας Ικανότητας πασσάλου σε κατακόρυφη φόρτιση

Οι υπολογισμός του οριακού φορτίου ενός μεμονωμένου πασσάλου, υπό αξονική κατακόρυφη φόρτιση, δίνεται από την γενική σχέση:

$$P_u = \Sigma f_s * A_s + f_b * A_b - W_b \quad (\text{Εξίσωση 6.41})$$

Όπου:

f_s , οριακή τιμή πλευρικής τριβής

f_b , αντοχή σε θραύση της αντοχής του πασσάλου A_s ,

παράπλευρος επιφάνεια του πασσάλου

A_b , επιφάνεια της αιχμής του πασσάλου W_p ,

το βάρος του πασσάλου

Το φορτίο το οποίο αναλαμβάνεται από την παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου είναι:

$$Q_s = \Sigma f_s * A_s \quad (\text{Εξίσωση 6.42})$$

Το φορτίο το οποίο αναλαμβάνεται από την αντοχή της αιχμής του πασσάλου είναι: Q_b

$$= f_b * A_b \quad (\text{Εξίσωση 6.43})$$

Φέρουσα ικανότητα της αιχμής πασσάλου κατά Terzaghi

Η φέρουσα ικανότητα της αιχμής ενός πασσάλου ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται κατά

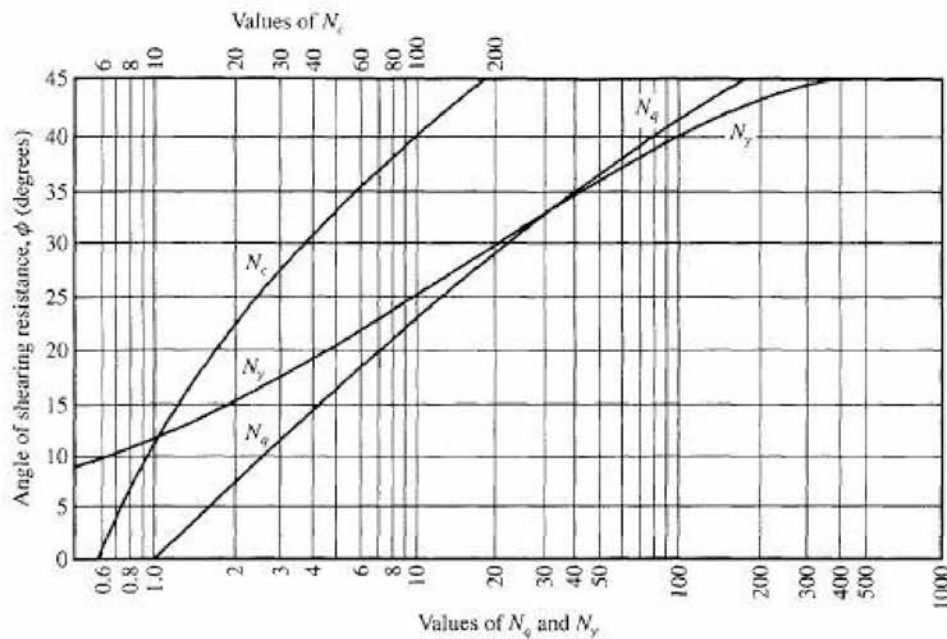
Terzaghi:

Για κυκλικής διατομής, διαμέτρου B , πασσάλους:

$$q_u = 1,3 * c * N_c + \gamma_1 * z * N_q + 0,3 * \gamma_2 * B * N_\gamma \quad (\text{Εξίσωση 6.44})$$

Όπου:

N_c , N_q , N_γ , συντελεστές φέρουσας ικανότητας εξαρτόμενοι από την γωνία τριβής του εδάφους (Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.12 Συντελεστές φέρουσας ικανότητας κατά Terzaghi (www.civilfoundation.com)

Αντοχή λόγω πλευρικών τριβών

Συνεκτικά εδάφη

Ανάλυση με αναφορά σε ενεργές τάσεις – βραδεία επιβολή του φορτίου.

Η αντοχή λόγω τριβών, ανά μονάδα επιφανείας στην παράπλευρη επιφάνεια εκφράζεται σύμφωνα με την κατωτέρω μεθοδολογία του Burland με την εξίσωση:

$$f'_s = \sigma'_{hs} * \epsilon \phi \delta' \quad (\text{Εξίσωση 6.45})$$

Όπου:

δ' , ενεργός γωνία τριβής της διεπιφάνειας εδάφους-πασσάλου

σ'_{hs} , ενεργός οριζόντια τάση, κατά τη θραύση

Εάν σ'_v είναι η ενεργός κατακόρυφη τάση λόγω υπερκείμενων γαιών, η ανωτέρω εξίσωση μπορεί να γραφεί:

$$f_s / \sigma'_v = K_s * \epsilon \phi \delta' = \beta \quad (\text{Εξίσωση 6.46})$$

Όπου:

$K_s = \sigma'_{hs} / \sigma'_v$, συντελεστής ωθήσεων στη παράπλευρη επιφάνεια

β , συντελεστής ενεργού πλευρικής τριβής

Για τον συντελεστή K_s και για διάφορες κατηγορίες εδάφους-πασσάλου έχουμε:

I) Σε πασσάλους δια εκσκαφής αναμένεται τιμή $K_s < K_0$ λόγω αποτονόσεως των τάσεων από την εκσκαφή.

II) Σε εμπηγνύομενους πασσάλους αναμένεται $K_s > K_0$ λόγω της αύξησης των οριζόντιων τάσεων από την εμπήξηση.

III) Στην περίπτωση κανονικά φορτισμένων (NC) αργιλικών εδαφών ισχύει:

$$K_0 = 1 - \eta \mu \phi'_{cv} \quad (\text{Εξίσωση 6.47})$$

Εάν δεχθούμε ότι $\delta' = \phi'_{cv}$ τότε για μια ιδανική κατάσταση

$$B_{\delta} = (1 - \eta \mu \phi'_{cv}) * \epsilon \phi \phi'_{cv} \quad (\text{Εξίσωση 6.48})$$

Για μεταβολές της ϕ'_{cv} από 20° έως 40° η αντίστοιχη τιμή του B_{δ} μεταβάλλεται από 0,25-0,30. Από δοκιμαστικές φορτίσεις επί πασσάλων δια εμπήξεως το β κυμαίνεται μεταξύ 0,25 και 0,40 με μέση τιμή 0,30.

IV) Στην περίπτωση προφορτισμένων (OC) αργιλικών εδαφών είναι γνωστό ότι το K_0 μεταβάλλεται με το βάθος και εξαρτάται με την προϊστορία των φορτίσεων. Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

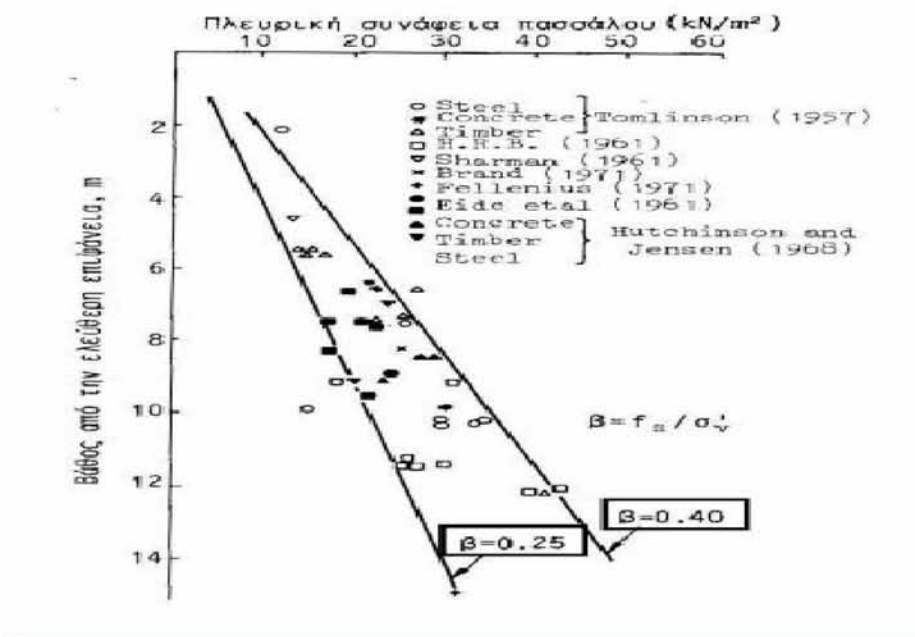
$$f_s = \sigma'_v * \sqrt{R} * \beta_{1\delta} \quad (\text{Εξίσωση 6.49})$$

Όπου $\beta_{1\delta}$ τιμή του β για την περίπτωση του αυτού εδάφους αλλά κανονικά φορτισμένου.

Με βάση την εμπειρική σχέση ισχύει $\beta = 0.3 * \sqrt{R}$

Όπου:

R, ο λόγος προφόρτισης



Σχήμα 6.13 Πάσσαλοι εμπεγνυόμενοι σε μαλακή άργιλο: Συσχέτιση συνάφειας πασσάλου, f_s και βάθους

(<http://users.ntua.gr/kavvadas/Books/Foundations/08b-piles.pdf>)

Μη συνεκτικά εδάφη

Στην περίπτωση μη συνεκτικών εδαφών το οριακό φορτίο λόγω τριβών εκτιμάται με εξισώσεις της μορφής:

$$Q_s = A_s \cdot K \cdot \sigma'_v \cdot \epsilon \delta' \quad (\text{Εξίσωση 6.50})$$

Όπου:

A_s , η παράπλευρος επιφάνεια του πασσάλου K ,

συντελεστής ωθήσεως επί του πασσάλου

δ' , η γωνία τριβής της διεπιφάνειας πασσάλου εδάφους

σ'_v , ενεργός κατακόρυφος τάση

Η ανά μονάδα επιφάνειας αντοχή λόγω πλευρικών τριβών δίνεται όπως και για την περίπτωση των αργίλων από ανάλογη εξίσωση:

$$f_s = K \cdot \sigma'_v \cdot \epsilon \delta' \quad (\text{Εξίσωση 6.51})$$

Έχει παρατηρηθεί ότι η ανά μονάδα επιφάνειας αντοχή λόγω πλευρικών τριβών του πασσάλου αυξάνει μέχρι ενός βάθους $6 \div 20B$ όπου B η διάμετρος του πασσάλου (κρίσιμο βάθος). Ο λόγος κρίσιμου βάθους είναι ανεξάρτητος του τρόπου κατασκευής και ο αυτός για την αντοχή αιχμής και πλευρικών τριβών.

Ο Broms συνιστά τις τιμές του πίνακα 6.3 για την παράμετρο K , για πασσάλους τριβής σε μη συνεκτικά εδάφη συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας.

Παράλληλα δίνεται η τιμή της γωνίας τριβής δ' για πασσάλους από σκυρόδεμα.

$$\delta' = 0,5 \cdot \phi' \quad (\text{Εξίσωση 6.52})$$

Για πασσάλους δια εκσκαφής και διαμέτρου $B > 60\text{cm}$ οι Touma και Reese συνιστούν

$K=0,7$ και $\delta' = \phi'$ με βάση αποτελέσματα από δοκιμαστικές φορτίσεις.

Πίνακας 6.9 Τιμές συντελεστή οθήσεων K σε πασσάλους

	Μικρή ΙD	Μεγάλη ΙD
Μικροί εκτοπίσεως πάσσαλοι	0,5	1
Πάσσαλοι εκ σκυροδέματος	1	2
Κωνικοί πάσσαλοι	1,5	4

Προτεινόμενοι συντελεστές ασφαλείας:

Ο συντελεστής ασφαλείας πρέπει να επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη τη φύση του υπεδάφους, τις τυχόν μεταβολές του καθώς και την αξιοπιστία της με την οποία προσδιορίστηκε η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου.

Ο Tomilson προτείνει ως επιτρεπόμενο φορτίο θράυσεως:

A) Για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε άργιλο: τη τιμή μεταξύ:

$$P_{ua} = \frac{Q_b + Q_s}{2,5} \quad (\text{Εξίσωση 6.53})$$

Και

$$P_{ua} = \frac{Q_b}{3} + \frac{Q_s}{1,5} \quad (\text{Εξίσωση 6.54})$$

B) Για την περίπτωση πασσάλων δι εκσκαφής, μεγαλύτερη διαμέτρου σε άργιλο τη μικρότερη τιμή μεταξύ:

$$P_{ua} = \frac{Q_b + Q_s}{2} \quad (\text{Εξίσωση 6.55})$$

$$P_{ua} = \frac{Q_b}{3} + Q_s \quad (\text{Εξίσωση 6.56})$$

Παράλληλα πρέπει να ελέγχεται στην περίπτωση πασσάλων από σκυρόδεμα ότι δεν έχουμε υπέρβαση της επιτρεπόμενης τάσης του σκυροδέματος που λαμβάνεται ίση με 6000 KPa.

Εκτίμηση φέρουσας ικανότητας πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση

Οι κατακόρυφοι πάσσαλοι αναλαμβάνουν τις οριζόντιες δυνάμεις καμπτόμενοι ενεργοποιώντας έτσι τόσο την αντοχή τους όσο και την αντοχή του εδάφους που τους περιβάλλει. Ο έλεγχος λοιπόν της φέρουσας ικανότητας πασσάλων σε οριζόντια φόρτιση περιλαμβάνει: α) τη φέρουσα ικανότητα του περιβάλλοντος του πασσάλου εδάφους, β) τον έλεγχο της αντοχής του πασσάλου ως φέροντος στοιχείου σε κάμψη λόγω των πλευρικών καταπονήσεων καθώς και γ) έλεγχο της μετατοπίσεως της κεφαλής του πασσάλου, να είναι ανεκτή από την ανωδομή.

Η συμπεριφορά των πασσάλων σε οριζόντιες φορτίσεις, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η ευκαμψία του πασσάλου σε σχέση με αυτή του εδάφους-κυρίως των ανωτέρων στρωμάτων, η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων και η αντοχή του εδάφους, καθώς και τις συνθήκες δεσμεύσεως της κεφαλής του πασσάλου.

Η κεφαλή του πασσάλου μπορεί να θεωρηθεί ως ελεύθερη, αρθρωτή ή και πλήρως πακτωμένη ανάλογα με τις συνθήκες δεσμεύσεως. Από τα χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων οριζοντίων φορτίων-μετατοπίσεων ολόκληρου του πασσάλου οι πάσσαλοι μπορούν να χαρακτηρισθούν α) ως άκαμπτοι (κοντοί) στην περίπτωση που στρέφονται περί ενός σημείου, σε κάποιο βάθος κατά το μήκος του πασσάλου, χωρίς ουσιαστική παραμόρφωση περί τον άξονα συμμετρίας τους και β) ως εύκαμπτοι (μεγάλου μήκους) εφόσον η συμπεριφορά τους κατά την οριζόντια φόρτιση μπορεί να αποδοθεί με αυτή μιας δοκού εντός ελαστικού εδάφους. Η φέρουσα ικανότητα ενός συστήματος εδάφους-εύκαμπτου πασσάλου μπορεί να

θεωρηθεί αντίστοιχη με αυτή της πεδιλοδοκού και συνδέεται κυρίως με την κάμψη του πασσάλου λόγω της οριζόντιας φόρτισης.

Μέθοδος Broms.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή οι πάσσαλοι διακρίνονται σε άκαμπτους «κοντούς» και

«μεγάλου μήκους» εύκαμπτους, με βάση τον τρόπο αστοχίας του συστήματος εδάφους-θεμελίου. Η αστοχία του συστήματος πάσσαλος-έδαφος πραγματοποιείται :

α) λόγω θραύσεως του εδάφους στην περίπτωση των κοντών πασσάλων β) λόγω υπέρβασης της αντοχής του πασσάλου έναντι καμπτικών ροπών στην περίπτωση των μεγάλων μήκους πασσάλων.

Ο συντελεστής ασφαλείας σε θραύση για το έδαφος πρέπει να λαμβάνεται τουλάχιστον 2 έως 2,5. Η απαίτηση αυτή αφορά στο έδαφος. Προσοχή χρειάζεται όταν κρίσιμο μέγεθος είναι η αντοχή σε κάμψη του πασσάλου κατά τον υπολογισμό της οποίας λαμβάνεται ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1.75.

Συνεκτικά εδάφη

Σαν τάση θραύσεως του εδάφους που είναι η μορφή αστοχίας του συστήματος εδάφους-πασσάλου για κοντό πάσσαλο θεωρείται η τιμή $9c_u$, όπου c_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους. Αντίθετα μεγάλου μήκους πάσσαλοι αστοχούν λόγω υπερβάσεως της αντοχής τους σε κάμψη. Η θέση της μέγιστης ροπής κάμψεως f , καθορίζεται από την σχέση:

$$f = \frac{H_u}{9+c_u*B} \quad (\text{Εξίσωση 6.57})$$

Η τιμή της μέγιστης ροπής κάμψεως είναι:

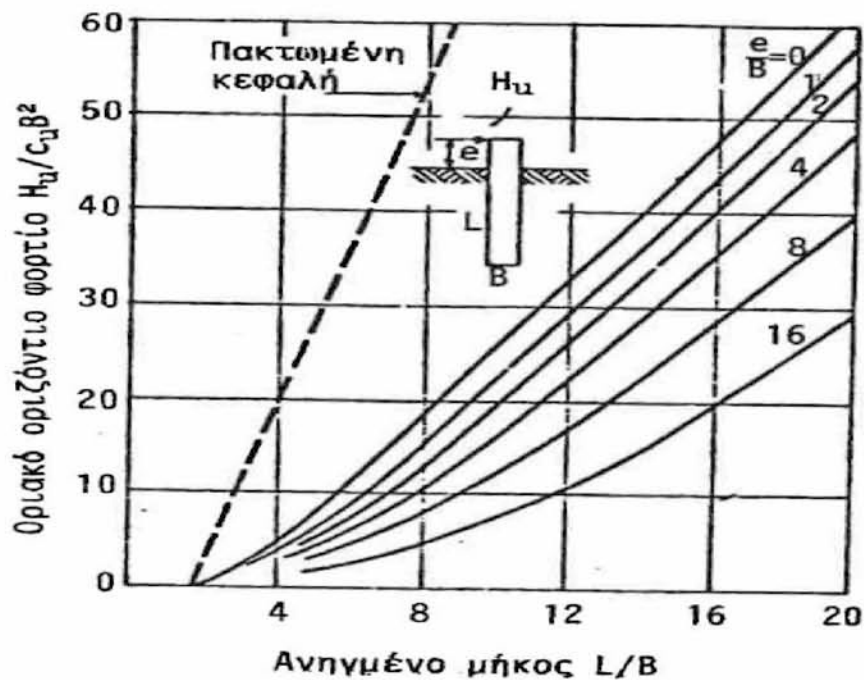
$$M_{\max} = H_u*(e+1,5*B+0,5*f) \quad (\text{Εξίσωση 6.58})$$

Ισχύει επίσης:

$$M_{\max} = 2,25 * B * g^2 * c_u$$

(Εξίσωση 6.59)

Επειδή $L = 1,5 * B + f + g$ είναι δυνατή η επίλυση του παραπάνω συστήματος ως προς το οριζόντιο φορτίο θραύσεως H_u . Η επίλυση του συστήματος δίνεται υπό μορφή αδιάστατων διαγραμμάτων παρακάτω για την περίπτωση κοντών πασσάλων. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να ισχύει $M_y > M_{\max}$ διότι αλλιώς ο πάσσαλος θεωρείται εύκαμπτος δηλαδή μεγάλου μήκους, (M_y) η ροπή θραύσεως της διατομής του πασσάλου.



Σχήμα 6.14 Διάγραμμα υπολογισμού οριζόντιου οριακού φορτίου κοντών πασσάλων σε συνεκτικό έδαφος

(Παναγιώτου, 2003)

Για κοντό πάσσαλο ισχύουν οι σχέσεις:

$$H_u = 9 * c_u * B * (L - 1,5 * B)$$

(Εξίσωση 6.60)

$$M_{\max} = H_u * (0,5 * L + 0,75 * B)$$

(Εξίσωση 6.61)

Στην περίπτωση των εύκαμπτων πασσάλων όπου $M_y < M_{max}$ η παραπάνω εξίσωση δεν ισχύει και ο υπολογισμός του H_u γίνεται με την βοήθεια των εξισώσεων 6.44 και 6.45 θέτοντας όπου M_{max} την M_y . Το διάγραμμα της λύση δίνεται στο Σχήμα 6.5.

Για εύκαμπτο πάσσαλο όπου το κριτήριο αστοχίας είναι η υπέρβαση της ροπής θραύσεως M_y από τη θετική ροπή ανοίγματος οπότε:

$$H_u = \frac{2 \cdot M_y}{1,5 \cdot B + 0,5 \cdot f} \quad (\text{Εξίσωση 6.62})$$

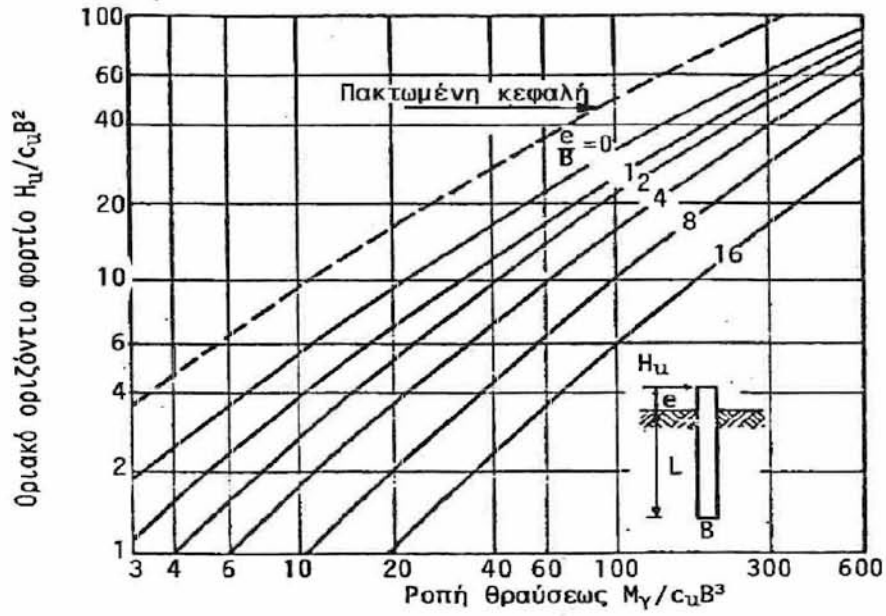
Στην περίπτωση αυτή δημιουργούνται δύο πλαστικές αρθρώσεις λόγω υπερέβασης της αντοχής του πασσάλου σύμφωνα με το Σχήμα 6.6γ. Είναι όμως πιθανή η υπέρβαση της M_y από την αρνητική ροπή πακτώσεως και όχι από τη ροπή ανοίγματος. Ο σχετικός μηχανισμός δίνεται στο Σχήμα 4.15β. Στην περίπτωση αυτή (ενδιάμεση περίπτωση πασσάλου) για τη ροπή πακτώσεως M_π ισχύει:

$$M_\pi = M_y = 2,25 \cdot c_u \cdot B \cdot g^2 - 9 \cdot c_u \cdot B \cdot f \cdot (1,5 \cdot B + 0,5 \cdot f) \quad (\text{Εξίσωση 6.63})$$

Στην περίπτωση αυτή με την βοήθεια των παρακάτω εξισώσεων υπολογίζεται η τιμή του οριακού φορτίου H_u . Θα πρέπει να ελεγχθεί όμως η ροπή στο βάθος $f + 1,5 \cdot B$ είναι από την M_π . Σε αντίθετη περίπτωση ο πάσσαλος θεωρείται μακρύς.

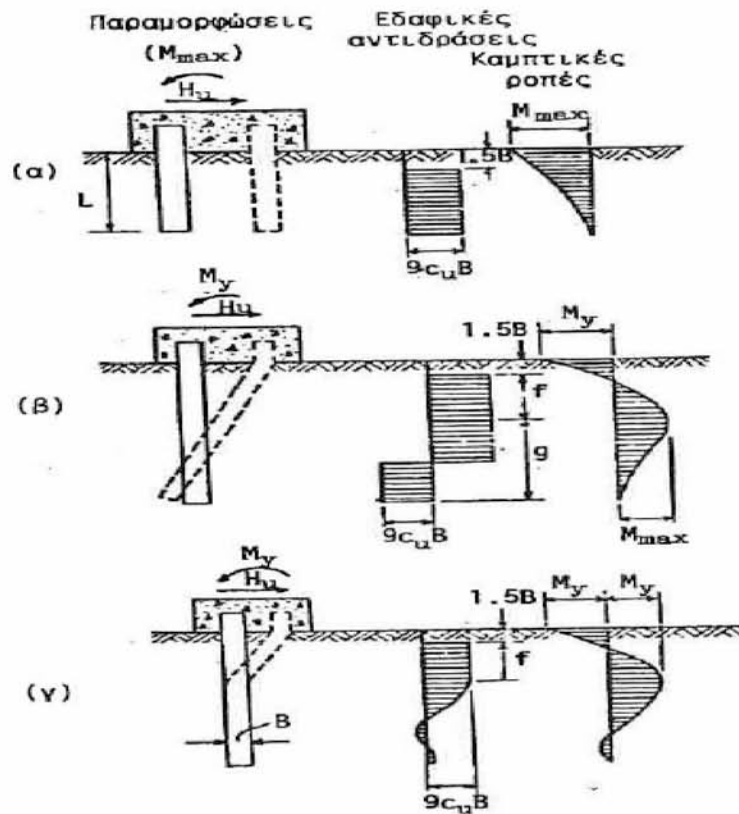
$$f = H_u / (9 \cdot c_u \cdot B) \quad (\text{Εξίσωση 6.64})$$

$$L = 1,5 \cdot B + f + g \quad (\text{Εξίσωση 6.65})$$



Σχήμα 6.15 Διάγραμμα υπολογισμού οριζόντιου οριακού φορτίου μακρών πασσάλων σε συνεκτικό έδαφος

(Παναγιώτου, 2003)



Σχήμα 6.16 Μηχανισμοί θραύσεως με πακτωμένη κεφαλή σε συνεκτικό έδαφος α) Κοντών β) Ενδιάμεσων

γ) Μακρών (Παναγιώτου, 2003)

Ενδεικτικό κριτήριο για κατ' αρχή θεώρηση του πασσάλου ως κοντού ή μακρού είναι

με βάση την παράμετρο β που δίνεται από την εξίσωση:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{B \cdot K_h}{E_p \cdot J_p}} \quad (\text{Εξίσωση 6.66})$$

Όπου:

L , το μήκος του πασσάλου

B , η διάμετρος του πασσάλου

E_p, J_p , το μέτρο ελαστικότητας και η ροπή αδράνειας της διατομής της διατομής του πασσάλου

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό έχουμε:

- Κοντός πάσσαλος εάν $\beta \cdot L < 2,25$
- Μακρύς πάσσαλος εάν $\beta \cdot L > 2,25$

Ο δείκτης εδάφους k_h σύμφωνα με την μέθοδο Broms δίνεται από τις σχέσεις:

$$\text{- Κοντός πάσσαλος : } k_h = \frac{(2 \cdot L + 3 \cdot B) \cdot k}{5 \cdot L + B} \quad (\text{Εξίσωση 6.67})$$

$$\text{- Μακρύς πάσσαλος : } k_h = 0,4 \cdot \frac{k}{B} \quad (\text{Εξίσωση 6.68})$$

Όπου:

k , ο δείκτης εδάφους κατά την κατακόρυφο, από δοκιμαστική φόρτιση τετραγωνικής πλάκας πλάτους 1μ. (Πίνακας 6.10)

Πίνακας 6.10 Δείκτης εδάφους k κατά Broms για συνεκτικά εδάφη

Ομάδες πασσάλων

Στις περισσότερες περιπτώσεις βαθιών θεμελιώσεων γίνεται χρήση περισσότερων του ενός πασσάλου, δηλαδή μιας ομάδας πασσάλων. Η φέρουσα ικανότητα του κάθε πασσάλου στην περίπτωση αυτή επηρεάζεται από την ύπαρξη γειτονικών πασσάλων με αποτέλεσμα το οριακό φορτίο της πασσαλοομάδας να μην είναι το άθροισμα των οριακών φορτίων για κάθε πάσσαλο (Αναγνωστόπουλος, 1990).

Για το λόγο αυτό εισάγεται ο όρος αποδοτικότητα E_f , που χρησιμοποιείται συχνά στην περίπτωση ομάδας πασσάλων και ορίζεται ως ο λόγος του μέσου οριακού φορτίου ανά πάσσαλο στην ομάδα κατά την θραύση της ομάδας, προς ο οριακό φορτίο εδάφους ενός μεμονωμένου πασσάλου της ομάδας. Η τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας για κατακόρυφη φόρτιση κυμαίνεται από 0,8 για την περίπτωση πασσάλων σε ομάδα με αξονική απόσταση $s < 7B$ όπου B η διάμετρος του πασσάλου μέχρι την τιμή 1 για $s > 7B$. Συνεπώς για κατακόρυφη φόρτιση το επιτρεπόμενο κατακόρυφο φορτίο δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{\varepsilon\pi}^{\text{πασσ,ομ}} = \min \left\{ \frac{Q_b + E_f + \Sigma Q_{si}}{2}, \frac{Q_b}{3} + E_f * \frac{\Sigma Q_{si}}{1,5} \right\} \quad (\text{Εξίσωση 6.69})$$

$6000 * A_b$

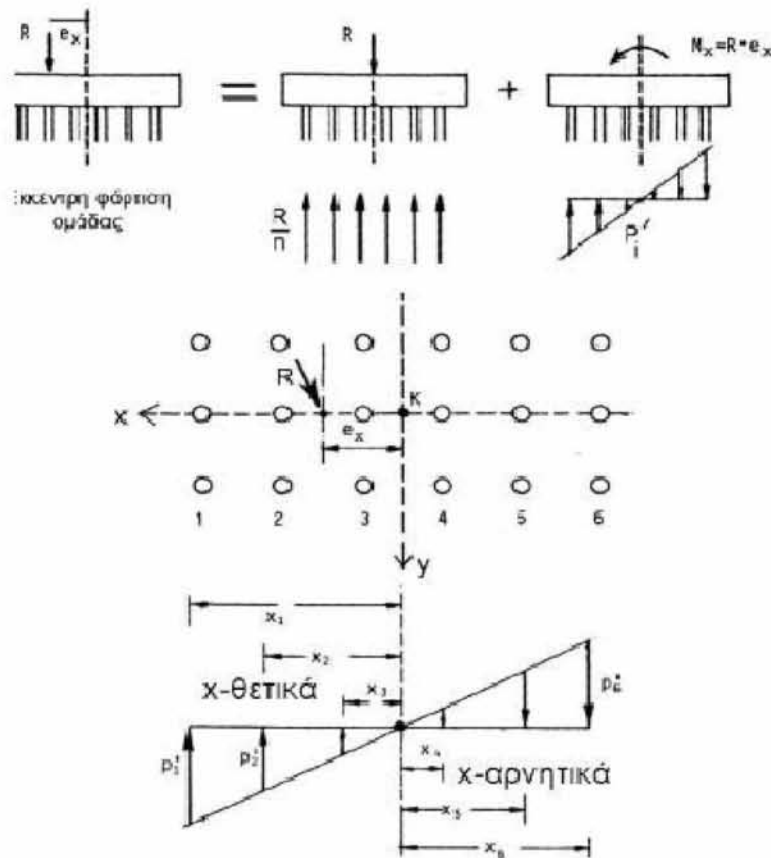
Για την περίπτωση οριζόντιου φορτίου ο συντελεστής αποδοτικότητας E_f παίρνει χαμηλότερες τιμές μεταξύ 0,6 και 0,8. Στην περίπτωση κατακόρυφου φορτίου με ροπή

είναι δυνατή η εκτίμηση της κατανομής του φορτίου με ροπή είναι δυνατή η εκτίμηση της κατανομής του φορτίου πασσάλων (Σχήμα 6.7) για την περίπτωση της ομάδας με n όμοιους πασσάλους. Το συνολικό φορτίο ανά πάσσαλο στην ομάδα είναι:

$$P_i = \frac{R}{n} + \frac{M \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (\text{Εξίσωση 6.70})$$

Όπου:

e_x , η εκκεντρότητα κατά τον άξονα xx



Σχήμα 6.17 Απλουστευτική κατανομή φορτίων σε ομάδα πασσάλων (<https://slideplayer.gr/slide/2770296/>)

7. ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΡΕΥΝΕΣ – ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ

Πριν την κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, θα πρέπει να καθοριστούν οι περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης προκειμένου να δοθεί ακριβής χαρακτηρισμός των περιβαλλοντικών φορτίων και των εδαφών για τη διαδικασία σχεδιασμού που θα ακολουθήσει. Οι συνθήκες της τοποθεσίας εγκατάστασης περιλαμβάνουν δεδομένα σχετικά με τα τοπικά γεωλογικά, ωκεανογραφικά, μετεωρολογικά, ανθρώπινα και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά. Στον Πίνακα 7.1 συνοψίζονται οι περιβαλλοντικές παράμετροι που επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, καθώς και ο εξοπλισμός και οι τεχνικές που θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων, σε όλα τα στάδια της έρευνας (Jenner, 2002).

Στην περίπτωση σχεδιασμού ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, η σημαντικότερη παράμετρος για τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό των υπεράκτιων θεμελίων είναι η λεπτομερής γνώση των συνθηκών των υπόγειων υδάτων. Πολύ σημαντικές είναι και οι συνθήκες του υπεδάφους, για την πρόβλεψη της συνολικής απόκρισης της θεμελίωσης. Από τις συνθήκες του υπεδάφους καθορίζονται οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του εδάφους καθώς και οι πιθανοί γεωκίνδυνοι. Η έκταση της επιτόπιας έρευνας βασίζεται στο βάθος και την έκταση της θάλασσας που επηρεάζει ή επηρεάζεται από το θεμέλιο. Τα εδάφη του πυθμένα παρουσιάζουν εξαιρετικά συμπίεστικά χαρακτηριστικά, ωστόσο, αυτό μπορεί να διαφέρει σημαντικά κατά μήκος των παράκτιων περιοχών ανά τον κόσμο, με αποτέλεσμα, ένας τύπος θεμελίων που λειτουργεί σε μια περιοχή να μην είναι κατάλληλος σε μια παρακείμενη τοποθεσία.

Πίνακας 7.1 Εφαρμογές επι τόπου συνθηκών για φάσεις έργου υπεράκτιου αιολικού πάρκου (Westgate and

DeJong, 2005)

Category	Offshore Wind Farm Project Phase										Acquisition Equipment
	Planning of Environmental Survey	Planning of MetOcean Survey	Planning of Geotechnical Survey	Foundation Engineering	Scour Protection	Cable Engineering	Commercial Viability of Project	EIA (Regulatory Requirement)	Installation planning	Operation & Maintenance	
Geology	Bathymetry & Seabed Topography	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Single & multi-beam echo-sounder
	Seabed features & sediments	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Sidescan sonar, magnetometer
	Shallow Geology	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Sub-bottom profilers
	Geotechnical Properties	■	■	■	■	■	■	■	■	■	CPT, vibrocore, boreholes & corers
Oceanography	Currents	■	■	■	■	■	■	■	■	■	ADCP & single point current meter
	Tides	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Current meter & pressure sensor
	Waves	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Wave buoys, radar & pressure sensors
	Turbidity	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Turbidity sensor
Meteorology	Wind	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Anemometer
	Ambient air turbulence	■	■	■	■	■	■	■	■	■	MetMast instruments
	Atmospheric pressure	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Barometer
	Salinity, humidity & temperature	■	■	■	■	■	■	■	■	■	MetMast instruments
Human	Lightning	■	■	■	■	■	■	■	■	■	MetMast instruments
	Fishing	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Consultation
	Shipping	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Radar & VTS
Environmental	Archaeology & Ordinance	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Sidescan sonar & magnetometer
	Benthic & Epibenthic Fauna	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Grab samples, trawls & video
	Particle Size Analysis	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Grab samples
	Marine growth	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Grab samples & video
	Ornithology	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Visual, aerial & radar

Φάσεις έρευνας στο πεδίο εγκατάστασης/ Διερεύνηση περιοχής

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ολοκληρωμένη έρευνα του υπεράκτιου χώρου, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει έως και ένα χρόνο ή και περισσότερο, ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα για την προτεινόμενη τοποθεσία και την έκταση του έργου, πρέπει να διεξαχθούν αρκετές σημαντικές φάσεις έρευνας.

Αρχικά, πρέπει να ολοκληρωθεί η διαδικασία σχεδιασμού, ξεκινώντας από τον ορισμό του εύρους των εργασιών που πρέπει να γίνουν και τελικά κινητοποιώντας τον ανάδοχο για την εκτέλεση του έργου. Στο αρχικό στάδιο πραγματοποιείται η ολοκλήρωση της μελέτης στο γραφείο, κατά την οποία γίνεται ο εντοπισμός του χώρου όπου θα μπορούσε να κατασκευαστεί το αιολικό πάρκο και πραγματοποιείται σχεδιασμός για τη διερεύνηση της περιοχής. Το κόστος αυτής της αρχικής φάσης συνήθως περιλαμβάνει περίπου το 2% του κόστους διερεύνησης της τοποθεσίας (Poulos 1988). Θα πρέπει να περιλαμβάνει διερεύνηση γεωλογικών βάσεων δεδομένων, βαθυμετρικά δεδομένα, γεωφυσικά και γεωτεχνικά δεδομένα, δεδομένα ωκεανογραφίας, σεισμολογικά δεδομένα, απόδοση υφιστάμενων υπεράκτιων αιολικών πάρκων, ανθρώπινες δραστηριότητες στην περιοχή (π.χ. αγωγούς, ναυτιλιακές διαδρομές κλπ.) και περιβαλλοντικές ανησυχίες (μεταναστευτικές διαδρομές πουλιών). Η διαδικασία σχεδιασμού μπορεί να διαρκέσει έως και 6 μήνες, για ένα έργο μεγάλης κλίμακας και συνήθως απαιτεί τουλάχιστον 3 μήνες για έργο μικρής κλίμακας (Randolph & Kenkhuis, 2001).

Ο γεωτεχνικός κίνδυνος που συνεπάγεται από την ανάπτυξη ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου απαιτεί συντονισμένη προσπάθεια τόσο από τους κατασκευαστές όσο και από τους εργολάβους, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος για όλα τα εμπλεκόμενα μέρη στο έργο. Τα τρία βασικά στοιχεία για τη διαχείριση του γεωτεχνικού κινδύνου είναι η αρχική μελέτη, η αξιολόγηση των κινδύνων και η διερεύνηση της περιοχής. Η εκτίμηση της επικινδυνότητας βασίζεται στη μελέτη και στον προσδιορισμό του φάσματος των σχετικών γεωτεχνικών κινδύνων, των πιθανών συνεπειών τους και των δυνατοτήτων μείωσης του αντίκτυπου αυτών.

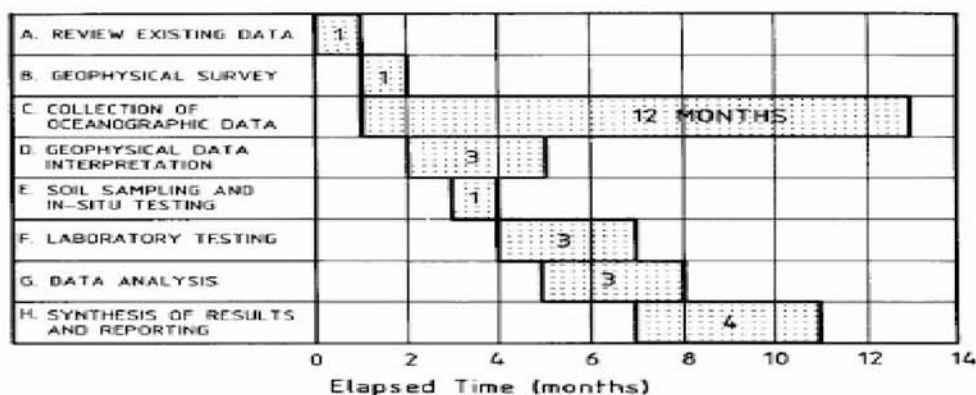
Η επιτόπια έρευνα παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την υλοποίηση του έργου.

Θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης γραφείου, την

εκτίμηση κινδύνου και των γεωλογικών και γεωφυσικών ερευνών. Η ενσωμάτωση αυτών των φάσεων είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί ότι οι συνθήκες του εδάφους καθορίζονται στον πληρέστερο βαθμό που απαιτείται για την εξασφάλιση ενός υγιούς γεωτεχνικού σχεδιασμού.

Η διερεύνηση της περιοχής μπορεί στη συνέχεια να χωριστεί στη γεωλογική μελέτη, τη γεωφυσική έρευνα και τη γεωτεχνική διερεύνηση, η οποία αντιπροσωπεύει περίπου το 79% του συνολικού κόστους. Το υπόλοιπο κόστος διερεύνησης χωρίζεται ανάμεσα στις εργαστηριακές δοκιμές και στην τεχνική ανάλυση και υποβολή εκθέσεων, οι οποίες αντιπροσωπεύουν το 8% και 11% του κόστους, αντίστοιχα (Poulos 1988). Το κόστος διερεύνησης μιας περιοχής εγκατάστασης μπορεί να είναι δαπανηρό, συνήθως κατά μέσο όρο 1 εκατομμύριο δολάρια την εβδομάδα, κυρίως λόγω της κινητοποίησης του χρησιμοποιούμενου σκάφους (Randolph and Kenkhuis, 2001). Ωστόσο, το κόστος αυτό μπορεί να μεταβάλλεται λόγω της μεταβλητής φύσης των θαλάσσιων επιχειρήσεων όπως για παράδειγμα τη διακοπή των ερευνών κατά τη διάρκεια μιας κακοκαιρίας. Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζεται ένα τυπικό πρόγραμμα υπεράκτιας διερεύνησης.

Πίνακας 7.2 Πρόγραμμα υπεράκτιας διερεύνησης



Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι επόμενες φάσεις για τη διερεύνηση της περιοχής είναι η γεωλογική μελέτη, η γεωφυσική και η γεωτεχνική έρευνα.

Γεωλογική μελέτη

Η φάση της γεωλογικής μελέτης βασίζεται στο γεωλογικό ιστορικό της περιοχής και όταν συνδυάζεται με τον τύπο, το μέγεθος και τη σπουδαιότητα της δομής της ανεμογεννήτριας και την ομοιογένεια της εναπόθεσης εδάφους χρησιμεύει ως βάση για την έκταση και τη μέθοδο της διερεύνησης της γεωτεχνικής έρευνας.

Γεωφυσική έρευνα

Κατά τη γεωφυσική έρευνα πραγματοποιείται θαλάσσια βαθυμετρία, τοπογραφία, στρωματογραφία και εντοπίζονται οι πιθανοί γεωκίνδυνοι της περιοχής. Η ανώτερη στρωματογραφία πρέπει να αξιολογηθεί για να προσδιοριστούν οι θέσεις αγκυροβόλησης και τα πιθανά προβλήματα κατά την τοποθέτηση της πλατφόρμας (jack-up rigs), καθώς η τοποθέτηση μπορεί να επηρεάσει γειτονικές υπάρχουσες κατασκευές, επηρεάζοντας το περιβάλλον έδαφος.

Για την πραγματοποίηση της γεωφυσικής έρευνας είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί αρχικά ένα σχέδιο έρευνας στο οποίο θα αναγράφονται τα διάφορα χαρακτηριστικά που προσδιορίζονται κατά την γεωφυσική έρευνα. Οποιαδήποτε υπάρχοντα δεδομένα (π.χ. γεωτρήσεις) θα πρέπει να περιλαμβάνονται σε αυτό το σχέδιο, έτσι ώστε οι γεωφυσικοί που διεξάγουν την έρευνα να μπορούν να βαθμονομούν τα δεδομένα των ερευνών σε σχέση με τα δεδομένα της γεώτρησης, προκειμένου να ελέγξουν τη συνέχεια μεταξύ των δεικτών.

Γεωτεχνική έρευνα

Η γεωτεχνική διερεύνηση της περιοχής διεξάγεται μετά από τη γεωφυσική έρευνα για να χρησιμοποιήσει τις πληροφορίες που λαμβάνονται από αυτή, όπως τις αλλαγές των στρωμάτων του εδάφους ή τα ειδικά χαρακτηριστικά της θάλασσας. Η γεωτεχνική έρευνα περιλαμβάνει τόσο επιτόπου όσο και εργαστηριακές δοκιμές, ενώ χαρακτηρίζει τις ιδιότητες του εδάφους σε πέντε συνιστώσες:

- μακροσκοπικά (π.χ., ιστορικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά),
- μηχανικές (π.χ. αντοχή και επιτόπου συνθήκες πίεσης),
- μικροσκοπικά (π.χ., μέγεθος σωματιδίων, στρογγυλότητα και σχήμα),
- χημικές (π.χ μοριακή δομή) και
- ιδιότητες του περιεχομένου ύδατος.

Η γεωτεχνική έρευνα ξεκινά με επιτόπου δοκιμές για τον καθορισμό της στρωματογραφίας της περιοχής ενδιαφέροντος, η οποία τυπικά πραγματοποιείται με τη δοκιμή στατικής πενετρομέτρησης (CPT). Στη συνέχεια, εφόσον θα έχει αξιολογηθεί η στρωματογραφία, με βάση αυτή, θα πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη των υπόλοιπων επιτόπου δοκιμών, της δειγματοληψίας και του προγράμματος των εργαστηριακών δοκιμών.

Το βάθος και η εναέρια έκταση της γεωτεχνικής έρευνας της περιοχής βασίζονται σε διάφορους παράγοντες, όπως η τοπική γεωλογία, η διαθεσιμότητα προηγούμενων ερευνών, η προσπελασιμότητα της περιοχής, η μεταβλητότητα του εδάφους, η δομική διαμόρφωση των θεμελίων, τα αναμενόμενα περιβαλλοντικά φορτία και οι περιορισμοί που σχετίζονται με τον χρόνο και τον προϋπολογισμό. Το βάθος εξαρτάται κυρίως από την παρουσία ασθενών υποκείμενων στρωμάτων που μπορεί να επηρεάσουν τη

συμπεριφορά της θεμελίωσης. Για τον περιορισμό της έκτασης της γεωτεχνικής έρευνας, με το βάθος, έχουν θεσπιστεί γενικοί κανόνες για τυπικούς τύπους θεμελίων:

- Για τα θεμέλια πασσάλων, η γεώτρηση και οι επιτόπου δοκιμές πρέπει γενικά να εκτείνονται σε τουλάχιστον μία διάμετρο πασσάλου κάτω από τη βάση του πασσάλου.
- Για τα θεμέλια βαρύτητας, η διάτρηση και οι επιτόπου δοκιμές πρέπει να εκτείνονται σε βάθος ίσο τουλάχιστον με τη μεγαλύτερη οριζόντια διάσταση της θεμελίωσης.
- Για κατασκευές μονής ανεμογεννήτριας, συνιστάται η διάτρηση επαρκούς βάθους για ανάκτηση δείγματος (DNV-OS-J101 2004).
- Για τα αιολικά πάρκα (πολλές ανεμογεννήτριες), το πρόγραμμα έρευνας θα πρέπει να περιλαμβάνει συνδυασμένες τεχνικές (π.χ. μία διάτρηση σε κάθε γωνία και στο κέντρο του πάρκου σε συνδυασμό με μια δοκιμή CPT σε κάθε θέση θεμελίωσης).

Η γεωτεχνική έρευνα θα πρέπει να παρακολουθείται από έναν γεωτεχνικό μηχανικό, ώστε να επιτρέπονται προσαρμογές του προγράμματος σε περίπτωση ανομοιογένειας του εδάφους, ή παρουσίας προβληματικών εδαφών, ή τροποποιήσεις στη δεύτερη φάση των δοκιμών, εάν χρησιμοποιείται ένα πολυφασικό πρόγραμμα έρευνας.

Για την επίτευξη ποιοτικών επιτόπου δοκιμών και δοκιμών δειγματοληψίας, απαιτείται ποικιλία του εξοπλισμού και των τεχνικών που χρησιμοποιούνται στις υπεράκτιες έρευνες .

Οι επιτόπιες έρευνες μπορούν να διεξαχθούν από διάφορους τύπους σκαφών, η επιλογή των οποίων ελέγχεται από θαλάσσιες συνθήκες (π.χ. βάθος νερού, κατάσταση της θάλασσας, συνθήκες αγκύρωσης), το προγραμματισμένο πρόγραμμα έρευνας και τη

διαθεσιμότητα και το κόστος του εξοπλισμού (Watson, 2000). Η ανάπτυξη και η χρήση του σκάφους μπορεί να είναι δαπανηρή και συνήθως αποτελεί το μεγαλύτερο στοιχείο του κόστους διερεύνησης. Οι επιλογές ομαδοποιούνται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες (Randolph & Kenkhuis, 2001):

- Σε ύδατα με βάθος μικρότερο από 20 m, όπου χρησιμοποιείται συνήθως ένα σκάφος υποστήριξης ή μια φορηγίδα με χαμηλό βύθισμα (low-draft barge), χρησιμοποιώντας συνήθως δύτες .
- Σε ύδατα μεγαλύτερα των 20 m, όπου χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα σκάφη (Randolph & Kenkhuis, 2001): γεώτρησης. Είναι τα πλέον ιδανικά για την παραγωγή αποτελεσμάτων υψηλής ποιότητας. Ωστόσο το κόστος τους είναι υψηλό, έχουν περιορισμένη αντοχή και περιορισμένη παροχή γλυκού νερού, γεγονός που μειώνει την επιλογή των υγρών διάτρησης σε τύπους συμβατοί με το θαλασσινό νερό. Τα περισσότερα από αυτά τα σκάφη είναι αυτοαγκυροβολημένα.
- πλατφόρμες (jack up rigs) αν το βάθος του νερού είναι μεγαλύτερο από 20 m και μικρότερο από 80 m. Οι πλατφόρμες αυτές παρέχουν μια σταθερή πλατφόρμα εργασίας, ωστόσο είναι ακριβές, απαιτούν σημαντική υποστήριξη και δεν ενδείκνυνται για εργασίες πολλαπλών γεωτρήσεων καθώς η μεταφορά και η εναπόθεση του εξοπλισμού είναι χρονοβόρες. Εφαρμόζονται κυρίως στις πετρελαϊκές δραστηριότητες ενώ είναι ακατάλληλες για γεωτεχνική έρευνα, εκτός αν παρέχουν τον κατάλληλο εξοπλισμό για τη γεώτρηση του εδάφους.
- Σε όλα τα βάθη μπορεί να εφαρμοστεί συνήθως η ανάπτυξη απομακρυσμένου εξοπλισμού από τα πλοία υποστήριξης.

Ανάλογα με τον τύπο του σκάφους που χρησιμοποιείται, η αγκύρωση μπορεί να είναι απαραίτητη, ενώ περιορίζεται σε βάθη μικρότερα των 200 m, αλλιώς χρησιμοποιούνται δυναμικά τοποθετημένα σκάφη.

Γεώτρηση

Η διαδικασία γεώτρησης πρέπει να διεξάγεται με στόχο την ελαχιστοποίηση της διαταραχής του δείγματος. Μπορεί να συμβάλει στη γνώση της κατάστασης της περιοχής, καθώς ορισμένες από τις παραμέτρους γεώτρησης δίνουν μια γενική ιδέα για τις συνθήκες του εδάφους. Σε ορισμένους τύπους εδάφους, όπως μαλακά πετρώματα ή σκληρές αργίλους, η περιστροφική διάνοιξη πυρήνων μπορεί να είναι η καλύτερη επιλογή. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι γεώτρησης με περιστροφικό πυρήνα είναι η Christensen coring και η High speed diamond coring. Η διαδικασία γεώτρησης και διάτρησης πυρήνων διαφέρει μεταξύ των διαφόρων τύπων σκαφών που χρησιμοποιούνται.

Στην περίπτωση των φορτηγίδων (barge), οι υποθαλάσσιες μέθοδοι (π.χ. δύτες που διεξάγουν τη δοκιμή) έχουν αρκετούς περιορισμούς, συμπεριλαμβανομένης της πραγματοποίησης των εργασιών μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας (που φέγγει ο ήλιος), δύτες που έχουν μικρή γεωτεχνική εμπειρία γεώτρησης, μικρούς χρόνους βάθους, ρηγά βάθη γεώτρησης (π.χ. < 4 m) και τα υγρά διάτρησης περιορίζονται στο θαλάσσιο νερό λόγω των απαιτήσεων ορατότητας για τους δύτες. Η επικοινωνία βίντεο και ήχου επιτρέπει στον γεωτεχνικό επιβλέποντα, ο οποίος βρίσκεται πάνω στη φορτηγίδα, να κατευθύνει τη δραστηριότητα. Ωστόσο, η πλήρης επίβλεψη είναι ασυνήθιστη, καθώς και η ευθύνη τους να καταγραφούν και να συσκευαστούν τα δείγματα.

Στις πλατφόρμες (jack up), οι εργασίες γεώτρησης μπορούν να κινητοποιηθούν από τους γεωτεχνικούς μηχανικούς ή άλλους έμπειρους τεχνίτες. Αυτή η τεχνική παράγει συνήθως τα υψηλότερα ποιοτικά αποτελέσματα υπό την προϋπόθεση ότι είναι διαθέσιμος όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός έρευνας. Είναι δυνατή η επιλογή υγρών γεώτρησης μέσω της άφθονης παροχής γλυκού νερού και οι εργασίες μπορούν να πραγματοποιούνται 24 ώρες την ημέρα.

Δειγματοληψία

Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τύποι δοκιμών, δειγματοληψίας και μεθόδων πυρήνα:

- Το σύστημα wheeldrive, το οποίο χρησιμοποιεί ένα βαρύ σκελετό για την παροχή αντίδρασης ώθησης, οδηγώντας τη ράβδο στο θαλασσινό νερό

χρησιμοποιώντας υδραυλικούς κινητήρες τοποθετημένους σε σειρά πάνω στο σκελετό. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη δοκιμή CPT, τη δοκιμή T-bar και τη δοκιμή διάτμησης πτερυγίων.

- Η δειγματοληψία grab, η οποία χρησιμοποιείται για τη συλλογή μεγάλων όγκων εδάφους για σκοπούς ταξινόμησης. Η δυνατότητα εφαρμογής του είναι κατάλληλη για έρευνες αγωγών όπου η τριβή και η διάβρωση μπορούν να εκτιμηθούν για μεγάλα μήκη του θαλασσινού νερού σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Ο δειγματολήπτης είναι ουσιαστικά ένας αρθρωτός κάδος που κυμαίνεται από λίγα λίτρα έως ένα κυβικό μέτρο που κλείνει κατά την επαφή με το θαλασσινό νερό. Η μέθοδος είναι απλή και φθηνή, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν άλλες συσκευές δεν μπορούν να εισχωρήσουν επαρκώς στο θαλασσινό νερό λόγω σκληρότερων επιφανειακών υλικών. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το υψηλό επίπεδο διαταραχής του δείγματος, ο κίνδυνος έκπλυσης κατά την ανάκτηση και το μικρό βάθος διεϊσδυσης.
- Η δειγματοληψία push and piston, για την οποία θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σωλήνες με λεπτό τοίχωμα (δηλ. <2 mm με διάμετρο \approx 75 mm) όπου είναι δυνατόν για ελαχιστοποίηση της διαταραχής του εδάφους. Σε ιδιαίτερα ευαίσθητα εδάφη όπως μαλακές αργίλους, πρέπει να χρησιμοποιούνται ρηχές γωνίες κοπής (δηλαδή 5 μοίρες) στη βάση του δειγματολήπτη (Norsok, 2004).
- Η δειγματοληψία περιστροφικού πυρήνα. Εδώ περιλαμβάνονται διάφορες τεχνικές, όπως το σύστημα τηλεχειρισμού το οποίο είναι μια αυτόνομη μονάδα γεώτρησης που λειτουργεί υδραυλικά από ένα σύστημα ελέγχου στο κατάστρωμα. Η δειγματοληψία πραγματοποιείται μέσω παρακολούθησης βίντεο, σε πραγματικό χρόνο. Το υγρό της γεώτρησης αποτελείται από

θαλασσινό νερό και το μέγιστο βάθος διάτρησης είναι περίπου 5 m. Είναι ιδανική για έρευνες αγωγών στις οποίες πρέπει να λαμβάνονται πολλές γεωτρήσεις. Άλλη μια τεχνική είναι η δόνηση πυρήνα η οποία χρησιμοποιείται όταν τα αμμώδη εδάφη είναι διαδεδομένα και η αντίσταση στη διείσδυση του θαλάσσιου νερού μπορεί να είναι πολύ υψηλή για την εισαγωγή του ίδιου βάρους του εμβόλου του πυρήνα. Δεδομένου ότι το δείγμα θεωρείται εξαιρετικά διαταραγμένο, λόγω των δονήσεων, η χρήση τους είναι τυπικά μόνο για σκοπούς ταξινόμησης. Τα βάθη των υδάτων που είναι κατάλληλα για τη μέθοδο αυτή είναι γενικά λιγότερο από 800 m. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι είναι απλή, έχει λίγο βάρος και φθινή ανάπτυξη. Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την έλλειψη δυνατότητας διείσδυσης σε πυκνή άμμο ή σκληρή άργιλο, έλλειψη ακριβούς ταυτοποίησης της διαστρωμάτωσης λόγω συμπίκνωσης, υψηλή διαταραχή που εφαρμόζεται στο έδαφος. Η τρίτη μέθοδος είναι ο πυρήνας βαρύτητας, ο οποίος χρησιμοποιείται συνήθως σε μαλακά εδάφη. Η αρχή της συσκευής είναι να χρησιμοποιεί τη δύναμη της βαρύτητας κατά τη διάρκεια των τελευταίων 5 έως 10 μέτρων ανάπτυξης για να επιτρέψει στον πυρήνα να διεισδύσει στο θαλασσινό νερό υπό το δικό του βάρος. Μπορούν να ληφθούν ποιοτικά δείγματα για βάθη μέχρι 20 μέτρα κάτω από τη θάλασσα. Η μέθοδος είναι φθινή, γρήγορη και εύκολη στη διεξαγωγή. Τα μειονεκτήματα με τον πυρήνα βαρύτητας περιλαμβάνουν την έλλειψη διείσδυσης σε πυκνές άμμους και δύσκαμπτες αργίλους, καθώς και ο κίνδυνος ή η δυσκολία χειρισμού του μηχανισμού απελευθέρωσης του πυρήνα. Η επόμενη μέθοδος είναι η μέθοδος box corer, που χρησιμοποιείται για την απόκτηση ενός αδιατάρακτου μπλοκ από άργιλο, το οποίο αργότερα μπορεί να τεμαχιστεί σε πολλά δείγματα, για εργαστηριακές δοκιμές. Η μέθοδος είναι

κατάλληλη κυρίως για μαλακές αργίλους και μπορεί να ανακτήσει δείγματα μεγέθους 10 έως 50 λίτρων, ενώ το κύριο μειονέκτημα είναι το περιορισμένο βάθος διείσδυσης της συσκευής. Τέλος, η μέθοδος του πυρήνα βράχου είναι μια συσκευή τοποθετημένη σε θαλασσινό νερό, η οποία μπορεί να αποκτήσει δείγματα βράχου μήκους 3 έως 9 μέτρων. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η έλλειψη ικανότητας λήψης πυρήνων υψηλής ποιότητας. Ακόμα, η έλλειψη σταθερότητας της γεώτρησης στα κοκκώδη εδάφη, το μέγεθος και το βάρος του εξοπλισμού.

Εντός αυτών των τεσσάρων κατηγοριών είναι οι τύποι εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν, με σειρά προτεραιότητας:

- 1) Αρχικά, ο δειγματολήπτης λεπτού τοιχώματος εμβόλου (thin-walled piston sampler)
- 2) έπειτα, ο δειγματολήπτης πίεσεως με λεπτό τοίχωμα (thin-walled push sampler),
- 3) ο δειγματολήπτης με παχύ τοίχωμα (thick-walled push sampler)
- 4) ο δειγματολήπτης σφύρας (hammer sampler) και τέλος
- 5) ο δειγματολήπτης περιστροφικού πυρήνα (rotary core sampler)

Οι τεχνικές και οι τύποι εξοπλισμού θα πρέπει να επιλέγονται λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο του εδάφους, τον τύπο της δοκιμής στον οποίο θα υποβληθούν τα δείγματα και την ελαχιστοποίηση της διαταραχής του δείγματος τόσο κατά τη διείσδυση της συσκευής όσο και κατά την εξαγωγή του δείγματος στην επιφάνεια.

Η δειγματοληψία μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μία από τις δύο κύριες μεθόδους: τη λειτουργία θαλάσσης (seafloor mode), όπου η δειγματοληψία εκτελείται από το θαλασσινό νερό χρησιμοποιώντας ένα πλαίσιο αντίδρασης με γεώτρηση και τη λειτουργία γεώτρησης, όπου η δειγματοληψία εκτελείται μέσω ενός τρυπανιού στο

κάτω μέρος του γεωτρύπανου. Κατά τη μέθοδο seafloor mode είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί ένα καλώδιο για την αποστολή δεδομένων στην επιφάνεια σε πραγματικό χρόνο και υδραυλικών σωλήνων για την εκτέλεση της δοκιμής. Η τεχνική επιτρέπει την πραγματοποίηση εναλλακτικών δειγματοληψιών και δοκιμών σε μία γεώτρηση. Το μήκος του ληφθέντος δείγματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που περιλαμβάνουν τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του δειγματολήπτη, τον τύπο του εδάφους και τον τύπο της εφαρμοζόμενης δύναμης (π.χ. ώθηση, δόνηση, σφύρα).

Η ταχύτητα της διαδικασίας δειγματοληψίας και του ποσοστού διείσδυσης εξαρτάται από τη φάση της έρευνας. Για τη γεωτεχνική φάση, ο βαθμός διείσδυσης του εξοπλισμού δειγματοληψίας θα είναι προσαρμοσμένος ώστε να επιτυγχάνεται η υψηλότερη ποιότητα δείγματος για μετέπειτα εργαστηριακές δοκιμές, ενώ κατά τη διάρκεια της γεωλογικής φάσης η διείσδυση δειγματοληψίας μπορεί να είναι ταχύτερη για να καλύψει όσο το δυνατόν περισσότερη περιοχή για τον προσδιορισμό της στρωματογραφίας. Οποιοσδήποτε διαταραχή πρέπει να αποφεύγεται, εκτός εάν τα δείγματα ανακτώνται μόνο για λόγους ταξινόμησης. Η ανάκτηση του δείγματος στο κατάστρωμα/στην επιφάνεια πρέπει επίσης να διεξάγεται κατά τρόπο που ελαχιστοποιεί τη διαταραχή του δείγματος.

Οι πυρήνες που έχουν αφαιρεθεί από τη συσκευή δειγματοληψίας πρέπει να φωτογραφηθούν κατά την εξαγωγή και να καταγραφούν ως προς το χρώμα, την υφή, την οσμή και τα χαρακτηριστικά υγρασίας. Αυτό πρέπει να γίνεται αμέσως μετά την αφαίρεση καθώς η εμφάνιση των υλικών μπορεί να αλλάξει γρήγορα όταν εκτίθεται στον αέρα.

Όλα τα δείγματα που αποθηκεύονται πρέπει να τοποθετούνται σε μια περιοχή με σταθερή θερμοκρασία (π.χ. 7 ° C σε εργαστήριο στην ξηρά) και υγρασία, μακριά από

χώρους όπου ενδέχεται να εμφανιστούν υπερβολικές δονήσεις ή μεταφορά θερμότητας. Τα δείγματα δεν πρέπει ποτέ να εκτίθενται σε θερμοκρασίες πάγου, καθώς ο πάγος σχηματίζεται στη θέση του νερού που προκαλεί διόγκωση και αλλάζει τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του εδάφους. Η μεταφορά των δειγμάτων θα πρέπει να γίνεται με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διαταραχές σε αυτά. Επίσης πρέπει να αποθηκεύονται και να μεταφέρονται με τον ίδιο προσανατολισμό από τον οποίο έχουν ανακτηθεί. Οριζόντια αποθήκευση και μεταφορά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σκληρά ή άκαμπτα εδάφη.

Επιτόπου δοκιμές

Οι επιτόπου δοκιμές περιλαμβάνουν δοκιμές στατικής πενετρομέτρησης (CPT), δοκιμές πτερυγίων και διάφορες τεχνικές γεωφυσικής έρευνας, όπως σεισμικές δοκιμές downhole. Οι επιτόπου δοκιμές διεξάγεται χρησιμοποιώντας μία από τις δύο μεθόδους, παρόμοιες με τις μεθόδους δειγματοληψίας, δηλαδή τη λειτουργία θαλάσσης (seafloor mode) και τη λειτουργία γεώτρησης. Και στις δύο μεθόδους, το εργαλείο εισάγεται επιτόπου στα εδάφη του θαλάσσιου βυθού, σε προκαθορισμένο βάθος ή έως ότου επιτευχθεί άρνηση. Μπορούν να τοποθετηθούν βιντεοκάμερες στο γεωτρήπανο για να παρακολουθήσουν τη δοκιμή και να επαληθεύσουν ότι αυτές οι συνθήκες είναι βέλτιστες.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρόποι πραγματοποίησης των επιτόπου δοκιμών:

- Η δοκιμή CPT μπορεί να παρέχει εκτιμήσεις της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό αβεβαιότητας, που μπορεί να είναι αρκετά υψηλός. Οι παράμετροι που μπορούν να εξαχθούν από τη δοκιμή περιλαμβάνουν τον τύπο εδάφους, τη σχετική πυκνότητα και το ιστορικό τάσης χρησιμοποιώντας εμπειρικές συσχετίσεις. Το πλεονέκτημα της CPT έναντι των

μεθόδων πυρήνων (coiring methods) περιλαμβάνει μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης, συνεχή μέτρηση της στρωματογραφίας, απόκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, μείωση της ποσότητας εργαστηριακών δοκιμών που τυπικά απαιτείται για τα δείγματα, αξιοπιστία σχετικού προσδιορισμού πυκνότητας για κοκκώδη εδάφη και ταχύτητα δοκιμών. Το κύριο μειονέκτημα της δοκιμής είναι η έλλειψη ανάκτησης ενός δείγματος εδάφους, το οποίο είναι απαραίτητο για να εξακριβωθεί ότι οι εμπειρικές συσχετίσεις που χρησιμοποιούνται ισχύουν για τον συγκεκριμένο τύπο εδάφους. Το βάρος του εξοπλισμού που απαιτείται για τη δύναμη αντίδρασης είναι συνήθως υψηλό, κυμαινόμενο από 5 έως 10 τόνους, και η απαιτούμενη πείρα για την ορθή διεξαγωγή και ερμηνεία της δοκιμής είναι άλλα μειονεκτήματα της CPT. Η διαδικασία δοκιμής θα πρέπει να διεξάγεται με ταχύτητα διείσδυσης 2 cm / s όσο το δυνατόν συνεχή, ανάλογα με τους περιορισμούς του εξοπλισμού. Η ακρίβεια των μετρήσεων βασίζεται στον τύπο εδάφους, την απόσταση μεταξύ των μετρήσεων και τον απαιτούμενο βαθμό ακρίβειας που απαιτείται.

Η δοκιμή CPT μπορεί να διεξάγει και σεισμικά δεδομένα για να μετρηθεί η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων (για τον υπολογισμό του συντελεστή διάτμησης του εδάφους). Το βάθος διείσδυσης των διατμητικών κυμάτων θα πρέπει να φθάνει τα 80 μέτρα κάτω από το θαλασσινό έδαφος υπό ευνοϊκές συνθήκες. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους μπορεί επίσης να μετρηθεί κατά τη διάρκεια της CPT χρησιμοποιώντας δύο ηλεκτρόδια τοποθετημένα στο πενετρόμετρο.

- Η δοκιμή T-bar είναι μια πρόσφατα ανεπτυγμένη συσκευή, παρόμοια με το κωνικό πενετρόμετρο, που παρέχει ένα ακριβέστερο μέσο εκτίμησης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στις μαλακές αργίλους. Η ράβδος T είναι

τοποθετημένη στη βάση του πενετρομέτρου για να χρησιμοποιήσει το κελί φόρτισης, για να μετρήσει την αντίσταση T-bar. Δεν υπάρχει τρέχουσα τυποποιημένη διαδικασία λειτουργίας για τη διεξαγωγή της δοκιμής T-bar. Εντούτοις, το Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο και το Κέντρο για συστήματα ανοικτής θάλασσας στην Αυστραλία συνιστούν να μετράται η αντίσταση T-bar κατά τη διείσδυση και την εξαγωγή με ρυθμό παρόμοιο με τον CPT.

- Η δοκιμή πτερυγίου διεξάγεται με έναν ανιχνευτή σταυροειδούς μορφής που ωθείται σε παρθένο έδαφος τουλάχιστον 0,5 m πριν από τη συσκευή δειγματοληψίας και περιστρέφεται για να μετρήσει την μέγιστη και τις παραμένουσες διατμητικές αντοχές του εδάφους. Η ταχύτητα και ο αριθμός των περιστροφών, η κατεύθυνση περιστροφής και το μέγεθος του πτερυγίου μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να ταιριάζουν με τον τύπο εδάφους που δοκιμάζεται και τον επιθυμητό τύπο αντοχής (δηλ. Στραγγισμένο ή αστράγγιστο). Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή θεωρείται ότι είναι ακριβέστερη από τις μετρήσεις της CPT σε μαλακά εδάφη αργίλου έως τα βάθη διείσδυσης 3 m κάτω από το θαλασσινό νερό. Το κύριο μειονέκτημα είναι η αργή ταχύτητα λειτουργίας και η περιορισμένη εφαρμογή του σε άλλους τύπους εδάφους.
- Άλλες επιτόπιες δοκιμές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένες περιπτώσεις περιλαμβάνουν δοκιμασία μετρητή πίεσης, δοκιμές υδραυλικού θραύσματος, δοκιμές οιδιμέτρου, δοκιμές διαπερατότητας, δοκιμές πυκνότητας, δοκιμές μοντέλων πασσάλων, σεισμοακουστικές τεχνικές, δοκιμές φόρτισης πλάκας και αξιολόγηση εκσκαφής αγωγών. Το βασικό πλεονέκτημα για τη χρήση ορισμένων δοκιμών μοντέλων είναι η δυνατότητα να μοντελοποιηθεί άμεσα η προβλεπόμενη συμπεριφορά των θεμελίων. Τα

μειονεκτήματα περιλαμβάνουν το μέγεθος και το κόστος των δοκιμών μεγάλης κλίμακας και το περιορισμένο εύρος των παραμέτρων στόχων τους.

Εργαστηριακές δοκιμές

Οι εργαστηριακές δοκιμές της έρευνας της υπεράκτιας περιοχής μελέτης παρέχουν την πλειονότητα των γεωτεχνικών δεδομένων για το έδαφος. Οι δοκιμές αυτές διαχωρίζεται σε δύο φάσεις: το πρόγραμμα των υπεράκτιων δοκιμών και το πρόγραμμα δοκιμών στην ξηρά.

Το πρόγραμμα των υπεράκτιων δοκιμών αποτελείται από δοκιμές κατάταξης, μετά από την εξαγωγή του δείγματος από τη συσκευή δειγματοληψίας, και δοκιμές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για τα συνεκτικά εδάφη. Προσδιορίζονται επίσης οι υγρές και ξηρές πυκνότητες του εδάφους και η περιεκτικότητα σε νερό, καθώς και ο προσδιορισμός της διαταραχής του δείγματος. Στη συνέχεια, επιλέγονται τμήματα του δείγματος και στη συνέχεια σφραγίζονται με κερί και αποθηκεύονται σε περιβάλλον όπου ελέγχεται η υγρασία και η θερμοκρασία για περαιτέρω εργαστηριακές δοκιμές στην ξηρά.

Η έκταση των εργαστηριακών δοκιμών στην ξηρά συνδέεται με τα αποτελέσματα των επιτόπου δοκιμών και με την ταξινόμηση του εδάφους. Επομένως, εξαρτάται από το βαθμό ομοιογένειας του εδάφους, την πιθανή στρωματοποίηση, την παρουσία κρίσιμων και αδύναμων στρωμάτων εδάφους και τη στρατηγική σχεδιασμού. Θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις από τα λεπτά προβληματικά στρώματα των οποίων η θέση σε σχέση με το θεμέλιο είναι δυσμενής. Πολλές από αυτές τις πληροφορίες βασίζονται στη γεωφυσική έρευνα και τα αποτελέσματα των επιτόπου δοκιμών.

Το εργαστηριακό πρόγραμμα πρέπει επίσης να συνυπολογίζει τις πραγματικές συνθήκες τάσης στο έδαφος. Η διάρκεια της πραγματοποίησης των εργαστηριακών δοκιμών μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις προαναφερθείσες εκτιμήσεις, ωστόσο τυπικές διάρκειες κυμαίνονται από 3 εβδομάδες έως 3 μήνες (Randolph & Kenkhuis, 2001).

Μετά την ολοκλήρωση αυτής της φάσης, τα αποτελέσματα θα πρέπει να ενσωματωθούν με τα αποτελέσματα των επιτόπου δοκιμών, ώστε να παρασχεθεί στην ομάδα σχεδιασμού μια περιεκτική γεωτεχνική βάση σχεδιασμού για να αρχίσει η ανάλυση των επιλογών θεμελίωσης. Μετά την οριστικοποίηση ενός σχεδίου θεμελίωσης και την έναρξη της κατασκευής, η επαλήθευση της βάσης σχεδιασμού πρέπει να πραγματοποιείται μέσω της παρακολούθησης των δραστηριοτήτων εγκατάστασης των θεμελίων. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει, χωρίς να περιορίζεται σε αυτό, τις μετρήσεις της πίεσης αναρρόφησης κατά τη διείδυση του θεμελίου για την επαλήθευση της ικανότητας ανύψωσης, τις μετρήσεις πρωτογενών και δευτερογενών μετακινήσεων κατά τη διάρκεια και μετά την εγκατάσταση του θεμελίου βαρύτητας και την εγκατάσταση γεωτεχνικών οργάνων για μακροπρόθεσμη επαλήθευση της απόδοσης.

Ταξινόμηση εδαφών

Η περιγραφή και η ταξινόμηση του εδάφους πρέπει να βασίζεται σε ένα καθιερωμένο σύστημα ταξινόμησης (π.χ. Unified Soil Classification System) και να περιλαμβάνει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: τύπο εδάφους, δευτερεύοντα συστατικά του εδάφους σημαντικά για τις ιδιότητες του εδάφους, αντοχή αργίλου ή σχετική πυκνότητα και ταξινόμηση άμμου, τη δομή και την υφή του εδάφους, το χρώμα και την οσμή του

εδάφους, τις φωτογραφίες κάθε ευδιάκριτου στρώματος και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως η παρουσία τσιμέντου ή ανθρακικού ασβεστίου.

Η περιεκτικότητα σε νερό πρέπει να λαμβάνεται για τυχόν δείγματα τα οποία στη συνέχεια θα δοκιμάζονται περαιτέρω. Θα πρέπει να λαμβάνεται τόσο πριν όσο και μετά την προηγμένη δοκιμή και θα πρέπει να περιλαμβάνει μια σειρά συνεχών μετρήσεων για την κατασκευή ενός προφίλ περιεκτικότητας σε νερό, της υπόγειας επιφάνειας. Το όριο υδαρότητας W_L και το όριο πλαστικότητας, W_P , θα πρέπει να λαμβάνεται με βάση τις τυποποιημένες διαδικασίες για τα όρια Atterberg. Η μέθοδος πρέπει να υποδεικνύει εάν το έδαφος έχει αποξηρανθεί πριν από τη δοκιμή και εάν το χονδρόκοκκο υλικό απομακρύνθηκε από το έδαφος.

Άλλες παράμετροι που πρέπει να συμπεριληφθούν σε αυτή τη φάση είναι η πυκνότητα του εδάφους, η ειδική βαρύτητα του εδάφους, η μέγιστη και η ελάχιστη πυκνότητα (για τα μη συνεκτικά εδάφη), η κατανομή μεγέθους κόκκων, η γωνιότητα των κόκκων της άμμου και η ραδιογραφία του εδάφους για τον προσδιορισμό της ποιότητας των δειγμάτων.

Δοκιμή δεικτών

Ο έλεγχος δεικτών πραγματοποιείται σε δείγματα συνεκτικού εδάφους για να εκτιμηθεί η αστράγγιστη διατμητική αντοχή τους. Οι τύποι των δοκιμών αυτών περιλαμβάνουν δοκιμές πτώσης κώνου, όπου μετριέται το βάθος διείσδυσης ενός μικρού κωνικού οργάνου, δοκιμές πενετρομέτρου «τσέπης», όπου μετράται η δύναμη να διεισδύει μια χαλύβδινη ράβδος στο δείγμα, δοκιμές Torvane και δοκιμές μικροσκοπικών πτερυγίων, στις οποίες μετριέται η ροπή που απαιτείται για την περιστροφή ενός κυλίνδρου με πτερύγια ενσωματωμένου στο δείγμα, δοκιμές ανεμπόδιστη θλιψης (UCT), στις οποίες

μετριέται η κατακόρυφη δύναμη που αποτυγχάνει σε κύλινδρο εδάφους και τριαξονικές δοκιμές (UU), στις οποίες το δείγμα περιορίζεται στην επί τόπου τάσης για 10 λεπτά πριν υποβληθεί σε κατακόρυφη δύναμη. Ακόμα, κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, χρησιμοποιώντας μία από τις προαναφερθείσες δοκιμές δείκτη ή χρησιμοποιώντας μια συσκευή διάτμησης δακτυλίου, θα πρέπει να μετριέται η αναδιαμορφωμένη αντοχή και η ευαισθησία των συνεκτικών εδαφών. Η ευαισθησία, S_t , είναι η αναλογία της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του αδιατάρακτου εδάφους προς εκείνη του αναδιαμορφωμένου εδάφους. Τεχνητά χαμηλές ευαισθησίες μπορεί να προκύψουν από υπερβολική διαταραχή του δείγματος και θα πρέπει να θεωρούνται ως τέτοιες κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Δοκιμή στερεοποίησης

Η δοκιμή για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των λεπτόκοκκων εδαφών είναι κατά κύριο λόγο η δοκιμασία οιδιμέτρου, στην οποία ο αριθμός των δοκιμών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 2 ανά στρώμα εδάφους (DNV-OS-J101 2004). Τα αποτελέσματα από εργαστηριακές και επιτόπιες δοκιμές πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την εγγενή αβεβαιότητα και τις διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των διαφόρων μεθόδων δοκιμών.

Η επιλογή του τύπου της δοκιμής στερεοποίησης θα πρέπει να βασίζεται στο ιστορικό καταπόνησης του εδάφους και στο επιθυμητό πρόγραμμα φόρτισης. Οι δύο κύριοι τύποι δοκιμών είναι η δοκιμή αυξητικού φορτίου και η δοκιμή συνεχούς φόρτισης (π.χ. δοκιμή CRS). Η δοκιμή αυξητικού φορτίου διεξάγεται με διπλασιασμό του εφαρμοζόμενου φορτίου σε κάθε αύξηση, επιτρέποντας στο δοκίμιο να φτάσει στην πρωταρχική στερεοποίηση σε κάθε βήμα φόρτισης σύμφωνα με τη μέθοδο του Taylor. Η δοκιμή CRS συμπιέζει το δοκίμιο σε σταθερό ρυθμό κατακόρυφης καταπόνησης που

κυμαίνεται από 0,2% έως 5% ανά ώρα για ένα δείγμα μονής στράγγισης των 20 mm. Η πίεση του νερού των πόρων μετράται από το κάτω μέρος του δείγματος και η στράγγιση πρέπει να επιτρέπεται στην κορυφή. Ο ρυθμός καταπόνησης θα πρέπει να αντιστοιχεί στον περιορισμό της πίεσης του νερού των πόρων σε λιγότερο από 10% του συνολικού κατακόρυφου φορτίου. Οι οριζόντιες καταπονήσεις θα πρέπει επίσης να μετρηθούν κατά τη διάρκεια της δοκιμής για να ληφθεί ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων, K_0 .

Η διαπερατότητα του εδάφους θα πρέπει να μετριέται με τη χρήση δοκιμών διαπερατότητας σταθερής κεφαλής υπό συνεχή τάση, όπου η πίεση του νερού των πόρων θα πρέπει πάντοτε να αυξάνεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής, και πάλι να περιορίζεται σε λιγότερο από 10% του συνολικού κατακόρυφου φορτίου. Η δοκιμή θα πρέπει να συνεχιστεί μέχρις ότου επιτευχθούν συνθήκες σταθερής κατάστασης.

Δοκιμή αντοχής

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι δοκιμών που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων αντοχής. Χρησιμοποιούνται δοκιμές άμεσης διάτμησης (DSS) και τριαξονικές δοκιμές (TX) για άμμους και κανονικά στερεοποιημένες αργίλους, ενώ κυκλικές δοκιμές DSS και TX χρησιμοποιούνται για εδάφη ευαίσθητα στην κυκλική φόρτωση (π.χ. χαλαρή άμμο και υπερστερεοποιημένη άργιλο).

Οι δοκιμές διάτμησης δακτυλίου χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς μεγάλου μετατοπιζόμενου εδάφους κατά μήκος μιας διεπαφής μεταξύ του εδάφους και του δομικού στοιχείου. Για τα εδάφη τύρφης, πρέπει να χρησιμοποιούνται δοκιμές διάτμησης δακτυλίου με δείγμα χαμηλής υγρασίας (ξηρό).

Ο τυπικός αριθμός των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν πρέπει να είναι 4 έως 5 ανά

στρώμα εδάφους (DNV-OS-J101 2004). Το επιπλέον έδαφος από τους σωλήνες δειγματοληψίας χρησιμοποιείται γενικά για σκοπούς ταξινόμησης.

Οι τριαξονικές δοκιμές παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά τάσης-καταπόνησης του εδάφους. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διεξαγωγής της δοκιμής, ο τύπος της επιλεγθείσας δοκιμής εξαρτάται από την προβλεπόμενη συμπεριφορά του εδάφους στην τοποθεσία ενδιαφέροντος. Η τριαξονική δοκιμή μπορεί να διεξαχθεί υπό συνθήκες στατικού φορτίου ή υπό κυκλική φόρτιση όπου επιβάλλονται όρια ελέγχου φορτίου με συχνότητα εξαρτώμενη από το πρόβλημα ενδιαφέροντος.

Οι δοκιμές άμεσης διάτμησης παρέχουν χαρακτηριστικά συμπεριφοράς τάσεως-καταπόνησης και αντοχής διατμήσεως για το έδαφος κατά μήκος ενός επιβαλλόμενου επιπέδου αστοχίας. Οι φάσεις προετοιμασίας και σταθεροποίησης των δειγμάτων της δοκιμής είναι παρόμοιες με τις τριαξονικές δοκιμές, ωστόσο επιτρέπεται μόνο μία μονοδιάστατη ογκομετρική αλλαγή στην κατακόρυφη διεύθυνση. Μπορεί να πραγματοποιηθεί στατική ή κυκλική φόρτιση, με ρυθμούς μετατόπισης που κυμαίνονται από 1 $\mu\text{m} / \text{min}$ έως 2 mm / min , και κυκλικές συχνότητες φορτίσεως κυμαινόμενες από 0.01-Ηζ έως 0.5-Ηζ.

Άλλες εργαστηριακές δοκιμές που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν κατά τη γεωτεχνική έρευνα είναι οι δοκιμές στήλης συντονισμού, οι οποίες παρέχουν δυναμικά χαρακτηριστικά συμπεριφοράς εδάφους, όπως συντελεστή διάτμησης και απόσβεση του εδάφους. Η δοκιμή αυτή μπορεί να παράσχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την απόκριση του. Ακόμα, οι δοκιμές θιξοτροπίας, οι οποίες μετρούν την αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ενός αναδιαμορφωμένου δείγματος αργίλου με την πάροδο του χρόνου. Η άργιλος αναδιαμορφώνεται υπό την επί τόπου περιεκτικότητα ύδατος και δοκιμάζεται χρησιμοποιώντας τη συσκευή πτώσης κώνου, για να μετρηθεί η διατμητική αντοχή σε αυξανόμενα χρονικά διαστήματα. Η δοκιμή αυτή είναι χρήσιμη

για την πρόβλεψη των μακροχρόνιων χαρακτηριστικών εσωτερικής διατμητικής αντοχής της αργίλου που υπόκειται σε υψηλές διαταραχές κατά την εγκατάσταση της θεμελίωσης. Επίσης, οι δοκιμές θερμικής αγωγιμότητας, οι οποίες παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τα θερμικά χαρακτηριστικά ενός αδιατάρακτου ή αναδιαμορφωμένου δείγματος εδάφους. Χρησιμοποιώντας το ηλεκτρικό ρεύμα που εφαρμόζεται σε μια βελόνα που εισάγεται στο δείγμα, παράγεται μία καμπύλη χρόνου-θερμοκρασίας για την ανάλυση της θερμικής αγωγιμότητας λ. Άλλες δοκιμές που μπορούν να διεξαχθούν σε δείγματα για τη λήψη σχετικών δεδομένων περιλαμβάνουν δοκιμές πλάκας, γεωλογικές και γεωχημικές δοκιμές για τον προσδιορισμό της γεωλογικής προέλευσης και του ιζηματογενούς ιστορικού, ανόργανων ή ορυκτών αναλύσεων, ανάλυση αμινοξέων ή ισοτόπων, ανάλυση αερίων, χρονολόγηση άνθρακα, εκτίμηση οργανικής περιεκτικότητας και αξιολόγηση του δυναμικού διάβρωσης. Για την αξιολόγηση του κινδύνου διάβρωσης, οι υπεράκτιες τεχνικές περιλαμβάνουν ανάλυση σουλφιδίου, μετρήσεις αντίστασης, μετρήσεις pH, σε συνδυασμό με περιγραφή χρώματος και οσμής και ανάλυση θείου και οργανικού περιεχομένου.

Μετά την ολοκλήρωση και της γεωτεχνικής έρευνας, τα δεδομένα που προέκυψαν από τη γεωφυσική και τη γεωτεχνική έρευνα της περιοχής, συνδυάζονται για να σχηματίσουν ένα γεωτεχνικό μοντέλο της περιοχής για την ανάπτυξη των απαιτούμενων παραμέτρων σχεδιασμού.

Μετά την ολοκλήρωση της έρευνας του πεδίου και της μελέτης και εφόσον έχουν ληφθεί υπόψη τα φορτία, που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, και έχει επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος θεμελίωσης για την υπεράκτια ανεμογεννήτρια (Κεφάλαιο 3), είναι η πραγματοποίηση αριθμητικών αναλύσεων και η διεξαγωγή αποτελεσμάτων, προκειμένου να ελεγχθεί η καταλληλότητα του συγκεκριμένου τύπου θεμελίου. Οι πραγματοποίηση τέτοιου είδους αναλύσεων κρίνεται αναγκαία λόγω της

σημαντικής αλληλεπίδρασης της κατασκευής με το έδαφος και το νερό και των συνθηκών που μπορεί αυτή να δημιουργεί. Μία από τις μεθόδους για τον έλεγχο καταλληλότητας της θεμελίωσης είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται η μελέτη ενός μονοπάσσαλου υπεράκτιου θεμελίου, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

8. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΟΠΑΣΣΑΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΥΠΕΡΚΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΑΡΓΙΛΙΚΑ ΕΛΔΑΦΗ – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ (CASE STUDY)

8.1. Παραδοχές σχεδιασμού

Οι Aliasger Haiderali και Gopal Madabhushi (2012) μελέτησαν τη συμπεριφορά μονοπάσσων υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε αργιλικά εδάφη. Σε αυτή την έρευνα, διεξήχθη ανάλυση τρισδιάστατων (3D) πεπερασμένων στοιχείων για τη διερεύνηση της επίδρασης στη συμπεριφορά των μονοπάσσων σε μαλακές και στιφρές θαλάσσιες αργίλους ανάλογα τη διάμετρο των πάσσων, των αντοχών της αργίλου και τη δυσκαμψία της αργίλου. Οι συνολικές αναλύσεις τάσεων πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό ABAQUS.

Στην παραμετρική αυτή μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις (4) διαφορετικοί πάσσαλοι. Δύο (2) πάσσαλοι μικρής διαμέτρου, $D=0,61\text{m}$ και $D=2,0\text{m}$ και δύο (2) πάσσαλοι μεγάλης διαμέτρου, $D=5,0\text{m}$ και $D=7,5\text{m}$. Το ενσωματωμένο μήκος L κάθε πάσσου στο έδαφος λαμβάνεται σταθερό και ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις και ίσο με $L=35\text{m}$. Ο πάσσαλος προεξέχει $1,0\text{m}$ πάνω από τον πυθμένα για να αποτρέψει το έδαφος να πηγαίνει πάνω από τον πάσσαλο που θα παραβίαζε την οριακή κατάσταση αστοχίας (Ultimate Limit State), και θα παρήγαγε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Κάθε περίπτωση μελετήθηκε για ομογενές αργιλικό έδαφος υπό αστράγγιστη διατμητική αντοχή $c_u=25\text{kPa}$ (μαλακή άργιλος), $c_u=50\text{kPa}$ (μαλακή προς στιφρή άργιλος), $c_u=75\text{kPa}$ (στιφρή άργιλος), $c_u=100\text{kPa}$ (σκληρή άργιλος).

Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από τρία μέρη: τον χαλύβδινο πάσσαλο, το έδαφος γύρω από τον πάσσαλο και το εδαφικό (plug) βύσμα μέσα στον πάσσαλο. Ο πάσσαλος θεωρήθηκε ότι είναι πλήρως βουλωμένος/γεμισμένος λόγω της

συμπίεσης-συμπύκνωσης της αργίλου κατά τη διάρκεια της διάτρησης του πασσάλου. Αυτή είναι μια ρεαλιστική παραδοχή υποστηριζόμενη από κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού που καθορίζουν το μήκος του βύσματος του εδάφους μέσα στο μονοπάσιναλο που πρέπει να ληφθεί ως 0,9 φορές το μήκος του πασσάλου που είναι διατρημένο/ ενσωματωμένο στο έδαφος.

Ο πάσσαλος κατασκευάστηκε με τη χρήση τετραγωνισμένων διπλά κυρτωμένων γραμμικών στοιχείων κελύφους με μειωμένη ενσωμάτωση/ολοκλήρωση, κλεψύδρα ελέγχου και πεπερασμένα στελέχη μεμβράνης (4-noded double curved linear shell elements with reduced integration, hourglass control and finite membrane strains) (Πίνακας 7.1). Το έδαφος και το βύσμα κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας 8-κομβά γραμμικά στοιχεία από τούβλα (brick) με μειωμένο έλεγχο ολοκλήρωσης και κλεψύδρας.

Το υλικό του πασσάλου θεωρήθηκε ότι είναι γραμμικό ελαστικό με το Young's Modulus $E_p = 210 \text{ GPa}$, τον λόγο Poisson $\nu = 0,3$ και πυκνότητα $\rho = 7850 \text{ kg / m}^3$. Ο προσδιορισμός του πάχους t κάθε πασσάλου προσδιορίστηκε σύμφωνα με τον API 2000 από την εξίσωση:

$$t = 6.35 + \frac{D}{100} \quad (\text{Εξίσωση 7.1})$$

Όπου:

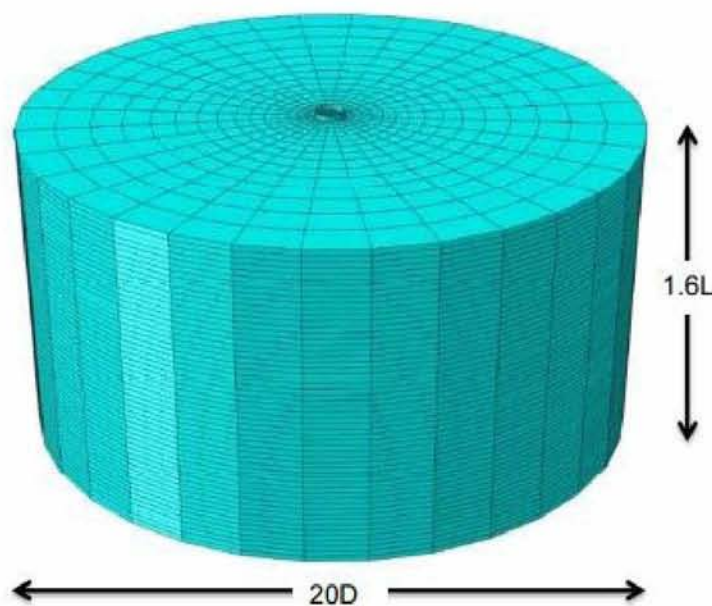
D , η διάμετρος του πασσάλου

Πίνακας 8.1 Γεωμετρία πασσάλων

Pile Diameter (m)	Total Pile Length (m)	Embedded Pile Length (m)	Pile Wall Thickness (mm)
0.61	36	35	13
2.0	36	35	27
5.0	36	35	57
7.5	36	35	82

Οι συνολικές διαστάσεις του μοντέλου περιλαμβάνουν ακτίνα $10D$ από το κέντρο των πασσάλων και ύψος ίσο με $1,6L$ (Σχήμα 7.1). Κατά τη διάρκεια δοκιμών, επιβεβαιώθηκε ότι αυτές οι διαστάσεις μοντέλου είναι επαρκείς για να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν τεχνητές οριακές επιδράσεις/επιπτώσεις στην αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους. Ο πυθμένας του εδαφικού μοντέλου πακτώθηκε (fixed) έναντι της μετακίνησης προς όλες τις κατευθύνσεις ενώ τα πλευρικά όρια σταθεροποιήθηκαν έναντι της πλευρικής μετακινήσεις.

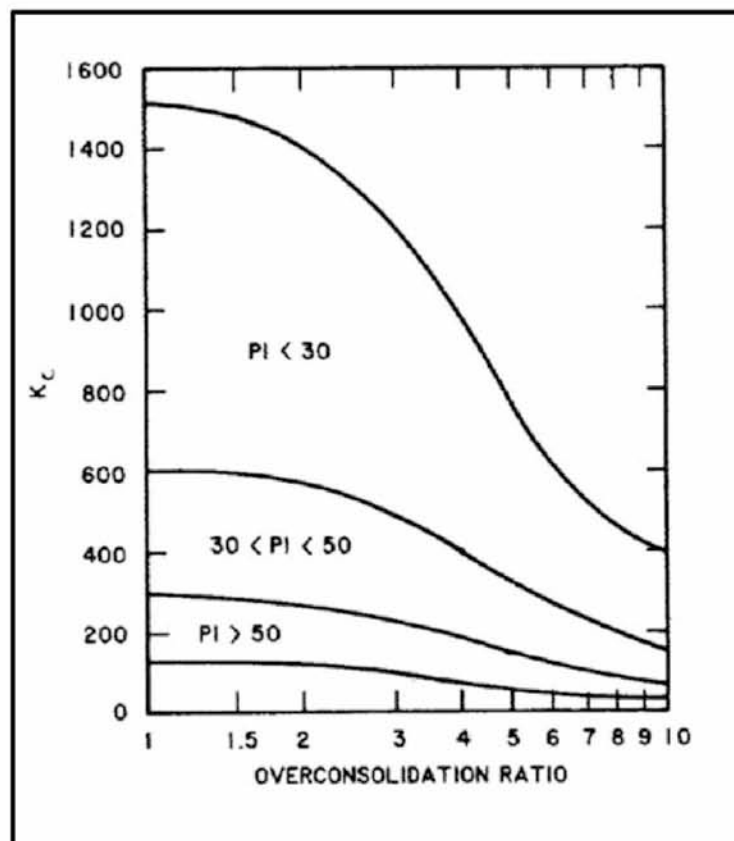
Η πυκνότητα της διακριτοποίησης που χρησιμοποιείται απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1. Μια ανάλυση ευαισθησίας διακριτοποίησης έδειξε ότι η χρήση πυκνότερης διακριτοποίησης έχει αμελητέα επίδραση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



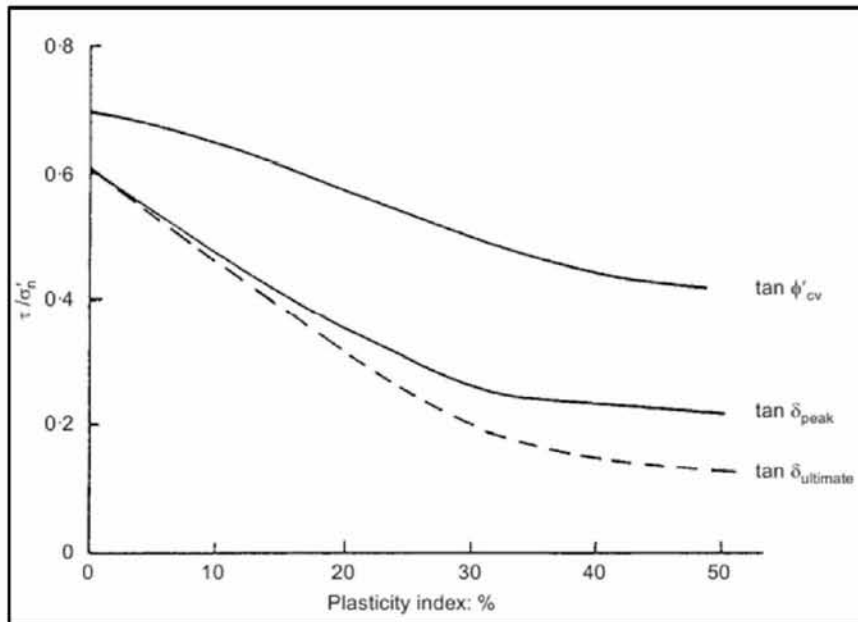
Σχήμα 8.1 3D Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Λόγω της πολύ χαμηλής διαπερατότητάς της, η άργιλος εμφανίζει αστράγγιστη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της εφαρμογής φορτίων αιχμής, καθώς ο ρυθμός φόρτωσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον ρυθμό με τον οποίο το νερό των

πόρων μπορεί να μετακινηθεί μέσα ή έξω από τα κενά μεταξύ των σωματιδίων. Το έδαφος, για όλες τις περιπτώσεις αργίλου, θεωρήθηκε ελαστοπλαστικό, σύμφωνα με το καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb. Ο λόγος Poisson, σε όλες τις περιπτώσεις, λήφθηκε $\nu=0.495$, η γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=0^\circ$ και η γωνία διασταλτικότητας 0° . Στον Πίνακα 7.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές ιδιότητες των υπό μελέτη αργιλικών εδαφών. Η άργιλος θεωρείται κανονικά στερεοποιημένη, με ειδικό βάρος $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, ομοιόμορφη με σταθερή αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u , και δυσκαμψία E_s , με το βάθος. Το E_s συσχετίστηκε με c_u με συντελεστή συσχέτισης K_c ο οποίος διέφερε ανάλογα με τον δείκτη πλαστικότητας της αργίλου.



Σχήμα 8.2 K_c για αργίλους



Σχήμα 8.3 Τριβή διεπαφής μ πασσάλου-αργίλου

Πίνακας 8.2 Γεωτεχνικές ιδιότητες αργίλων

Clay Type	Unit Weight (kN/m ³)	Plasticity Index PI (%)	C _u (kPa)	K _c	E _s (kPa)	Interface friction angle δ (°)	Interface friction coefficient μ
1	18	80	25	192	4800	11.90	0.210
2	18	44	50	383	19150	13.50	0.240
3	18	40	75	447	33525	13.87	0.247
4	18	38	100	479	47900	14.04	0.250

Όσον αφορά τα φορτία που θα δεχθεί ο πάσσαλος, αυτά λήφθηκαν μετά από επικοινωνία με τους σχεδιαστές υπεράκτιων αιολικών πάρκων για πάσσαλο με διάμετρο 5 m. Με δεδομένα τα κατακόρυφα και οριζόντια μονοτονικά φορτία που δέχεται ο πάσσαλος διαμέτρου 5 m υπολογίστηκαν τα φορτία και για τις άλλες διαμέτρους πασσάλων, διατηρώντας έναν σταθερό λόγο μεταξύ της οριζόντιας ροπής και της οριζόντιας δύναμης. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τους πασσάλους όπου η άργιλος έχει $c_u=25$ kPa, εφαρμόστηκαν χαμηλότερα φορτία, βάσει κριτηρίων ευστάθειας. Ωστόσο, για την διευκόλυνση της σύγκρισης των αποτελεσμάτων,

πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για όλες τις αντοχές αργίλου στα χαμηλότερα φορτία.

Τα φορτία που εφαρμόστηκαν παρουσιάζονται στον επόμενο Πίνακα 7.3.

Πίνακας 8.3 Μέγιστα φορτία εφαρμογής

Pile Diameter (m)	Axial Load (MN)	$C_u = 50, 75 \text{ \& } 100 \text{ kPa}$		$C_u = 25 \text{ kPa}$	
		Lateral Force (MN)	Lateral Moment (MN.m)	Lateral Force (MN)	Lateral Moment (MN.m)
0.61	1.078	0.0401	1.5078	0.0301	1.1308
2.0	3.568	1.16060	43.6716	0.5803	21.8358
5.0	9.104	12.6930	477.5250	5.9234	222.8450
7.5	13.885	19.3590	728.3070	9.0342	339.8766

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, η φόρτιση εφαρμόστηκε στα ακόλουθα στάδια:

- Γεωστατική ισορροπία αργίλου
- Βαρύτητα σε όλο το μοντέλο
- Κατακόρυφη φόρτιση στην κεφαλή του πασσάλου
- Οριζόντια δύναμη και οριζόντια ροπή που εφαρμόζονται στην κεφαλή του πασσάλου από το μηδέν μέχρι τη μέγιστη τιμή

Η αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους μοντελοποιήθηκε με τη χρήση μικρής ολίσθησης, επιφάνειας-προς-επιφάνεια κύριας/δευτερεύοντος επαφής. Ο πάσσαλος, που είναι πολύ πιο άκαμπτος από το έδαφος, επιλέχθηκε ως η κύρια επιφάνεια ενώ το έδαφος που έρχεται σε επαφή με τον πάσσαλο επιλέχθηκε ως δευτερεύουσα επιφάνεια.

Οι συνθήκες επαφής μεταξύ αυτών των δύο επιφανειών διέπονται από κινηματικούς περιορισμούς στις κύριες και εφαπτόμενες διευθύνσεις.

Στην κύρια κατεύθυνση, η τάση επαφής είναι μηδενική όταν αναπτύσσεται ένα διάκενο μεταξύ του πασσάλου και του εδάφους ή είναι θλιπτική όταν ο πάσσαλος έρχεται σε επαφή με το έδαφος. Στην εφαπτομένη κατεύθυνση, χρησιμοποιώντας νόμο τριβής

Coulomb, η μέγιστη διατμητική τάση στην επαφή είναι ίση με την κανονική τάση πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή τριβής μ .

Όταν η διατμητική τάση είναι μικρότερη από αυτή τη μέγιστη τιμή, δεν σχηματίζεται κανένα επαπτόμενο κενό και οι επιφάνειες είναι σε κατάσταση ραβδιού. Όταν η διατμητική τάση φτάσει στη μέγιστη τιμή, σχηματίζεται ένα επαπτόμενο κενό και οι επιφάνειες ολισθαίνουν σε σχέση με την άλλη στην κατεύθυνση της διατμητικής τάσης. Τόσο οι κανονικοί όσο και οι επαπτόμενοι περιορισμοί επαφής επιβλήθηκαν με τη μέθοδο της ποινής (penalty method).

8.2. Αποτελέσματα

Για τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα ισχύουν τα ακόλουθα σημεία:

- Διεξήχθησαν αναλύσεις στα μέγιστα πλευρικά φορτία για αργίλους με $c_u=50\text{kPa}$, $c_u=75\text{kPa}$ και $c_u=100\text{ kPa}$ και σε μειωμένα πλευρικά φορτία για άργιλο με $c_u=25\text{ kPa}$ (βλ. Πίνακα 7.3). Ωστόσο, τα αποτελέσματα σε μειωμένα φορτία διεξήχθησαν για όλες τις αργίλους για να καταστεί δυνατή μία ορθολογική σύγκριση όσον αφορά την αντοχή και την δυσκαμψία της αργίλου.
- Τα εφαρμοζόμενα φορτία, τα οποία είναι σταθερά για ένα πάσσαλο δεδομένης διαμέτρου, προκαλούν το μέγεθος της ροπής κάμψης του πασσάλου και της δύναμης διάτμησης στο επίπεδο του θαλάσσιου βυθού, ανεξάρτητα από την αντοχή και την δυσκαμψία της αργίλου.
- r -peak ορίζεται ως η αναλογία της μέγιστης ροπής κάμψης κατά μήκος του πασσάλου και της εφαρμοζόμενης πλευρικής ροπής στο επίπεδο του πυθμένα.
- x -peak ορίζεται ως το βάθος του πασσάλου κάτω από το επίπεδο του βυθού στο οποίο λαμβάνει χώρα η αιχμή κάμψης της κορυφής.

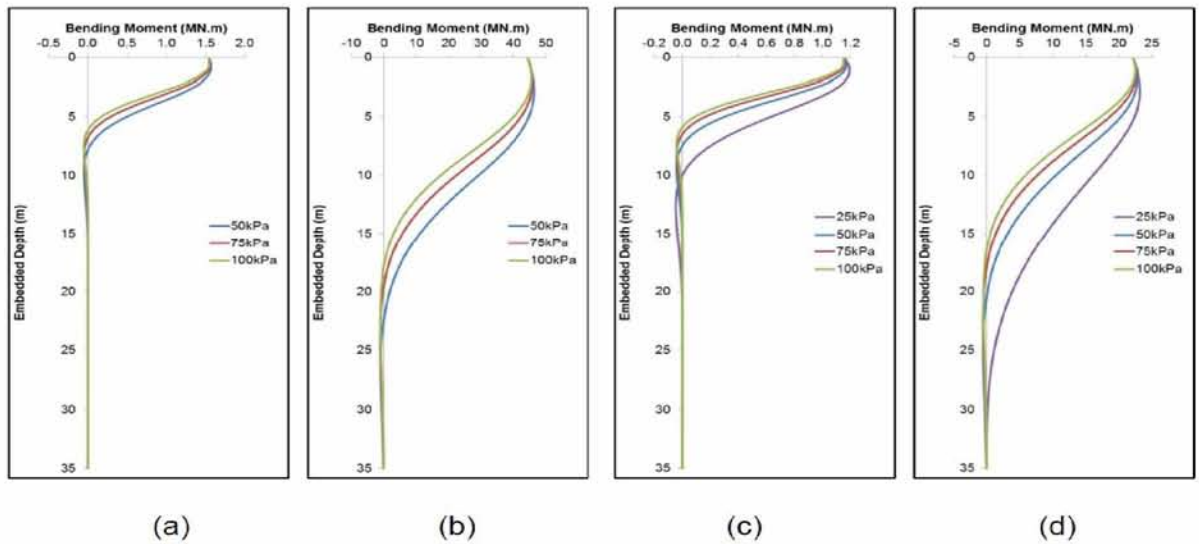
Καμπτική ροπή κατά μήκος του πασσάλου

Τα προφίλ ροπής κάμψης για διαμέτρους πασσάλων 0,61 m και 2,0 m σε άργιλο με $c_u=50$ kPa, $c_u=75$ και $c_u=100$ kPa (Σχήματα 7.4a και 7.4b) δείχνουν ότι οι ροπές κάμψης περιορίζονται στο άνω μέρος του πασσάλου και καθίστανται αμελητέες μέσα σε ~ 11 έως 13D και ~ 9 έως 11D αντίστοιχα από τον πυθμένα. Αυτό είναι σύμφωνο με τα ευρήματα του Randolph (1981) για μεμονωμένους εύκαμπτους πασσάλους. Για πασσάλους σε άργιλο 25 kPa, οι ροπές κάμψης μειώνονται σε αμελητέες ποσότητες σε μεγαλύτερο βάθος $\sim 16D$ από τον πυθμένα (Σχήματα 7.4c και 7.4d).

Αντίθετα, τα προφίλ κάμψης για μονοπασσάλους διαμέτρου 5,0 m και 7,5 m σε άργιλο με $c_u=50$, $c_u=75$ και $c_u=100$ kPa (Σχήματα 7.5a και 6.5b) είναι σημαντικά διαφορετικά, καθώς σε ολόκληρο το μήκος του πασσάλου παρατηρείται να είναι σε κάμψη υποδεικνύοντας άκαμπτη συμπεριφορά πασσάλου. Για μονοπασσάλους σε άργιλο $c_u=25$ kPa, δημιουργούνται σημαντικά υψηλότερες ροπές κάμψης σε σχέση με τους άλλους αργίλους (Σχήματα 7.5c και 7.5d).

Το σχήμα 7.6a δείχνει το r-peak να αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου του πασσάλου, με μόνη εξαίρεση το μονοπάσσαλο 7,5m σε άργιλο $c_u=50$ kPa. Αυτό υποδηλώνει ότι σε $c_u=50$ kPa άργιλο, η περιστροφή κυριαρχεί πάνω από την κάμψη ως τον κύριο τρόπο παραμόρφωσης.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.6b, για τους μονοπασσάλους με διάμετρο 0,61m και 2,0m, η μέγιστη ροπή κάμψης εμφανίζεται σε x-peak από 0,3m έως 0,5m και 1,8m έως 2,8m αντίστοιχα, ενώ για τους μονοπασσάλους με διάμετρο 5,0 m και 7,5 m, η μέγιστη ροπή εμφανίζεται σε x-peak από 5.8m έως 8.1m και από 6.5m έως 8.4m αντίστοιχα. Όπως ήταν αναμενόμενο, το x-peak μειώνεται καθώς η αντοχή του εδάφους αυξάνεται από $c_u=50$ kPa σε $c_u=100$ kPa.



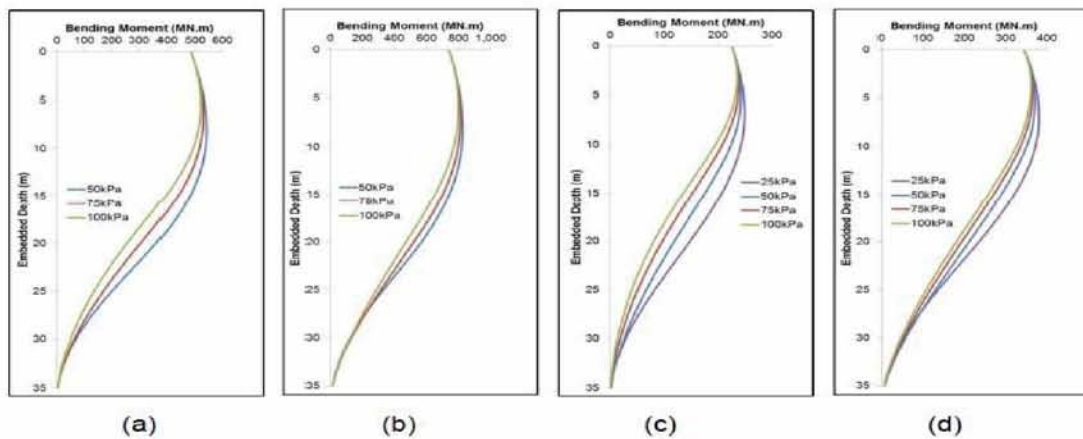
Σχήμα 8.4 Προφίλ καμπικής ροπής για πασσάλους μικρής διαμέτρου για μέγιστο πλευρικό φορτίο

a) $D=0.61\text{m}$ & $c_u=50,75,100$ kPa

b) $D=2.0\text{m}$ & $c_u=50,75,100$ kPa

c) $D=0.61\text{m}$ & $c_u=25$ kPa

d) $D=2.0\text{m}$ & $c_u=25$ kPa



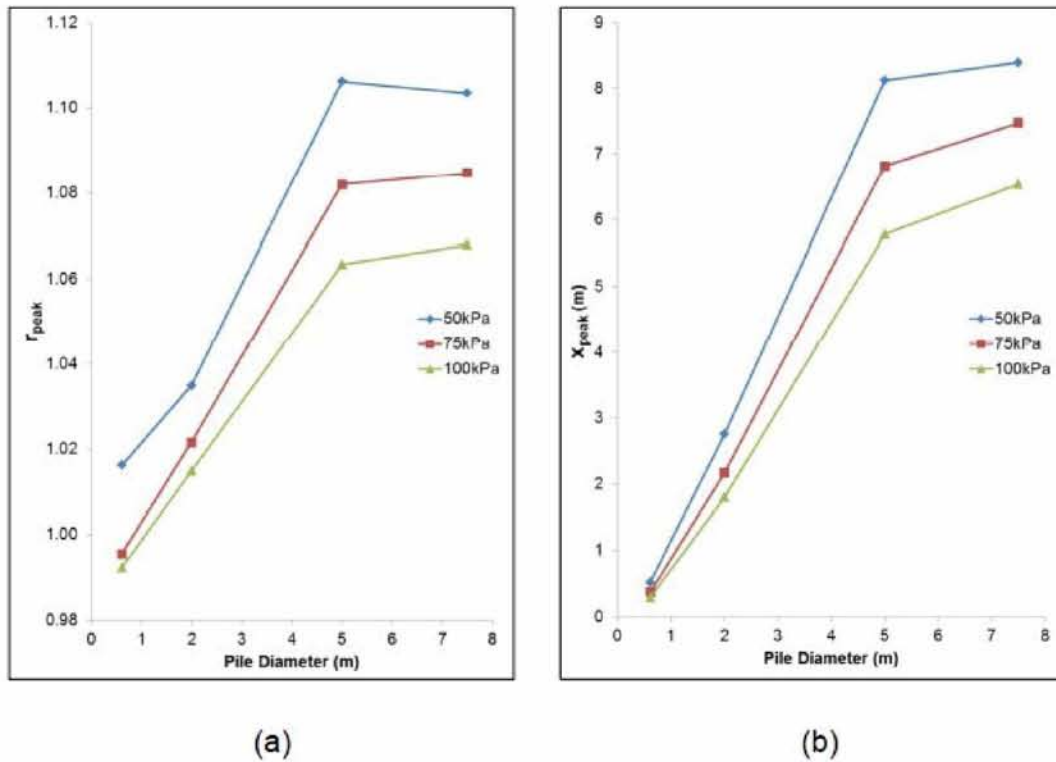
Σχήμα 8.5 Προφίλ καμπικής ροπής για πασσάλους μεγάλης διαμέτρου για μέγιστο πλευρικό φορτίο

a) $D=5.00\text{m}$ & $c_u=50,75,100$ kPa

b) $D=7.50\text{m}$ & $c_u=50,75,100$ kPa

c) $D=5.00\text{m}$ & $c_u=25$ kPa

d) $D=7.50\text{m}$ & $c_u=25$ kPa

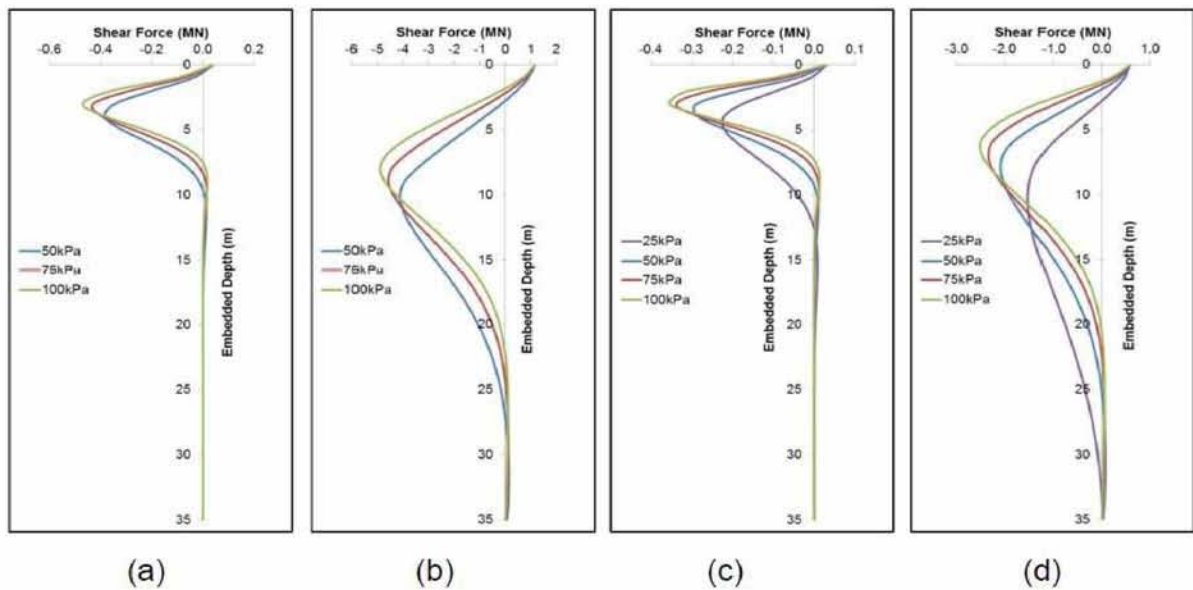


Σχήμα 8.6 α) Γ -peak συναρτήσει της διαμέτρου του πασσάλου β) X -peak συναρτήσει της διαμέτρου του πασσάλου

Διατμητική δύναμη κατά μήκος του πασσάλου

Τα προφίλ διατμητικής δύναμης για πασσάλους διαμέτρου 0,61m και 2,0m σε άργιλο με $c_u=50$ kPa, $c_u=75$ kPa και $c_u=100$ kPa (Σχήματα 7.7a και 7.7b) δείχνουν ότι η διατμητική δύναμη περιορίζεται στο άνω μέρος του πασσάλου και καθίσταται αμελητέα σε μέγεθος περίπου ~ 12 έως $16D$ και ~ 11 έως $13D$ αντιστοίχως από τον πυθμένα. Για πάσσαλο διαμέτρου 0,61m σε άργιλο $c_u=25$ kPa, η δύναμη διάτμησης μειώνεται σε αμελητέο μέγεθος σε βάθος $\sim 21D$ (Εικόνα 7.7c), ενώ για τον πάσσαλο 2,0 m σε άργιλο 25 kPa υπάρχει βαθμιαία μείωση στη διατμητική δύναμη κορυφής (peak) έως ότου είναι μηδέν στο ποδαρικό του πασσάλου (εικόνα 7.7d). Καθώς το c_u αυξάνεται από $c_u=25$ σε $c_u=100$ kPa, η μέγιστη δύναμη διάτμησης κατά μήκος των δύο αυτών πασσάλων αυξάνεται, αν και με χαμηλότερο περιθώριο σε υψηλότερες τιμές c_u .

Συγκριτικά, τα προφίλ διατμητικής δύναμης για μονοπασσάλους διαμέτρου 5,0m και 7,5m σε άργιλο με $c_u=50$, 7 $c_u=5$ και $c_u=100$ kPa (Σχήματα 7.8a και 7.8b) είναι αισθητά διαφορετικά με ολόκληρο το μήκος του πασσάλου που παρατηρείται να υφίσταται διάτμηση. Η μέγιστη δύναμη διάτμησης των μονοπασσάλων $c_u=5,0m$ και $c_u=7,5m$ σε άργιλο $c_u=50-100$ kPa επιτυγχάνεται σε βάθος 18-23m και 21-24m αντίστοιχα, μετά από την οποία παρατηρείται σταδιακή μείωση του πασσάλου μέχρι τον πόδα του. Μεταξύ των $c_u=50$ kPa και $c_u=100$ kPa, η μέγιστη δύναμη διάτμησης κατά μήκος των δύο μονοπασσάλων αυξάνεται, ωστόσο, σε $c_u=25$ kPa, είναι κατά μέσο όρο 16,4% υψηλότερο σε σχέση με τις τιμές διάτμησης αιχμής που λαμβάνονται στους άλλους αργίλους (Εικόνες 7.8c και 7.8d).



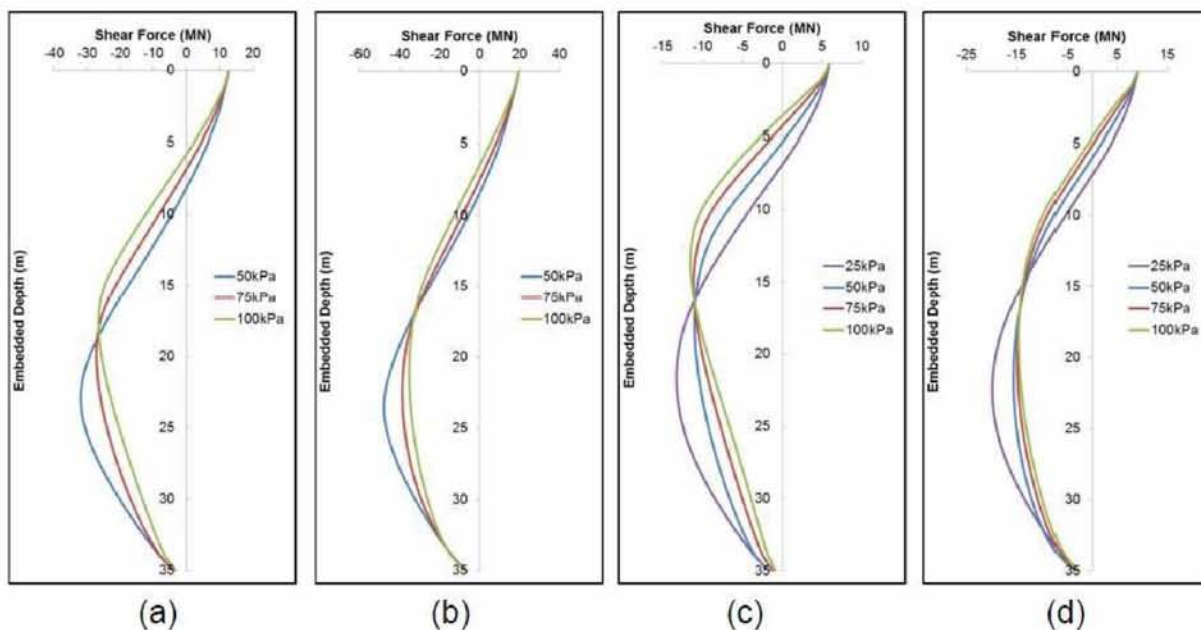
Σχήμα 8.7 Προφίλ διατμητικής δύναμης για πασσάλους μικρής διαμέτρου για μέγιστο πλευρικό φορτίο

a) $D=0.61m$ & $c_u=50,75,100$ kPa

b) $D=2.0m$ & $c_u=50,75,100$ kPa

c) $D=0.61m$ & $c_u=25$ kPa

d) $D=2.0m$ & $c_u=25$ kPa



Σχήμα 8.8 Προφίλ διατμητικής δύναμης για πασσάλους μεγάλης διαμέτρου για μέγιστο πλευρικό φορτίο

a) $D=5.00\text{m}$ & $c_u=50,75,100$ kPa

b) $D=7.50\text{m}$ & $c_u=50,75,100$ kPa

c) $D=5.00\text{m}$ & $c_u=25$ kPa

d) $D=7.50\text{m}$ & $c_u=25$ kPa

Πλευρική μετατόπιση του πασσάλου

Τα προφίλ πλάγιας μετατόπισης για πασσάλους διαμέτρου 0,61m και 2,0m σε άργιλο με $c_u=50$ kPa, $c_u=75$ kPa και $c_u=100$ kPa (Σχήματα 7.9a και 7.9b) έχουν την ακόλουθη τάση από κοινού:

- Μέγιστη μετατόπιση στην κεφαλή του πασσάλου, η οποία μειώνεται με αυξανόμενο βάθος και καθίσταται αρνητική σε βάθος $\sim 4-6D$ από το επίπεδο του θαλάσσιου βυθού, με την κατώτατη τιμή που αντιστοιχεί σε $c_u=100$ kPa και την ανώτερη οριακή τιμή σε $c_u=50$ kPa.

- Στη συνέχεια, μια αύξηση στην αρνητική μετατόπιση ακολουθούμενη από μια πτώση σε αμελητέο μέγεθος σε βάθος $\sim 12-16D$ από το επίπεδο του θαλάσσιου βυθού.

Τα πλευρικά προφίλ μετατόπισης για πασσάλους 0,61m και 2,0m σε άργιλο $c_u=25$ kPa ακολουθούν επίσης την προαναφερόμενη τάση. Εντούτοις, όπως παρατηρείται στα Σχήματα 7.9c και 7.9d, οι μετατοπίσεις καθίστανται αρνητικές σε μεγαλύτερο βάθος και στη συνέχεια μειώνονται σε αμελητέο μέγεθος.

Σε μια ενδιαφέρουσα αντίθεση, τα προφίλ πλευρικής μετατόπισης για μονοπασσάλους διαμέτρου 5,0m και 7,5m σε όλες τις άργιλους (Σχήματα 7.10a έως 7.10d) δείχνουν την ακόλουθη τάση:

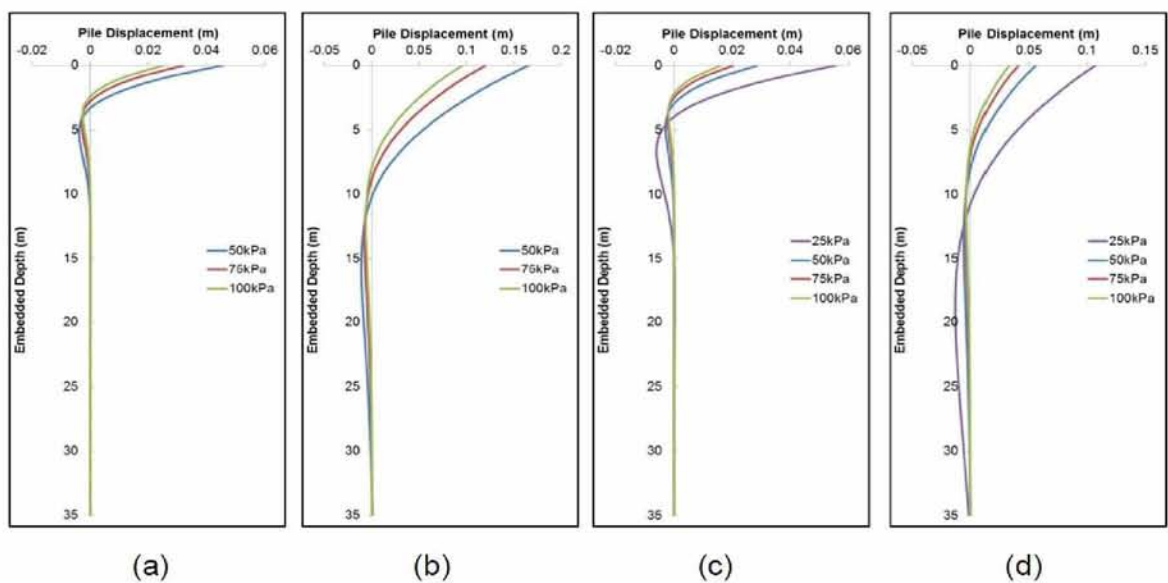
- Μέγιστη μετατόπιση στην κεφαλή πασσάλου, η οποία μειώνεται με αυξανόμενο βάθος μέχρι να επιτευχθεί ένα μόνο σημείο μηδενικής απόκλισης κατά μήκος του πασσάλου. Το βάθος στο οποίο συμβαίνει αυτό παρατηρήθηκε να ποικίλλει ανάλογα με τη διάμετρο του πασσάλου, το μέγεθος του εφαρμοζόμενου φορτίου και την αντοχή και την δυσκαμψία της άργιλου.
- Στη συνέχεια, αύξηση της αρνητικής μετατόπισης σε μια μέγιστη τιμή στον πόδα του πασσάλου.

Αυτό υποδηλώνει ότι οι μονοπάσσαλοι μεγάλης διαμέτρου αναπτύσσουν ένα ‘toe-kick’ και συμπεριφέρονται περισσότερο σαν άκαμπτοι πασσάλου.

Στο μέγιστο πλευρικό φορτίο, παρατηρήθηκε ότι οι μετατοπίσεις ήταν σημαντικά υψηλότερες για μονοπασσάλους ενσωματωμένες σε άργιλο με $c_u=50$ kPa σε σύγκριση με εκείνες σε άργιλο με $c_u=75$ kPa και $c_u=100$ kPa (Εικόνες 7.10a και 7.10b). Ομοίως, στο μειωμένο πλευρικό φορτίο, οι μετατοπίσεις για μονοπασσάλους ενσωματωμένους

σε άργιλο $c_u=25$ kPa ήταν σημαντικά υψηλότερες σε σύγκριση με εκείνες των υπόλοιπων αργίλων (Εικόνες 7.10c και 7.10d).

Μια σαφής διάκριση μεταξύ άκαμπτης και εύκαμπτης συμπεριφοράς πασσάλου μπορεί να γίνει με την επιθεώρηση του παραμορφωμένου σχήματος του πασσάλου. Η παραμόρφωση των μονοπασσάλων μεγάλης διαμέτρου, τα οποία έχουν σχετικά μεγαλύτερη (flexural) ελαστικότητα δυσκαμψίας $E_p I_p$, κυριαρχείται από την περιστροφή (Εικόνες 7.11a και 7.11β) σε αντίθεση με τους πασσάλους μικρής διαμέτρου για τους οποίους κυριαρχεί η καθαρή κάμψη (Εικόνες 7.11c και 7.11d). Εντούτοις, όπως καταδεικνύεται από το σχήμα 7.11c, ένας συνδυασμός κάμψης και περιστροφής μπορεί επίσης να συμβεί σε μονοπασσάλους.



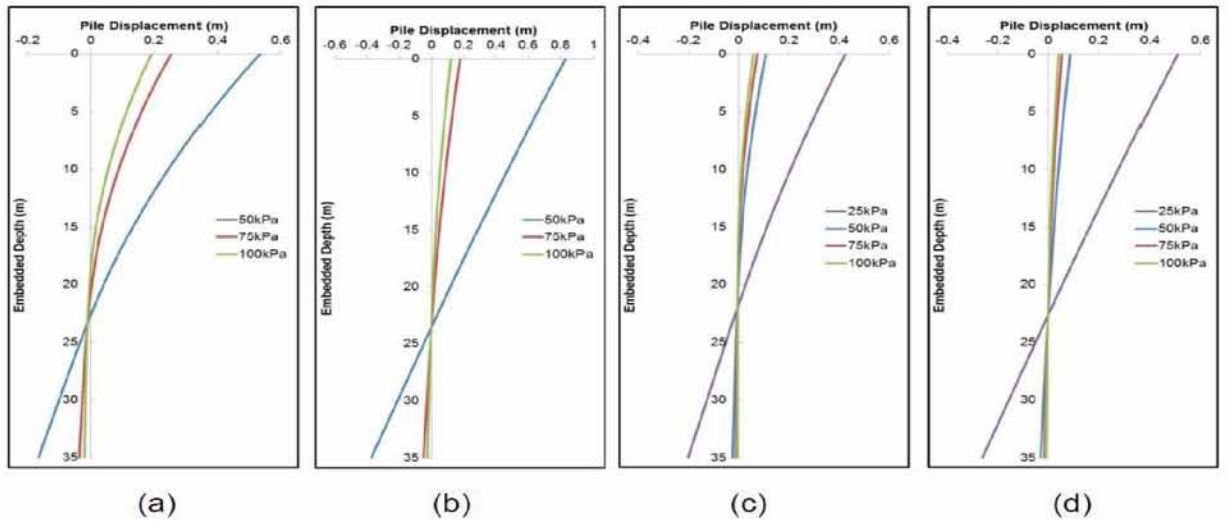
Σχήμα 8.9 Προφίλ πλευρικής μετατόπισης για πασσάλους μικρής διαμέτρου για μέγιστο πλευρικό φορτίο

a) $D=0.61\text{m}$ & $c_u=50,75,100$ kPa

b) $D=2.0\text{m}$ & $c_u=50,75,100$ kPa

c) $D=0.61\text{m}$ & $c_u=25$ kPa

d) $D=2.0\text{m}$ & $c_u=25$ kPa



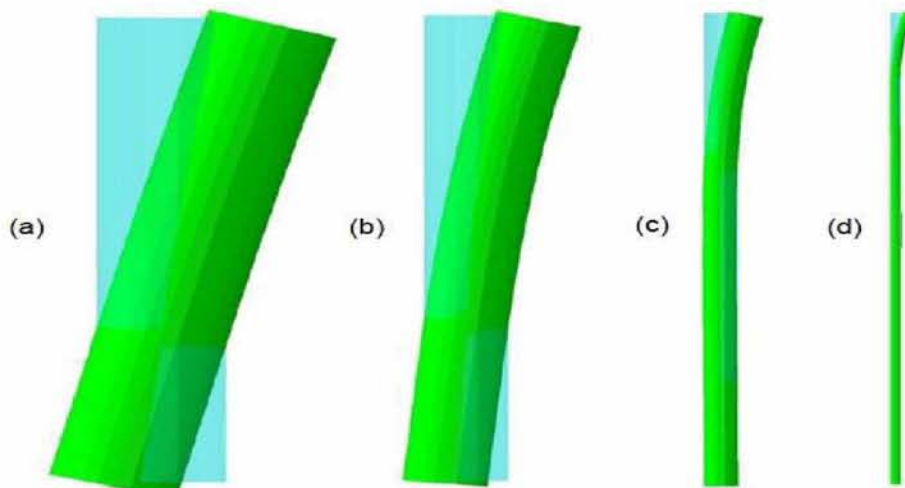
Σχήμα 8.10 Προφίλ πλευρικής μετατόπισης για πασσάλους μεγάλης διαμέτρου για μέγιστο πλευρικό φορτίο

a) $D=5.00\text{m}$ & $c_u=50,75,100$ kPa

b) $D=7.50\text{m}$ & $c_u=50,75,100$ kPa

c) $D=5.00\text{m}$ & $c_u=25$ kPa

d) $D=7.50\text{m}$ & $c_u=25$ kPa



Σχήμα 8.11 Παραμορφωμένο σχήμα πασσάλου ($c_u=50\text{kPa}$)

a) $D=7.5\text{m}$

b) $D=5.0\text{m}$

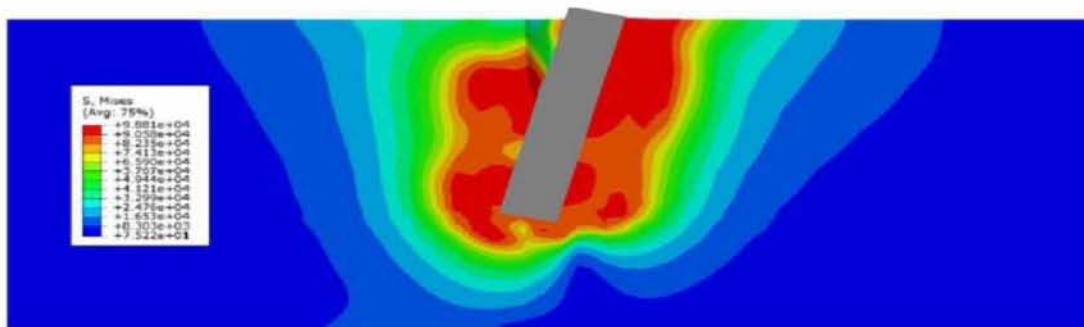
c) $D=2.0\text{m}$

d) $D=0.61\text{m}$

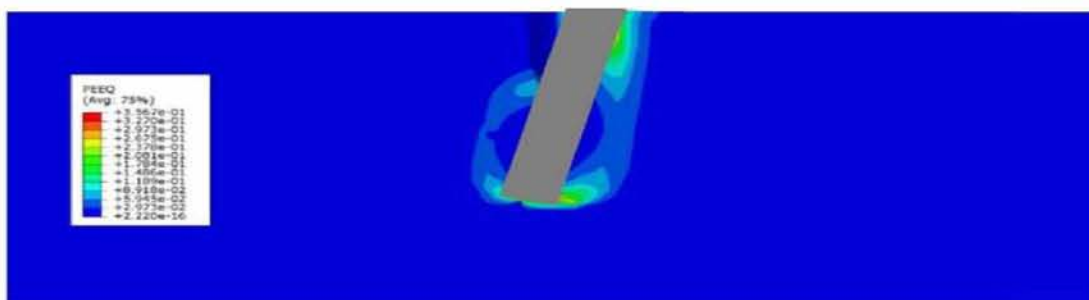
Μηχανισμός παραμόρφωσης

Η άκαμπτη συμπεριφορά των μονοπασσάλων μεγάλης διαμέτρου απεικονίζεται σαφώς στο Σχήμα 7.12 το οποίο δείχνει τη δημιουργία μέγιστων οριζόντιων τάσεων στο έδαφος σε αντίθετες πλευρές του μονοπασσάλου πάνω και κάτω από το σημείο περιστροφής αντίστοιχα. Ομοίως, οι πλαστικές παραμορφώσεις (strain) που αναπτύσσονται στο έδαφος κατά μήκος του μονοπασσάλου ακολουθούν επίσης ένα πανομοιότυπο μοτίβο (Σχήμα 7.13).

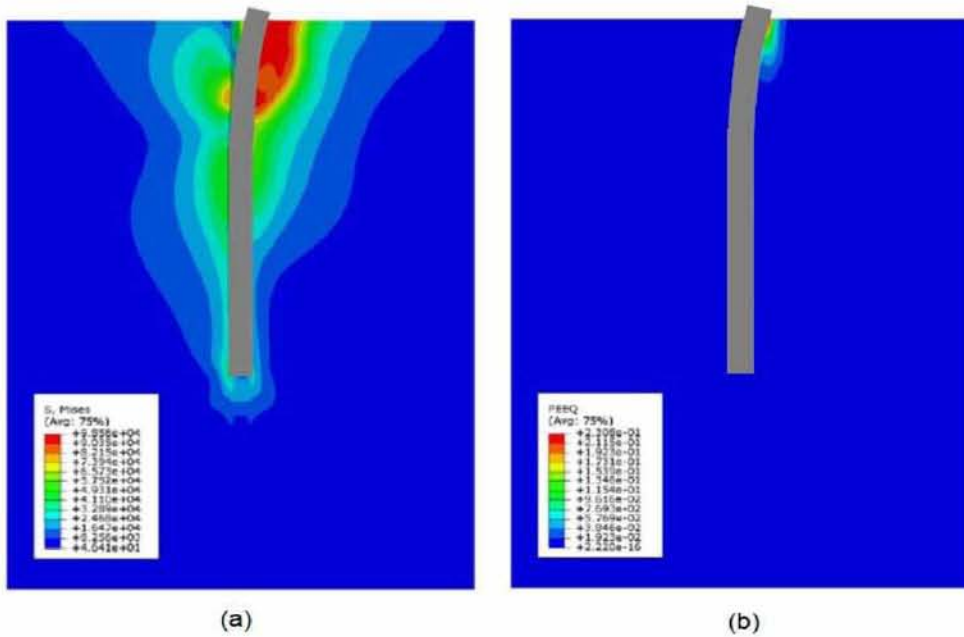
Συγκριτικά, η εύκαμπτη συμπεριφορά των πασσάλων μικρής διαμέτρου απεικονίζεται στα Σχήματα 7.14a και 7.14b, τα οποία δείχνουν αντίστοιχα ότι η μέγιστη οριζόντια τάση και η πλαστική παραμόρφωση στο έδαφος συγκεντρώνονται παράλληλα με το ανώτερο τμήμα του πασσάλου.



Σχήμα 8.12 Εδαφική τάση κατά μήκος του πασσάλου για μέγιστο πλευρικό φορτίο ($D=7.5\text{m}$, $c_u=50\text{kPa}$)



Σχήμα 8.13 Πλαστική παραμόρφωση εδάφους κατά μήκος του πασσάλου για μέγιστο πλευρικό φορτίο ($D=7.5\text{m}$, $c_u=50\text{kPa}$)

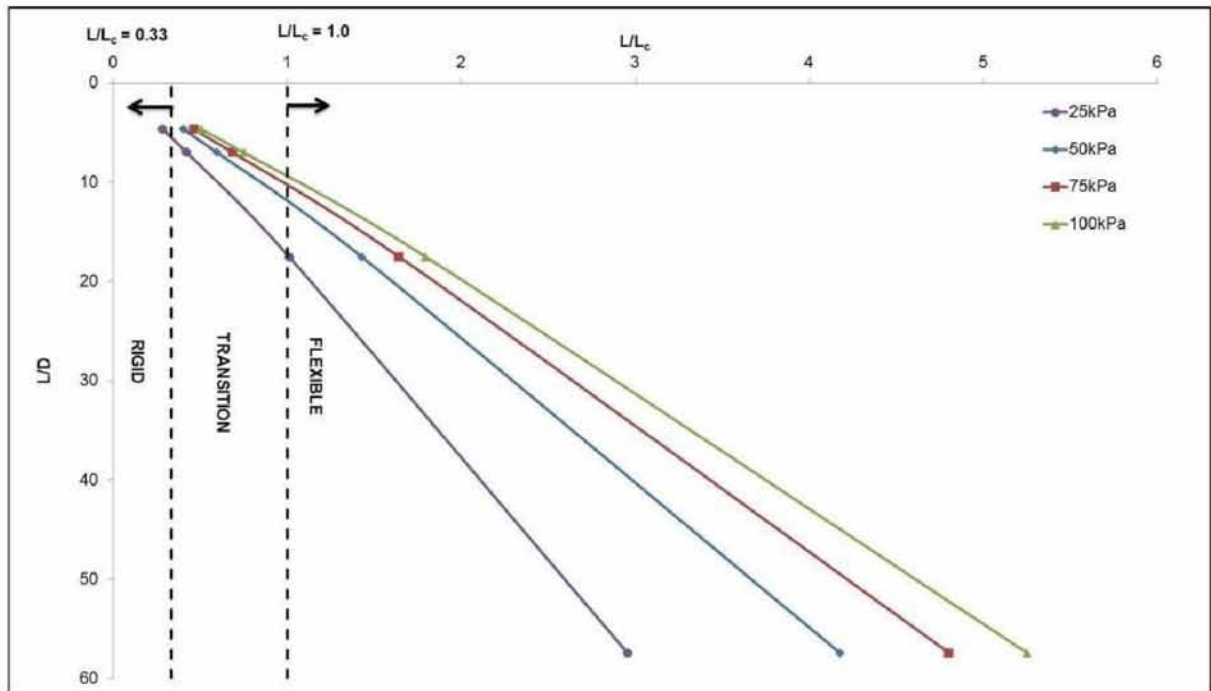


Σχήμα 8.14 Εδαφική τάση κατά μήκος του πασσάλου για μέγιστο πλευρικό φορτίο ($D=2.0\text{m}$, $c_u=50\text{kPa}$)

Η έννοια του Κρίσιμου μήκους πασσάλου L_c , που αναπτύχθηκε από τους Roulos και Hull (1989) εισάγεται εδώ για να ταξινομήσει την απόκριση πασσάλων. Η έκφραση για το L_c , η οποία εξαρτάται από τα $E_p I_p$ και E_s , δίνεται από την εξίσωση 7.2.

$$L_c = 4,44 * \left(\frac{E_p * I_p}{E_s} \right)^{0,25} \quad (\text{Εξίσωση 7.2})$$

Σύμφωνα με τον Roulos και Hull (1989), ένας πάσσαλος συμπεριφέρεται άκαμπτα εάν το ενσωματωμένο μήκος L του είναι μικρότερο από $0.33 * L_c$ και με ευελιξία αν L είναι μεγαλύτερο από L_c . Μια γραφική παράσταση του L/L_c έναντι του L/D (Σχήμα 7.15) επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι οι μονοπάσσαλοι μεγάλης διαμέτρου (5,0m και 7,5m) και στις 4 αργίλους εμπίπτουν/υπάγονται είτε στο άκαμπτο είτε στο μεταβατικό κριτήριο για το οποίο η περιστροφή ή ο συνδυασμός περιστροφής και κάμψης είναι ο τρόπος καθορισμού της παραμόρφωσης. Αντιστρόφως, οι πάσσαλοι μικρής διαμέτρου (0,61m και 2,0m) σε όλες τις 4 αργίλους εμπίπτουν στο ευέλικτο κριτήριο, για το οποίο η καθαρή κάμψη είναι ο τρόπος καθορισμού της παραμόρφωσης.



Σχήμα 8.15 Μηχανισμοί παραμόρφωσης πασσάλων βασισμένοι στο κρίσιμο μήκος πασσάλου

8.3. Συμπεράσματα

Οι μονοπάσσαλοι αναμένεται να παραμείνουν μια οικονομική λύση θεμελίωσης για μελλοντικά υπεράκτια αιολικά πάρκα. Ωστόσο, για να εξασφαλιστεί η ανταγωνιστικότητά τους, είναι ζωτικής σημασίας ο προσδιορισμός και η εφαρμογή της αποτελεσματικότητας του σχεδιασμού.

Η μέθοδος p - y , η οποία χρησιμοποιείται επί του παρόντος στο σχεδιασμό μονοπασσάλων, αναπτύχθηκε για πλευρικά φορτισμένους πασσάλους μικρής διαμέτρου στον πετρελαϊκό και φυσικού αερίου τομέα. Για τον εντοπισμό αδυναμιών στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου στο σχεδιασμό μονοπασσάλων μεγάλης διαμέτρου σε άργιλο, πραγματοποιήθηκε ανάλυση 3D πεπερασμένων στοιχείων για να εξεταστεί η συμπεριφορά και των πασσάλων μικρής διαμέτρου (0,61 m και 2,0 m) και των μονοπασσάλων μεγάλης διαμέτρου (5,0 m και 7,5 μ.) υπό συνδυασμένη κατακόρυφη, οριζόντια φόρτιση αλλά και την ύπαρξη ροπής. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης, διατυπώνονται οι ακόλουθες βασικές παρατηρήσεις:

- Οι ροπές κάμψης σε πάσσαλο μικρής διαμέτρου συγκεντρώνονται κατά μήκος του ανώτερου τμήματος του πασσάλου με το υπόλοιπο του πασσάλου να υφίσταται αμελητέα κάμψη. Συγκριτικά, οι ροπές κάμψης σε μονοπάσσαλο μεγάλης διαμέτρου κινητοποιούνται σε όλο το μήκος του πασσάλου.
- Η διατμητική δύναμη σε ένα πάσσαλο μικρής διαμέτρου συγκεντρώνεται κατά μήκος του ανώτερου τμήματος του πασσάλου με το υπόλοιπο του πασσάλου να υφίσταται ασημαντή διάτμηση. Σε σύγκριση, η δύναμη διάτμησης σε ένα μονοπάσσαλο μεγάλης διαμέτρου προκαλείται καθ' όλο το μήκος του.
- Ο πόδας ενός πασσάλου μικρής διαμέτρου υφίσταται αμελητέα πλευρική μετατόπιση. Αντίθετα, ο πόδας ενός πασσάλου μεγάλης διαμέτρου αναπτύσσει ένα toe-kick και υφίσταται αρνητική πλευρική μετατόπιση.

Η παρατηρούμενη διακύμανση στην απόδοση των πασσάλων μικρού διαμέτρου και μονοπασσάλων μεγάλης διαμέτρου συνδέθηκε με σαφώς διαφορετικούς μηχανισμούς παραμόρφωσης. Ένας μονοπάσσαλος παραμορφώνεται κυρίως μέσω άκαμπτης περιστροφής του σώματος, ενώ ένας συμβατικός πάσσαλος μικρής διαμέτρου είναι εύκαμπτος και παραμορφώνεται με κάμψη. Μια ανασκόπηση του παραμορφωμένου σχήματος των πασσάλων παρείχε επιβεβαίωση αυτών των δύο διαφορετικών τρόπων παραμόρφωσης.

Η χρήση της έννοιας του κρίσιμου μήκους πασσάλου επέτρεψε στους μονοπασσάλους μεγάλης διαμέτρου να ταξινομηθούν ως ουσιαστικά άκαμπτα και οι πάσσαλοι μικρής διαμέτρου να κατηγοριοποιηθούν ως ευέλικτες.

Μια τέτοια θεμελιώδης διαφορά στη λειτουργία αστοχίας δημιουργεί σοβαρές αμφιβολίες για την αποτελεσματικότητα της υπάρχουσας προσέγγισης $p-y$ στο σχεδιασμό μονοπασσάλων για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το βασικό συμπέρασμα που προέκυψε από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι ότι οι ανεμογεννήτριες αποτελούν ένα πολύπλοκο αντικείμενο μελέτης καθώς η σωστή και αποτελεσματική λειτουργία τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Βασικός παράγοντας είναι η επιλογή του κατάλληλου μέρους εγκατάστασης ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, η θεμελίωση των ανεμογεννητριών δεν γίνεται πάντοτε στις ευμενέστερες εδαφικές συνθήκες. Οι τρόποι θεμελίωσης ποικίλουν και ανάλογα την περίπτωση πρέπει να επιλέγεται ο καταλληλότερος ώστε να υφίσταται επαρκής σταθεροποίηση των ανεμογεννητριών με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Συνεπώς, ο σωστός γεωτεχνικός σχεδιασμός παίζει κυρίαρχο ρόλο στη μελέτη και το σχεδιασμό των ανεμογεννητριών. Ο σωστός γεωτεχνικός σχεδιασμός περιλαμβάνει την επιλογή του κατάλληλου τρόπου θεμελίωσης, την επιλογή των κατάλληλων φορτίων επιβολής και τον συνδυασμό δράσης τους. Επιπρόσθετα, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο καταλαμβάνουν οι επί τόπου γεωτεχνικές έρευνες για τον προσδιορισμό των εδαφικών παραμέτρων. Αφού προσδιοριστούν οι εδαφικές παράμετροι ακολουθεί η διαστασιολόγηση της θεμελίωσης. Όπως γίνεται αντιληπτό τα βήματα είναι πολλά και πολλές φορές μπορεί να γίνεται και διαφοροποίηση στην σειρά τους.

Όσον αφορά τη θεμελίωση χερσαίων ανεμογεννητριών δεν διαφέρει και πολύ από τη θεμελίωση των υπόλοιπων τεχνικών έργων. Όσον αφορά όμως τη θεμελίωση υπεράκτιων ανεμογεννητριών, μέχρι σήμερα βασικός τρόπος θεμελίωσης είναι με τη χρήση μονοπάσσαλου ή με θεμελίωση βαρύτητας. Οι τρόποι αυτοί είναι ικανοποιητικοί όμως έχουν περιορισμό βάθους. Συνεπώς, υπάρχει η ανάγκη βελτιστοποίησης και των υπόλοιπων τρόπων θεμελίωσης υπεράκτιων κατασκευών ώστε να είναι προσιτοί οικονομικά και να αρθεί ο οικονομικός περιορισμός που

εμπεριέχουν και να χρησιμοποιηθούν για να την θεμελίωση
υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε μεγαλύτερα βάθη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αλεξανδρίδης, Α. (2010). “Τεχνολογίες Ελέγχου στα Αιολικά Συστήματα”. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
2. Αναγνωστόπουλος, Α., Παπαδόπουλος, Β., (2011). “Θεμελιώσεις με πασσάλους, Επιφανειακές θεμελιώσεις.”
3. Αναγνωστόπουλος, Χ., Γεωργιάδης Μ., Πιτιλάκης Κ., (1994). Πανεπιστημιακές Σημειώσεις “ Θεμελιώσεις – Αντιστηρίξεις”. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
4. Γραμματικόπουλος, Γ., Μάνου-Ανδρεάδου Ν., Χατζηγώγος Θ., (1994), “Εδαφομηχανική: ασκήσεις και προβλήματα”.
5. Γράβας, Θ. (2015). Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία “Υπεράκτιες Πλωτές Ανεμογεννήτριες – Ανάλυση Αγκυρωμένης Κατασκευής με Κατακόρυφους Πρεοντεταμένους Κλάδους (TLP). Σχολή Μηχανολόγων Ναυπηγών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
6. Δαγκαλίδης, Α. (2010). “Κλαδική Μελέτη Αιολικών Πάρκων”. Τράπεζα Πειραιώς
7. Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, (2017). “Μακροχρόνιος σχεδιασμός για το ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας”
8. Καββαδάς, Μ. (2005). “Θεμελιώσεις Τεχνικών Έργων”
9. Κάραλης, Γ. (2013). “Βασικές Γνώσεις Αιολικής Ενέργειας”. Ακαδημία Ενέργειας
10. Κοπελιάς, Α. (2014). Πτυχιακή Εργασία “Αεροδυναμική Ανεμογεννητριών Οριζόντιου Άξονα”. Σχολή Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
11. Λευθεριώτης, Γ. (2012). “Αιολική Ενέργεια & Ενέργεια του Νερού”. Σχολή Θετικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Πατρών
12. Μπινόποπουλος, Ε., Χαβιαρόπουλος, Π., (2015). “Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Αιολιών Πάρκων: Μύθος και Πραγματικότητα.” Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
13. Παναγιώτου, Μ., (2003). Διπλωματική Εργασία “Ανάλυση Ανωφομής και Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους – Κατασκευής σε Πύργους Ανεμογεννητριών.” Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
14. Πανίδης, Α. (2013). Πτυχιακή Εργασία “Αιολική Ενέργεια – Αιολικά Πάρκα”. Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας
15. Πεκόπουλος, Δ. (2000). “Ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα και Δ. Μακεδονία – πηγές, μέσα, στόχοι”. ANKO, Κοζάνη
16. Πριονάς, (Ε.) (2015). Διπλωματική Εργασία “Μελέτη Επίδρασης στο Δίκτυο Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών”. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
17. Σταυρακάκης, Γ. (2005). “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Σημειώσεις Μαθήματος”. Σχολή Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης

18. Ταβουλάρης, Ν. (2017). Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία “Κώδικες δικτύων και ρύθμιση συχνότητας μέσω υπεράκτιων αιολικών πάρκων”. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά
19. Τζάφος, Σ. (2015). Διπλωματική Εργασία “Έλεγχος Βήματος Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών”. Σχολή Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
20. Τσότσος, Στ., (1991). “Εδαφομηχανική – Θεωρία, Μέθοδοι, Εφαρμογές”
21. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (2003)

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Schlichting, H., Gersten, K. (2000). “Boundary Layer Theory”. Springer, Berlin.
2. Kaldellis, J.K., Kavadias, K.A. (2004). “Evaluation of Greek wind parks visual impact: the public attitude”. *Fresenius Environmental Bulletin*, pp. 413–423.
3. Hatziargyriou, N.D., Tsikalakis, A., Androutsos, A. (2006). “Status of distributed generation in the Greek Islands”. *Proceedings of the Power Engineering Society General Meeting*. Montreal, Canada.
4. Kabouris, J., Hatziargyriou, N. (2006). “Wind power in Greece-current situation, future developments and prospects”. *Proceedings of the Power Engineering Society General Meeting*. Montreal, Canada.
5. Papadopoulos, A.M., Glinou, G.L., Papachristos, D.A. (2008). “Developments in the utilisation of wind energy in Greece”. *Renewable Energy*, pp. 105–110.
6. Kira, G. (2013). “Harvesting the wind: The physics of wind turbines”.
7. Stathopoulos, T., Blocken, B. (2018). “Wind Engineering & Industrial Aerodynamics”.
8. Anca, D. (2017). *Hansen Wind Turbine Technologies*.
9. Tuller, S., Brett, A. (1983). “The characteristics of wind velocity that favor the fitting of a Weibull distribution in wind speed analysis”.
10. Hau, E. (2012). “Wind turbines, Fundamentals, Technologies Application, Economics”.
11. Ragheb, M., Ragheb, A. (2011) “Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio”.
12. Nihei, Y., Matsuura, M., Fujioka, H., Suzuki, H.(2011). “An Approach for the optimum design of TLP type offshore wind turbines”. *Proceedings of the Asme 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, June 19-24, 2011, OMAE 2011-50258.
13. Lee, K.H. (2004). “Responses of floating wind turbines to wind and wave excitation” (Master of Science Thesis). Massachusetts Institute of Technology.
14. Peynard, C. (2015). “Offshore Wind Turbine Foundation”. *Laboratory of Hydraulics, St Venant*.
15. Zhao, Y., Yang, J., He, Y. (2012). “Preliminary Design of a Multi-Column TLP Foundation for a 5-MW Offshore Wind Turbine”.
16. *Global wind statistics 2014*, Global Wind Energy Council (GWEC).
17. Westgate, Z., Dejong, J. (2005). “Geotechnical Considerations for Offshore Wind Turbines”.
18. Barnes, G. (2000). “Soil Mechanics: Principles and Practice”.
19. Poulos, H.G. (1988). “Marine Geotechnics”, Unwin Hyman Ltd., London.

20. Randolph, M.F., Kenkhuis, J. (2001). "Offshore Foundation Systems 406: Site Investigation Planning" – Course Notes, Center for Offshore Foundation Systems, University of Western Australia.
21. Eurocode 0 (2010). "Basis of structural design"
22. Eurocode 1 (2009). "Action on structures – Part 1-1: General actions - Densities, self-weights and loads of building exploitation"
23. Eurocode 1 (2009). "Action on structures – Part 1-3: Actions included by cranes and machinery"
24. Eurocode 1 (2009). "Action on structures – Part 1-4: General actions – Wind loads"
25. Eurocode 8 (2009). "Design of structures for earthquake resistance"
26. DNV (2011). "Design of Offshore Wind Turbine Structures" DNV-OS-J101, Det Norske Veritas AS.
27. Norsok Standard (2004): "Well Integrity and Well Operation"
28. Hayashi, Chushiro, Minoru Nishida, (1956). "Formation of light nuclei in the expanding universe".
29. Bjerrum, L., (1963). "Allowable settlement of structures". Proceedings of Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
30. Watson, G., (2000). "Structure and Foundation Design of Offshore Wind Installations", Final Report from the Offshore Wind Energy Network Workshop, March, CLRC Rutherford Appleton Laboratory. 27pp.
31. Jenner, C., Finch, M., Finlayson, K., Harker, G., (2002). "Optimizing Integrated Site Investigations for Offshore Wind Farm Projects", Proceedings of the International Conference on Offshore Site Investigations: Diversity and Sustainability, November 26-28, London, United Kingdom, pp.141-149.
32. Braja M. Das (1999). "Fundamental of Geotechnical Engineering". 2nd Edition. Canada: Divison of Thomson Canada Kimeted

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

1. www.forward.gr
2. www.enikonomia.gr
3. www.ypeka.gr
4. www.ewea.org
5. www.awea.org
6. www.wikipedia.com
7. egpaid.blogspot.com
8. people.bu.edu/dew11/windturbine.html
9. www.amusingplanet.com
10. www.atlasobscura.com
11. www.123rf.com
12. www.cleantechnica.com
13. www.drømstørre.dk
14. www.slideshare.net
15. www.pinterest.com
16. www.researchgate.net
17. www.hmga.gr
18. ape.chania.teicrete.gr
19. www.saltireserver.com

20. www.mwps.world
21. www.researchgate.net
22. www.e-education.psu.edu
23. <http://www.windfarmbop.com>
24. www.statoil.com
25. www.4coffshore.com
26. www.energyproject.gr
27. <http://www.astanks.com>
28. www.buildipedia.com
29. www.civiltoday.com
30. www.4coffshore.com
31. www.civilfoundationengineering.com
32. <https://slideplayer.gr/slide/2770296/>