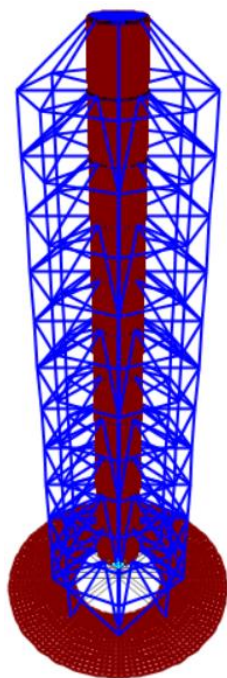




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Παραμετρικός Σχεδιασμός Βάσης Πυλώνων Ανεμογεννητριών με Εσωτερικό Κέλυφος και Εξωτερικό Πλαισιακό Φορέα



Διπλωματική Εργασία
Ρομέο Τσούκα

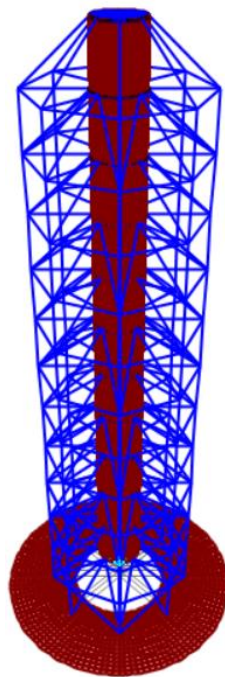
EMK ΔΕ 2021 19

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Αθήνα, Ιούλιος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Παραμετρικός Σχεδιασμός Βάσης Πυλώνων Ανεμογεννητριών με Εσωτερικό Κέλυφος και Εξωτερικό Πλαισιακό Φορέα



Διπλωματική Εργασία
Ρομέο Τσούκα

ΕΜΚ ΔΕ 2021 19

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Αθήνα, Ιούλιος 2021

Copyright © Ρομέο Τσούκα, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Romeo Cuka, 2021
All Rights Reserved

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

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

Ρομέο Τσούκα (2021)

Παραμετρικός Σχεδιασμός Βάσης Πυλώνων Ανεμογεννητριών με Εσωτερικό Κέλυφος και Εξωτερικό
Πλαισιακό Φορέα
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2021 19
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Romeo Cuka (2021)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2021 19
Parametric Design of Base of Wind Turbines Pylons with Inner Shell and Exterior Frame
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου Χάρη Γαντέ, για την εμπιστοσύνη και τη δυνατότητα να ασχοληθώ και να αναπτύξω αυτή την πρωτοποριακή ιδέα. Η συμβολή του στην καταπόνηση αυτής της εργασίας, ήταν καθοριστική καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης και οι συμβουλές ήταν εξαιρετικά χρήσιμες και σαφείς σε κομβικά σημεία της. Πέρα από το επιστημονικό μέρος, μου μετέδωσε πολύτιμες δεξιότητες και τρόπους αντιμετώπισης καταστάσεων, που μπορεί στην μετέπειτα σταδιοδρομία μου να αντιμετωπίσω.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Ιωάννη Ψαρά, ο οποίος συνέβαλε παρέχοντας χρήσιμες συμβουλές σχετικά με τη λειτουργία του λογισμικού, που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω από τις ευχαριστίες την οικογένεια μου, τους φίλους μου και την κοπέλα μου, που μου παρείχαν ηθική στήριξη και πρακτική βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές της σχολής Πολιτικών Μηχανικών, που συνέβαλλαν στην επιστημονική μου κατάρτιση.

Στη μνήμη του πατέρα μου



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2021 19

Παραμετρικός Σχεδιασμός Βάσης Πυλώνων Ανεμογεννητριών με Εσωτερικό Κέλυφος και Εξωτερικό Πλαισιακό Φορέα

Ρομέο Τσούκα

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Ιούλιος 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τη σημερινή εποχή, δεδομένης της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης σε ενέργεια, η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος μεταξύ των άλλων ανανεώσιμων πηγών. Με τη βελτίωση της τεχνολογίας, υπάρχει συνεχής αύξηση του μεγέθους της ανεμογεννήτριας, τόσο στο ύψος του πύργου ανεμογεννητριών, όσο και στο μήκος των πτερυγίων. Ως αποτέλεσμα, προκύπτει σημαντική αύξηση στα φορτία σχεδιασμού της κατασκευής, καθώς αυξάνεται το ύψος της ανεμογεννήτριας, ειδικά στα φορτία ανέμου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αξιολογείται υπολογιστικά μέσω προηγμένων αριθμητικών αναλύσεων μια νέα ιδέα που έχει προταθεί, με στόχο να επιτρέψει στους πύργους ανεμογεννητριών να φτάσουν σε μεγαλύτερα ύψη, ώστε να επιτρέψουν καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Προς αυτή την κατεύθυνση, μελετάται βάση ανεμογεννήτριας 60 m με εσωτερικό κυλινδρικό κέλυφος, που υποστηρίζεται από εξωτερικό πλαισιακό φορέα. Αρχικά, πραγματοποιείται γραμμική στατική ανάλυση του μεταλλικού τμήματος της βάσης της ανεμογεννήτριας και όλα τα δομικά στοιχεία ελέγχονται κατά EN1993. Σε επόμενο στάδιο, διεξάγεται παραμετρική διερεύνηση ως προς την ακτίνα του εξωτερικού πλαισιακού φορέα. Οι στόχοι που τίθενται είναι, πρώτον να προκύψει η βέλτιστη ακτίνα η οποία θα μεγιστοποιεί τη δυσκαμψία και δεύτερον η ακτίνα να οδηγεί σε εκμετάλλευση, με όσο το δυνατόν οικονομικότερο τρόπο, των στοιχείων του εξωτερικού πλαισιακού φορέα. Εν συνεχεία, λαμβάνει χώρα μη γραμμική στατική ανάλυση στο φορέα της δακτυλιοειδούς θεμελίωσης από οπλισμένο σκυρόδεμα, στην οποία θα στηριχθεί το μεταλλικό τμήμα της βάσης ανεμογεννήτριας. Η θεμελίωση ελέγχεται κατά EN1992. Έπειτα, διεξάγεται παραμετρική διερεύνηση ως προς την εξωτερική και την εσωτερική ακτίνα της δακτυλιοειδούς θεμελίωσης, για να προσδιορισθεί η γεωμετρία με τα βέλτιστα χαρακτηριστικά και την ελάχιστη δυνατή απαίτηση οπλισμού. Τέλος, το μοντέλο της θεμελίωσης ενσωματώνεται σε εκείνο του μεταλλικού τμήματος της βάσης ανεμογεννήτριας. Μετά την ανάλυση του σύνθετου φορέα, πραγματοποιούνται συγκρίσεις των αποτελεσμάτων του με εκείνα των δύο μεμονωμένων μοντέλων (μεταλλικής κατασκευής και θεμελίωσης). Ακολουθεί ο υπολογισμός της ιδιοσυχνότητας της συνολικής κατασκευής και πραγματοποιείται ο πιο κρίσιμος έλεγχος, αυτός του συντονισμού της κατασκευής.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2021 19

Parametric Design of Base of Wind Turbines Pylons with Inner Shell and Exterior Frame

Romeo Cuka

Supervisor: Professor Charis Gantes
July 2021

ABSTRACT

Nowadays, given the ever-increasing demand for energy, the harnessing of wind energy is constantly gaining ground among other renewable resources. With the improvement of technology, there is a continuous increase in the size of the wind turbine, in terms of both height of the wind turbine tower and length of the blades. As a result, there is a significant increase in the design loads of the construction, especially wind loads. In this thesis a novel concept that has been proposed to enable wind turbine towers to reach higher hub heights for better exploitation of the available wind potential, is evaluated computationally by means of advanced numerical analyses. In this concept, the cylindrical tower shell is externally supported by a frame structure, properly interconnected to the internal tube. At first, a preliminary design is performed by means of linear structural analyses and verifications according to EN1993. In the next step, a parametric investigation is carried out on the radius of the outer frame structure. The objectives are to select the optimal radius in which the stiffness of the structure is maximized, and the members of the external frame are exploited in an optimum economical way. Then, a non-linear static analysis is performed on the annular reinforced concrete foundation, on which the steel superstructure of the wind turbine base is supported. The foundation is verified according to EN1992. Then, a parametric investigation takes place on the outer and inner radius of the annular foundation, to determine the geometry with the optimal characteristics and the minimum reinforcement requirement. Finally, the foundation model is integrated into that of the steel superstructure of the wind turbine base. After the analysis of the composite structure, comparisons of its results are made with those of the two individual models (metal construction and foundation). The calculation of the eigenfrequency of the total construction follows and the most critical verification is carried out, the resonance verification of the construction.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Ιστορικά στοιχεία	1
1.2	Παραγωγή αιολικής ενέργειας	2
1.3	Ανεμογεννήτριες	4
1.3.1	Τύποι ανεμογεννητριών	5
1.3.1.1	Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα	5
1.3.1.2	Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα	6
1.4	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	6
1.5	Οικονομικά στοιχεία	8
1.6	Αντικείμενο παρούσας διπλωματικής	11
2	ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	13
2.1	Συνδυασμοί φόρτισης	13
2.1.1	Καταστάσεις σχεδιασμού	13
2.1.2	Εξωτερικές συνθήκες	14
2.1.3	Σχεδιαστικοί συνδυασμοί φόρτισης	14
2.2	Είδη Φορτίων	16
2.2.1	Αδρανειακά και βαρυτικά φορτία	16
2.2.2	Αεροδυναμικά φορτία	16
2.2.2.1	Πτερύγια	16
2.2.2.2	Πύργος	18
2.2.3	Φορτία Λειτουργίας	18
2.2.4	Άλλα φορτία	19
2.3	Μερικοί Συντελεστές Ασφαλείας	19
2.3.1	Μερικοί συντελεστές ασφαλείας φορτίων	19
2.3.2	Μερικοί συντελεστές ασφαλείας υλικών	20
2.4	Έλεγχοι	21
2.4.1	Πλαστικός έλεγχος	21
2.4.2	Έλεγχος ευστάθειας	21
2.4.2.1	Έλεγχος ευστάθειας μέσω τάσεων	21
2.4.2.2	Έλεγχος ευστάθειας μέσω καθολικής αριθμητικής ανάλυσης	22
2.4.2.3	Ατέλειες	24
2.4.3	Κόπωση	24
2.4.4	Σεισμός	25
2.4.5	Έλεγχος εκτροπής πτερυγίου	25

2.4.6 Έλεγχος συντονισμού	25
2.5 Σκοπός παρούσας διπλωματικής.....	25
3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	27
3.1 Γεωμετρία	28
3.1.1 Εσωτερικό κέλυφος.....	28
3.1.2 Νευρώσεις.....	28
3.1.3 Εξωτερικός πλαισιακός φορέας.....	30
3.1.4 Θεμελίωση	33
3.2 Υλικά	34
3.3 Φόρτιση.....	35
4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	37
4.1 Προσομοίωση φορέα	37
4.2 Αποτελέσματα γραμμικής στατικής και ιδιομορφικής ανάλυσης	38
4.3 Καταπονήσεις δομικών στοιχείων και έλεγχοι επάρκειας κατά EN1993.....	44
4.3.1 Τάσεις εσωτερικού	44
4.3.2 Εξωτερικός πλαισιακός φορέας.....	46
4.3.3 Έλεγχοι επάρκειας των δομικών στοιχείων	51
4.4 Παραμετρική ως προς την εκμετάλλευση διατομών	54
5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΚΤΙΝΑΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΑΚΟΥ ΦΟΡΕΑ	57
5.1 Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων ακτίνας εξωτερικού πλαισιακού φορέα	57
5.1.1 Ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα $R_{εξ}=5$ m.....	58
5.1.2 Ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα $R_{εξ}= 10$ m.....	59
5.1.3 Ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα $R_{εξ}=12.5$ m	60
5.2 Συγκρίσεις και συμπεράσματα παραμετρικών αναλύσεων $R_{εξ}$	62
5.2.1 Σύγκριση διατομών των στοιχείων.....	62
5.2.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών κατασκευής	63
5.2.3 Εκλογή βέλτιστης ακτίνας εξωτερικού πλαισιακού φορέα	67
6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ	69
6.1 Χαρακτηριστικά γεωμετρίας.....	69
6.2 Προσομείωση φορέα θεμελίωσης	71
6.3 Ανάλυση φορέα	74
6.3.1 Καμπτική και αξονική καταπόνηση.....	74
6.3.2 Διατμητική καταπόνηση	83
6.4 Χαρακτηριστικά θεμελίωσης	89
7 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΕΙΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ	91
7.1 Παραμετρική διερεύνηση εξωτερικής ακτίνας και συμπεράσματα.....	91

7.2	Παραμετρική διερεύνηση εσωτερικής ακτίνας και συμπεράσματα	99
8	ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΦΟΡΕΑΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ.....	107
8.1	Ανάλυση σύνθετου φορέα και σύγκριση αποτελεσμάτων.....	107
8.2	Έλεγχος συντονισμού της κατασκευής.....	109
8.2.1	Ιδιοσυχνότητα μέσω στροφικής δυσκαμψίας και μη γραμμικής στατικής ανάλυσης..	109
8.2.2	Ιδιοσυχνότητα μέσω ιδιομορφικής ανάλυσης.....	110
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	113
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	115

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται "ήπια μορφή ενέργειας" και περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές, όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους.

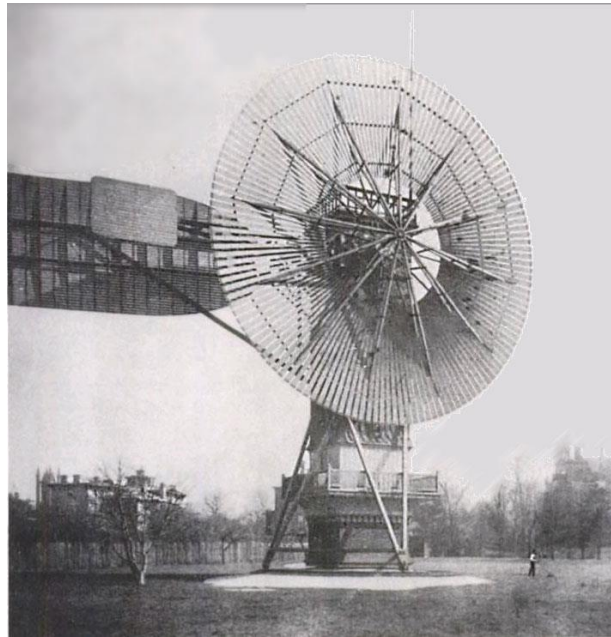
Η αιολική ενέργεια είναι μια βιώσιμη και ανανεώσιμη ενέργεια και έχει πολύ μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον σε σύγκριση με την καύση ορυκτών καυσίμων, γι' αυτό αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» της είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επίσης, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.

1.1 Ιστορικά στοιχεία

Η αιολική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί για όσο διάστημα οι άνθρωποι έβαζαν πανιά στον άνεμο. Ο Codex του King Hammurabi (βασιλείς 1792 - 1750 π.Χ.) ανέφερε ήδη ανεμόμυλους για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Ανεμοκίνητα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την άλεση σιτηρών και άντλησης νερού, του ανεμόμυλου και της αντλίας αέρα, αναπτύχθηκαν μέχρι τον 9ο αιώνα στις περιοχές που βρίσκονται τώρα Ιράν, Αφγανιστάν και Πακιστάν. Οι αντλίες με αιολική ενέργεια αποστράγγιζαν μεγάλες εκτάσεις της Ολλανδίας ενώ σε άνυδρες περιοχές όπως η αμερικανική δύση ή την Αυστραλία, οι αντλίες ανέμου παρείχαν νερό για κτηνοτροφία και ατμομηχανές.

Ο πρώτος ανεμόμυλος που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάστηκε στη Σκωτία τον Ιούλιο του 1887 από τον καθηγητή James Blyth από το Anderson's College της Γλασκώβης. Πέρα από τον Ατλαντικό, στο Κλίβελαντ του Οχάιο, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα μεγαλύτερο και βαρύτερο μηχανήμα το χειμώνα του 1887-1888 από τον Charles F. Brush. Αυτό κατασκευάστηκε από την εταιρεία μηχανικής του στο σπίτι του και λειτούργησε από το 1886 έως το 1900. Η ανεμογεννήτρια Brush είχε ρότορα διαμέτρου 17 μέτρων και τοποθετήθηκε σε πύργο 18 μέτρων, ενώ ζύγιζε 3.6 τόνους. Παρόλο που είναι μεγαλύτερο από τα σημερινά πρότυπα, το μηχανήμα τροφοδοτήθηκε από γεννήτρια των 12 kW. Το συνδεδεμένο δυναμό χρησιμοποιήθηκε είτε για τη

φόρτιση μιας συστοιχίας μπαταριών είτε για τη λειτουργία έως και 100 λαμπτήρων πυρακτώσεως, τριών λαμπτήρων τόξου και διάφορων κινητήρων στο εργαστήριο του Brush.

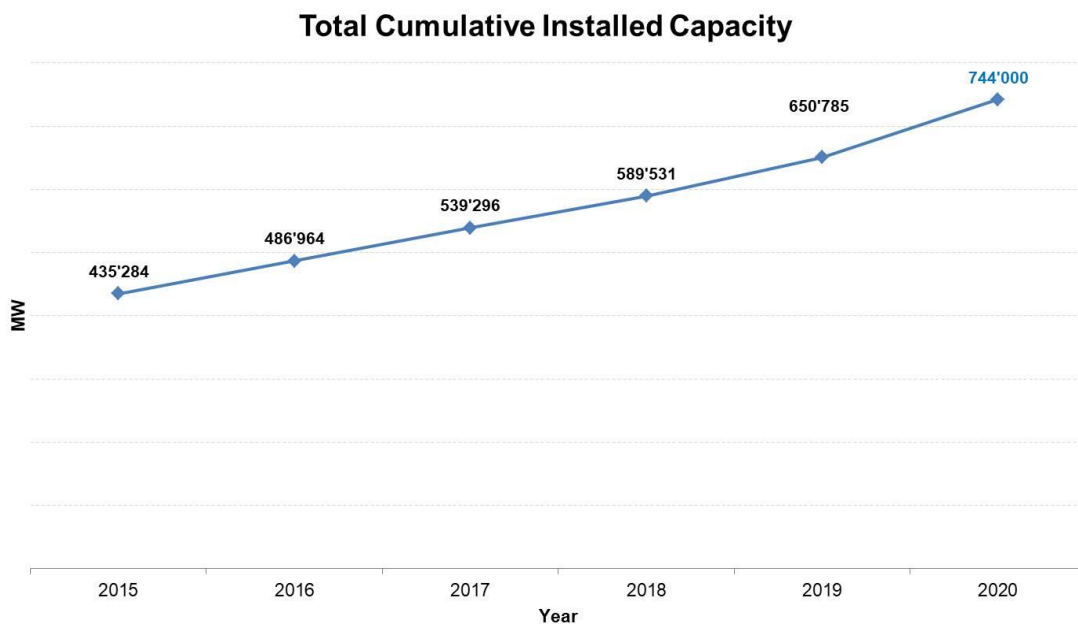


Εικόνα 1-1: Πρώτη αυτόματη ανεμογεννήτρια 1888 [22]

Με την ανάπτυξη της ηλεκτρικής ενέργειας, η αιολική ενέργεια βρήκε νέες εφαρμογές σε φωτισμό κτιρίων που απέχουν από την κεντρικά παραγόμενη ενέργεια. Καθ' όλη τη διάρκεια του 20ου αιώνα, παράλληλα μονοπάτια ανέπτυξαν μικρούς αιολικούς σταθμούς κατάλληλους για αγροκτήματα ή κατοικίες. Η πετρελαϊκή κρίση του 1973 πυροδότησε την έρευνα στη Δανία και τις Ηνωμένες Πολιτείες, που οδήγησε σε μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες καλύτερων αποδόσεων που θα μπορούσαν να συνδεθούν με ηλεκτρικά δίκτυα για απομακρυσμένη χρήση ισχύος. Σήμερα, οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν σε κάθε εύρος μεγέθους μεταξύ μικροσκοπικών σταθμών για φόρτιση μπαταρίας σε απομονωμένες κατοικίες, έως και υπεράκτια αιολικά πάρκα μεγέθους σχεδόν GW που παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε εθνικά ηλεκτρικά δίκτυα.

1.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παγκόσμια χωρητικότητα αιολικής ενέργειας τετραπλασιάστηκε μεταξύ του 2000 και του 2006. Η βιομηχανία αιολικής ενέργειας έθεσε νέα ρεκόρ το 2014, όταν εγκαταστάθηκαν περισσότερα από 50 GW νέας χωρητικότητας. Ένα άλλο πρωτοποριακό γεγονός που σημειώθηκε το 2015, ήταν η κατά 22% ετήσια αύξηση της αγοράς, με αποτέλεσμα αυτή να ξεπεράσει το όριο των 60 GW. Το 2015, σχεδόν το ήμισυ του συνόλου της νέας αιολικής ενέργειας προστέθηκε εκτός των παραδοσιακών αγορών στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό σε νέες κατασκευές στην Κίνα και την Ινδία. Όσον αφορά την οικονομική αξία, ο τομέας της αιολικής ενέργειας έχει γίνει ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στις αγορές ενέργειας, με τις συνολικές επενδύσεις να φτάνουν τα 329 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ (296.6 δισεκατομμύρια ευρώ), αύξηση 4% σε σχέση με το 2014. Η βιομηχανία αιολικής ενέργειας επηρεάστηκε από την παγκόσμια οικονομική κρίση το 2009 και το 2010, όμως η παγκόσμια χωρητικότητα αιολικής ενέργειας αυξήθηκε σε 590 GW το 2018. Η GWEC [16] προβλέπει ότι η εγκατεστημένη ισχύς της αιολικής ενέργειας θα είναι 5806 GW μέχρι το τέλος του 2050.



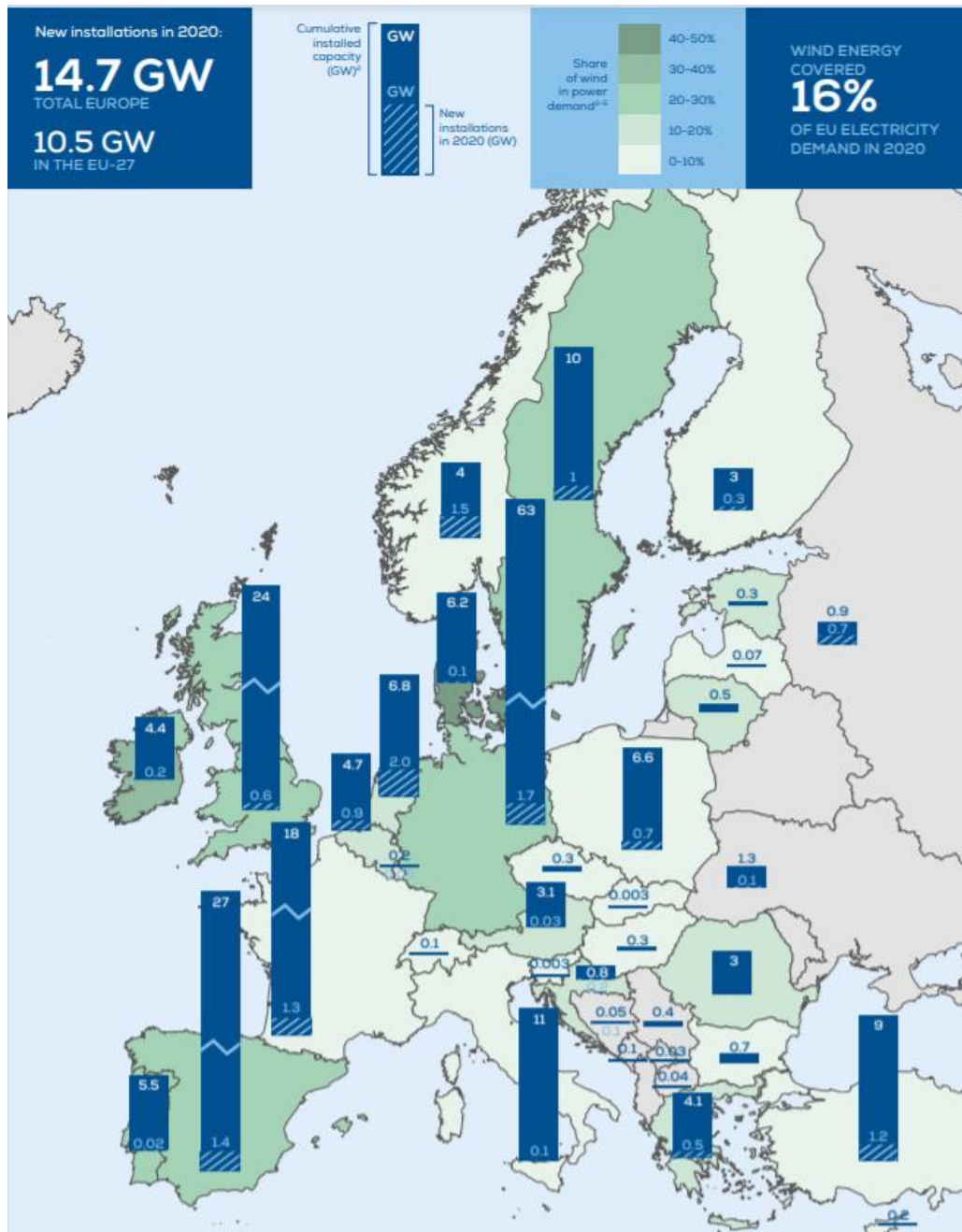
Γράφημα 1-1: Εγκατεστημένη χωρητικότητα σε MW παγκοσμίως την περίοδο 2015-2020 ^[10]

Στο γράφημα 1-1 παρατηρούμε πως η αύξηση της εγκατεστημένης χωρητικότητας παγκοσμίως από το 2015 έως το 2020 έχει αυξηθεί κατά 71%, ενώ μόνο το 2020 προστέθηκαν 93 GW, αριθμός που αποτελεί παγκόσμιο ρεκόρ εγκατάστασης ισχύς σε ένα έτος.

Αυτή η αύξηση της χρήσης της αιολικής ενέργειας συνοδεύεται από χαμηλές τιμές για την επικείμενη ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η χερσαία αιολική ενέργεια είναι ήδη η φθηνότερη επιλογή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και το κόστος συνεχίζει να μειώνεται. Η συνεισφορά αιολικής ενέργειας είναι το κλάσμα της ενέργειας που παράγεται από τον άνεμο σε σύγκριση με τη συνολική παραγωγή ενέργειας. Η συνεισφορά της αιολικής ενέργειας στην παγκόσμια χρήση ηλεκτρικής ενέργειας στο τέλος του 2018 ήταν 4.8% από 3.5% το 2015.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, το 2020, η συνεισφορά της αιολικής ενέργειας στην ευρωπαϊκή χρήση ηλεκτρικής ενέργειας ανήλθε στο 16%. Η Δανία ήταν η χώρα με την υψηλότερη συνεισφορά, αφού το 40-50% της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας της προήλθε από την αιολική. Ακολούθησαν η Ιρλανδία με 30-40% και Γερμανία, Ηνωμένο Βασίλειο, Ισπανία, Πορτογαλία και Σουηδία με 20-30% καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας της παράγεται από αιολική ενέργεια. Τέλος, για τη χώρα μας το αντίστοιχο ποσοστό ήταν περί το 10-20% ^[11].

Πέρα από αυτά, παρά την πανδημία της νόσου Covid-19, κατά το 2020 προστέθηκαν 14.7 GW και ανήλθαν στα 220 GW στο σύνολο (αύξηση 7%).



Σχήμα 1-1: Συνεισφορά αιολικής ενέργειας σε ευρωπαϊκό επίπεδο ^[11]

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως σε παγκόσμιο επίπεδο, τουλάχιστον 83 χώρες χρησιμοποιούν την αιολική ενέργεια για να τροφοδοτήσουν τα ηλεκτρικά τους δίκτυα.

1.3 Ανεμογεννήτριες

Η ανεμογεννήτρια είναι μια αιολική μηχανή που μετατρέπει τον άνεμο από κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Η κατασκευή της αποτελείται από μία στήλη κάθετη προς το έδαφος και από μία τουρμπίνα στην κορυφή της. Μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές όπως η φόρτιση μπαταριών, για συμπληρωματική ενέργεια σε σκάφη και τροχόσπιτα ή για τροφοδοσία ρεύματος σε πινακίδες. Μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για παροχή ρεύματος σε σπίτια. Πλήθος τέτοιων ανεμογεννητριών συγκροτούν τα αιολικά πάρκα, που αποτελούν ανανεώσιμη

πηγή ενέργειας. Πολλές χώρες έχουν κατασκευάσει αιολικά πάρκα, με σκοπό τη μείωση εκπομπής ρυπογόνων ουσιών και την απεξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα. Μια εγκατάσταση ανεμογεννητριών αποτελείται από τα απαραίτητα συστήματα που απαιτούνται για την εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου, τη μετατροπή της μηχανικής περιστροφής σε ηλεκτρική ενέργεια και άλλα συστήματα για την εκκίνηση, τη διακοπή και τον έλεγχο του στροβίλου.

1.3.1 Τύποι ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες, χρησιμοποιώντας μια σειρά από τεχνικές μοντελοποίησης, να εκμεταλλεύονται την αιολική ενέργεια που υπάρχει στην περιοχή. Η αεροδυναμική μοντελοποίηση χρησιμοποιείται για να καθοριστεί το βέλτιστο ύψος του πύργου, τα συστήματα ελέγχου, τον αριθμό και το σχήμα των λεπίδων. Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια.

Οι ανεμογεννήτριες μπορεί να περιστρέφονται πάνω σε οριζόντιο ή κάθετο άξονα.

1.3.1.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι συμβατικές ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μπορούν να χωριστούν σε τρία βασικά εξαρτήματα:

- ✓ Ο ρότορας, ο οποίος αποτελεί περίπου το 20% του κόστους της ανεμογεννήτριας, και περιλαμβάνει τις λεπίδες οι οποίες μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε χαμηλής ταχύτητας κινητική.
- ✓ Η ανεμογεννήτρια, η οποία αποτελεί περίπου το 34% του κόστους. Περιλαμβάνει τη γεννήτρια, τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου, και (συνήθως) το κιβώτιο ταχυτήτων τη διευθυντήρια οδηγό ταχύτητας ή τη συνεχώς μεταβαλλόμενη μετάδοση, οι οποίες μετατρέπουν τη χαμηλή ταχύτητα περιστροφής σε υψηλή, ώστε να παραχθεί ενέργεια.
- ✓ Ο πύργος υποστήριξης, ο οποίος αποτελεί περίπου το 15% του κόστους και περιλαμβάνει τον πύργο και το μηχανισμό εκτροπής στροφών.

Μία ανεμογεννήτρια 1,5 MW (συχνός τύπος στις ΗΠΑ), έχει συνήθως ύψος 80 μέτρων. Ο ρότορας ζυγίζει 22.000 κιλά, ενώ η γεννήτρια, μαζί με τα υπόλοιπα εξαρτήματα ζυγίζει 52.000 κιλά. Ο πύργος αποτελείται από 26.000 κιλά χαλύβδινου οπλισμού και 190 κυβικά μέτρα σκυρόδεμα. Στη βάση, ο πύργος έχει 15 μέτρα διάμετρο, ενώ το τοίχωμα είναι 2.4 μέτρα παχύ. Ανάμεσα σε όλα τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες έχουν την υψηλότερη αποτελεσματική ένταση σε σχέση με την επιφάνεια.



Εικόνα 1-2: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα ^[15]

1.3.1.2 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα

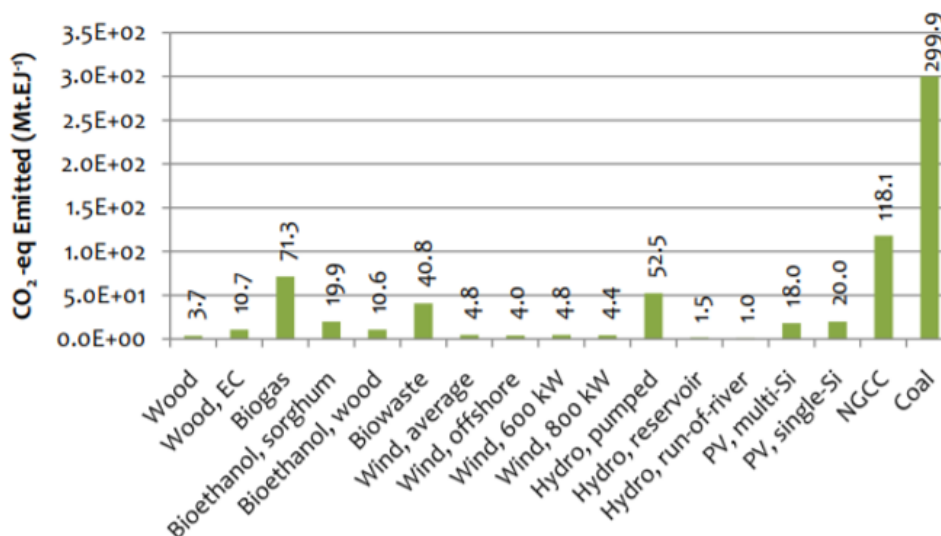
Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα έχουν τοποθετημένο το ρότορα κάθετα στο έδαφος. Το βασικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου, είναι πως η γεννήτρια δε χρειάζεται να είναι στραμμένη προς την κατεύθυνση του ανέμου για να είναι παραγωγική, οπότε είναι πιο αποδοτική σε περιοχές με μεταβλητούς ανέμους, αφού περιστρέφονται κατά 360°. Επίσης, το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια βρίσκονται τοποθετημένα κοντά στο έδαφος, κάνοντάς τα πιο εύκολα προσβάσιμα για συντήρηση. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα αυτών των ανεμογεννητριών είναι ότι παράγουν πολύ λιγότερη ενέργεια κατά μέσο όρο με την πάροδο του χρόνου. Άλλα μειονεκτήματα αυτού του τύπου είναι η σχετικά χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, το υψηλότερο κόστος της γεννήτριας, ο χαμηλότερος συντελεστής απόδοσης, η μεγάλη φθορά των πτερυγίων λόγω της περιστροφής των 360° και η δυσκολία μοντελοποίησης του ανέμου κατά το σχεδιασμό, δυσκολεύοντας την ανάλυση και το σχεδιασμό του ρότορα κατά τη κατασκευή της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 1-3: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα ^[12]

1.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Τα αιολικά συστήματα έχουν αρνητικές και θετικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι αρνητικές αφορούν θανάτους πουλιών, θόρυβο και ενοχλήσεις από τις κατασκευές, αισθητικές επιπτώσεις και ρύπανση που συνδέεται με την αρχική ενέργεια για την κατασκευή των ανεμογεννητριών. Οι θετικές επιπτώσεις προκύπτουν από την υποκατάσταση των άλλων ρυπογόνων ενεργειακών συστημάτων. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή της αιολικής ενέργειας δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρή» μορφή ενέργειας, πολύ «φιλική» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύει υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αιολικής ενέργειας θεωρούνται σχετικά μικρές σε σύγκριση με αυτές των ορυκτών καυσίμων και έτσι θεωρείται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη. Στο γράφημα 1-2 παρατηρείτε πως η εξόρυξη άνθρακα εκπέμπει 60, ενώ η εξόρυξη φυσικού αερίου 24 φορές περισσότερο CO₂ σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες.



Γράφημα 1-2: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για ανανεώσιμες και μη τεχνολογίες ενέργειας [23]

Σε αξιολογήσεις των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κύκλου ζωής των πηγών ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες έχουν μέση τιμή εκπομπών 12 και 11 (gCO₂eq / kWh) για υπεράκτιους και χερσαίους στρόβιλους, αντίστοιχα. Φυσικά, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν σχεδόν καθόλου εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τα οικονομικά οφέλη των αιολικών συστημάτων θα αυξηθούν, εάν και όταν οι πηγές που εκπέμπουν παράγωγα του άνθρακα αρχίσουν να φορολογούνται. Τα χερσαία αιολικά πάρκα μπορούν να έχουν σημαντικό οπτικό αντίκτυπο στο τοπίο. Τα αιολικά πάρκα μαζί με το δίκτυο των στρόβιλων, των οδών πρόσβασης, των γραμμών μεταφοράς και των υποσταθμών πρέπει συνήθως να καλύπτουν περισσότερη γη και να είναι πιο απλωμένα από άλλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Για την τροφοδοσία μεγάλων πόλεων μόνο από τον άνεμο θα απαιτούνταν η κατασκευή αιολικών πάρκων μεγαλύτερων από τις ίδιες τις πόλεις. Τα αιολικά πάρκα είναι συνήθως χτισμένα σε άγριες και αγροτικές περιοχές, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε "εκβιομηχάνιση της υπαίθρου" και απώλεια ενδιαιτημάτων (δηλαδή το φυσικό περιβάλλον στο οποίο ζει και αναπαράγεται ένα είδος, ένας πληθυσμός ή μια βιοκοινότητα).

Πίνακας 1-1: Εκμετάλλευση εδάφους για ανανεώσιμες και μη τεχνολογίες ενέργειας [13]

	Total Land Occupation (km ² ·a)	Land Transformation (km ²)
Wood	18880	2.52
Wood, EC	18927	2.57
Biogas	358	5.86
Bioethanol, sorghum	40332	3.18
Bioethanol, wood	81794	8.25
Biowaste	1009	1.16
Wind, average	638	0.51
Wind, offshore	103	0.53
Wind, 600 kW	556	0.50
Wind, 800 kW	445	0.47
Hydro, pumped	1046	9.45
Hydro, reservoir	35	2.36
Hydro, run-of-river	24	-0.03
PV, multi-Si	849	3.48
PV, single-Si	841	3.57
NGCC	76	26.22
Coal	8328	14.05

Στον πίνακα 1-1 παρατηρούμε η έκταση εδάφους που απαιτείται για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι 638 km², ενώ η εξόρυξη άνθρακα απαιτεί έκταση 13 φορές μεγαλύτερη.

Η απώλεια ενδιαπημάτων είναι η μεγαλύτερη επίπτωση των αιολικών πάρκων στην άγρια φύση. Υπάρχουν αναφορές για υψηλότερη θνησιμότητα πουλιών και νυχτερίδων στις ανεμογεννήτριες καθώς υπάρχουν στην γύρω περιοχή και άλλες τεχνητές κατασκευές. Παρόλο που το ποσοστό των θανάτων που προκαλούνται από τις ανεμογεννήτριες είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα εμπόδια που βάζουν οι άνθρωποι στο δρόμο τους, εξακολουθεί να είναι ένα ζήτημα που προκαλεί ανησυχία. Η πρόληψη και ο μετριασμός των θανάτων των άγριων ζώων, καθώς και η προστασία του φυσικού περιβάλλοντος επηρεάζουν τη θέση και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών.

Οι αντιλήψεις των ανθρώπων για την αισθητική των αιολικών πάρκων είναι σημαντικές για τη χωροθέτηση των μηχανών. Μερικές απλές σκέψεις μπορούν να κάνουν τις ανεμογεννήτριες πολύ πιο αποδεκτές. Η τακτοποίηση των ανεμογεννητριών του ίδιου μεγέθους σε ενιαίες γραμμές και στήλες φαίνεται να βοηθά, όπως και ο χρωματισμός τους με ανοιχτό γκρι χρώμα για να συνδυάζονται με τον ουρανό. Οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες περιστρέφονται πιο αργά και έτσι δεν αποσπούν τόσο την προσοχή.

Ο θόρυβος από μια ανεμογεννήτρια ή ένα αιολικό πάρκο είναι ένα άλλο αμφισβητήσιμο φαινόμενο και οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να ελέγχουν αυτόν τον θόρυβο. Είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί το πραγματικό επίπεδο θορύβου που προκαλείται από τις ανεμογεννήτριες, επειδή ο θόρυβος του περιβάλλοντος που προκαλείται από τον ίδιο τον άνεμο καλύπτει τον θόρυβο των γεννητριών. Σε απόσταση λίγων μόνο διαμέτρων δρομέα μακριά από μια ανεμογεννήτρια, το επίπεδο του ήχου είναι συγκρίσιμο με έναν άνθρωπο που ψιθυρίζει. Υπάρχουν ανέκδοτες αναφορές αρνητικών επιπτώσεων στην υγεία από το θόρυβο σε άτομα που ζουν πολύ κοντά σε ανεμογεννήτριες, ωστόσο η έρευνα από επιστήμονες γενικά δεν υποστήριξε αυτούς τους ισχυρισμούς. Επιπλέον, η Πολεμική Αεροπορία και το Ναυτικό των Ηνωμένων Πολιτειών εξέφρασαν ανησυχία ότι η τοποθέτηση μεγάλων ανεμογεννητριών κοντά σε βάσεις "θα επηρεάσει αρνητικά το ραντάρ σε σημείο που οι ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας θα χάσουν τη θέση του αεροσκάφους.

Πριν από το 2019, πολλές λεπίδες ανεμογεννητριών είχαν κατασκευαστεί από fiberglass με σχέδια που παρείχαν διάρκεια ζωής μόνο 10 έως 20 ετών. Δεδομένου ότι δεν υπήρχε αγορά ανακύκλωσης αυτών των παλαιών λεπίδων, απορρίπτονταν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Επειδή οι λεπίδες έχουν σχεδιαστεί για να είναι κοίλες, καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο σε σύγκριση με τη μάζα τους. Επομένως, οι υπάλληλοι υγειονομικής ταφής έχουν αρχίσει να απαιτούν από τους χειριστές να συνθλίβουν τις λεπίδες προτού μπορέσουν να τις πετάξουν στη χωματερή.

1.5 Οικονομικά στοιχεία

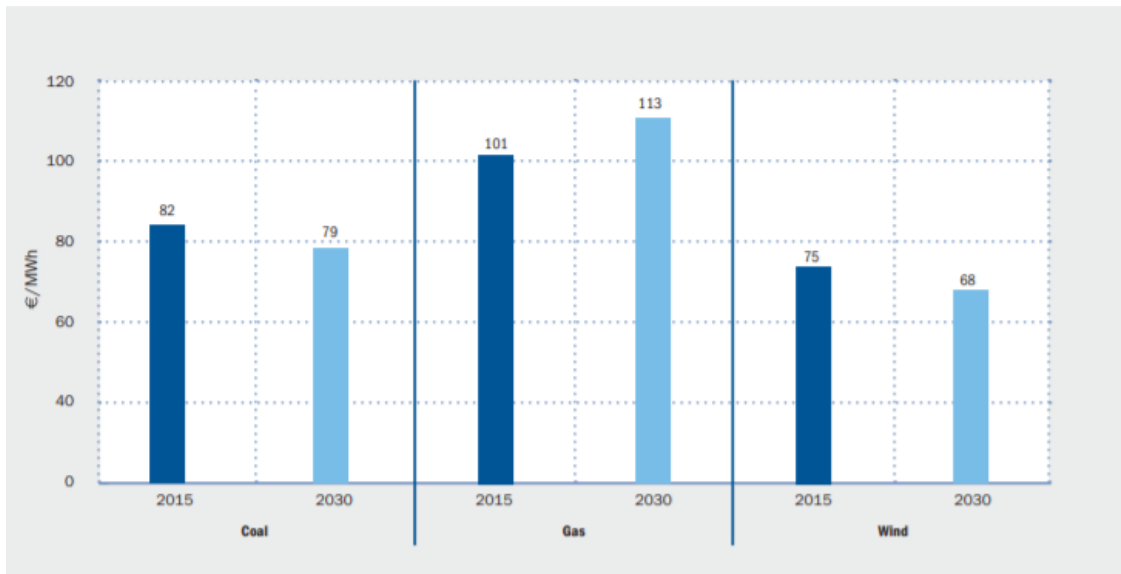
Η αιολική ενέργεια έχει εξελιχθεί ραγδαία τις τελευταίες τρεις δεκαετίες. Οι ανεμογεννήτριες έχουν γίνει πολύ μεγαλύτερες, οι συντελεστές χωρητικότητας έχουν αυξηθεί και το κόστος του συστήματος έχει μειωθεί σημαντικά. Η αιολική ενέργεια έχει γίνει σήμερα η πιο αποδοτική τεχνολογία (με οικονομικούς όρους) μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και οι προβλέψεις δείχνουν ότι μέσα σε λίγα χρόνια θα παρέχει ενέργεια, χωρίς ειδικές επιδοτήσεις, τόσο φθηνά όσο οποιαδήποτε άλλη συμβατική πηγή. Τα οικονομικά δεδομένα της αιολικής ενέργειας εξαρτώνται από έναν αριθμό βασικών παραγόντων, στους οποίους περιλαμβάνονται οι ακόλουθοι:

- ✓ Το κόστος επένδυσης ολόκληρου του συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει την ανεμογεννήτρια (πτερυγία, γεννήτρια, πύργος και θεμελίωση), τις κατασκευές, τις συνδέσεις δικτύου, τον σχεδιασμό του έργου και τα κόστη δανειοδότησης. Αυτά αντιπροσωπεύουν περίπου το 80% του σταθμισμένου κόστους της αιολικής ενέργειας.

- ✓ Τα μεταβλητά κόστη, ως επί το πλείστον λειτουργίας και συντήρησης, αλλά και το ετήσιο κόστος της ασφάλισης, των φόρων, της μίσθωσης της γης και της συνεχούς διαχείρισης και διοίκησης. Αυτά αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του υπόλοιπου 20% του κόστους.
- ✓ Η τοποθεσία, κυρίως αν πρόκειται για χερσαίο ή υπεράκτιο σύστημα. Τα υπεράκτια συστήματα κοστίζουν περίπου διπλάσια από τα χερσαία συστήματα.
- ✓ Ο συντελεστής χωρητικότητας, ο οποίος εξαρτάται από το αιολικό δυναμικό, το ύψος της ατράκτου και τον λόγο της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας προς την επιφάνεια σάρωσης.
- ✓ Τα κίνητρα ή οι επιδοτήσεις, τα οποία μπορεί να είναι σε άλλες μορφές, όπως μειώσεις στη φορολογία, κίνητρα επενδύσεων ή κίνητρα επιταχυνόμενης απόσβεσης.
- ✓ Η χρηματοδότηση, η οποία περιλαμβάνει το μείγμα των ίδιων κεφαλαίων και του δανεισμού, καθώς και τη δομή του συστήματος ανάκτησης κεφαλαίου επένδυσης.

Η τιμή της αιολικής ενέργειας είναι πολύ πιο σταθερή από τις μεταβαλλόμενες τιμές των πηγών ορυκτών καυσίμων. Το οριακό κόστος της αιολικής ενέργειας μόλις κατασκευαστεί ένας σταθμός είναι συνήθως μικρότερο από 1% ανά kWh. Ωστόσο, στο εκτιμώμενο μέσο κόστος ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να περιληφθεί το κόστος κατασκευής των εγκαταστάσεων στροβίλου και μεταφοράς, ο δανεισμός κεφαλαίων, η επιστροφή σε επενδυτές (συμπεριλαμβανομένου του κόστους κινδύνου), η εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή και άλλα στοιχεία, σε σχέση και με τη προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού, η οποία μπορεί να είναι μεγαλύτερη των 20 ετών. Οι εκτιμήσεις του ενεργειακού κόστους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από αυτές τις παραδοχές, επομένως τα δημοσιευμένα στοιχεία κόστους μπορούν να διαφέρουν σημαντικά. Το 2004, η αιολική ενέργεια κόστισε το 1/5 του ποσού που κόστιζε στη δεκαετία του 1980 και ορισμένοι περίμεναν ότι η πτωτική τάση θα συνέχιζε με τους μεγαλύτερους στροβίλους πολλαπλών μεγαβάτ που παρήχθησαν μαζικά. Το 2012 το κόστος κεφαλαίου για ανεμογεννήτριες ήταν σημαντικά χαμηλότερο από το 2008-2010, αλλά εξακολουθεί να υπερβαίνει τα επίπεδα του 2002.

Η αιολική ενέργεια έχει μερικά από τα χαμηλότερα κόστη, γεγονός που την καθιστά πολύ ανταγωνιστική σε σχέση με τα αντίστοιχα ορυκτά καύσιμα. Σύμφωνα με την έκθεση *The economics of the wind energy* ^[15] που δημοσιεύθηκε το 2009, το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από νέα αιολικά πάρκα είναι φθηνότερο από το νέο άνθρακα ή τις νέες μονάδες φυσικού αερίου βασικού φορτίου, δίνοντας και προβλέψεις για το 2030, όπως φαίνεται στο γράφημα 1-3.



Γράφημα 1-3: Κόστη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση ^[15]

Το κόστος έχει μειωθεί καθώς η τεχνολογία ανεμογεννητριών έχει βελτιωθεί. Υπάρχουν πλέον μακρύτερες και ελαφρύτερες λεπίδες ανεμογεννητριών, βελτιώσεις στην απόδοση του στροβίλου και αυξημένη απόδοση παραγωγής ενέργειας. Επίσης, το κόστος του αιολικού έργου και το κόστος συντήρησης συνέχισαν να μειώνονται. Έχει προταθεί ότι η καινοτομία σε κλίμακα θα μπορούσε να επιφέρει μείωση κόστους κατά 25% σε υπεράκτια αιολική ενέργεια έως το 2020. Εκτιμάται ότι μέχρι το 2025 η ενέργεια από την υπεράκτια αιολική ενέργεια θα είναι μια από τις φθηνότερες, επεκτάσιμες λύσεις στο Ηνωμένο Βασίλειο, σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και ορυκτά καύσιμα, εάν το πραγματικό κόστος για την κοινωνία συνυπολογιστεί με το κόστος της ενεργειακής εξίσωσης. Υπολογίζεται ότι το κόστος αυτή τη στιγμή είναι 43 EUR / MWh για την χερσαία και 72 EUR / MWh για υπεράκτια αιολική ενέργεια. Το 2016, το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL) ^[17] του Τμήματος Ενέργειας δημοσίευσε μια νέα έκθεση σχετικά με τη μείωση του κόστους αιολικής ενέργειας κατά 50% έως το 2030. Το NREL αναμένεται να επιτύχει πρόοδο στον σχεδιασμό, τα υλικά και τους ελέγχους της ανεμογεννήτριας για να εξασφαλίσει βελτίωση στην απόδοση και μείωση του κόστους, με τη μείωση να προβλέπεται πως θα κυμαίνεται μεταξύ 24% και 30% έως το 2030. Σε πιο επιθετικές περιπτώσεις, οι ειδικοί εκτιμούν μείωση κόστους έως και 40% εάν τα προγράμματα έρευνας, ανάπτυξης και τεχνολογίας έχουν ως αποτέλεσμα πρόσθετη αποδοτικότητα.

Η αιολική βιομηχανία στις Ηνωμένες Πολιτείες δημιουργεί δεκάδες χιλιάδες θέσεις εργασίας και δισεκατομμύρια δολάρια οικονομικής δραστηριότητας. Τα αιολικά έργα παρέχουν τοπικούς φόρους ή πληρωμές αντί των φόρων και ενισχύουν την οικονομία των αγροτικών κοινοτήτων παρέχοντας εισόδημα στους αγρότες με ανεμογεννήτριες στη γη τους. Η αιολική ενέργεια σε πολλές περιπτώσεις λαμβάνει οικονομική ή άλλη υποστήριξη για να ενθαρρύνεται η ανάπτυξή της. Ακόμα, η αιολική ενέργεια ωφελείται από επιδοτήσεις σε πολλές περιπτώσεις είτε για να αυξηθεί η ελκυστικότητά της είτε για να αντισταθμίσει τις επιδοτήσεις που λαμβάνονται από άλλες μορφές παραγωγής που έχουν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στην κοινωνία.

Ένα φορολογικό όφελος που λαμβάνουν όσοι ασχολούνται με την αιολική ενέργεια είναι η επιταχυνόμενη απόσβεση. Πολλές αμερικανικές πολιτείες παρέχουν επίσης κίνητρα, όπως απαλλαγή από τον φόρο ιδιοκτησίας, εντολές αγοράς και πρόσθετες αγορές για "πράσινες πιστώσεις". Χώρες όπως ο Καναδάς και η Γερμανία παρέχουν επίσης κίνητρα για την κατασκευή ανεμογεννητριών, όπως εκπτώσεις φόρου ή ελάχιστες τιμές αγοράς για παραγωγή αιολικής ενέργειας, με εξασφαλισμένη

πρόσβαση στο δίκτυο (μερικές φορές αναφέρεται ως τιμολόγια τροφοδοσίας). Αυτά τα τιμολόγια τροφοδοσίας συνήθως ορίζονται πολύ πάνω από τις μέσες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι δευτερεύουσες δυνάμεις της αγοράς παρέχουν επίσης κίνητρα για τις επιχειρήσεις να χρησιμοποιούν την αιολική ενέργεια, ακόμη και αν υπάρχει μια premium τιμή για την ηλεκτρική ενέργεια. Για παράδειγμα, οι κοινωνικά υπεύθυνοι κατασκευαστές πληρώνουν στις εταιρείες κοινής ωφέλειας ένα ασφάλιστρο που επιδοτεί και χτίζει νέα υποδομή αιολικής ενέργειας. Οι εταιρείες χρησιμοποιούν αιολική ενέργεια, και σε αντάλλαγμα, μπορούν να ισχυριστούν ότι καταβάλλουν ισχυρές «πράσινες» προσπάθειες. Στις ΗΠΑ, ο οργανισμός Green-e παρακολουθεί τη συμμόρφωση των επιχειρήσεων με αυτές τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι τιμές του στροβίλου έχουν μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια λόγω σκληρότερων ανταγωνιστικών συνθηκών, όπως η αυξημένη χρήση των δημοπρασιών ενέργειας και η κατάργηση των επιδοτήσεων σε πολλές αγορές. Για παράδειγμα, η Vestas, κατασκευαστής ανεμογεννητριών, της οποίας ο μεγαλύτερος χερσαίος στρόβιλος μπορεί να αντλήσει ενέργεια 4.2 MW, αρκετά για να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε περίπου 5.000 σπίτια, έχει δει τις τιμές για τους στρόβιλους της να πέφτουν από 950.000 ευρώ ανά MW στα τέλη του 2016, σε περίπου 800.000 ευρώ ανά MW το τρίτο τρίμηνο του 2017.

1.6 Αντικείμενο παρούσας διπλωματικής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, τα τελευταία έτη αυξάνεται με γεωμετρική πρόοδο. Το γεγονός ότι ο ορυκτός πλούτος, μοιάζει να φθίνει, με κίνδυνο την ολική εξάλειψη του, σε συνδυασμό με τα σημαντικά οικολογικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ο πλανήτης, καθιστούν μονόδρομο την εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η υπερθέρμανση του πλανήτη αποτελεί ένα μείζον ζήτημα και πολλές χώρες, ανάμεσα τους και υπερδυνάμεις, προσπαθούν να το περιορίσουν. Η αιολική ενέργεια εντάσσεται στις 'καθαρές' μορφές ενέργειας, δηλαδή με σχεδόν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων αερίων, οι οποίες ευθύνεται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Γι' αυτόν το λόγο, πολυάριθμοι οργανισμοί και χώρες επενδύουν σε ερευνητικά προγράμματα, με στόχο τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.

Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών, ο μηχανολόγος μηχανικός προσπαθεί να βελτιστοποιήσει τα μηχανολογικά εξαρτήματα με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας της ανεμογεννήτριας. Από την άλλη, ο δομοστατικός μηχανικός αναζητά τρόπους αύξησης του ύψους της ανεμογεννήτριας, ώστε οι ρότορες να λειτουργούν σε μεγαλύτερο ύψος, όπου ο άνεμος αναπτύσσει μεγαλύτερες ταχύτητες και είναι πιο σταθερός. Αυτές είναι δύο παράμετροι, οι οποίες μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την παραγόμενη ποσότητα ενέργειας. Προς αυτήν την κατεύθυνση, στην παρούσα διπλωματική θα μελετηθεί μια βάση ανεμογεννήτριας ενδεικτικού ύψους 60 m, πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί μια συμβατική ανεμογεννήτρια ενδεικτικού ύψους 117.5 m. Σκοπός είναι να ερευνηθεί αν η κατασκευή αυτή, μπορεί να ικανοποιήσει τους ελέγχους, ως οφείλει.

2 ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αρχές που θα πρέπει να ακολουθηθούν, ώστε να σχεδιαστεί με ασφάλεια η ανεμογεννήτρια. Μερικές από αυτές, θα εφαρμοστούν και για το σχεδιασμό της βάσης της ανεμογεννήτριας. Στόχος του κεφαλαίου είναι να γίνει σαφές τι πρέπει να λαμβάνει υπόψιν ένας μηχανικός, κατά το σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας.

2.1 Συνδυασμοί φόρτισης

Μια ανεμογεννήτρια θα πρέπει να αναλυθεί για τα διάφορα είδη φορτίων, με τα οποία θα καταπονηθεί κατά τη διάρκεια της ζωής της. Κύριο μέλημα του μηχανικού, είναι η διασφάλιση ότι η κατασκευή θα αντέξει αυτά τα φορτία με επαρκές περιθώριο ασφαλείας. Αυτή η διαδικασία συστηματοποιείται με ανάλυση της κατασκευής για διάφορους συνδυασμούς φόρτισης. Οι συνδυασμοί φόρτισης αποτελούνται από διάφορες καταστάσεις σχεδιασμού και εξωτερικές συνθήκες που μπορεί να επηρεάσουν την κατασκευή.

2.1.1 Καταστάσεις Σχεδιασμού

Οι καταστάσεις σχεδιασμού μπορούν χωριστούν σε λειτουργικές και προσωρινές συνθήκες.

Οι συνθήκες λειτουργίας αποτελούνται από:

- ✓ Κανονική λειτουργία
- ✓ Παραγωγή ενέργειας
- ✓ Απότομη διακοπή λειτουργίας, λειτουργία στο ρελαντί και απόλυτη ακινησία

Οι προσωρινές συνθήκες αποτελούνται από:

- ✓ Μεταφορά
- ✓ Εγκατάσταση και συναρμολόγηση
- ✓ Σφάλμα, όπως σφάλμα στο λειτουργικό σύστημα
- ✓ Συντήρηση και επιδιόρθωση

- ✓ Δοκιμαστική λειτουργία

2.1.2 Εξωτερικές συνθήκες

Κύρια εξωτερική συνθήκη στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας είναι ο άνεμος. Οι συνθήκες ανέμου μπορούν να χωριστούν σε κανονικές και ακραίες, και θα πρέπει να ελέγχονται. Το πρότυπο IEC-61400-1 ^[4] ορίζει τα παρακάτω είδη ανέμου:

- ✓ Κανονική κατανομή ανέμου
- ✓ Κανονικές συνθήκες τύρβης
- ✓ Ακραία παρατεταμένη ριπή
- ✓ Ακραία αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου
- ✓ Ακραία τιμή ταχύτητας ριπής ανέμου σε κατάσταση λειτουργίας
- ✓ Ακραία τιμή ταχύτητας ανέμου
- ✓ Ακραία εναλλαγή κλίσης ανέμου

Ενώ σύμφωνα με το σχεδιαστικό πρότυπο 'Germanischer Lloyd' ^[6] άλλες εξωτερικές συνθήκες που επηρεάζουν την κατασκευή και πρέπει να ελέγχονται είναι:

- ✓ Φυσιολογικές και ακραίες μεταβολές της θερμοκρασίας
- ✓ Υγρασία
- ✓ Πυκνότητα αέρα
- ✓ Ακτινοβολία και υπεριώδες φως
- ✓ Πάγος, βροχή, χιόνι, χαλάζι
- ✓ Χημικές ουσίες (Ατμοσφαιρική διάβρωση)
- ✓ Σεισμός
- ✓ Κεραυνός
- ✓ Αλατότητα

2.1.3 Σχεδιαστικοί Συνδυασμοί φόρτισης

Οι σχεδιαστικοί συνδυασμοί φόρτισης που αναλύονται κατά τη διαδικασία σχεδιασμού μιας ανεμογεννήτριας αποτελούνται από συνδυασμούς μεταξύ των σχεδιαστικών καταστάσεων παράγραφος 2.1.1 αλλά και των εξωτερικών συνθηκών παράγραφος 2.1.2. Αυτοί σύμφωνα με το πρότυπο IEC-61400-1 ^[4] είναι:

- ✓ Κανονική λειτουργία και κανονικές εξωτερικές συνθήκες
- ✓ Κανονική λειτουργία και ακραίες εξωτερικές συνθήκες
- ✓ Καταστάσεις που έχει προκύψει βλάβη στο σύστημα λειτουργίας και κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν και ακραίες εξωτερικές συνθήκες. Τέτοια σφάλματα μπορεί να είναι σφάλμα στο δίκτυο ή στο σύστημα πέδησης της ανεμογεννήτριας
- ✓ Μεταφορά, εγκατάσταση και συντήρηση με κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες

Πίνακας 2-1: Σχεδιαστικοί συνδυασμοί φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο IEC-61400-1 [4]

Table 4-2. Design load cases, cf. IEC 61400-1.			
Design situation	Wind condition	Other conditions	Type of analysis
Power production	Normal turbulence		Ultimate
	Normal turbulence		Fatigue
	Extreme coherent gust with direction change		Ultimate
	Normal wind profile	External electrical fault	Ultimate
	Extreme operating gust, one-year recurrence period	Loss of electrical connection	Ultimate
	Extreme operating gust, fifty-year recurrence period		Ultimate
	Extreme wind shear		Ultimate
	Extreme direction change, fifty-year recurrence period		Ultimate
	Extreme coherent gust		Ultimate
Power production plus occurrence of fault	Normal wind profile	Control system fault	Ultimate
	Normal wind profile	Protection system fault or preceding internal electrical fault	Ultimate
	Normal turbulence	Control or protection system fault	Fatigue
Start-up	Normal wind profile		Fatigue
	Extreme operating gust, one-year recurrence period		Ultimate
	Extreme direction change, one-year recurrence period		Ultimate
Normal shutdown	Normal wind profile		Fatigue
	Extreme operating gust, one-year recurrence period		Ultimate
Emergency shutdown	Normal wind profile		Ultimate
Parked (standing still or idling)	Extreme wind speed, fifty-year recurrence period	Possible loss of electric power network	Ultimate
	Normal turbulence		Fatigue
Parked and fault conditions	Extreme wind speed, one-year recurrence period		Ultimate
Transport, assembly, maintenance and repair	To be stated by manufacturer		Ultimate

Ο πίνακας 2-1 απεικονίζει τους διάφορους συνδυασμούς φόρτισης με τους οποίους θα πρέπει να ελεγχθεί η κατασκευή καθώς και το είδος της ανάλυσης που πρέπει να γίνει σε κάθε συνδυασμό ήτοι έλεγχος κόπωσης ή αστοχίας σύμφωνα με το πρότυπο IEC-61400-1 [4].

2.2 Είδη φορτίων

Τα εξωτερικά φορτία που δρουν σε μία ανεμογεννήτρια είναι κυρίως φορτία ανέμου. Μία ανεμογεννήτρια περιέχει λεπτά στοιχεία όπως τα πτερύγια και τον πύργο και καταπονείται από δυνάμεις αδράνειας μαζί με φορτία βαρύτητας τα οποία δρουν σε αυτά τα στοιχεία.

2.2.1 Αδρανειακά και βαρυτικά φορτία

Σύμφωνα με το πρότυπο σχεδιασμού DNV/Risø ^[5] τα φορτία αδράνειας και βαρύτητας στον ρότορα της ανεμογεννήτριας είναι φορτία εξαρτώμενα από τη μάζα. Η φυγοκεντρική δύναμη της διατομής F_c εξαρτάται από τη γωνιακή ταχύτητα του ρότορα, την ακτινική του θέση και τη μάζα κάθε πτερυγίου. Στην αρχή του πτερυγίου η φυγοκεντρική δύναμη είναι:

$$F_c = \sum_{i=1}^n m_i \times r_i \times \omega^2 \quad (2-1)$$

Όπου:

m_i : η μάζα του i -οστού στοιχείου πτερυγίου σε kg

ω : η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα σε rad/s

r_i : η ακτινική θέση του i -οστού στοιχείου πτερυγίου σε m

Η βαρυτική δύναμη ορίζεται ως:

$$F_g = \sum_{i=1}^n m_i \times g \quad (2-2)$$

Όπου:

m_i : η μάζα του i -οστού στοιχείου πτερυγίου σε kg

g : 9.82 m/s²

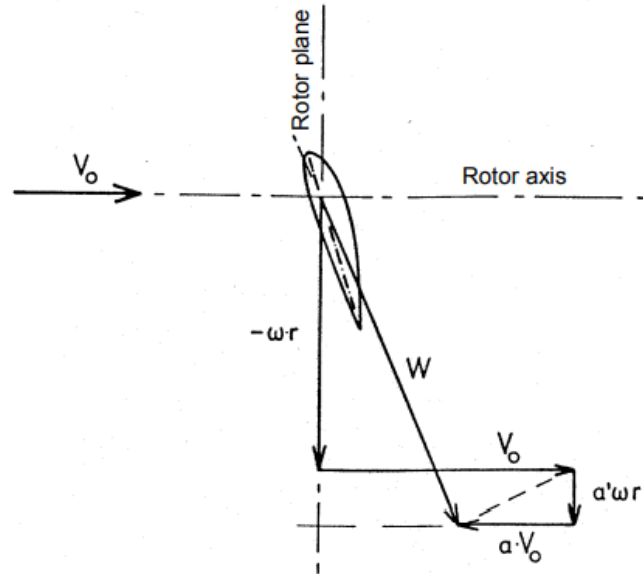
Το πτερύγιο έχει διακριτοποιηθεί σε n στοιχεία.

2.2.2 Αεροδυναμικά Φορτία

Τα αεροδυναμικά φορτία μπορούν να διακριτοποιηθούν για τη δράση τους σε δύο τμήματα της ανεμογεννήτριας. Αυτά είναι τα πτερύγια και ο πύργος. Ακολουθεί η περιγραφή τους διεξοδικά. Όπως αυτά ορίζονται στο σχεδιαστικό πρότυπο DNV/Risø ^[5].

2.2.2.1 Πτερύγια

Η πραγματική ροή του ανέμου κοντά στον ρότορα της ανεμογεννήτριας είναι αρκετά περίπλοκο να υπολογιστεί, καθώς ο ίδιος ο ρότορας προκαλεί ταχύτητες. Ως εκ τούτου, αποτελεί κοινή πρακτική η χρησιμοποίηση μιας απλοποιημένης μεθόδου για τον υπολογισμό των φορτίων του ρότορα για το σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2-1: Διάγραμμα ταχυτήτων στη διατομή του πτερυγίου [5]

Η ταχύτητα του ανέμου κάθετη στο επίπεδο του ρότορα είναι η V_0 . Όταν άνεμος περνάει το επίπεδο του ρότορα αυτή η ταχύτητα μειώνεται κατά ένα ποσοστό a' λόγω της αξονικής παρεμβολής (ρότορας). Ο ρότορας περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω . Επομένως, ένα στοιχείο του πτερυγίου σε απόσταση r_i , από τον άξονα του ρότορα θα κινείται με ταχύτητα $\omega \times r_i$ στο επίπεδο του ρότορα. Όταν ο άνεμος περνά το επίπεδο του ρότορα και αλληλεπιδρά με τον κινούμενο ρότορα, προκαλείται μια νέα εφαπτομενική ταχύτητα ανέμου ίση με $a' \times \omega \times r$. Η συνισταμένη ταχύτητα αυτών είναι αυτή που σημειώνεται με W στο σχήμα 2-2. Η ταχύτητα W ενισχύει τις αεροδυναμικές δυνάμεις που δρουν στο πτερύγιο, τη δύναμη άντωσης F_L και την οπισθέλκουσα δύναμη F_D , οι οποίες σύμφωνα με το πρότυπο σχεδιασμού DNV/Risø [5] είναι οι εξής:

$$F_L = \frac{1}{2} \times C_L \times \rho \times c \times W^2 \quad (2-3)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \times C_D \times \rho \times c \times W^2 \quad (2-4)$$

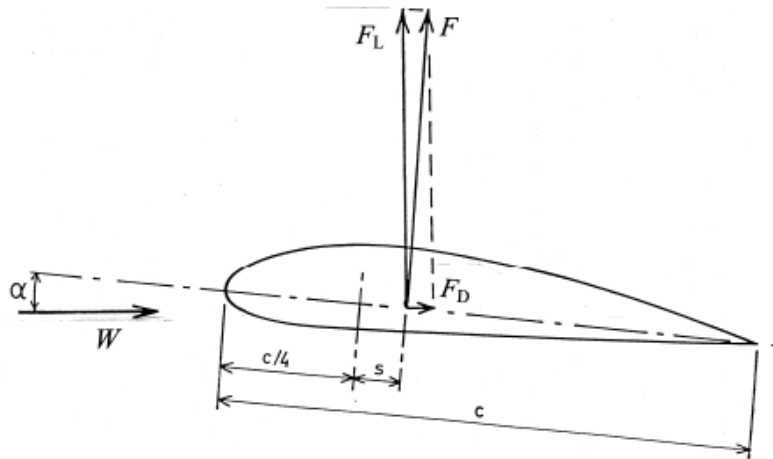
Όπου:

C_L : ο συντελεστής ανύψωσης

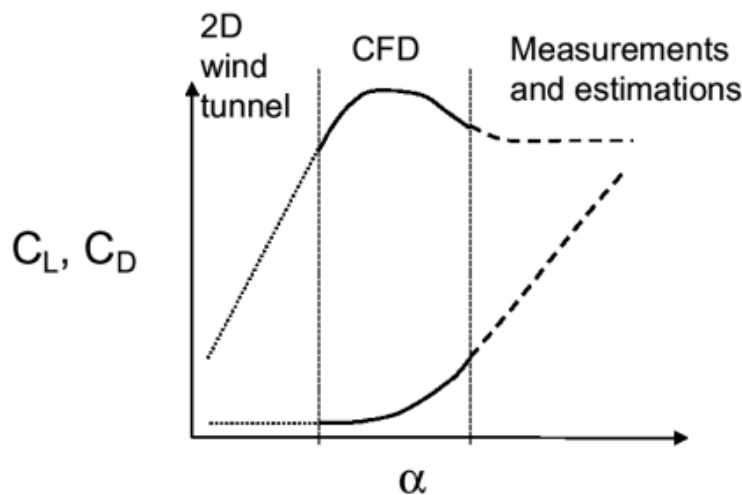
C_D : οι συντελεστές

ρ : η πυκνότητα αέρα

c : το μήκος χορδής πτερυγίου



Σχήμα 2-2: Δύναμη άντωσης F_L και οπισθέλκουσα F_D ^[5]



Σχήμα 2-3: Καμπύλες συντελεστών C_L και C_D ^[5]

2.2.2.2 Πύργος

Η οπισθέλκουσα δύναμη F_d , που δρα στο πύργο, μπορεί να υπολογιστεί από την προβαλλόμενη επιφάνεια που είναι κάθετη στη ροή του ανέμου.

$$F_d = 0.5 \times \rho \times A \times V_0^2 \times C_D \quad (2-5)$$

Όπου:

A : επιφάνεια που είναι προβαλλόμενη κάθετα στη ροή.

2.2.3 Φορτία λειτουργίας

Τα λειτουργικά φορτία σε μία ανεμογεννήτρια προκύπτουν όταν η ανεμογεννήτρια υπόκειται σε παροδικές λειτουργικές συνθήκες όπως το φρενάρισμα και η περιστροφή, ή όταν η γεννήτρες είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο. Τα πιο σημαντικά λειτουργικά φορτία σύμφωνα με το πρότυπο σχεδιασμού DNV/Risø ^[5] μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- ✓ Φορτία πέδησης από μηχανικά και αεροδυναμικά φρένα
- ✓ Παροδικά φορτία στο σύστημα μετάδοσης, πχ. προκαλούμενο από τη λειτουργία γεννήτριας
- ✓ Περιστρεφόμενα φορτία, δηλαδή φορτία παραγόμενα απευθείας από την περιστροφή
- ✓ Φορτία προκαλούμενα από τη κλίση ή τη δέσμευση των φρένων των πτερυγίων, τα οποία ξεκινάνε από το σύστημα ελέγχου

2.2.4 Άλλα φορτία

Άλλα φορτία ή επιδράσεις φορτίων που πρέπει να ληφθούν υπόψιν δονήσεις που μπορεί να προκληθούν από ακραία καιρικά φαινόμενα (π.χ. ανεμοστρόβιλος), απόσβεσης και αστάθειες που μπορεί να προκληθούν από δονήσεις των πτερυγίων. Επίσης, για ανεμογεννήτριες που είναι εγκατεστημένες στο νερό, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψιν φορτία που δημιουργεί το θαλάσσιο περιβάλλον όπως φορτία λόγω κυμάτων, θαλάσσιων ρευμάτων και φορτία πάγου.

2.3 Μερικοί συντελεστές ασφαλείας

Οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας λαμβάνονται υπόψη εξαιτίας αβεβαιοτήτων και μεταβλητότητας των φορτίων και των υλικών, αβεβαιοτήτων ως προς τις μεθόδους ανάλυσης και της σημασίας των δομικών στοιχείων όσον αφορά τις συνέπειες της αστοχίας.

2.3.1 Μερικοί συντελεστές ασφαλείας φορτίων

Για να διασφαλίσει ότι στις τιμές σχεδιασμού συμπεριλαμβάνονται τυχόν αβεβαιότητες αλλά και τυχόν μεταβλητότητα στα φορτία λαμβάνονται υπόψιν οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας, δηλαδή:

$$F_d = \gamma_f \times F_k \quad (2-6)$$

Όπου:

F_d : η σχεδιαστική τιμή για συγκεντρωτικό εσωτερικό φορτίο ή αντίδραση φορτίου με ταυτόχρονο πολλαπλασιασμό με φορτία από διάφορες άλλες πηγές για δεδομένη σχεδιαστικό συνδυασμό φόρτισης

γ_f : μερικός συντελεστής ασφάλειας για φορτία

F_k : η χαρακτηριστική τιμή φορτίου

Οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας για φορτία που χρησιμοποιούνται στο πρότυπο IEC-61400-1 [4] λαμβάνουν υπόψη:

- ✓ Πιθανές ανεπιθύμητες αποκλίσεις/αβεβαιότητες του φορτίου ως προς τη χαρακτηριστική του τιμή
- ✓ Τυχόν Αβεβαιότητες του μοντέλο φόρτισης

Πίνακας 2-2: Μερικοί συντελεστές ασφαλείας για φορτία ^[4]

Unfavourable loads			Favourable ⁹ loads
Type of design situation (see Table 2)			All design situations
Normal (N)	Abnormal (A)	Transport and erection (T)	
1,35*	1,1	1,5	0,9
<p>* For design load case DLC 1.1, given that loads are determined using statistical load extrapolation at prescribed wind speeds between V_{in} and V_{out}, the partial load factor for normal design situations shall be $\gamma_1 = 1,25$.</p> <p>If for normal design situations the characteristic value of the load response $F_{gravity}$ due to gravity can be calculated for the design situation in question, and gravity is an unfavourable load, the partial load factor for combined loading from gravity and other sources may have the value</p> $\gamma_1 = 1,1 + \varphi \zeta^2$ $\varphi = \begin{cases} 0,15 & \text{for DLC1.1} \\ 0,25 & \text{otherwise} \end{cases}$ $\zeta = \begin{cases} 1 - \left \frac{F_{gravity}}{F_k} \right ; & F_{gravity} \leq F_k \\ 1; & F_{gravity} > F_k \end{cases}$			

2.3.2 Μερικοί συντελεστές ασφαλείας υλικών

Για να διασφαλιστεί ότι στις τιμές σχεδιασμού συμπεριλαμβάνονται τυχόν αβεβαιότητες αλλά και τυχόν μεταβλητότητα στα υλικά λαμβάνονται υπόψιν οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας, δηλαδή:

$$f_d = \frac{1}{\gamma_m} \times f_k \quad (2-6)$$

Όπου:

f_d : σχεδιαστικές τιμές για φορτία

γ_m : μερικός συντελεστής ασφαλείας υλικών

f_k : χαρακτηριστικές τιμές για τις ιδιότητες των υλικών

Όσον αφορά τους συντελεστές ασφαλείας για τα υλικά το συγκεκριμένο πρότυπο ^[4], λαμβάνει υπόψη:

- ✓ Τυχόν ανεπιθύμητες αποκλίσεις/αβεβαιότητες της αντοχής του υλικού ως προς τη χαρακτηριστική τιμή του
- ✓ Πιθανές ανακρίβειες στην αξιολόγηση της αντοχής ορισμένων διατομών ή της επάρκειας τμημάτων της κατασκευής που φέρουν φορτία
- ✓ Αβεβαιότητες ως προς τις γεωμετρικές παραμέτρους
- ✓ Αβεβαιότητες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των υλικών της κατασκευής και εκείνων που μετρήθηκαν με δοκιμές ορισμένων δοκιμίων
- ✓ Αβεβαιότητες σε συντελεστές μετατροπής.

2.4 Έλεγχοι

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η κατασκευή για να λειτουργεί με ασφάλεια θα πρέπει όλοι οι έλεγχοι να ικανοποιούνται με επάρκεια.

2.4.1 Πλαστικός έλεγχος

Η οριακή κατάσταση του πλαστικού ελέγχου (Plastic Limit State LS1 ^[1]) θεωρείται η κατάσταση κατά την οποία η δυνατότητα της κατασκευής να αντισταθεί σε παραπάνω φορτία εξαντλείται λόγω διαρροής του υλικού. Η αντίσταση αυτή που προσφέρει η κατασκευή προέρχεται από το πλαστικό φορτίο κατάρρευσης, που εξασφαλίζεται από έναν μηχανισμό που βασίζεται στη θεωρία των μικρών μετατοπίσεων. Η οριακή κατάσταση θραύσης λόγω εφελκυσμού θεωρείται η κατάσταση κατά την οποία το τοίχωμα του κελύφους υπόκειται σε αστοχία λόγω εφελκυσμού με αποτέλεσμα το διαχωρισμό δύο σημείων του κελύφους. Όλοι οι συνδυασμοί φορτίσεων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον πλαστικό έλεγχο. Μία ή περισσότερες από τις παρακάτω μεθόδους ανάλυσης πρέπει να χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τάσεων σχεδιασμού όταν πραγματοποιούμε πλαστικό έλεγχο κατασκευής:

- ✓ Θεωρία μεμβρανών
- ✓ Γραμμική ελαστική ανάλυση (LA)
- ✓ Μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA)
- ✓ Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας (GMNA)

2.4.2 Έλεγχος ευστάθειας

Η οριακή κατάσταση λυγισμού (Buckling Limit State LS3 ^[1]) θεωρείται η κατάσταση κατά την οποία ολόκληρο ή μέρος της κατασκευής ξαφνικά αναπτύσει μεγάλες μετατοπίσεις στην επιφάνεια του κελύφους, που προκαλούνται λόγω της απώλειας ευστάθειας υπό μεγάλες θλιπτικές ή διατμητικές τάσεις στο τοίχωμα του κελύφους, με αποτέλεσμα την αδυναμία παραλαβής επιπρόσθετων τάσεων, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν την κατασκευή σε κατάρρευση. Μία ή περισσότερες από τις παρακάτω μεθόδους ανάλυσης, πρέπει να χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τάσεων σχεδιασμού κατά τον έλεγχο ευστάθειας της κατασκευής:

- ✓ Θεωρία μεμβρανών για άξονα με συμμετρικές συνθήκες
- ✓ Γραμμική ελαστική ανάλυση
- ✓ Γραμμική ανάλυση λυγισμού
- ✓ Μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA)
- ✓ Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας (GMNA)

Όλοι οι συνδυασμοί φόρτισης που προκαλούν θλιπτικές ή διατμητικές τάσεις στο τοίχωμα του κελύφους, πρέπει να ελέγχονται ως προς την ευστάθεια. Επειδή η αντοχή υπό οριακή κατάσταση λυγισμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της κατασκευής, οι αναλύσεις πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις γεωμετρικές ανοχές/ατέλειες.

2.4.2.1 Έλεγχος ευστάθειας μέσω τάσεων

Οι τιμές σχεδιασμού των τάσεων $\sigma_{x,ED}$, $\sigma_{\theta,ED}$ και $\sigma_{\chi\theta,ED}$ που λαμβάνονται από τη γραμμική ελαστική ανάλυση, πρέπει να ληφθούν υπόψη ως βασικές τιμές των θλιπτικών και διατμητικών τάσεων της μεμβράνης.

Η αντοχή σε λυγισμό πρέπει να ελέγχεται μέσω των τάσεων σχεδιασμού για λυγισμό, οι οποίες είναι:

$$\sigma_{\chi,Rd} = \sigma_{\chi,Rk} / \gamma_{M1}, \quad \sigma_{\theta,Rd} = \sigma_{\theta,Rk} / \gamma_{M1}, \quad \tau_{\chi\theta,Rd} = \tau_{\chi\theta,Rk} / \gamma_{M1} \quad (2-8)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι λυγισμού γ_{M1} έχει τιμή ίση ανάλογα με το πρότυπο που εφαρμόζεται. Κατά τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών τάσεων λυγισμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι μειωτικοί συντελεστές λυγισμού χ :

$$\sigma_{\chi,Rk} = \chi_{\chi} \times f_{yk}, \quad \sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} \times f_{yk}, \quad \tau_{\chi\theta,Rk} = \tau_{\chi\theta,Rk} \times \frac{f_{yk}}{\sqrt{3}} \quad (2-9)$$

Οι συντελεστές απομείωσης χ_{χ} , χ_{θ} και χ_{τ} πρέπει να υπολογίζονται συναρτήσει της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}$:

$$\chi = 1 \quad \text{όταν} \quad \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad (2-10)$$

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right) \quad \text{όταν} \quad \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_p \quad (2-11)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} \quad \text{όταν} \quad \bar{\lambda}_p < \bar{\lambda} \quad (2-12)$$

όπου:

α : μειωτικός συντελεστής ελαστικής ατέλειας

β : συντελεστής εύρους πλαστικότητας

η : συντελεστής αλληλεπίδραση

$\bar{\lambda}_0$: όριο σύνθλιψη της ανηγμένης λυγηρότητας

Η τιμή του ορίου ανηγμένης πλαστικότητας $\bar{\lambda}_0$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} \quad (2-13)$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$\bar{\lambda}_{\chi} = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\chi,Rcr}}}, \quad \bar{\lambda}_{\theta} = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta,Rcr}}}, \quad \bar{\lambda}_{\tau} = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sqrt{3} \times \tau_{\chi\theta,Rcr}}} \quad (2-14)$$

όπου:

$\sigma_{\chi,Rcr}$: ιδεατή τάση κύρτωσης λόγω αξονικής θλίψης

$\sigma_{\theta,Rcr}$: ιδεατή τάση κύρτωσης λόγω περιφερειακής θλίψης

$\tau_{\chi\theta,Rcr}$: ιδεατή τάση λόγω διατμητικής κύρτωσης

Οι παραπάνω τάσεις υπολογίζονται σύμφωνα με το παράρτημα D του EN1993-1-6 [1]. Αν στο παράρτημα D, δε δίνονται κατάλληλες τιμές, τότε οι κρίσιμες τάσεις λυγισμού μπορεί να προκύψουν μέσα από μια γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) υπό τους σχετικούς συνδυασμούς φόρτισης λυγισμού.

2.4.2.2 Έλεγχος ευστάθειας μέσω καθολικής αριθμητικής ανάλυσης

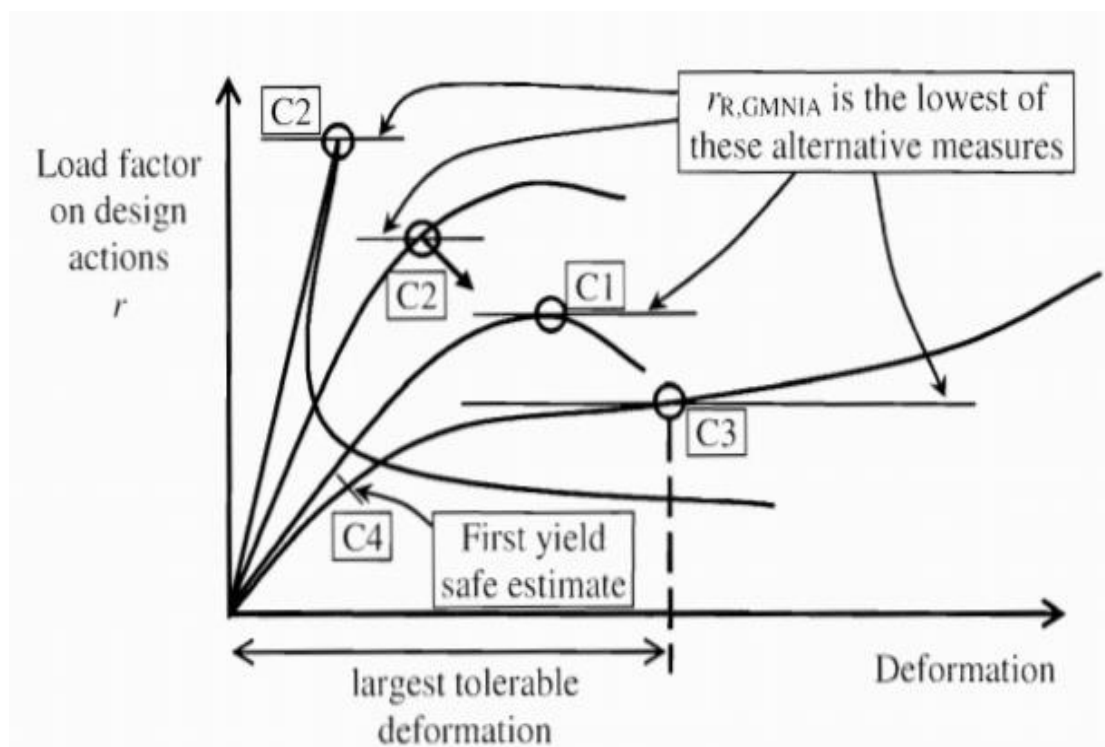
Ο έλεγχος ευστάθειας μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω χρήσης κάποιων αριθμητικών αναλύσεων, όπως:

✓ Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) και Μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA)

- ✓ Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλεια (GMNIA)

Η ανάλυση GMNIA είναι πιο λεπτομερής και πιο αξιόπιστη καθώς λαμβάνει υπόψιν και τις ατέλειες της κατασκευής. Η οριακή αντοχή $r_{R,GMNIA}$ είναι ίση με το χαμηλότερο συντελεστή που προκύπτει από τα τέσσερα παρακάτω κριτήρια:

- ✓ Κριτήριο C1: Ο συντελεστής του μέγιστου φορτίου που εμφανίζεται στον δρόμο ισορροπίας φορτίου-παραμόρφωσης (οριακό φορτίο).
- ✓ Κριτήριο C2: Ο συντελεστής του φορτίου διακλάδωσης, όταν αυτή συμβαίνει πριν το οριακό φορτίο του δρόμου ισορροπίας φορτίου-παραμόρφωσης.
- ✓ Κριτήριο C3: Η μέγιστη ανεκτή παραμόρφωση, όταν αυτή συμβαίνει κατά τη διάρκεια του δρόμου ισορροπίας φορτίου-παραμόρφωσης πριν το οριακό φορτίο ή το φορτίο διακλάδωσης.
- ✓ Κριτήριο C4: Ο συντελεστής του φορτίου όπου στο σημείο με την μεγαλύτερη τάση von Mises στην επιφάνεια του κελύφους, αυτή εξισώνεται με την τάση διαρροής $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{M0}$. (Πρόκειται για ένα συντηρητικό κριτήριο το οποίο χρησιμοποιείται όταν η μη γραμμικότητα υλικού δε λαμβάνεται υπόψιν)



Σχήμα 2-4: Ορισμός $r_{R,GMNIA}$ μέσω των κριτηρίων C1, C2, C3, C4 ^[1]

Για τον έλεγχο αξιοπιστίας της μεθόδου εισαγωγής ατελειών στο μοντέλο για την ανάλυση GMNIA πραγματοποιείται ένας επιπλέον έλεγχος, ο οποίος έχει ως στόχο την βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων με την χρήση ως μέτρο αναφοράς τον υπολογισμό της αντοχής για μία γεωμετρία και εντατική κατάσταση που είναι ήδη γνωστή. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με δύο τρόπους: α) με την χρήση αποτελεσμάτων για δεδομένες γεωμετρίες και φορτίσεις με γνωστή συμπεριφορά η οποία προσδιορίζεται στον EN 1993-1-6 ^[1] ή β) με την χρήση πειραματικών αποτελεσμάτων. Από τους αντίστοιχους υπολογισμούς προσδιορίζεται ο συντελεστής βαθμονόμησης k_{GMNIA} ως εξής:

$$k_{GMNIA} = \frac{r_{Rk,known,check}}{r_{R,GMNIA,check}} \text{ ή } k_{GMNIA} = \frac{r_{Rk,test,known,check}}{r_{R,GMNIA,check}} \quad (2-15)$$

Όπου:

$r_{Rk,known,check}$: γνωστή χαρακτηριστική τιμή

$r_{Rk,test,known,check}$: γνωστό πειραματικό αποτέλεσμα

$r_{Rk,known,check}$: αποτέλεσμα του υπολογισμού από το λογισμικό για την γεωμετρία και φόρτιση ελέγχου

Όταν τα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορίζουν το $k_{GMNIA} > 1$ τότε θα πρέπει να λαμβάνεται $k_{GMNIA}=1$. Όταν για τον προσδιορισμό της k_{GMNIA} , χρησιμοποιείται η γνωστή χαρακτηριστική τιμή, και η τιμή k_{GMNIA} δεν ανήκει στο σύνολο (0.8,1.2) τότε αυτή η διαδικασία δε θα πρέπει να χρησιμοποιείται.

Η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής υπολογίζεται:

$$r_{Rk} = k_{GMNIA} \times r_{R,GMNIA} \quad (2-16)$$

Όπου:

$r_{R,GMNIA}$: είναι η αντοχή που υπολογίζεται για τον ατελή φορέα

Η τιμή της αντοχής σχεδιασμού υπολογίζεται:

$$r_{Rd} = r_{Rk} / \gamma_{M1} \quad (2-17)$$

Η επάρκεια του ελέγχου προκύπτει με την επαλήθευση της παρακάτω σχέσης:

$$F_{Ed} \leq F_{Rd} = r_{Rd} \times F_{Ed} \text{ ή } r_{Rd} \geq 1 \quad (2-18)$$

2.4.2.3 Ατέλειες

Για τις αναλύσεις GMNIA είναι απαραίτητη ενσωμάτωση στο μοντέλο κάποιων ατελειών που στην πραγματικότητα δε μπορούν να αποφευχθούν. Τέτοιες ατέλειες είναι:

- ✓ Ατέλειες υλικού
- ✓ Γεωμετρικές ατέλειες

I. Ατέλειες υλικού

Οι ατέλειες του υλικού προκύπτουν κυρίως από την ανομοιογένεια του αλλά και παραμένουσες τάσεις

II. Γεωμετρικές ατέλειες

Οι γεωμετρικές ατέλειες προκύπτουν από τις κατασκευαστικές επιτρεπόμενες ανοχές οι οποίες εξαρτώνται από την κλάση της ποιότητας κατασκευής και έχουν τις εξής μορφές:

- a) Απόκλιση κυκλικότητας
- b) Αθέλητη εκκεντρότητα
- c) Ανοχή κοιλώματος

2.4.3 Κόπωση

Η οριακή κατάσταση κόπωσης θεωρείται η κατάσταση κατά την οποία το κέλυφος υπόκειται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους εναλλαγής τάσεων, δηλαδή αύξησης και μείωσης των τάσεων στο τοίχωμα του κελύφους που μπορεί να οδηγήσει σε ψαθυρή αστοχία. Κατασκευές που υπόκεινται σε δυναμικά φορτία όπως οι ανεμογεννήτριες θα πρέπει να ελέγχονται διεξοδικά ως προς την κόπωση.

2.4.4 Σεισμός

Ο έλεγχος της ανεμογεννήτριας σε σεισμικά φορτία δεν είναι ιδιαίτερα κρίσιμος κυρίως λόγω των υψηλών ιδιοσυχνοτήτων που εμφανίζουν οι ανεμογεννήτριες. Στα περισσότερα πρότυπα προτείνονται απλουστευτικοί έλεγχοι με απλοποιητικές παραδοχές υπέρ της ασφαλείας, όπου αν δεν ικανοποιούνται επιτρέπεται ακριβέστερος έλεγχος με φασματική ανάλυση.

2.4.5 Έλεγχος εκτροπής κρίσιμου πτερυγίου

Κατά το πρότυπο σχεδιασμού DNV/Risø ^[5] η απόσταση μεταξύ πύργου και άκρης πτερυγίου θα πρέπει να υπακούει την παρακάτω εξίσωση:

$$d_0 - \gamma \times u_{max} > F \quad (2-19)$$

Όπου:

d_0 : απόσταση πύργου και άκρης πτερυγίου σε αφόρτιστη κατάσταση

u_{max} : μέγιστη εκτροπή του πτερυγίου λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις σχετικούς συνδυασμούς φόρτισης και βασιζόμενοι στις χαρακτηριστικές τιμές του φορτίου και τις χαρακτηριστικές τιμές του υλικού

γ : μερικός συντελεστής ασφαλείας στη μέγιστη εκτροπή πτερυγίου, προς επιλογή σύμφωνα με το σχετικό συνδυασμό φόρτισης

F: απαίτηση για την υπολειπόμενη απόσταση μεταξύ πύργου και άκρης πτερυγίου συνήθως ίση με 0.0

2.4.6 Έλεγχος συντονισμού

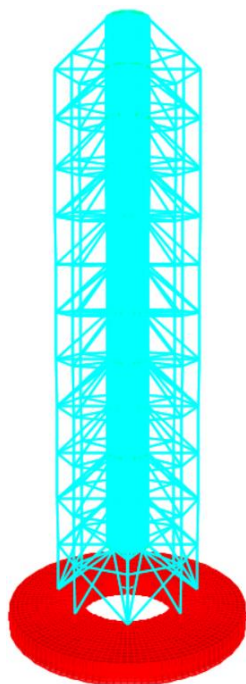
Η θεμελιώδης συχνότητα της κατασκευής δεν πρέπει να συμπίπτει με τις συχνότητες διέλευσης του ρότορα και των πτερυγίων, δηλαδή τις συχνότητες 1P και 3P, αντίστοιχα, ώστε να αποφύγουμε τον συντονισμό. Εάν εξασφαλιστεί, ότι η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα του πύργου είναι εκτός του εύρους +/- 10% 1P και 3P, τότε διασφαλίζεται πως κανονικά δε θα προκύψουν προβλήματα σε περίπτωση ενίσχυσης του φορτίου λόγω κάποιων δονήσεων.

2.5 Σκοπός παρούσας διπλωματικής

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.6, ο στόχος του δομοστατικού μηχανικού είναι να καταφέρει να αυξήσει τη στάθμη, στην οποία θα λειτουργεί ο ρότορας της ανεμογεννήτριας, σε υψόμετρο που ο άνεμος έχει μεγαλύτερες ταχύτητες και είναι πιο σταθερός. Το μεγαλύτερο πρόβλημα σε αυτή την προσπάθεια, έγκειται στην αποφυγή του συντονισμού. Όπως προαναφέρθηκε, η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα της κατασκευής δε θα πρέπει να συμπίπτει ούτε με την 1P (συχνότητα διέλευσης ρότορα), ούτε με την 3P (συχνότητα διέλευσης πτερυγίων). Έτσι, επιδιώκεται ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας να έχει μια θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα που να μην είναι στο εύρος +/- 10 % της 3P, αλλά κυρίως της 1P. Στην προσπάθεια αύξησης του ύψους λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, παρατηρείται πως ο πυλώνας γίνεται πιο εύκαμπτος με αποτέλεσμα η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα να προσεγγίζει το απαγορευτικό εύρος +/-10 %. Συνεπώς, με την εισαγωγή μιας βάσης ανεμογεννήτριας, που θα είναι εμφανώς πιο δύσκαμπτη από τον συμβατικό πυλώνα, στόχος είναι η δημιουργία μιας κατασκευής η οποία συνολικά, θα έχει θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα που θα κατατάσσεται εκτός του απαγορευτικού εύρους. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται το συνολικό ύψος του πυλώνα, με ότι αυτό συνεπάγεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και γενικά τη συνεισφορά του αιολικού δυναμικού σε αυτήν.

3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Το παρόν κεφάλαιο αφορά την παρουσίαση της γεωμετρίας της βάσης ανεμογεννήτριας, των υλικών και της φόρτισης, υπό την οποία μελετάται η κατασκευή. Η βάση ανεμογεννήτριας μπορεί να χωρισθεί σε δύο επιμέρους τμήματα. Κατά πρώτον, το μεταλλικό μέρος, το οποίο αποτελεί την ανωδομή και κατά δεύτερον τη θεμελίωση από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το μεταλλικό τμήμα αποτελείται από εσωτερικό κέλυφος, το οποίο υποστηρίζεται από έναν εξωτερικό πλαίσιακό φορέα. Αυτό με τη σειρά του εδράζεται πάνω σε μια δακτυλιοειδή θεμελίωση οπλισμένου σκυροδέματος. Το συνολικό ύψος της βάσης ανεμογεννήτριας είναι 60 m, εάν ορισθεί ως αρχή μέτρησης της, το επίπεδο επαφής του μεταλλικού τμήματος με τη θεμελίωση. Τέλος, στην κορυφή της βάσης ανεμογεννήτριας εδράζεται η συμβατική ανεμογεννήτρια 117.5 m, μέσω των κοχλιών.



Σχήμα 3-1: Μεταλλικό τμήμα (γαλάζιο), θεμελίωση(κόκκινο)

3.1 Γεωμετρία

Η παρουσίαση της κατασκευής χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες είναι οι εξής:

- ✓ Το εσωτερικό κέλυφος
- ✓ Οι νευρώσεις
- ✓ Ο εξωτερικός πλαίσιακός φορέας
- ✓ Η θεμελίωση

3.1.1 Εσωτερικό κέλυφος

Η βάση ανεμογεννήτριας αποτελείται από εσωτερικό κυλινδρικό κέλυφος σταθερής ακτίνας 2.15 m καθ ύψος. Το εσωτερικό κέλυφος ξεκινάει από τη στάθμη +5 m και καταλήγει σε στάθμη +60 m, δηλαδή στην κορυφή της βάσης ανεμογεννήτριας. Το εσωτερικό κέλυφος αποτελείται από τμήματα 2.5 m, τα οποία φτάνουν στο σημείο ανέγερσης και ενώνονται επιτόπου με τη χρήση κοχλιών. Η κορυφή του εσωτερικού σωλήνα είναι η περιοχή, όπου εδράζεται η ανεμογεννήτρια 117.5 m.



Σχήμα 3-2: Εσωτερικό κέλυφος

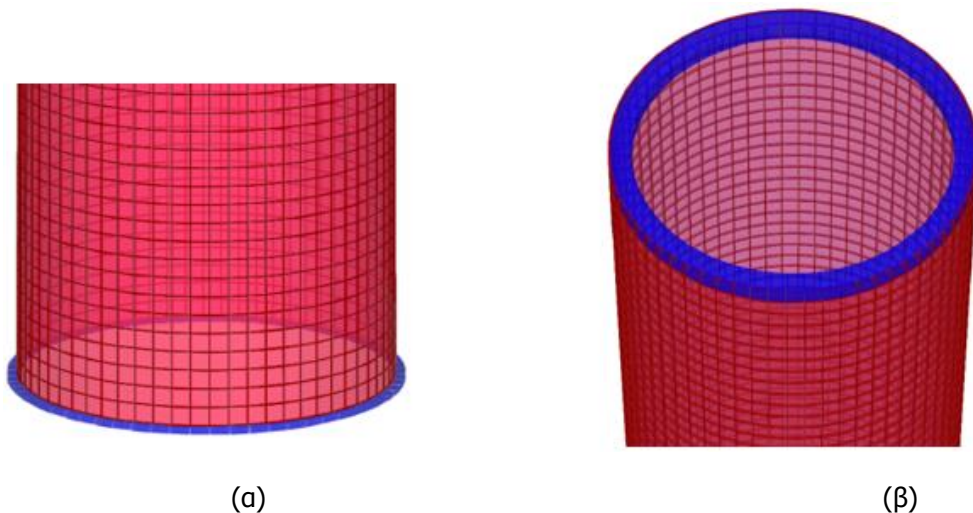
3.1.2 Νευρώσεις

Οι νευρώσεις αποτελούν σημαντικό τμήμα της κατασκευής. Το εσωτερικό κέλυφος στηρίζεται σε έναν εξωτερικό δικτυωτό φορέα, με αποτέλεσμα πολλά μέλη του εξωτερικού πλαίσιακού φορέα να έρχονται σε επαφή με το εσωτερικό κυλινδρικό κέλυφος. Συγκεκριμένα, τα μέλη αυτά καταπονούνται από μεγάλα εντατικά μεγέθη. Επομένως, αναδύεται η ανάγκη διασφάλισης της μη καταπόνησης, του κελύφους, απευθείας σημειακά από αυτά. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η τοποθέτηση

νευρώσεων περιφερειακά του εσωτερικού κελύφους. Εκεί που τα μέλη του εξωτερικού πλαισιακού φορέα έρχονται σε επαφή με το κέλυφος, με τρόπο, ώστε να τον ενισχύσουν και να αποφευχθούν τυχόν τοπικές αστοχίες. Οι νευρώσεις, λοιπόν, συγκολλούνται στο εσωτερικό κέλυφος, ξεκινώντας από τη στάθμη +5 m και καταλήγοντας στη στάθμη +60 m με βήμα 5 m. Είναι αξιο αναφοράς, ότι οι νευρώσεις σε όλες τις στάθμες τοποθετούνται εξωτερικά. Εξαιρέση αποτελεί η στάθμη +60 m, καθώς εκεί οι νευρώσεις τοποθετούνται εσωτερικά, έτσι ώστε με τη χρήση κοχλιών να εδρασθεί η συμβατική ανεμογεννήτρια των 117.5 m.



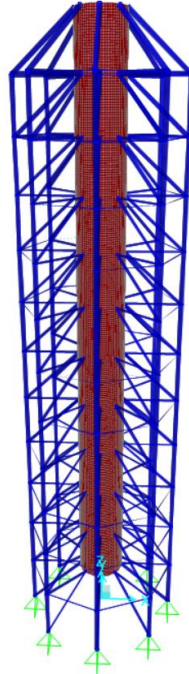
Σχήμα 3-3: Εσωτερικό κέλυφος με τις νευρώσεις (μπλε χρώμα) ανά 5 μέτρα



Σχήμα 3-4: Νευρώσεις (α) στη στάθμη +5 m και (β) στη στάθμη +60 m

3.1.3 Εξωτερικός πλαισιακός φορέας

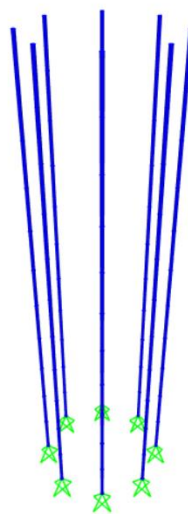
Θεμελιώδους σημασίας στοιχείο αποτελεί ο εξωτερικός πλαισιακός φορέας. Ο εξωτερικός πλαισιακός φορέας, αποτελεί τον συνδετικό κρίκο, μεταξύ του εσωτερικού κελύφους και της θεμελίωσης. Διαμορφώνεται από 4 ομάδες μελών, οι οποίες είναι όλες κοίλες κυκλικές διατομές (CHS).



Σχήμα 3-5: Βάση Ανεμογεννήτριας

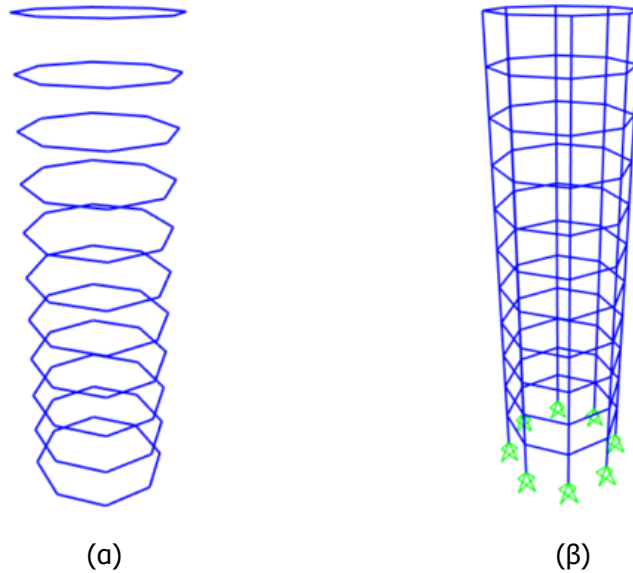
Ακολουθεί η παρουσίαση των ομάδων μελών που απαρτίζουν τον εξωτερικό πλαισιακό φορέα:

- ✓ VERTICAL MEMBERS / ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΜΕΛΗ (VERT) → Κατακόρυφα μέλη 8 σε πλήθος ανά στάθμη, ξεκινώντας από το +0 m με βήμα 5 m και καταλήγοντας στα +55 m όντας τοποθετημένα ανά γωνία 45 μοιρών σε συγκεκριμένη ακτίνα.



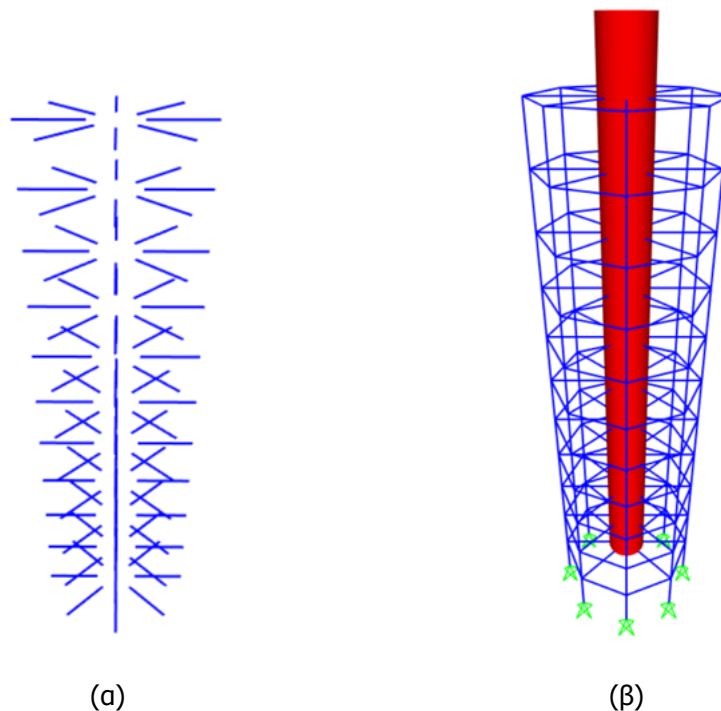
Σχήμα 3-6: Κατακόρυφα μέλη εξωτερικού πλαισιακού φορέα

- ✓ CIRCUMFERENTIAL MEMBERS / ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΜΕΛΗ (CIRC) → Περιμετρικά μέλη ανά 5 m, ξεκινώντας από τη στάθμη +5 m και καταλήγοντας στη στάθμη +55 m, δημιουργώντας έναν εξωτερικό πλαίσιακό δακτύλιο σε συγκεκριμένη ακτίνα.



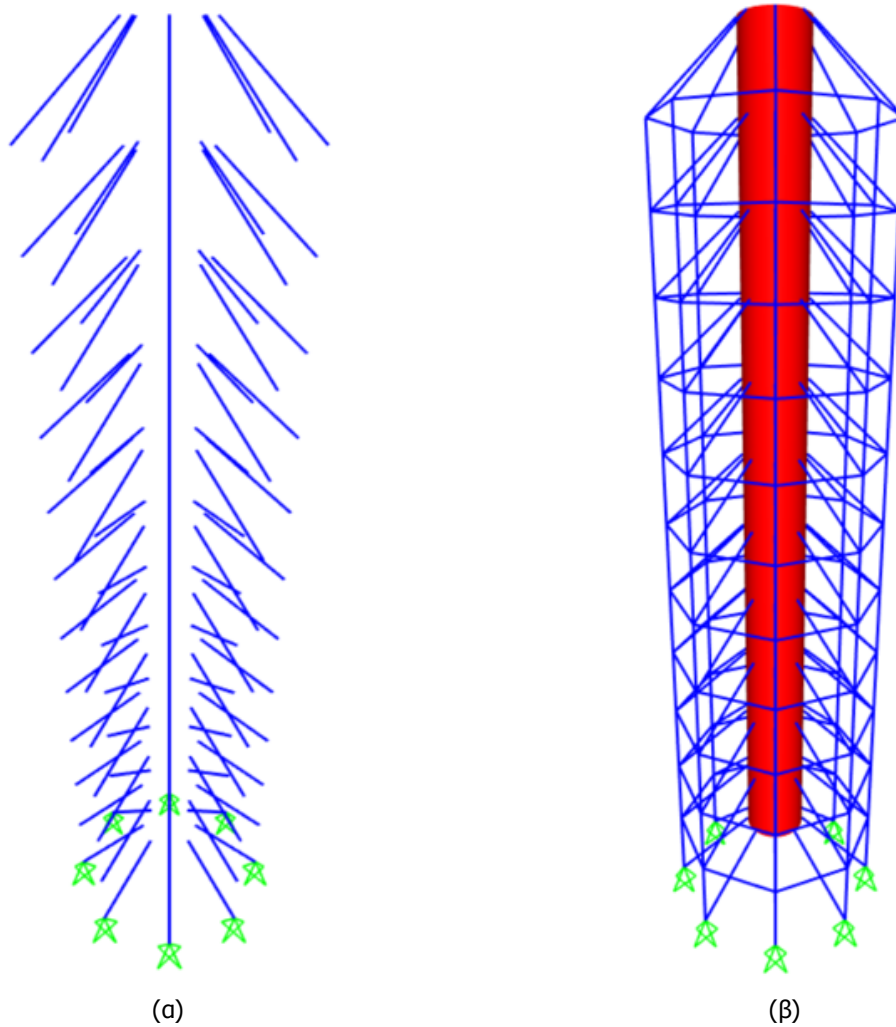
Σχήμα 3-7: (α) Περιμετρικά μέλη εξωτερικού πλαίσιακού φορέα (β) Εξωτερικός πλαίσιακός δακτύλιος

- ✓ RADIAL MEMBERS / ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΜΕΛΗ (RAD) → Ακτινικά μέλη ανά 5 m, ξεκινώντας από τη στάθμη +5 m καταλήγοντας στη στάθμη +55 m, τα οποία ενώνουν τον εξωτερικό φορέα με το εσωτερικό κέλυφος και είναι διατεταγμένα ανά γωνία 45 μοιρών.

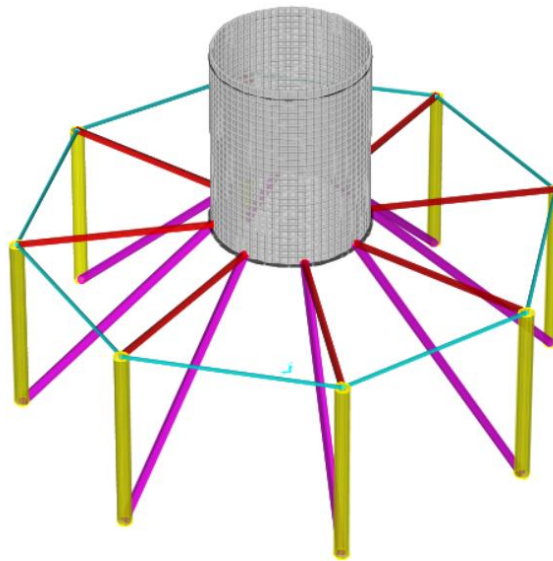


Σχήμα 3-8: (α) Ακτινικά μέλη (β) Σύνδεση εξωτερικού πλαίσιακού δακτυλίου με το εσωτερικό κέλυφος μέσω ακτινικών στοιχείων

- ✓ INCLINED RADIAL MEMBERS / ΚΕΚΛΙΜΕΝΑ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΜΕΛΗ (INCL) → Κεκλιμένα ακτινικά μέλη ανά 5 m που θα συνδέουν τον εξωτερικό πλαίσιακό με το εσωτερικό κέλυφος, ξεκινώντας από το +0 m και καταλήγοντας στα +60 m, τα οποία ξεκινούν από κόμβο του εξωτερικού πλαίσιακού δακτυλίου και καταλήγουν σε κόμβο στην επιφάνεια του εσωτερικού κελύφους που είναι μια στάθμη πιο πάνω, δηλαδή 5 m πιο πάνω.



Σχήμα 3-9: (α) Κεκλιμένα ακτινικά στοιχεία (β) Σύνδεση εξωτερικού δακτυλίου με το εσωτερικό κέλυφος μέσω κεκλιμένων ακτινικών στοιχείων



Σχήμα 3-10: Χρωματική απεικόνιση όλων των μελών της βάσης ανεμογεννήτριας

ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΚΕΛΥΦΟΣ

ΝΕΥΡΩΣΕΙΣ

ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (VERT)

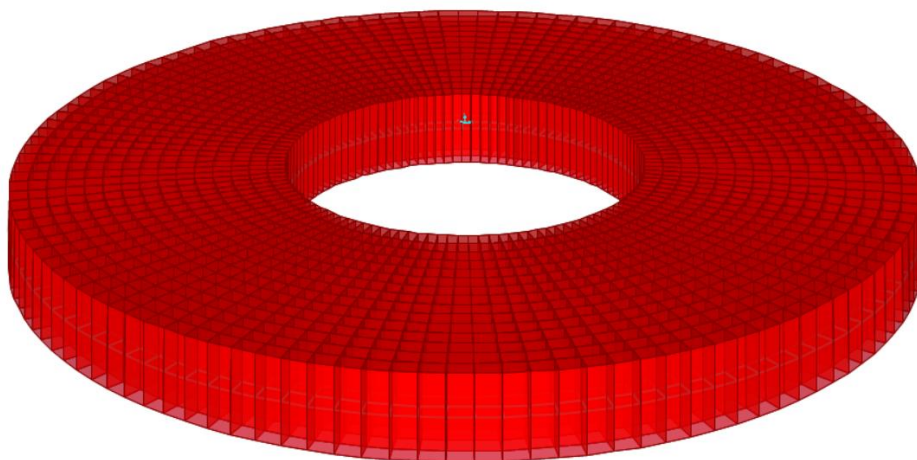
ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (CIRC)

ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (RAD)

ΚΕΚΛΙΜΕΝΑ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (INCL)

3.1.4 Θεμελίωση

Το μεταλλικό τμήμα της βάσης ανεμογεννήτριας που παρουσιάστηκε διεξοδικά στις τρεις προηγούμενες υποπαραγράφους εδράζεται σε δακτυλιοειδή θεμελίωση οπλισμένου σκυροδέματος σταθερού πάχους 2 m, όπως φαίνεται στο Σχήμα (3-11).



Σχήμα 3-11: Δακτυλιοειδής θεμελίωση

3.2 Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της βάσης ανεμογεννήτριας είναι τα εξής:

- ✓ Δομικός χάλυβας ποιότητας S355
- ✓ Σκυρόδεμα C30/37 και χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος B500C

Για το μεταλλικό τμήμα της κατασκευής, δηλαδή το εσωτερικό κυλινδρικό κέλυφος, τις νευρώσεις και τα μέλη του εξωτερικού πλαισιακού φορέα χρησιμοποιήθηκε χάλυβας ποιότητας S355. Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του δομικού χάλυβα παρουσιάζονται στους πίνακες 3-1 και 3-2.

Πίνακας 3-1: Ιδιότητες δομικού χάλυβα [5]

Table E-1. Mechanical properties of steel.		
Modulus of elasticity	E	210 000 MPa
Poisson's ratio	ν	0.3
Shear modulus	G	$E/2(1-\nu)$
Unit mass	ρ	7850 kg/m ³
Coefficient of linear thermal expansion	α	12·10 ⁻⁶ °C ⁻¹

Πίνακας 3-2: Τάσεις διαρροής δομικού χάλυβα [5]

Table E-2. Yield strength for structural steel.									
Reference Standard	Grade	Minimum yield strength f_y [MPa]							
		Thickness t [mm]							
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250
EN 10 025	S235	235	225	215	215	215	195	185	175
EN 10 025	S275	275	265	255	245	235	225	215	205
EN 10 025	S355	355	345	335	325	315	295	285	275

Όσον αφορά, τη δακτυλιοειδή θεμελίωση από οπλισμένο σκυρόδεμα, στους Πίνακες 3-3 και 3-4 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του οπλισμένου σκυροδέματος.

Πίνακας 3-3: Χαρακτηριστικά σκυροδέματος [3]

Strength classes for concrete														
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk,0.05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk,0.95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44

Πίνακας 3-4: Χαρακτηριστικά οπλισμού σκυροδέματος [3]

Product form	Bars and de-coiled rods			Wire Fabrics			Requirement or quantile value (%)
	A	B	C	A	B	C	
Class							-
Characteristic yield strength f_{yk} or $f_{0,2k}$ (MPa)	400 to 600						5,0
Minimum value of $k = (f_t/f_y)_k$	≥1,05	≥1,08	≥1,15 <1,35	≥1,05	≥1,08	≥1,15 <1,35	10,0
Characteristic strain at maximum force, ϵ_{uk} (%)	≥2,5	≥5,0	≥7,5	≥2,5	≥5,0	≥7,5	10,0
Bendability	Bend/Rebend test			-			
Shear strength	-			0,25 $A f_{yk}$ (A is area of wire)			Minimum
Maximum deviation from nominal mass (individual bar or wire) (%)	Nominal bar size (mm)						5,0
	≤ 8		± 6,0				
	> 8		± 4,5				

3.3 Φόρτιση

Για τη μελέτη της βάσης ανεμογεννήτριας επιβάλλονται στην κορυφή της, φορτία ίσα με τυπικές τιμές αντιδράσεων στήριξης στην έδραση συμβατικού πυλώνα ανεμογεννήτριας ύψους περί τα 117.5 m. Τα φορτία αυτά περιλαμβάνουν ήδη συντελεστές ασφαλείας. Επιπλέον, το ίδιο βάρος της βάσης ανεμογεννήτριας πολλαπλασιάζεται με συντελεστή 1.35. Όμως, είναι σημαντικό να σημειωθεί, πως στη μελέτη αυτή δε λήφθηκαν υπόψιν τα φορτία του ανέμου που δρουν στη βάση της ανεμογεννήτριας.

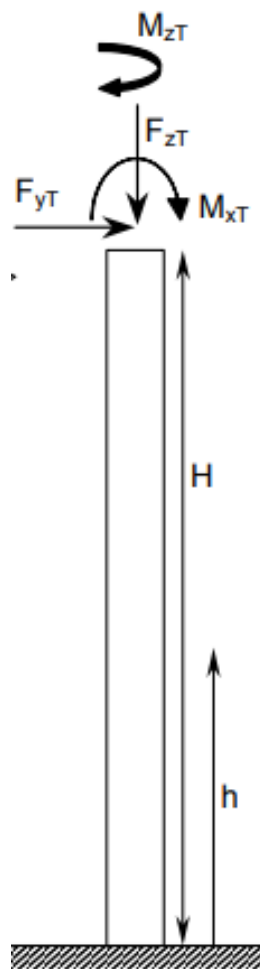
- Οριζόντια δύναμη ίση με **$F_{yT} = 1200 \text{ kN}$** .
- Κατακόρυφη δύναμη ίση με **$F_{zT} = 8915 \text{ kN}$** .
- Καμπτική ροπή ίση με **$M_{xT} = 150000 \text{ kNm}$**
- Στρεπτική ροπή ίση με **$M_{zT} = 3170 \text{ kNm}$**

Όπου:

X: άξονας κάθετος στη διεύθυνση του ανέμου

Y: άξονας παράλληλος στη διεύθυνση του ανέμου άξονας κάθετος στη διεύθυνση του ανέμου

Z: κατακόρυφος άξονας



Σχήμα 3-12: Απεικόνιση φόρτισης βάσης ανεμογεννήτριας ^[5]

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΦΟΡΕΑ

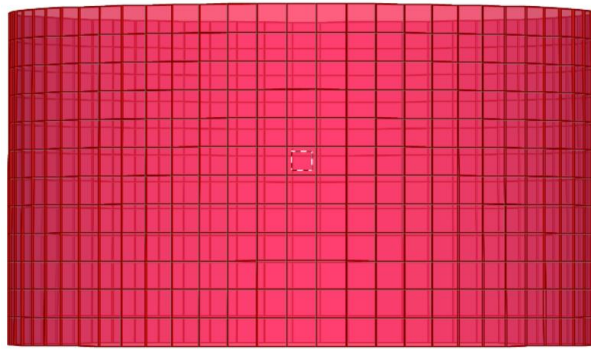
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματοποιείται γραμμική στατική και ιδιομορφική ανάλυση της βάσης ανεμογεννήτριας για συγκεκριμένη ακτίνα του εξωτερικού πλαισιακού φορέα. Ως πρώτη ακτίνα ανάλυσης, λαμβάνεται η $R_{εξ^1}=7.5 \text{ m}$. Αρχικά, γίνεται περιγραφή του προσομοιώματος, που χρησιμοποιήθηκε. Στη συνέχεια, δίνονται τα αποτελέσματα, δηλαδή τα πάχη εσωτερικού κελύφους, οι διαστάσεις των νευρώσεων και οι διατομές που προέκυψαν για τα μέλη του εξωτερικού πλαισιακού φορέα.

4.1 Προσομοίωση φορέα

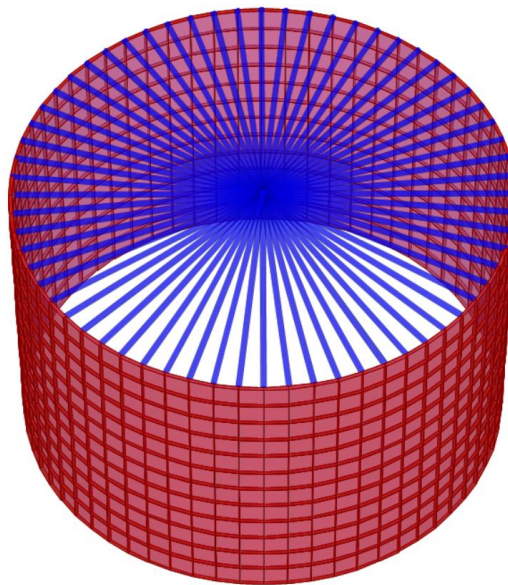
Η προσομοίωση του φορέα πραγματοποιείται ως εξής:

- ✓ Το εσωτερικό κυλινδρικό κέλυφος προσομοιώνεται με shell elements. Τα shell elements έχουν διαστάσεις 211x200 mm, δηλαδή μήκος 211 mm κατά τη περιφερειακή διεύθυνση και 200 mm κατά τη μεσημβρινή διεύθυνση (σχήμα 4-1) και είναι 17600 σε πλήθος. Όσον αφορά το πάχος των shell elements, αυτό είναι μεταβλητό.
- ✓ Οι νευρώσεις προσομοιώνονται ως beam elements.
- ✓ Τα φορτία που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.3, επιβάλλονται σε ένα master node (σχήμα 4-2), που βρίσκεται στο κέντρο της κορυφής του εσωτερικού σωλήνα και ενώνεται με 64 αβαρή και άκαμπτα στοιχεία με τους κόμβους του εσωτερικού κυλινδρικού κελύφους.
- ✓ Τέλος, στη στάθμη +0 m, τα 8 κατακόρυφα στοιχεία αρθρώνονται στο έδαφος. (Η θεμελίωση θα προσομοιωθεί ξεχωριστά σε επόμενο κεφάλαιο, όπου θα χρησιμοποιηθεί μη γραμμική στατική ανάλυση)

¹ Ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα



Σχήμα 4-1: Shell elements διαστάσεων 211x200 mm



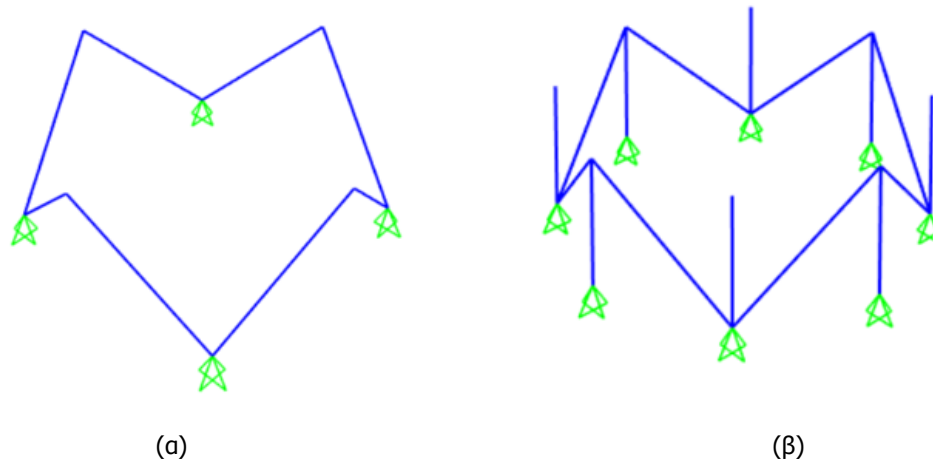
Σχήμα 4-2: Master node

4.2 Αποτελέσματα γραμμικής στατικής και ιδιομορφικής ανάλυσης

Κατά την πρώτη ιδιομορφική ανάλυση, παρατηρήθηκε πως η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής, είναι στρεπτική και ίση με $T_1=7.60$ sec, γεγονός που καθιστά την κατασκευή, αρκετά εύκαμπη στρεπτικά. Οι άλλες δύο ιδιοπερίοδοι ήταν στρεπτικές και ίσες με $T_2=1.97$ sec και $T_3=1.40$ sec. Όπως προαναφέρθηκε, ο στόχος που τέθηκε είναι η παρουσίαση μιας βάσης, η οποία θα είναι, όσο το δυνατόν πιο δύσκαμπτη. Εξαιτίας αυτού, κρίθηκε σκόπιμο να εισάγουμε στο μοντέλο μας άλλες δύο ομάδες στοιχείων με σκοπό να μειωθεί η στροφή της βάσης ανεμογεννήτριας, ώστε να μειωθεί η τιμή της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου και να αυξηθεί η στρεπτική δυσκαμψία της βάσης. Παρά ταύτα, μπορεί η διαδικασία ενίσχυσης της βάσης, ώστε να αυξηθεί η δυσκαμψία, να είναι ανώφελη. Στον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας της τελικής κατασκευής, δηλαδή στο μοντέλο θεμελίωσης, βάσης ανεμογεννήτριας μαζί με τον πυλώνα ανεμογεννήτριας, τα παραπάνω στοιχεία μπορεί να μη είναι χρήσιμα. Η αναγκαιότητα τους θα εξετασθεί στο τελικό στάδιο της διπλωματικής εργασίας.

Ακολουθεί η παρουσίαση των ομάδων των στοιχείων CROSS & RMOD και τα αποτελέσματα των ιδιομορφικών αναλύσεων, τα οποία κατέστησαν απαραίτητη την τοποθέτησή τους.

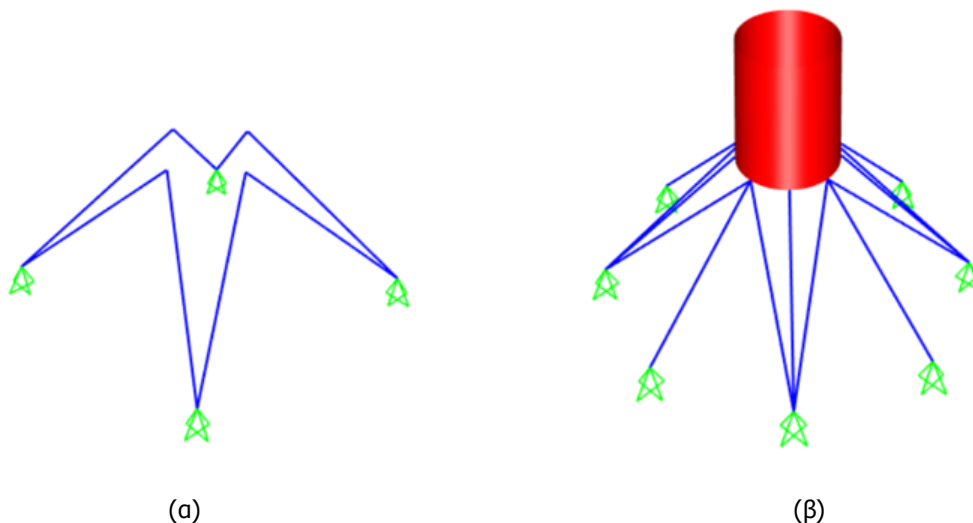
- ❖ CROSS MEMBERS / ΔΙΑΓΩΝΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (CROSS) → Διαγώνια στοιχεία ως προς τα κατακόρυφα στοιχεία του εξωτερικού πλαισιακού σωλήνα. Η τοποθέτηση έγινε με σκοπό τη μείωση της στροφής του εξωτερικού πλαισιακού δακτυλίου.



Σχήμα 4-3: (α) Διαγώνια στοιχεία (β) Διαγώνια ως προς τα κατακόρυφα στοιχεία

Η τοποθέτηση των διαγώνιων στοιχείων από τη στάθμη +0 m έως +5 m, μείωσε τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο σε τιμή ίση με $T_1=3.75$ sec, ενώ οι υπόλοιπες δύο ήταν και αυτές στρεπτικές με $T_2=1.4$ sec και $T_3=0.96$ sec, περιορίζοντας τη στροφή στον εξωτερικό πλαισιακό δακτύλιο. Η τοποθέτηση επιπρόσθετων διαγώνιων στοιχείων σε περισσότερες στάθμες δεν κρίθηκε ουσιάς, καθώς η στροφή του εξωτερικού δακτυλίου περιορίστηκε αρκετά με τα διαγώνια στοιχεία στη βάση. Αντιθέτως, η στροφή του εσωτερικού σωλήνα παρέμεινε αμετάβλητη. Το γεγονός αυτό, οδήγησε στην τοποθέτηση των ακτινικών mod στοιχείων.

- ❖ RADIAL MOD MEMBERS / ΑΚΤΙΝΙΚΑ MOD ΣΤΟΙΧΕΙΑ (RMOD) → Ακτινικά διαγώνια κεκλιμένα στοιχεία ως προς τα κεκλιμένα ακτινικά, ξεκινούν από τη στάθμη +0 m από τον εξωτερικό δακτύλιο και καταλήγουν στη στάθμη +5 m του εσωτερικού κελύφους. Η τοποθέτηση έγινε με σκοπό τη μείωση της στροφής του εσωτερικού κυλινδρικού κελύφους.

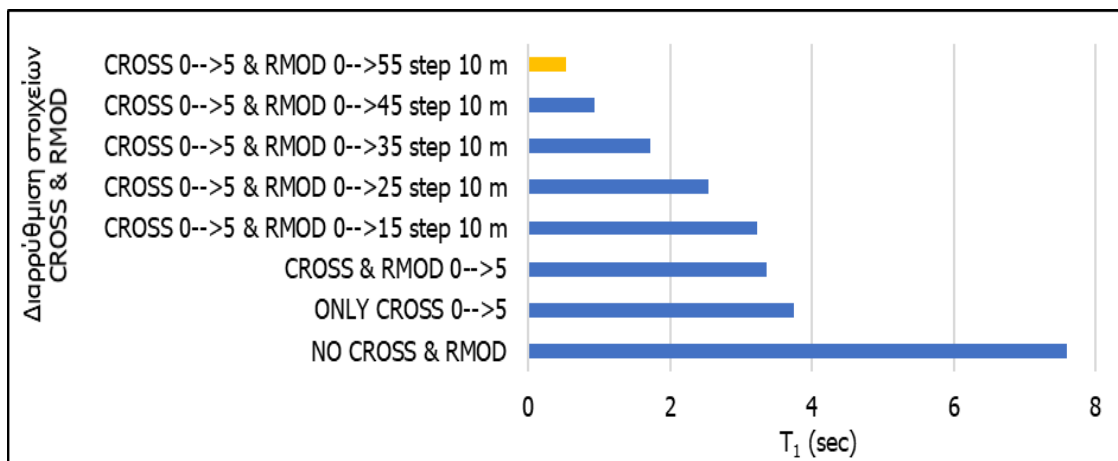


Σχήμα 4-4: (α) Ακτινικά RMOD στοιχεία (β) Σύνδεση εξωτερικού δακτυλίου με εσωτερικό κέλυφος μέσω ακτινικών RMOD στοιχείων

Αρχικά, η ιδιομορφική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με στοιχεία RMOD και CROSS, μόνο στη στάθμη +0 m έως στη στάθμη +5 m. Η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος ήταν στρεπτική $T_1=3.37$ sec, ενώ οι υπόλοιπες δύο ιδιοπερίοδοι, ήταν ίσες με $T_2=0.97$ sec (στρεπτική) και $T_3=0.54$ sec (καμπτική). Με την παρέμβαση αυτή η στροφή του εσωτερικού κελύφους μειώθηκε. Εντούτοις, η ιδιοπερίοδος δεν μειώθηκε αισθητά. Για το λόγο αυτό, έπειτα από διαδοχικές δοκιμές, με τη τοποθέτηση RMOD στοιχείων ανά 10 m έως και τη στάθμη +55 m, η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος που προέκυψε από την ιδιομορφική ανάλυση, ήταν καμπτική και ίση με $T=0.54$ sec. Στον πίνακα 4-1 παρουσιάζονται οι δοκιμές που έγιναν, ώστε η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος να είναι καμπτική. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η ελάχιστη δυνατή ιδιοπερίοδος (με έντονη γραφή επισημαίνονται οι στρεπτικές ιδιοπερίοδοι).

Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα για διάφορους συνδυασμούς των στοιχείων CROSS & RMOD

Διαρρύθμιση CROSS & RMOD	T_1 (sec)	T_2 (sec)	T_3 (sec)
NO CROSS & RMOD	7.6	1.97	1.4
ONLY CROSS 0-->5	3.75	1.4	0.96
CROSS & RMOD 0-->5	3.37	0.97	0.54
CROSS 0-->5 & RMOD 0-->15 step 10 m	3.22	0.9	0.54
CROSS 0-->5 & RMOD 0-->25 step 10 m	2.54	0.67	0.54
CROSS 0-->5 & RMOD 0-->35 step 10 m	1.73	0.54	0.54
CROSS 0-->5 & RMOD 0-->45 step 10 m	0.94	0.54	0.54
CROSS 0-->5 & RMOD 0-->55 step 10 m	0.54	0.54	0.48



Γράφημα 4-1: Θεμελιώδης ιδιοπερίοδος για διάφορες διαρρυθμίσεις των στοιχείων RMOD & CROSS

Συνεπώς, η διαρρύθμιση των στοιχείων CROSS & RMOD, η οποία για ακτίνα $R_{εξ}=7.5$ m είναι η ακόλουθη:

CROSS: μόνο από στάθμη +0 m έως στάθμη +5 m (1 στάθμη)

RMOD: από στάθμη +0 m έως στάθμη +50 m με βήμα 10 m (σύνολο 6 στάθμες)

Για την προαναφερθείσα διαρρύθμιση και αφού διεξήχθησαν πολλές δοκιμές, οι διατομές που προέκυψαν για εκμετάλλευση περί το 90% των στοιχείων του εξωτερικού πλαισιακού φορέα απεικονίζονται στον πίνακα 4-2. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα πάχη του εσωτερικού σωλήνα που αλλάζουν με βήμα 2.5 m και 5 m, ανάλογα με την απαίτηση (πίνακας 4-3). Ακολουθούν οι διαστάσεις

των νευρώσεων σε κάθε στάθμη (πίνακας 4-4). Η πρώτη διάσταση αφορά το μήκος της νευρώσης που είναι κάθετο στο κέλυφος, ενώ η δεύτερη αντιπροσωπεύει το πάχος της νευρώσης σχήμα 4-5.

Πίνακας 4-2: Διατομές των στοιχείων του εξωτερικού πλαισιακού φορέα ακτίνας 7.5 m με εκμετάλλευση περί το 90%

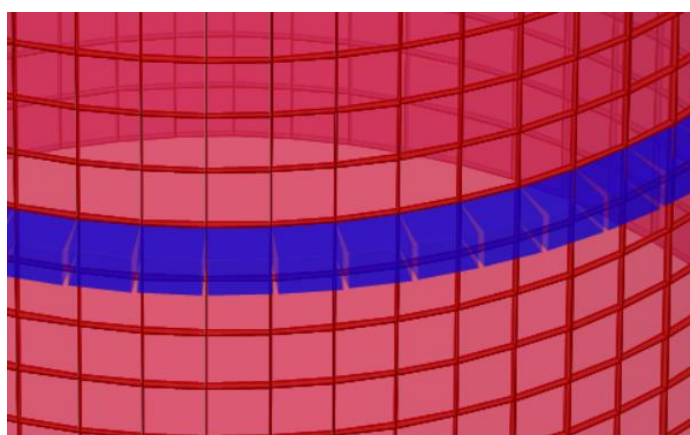
ΥΨΟΜΕΤΡΟ		ΟΜΑΔΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (mm x mm)				ΣΤΑΘΜΗ (m)	ΟΜΑΔΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (mm x mm)	
ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	VERT	INCL	RMOD	CROSS		RAD	CIRC
0	5	406.4X25	244.5x6.3	273x6.3	193.7x6.3	5	168.3X5	88.9X4
5	10	406.4X25	244.5x6.3			10	139.7X5	60.3x3.2
10	15	406.4X25	244.5x6.3	168.3X5		15	139.7X5	33.7X3.2
15	20	406.4X25	244.5x6.3			20	139.7X5	33.7X3.2
20	25	406.4X20	244.5x6.3	88.9X4		25	168.3X5	33.7X3.2
25	30	406.4X20	244.5x6.3			30	168.3X5	33.7X3.2
30	35	406.4X20	244.5x6.3	101.6X4		35	168.3X5	33.7X3.2
35	40	406.4X20	244.5x6.3			40	168.3X5	42.4X3.2
40	45	406.4X16	244.5x6.3	139.7X4		45	177.8x6.3	33.7X3.2
45	50	406.4X16	273x6.3			50	244.5X8	88.9X3.2
50	55	406.4X12.5	355.6x8	219.1x6.3		55	406.4X10	33.7X3.2
55	60		406.4X16			60		

Πίνακας 4-3: Πάχη εσωτερικού κελύφους καθ' ύψος

ΥΨΟΜΕΤΡΟ		ΠΑΧΟΣ (mm)
ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	
5	20	12
20	25	13
25	30	14
30	32.5	15
32.5	35	16
35	37.5	17
37.5	40	18
40	42.5	19
42.5	45	20
45	47.5	21
47.5	50	22
50	52.5	25
52.5	55	27
55	57.5	29
57.5	60	30

Πίνακας 4-4: Διαστάσεις νευρώσεων ανά στάθμη

ΣΤΑΘΜΗ (m)	Διαστάσεις (mm x mm)
5	100X100
10	50X25
15	60X40
20	50X25
25	50X25
30	50X25
35	50X25
40	50X25
45	80X40
50	150X75
55	200X130
60	200X150

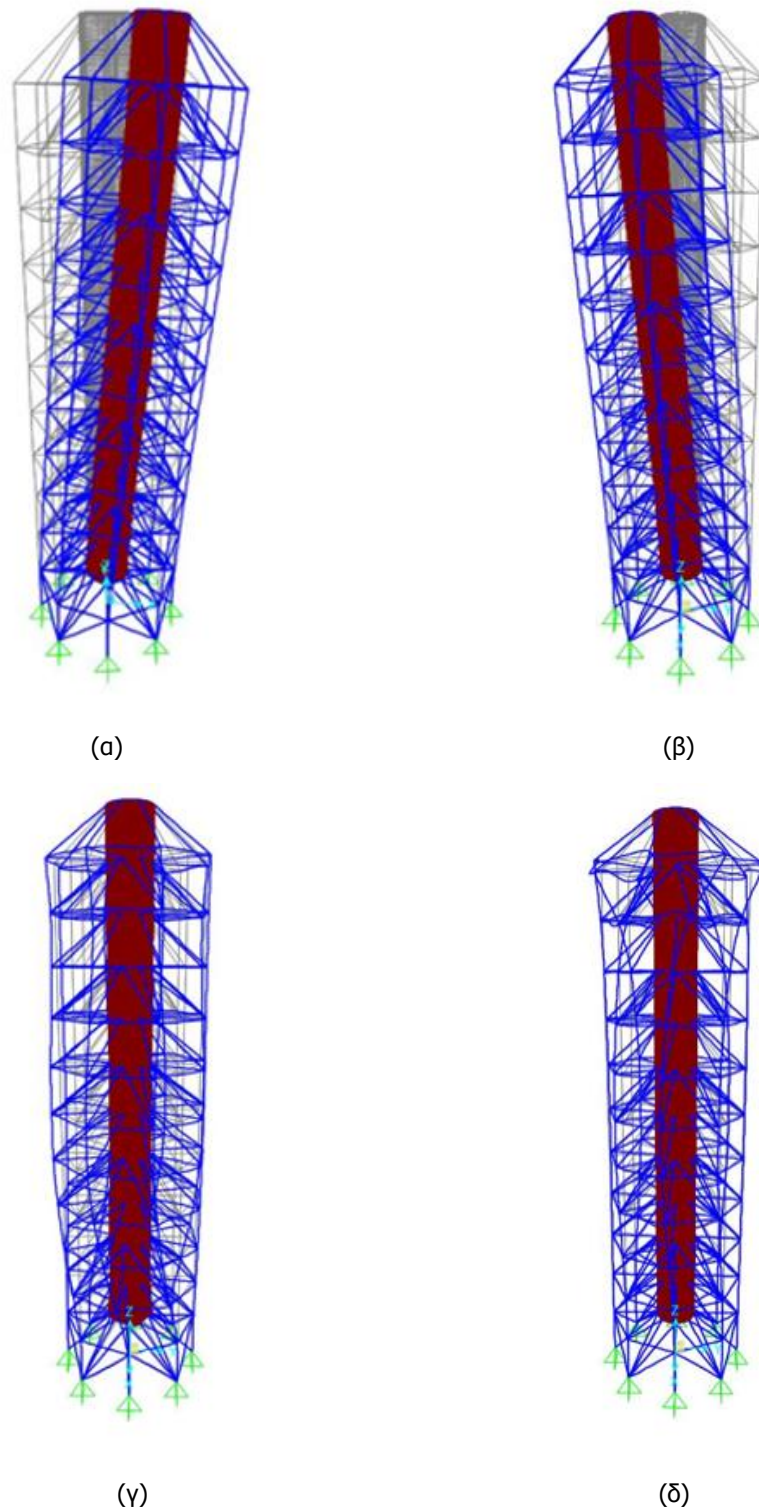


Σχήμα 4-5: Απεικόνιση νευρώσεων

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης της κατασκευής πίνακας 4-5 και απεικονίζονται σχηματικά οι τέσσερις πρώτες ιδιοπερίοδοι της κατασκευής. Όπως, τονίστηκε και παραπάνω, η εισαγωγή των στοιχείων RMOD και CROSS, κατέστησε την κατασκευή πιο δύσκαμπτη στρεπτικά. Αυτό αποτελούσε και αρχικό στόχο, δηλαδή μια βάση ανεμογεννήτριας με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη δυσκαμψία, ώστε η συνισταμένη δυσκαμψία βάσης και πυλώνων ανεμογεννήτριας να είναι ικανή για την αποφυγή των ιδιοσυχνοτήτων 1P και 3P.

Πίνακας 4-5: Ιδιομορφές κατασκευής

Ιδιομορφή	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η
Είδος	Καμπτική	Καμπτική	Στρεπτική	Στρεπτική
Ιδιοπερίοδος T (sec)	0.54	0.54	0.48	0.29



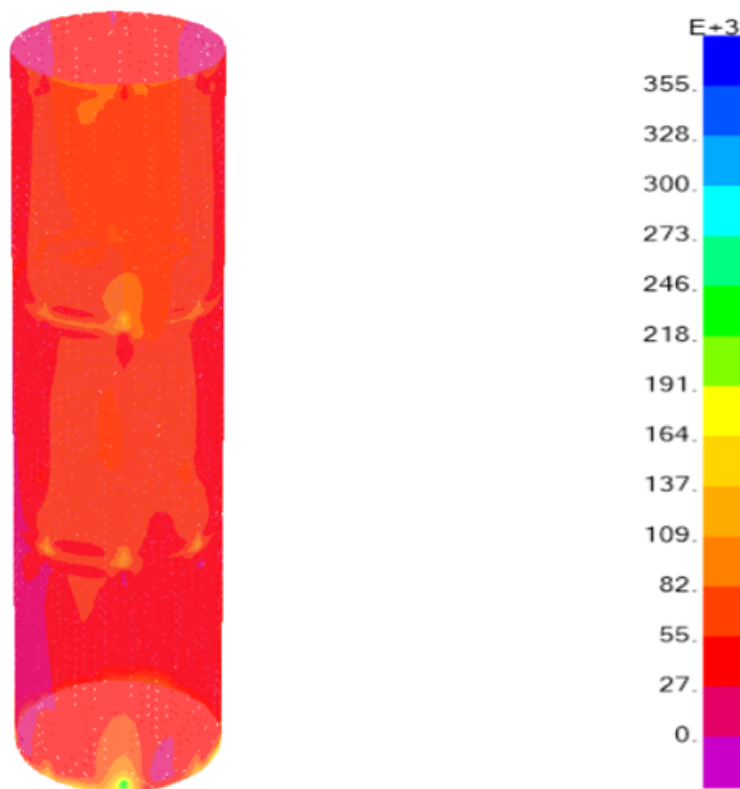
Σχήμα 4-6: Θεμελιώδης ιδιοπερίοδοι κατασκευής (α) T_1 (β) T_2 (γ) T_3 (δ) T_4

4.3 Καταπονήσεις δομικών στοιχείων και έλεγχοι επάρκειας κατά EN1993

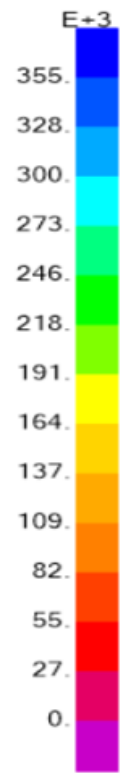
Στη παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη, τα οποία καταπονούν τον εσωτερικό κυλινδρικό κέλυφος και τα στοιχεία του εξωτερικού πλαισιακού φορέα. Για τον εσωτερικό σωλήνα παρουσιάζονται οι τάσεις Von Mises που δρουν στο κέλυφος, ενώ για τα στοιχεία του εξωτερικού πλαισιακού φορέα δίνονται τα διαγράμματα της αξονικής καταπόνησης. Τέλος, παρουσιάζονται οι έλεγχοι επάρκειας που πραγματοποιήθηκαν, για να επιλεγθούν τα τελικά πάχη, οι διαστάσεις και οι διατομές.

4.3.1 Τάσεις εσωτερικού κελύφους

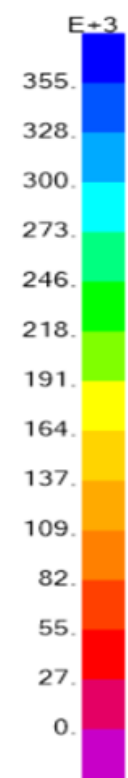
Το εσωτερικό κέλυφος ελέγχεται, ώστε σε κανένα σημείο οι τάσεις von Mises να μην υπερβαίνουν το όριο διαρροής του υλικού, δηλαδή το $F_y = 355000 \text{ KN/m}^2$ (Plastic Limit State LS1 ^[1]). Η επιλογή των παχών του εσωτερικού κελύφους, δεν έγινε με κριτήριο την πλήρη εκμετάλλευσή τους, διότι ο έλεγχος ευστάθειας είναι πιο κρίσιμος (Buckling Limit State LS3 ^[1]). Επιπλέον, άλλος ένας λόγος για τον οποίο αφέθηκε περιθώριο εκμετάλλευσής είναι το γεγονός, ότι η επίδραση του ανέμου στη βάση ανεμογεννήτριας αμελήθηκε. Το ελάχιστο πάχος που επιλέχθηκε είναι 12 mm και τα υπόλοιπα πάχη επιλέχθηκαν με εκμετάλλευση περί το 60 %. Στο σχήμα 4-7 παρουσιάζονται οι τάσεις von Mises καθ' ύψος. Επιπλέον, στην κορυφή του σωλήνα, παρουσιάζονται κάποιες περιοχές, όπου τοπικά οι τάσεις υπερβαίνουν το όριο διαρροής. Αυτό, οφείλεται κυρίως στην προσομοίωση, η οποία έγινε με master node. Τα άκαμπτα και αβαρή στοιχεία μεταφέρουν μεγάλες εντάσεις στο σωλήνα, οι οποίες δεν υφίστανται στην πραγματικότητα.



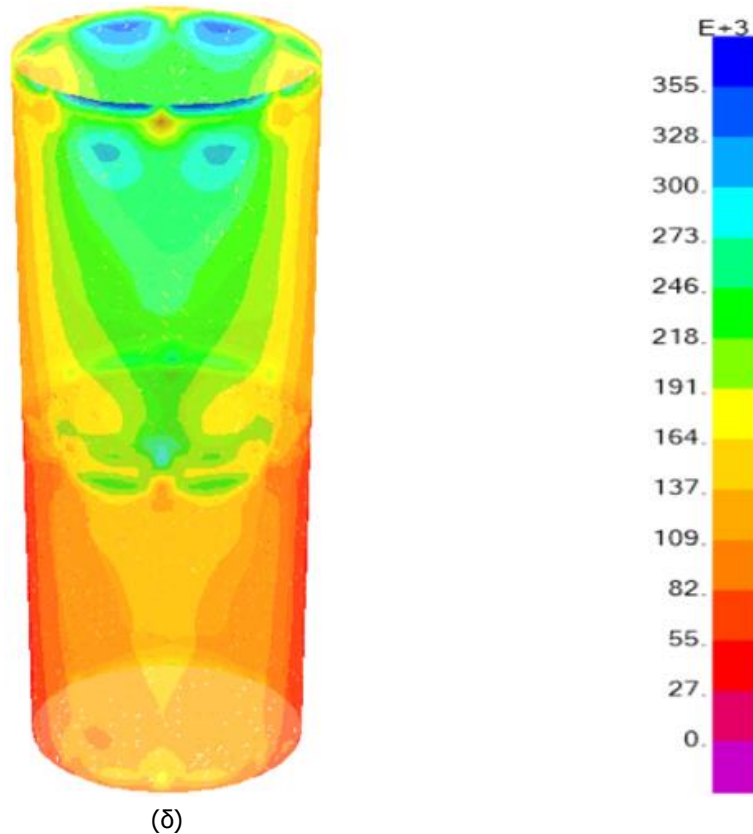
(a)



(β)



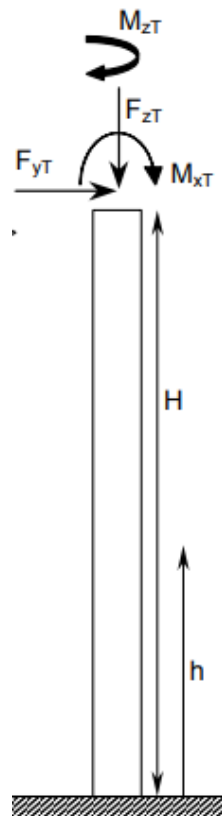
(γ)



Σχήμα 4-7: Τάσεις von Mises σε kN/m^2 (α) Στάθμη +5 m έως +20 m (β) Στάθμη +20 m έως +35 m (γ) Στάθμη +35 m έως +50 m (δ) Στάθμη +50 m έως +60 m

4.3.2 Εξωτερικός πλαισιακός φορέας

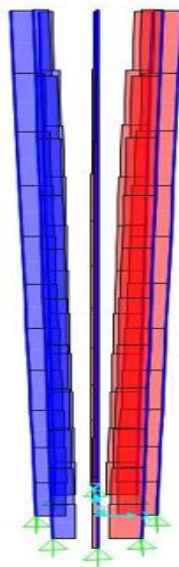
Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής, πρέπει να προσδιοριστεί ο τρόπος με τον οποίο διανέμονται οι δυνάμεις στον εξωτερικό πλαισιακό φορέα. Η καταπόνηση της βάσης ανεμογεννήτριας, μπορεί παρομοιασθεί με έναν πακτωμένο πρόβολο (σχήμα 4-8). Αναμένεται, μεγάλη καταπόνηση στην κορυφή της βάσης ανεμογεννήτριας, καθώς το εσωτερικός κυλινδρικό κέλυφος παραλαμβάνει μεγάλα εντατικά μεγέθη, τα οποία μέσω των ακτινικών στοιχείων μεταφέρονται προς τα έξω. Προχωρώντας σε χαμηλότερα ύψη, το εσωτερικό κέλυφος και τα ακτινικά μέλη καταπονούνται ολοένα και λιγότερο. Τα κατακόρυφα στοιχεία (VERT) παραλαμβάνουν κυρίως την F_{zT} , το ίδιο βάρος της κατασκευής και την ροπή M_{xT} με ζεύγη δυνάμεων. Έτσι αναμένεται, κατεβαίνοντας σε ύψος τα κατακόρυφα αυτά στοιχεία να καταπονούνται όλο και περισσότερο, καθώς όχι μόνο αυξάνεται το ίδιο βάρος, αλλά η ύπαρξη της F_{yT} αυξάνει και την παραληφθείσα ροπή την οποία αναλαμβάνουν με ζεύγη δυνάμεων. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί, πως όλα τα κατακόρυφα στοιχεία έχουν ίδια εξωτερική περίμετρο. Επιπλέον, για λόγους συνδεσιμότητας δεν είναι εφικτό η εξωτερική περίμετρος διατομής οποιασδήποτε ομάδας στοιχείων, να υπερβαίνει την εξωτερική περίμετρο των κατακόρυφων στοιχείων.



Σχήμα 4-8: Φόρτιση βάσης ανεμογεννήτριας [5]

Δεδομένου ότι όλες οι ομάδες στοιχείων καταπονούνται από μεγάλες αξονικές δυνάμεις, παρουσιάζονται παρακάτω οι αξονικές καταπονήσεις, στις οποίες υπόκεινται τα στοιχεία ανά ομάδες,

❖ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (VERT)

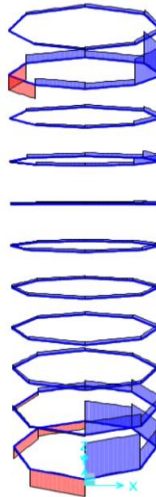


Σχήμα 4-9: Αξονικές δυνάμεις των κατακόρυφων στοιχείων

Όπως ήταν αναμενόμενο, οι δυνάμεις αυξάνουν κατά μέτρο από την κορυφή έως τη βάση. Επιπλέον, κατά απόλυτη τιμή, οι θλιπτικές είναι μεγαλύτερες από τις εφελκυστικές. Συνεπώς, οι θλιβόμενες διατομές είναι αυτές που καθορίζουν σε κάθε στάθμη τη διατομή των κατακόρυφων στοιχείων. Ενδεικτικά:

Θλιπτικές Δυνάμεις (κόκκινο): Βάση $F=7955$ kN --- Κορυφή $F=3190$ kN
 Εφελκυστικές Δυνάμεις (μπλε): Βάση $F=5507$ kN --- Κορυφή $F=2707$ kN

❖ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (CIRC)

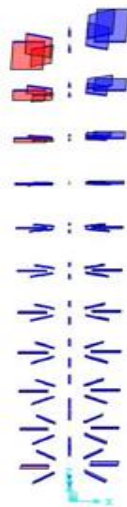


Σχήμα 4-10: Αξονικές δυνάμεις των περιμετρικών στοιχείων

Στο σχήμα απεικονίζεται η συγκεκριμένη ομάδα στοιχείων, να καταπονείται κυρίως σε εφελκυσμό. Επιπροσθέτως, οι δυνάμεις στις οποίες υπόκεινται είναι σημαντικά μικρότερες από άλλες ομάδες στοιχείων. Ενδεικτικά:

Μέγιστες: Θλιπτικές Δυνάμεις: Στάθμη +5 m : $F=41$ kN
 Εφελκυστικές Δυνάμεις: Στάθμη +5 m : $F=82$ kN

❖ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (RAD)

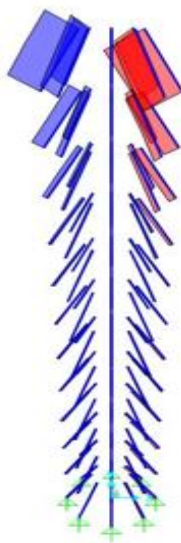


Σχήμα 4-11: Αξονικές δυνάμεις των ακτινικών στοιχείων

Παρατηρείται, ότι οι δυνάμεις στην κορυφή είναι μεγάλες και φθίνουν σταδιακά όσο μειώνεται το υψόμετρο. Αυτό ήταν αναμενόμενο, όπως ειπώθηκε και παραπάνω. Ακόμη, παρατηρείται πως οι εφελκυστικές δυνάμεις κατά απόλυτη τιμή, είναι μεγαλύτερες από τις θλιπτικές, όχι όμως αρκετά μεγαλύτερες. Ως επακόλουθο αυτού, δε μπορεί να προσδιορισθεί με σιγουριά, αν οι θλιπτικές δυνάμεις καθορίζουν τις διατομές σε κάθε στάθμη. Ενδεικτικά:

Θλιπτικές Δυνάμεις: Στάθμη +5 m: $F= 304 \text{ kN}$ --- Στάθμη +55 m: $F= 2912 \text{ kN}$
 Εφελκυστικές Δυνάμεις: Στάθμη +5 m: $F= 587 \text{ kN}$ --- Στάθμη +55 m: $F= 3384 \text{ kN}$

❖ ΚΕΚΛΙΜΕΝΑ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (INCL)



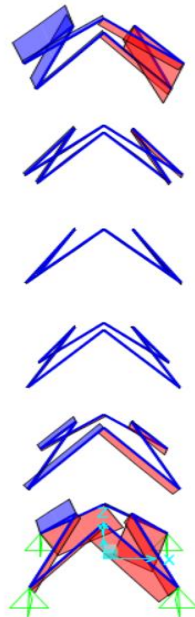
Σχήμα 4-12: Αξονικές δυνάμεις κεκλιμένα ακτινικά στοιχεία

Οι θλιπτικές και εφελκυστικές δυνάμεις είναι μεγάλες στην κορυφή, ενώ από τη στάθμη +50 m και κάτω είναι αρκετά μικρές συγκριτικά με την κορυφή, ενδεικτικά:

Θλιπτικές Δυνάμεις: Βάση $F=640 \text{ kN}$ --- Κορυφή $F=4651 \text{ kN}$
 Εφελκυστικές Δυνάμεις: Βάση $F=82 \text{ kN}$ --- Κορυφή $F=3985 \text{ kN}$

Σε αυτή την ομάδα στοιχείων κατά απόλυτη τιμή οι θλιπτικές είναι μεγαλύτερες από τις εφελκυστικές δυνάμεις, δηλαδή η θλίψη καθορίζει την επιλογή διατομών σε κάθε στάθμη.

❖ ΑΚΤΙΝΙΚΑ MOD ΣΤΟΙΧΕΙΑ (RMOD)



Σχήμα 4-13: Αξονικές δυνάμεις των ακτινικών RMOD στοιχείων

Η συγκεκριμένη ομάδα στοιχείων καταπονείται σε θλίψη και εφελκυσμό, κυρίως στη βάση και στη κορυφή. Οι δυνάμεις στις οποίες υπόκεινται, όπως και στα περιμετρικά στοιχεία είναι σημαντικά μικρότερες από άλλες ομάδες στοιχείων, ενδεικτικά:

Μέγιστες: Θλιπτικές Δυνάμεις: Βάση $F=705$ kN --- ΣΤΑΘΜΗ +50 m: $F=338$ kN
Εφελκυστικές Δυνάμεις: Βάση $F=640$ kN --- ΣΤΑΘΜΗ +50 m: $F=271$ kN

Τα στοιχεία RMOD τοποθετήθηκαν με σκοπό τον περιορισμό της στροφής του εσωτερικού κυλινδρικού κελύφους και τη μείωση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου. Τα στοιχεία RMOD στις στάθμες +20 m έως +25 m και +30 m έως +35 m καταπονούνται από πολύ μικρές αξονικές δυνάμεις. Συνεπώς, μπορεί να τεθεί υπό αμφισβήτηση η χρησιμότητα τους.

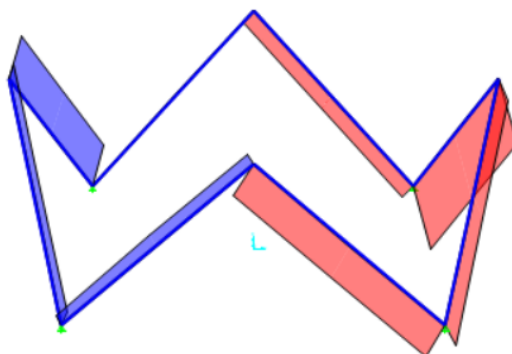
Η απάντηση μπορεί να δοθεί μέσω μιας ιδιομορφικής ανάλυσης. Από την ιδιομορφική ανάλυση της βάσης ανεμογεννήτριας χωρίς RMOD στοιχεία στις στάθμες +20 m έως +25 m και +30 m έως +35 m, προκύπτουν τα αποτελέσματα του πίνακα 4-6.

Πίνακας 4-6: Ιδιομορφική ανάλυση χωρίς RMOD στοιχεία στις στάθμες +20 m έως +25 m και +30 m έως +35 m

Διαρρύθμιση BASE & RMOD	T1(sec)	T2(sec)	T3(sec)
NO RMOD 20-->25 & 30-->35	<u>0.73</u>	0.54	0.54

Όπως, αναγράφεται στον πίνακα 4-6, τα στοιχεία RMOD στις στάθμες +20 m έως +25 m και +30 m έως +35 m, είναι απολύτως απαραίτητα για την ενίσχυση της στρεπτικής δυσκαμψίας και την εμφάνιση της 1^{ης} καμπτικής ως θεμελιώδης ιδιοπεριόδο, παρόλο που καταπονούνται από πολύ μικρές αξονικές.

❖ ΔΙΑΓΩΝΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (CROSS)



Σχήμα 4-14: Αξονικές Δυνάμεις των BASE

Ομοίως, τα διαγώνια στοιχεία καταπονούνται από μικρές αξονικές, συγκριτικά με τις άλλες ομάδες στοιχείων. Επιπλέον, και σε αυτή την ομάδα, οι θλιπτικές δυνάμεις ορίζουν τις τελικές διατομές. Ενδεικτικά:

Μέγιστη Θλιπτική = 365 kN --- Μέγιστη Εφελκυστική = 230 kN

4.3.3 Έλεγχοι επάρκειας των δομικών στοιχείων

Ακολουθεί η παρουσίαση των ελέγχων, οι οποίοι πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τον EN1993-1-1 [2], για τις νευρώσεις και τις ομάδες των στοιχείων του εξωτερικού πλαισιακού φορέα.

Για τους συγκεκριμένους ελέγχους χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές ασφαλείας $\gamma_{M0}=1.00$, $\gamma_{M1}=1.00$ και $\gamma_{M2}=1.25$. Επιπλέον, όλες οι διατομές θεωρήθηκαν ψυχρής έλασης με καμπύλη λυγισμού c και θεωρητική τιμή k για το μήκος λυγισμού μεμονωμένου υποστυλώματος ($L_{cr}=k \times L$) λήφθηκε για όλα τα στοιχεία $k=1$. Το κατακόρυφο στοιχείο διατομής CHS 406.4x25 στη βάση του εξωτερικού σωλήνα επιλέχθηκε, ώστε να παρουσιαστούν οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν μέσω του προγράμματος (SAP 2000).

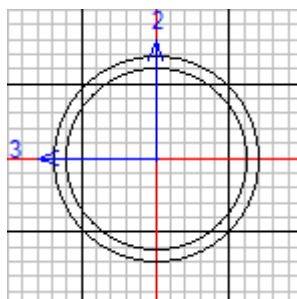
```

Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, m, C

Frame : 253      X Mid: 7.500      Combo: COMB1      Design Type: Column
Length: 5.000   Y Mid: 0.000      Shape: PIPE406.4X25  Frame Type: DCL-MRF
Loc : 2.500     Z Mid: 2.500      Class: Class 1     Rolled : No

Country=CEN Default      Combination=Eq. 6.10      Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B)  MultiResponse=Envelopes  P-Delta Done? No

```



Σχήμα 4-15: Διατομή κατακόρυφου στοιχείου (CHS)

✓ Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Aeff=0.030	eNy=0.000	eNz=0.000		
A=0.030	Iyy=5.470E-04	iyy=0.135	Wel,yy=0.003	Weff,yy=0.003
It=0.001	Izz=5.470E-04	izz=0.135	Wel,zz=0.003	Weff,zz=0.003
Iw=0.000	Iyz=0.000	h=0.406	Wpl,yy=0.004	Av,y=0.019
E=210000000.0	fy=355000.000	fu=510000.000	Wpl,zz=0.004	Av,z=0.019

✓ Εντατικά μεγέθη

Location	Ned	Med,yy	Med,zz	Ved,z	Ved,y	Ted
2.500	-7848.894	15.778	-21.214	6.311	-9.023	-1.256

✓ Έλεγχος αξονικής δύναμης

	Ned	Nc,Rd	Nt,Rd				
	Force	Capacity	Capacity				
Axial	-7848.894	10634.056	10634.056				
	Npl,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag		
	10634.056	10999.508	2419449.250	45350.592	1.000		
	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	c	0.490	45350.592	0.484	0.687	0.852	9057.694
MajorB(y-y)	c	0.490	45350.592	0.484	0.687	0.852	9057.694
Minor (z-z)	c	0.490	45350.592	0.484	0.687	0.852	9057.694
MinorB(z-z)	c	0.490	45350.592	0.484	0.687	0.852	9057.694
Torsional TF	c	0.490	45350.592	0.484	0.687	0.852	9057.694

✓ Έλεγχος διατμητικής δύναμης

	Ved	Ted	Vc,Rd	Stress	Status
	Force	Torsion	Capacity	Ratio	Check
Major (z)	6.311	1.256	3908.573	0.002	OK
Minor (y)	9.023	1.256	3908.573	0.002	OK
	Vpl,Rd	Eta	LambdabarW		
Reduction	3908.573	1.200	0.000		

✓ Έλεγχος καμπτικής ροπήs

	Med	Med,span	Mc,Rd	Mv,Rd	Mn,Rd	Mb,Rd	
	Moment	Moment	Capacity	Capacity	Capacity	Capacity	
Major (y-y)	15.778	31.555	1292.859	1292.859	1292.859	1292.859	
Minor (z-z)	-21.214	-43.773	1292.859	1292.859	1292.859		
	Curve	AlphaLT	LambdaBarLT	PhiLT	ChiLT	C1	Mcr
LTB	d	0.760	0.104	0.469	1.000	1.880	119011.591
		kyy	kyz	kzy	kzz		
Factors		0.748	0.439	0.449	0.732		

✓ Έλεγχος υπό κάμψη και θλίψη

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.62)

$$\begin{aligned} \text{D/C Ratio: } 0.894 &= 0.867 + \sqrt{(0.011)^2 + (0.025)^2} < 0.950 \quad \text{OK} \\ &= N_{Ed}/(\chi_{i,z} N_{Rk}/\gamma_{M1}) + \sqrt{[(k_{zy} (M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny})/(\chi_{i,LT} M_{y,Rk}/\gamma_{M1}))^2 \\ &\quad + (k_{zz} (M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz})/(\chi_{i,Rk}/\gamma_{M1}))^2]} \quad (\text{EC3 6.3.3(4)-6.62}) \end{aligned}$$

Ακολουθεί ο έλεγχος της αξονικής δύναμης, προκειμένου να διαπιστωθεί η εγκυρότητα των ελέγχων που διενεργεί το πρόγραμμα.

$$N_{Ed} = -7484.894 \text{ kN}$$

$$N_{t,rd} = \min\{N_{pl,rd}; N_{u,rd}\} = \left\{ \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}}; \frac{k \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{M2}} \right\} \quad (4-1)$$

$$N_{pl,rd} = 10634.1 \text{ kN}$$

$$N_{u,rd} = 10999.5 \text{ kN}$$

$$N_{t,rd} = 10634.1 \text{ kN} > N_{Ed} \quad \text{ΕΛΕΓΧΟΣ OK}$$

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd}, \text{ με } N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4-2)$$

$$N_{c,Rd} = 10634.056 \text{ kN} > N_{Ed} \quad \text{ΕΛΕΓΧΟΣ OK}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \times \frac{1}{\lambda_1} \quad (4-3)$$

με $L_{cr} = 500 \text{ cm}$ ($k=1$), $i=13.5 \text{ cm}$ για διατομή CHS 406.4x25, $\lambda_1 = 76.397$, αφού $\varepsilon = 0.8136$ (S355)

Συνεπώς, $\bar{\lambda} = 0.484$

$$\Phi = 0,5 \times [1 + \alpha \times (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (4-4)$$

με καμπύλη λυγισμού c, $\alpha = 0.49$

Άρα, $\Phi = 0.687$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (4-5)$$

Επομένως, $\chi = 0.852$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \times f_y \times A}{\gamma_{M1}} \quad (4-6)$$

$$N_{b,Rd} = 9057.964 \text{ kN}$$

Επομένως, $N_{Ed} < N_{b,Rd}$ *ΕΛΕΓΧΟΣ OK*

Συμπερασματικά, ο έλεγχος της αξονικής δύναμης είναι ορθός και απεδείχθη διενεργώντας και τις επιμέρους πράξεις. Με παρόμοιο τρόπο επαληθευτήκαν και οι υπόλοιποι έλεγχοι, αλλά δεν παρουσιάζονται, καθώς ο σκοπός δεν ήταν η εφαρμογή του EN1993-1-1 [2], αλλά ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας του προγράμματος.

4.4 Παραμετρική ως προς την εκμετάλλευση διατομών

Στην παρούσα παράγραφο πραγματοποιείται μια παραμετρική διερεύνηση, ως προς την εκμετάλλευση των διατομών του εξωτερικού πλαισιακού φορέα. Όπως αναφέρθηκε και στη παρουσίαση της φόρτισης της βάσης ανεμογεννήτριας παράγραφος 3.3, τα φορτία του ανέμου που δρουν στη βάση της ανεμογεννήτριας, δε λαμβάνονται υπόψιν. Για το λόγο αυτό επιλέγονται διατομές, με εκμετάλλευση περί το 70%, ώστε να αφεθεί περιθώριο για άλλους παράγοντες που δε λήφθηκαν υπόψιν, όπως ο άνεμος. Μια τέτοια παραμετρική, αναμένεται να αυξήσει το συνολικό βάρος της κατασκευής, γεγονός που συμβάλει στην καταγραφή της επίδραση του βάρους, στη μετακίνηση κορυφής της κατασκευής και στα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης. Συνολικά, λοιπόν, η επίδραση της παραπάνω παραμετρικής, αφορά τα εξής χαρακτηριστικά της κατασκευής:

- A. Οι πρώτες ιδιοπερίοδοι (T) της κατασκευής καθώς και το είδος τους.
- B. Η μετακίνηση κορυφής $U_{\text{κορ}}$
- C. Το βάρος της κατασκευής

Στον πίνακα 4-7 σημειώνονται οι διατομές, που επιλέχθηκαν για τις ομάδες μελών, έπειτα από διαδοχικές δοκιμές με στόχο την εκμετάλλευση των διατομών περί το 70%.

Πίνακας 4-7: Διατομές των στοιχείων του εξωτερικού πλαισιακού φορέα με εκμετάλλευση περί το 70%

ΥΨΟΜΕΤΡΟ		ΟΜΑΔΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (mm x mm)					ΟΜΑΔΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (mm x mm)	
ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	VERT	INCL	RMOD	CROSS	ΣΤΑΘΜΗ (m)	RAD	CIRC
0	5	406.4x30	244.5x8	273x8	177.8x8	5	168.3x5	88.9x5
5	10	406.4x30	219.1x8			10	139.7x5	60.3x3.2
10	15	406.4x30	219.1x8	168.3x6.3		15	139.7x5	33.7x4
15	20	406.4x30	219.1x8			20	139.7x5	33.7x4
20	25	406.4x30	219.1x8	88.9x5		25	139.7x5	33.7x4
25	30	406.4x30	219.1x8			30	168.3x5	33.7x4
30	35	406.4x30	219.1x8	88.9x5		35	168.3x5	33.7x4
35	40	406.4x25	219.1x8			40	168.3x5	33.7x4
40	45	406.4x25	244.5x6.3	114.3x5		45	177.8x6.3	42.4x4
45	50	406.4x20	273x8			50	323.9x8	88.9x4
50	55	406.4x16	355.6x12.5	219.1x8		55	406.4x10	33.7x4
55	60		406.4x25			60		

Στους επόμενους δύο πίνακες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των δύο περιπτώσεων εκμετάλλευσης.

Πίνακας 4-8: Χαρακτηριστικά κατασκευής με εκμετάλλευση περί το 90%

T_1 (sec)	T_2 (sec)	T_3 (sec)	T_4 (sec)	$U_{\text{κορ}}$ (m)	Βάρος (tn)
0.54	0.54	0.48	0.29	0.308	265

Πίνακας 4-9: Χαρακτηριστικά της κατασκευής με εκμετάλλευση περί το 70%

T1 (sec)	T2 (sec)	T3 (sec)	T4 (sec)	U _{κορ} (m)	Βάρος (tn)
0.54	0.54	0.52	0.31	0.242	310

Πίνακας 4-10: Ιδιοσυχνότητες πρώτων ιδιοπεριόδων κατασκευής

Εκμετάλλευση	Ιδιοσυχνότητα (rad/sec)	
	1η καμπτική	3η στρεπτική
~90%	11.5	13.1
~70%	11.6	12.1

Όπου:

- ✓ Οι *καμπτικές* ιδιοσυχνότητες είναι γραμμένες με πλάγια γραφή, ενώ οι *στρεπτικές* είναι υπογραμμισμένες
- ✓ U_{κορ}: μετακίνηση κορυφής

Αξίζει να σημειωθεί, πως το βάρος της κατασκευής είναι προσεγγιστικό. Δεν έχει υπολογιστεί το βάρος των μελών σύνδεσης (ελάσματα και κοχλίες). Εντούτοις, έχει υπερτιμηθεί το βάρος των κυκλικών διατομών (CHS) του εξωτερικού πλαισιακού φορέα, διότι το πρόγραμμα υπολογίζει ολόκληρα τα μήκη των διατομών (θα πρέπει να αφαιρεθεί ένα μικρό μήκος στα άκρα του στοιχείου, λόγω της μορφής των συνδέσεων). Τέλος, στο εσωτερικό κέλυφος έχει αφεθεί αρκετό περιθώριο αντοχής, διότι δεν έχει ληφθεί υπόψιν ο άνεμος, όπως έχει επισημανθεί επανειλημμένα.

Συμπερασματικά, η μείωση της απαίτησης των διατομών κατά 20%, οδηγεί σε αύξηση του βάρους της κατασκευής κατά 16%, ενώ ταυτόχρονα η μετατόπιση κορυφής μειώνεται κατά 21%. Ως προς το είδος των ιδιοπεριόδων δεν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση, αλλά ούτε στη τιμή της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου (χιλιοστά δευτερολέπτου). Συνεπώς, σε εξωτερική ακτίνα R_{εξ}=7.5 m, η αύξηση του βάρους κατά 16%, αφήνει σχεδόν αμετάβλητη τη δυσκαμψία της κατασκευής. Τέλος, όσον αφορά τις μετακινήσεις κορυφής, σύμφωνα με τον κανονισμό ^[2] ο κατασκευαστής θα πρέπει να έρθει σε συνεννόηση με τον κύριο του έργου, για αυτές. Στον πίνακα 4-11, παρουσιάζονται οι μετακινήσεις και για τις δύο εκμεταλλεύσεις με τη σύγκριση ως προς το ύψος.

Πίνακας 4-11: Μετακίνηση κορυφής

Εκμετάλλευση	U _{κορ}	
~90%	0.308	H/195
~70%	0.242	H/248

Όπου:

- ✓ H=60 m, δηλαδή το ύψος της βάσης ανεμογεννήτριας

5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΚΤΙΝΑΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΑΚΟΥ ΦΟΡΕΑ

Σε συνέχεια του προηγούμενου κεφαλαίου, κρίθηκε απαραίτητο να διερευνηθεί η επίδραση της ακτίνας εξωτερικού πλαίσιακού φορέα, ώστε να καταγραφούν οι διαφοροποιήσεις σε διάφορα χαρακτηριστικά της βάσης ανεμογεννήτριας. Χαρακτηριστικά όπως η μετακίνηση κορυφής, το βάρος και η δυσκαμψία της κατασκευής. Έτσι, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα των αναλύσεων ακτίνας $R_{εξ}=5$ m, $R_{εξ}=10$ m και $R_{εξ}=12.5$ m του εξωτερικού πλαίσιακού φορέα. Εν συνεχεία, διεξάγονται συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων μέσω διαγραμμάτων και διατυπώνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω παραμετρική διερεύνηση.

5.1 Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων ακτίνας εξωτερικού πλαίσιακού φορέα

Ακολουθεί η παρουσίαση των διατομών για εκμετάλλευση περί το 90% για κάθε ακτίνα. Επιπλέον, παρατίθενται και για τις δύο κατηγορίες εκμετάλλευσης διατομής περί α) 90% και β) 70% με τα εξής αποτελέσματα:

- A. Οι πρώτες ιδιοπερίοδοι (T) της κατασκευής καθώς και το είδος τους
- B. Η μετακίνηση κορυφής $U_{κορ}$
- C. Το βάρος της κατασκευής

Τέλος, στην αρχή κάθε υποπαραγράφου καταγράφεται η διαρρύθμιση των ομάδων στοιχείων για τα ακτινικά mod στοιχεία (RMOD) και τα διαγώνια στοιχεία (CROSS), καθώς δεν είναι ίδια ούτε σε πλήθος, ούτε το βήμα τους σε κάθε ακτίνα εξωτερικού πλαίσιακού φορέα διερεύνησης.

5.1.1 Ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα $R_{εξ}=5$ m

Διαρρύθμιση στοιχείων RMOD & CROSS MEMBERS:

- ✓ Ακτινικά mod στοιχεία (RMOD): από τη στάθμη +0 m έως τη στάθμη +50 m με βήμα 10 m (6 στάθμες)
- ✓ Διαγώνια στοιχεία (CROSS): μόνο στη στάθμη +0 m έως +5 m (1 στάθμη)

Πίνακας 5-1: Διατομές των στοιχείων εξωτερικού πλαισιακού φορέα με $R_{εξ}=5$ m και εκμετάλλευση περί το 90 %

ΥΨΟΜΕΤΡΟ		ΟΜΑΔΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (mm x mm)					ΟΜΑΔΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (mm x mm)	
ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	VERT	INCL	RMOD	CROSS	ΣΤΑΘΜΗ (m)	RAD	CIRC
0	5	457X30	273X6.3	244.5x6.3	244.5x6.3	5	139.7X5	76.1X3.2
5	10	457X30	219.1x6.3			10	114.3X4	60.3X3.2
10	15	457X30	219.1x6.3	139.7X4		15	101.6X4	33.7X2.6
15	20	457X30	193.7x6.3			20	101.6X4	33.7X2.6
20	25	457X30	177.8X6.3	88.9X3.2		25	101.6X4	33.7X2.6
25	30	457X30	177.8X6.3			30	88.9x3.2	33.7X2.6
30	35	457X30	168.3X5	76.1X3.2		35	88.9x3.2	48.3X3.2
35	40	457X30	168.3X6.3			40	114.3X4	60.3X3.2
40	45	457X30	219.1x6.3	139.7X4		45	168.3X6.3	48.3X2.6
45	50	457X25	273X8			50	323.9x8	48.3X3.2
50	55	457X16	406.4X10	168.3X6.3		55	406.4x10	48.3X3.2
55	60		457x10			60		

Πίνακας 5-2: Χαρακτηριστικά κατασκευής με $R_{εξ}=5$ m και εκμετάλλευση περί το 90%

T_1 (sec)	T_2 (sec)	T_3 (sec)	T_4 (sec)	$U_{κορ}$ (m)	Βάρος (tn)
0.61	0.61	0.41	0.24	0.405	285

Πίνακας 5-3: Χαρακτηριστικά κατασκευής με $R_{εξ}=5$ m και εκμετάλλευση περί το 70%

T_1 (sec)	T_2 (sec)	T_3 (sec)	T_4 (sec)	$U_{κορ}$ (m)	Βάρος (tn)
0.58	0.58	0.41	0.24	0.32	325

Όπου:

- ✓ Οι καμπτικές ιδιοπερίοδοι είναι γραμμένες με πλάγια γραφή, ενώ οι στρεπτικές είναι υπογραμμισμένες
- ✓ $U_{κορ}$: μετακίνηση κορυφής

Πίνακας 5-4: Ιδιοσυχρότητες πρώτων ιδιοπεριόδων κατασκευής για $R_{εξ}=5$ m

Εκμετάλλευση	Ιδιοσυχρότητα (rad/sec)	
	1 ^η καμπτική	3 ^η στρεπτική
~90%	10.3	15.3
~70%	10.8	15.3

Συμπερασματικά, η μείωση της απαίτησης των διατομών κατά 20%, οδηγεί σε αύξηση του βάρους της κατασκευής κατά 14% και ταυτόχρονα η μετατόπιση κορυφής μειώνεται κατά 21%. Επιπλέον, ως προς το είδος των ιδιοπεριόδων δεν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση. Ωστόσο, η μείωση της εκμετάλλευσης οδήγησε σε μικρή αύξηση (5%) της ιδιοσυχρότητας, δηλαδή σε μικρή αύξηση της δυσκαμψίας.

5.1.2 Ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα $R_{εξ}=10$ m

Για πρώτη φορά, παρατηρείται αλλαγή στη διαρρύθμιση των RMOD και CROSS στοιχείων, διότι η αύξηση της εξωτερικής ακτίνας πλαισιακού φορέα, καθιστά πιο ευάλωτη την κατασκευή στη στρεπτική καταπόνηση. Τα RMOD τοποθετούνται με μικρότερο βήμα και τα CROSS στοιχεία τοποθετούνται και αυτά σε πάνω από μία στάθμη.

Διαρρύθμιση στοιχείων RMOD & CROSS MEMBERS:

- ✓ Ακτινικά mod στοιχεία (RMOD): από τη στάθμη +0 m έως τη στάθμη +50 m με βήμα 5 m (11 στάθμες)
- ✓ Διαγώνια στοιχεία (CROSS): από τη στάθμη +0 m έως +40 m με βήμα 20 m (3 στάθμες)

Πίνακας 5-5: Διατομές των στοιχείων του εξωτερικού πλαισιακού φορέα με $R_{εξ}=10$ m και εκμετάλλευση περί το 90%

ΥΨΟΜΕΤΡΟ		ΟΜΑΔΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (mm x mm)				ΣΤΑΘΜΗ (m)	ΟΜΑΔΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (mm x mm)	
ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	VERT	INCL	RMOD	CROSS		RAD	CIRC
0	5	457X16	273X8	273x6.3	219.1x6.3	5	168.3X5	139.7X5
5	10	457X16	273x6.3	168.3X6.3		10	168.3X5	139.7X5
10	15	457X16	273x6.3	139.7X6.3		15	168.3X5	139.7X5
15	20	457X16	273x6.3	114.3X5		20	168.3X5	139.7X5
20	25	457X16	273x6.3	101.6X4	139.7X6.3	25	168.3X6.3	139.7X5
25	30	457X16	273x6.3	101.6X4		30	168.3X6.3	139.7X5
30	35	457X12.5	273x6.3	88.9X4		35	193.7X6.3	139.7X5
35	40	457X12.5	273x6.3	114.3X5		40	219.1x6.3	139.7X5
40	45	457X12.5	273x6.3	139.7X6.3	177.8X6.3	45	244.5X6.3	168.3X5
45	50	457X10	323.9X8	168.3X6.3		50	323.9X8	168.3X5
50	55	457X10	355.6x10	273x6.3		55	457x10	168.3X5
55	60		406.4x16			60		

Πίνακας 5-6: Χαρακτηριστικά κατασκευής με $R_{εξ}=10$ m και εκμετάλλευση περί το 90%

T_1 (sec)	T_2 (sec)	T_3 (sec)	T_4 (sec)	$U_{\text{κορ}}$ (m)	Βάρος (tn)
0.58	0.58	0.57	0.31	0.257	310

Πίνακας 5-7: Χαρακτηριστικά κατασκευής με $R_{εξ}=10$ m και εκμετάλλευση περί το 70%

T_1 (sec)	T_2 (sec)	T_3 (sec)	T_4 (sec)	$U_{\text{κορ}}$ (m)	Βάρος (tn)
0.55	0.55	0.52	0.22	0.19	375

Όπου:

- ✓ Οι *καμπτικές* ιδιοπεριόδοι είναι γραμμένες με πλάγια γραφή, ενώ οι *στρεπτικές* είναι υπογραμμισμένες
- ✓ $U_{\text{κορ}}$: μετακίνηση κορυφής

Πίνακας 5-8: Ιδιοσυχνότητες πρώτων ιδιοπεριόδων κατασκευής για $R_{εξ}=10$ m

Εκμετάλλευση	Ιδιοσυχνότητα (rad/sec)	
	1 ^η καμπτική	3 ^η στρεπτική
~90%	10.8	11
~70%	11.4	12.1

Συμπερασματικά, η μείωση της απαίτησης των διατομών κατά 20% οδηγεί σε αύξηση του βάρους της κατασκευής κατά 21%, ενώ ταυτόχρονα η μετατόπιση κορυφής μειώνεται κατά 26%. Δεν παρατηρείται αλλαγή ως προς το είδος των ιδιομορφών. Η μείωση της εκμετάλλευσης οδήγησε σε μικρή αύξηση της ιδιοσυχνότητας περί το 6 %, δηλαδή σε ελάχιστη αύξηση της δυσκαμψίας.

5.1.3 Ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα $R_{εξ}=12.5$ m

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση ($R_{εξ}=10$ m), τα στοιχεία των ομάδων RMOD και CROSS αυξάνονται σε πλήθος και βήμα.

Διαρρύθμιση στοιχείων MOD & CROSS MEMBERS:

- ✓ Radial mod members / Ακτινικά mod στοιχεία: από τη στάθμη +0 m έως τη στάθμη +50 m με βήμα 5 m (11 στάθμες)
- ✓ Cross members / Διαγώνια στοιχεία: από τη στάθμη +0 m έως +50 m με βήμα 10 m (6 στάθμες)

Πίνακας 5-9: Διατομές των στοιχείων του εξωτερικού πλαίσιακού φορέα με $R_{εξ}=12.5$ m και εκμετάλλευση περί το 90%

ΥΨΟΜΕΤΡΟ		ΟΜΑΔΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (mm x mm)					ΟΜΑΔΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (mm x mm)	
ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	VCOL	INCL	RMOD	CROSS	ΣΤΑΘΜΗ (m)	RAD	CIRC
0	5	457X16	323.9X8	273x6.3	193.7X6.3	5	168.3X6.3	139.7X5
5	10	457X16	273X8	177.8X6.3		10	168.3X5	139.7X5
10	15	457X16	273X8	139.7X5	168.3X6.3	15	177.8X6.3	168.3X5
15	20	457X16	273X8	114.3X5		20	177.8X6.3	168.3X5
20	25	457X12.5	273X8	114.3X5	193.7X6.3	25	177.8X6.3	168.3X5
25	30	457X12.5	273X8	114.3X5		30	193.7X6.3	168.3X5
30	35	457X12.5	273X8	139.7X5	193.7X6.3	35	219.1X6.3	168.3X5
35	40	457X10	273X8	139.7X6.3		40	219.1X6.3	168.3X5
40	45	457X10	323.9X8	168.3X5	193.7X6.3	45	273X6.3	168.3X5
45	50	457X10	323.9X8	193.7X6.3		50	355.6X10	177.8X6.3
50	55	457X10	457X16	273x6.3	193.7X6.3	55	457x16	168.3X5
55	60		457X30			60		

Πίνακας 5-10: Χαρακτηριστικά κατασκευής με $R_{εξ}=12.5$ m και εκμετάλλευση περί το 90%

T_1 (sec)	T_2 (sec)	T_3 (sec)	T_4 (sec)	$U_{κορ}$ (m)	Βάρος (tn)
0.61	0.61	0.6	0.25	0.2	375

Πίνακας 5-11: Χαρακτηριστικά κατασκευής με $R_{εξ}=12.5$ m και εκμετάλλευση περί το 70%

T_1 (sec)	T_2 (sec)	T_3 (sec)	T_4 (sec)	$U_{κορ}$ (m)	Βάρος (tn)
0.58	0.58	0.55	0.20	0.15	460

Πίνακας 5-12: Ιδιοσυχνότητες πρώτων ιδιοπεριόδων κατασκευής για $R_{εξ}=10$ m

Εκμετάλλευση	Ιδιοσυχνότητα (rad/sec)	
	1 ^η καμπτική	3 ^η στρεπτική
~90%	10.3	10.5
~70%	10.8	11.4

Η μείωση της απαίτησης των διατομών κατά 20% οδηγεί σε αύξηση του βάρους της κατασκευής κατά 25%, ενώ ταυτόχρονα η μέγιστη μετατόπιση κορυφής μειώνεται κατά 25%. Καμία διαφοροποίηση

δεν παρατηρήθηκε ως προς το είδος των ιδιομορφών. Τέλος, η μείωση της εκμετάλλευσης οδήγησε σε μικρή αύξηση της ιδιοσυχνότητας (6%), δηλαδή σε μικρή αύξηση της δυσκαμψίας.

5.2 Συγκρίσεις και συμπεράσματα παραμετρικών αναλύσεων $R_{εξ}$

Στην παρούσα παράγραφο διεξάγονται συγκρίσεις για τις διατομές, με εκμετάλλευση περί το 90%, για τις διάφορες ομάδες των στοιχείων που απαρτίζουν τον εξωτερικό πλαισιακό φορέα ως προς τις τέσσερις ακτίνες εξωτερικού πλαισιακού φορέα που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Στη συνέχεια, παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών που αναλύθηκαν. Συγκεκριμένα, η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα, το βάρος κατασκευής και η μετακίνηση κορυφής, για τις δύο κατηγορίες εκμετάλλευσης. Ολοκληρώνοντας, θα επιλεγθεί η βέλτιστη ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο για τη μελέτη της δακτυλιοειδούς θεμελίωσης.

5.2.1 Σύγκριση διατομών των στοιχείων

Για τη σύγκριση των διατομών των στοιχείων, επιλέχθηκαν δυο συγκεκριμένες ομάδες στοιχείων. Τα κεκλιμένα ακτινικά στοιχεία (INCL) και τα κατακόρυφα (VERT). Όπως, έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, τα ακτινικά μέλη χρησιμοποιούνται ως συνδετικός κρίκος του εσωτερικού κυλινδρικού κελύφους με τον εξωτερικό δακτύλιο. Μεταφέρουν τα φορτία της κορυφής της βάσης ανεμογεννήτριας προς τα έξω. Από την άλλη, τα κατακόρυφα στοιχεία αναλαμβάνουν κυρίως την κατακόρυφη δύναμη, το ίδιο βάρος αλλά και την ροπή στην κορυφή με ζεύγη δυνάμεων. Όσο μειώνεται το υψόμετρο, η τιμή της συνολική ροπή αυξάνεται, αφού η οριζόντια δύναμη δημιουργεί επιπρόσθετη ροπή.

Πίνακας 5-13: Κεκλιμένα ακτινικά στοιχεία όλων των εξεταζόμενων $R_{εξ}$ με εκμετάλλευση περί το 90%

INCL		$R_{εξ}$ (m)			
ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	5	7.5	10	12.5
0	5	273X6.3	244.5x6.3	273X8	323.9X8
5	10	219.1x6.3	244.5x6.3	273x6.3	273X8
10	15	219.1x6.3	244.5x6.3	273x6.3	273X8
15	20	193.7x6.3	244.5x6.3	273x6.3	273X8
20	25	177.8X6.3	244.5x6.3	273x6.3	273X8
25	30	177.8X6.3	244.5x6.3	273x6.3	273X8
30	35	168.3X5	244.5x6.3	273x6.3	273X8
35	40	168.3X6.3	244.5x6.3	273x6.3	273X8
40	45	219.1x6.3	244.5x6.3	273x6.3	323.9X8
45	50	273X8	273x6.3	323.9X8	323.9X8
50	55	406.4X10	355.6x8	355.6x10	457X16
55	60	457x10	406.4X16	406.4x16	457X30

Στον πίνακα 5-13, παρατηρείται, ότι όσο μεγαλώνει η $R_{εξ}$, το πάχος των διατομών t αυξάνεται. Σύμφωνα και με την αναφορά στη παράγραφο 4.4.2, οι θλιπτικές δυνάμεις κατά απόλυτη τιμή είναι μεγαλύτερες σε μέτρο από τις εφελκυστικές. Άρα, αυτές καθορίζουν την επιλογή διατομής σε κάθε στάθμη. Εφόσον η φόρτιση είναι ίδια, το χαρακτηριστικό που μεταβάλλεται όσο αυξάνεται η $R_{εξ}$, είναι τα μήκη των ακτινικών στοιχείων που και αυτά αυξάνονται με τη σειρά τους. Η αύξηση του κρίσιμου μήκους λυγισμού, έχει ως επακόλουθο τη μείωση του μειωτικού συντελεστή χ , άρα και τη μείωση της αντοχής σε λυγισμό $N_{b,rd}$ (EN1993-1-1 §6.3.1 ^[2]). Επομένως, το αποτέλεσμα θα είναι η επιλογή

μεγαλύτερων διατομών. Για τον ίδιο λόγο, επιλέγονται μεγαλύτερες διατομές για τις υπόλοιπες ομάδες ακτινικών στοιχείων.

Πίνακας 5-14: Κατακόρυφα στοιχεία όλων των εξεταζόμενων $R_{εξ}$ με εκμετάλλευση περί το 90%

VERT		$R_{εξ}$ (m)			
ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	5	7.5	10	12.5
0	5	457X30	406.4X25	457X16	457X16
5	10	457X30	406.4X25	457X16	457X16
10	15	457X30	406.4X25	457X16	457X16
15	20	457X30	406.4X25	457X16	457X16
20	25	457X30	406.4X20	457X16	457X12.5
25	30	457X30	406.4X20	457X16	457X12.5
30	35	457X30	406.4X20	457X12.5	457X12.5
35	40	457X30	406.4X20	457X12.5	457X10
40	45	457X30	406.4X16	457X12.5	457X10
45	50	457X25	406.4X16	457X10	457X10
50	55	457X16	406.4X12.5	457X10	457X10

Όσο η $R_{εξ}$ αυξάνεται, η απαίτηση σε πάχος t διατομής μειώνεται, παρόλο που υπόκειται σε ίδια φόρτιση κορυφής. Γίνεται σαφές, πως τα κατακόρυφα στοιχεία καταπονούνται κυρίως από την ροπή, την οποία λαμβάνουν με ζεύγη δυνάμεων. Επομένως, η αύξηση της $R_{εξ}$, αυξάνει τον μοχλοβραχίονα των ζευγών των δυνάμεων. Η τιμή των δυνάμεων αυτών μειώνεται, άρα και η απαίτηση πάχους των διατομών.

5.2.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών κατασκευής

Στη παρούσα υποπαράγραφο παρουσιάζονται διαγράμματα, για την γραφική αναπαράσταση της μεταβολής των χαρακτηριστικών της κατασκευής: α) Βάρος, β) Θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα, γ) $U_{κορ}$ ως προς την ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα με εκμετάλλευση διατομών περί το 90% και 70%. Ύστερα, με βάση τα συμπεράσματα θα γίνει η επιλογή της βέλτιστης ακτίνας εξωτερικού πλαισιακού φορέα, ώστε να ακολουθήσει η ανάλυση της θεμελίωσης.

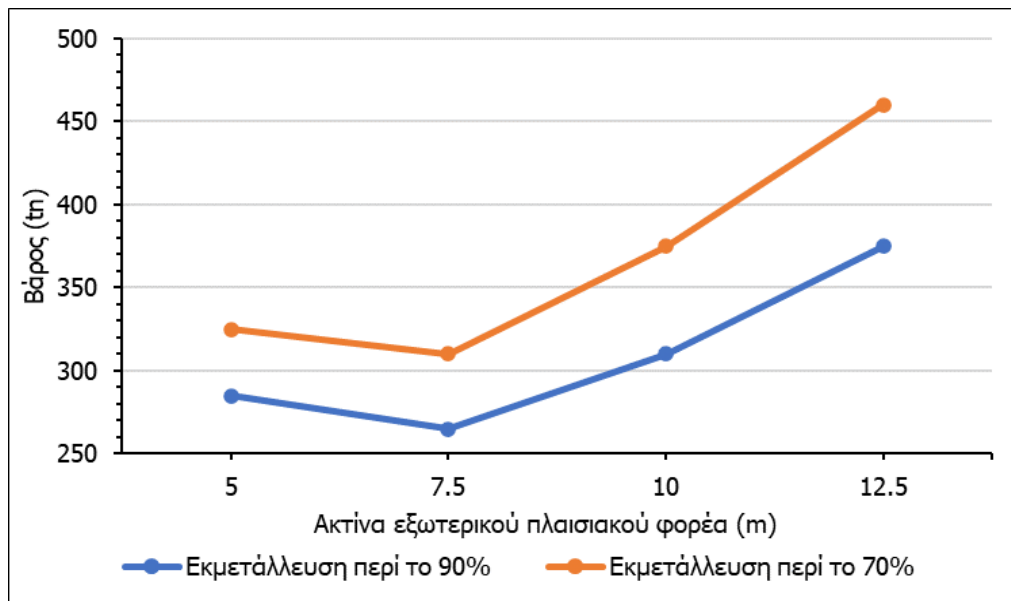
Πίνακας 5-15: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για εκμετάλλευση περί το 90%

ΑΚΤΙΝΑ (m)	ΒΑΡΟΣ (tn)	ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (rad/sec)	$U_{κορ}$ (m)
5	285	10.3	0.41
7.5	265	11.6	0.308
10	310	10.8	0.257
12.5	375	10.3	0.2

Πίνακας 5-16: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για εκμετάλλευση περί το 70%

ΑΚΤΙΝΑ (m)	ΒΑΡΟΣ (tn)	ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (rad/sec)	$U_{\text{κoρ}}$ (m)
5	325	10.8	0.32
7.5	310	11.6	0.242
10	375	11.4	0.18
12.5	460	10.8	0.15

➤ Βάρος



Γράφημα 5-1: Μεταβολή βάρους ανά εξωτερική ακτίνα με εκμετάλλευση περί το 90% και το 70%

Η μείωση της εκμετάλλευσης των διατομών κατά 20%, οδηγεί σε αύξηση του βάρους της βάσης ανεμογεννήτριας. Όπως, φάνηκε από τους πίνακες σύγκρισης διατομών, η μείωση της εκμετάλλευσης οδηγεί σε επιλογή διατομών με μεγαλύτερο πάχος t . Συνεπώς, η αύξηση του βάρους είναι αναμενόμενη. Από το γράφημα 5-1 γίνεται αντιληπτό, ότι και για τις δύο εκμεταλλεύσεις διατομών, η αύξηση της ακτίνας εξωτερικού πλαισιακού φορέα από τα 5 m στα 7.5 m δεν οδηγεί σε αύξηση του βάρους, αλλά αντιθέτως σε μείωση, περί το 7%. Για να γίνει σαφής ο λόγος αυτής της μείωσης, υπολογίζονται τα επιμέρους βάρη των δομικών υλικών.

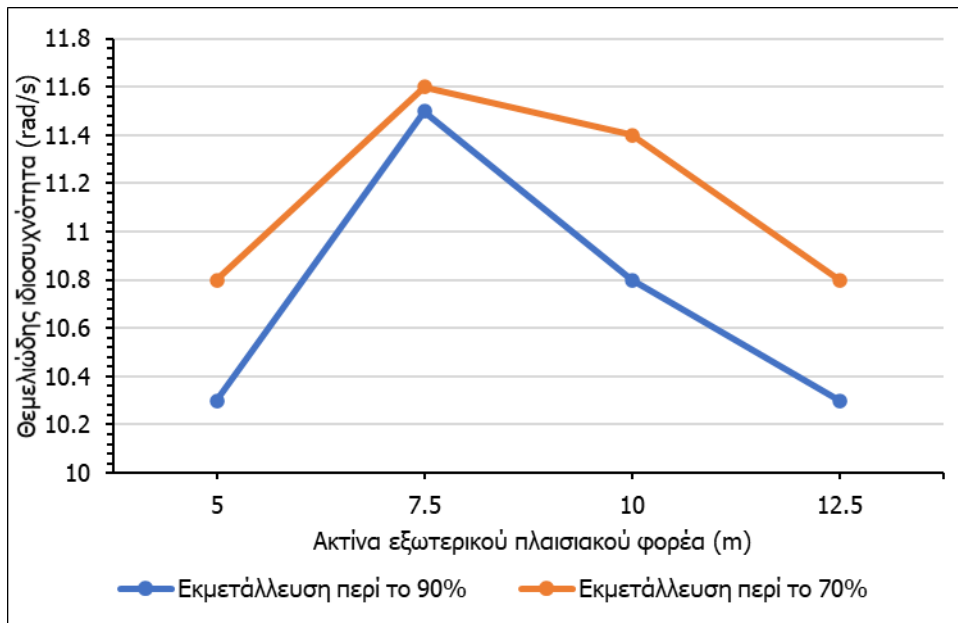
Πίνακας 5-17: Επιμέρους βάρη δομικών στοιχείων για $R_{εξ}=5$ m και $R_{εξ}=7.5$ m

Κατηγορία	Βάρος (tn)	
	$R_{εξ}=5$ m	$R_{εξ}=7.5$ m
Νευρώσεις	15	15
Εσωτερικό κέλυφος	110	110
Διατομές CHS	170	150
Σύνολο	285	265

Στον πίνακα 5-17, αναγράφονται τα επιμέρους βάρη των δομικών υλικών για εκμετάλλευση 90%, στις περιπτώσεις με $R_{εξ}=5$ m και $R_{εξ}=7.5$ m. Οι δύο περιπτώσεις έχουν περίπου ίδιο βάρος νευρώσεων και εσωτερικού κελύφους. Όμως, το βάρος των διατομών της $R_{εξ}=7.5$ m είναι κατά 20 τόνους ελαφρύτερο από το αντίστοιχο της $R_{εξ}=5$ m. Επομένως, για τη μείωση του βάρους της βάσης ανεμογεννήτριας, ευθύνονται οι διατομές CHS. Όπως έχει επισημανθεί οι θλιπτικές δυνάμεις σχεδόν σε όλες τις ομάδες στοιχείων, καθορίζουν τη διατομή σε κάθε στάθμη. Συνεπώς, αύξηση της ακτίνας του εξωτερικού πλαισιακού φορέα, οδηγεί σε αύξηση μήκους των μελών, άρα και του κρίσιμου μήκους λυγισμού, επομένως σε μεγαλύτερη απαίτηση πάχους και αύξηση βάρους. Υπάρχει όμως μία ομάδα στοιχείων που δεν αλλάζει μήκος και είναι αυτή των κατακόρυφων στοιχείων. Επιπλέον, πέραν του ότι δεν αλλάζουν μήκος, η αύξηση του μοχλοβραχίονα μειώνει και τα ζεύγη δυνάμεων που παραλαμβάνουν. Στους πίνακες 5-1 και 4-2 όπου απεικονίζονται οι διατομές για $R_{εξ}=5$ m και $R_{εξ}=7.5$ m αντίστοιχα, παρατηρείται πως για τις ακτινικές ομάδες στοιχείων αυξάνεται το πάχος κατά 1-2 mm. Απεναντίας στα κατακόρυφα στοιχεία, σε όλες στις στάθμες παρατηρείται πως οι διατομές των κατακόρυφων στοιχείων της $R_{εξ}=5$ m είναι κατά 5 mm και για ορισμένες στάθμες κατά 10 mm παχύτερες από τις αντίστοιχες των $R_{εξ}=7.5$ m. Εν κατακλείδι, αυτή η παρατήρηση μοιάζει να είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς η ακτίνα 7.5 m ή μια άλλη τιμή κοντά στα 7.5 m, είναι η βέλτιστη ως προς το βάρος, αρά και την οικονομία του υλικού.

Τέλος, η αύξηση του βάρους στην ακτίνα 10 m και 12.5 m, είναι απολύτως αναμενόμενη, κυρίως από το γεγονός ότι για όλα τα ακτινικά μέλη αυξάνεται το μήκος άρα και η απαίτηση σε πάχος διατομής.

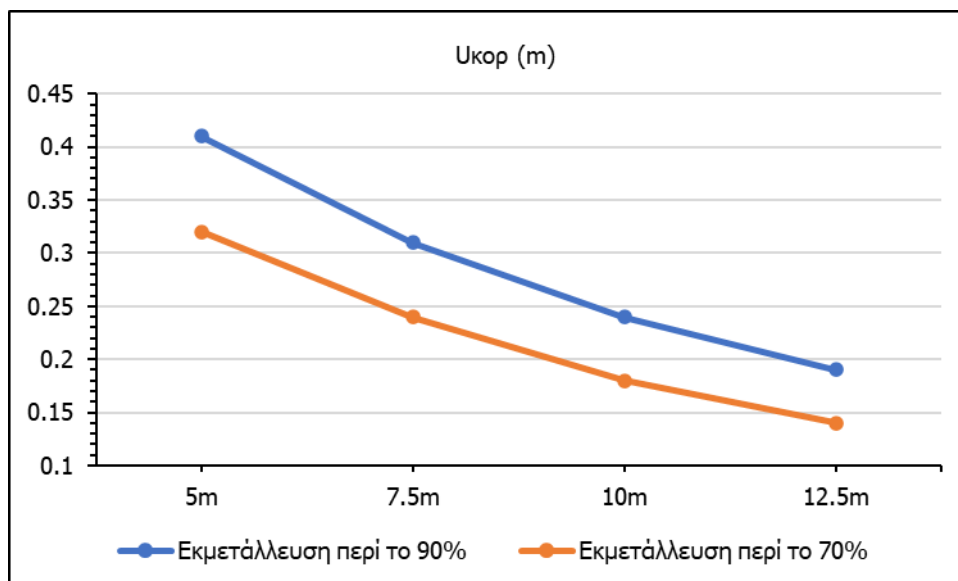
➤ Θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα (rad/sec)



Γράφημα 5-2: Μεταβολή θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας ανά $R_{εξ}$ με εκμετάλλευση περί το 90% και 70%

Από το γράφημα 5-2 προκύπτει, πως η μείωση της εκμετάλλευσης των διατομών, οδηγεί σε αύξηση της ιδιοσυχνότητας, επομένως και της δυσκαμψίας της βάσης ανεμογεννήτριας. Η διαπίστωση αυτή ήταν αναμενόμενη, εφόσον από το προηγούμενο γράφημα η αύξηση του βάρους ήταν γνωστό, ότι θα καταστήσει τη βάση ανεμογεννήτριας, πιο δύσκαμπτη. Για τις δύο εκμεταλλεύσεις διατομών, η ιδιοσυχνότητα μεγιστοποιείται για ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα ίση με 7.5 m.

➤ $U_{κορ}$



Γράφημα 5-3: Μεταβολή μετακίνησης κορυφής $U_{κορ}$ ανά $R_{εξ}$ με εκμετάλλευση περί το 90% και 70%

Παρατηρείται, πως η μετακίνηση κορυφής μειώνεται με τη μείωση της εκμετάλλευσης. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, εφόσον το βάρος αυξάνεται. Επίσης, η μείωση της μετακίνησης της κορυφής, μέσω της μείωσης της εκμετάλλευσης, είναι άλλη μία ένδειξη της αύξησης της δυσκαμψίας της κατασκευής. Αναφορικά με τις τιμές των μετακινήσεων, οι κανονισμοί ^[2] αναφέρουν χαρακτηριστικά, πως ο κατασκευαστής θα πρέπει να έρθει συνεννόηση με τον κύριο του έργου για τα οριζόντια βέλη κορυφής. Στον πίνακα 5-18 αναγράφονται όλες οι μετακινήσεις και η σύγκριση τους με το ύψος της βάσης ανεμογεννήτριας.

Πίνακας 5-18: Συγκεντρωτικά μετακινήσεις κορυφής

	U _{kop} (m)			
	R _{εξ} (m)			
Εκμετάλλευση	5	7.5	10	12.5
~90%	0.41	0.308	0.257	0.2
	H/147	H/195	H/235	H/300
~70%	0.32	0.242	0.18	0.15
	H/188	H/248	H/335	H/400

Όπου:

H: ύψος βάσης ανεμογεννήτριας ίσο με 60 m

Τέλος, οι πραγματικές μετακινήσεις της κορυφής αναμένεται να είναι μεγαλύτερες από αυτές του πίνακα 5-18. Μέχρι τώρα, δεν έχει ληφθεί υπόψιν τη στροφή του θεμελίου, η οποία θα εξαρτηθεί και από το είδος του εδάφους.

5.2.3 Εκλογή βέλτιστης ακτίνας εξωτερικού πλαισιακού φορέα

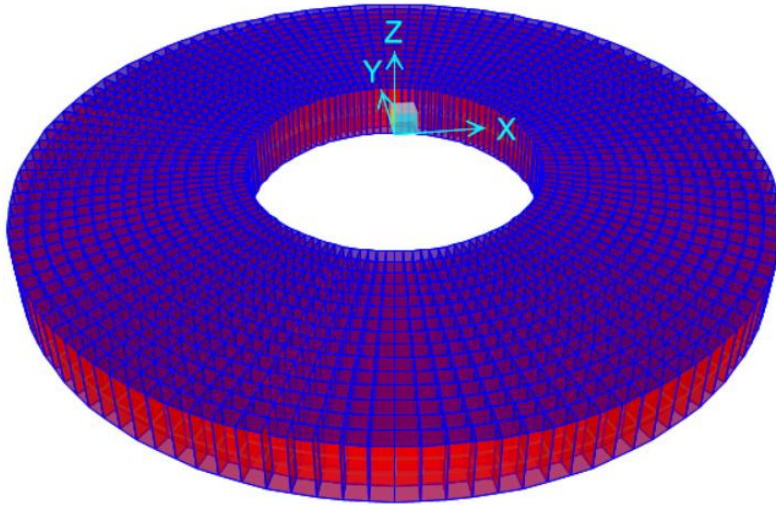
Από την προηγούμενη παράγραφο γίνεται αντιληπτό, πως η $R_{εξ}=7.5$ m μοιάζει να είναι η βέλτιστη περίπτωση ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα, ώστε να ακολουθήσει η ανάλυση της θεμελίωσης (Κεφάλαιο 6). Για τη συγκεκριμένη ακτίνα η ιδιοσυχνότητα μεγιστοποιείται, δηλαδή είναι η βέλτιστη ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα ως προς τη δυσκαμψία της κατασκευής. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του βάρους (γράφημα 5-1) στη συγκεκριμένη ακτίνα, αιτιολογούν την επιλογή της, για συνέχεια των αναλύσεων με $R_{εξ}=7.5$ m.

6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

Το προηγούμενο κεφάλαιο καταλήγει στη βέλτιστη γεωμετρία του μεταλλικού τμήματος της βάσης ανεμογεννήτριας. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεμελίωση από οπλισμένο σκυρόδεμα, πάνω στην οποία εδράζεται το μεταλλικό τμήμα της βάσης ανεμογεννήτριας. Πρόκειται, για μια επιφανειακή δακτυλιοειδή θεμελίωση με σταθερό πάχος. Αρχικά, παρουσιάζεται η γεωμετρία, η φόρτιση και πραγματοποιείται η περιγραφή της προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε. Εν συνεχεία, παρατίθενται τα αποτελέσματα και πραγματοποιούνται οι απαιτούμενοι έλεγχοι διάτμησης και διάτρησης κατά EN1992 ^[3]. Τέλος, παρατίθενται κάποια χαρακτηριστικά της θεμελίωσης.

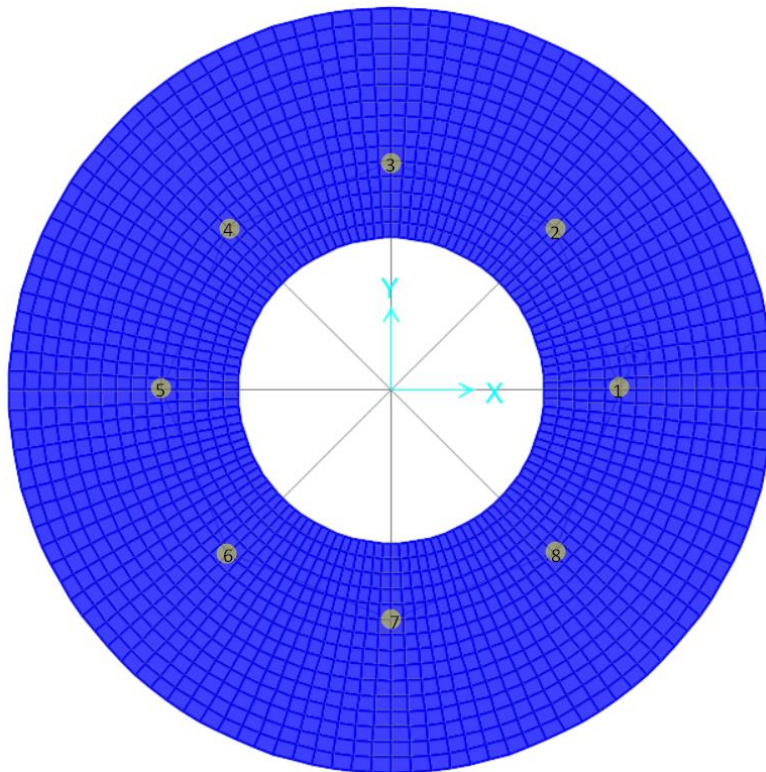
6.1 Χαρακτηριστικά γεωμετρίας

Η εν λόγω θεμελίωση, είναι μια επιφανειακή δακτυλιοειδή θεμελίωση σταθερού πάχους 2 m. Η εσωτερική ακτίνα είναι ίση με 5 m, ενώ η εξωτερική ακτίνα είναι ίση με 12.5 m. Επί της θεμελίωσης εδράζεται το μεταλλικό τμήμα της θεμελίωσης. Πιο συγκεκριμένα, σε ακτίνα ίση με 7.5 m, τοποθετούνται τα 8 κατακόρυφα μεταλλικά μέλη ανά 45 μοίρες. Ο λόγος που δεν επιλέχθηκε κυκλική η θεμελίωση, είναι η εξοικονόμηση υλικού.



Σχήμα 6-1: Γεωμετρία δακτυλιοειδούς θεμελίωσης

Όσον αφορά τη φόρτιση που επιβάλλεται στη θεμελίωση, παραλαμβάνονται οι αντιδράσεις στήριξης από το μοντέλο που επιλύθηκε στο Κεφάλαιο 4. Οι δυνάμεις αυτές τοποθετούνται ίσες και αντίθετες στα αντίστοιχα σημεία. Στο σχήμα 6-2 διακρίνονται τα σημεία, όπου υποβάλλονται τα φορτία, δηλαδή σε ακτίνα 7.5 m και ανά 45 μοίρες. Στον πίνακα 6-1 αναγράφονται οι δυνάμεις που δρουν στα συγκεκριμένα σημεία. Επισημαίνεται, ότι ο άξονας $x'x'$, είναι ο άξονας μέτρησης της στροφής. Η ημιευθεία Ox είναι η αρχή της μέτρησης, δηλαδή 0 μοίρες.



Σχήμα 6-2: Κάτοψη δακτυλιοειδούς θεμελίωσης

Πίνακας 6-1: Αντιδράσεις στηρίξεων

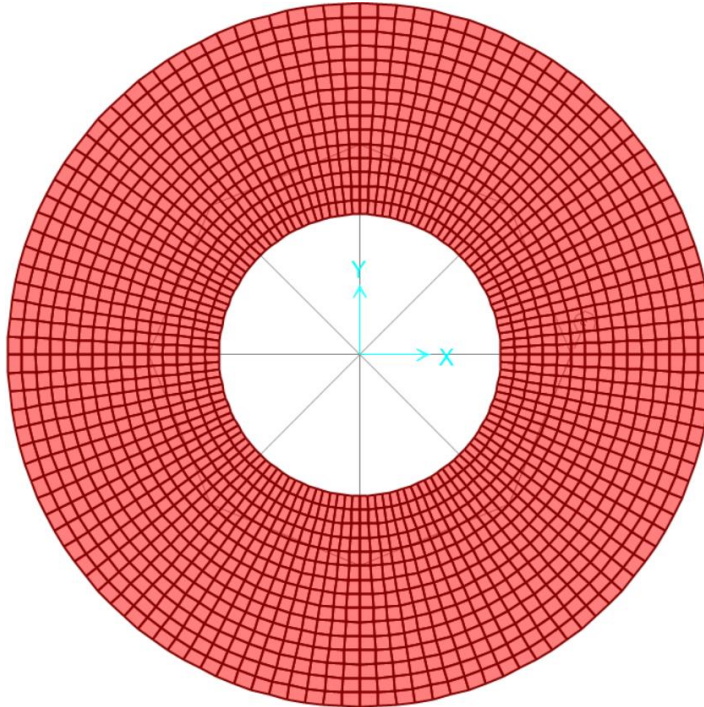
Σημείο	Γωνία (μοίρες)	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)
1	0	-21.117	-124.181	-1372.79
2	45	727.356	-839.336	-7539.2
3	90	300.548	-9.203	-8241.01
4	135	564.906	1001.787	-7539.2
5	180	-2.71	124.181	-1372.79
6	225	-291.81	-145.071	3678.016
7	270	52.186	9.203	5495.443
8	315	-129.359	-17.379	3678.016

6.2 Προσομείωση φορέα θεμελίωσης

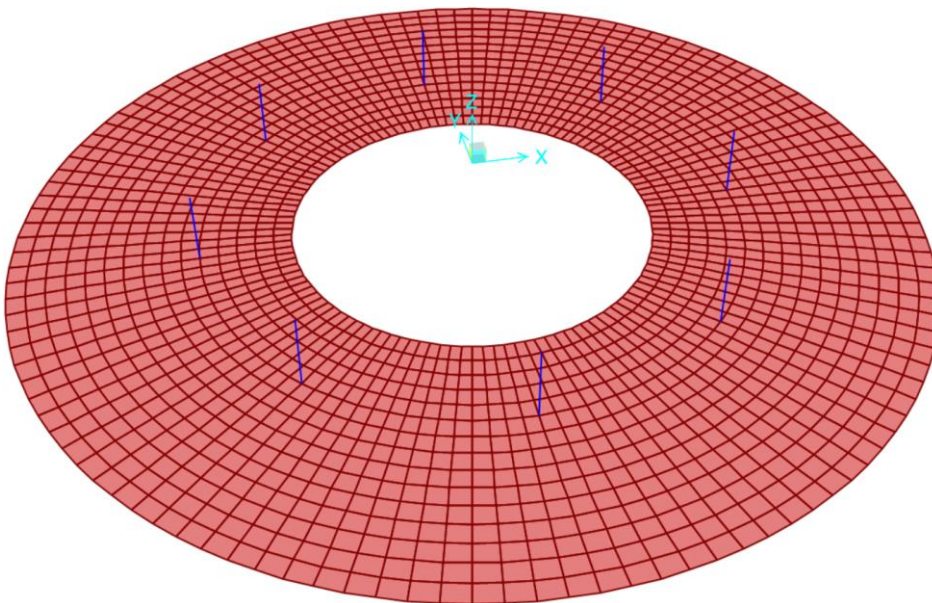
Η προσομείωση του φορέα πραγματοποιείται ως εξής:

Αναφορικά με τη θεμελίωση από οπλισμένο σκυρόδεμα:

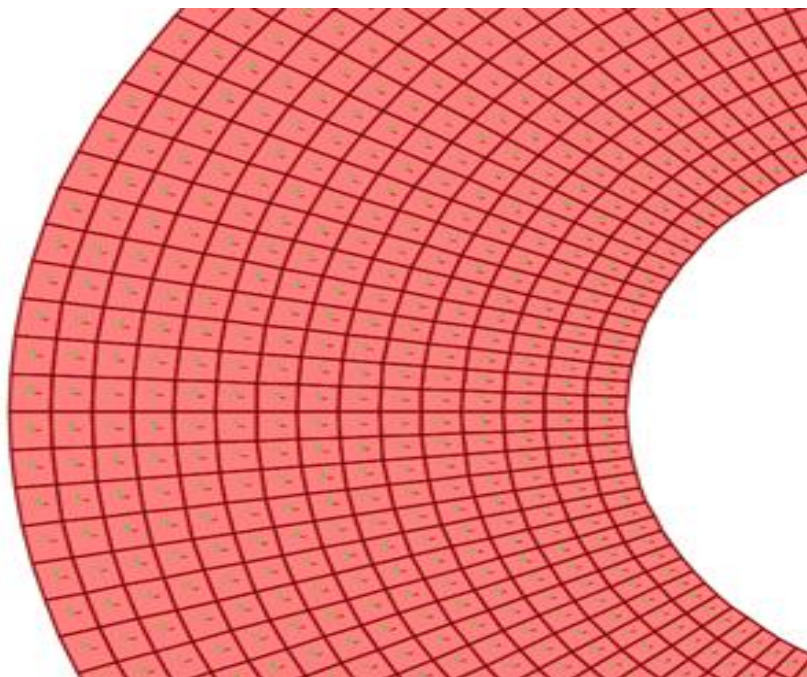
- ✓ Κατά την ακτινική διεύθυνση ο φορέας χωρίζεται ανά 0.5 m, άρα αποτελείται από 15 κυκλικούς δακτύλιους με εσωτερική ακτίνα 5 m και εξωτερική 5.5 m, με εσωτερική ακτίνα 5.5 m και εξωτερική 6 m κοκ . Ο τελευταίος δακτύλιος με εσωτερική ακτίνα 12 m και εξωτερική 12.5 m
- ✓ Κατά τη περιφερειακή διεύθυνση, ο φορέας χωρίζεται ανά 3 μοίρες, άρα σε 120 τμήματα. Συνεπώς, κάθε δακτύλιος χωρίζεται σε 120 πεπερασμένα στοιχεία και στο σύνολο όλη η θεμελίωση αποτελείται από 1800 πεπερασμένα στοιχεία πάχους 2 m, με εμβαδόν μεταβλητό ανά δακτύλιο (σχήμα 6-3).
- ✓ Οι τοπικοί άξονες των πεπερασμένων στοιχείων έχουν στραφεί με τρόπο, ώστε ο ένας άξονας να είναι ακτινικός και άλλος περιφερειακός. Έτσι, όταν το πρόγραμμα (Sap 2000) υπολογίσει τους οπλισμούς κάμψης, δίνονται σε ακτινική και περιφερειακή διεύθυνση (σχήμα 6-5).
- ✓ Οι δυνάμεις με τις οποίες φορτίζεται η θεμελίωση δεν τοποθετούνται σε κάποιο κόμβο πεπερασμένου στοιχείου απευθείας, αλλά στους κόμβους αυτούς τοποθετούνται κυκλικά μεταλλικά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά είναι αβαρή και άκαμπτα με μήκος 2 m όσο και το πάχος της θεμελίωσης. Η τοποθέτηση των συγκεκριμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε, ώστε το πρόγραμμα να μας δώσει αποτελέσματα, που προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματικότητα (σχήμα 6-6).
- ✓ Η δακτυλιοειδής θεμελίωση τοποθετείται σε υψόμετρο - 2 m, αρά τα φορτία τοποθετούνται στα άνω άκρα των κυκλικών μεταλλικών στοιχείων, δηλαδή σε υψόμετρο + 0 m. Με αυτόν τον τρόπο, το πρόγραμμα υπολογίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πιέσεις εδάφους και γενικά προκύπτουν αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας.



Σχήμα 6-3: Πεπερασμένα στοιχεία θεμελίωσης



Σχήμα 6-4: Θεμελίωση με άκαμπτα μεταλλικά στοιχεία



Σχήμα 6-5: Τοπικοί άξονες πεπερασμένων επιφανειακών στοιχείων

Όσον αφορά τις πιέσεις εδάφους:

- ✓ Επειδή δεν είναι γνωστό, σε τι έδαφος εδράζεται η κατασκευή, πραγματοποιείται ανάλυση για ένα μαλακό έδαφος με δείκτη εδάφους $k = 25 \text{ MN/m}^3$.

Το έδαφος προσομοιώνεται με ελατήρια. Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο του προσομοιώματος τοποθετούνται επιφανειακά ελατήρια, ένα για κάθε τοπικό άξονα. Το μέτρο κάθε ελατηρίου υπολογίζεται με τον ακόλουθο τρόπο:

- ✓ Το μέτρο του ελατηρίου του τοπικού κατακόρυφου άξονα, είναι ίσο με το δείκτη εδάφους (k_i) επί το εμβαδόν (A_i) του στοιχείου, δηλαδή: $K_z = k_i \times A_i$
- ✓ Το μέτρο του ελατηρίου των οριζοντίων τοπικών αξόνων x και y , είναι ίσο με το μισό εκείνου της κατακόρυφης διεύθυνσης, δηλαδή: $K_x = K_y = K_z/2$

Τα ελατήρια του κατακόρυφου άξονα λειτουργούν μόνο σε θλίψη, ενώ αυτά των οριζοντίων αξόνων x και y , λειτουργούν σε θλίψη και εφελκυσμό. Ο λόγος για τον οποίο έγινε χρήση των μη γραμμικών ελατηρίων κατά τον κατακόρυφο άξονα είναι για να προσομοιωθεί σωστά το έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, τα κατακόρυφα ελατήρια αδυνατούν να λειτουργήσουν σε εφελκυσμό, καθώς το έδαφος δεν μπορεί να συγκρατήσει τη θεμελίωση, όταν εκείνη τείνει να ανασηκωθεί. Τέλος, η εισαγωγή κατακόρυφων μη γραμμικών ελατηρίων οδηγεί στην εκτέλεση μη γραμμικής στατικής ανάλυσης.

Πίνακας 6-2: Σταθερές επιφανειακών ελατηρίων

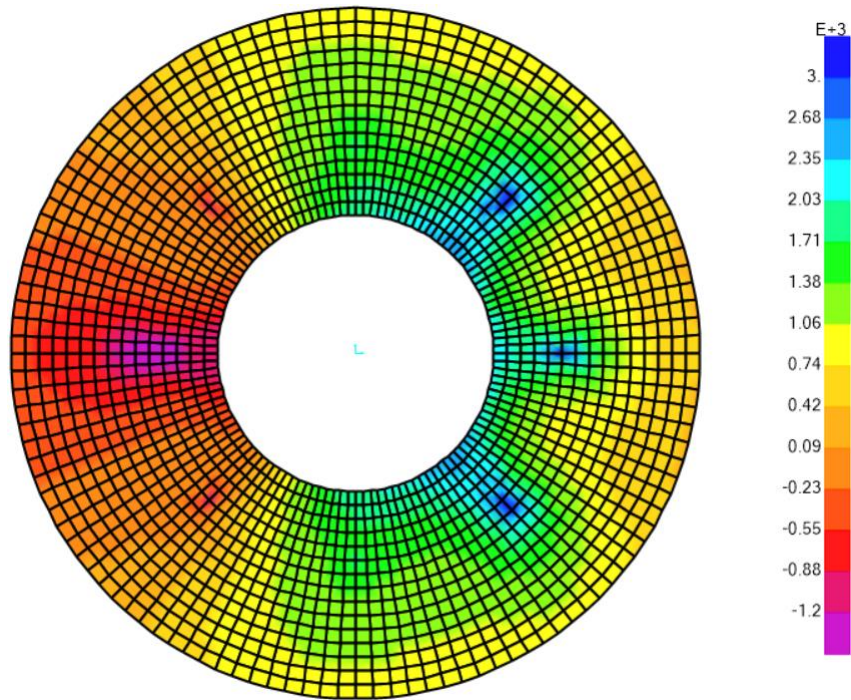
Ακτίνα				k=25 MN/m ³	
ΑΠΟ	ΕΩΣ	Δακτύλιος	Εμβαδόν	Kz	Kx, Ky
(m)	(m)			(kN/m)	(kN/m)
5	5.5	1	0.137	3435	1717
5.5	6	2	0.150	3762	1881
6	6.5	3	0.164	4089	2044
6.5	7	4	0.177	4416	2208
7	7.5	5	0.190	4743	2371
7.5	8	6	0.203	5070	2535
8	8.5	7	0.216	5397	2699
8.5	9	8	0.229	5724	2862
9	9.5	9	0.242	6051	3026
9.5	10	10	0.255	6378	3189
10	10.5	11	0.268	6706	3353
10.5	11	12	0.281	7033	3516
11	11.5	13	0.294	7360	3680
11.5	12	14	0.307	7687	3843
12	12.5	15	0.321	8014	4007

6.3 Ανάλυση φορέα

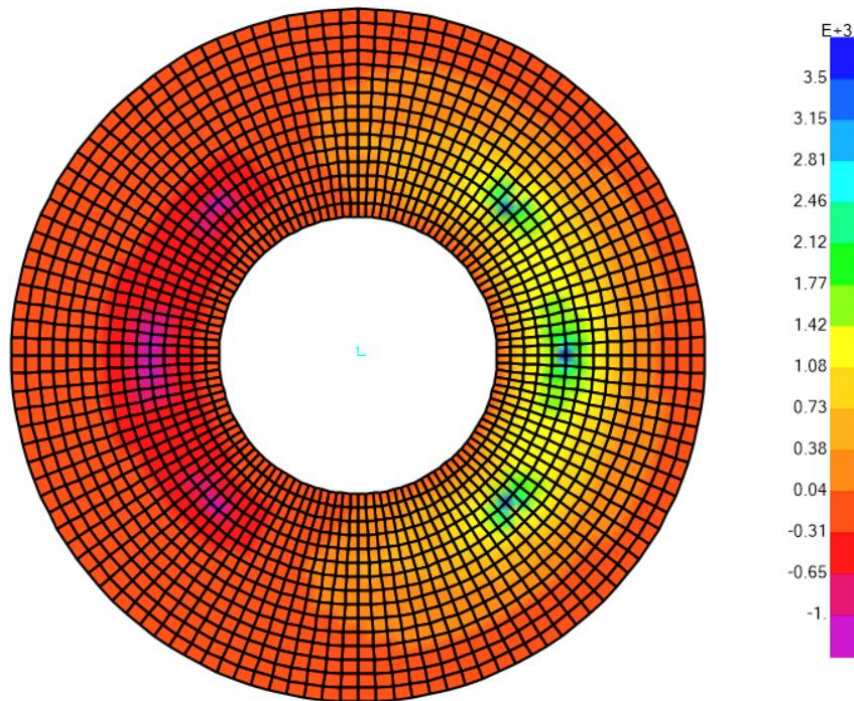
Στη παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης. Αρχικά, παρουσιάζονται οι καμπτικές και αξονικές καταπονήσεις, που δέχεται η θεμελίωση και στη συνέχεια τοποθετούνται οι οπλισμοί κάμψης. Σε επόμενη φάση γίνεται παρουσίαση των διατμητικών δυνάμεων που δρουν στη θεμελίωση. Έπειτα, ακολουθούν οι έλεγχοι διάτμησης και διάτρησης κατά EN1992 ^[3]. Στη συνέχεια, οπλίζεται η πλάκα σε διάτμηση και διάτρηση, αν αυτό κριθεί αναγκαίο.

6.3.1 Καμπτική και αξονική καταπόνηση

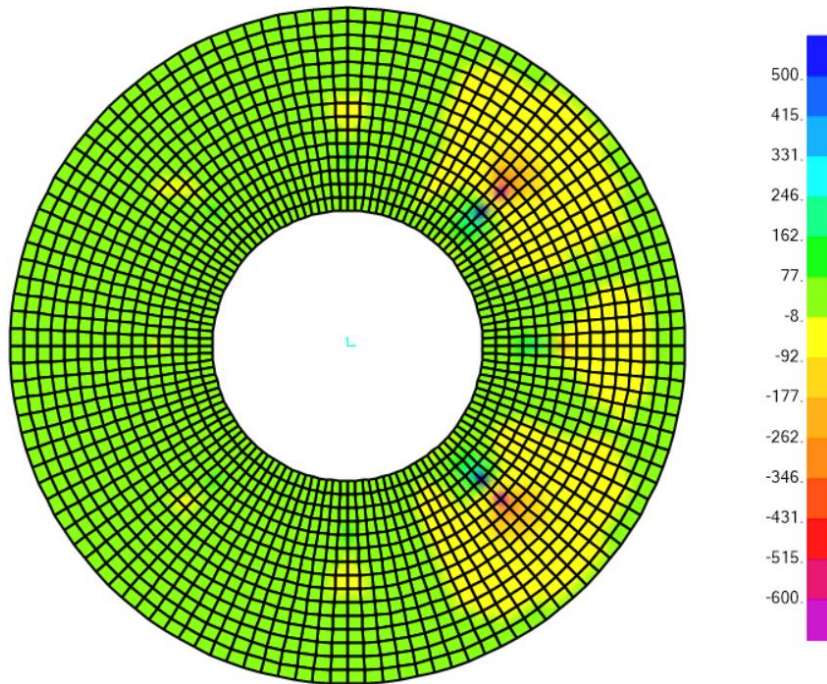
Στη παρούσα υποπαράγραφο απεικονίζονται οι καμπτικές ροπές και οι αξονικές δυνάμεις, που δρουν στη θεμελίωση. Εν συνεχεία, με βάση αυτές τις καταπονήσεις, το πρόγραμμα (Sap 2000) υπολογίζει τους απαιτούμενους οπλισμούς κάμψης κατά την ακτινική αλλά και την περιφερειακή διεύθυνση, για το άνω και κάτω πέγμα της θεμελίωσης.



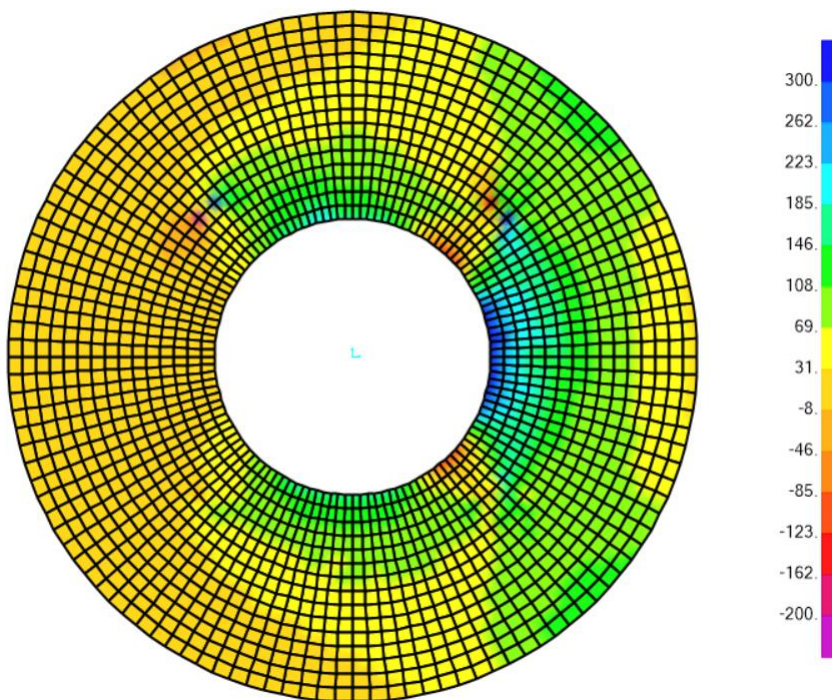
Σχήμα 6-6: Ροπές κατά την ακτινική διεύθυνση



Σχήμα 6-7: Ροπές κατά την περιφερειακή διεύθυνση



Σχήμα 6-8: Αξονικές δυνάμεις κατά την ακτινική διεύθυνση



Σχήμα 6-9: Αξονικές δυνάμεις κατά την περιφερειακή διεύθυνση

Παρατηρείται, ότι οι μέγιστες ροπές και αξονικές δυνάμεις σημειώνονται σε περιοχή γύρω από τα σημεία που εδράζονται τα κατακόρυφα στοιχεία του μεταλλικού τμήματος της κατασκευής. Επιπλέον, το πρόγραμμα ορίζει ως θετική ίνα την κάτω, επομένως αναμένεται το κάτω πέλμα να έχει μεγαλύτερη απαίτηση οπλισμού και στην ακτινική και στην περιφερειακή διεύθυνση. Στον πίνακα 6-3, καταγράφονται οι μέγιστες τιμές ροπών και αξονικών σε κάθε διεύθυνση από τα παραπάνω σχήματα.

Πίνακας 6-3: Μέγιστες τιμές ροπών και αξονικών

ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ	ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ	
	ΑΡΝΗΤΙΚΗ	ΘΕΤΙΚΗ
Καμπτική ακτινική ροπή (kNm)	2265	3850
Καμπτική περιφερειακή ροπή (kNm)	2630	4150
Αξονική ακτινική δύναμη (kN)	215	365
Αξονική περιφερειακή δύναμη (kN)	835	771

➤ Οπλισμός κάμψης

Το πρόγραμμα με το οποίο πραγματοποιούνται οι αναλύσεις (Sap 2000), παρέχει τις απαιτήσεις των οπλισμών για την ακτινική και περιφερειακή διεύθυνση. Για κάθε κατηγορία οπλισμού δίνονται οι απαιτήσεις και στη συνέχεια η διάταξη των οπλισμών. Η διάταξη του οπλισμού κάμψης απεικονίζεται σε ένα τεταρτοκύκλιο και είναι η ίδια και στα υπόλοιπα τεταρτοκύκλια, καθώς δε είναι γνωστή η διεύθυνση του ανέμου. Πριν την απεικόνιση της διάταξη του οπλισμού κάμψης, θα ανατρέξουμε στον κανονισμό EN1992 [3], στις κατασκευαστικές διατάξεις ώστε να υπολογιστούν τα όρια, δηλαδή μέγιστο και ελάχιστο εμβαδόν οπλισμού και των αποστάσεων. Από τις κατασκευαστικές διατάξεις προκύπτει:

$$A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_y} b_1 d$$
 but not less than $0,0013b_1d$

The spacing of bars should not exceed $s_{max,slabs}$.

Note; The value of $s_{max,slabs}$ for use in a Country may be found in its National Annex. The recommended value is:

- for the principal reinforcement, $3h \leq 400$ mm, where h is the total depth of the slab;
- for the secondary reinforcement, $3,5h \leq 450$ mm .

In areas with concentrated loads or areas of maximum moment those provisions become respectively:

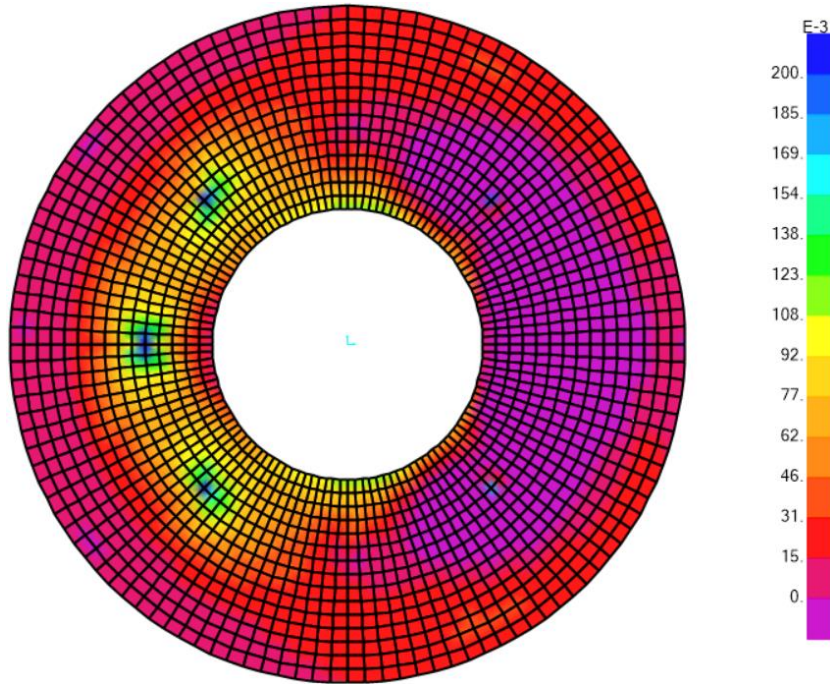
- for the principal reinforcement, $2h \leq 250$ mm
- for the secondary reinforcement, $3h \leq 400$ mm.

Εικόνα 6-1: Κατασκευαστικές διατάξεις κατά EN1992 [3]

Ελάχιστος κύριος οπλισμός	$A_{smin} = 0.26[f_{ctm}/f_{yk}]bd > 0.0013bd =$	29	cm^2
Μέγιστος κύριος οπλισμός	$A_{smax} = 0.4A_c =$	OK	
Μέγιστη απόσταση κύριων οπλισμών	γενικά	$s_{max}(mm) =$	400
	περιοχές με συγκεντρωμένα φορτία	$s_{max}(mm) =$	250
$f_{ctm}(MPa) =$	2.9	$b(cm) =$	100
$f_{yk}(MPa) =$	500	$d(cm) =$	191.75

Συνεπώς, ο ελάχιστος οπλισμός κάμψης είναι $29 \text{ cm}^2/\text{m}$. Επιπλέον, πρέπει να δοθεί προσοχή, ώστε να μην ξεπεραστούν οι s_{max} .

- Ακτινικός οπλισμός κάμψης άνω πέλματος



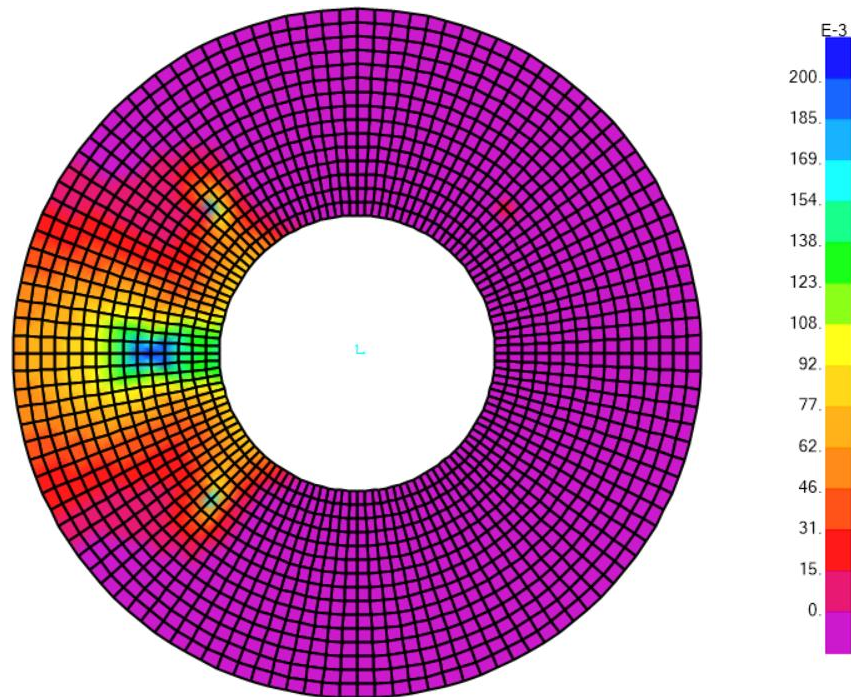
Σχήμα 6-10: Ακτινικός οπλισμός άνω πέλματος (cm^2/cm)

Ο μέγιστος ακτινικός οπλισμός κάμψης είναι $26 \text{ cm}^2/\text{m}$, όμως ο ελάχιστος οπλισμός είναι $29 \text{ cm}^2/\text{m}$. Συνεπώς, τοποθετείται παντού ο ελάχιστος οπλισμός.



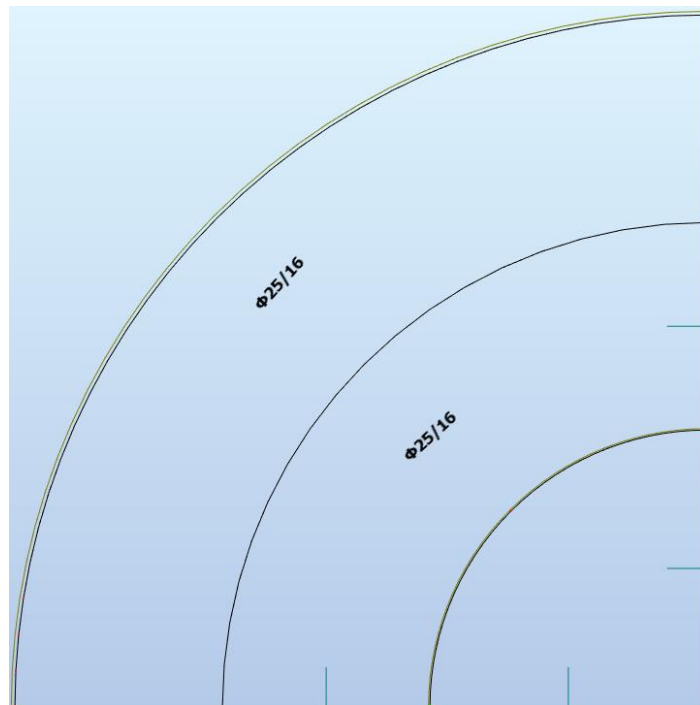
Σχήμα 6-11: Διάταξη ακτινικού οπλισμού κάμψης άνω πέλματος

- Περιφερειακός οπλισμός κάμψης άνω πέλματος



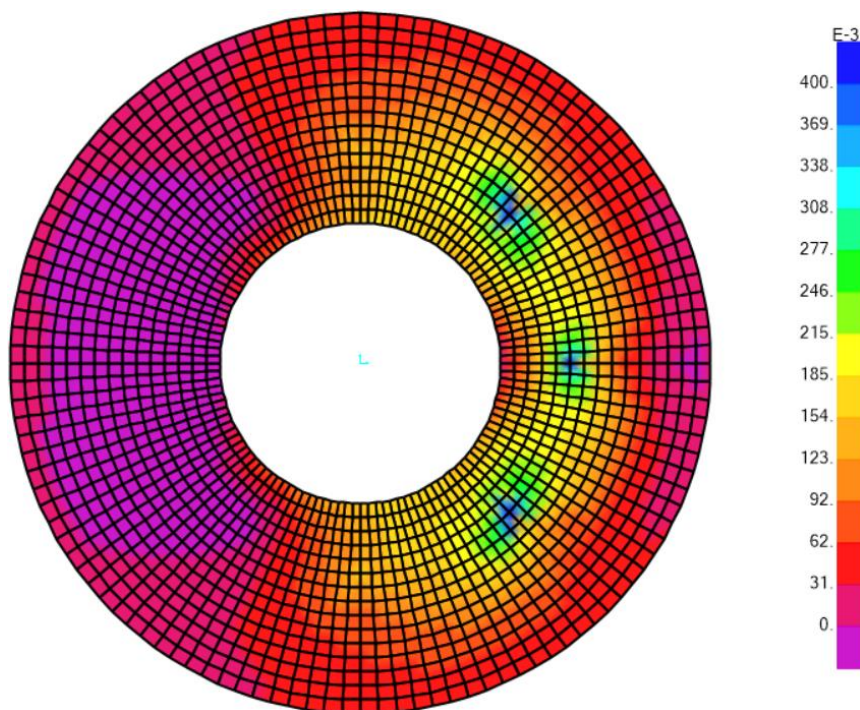
Σχήμα 6-12: Περιφερειακός οπλισμός άνω πέλματος (cm^2/cm)

Η μέγιστη απαίτηση περιφερειακού οπλισμού κάμψης ισούται με $29 \text{ cm}^2/\text{m}$, δηλαδή όσος και ο ελάχιστος απαιτούμενος οπλισμός. Επομένως, τοποθετείται παντού ο ελάχιστος οπλισμός.



Σχήμα 6-13: Διάταξη περιφερειακού οπλισμού κάμψης άνω πέλματος

- Ακτινικός οπλισμός κάμψης κάτω πέλματος

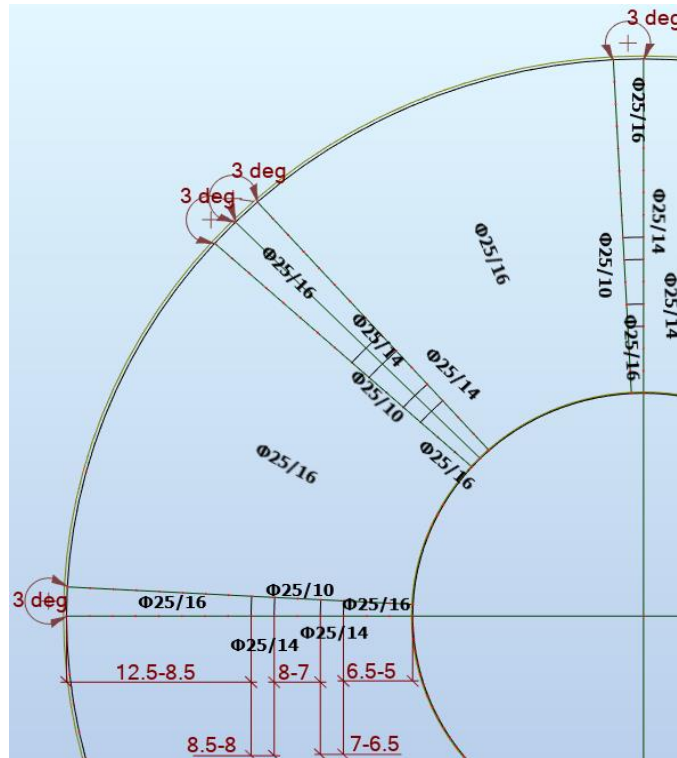


Σχήμα 6-14: Ακτινικός οπλισμός κάτω πέλματος (cm^2/cm)

Η μέγιστη απαίτηση ακτινικού οπλισμού κάμψης είναι $48 \text{ cm}^2/\text{m}$. Η θεμελίωση χωρίζεται σε ζώνες ανάλογα με την απαίτηση του οπλισμού πίνακας 6-4.

Πίνακας 6-4: Ζώνες όπλισης για ακτινικό οπλισμό κάμψης κάτω πέλματος

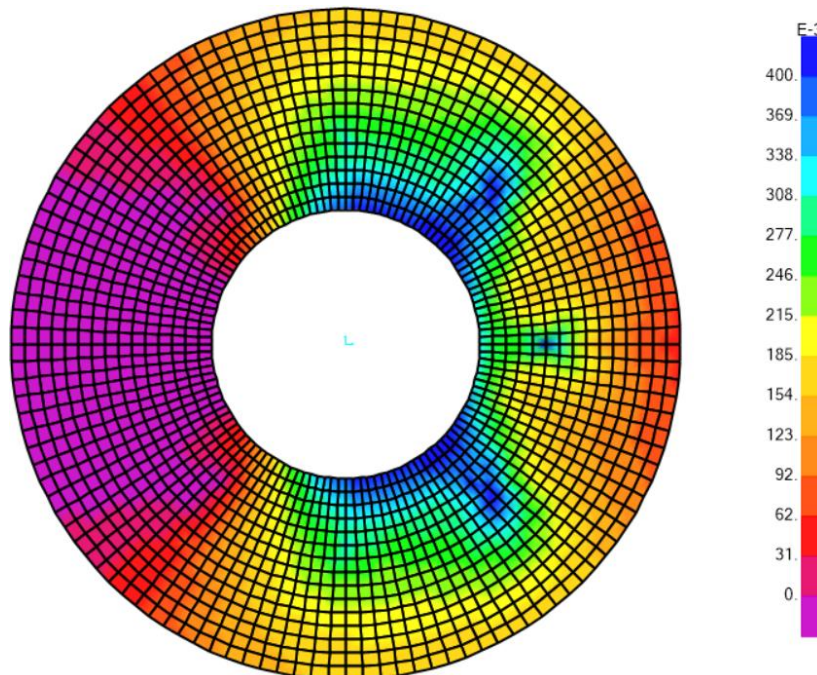
ΜΟΙΡΕΣ 0-3			
ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)	ΟΠΛΙΣΜΟΣ (cm^2/m)	Φ
5	6.5	29	Φ25/16
6.5	7	34	Φ25/14
7	8	48	Φ25/10
8	8.5	34	Φ25/14
8.5	12.5	29	Φ25/16
ΜΟΙΡΕΣ 3-42			
5	12.5	29	Φ25/16



Σχήμα 6-15: Διάταξη ακτινικού οπλισμού κάμψης κάτω πέλματος

Παρατηρείται, ότι στην περιοχή κοντά στην έδραση του κατακόρυφου στοιχείου, υπάρχει αύξηση της απαίτησης οπλισμού κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο.

- Περιφερειακός οπλισμός κάμψης κάτω πέλματος

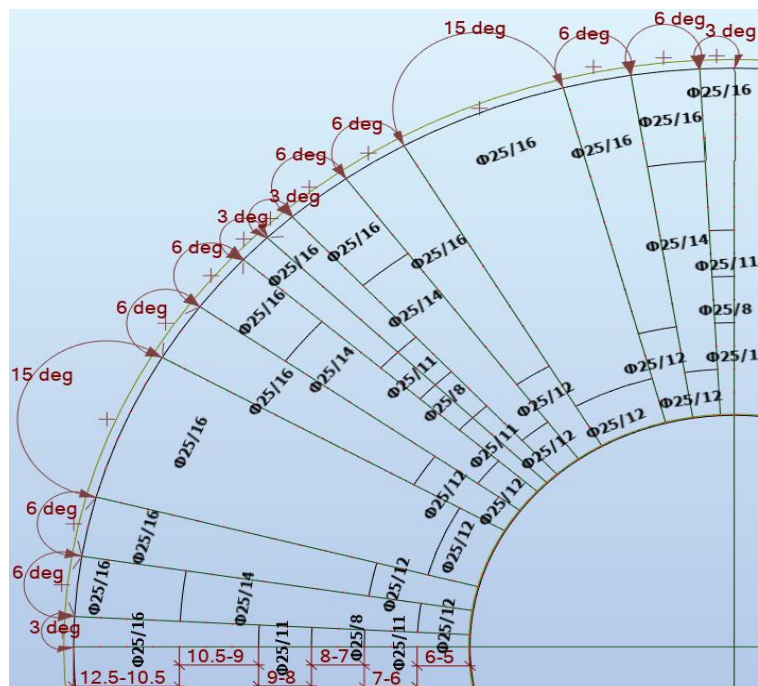


Σχήμα 6-16: Περιφερειακός οπλισμός κάτω πέλματος (cm²/cm)

Η μέγιστη απαίτηση περιφερειακού οπλισμού κάμψης είναι $59 \text{ cm}^2/\text{m}$. Η θεμελίωση χωρίζεται σε ζώνες ανάλογα με την απαίτηση του οπλισμού πίνακας 6-5.

Πίνακας 6-5: Ζώνες όπλισης για περιφερειακό οπλισμό κάμψης άνω πέλματος

ΜΟΙΡΕΣ 0-3			
ΑΠΌ (m)	ΕΩΣ (m)	ΟΠΛΙΣΜΟΣ (cm^2/m)	Φ
5	7	43	Φ25/11
7	8	58	Φ25/8
8	9	43	Φ25/11
8	8.5	29	Φ25/16
8.5	12.5	29	Φ25/16
ΜΟΙΡΕΣ 3-9			
5	6	40	Φ25/12
6	10.5	35	Φ25/14
10.5	12.5	29	Φ25/16
ΜΟΙΡΕΣ 9-15			
5	7	40	Φ25/12
7	12.5	29	Φ25/16
ΜΟΙΡΕΣ 15-30			
5	6	40	Φ25/12
6	12.5	29	Φ25/16



Σχήμα 6-17: Διάταξη οπλισμού κάμψης

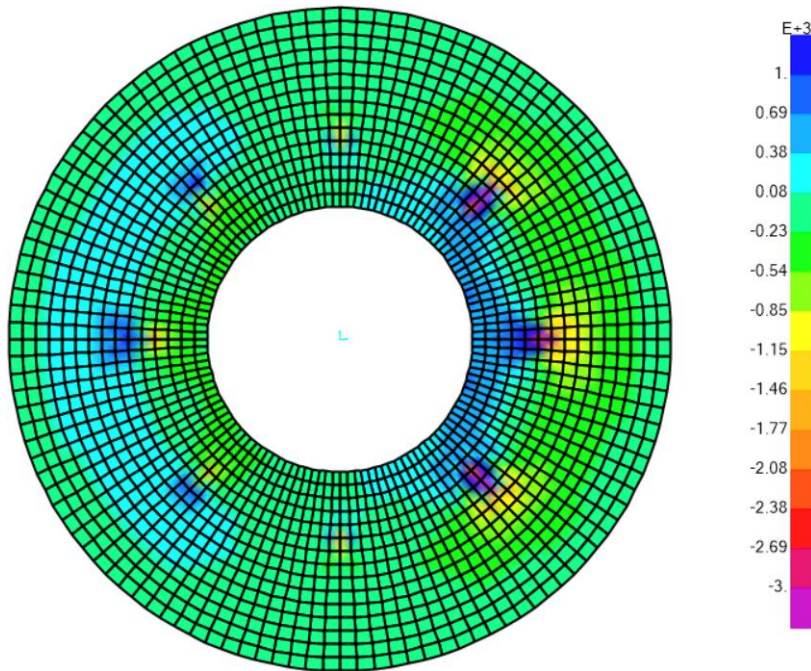
Αρχικά, πρέπει να επισημανθεί ότι στη ζώνη όπου τοποθετούνται Φ25/8, μπορεί εναλλακτικά να τοποθετηθεί οπλισμός Φ32/13.5, διότι τα 8 εκατοστά μπορεί να θεωρηθούν πολύ μικρή απόσταση οπλισμών. Εδώ, αξίζει να σημειωθεί, πως μια επιφανειακή θεμελίωση συμβατικής ανεμογεννήτριας οπλίζεται με, το πολύ, Φ32. Συνεπώς, μπορεί να διατηρηθεί το πάχος θεμελίωσης 2 m, καθώς η μείωση του μπορεί να συντελέσει στην αύξηση της απαίτησης οπλισμού. Επειδή δεν έχουν πραγματοποιηθεί οι έλεγχοι διάτμησης και διάτρησης, δε μπορεί να υποστηριχθεί αυτή η άποψη, δηλαδή ότι το πάχος μπορεί να μειωθεί. Τέλος, στον πίνακα 6-6 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές απαίτησης οπλισμού κάμψης.

Πίνακας 6-6: Μέγιστοι απαιτούμενοι οπλισμοί κάμψης

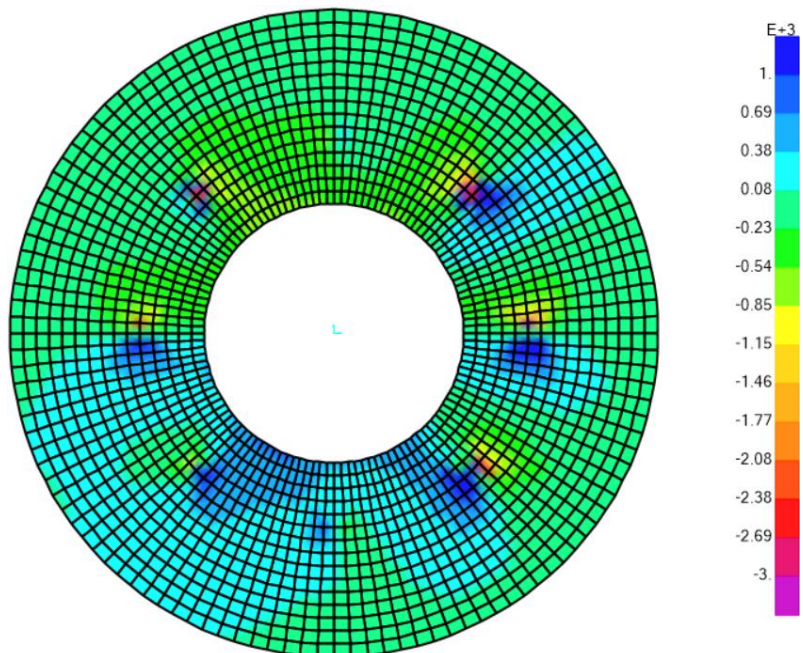
ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΚΑΜΠΤΙΚΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ	ΑΚΤΙΝΑ (m)
	12.5
ΑΚΤΙΝΙΚΟΣ ΑΝΩ ΠΕΛΜΑΤΟΣ (cm ² /m)	26
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΣ ΑΝΩ ΠΕΛΜΑΤΟΣ (cm ² /m)	29
ΑΚΤΙΝΙΚΟΣ ΚΑΤΩ ΠΕΛΜΑΤΟΣ (cm ² /m)	48
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΣ ΚΑΤΩ ΠΕΛΜΑΤΟΣ (cm ² /m)	59

6.3.2 Διατμητική καταπόνηση

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται οι διατμητικές δυνάμεις που δρουν στη θεμελίωση. Σε δεύτερο χρόνο, διενεργούνται αναλυτικά οι έλεγχοι διάτμησης και διάτρησης κατά EN1992 [3]. Τέλος, υπολογίζονται οι οπλισμοί διάτμησης, αλλά και διάτρησης εάν αυτό κριθεί αναγκαίο.



Σχήμα 6-18: Διατμητικές δυνάμεις κατά την ακτινική διεύθυνση



Σχήμα 6-19: Διατμητικές δυνάμεις κατά την περιφερειακή διεύθυνση

Πίνακας 6-7: Μέγιστες διατμητικές δυνάμεις

ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ	ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ	
	ΑΡΝΗΤΙΚΗ	ΘΕΤΙΚΗ
Διατμητική ακτινική δύναμη (kN)	9500	4000
Διατμητική περιφερειακή δύναμη (kN)	4300	3400

➤ Έλεγχοι διάτμησης

Κατά τη διατμητική καταπόνηση, ολόκληρος ο εφελκυσμός που προκαλείται από την τέμνουσα παραλαμβάνεται από συνδετήρες. Ταυτοχρόνως, πρέπει να εξασφαλισθεί ότι και το σκυρόδεμα δεν αστοχεί από λοξή θλίψη, δηλαδή πρέπει να ισχύουν τα εξής:

- $V_{Ed} < V_{rd,max}$, έλεγχος λοξής θλίψης αν δεν ικανοποιείται, αλλαγή διαστάσεων, στην προκειμένη περίπτωση αύξηση πάχους.
- Όπου $V_{Ed} < V_{rd,c}$, τότε τοποθετείται ο ελάχιστος απαιτούμενος κατασκευαστικός οπλισμός 2Φ14/50/50.
- Όπου $V_{Ed} > V_{rd,c}$, τότε πρέπει να τεθεί $V_{Ed} = V_{rd,s}$ και να υπολογιστεί ο απαιτούμενος οπλισμός διάτμησης.

The design value for the shear resistance $V_{Rd,c}$ is given by:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$$

with a minimum of

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta)$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta$$

Εικόνα 6-2: Τύποι για τον έλεγχο διάτμησης κατά EN1992 [3]

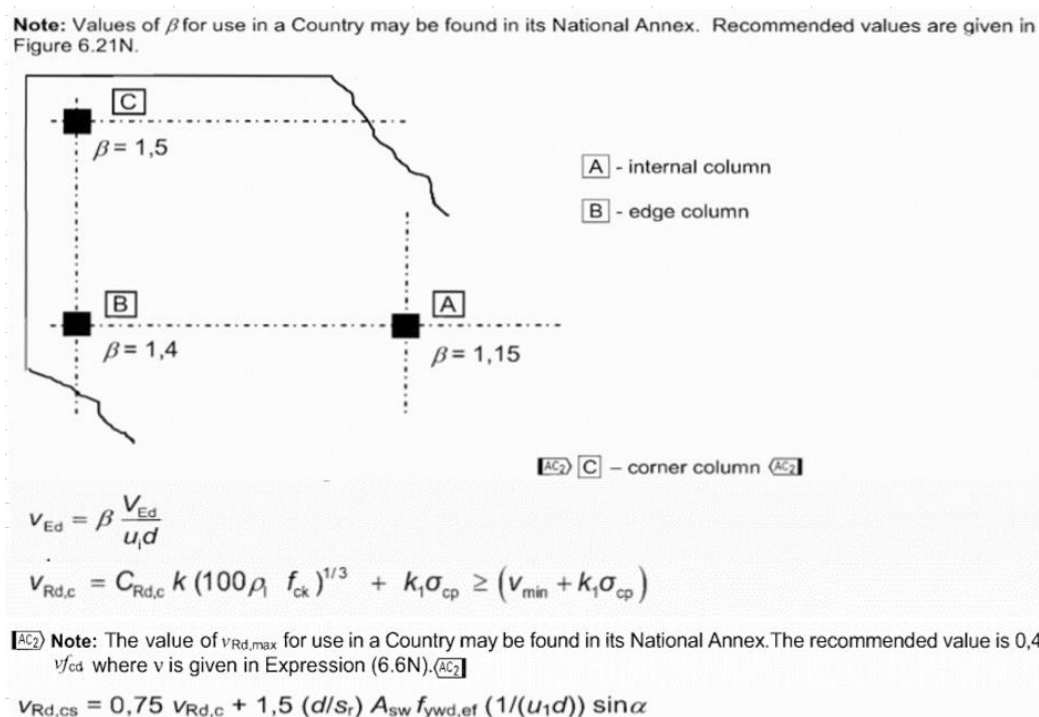
fck(Mpa)=	30	cnom(mm)=	45
bw(mm)=	1000	Φ(mm)=	25
$k = \min(1 + (200/d)^{1/2}, 2) =$	1.32296	d(mm)=	1917.5
$C_{rdc} = 0.15/\gamma_c =$	0.12	θ(μοίρες)=	33
$v_{min} = 0.0035 * (k^{3/2}) * (f_{ck}^{1/2}) =$	0.29171	tanθ=	0.64899
As(cm2)=	58	cotθ=	1.54085
$\rho_l = A_s / (b_w * d) =$	0.0003	fcd(Mpa)=0.85*fck/1.5=	17
acw=	1	fywd(Mpa)=0.8fyk	400
z(mm)=0.9d	1725.75	Vedπαιριάς=	6500
$v_1 = 0.6 * (1 - d/250) =$	0.528	Ved=Vrds=	6430
$\sigma_{cp} = 0$ με ned>0		Vrdmax(kN)=	7074
		Vrdc(kN)=	559
		Asw/s(cm2/m)=	60.45

Από τους παραπάνω υπολογισμούς, διαπιστώνεται αρχικά, ότι ο έλεγχος λοξής θλίψης είναι επαρκής, για ποιότητα σκυροδέματος C30/37. Εν συνεχεία, παρατηρείται πως σε περιοχές της θεμελίωσης, όπου

η διατμητική δύναμη είναι μεγαλύτερη από $V_{rd,c}=559$ kN, απαιτείται οπλισμό διάτμησης. Ενδεικτικά, για διατμητική δύναμη ίση με τη μέγιστη παρειάς απαιτείται οπλισμός διάτμησης 62 cm²/m. Η παρεία υπολογίζεται γύρω στα 70 cm από το κέντρο βάρους του κατακόρυφου στοιχείου. Τα κατακόρυφα στοιχεία, δεν τοποθετούνται απευθείας πάνω στην επιφάνεια θεμελίωσης, αλλά σε base plates με αγκυρώσεις. Οπότε κρίνεται ορθή η σύγκριση της $V_{rd,max}$ με τη διατμητική καταπόνηση που εντοπίζεται στην παρεία. Επειδή, υπάρχει περιθώριο περί τα 500 kN μεταξύ $V_{Ed,παρειάς}$ και $V_{rd,max}$, έγινε δοκιμή με σκοπό τη μείωση της ποιότητας σκυροδέματος σε C20/25, αλλά δεν πληρείται ο έλεγχος λοξής θλίψης. Επιπλέον, με τη μείωση πάχους κατά 10 cm, το $V_{rd,max}$ ισούται με 6700 kN, αλλά το $V_{Ed,παρειάς}$ αυξάνεται στα 6600 kN. Αυτή η διαφορά είναι πολύ μικρή για έναν έλεγχο τόσο κρίσιμο, όπως της λοξής θλίψης σκυροδέματος. Οπότε, διατηρείται το πάχος θεμελίωσης 2 m.

➤ Έλεγχοι διάτμησης

Η διάτμηση προκύπτει όταν εφαρμόζεται ένα συγκεντρωμένο φορτίο σε μια μικρή περιοχή μίας πλάκας ή, συνθηθέστερα, μία αντίδραση από ένα υποστυλώμα στην προκειμένη περίπτωση το κατακόρυφο στοιχείο επί μίας πλάκας (δακτυλιοειδής θεμελίωσης). Οι επακόλουθες τάσεις, ελέγχονται κατά μήκος καθορισμένων περιμέτρων ελέγχου γύρω από τη φορτισμένη επιφάνεια. Η τέμνουσα δρα σε μία επιφάνεια $u_0 \times d_{eff}$, όπου u_0 είναι το μήκος της περιμέτρου και d_{eff} είναι το στατικό ύψος της πλάκας, λαμβανόμενο ως ο μέσος όρος των στατικών υψών σε δύο διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους. Στην περίμετρο του κατακόρυφου στοιχείου πρέπει να εξασφαλίζεται, ότι δεν υπάρχει υπέρβαση της μέγιστης διατμητικής τάσης, δηλαδή $v_{Ed,u0} < v_{Rd,max}$. Επιπλέον, ελέγχεται στη βασική περίμετρο u_1 , αν $v_{Ed,u1} < v_{Rd,c}$, τότε δεν απαιτείται οπλισμός διάτμησης, αλλιώς η πλάκα οπλίζεται με $v_{Rd,cs}$, όπως ορίζει ο κανονισμός [3].



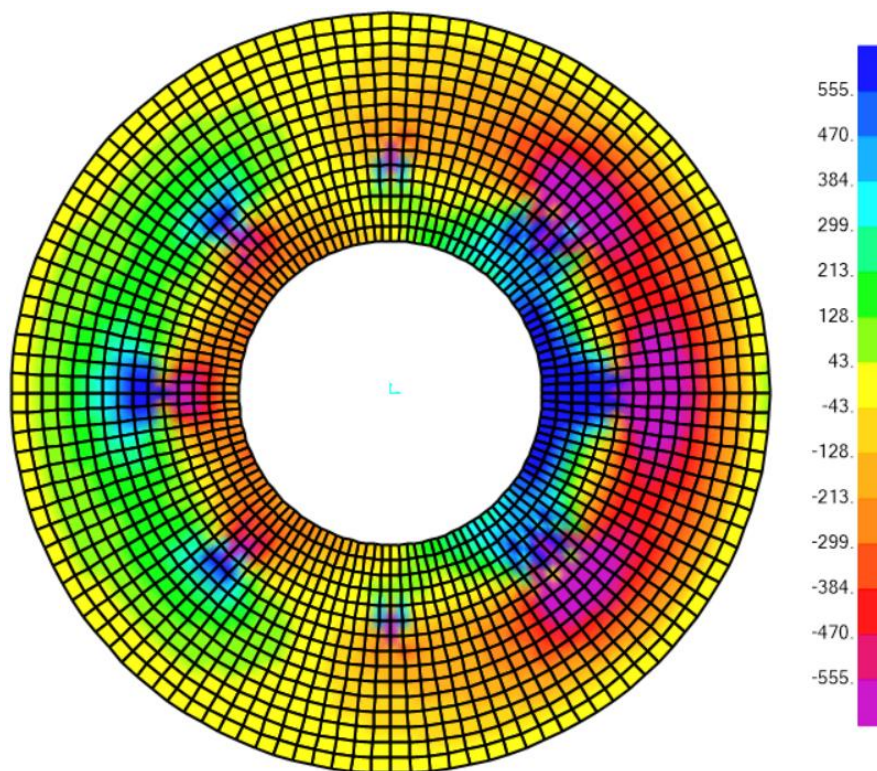
Εικόνα 6-3: Τύποι για έλεγχο διάτμησης κατά EN1992 [3]

D(m)=	0.4046	fck(MPA)=	30
cnom(mm)=	45	fcd=fck/1.5 (MPa)=	20
Φ(mm)=	25	Crdc=0.15/γc=	0.12
deff(mm)=	1917.5	As1(cm2)=	58
$v=0.6*(1-fck/250)=$	0.528	$\rho1=\min(As1/[(b+6*deff)*deff*10000],0.02)=$	0.000242
$v_{min}=0.0035*(k^{(3/2)})*(fck^{(1/2)})=$	0.267	As2(cm2)=	49
$k=\min(1+(200/d)^{(1/2)},2)=$	1.323	$\rho2=\min(As2/[(b+6*deff)*deff*10000],0.02)=$	0.000204
$\rho=\left(\rho1*\rho2\right)^{(1/2)}$	0.0002224	$u1(mm)=n*D+4n*deff$	25360
$u(mm)=n*D$	1276	$\beta=$	1.15
Ved(N)=	8240000		
vedu(MPa)=	3.87	vedu1(MPa)=	0.19
vrdmax(MPa)=	4.22	vrdc(MPa)=	0.27

Η δρώσα δύναμη, με την οποία πραγματοποιούνται οι έλεγχοι διάτρησης είναι 8240 kN. Όπως, προκύπτει από τους παραπάνω υπολογισμούς ο έλεγχος λοξής θλίψης στην περίμετρο u_0 ικανοποιείται. Επιπροσθέτως, ο έλεγχος απαίτησης οπλισμού στη βασική περίμετρο u_1 ($V_{Ed,u1} < V_{Rd,c}$) ικανοποιείται χωρίς να αφαιρεθούν οι ευμενείς τάσεις εδάφους από την δρώσα διατμητική τάση. Άρα, δεν απαιτείται οπλισμός διάτρησης.

➤ Οπλισμός διάτρησης

Όπως, παρατηρήθηκε παραπάνω, η διατμητική δύναμη για την οποία δεν απαιτείται οπλισμός διάτρησης είναι $V_{Rd,c}=559$ kN. Στο σχήμα 6-20 παρουσιάζονται οι μέγιστες δρώσες διατμητικές δυνάμεις. Σύμφωνα με την χρωματική απεικόνιση, οι περιοχές με έντονο μπλε και μοβ χρώμα απαιτούν οπλισμό διάτρησης. Στους πίνακες 6-8 και 6-9 παρουσιάζεται η απαίτηση σε οπλισμό διάτρησης ανά ζώνες σύμφωνα με το σχήμα 6-21.



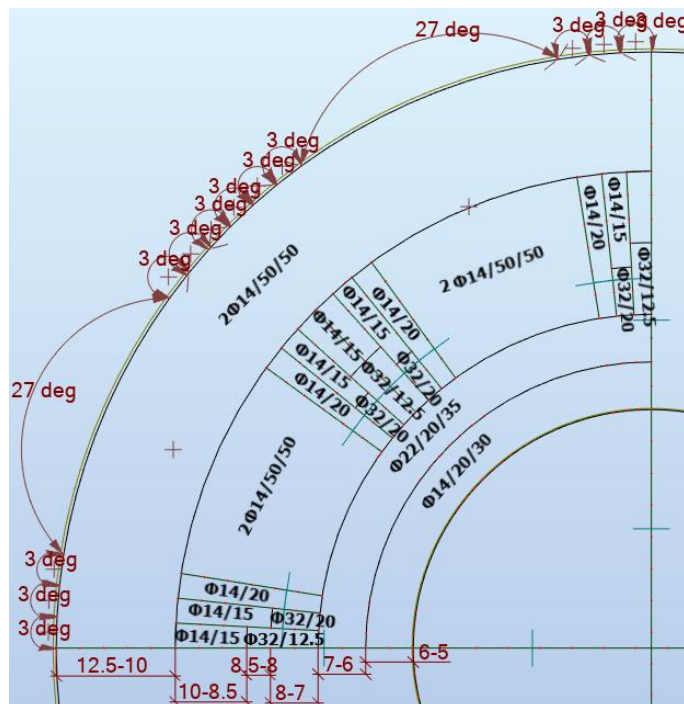
Σχήμα 6-20: Μέγιστες δρώσες διατμητικές δυνάμεις

Πίνακας 6-8: Ζώνες οπλισμού διάτμησης υπό μορφή κανάβου

ΜΟΙΡΕΣ 0-45		
ΑΠΟ(m)	ΕΩΣ(m)	Κάναβος Φ/cm/cm
5	6	Φ14/20/30
6	7	Φ22/20/35
10	12.5	2Φ14/50/50
ΜΟΙΡΕΣ 9-36		
ΑΠΟ(m)	ΕΩΣ(m)	Κάναβος Φ/cm/cm
7	10	2Φ14/50/50

Πίνακας 6-9: Ζώνες οπλισμού διάτμησης υπό μορφή λωρίδων

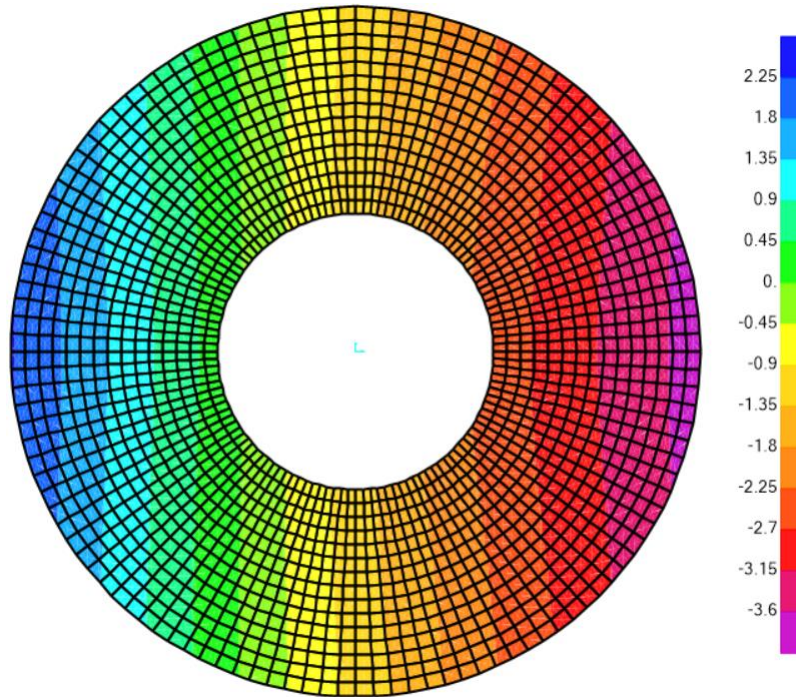
ΜΟΙΡΕΣ 0-3			
ΑΠΟ(m)	ΕΩΣ(m)	ΟΠΛΙΣΜΟΣ (cm ² /m)	Φ
7	8.5	62	Φ32/12.5
8.5	10	10	Φ14/15
ΜΟΙΡΕΣ 3-6			
ΑΠΟ(m)	ΕΩΣ(m)	ΟΠΛΙΣΜΟΣ (cm ² /m)	Φ
7	8	40	Φ32/20
8	10	10	Φ25/14
ΜΟΙΡΕΣ 6-9			
ΑΠΟ(m)	ΕΩΣ(m)	ΟΠΛΙΣΜΟΣ (cm ² /m)	Φ
7	10	7	Φ14/20



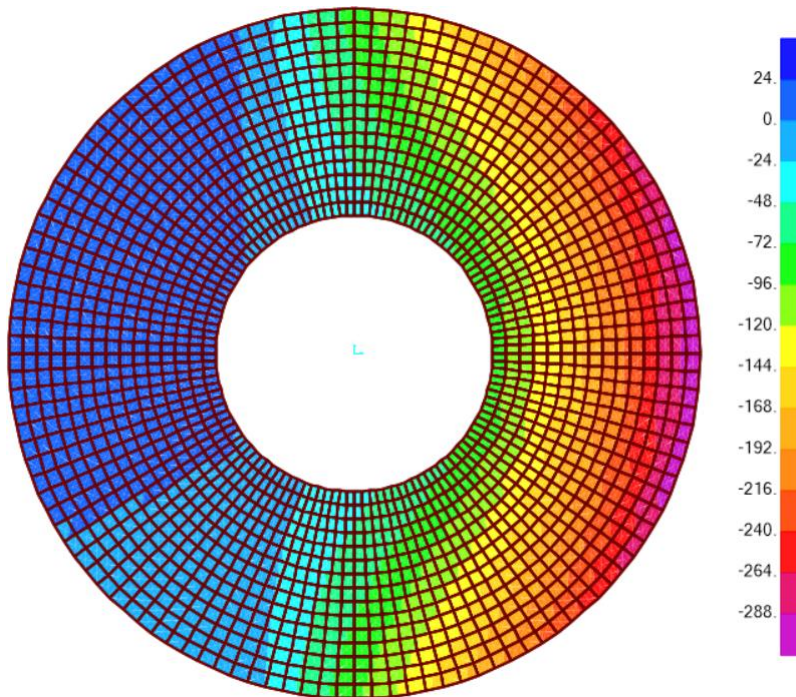
Σχήμα 6-21: Διάταξη οπλισμού διάτμησης

6.4 Χαρακτηριστικά θεμελίωσης

Μετά τον υπολογισμό των οπλισμών κάμψης και διάτμησης, παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά της θεμελίωσης, όπως το ποσοστό της αδρανούς περιοχής, η μέγιστη καθίζηση, η στροφή του θεμελίου αλλά και οι αναπτυσσόμενες τάσεις εδάφους.



Σχήμα 6-22: Μετακινήσεις κατά την κατακόρυφη διεύθυνση



Σχήμα 6-23: Αναπτυσσόμενες τάσεις εδάφους

Πίνακας 6-10: Χαρακτηριστικά Θεμελίωσης

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΤΙΜΗ
Ποσοστό αδρανούς περιοχής (%)	34
Μέγιστη καθίζηση (cm)	3.8
Στροφή (μοίρες)	0.14
Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση εδάφους (kN/m ²)	310

Ο υπολογισμός της στροφής έγινε με τον εξής τρόπο:

$$\varphi = \frac{|\delta'| + |\delta|}{D} \times \frac{180}{\pi} \quad (6-1)$$

Όπου:

φ : στροφή

δ' : μέγιστη ανύψωση

δ : μέγιστη καθίζηση

D : διάμετρος θεμελίωσης

Παρατηρείται, ότι το ποσοστό αδρανούς περιοχής είναι ικανοποιητικό καθώς επιδιώκεται η μη υπέρβαση σε καμία περίπτωση του 50%, ώστε να μην έχουμε προβλήματα ανατροπής. Επιπλέον, η μέγιστη καθίζηση περί τα 4 cm είναι ικανοποιητική. Η στροφή είναι μικρή και γενικά επιδιώκουμε να είναι σχετικά μικρή. Στη συνέχεια, ακολουθούν παραμετρικές αναλύσεις ως προς την εσωτερική αλλά και την εξωτερική ακτίνα της δακτυλιοειδούς θεμελίωσης για τρεις διαφορετικούς δείκτες εδαφών, ώστε να παρατηρηθεί ποιες είναι διαφοροποιήσεις στους οπλισμούς και στα τέσσερα παραπάνω χαρακτηριστικά.

7 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΕΙΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται παραμετρική διερεύνηση της εσωτερικής και της εξωτερικής ακτίνας της δακτυλιοειδούς θεμελίωσης για τρία διαφορετικά είδη μαλακών εδαφών, με δείκτες εδάφους $k_1=15 \text{ MN/m}^3$, $k_2=25 \text{ MN/m}^3$ και $k_3=35 \text{ MN/m}^3$, ώστε να προκύψουν οι βέλτιστες διαστάσεις της θεμελίωσης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μεταβολές των οπλισμών και των χαρακτηριστικών της θεμελίωσης, για τις παραπάνω διερευνήσεις.

7.1 Παραμετρική διερεύνηση εξωτερικής ακτίνας και συμπεράσματα

Στην παρούσα παράγραφο πραγματοποιείται παραμετρική διερεύνηση της εξωτερικής ακτίνας της θεμελίωσης με σταθερή εσωτερική ακτίνα 5 m. Οι παραμετρικές αυτές αναλύσεις ξεκινούν με ακτίνα 11 m και καταλήγουν σε ακτίνα 14 m για τρία είδη εδαφών με δείκτες εδάφους k_1 , k_2 και k_3 και σε κάθε ακτίνα καταγράφονται τα εξής χαρακτηριστικά:

- ✓ Ποσοστό αδρανούς περιοχής (%)
- ✓ Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση εδάφους (kN/m^2)
- ✓ Μέγιστη καθίζηση (cm)
- ✓ Στροφή (deg)
- ✓ Μέγιστος απαιτούμενος οπλισμός κάμψης

Μετέπειτα, παρουσιάζονται οι απαιτήσεις οπλισμού κάμψης, κατά την ακτινική και την περιφερειακή διεύθυνση στην άνω και κάτω επιφάνεια της θεμελίωσης. Τέλος, όλα τα αποτελέσματα δίνονται σε μορφή διαγραμμάτων και καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όπως στο Κεφάλαιο 6. Στον πίνακα 7-1 παρουσιάζονται οι σταθερές των επιφανειακών ελατηρίων για την προσομοίωση του εδάφους, για τρεις δείκτες k_1 , k_2 και k_3 .

Πίνακας 7-1: Σταθερές επιφανειακών ελατηρίων για δείκτες εδάφους k_1 , k_2 και k_3 .

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ		Δακτύλιος	Εμβαδόν	k=15 MN/m ³		k=25 MN/m ³		k=35 MN/m ³	
ΑΠΟ (m)	ΕΩΣ (m)			Kz (kN/m)	Kx, Ky (kN/m)	Kz (kN/m)	Kx, Ky (kN/m)	Kz (kN/m)	Kx, Ky (kN/m)
5	5.5	1	0.137	2061	1030	3435	1717	4808	2404
5.5	6	2	0.150	2257	1128	3762	1881	5266	2633
6	6.5	3	0.164	2453	1227	4089	2044	5724	2862
6.5	7	4	0.177	2650	1325	4416	2208	6182	3091
7	7.5	5	0.190	2846	1423	4743	2371	6640	3320
7.5	8	6	0.203	3042	1521	5070	2535	7098	3549
8	8.5	7	0.216	3238	1619	5397	2699	7556	3778
8.5	9	8	0.229	3435	1717	5724	2862	8014	4007
9	9.5	9	0.242	3631	1815	6051	3026	8472	4236
9.5	10	10	0.255	3827	1914	6378	3189	8930	4465
10	10.5	11	0.268	4023	2012	6706	3353	9388	4694
10.5	11	12	0.281	4220	2110	7033	3516	9846	4923
11	11.5	13	0.294	4416	2208	7360	3680	10304	5152
11.5	12	14	0.307	4612	2306	7687	3843	10762	5381
12	12.5	15	0.321	4808	2404	8014	4007	11220	5610
12.5	13	16	0.334	5005	2502	8341	4171	11677	5839
13	13.5	17	0.347	5201	2600	8668	4334	12135	6068
13.5	14	18	0.360	5397	2699	8995	4498	12593	6297

➤ Δείκτης εδάφους $k_1=15 \text{ MN/m}^3$ Πίνακας 7-2: Χαρακτηριστικά για δείκτη εδάφους $k_1=15 \text{ MN/m}^3$ με σταθερή εσωτερική ακτίνα ίση 5 m και μεταβλητή εξωτερική

ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ $k_1=15 \text{ MN/m}^3$							
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΑΚΤΙΝΑ (m)						
	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14
-							
Ποσοστό αδρανούς περιοχής (%)	61	51	43	35	24	16	10
Μέγιστη τάση εδάφους (kN/m ²)	665	475	375	315	275	246	224
Μέγιστη Καθίζηση (cm)	15.6	10.6	8.0	6.4	5.4	4.6	4.1
Στροφή (deg)	1.18	0.59	0.35	0.23	0.16	0.12	0.10

➤ Δείκτης εδάφους $k_2=25 \text{ MN/m}^3$

Πίνακας 7-3: Χαρακτηριστικά για δείκτη εδάφους $k_2=25 \text{ MN/m}^3$ με σταθερή εσωτερική ακτίνα ίση με 5 m και μεταβλητή εξωτερική

ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ $k_2=25 \text{ MN/m}^3$							
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΑΚΤΙΝΑ (m)						
-	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14
Ποσοστό αδρανούς περιοχής (%)	63	52	43	34	25	17	11
Μέγιστη τάση εδάφους (kN/m^2)	664	472	370	310	269	239	216
Μέγιστη Καθίζηση (cm)	9.3	6.3	4.8	3.8	3.2	2.7	2.4
Στροφή (deg)	0.73	0.36	0.21	0.14	0.10	0.07	0.06

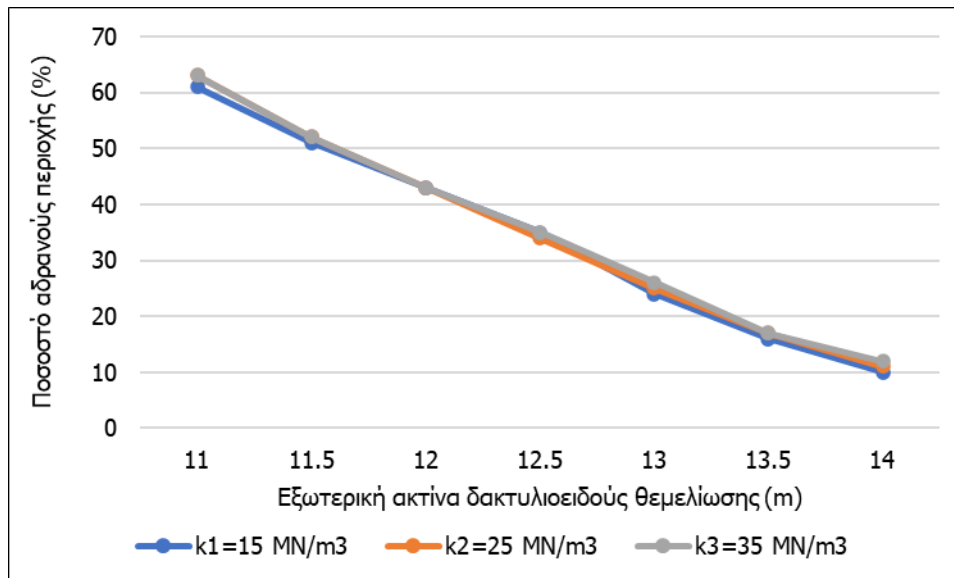
➤ Δείκτης εδάφους $k_3=35 \text{ MN/m}^3$

Πίνακας 7-4: Χαρακτηριστικά για δείκτη εδάφους $k_3=35 \text{ MN/m}^3$ με σταθερή εσωτερική ίση με ακτίνα 5 m και μεταβλητή εξωτερική

ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ $k_3=35 \text{ MN/m}^3$							
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΑΚΤΙΝΑ (m)						
-	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14
Ποσοστό αδρανούς περιοχής (%)	63	52	43	35	26	17	12
Μέγιστη τάση εδάφους (kN/m^2)	662	469	366	304	262	233	209
Μέγιστη Καθίζηση (cm)	6.7	4.5	3.4	2.7	2.2	1.9	1.6
Στροφή (deg)	0.54	0.27	0.16	0.10	0.07	0.05	0.04

Ακολουθεί η συγκεντρωτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, ως προς τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, καθώς και σχολιασμός τους.

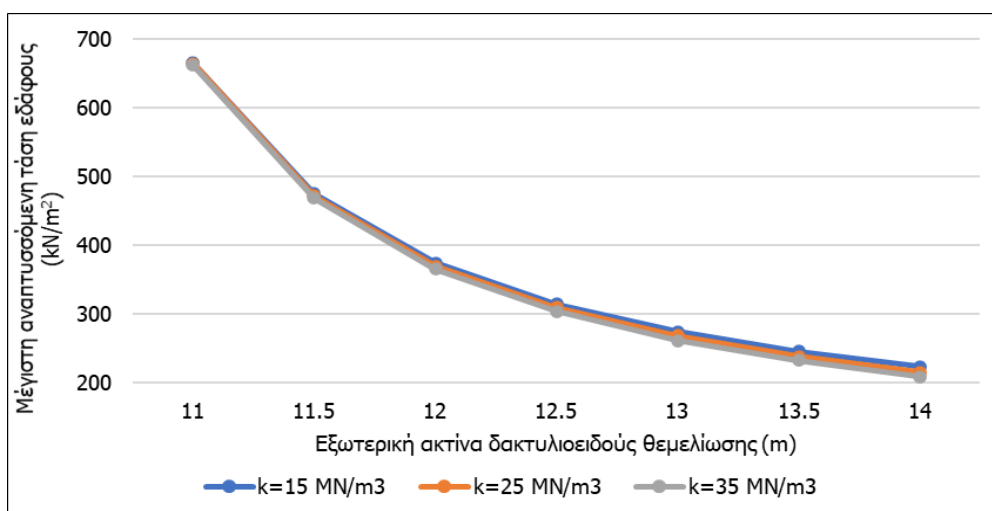
❖ Ποσοστό αδρανούς περιοχής (%)



Γράφημα 7-1: Ποσοστό αδρανούς περιοχής ανά εξωτερική ακτίνα για τους 3 δείκτες εδάφους

Στο Γράφημα 7-1 παρατηρείται, πως για εξωτερικές ακτίνες μεγαλύτερες των 11.5 m, η αδρανής περιοχή πέφτει κάτω από το 50 %, κάτι που επιδιώκεται γενικώς στις θεμελιώσεις. Από την άλλη, από εξωτερικές ακτίνες μεγαλύτερες από 13 m, η ανενεργή περιοχή αρχίζει να πέφτει κάτω από το 25%, γεγονός που αναδεικνύει ότι η χρήση μεγαλύτερης εξωτερικής ακτίνας από αυτή των 13 m, ισοδυναμεί με μη αξιοποιήσιμο υλικό. Επιπλέον, η μείωση της αδρανούς περιοχής είναι ανεξάρτητη του δείκτη εδάφους, άρα και του είδους του εδάφους.

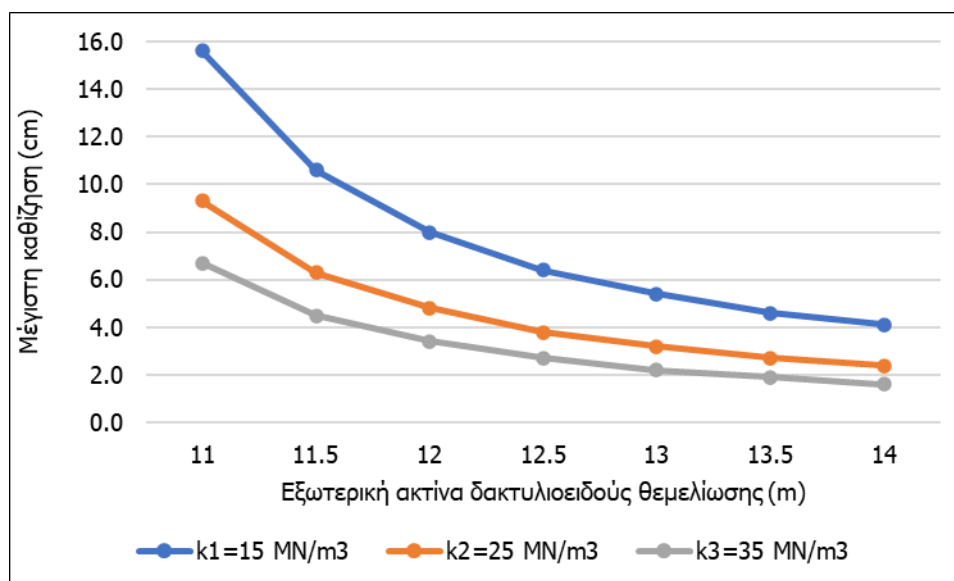
❖ Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση εδάφους



Γράφημα 7-2: Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση ανά εξωτερική ακτίνα για τους 3 δείκτες εδάφους

Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση εδάφους, είναι ανεξάρτητη από το είδος του εδάφους. Πέρα από το δείκτη εδάφους, δεν είναι διαθέσιμη κάποια άλλη πληροφορία για το έδαφος. Οπότε, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους θα επιλεγθεί η εξωτερική ακτίνα της δακτυλιοειδούς θεμελίωσης.

❖ Μέγιστη Καθίζηση



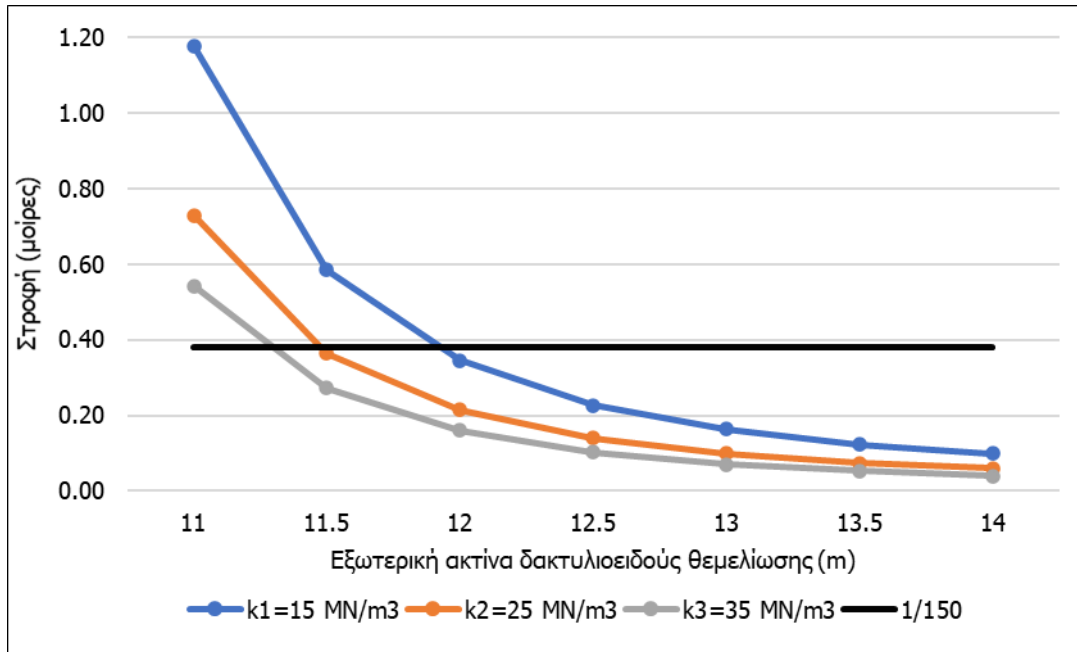
Γράφημα 7-3: Μέγιστη καθίζηση ανά εξωτερική ακτίνα για τους 3 δείκτες εδάφους

Πίνακας 7-5: Μέγιστες επιτρεπόμενες καθιζήσεις κατά Polshin & Tokar 1957 ^[21]

Structure	Maximum Average Settlement (mm)
Buildings with plain brick walls on continuous and separate foundations (L = wall length, H = wall height)	
L/H ≥ 2.5	80
L/H ≤ 1.5	100
Buildings with brick walls reinforced with reinforced concrete or reinforced brick	150
Framed buildings	100
Solid reinforced concrete foundations of blast furnaces, smoke stacks, silos, water towers, etc.	300

Οι τιμές των μέγιστων καθιζήσεων είναι αποδεκτές κατά Polshin & Tokar ^[21], καθώς οι μέγιστες καθιζήσεις για παρόμοιες κατασκευές είναι 30 cm. Τα αποτελέσματα των δεικτών k_2 και k_3 τείνουν να συγκλίνουν όσο μεγαλώνει η εξωτερική ακτίνα. Για έδαφος k_1 , φαίνεται πως η τιμή των καθιζήσεων αυξάνεται απότομα σε σύγκριση με τα άλλα δύο εδάφη.

❖ Στροφή



Γράφημα 7-4: Μέγιστη καθίζηση ανά εξωτερική ακτίνα για τους 3 δείκτες εδάφους

Πίνακας 7-6: Γωνιακή εκτροπή (στροφή) θεμελίωσης κατά Bjerrum 1963 [20]

Criterion	Angular Distortion (δ/l)
Structural damage to building	1/150
Safe limit for flexible brick walls ($H/L < \frac{1}{4}$)	1/150
Considerable cracking in panel walls and brick walls	1/150
Difficulties with overhead cranes to be expected	1/300
First cracking in panel walls to be expected	1/300
Safe limit for buildings where cracking is not permissible	1/500
Danger limit for frames with diagonals	1/600
Limit where difficulties with machinery sensitive to settlements to be feared	1/750

Η στροφή του θεμελίου συγκλίνει με την αύξηση της εξωτερικής ακτίνας. Σύμφωνα με τον πίνακα 7-6 κατά Bjerrum [20], η εξωτερική ακτίνα ίση με 11 m κρίνεται ακατάλληλη για όλα τα εδάφη, όπως και η εξωτερική ακτίνα ίση με 11.5 m για εδάφη με δείκτη εδάφους k_1 και k_2 . Επιπροσθέτως, για το έδαφος k_1 , παρατηρείται πως με τη μείωση της εξωτερικής ακτίνας ο ρυθμός αύξησης της στροφής μεγαλώνει αρκετά συγκριτικά με τα άλλα δυο εδάφη.

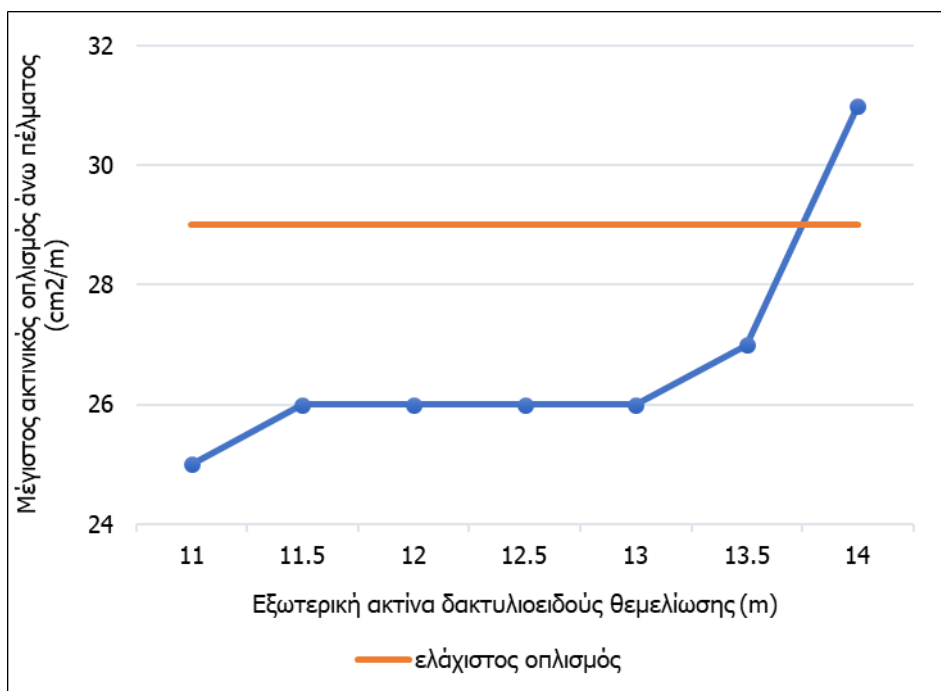
❖ Οπλισμός κάμψης

Όσον αφορά τον οπλισμό κάμψης, παρουσιάζονται οι μέγιστες απαιτήσεις και πιο συγκεκριμένα για τον περιφερειακό και ακτινικό οπλισμό άνω και κάτω πέλματος. Με αυτόν τον τρόπο αναδεικνύεται, πώς

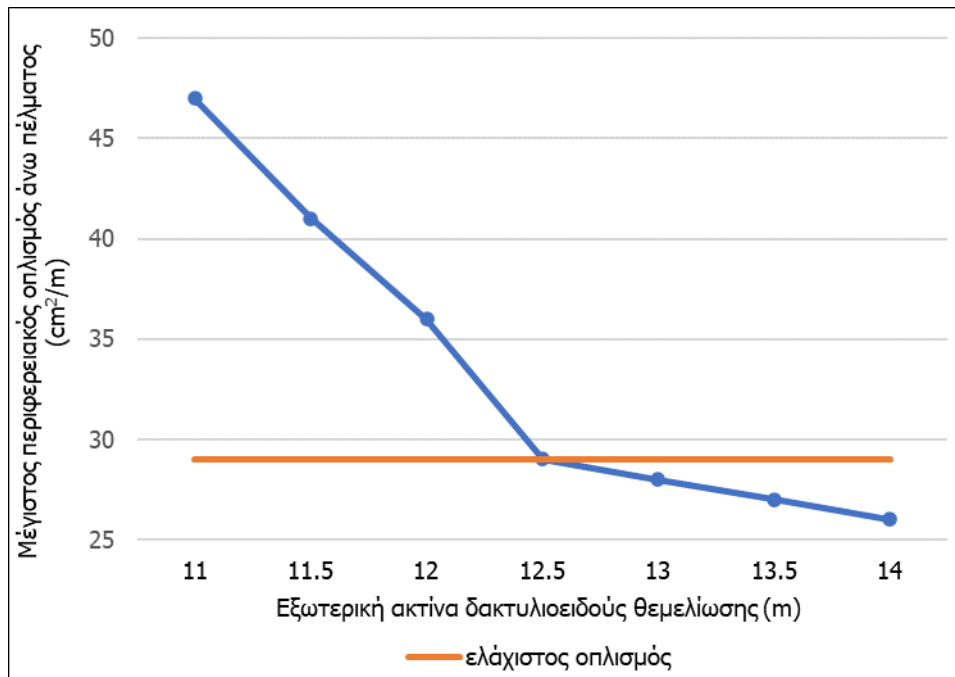
επηρεάζεται η απαίτηση του οπλισμού με τη μεταβολή της εξωτερικής ακτίνας της δακτυλοειδής θεμελίωσης.

Πίνακας 7-7: Μέγιστοι απαιτούμενοι οπλισμοί κάμψης για μεταβλητή εξωτερική ακτίνα

ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΚΑΜΠΤΙΚΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ	ΑΚΤΙΝΑ (m)						
	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14
Ακτινικός άνω πέλματος (cm ² /m)	25	26	26	26	26	26	31
Περιφερειακός άνω πέλματος (cm ² /m)	47	41	36	29	28	27	26
Ακτινικός κάτω πέλματος (cm ² /m)	53	50	48	48	48	48	50
Περιφερειακός κάτω πέλματος (cm ² /m)	68	61	59	59	60	60	63



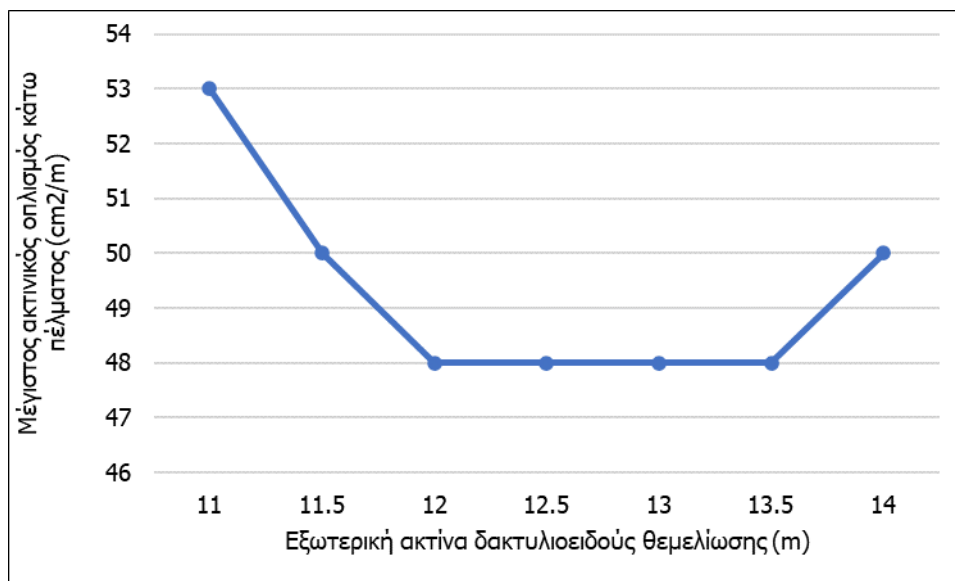
Γράφημα 7-5: Μέγιστος ακτινικός οπλισμός άνω πέλματος για μεταβλητή εξωτερική ακτίνα



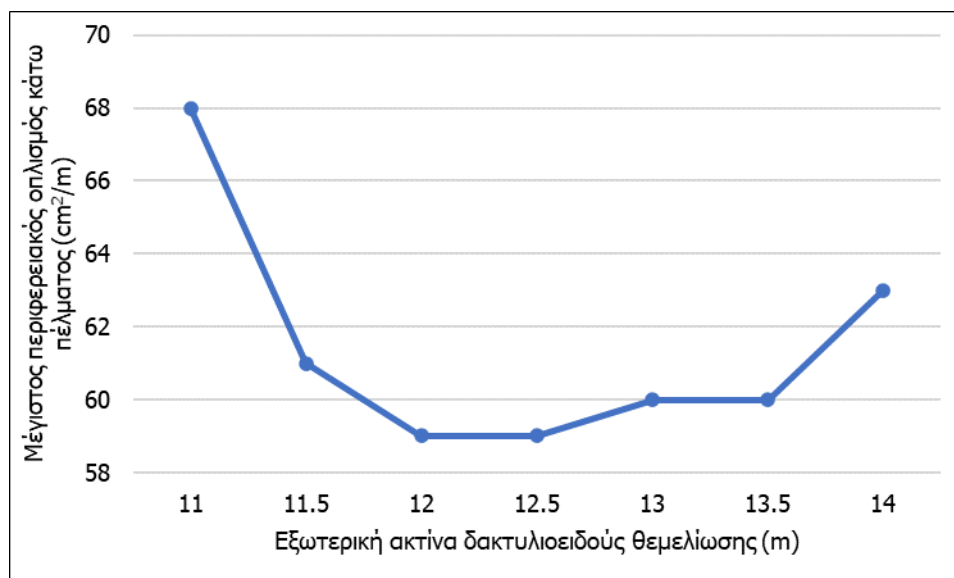
Γράφημα 7-6: Μέγιστος περιφερειακός οπλισμός άνω πέλματος για μεταβλητή εξωτερική ακτίνα

Όσον αφορά τον οπλισμό του άνω πέλματος, ακτινικού και περιφερειακού, διαγράφουν αντίθετες τάσεις. Ο ακτινικός οπλισμός τείνει να αυξηθεί, ενώ ο περιφερειακός ακολουθεί πτωτική πορεία. Επιπλέον, η αύξηση απαίτησης ακτινικού οπλισμού από τα 11 m στα 14 m εξωτερικής ακτίνας, είναι μόλις 6 cm²/m. Απεναντίας, η αντίστοιχη μείωση απαίτησης περιφερειακού οπλισμού από τα 11 στα 14 m εξωτερικής ακτίνας είναι 21 cm²/m, αρκετά μεγάλο εμβαδόν. Είναι άξιο αναφοράς, το γεγονός ότι μετά τα 12.5 m φθίνει ο ρυθμός μείωσης της απαίτησης περιφερειακού οπλισμού.

Σε όλα αυτά πρέπει να τονιστεί, πως σύμφωνα με τη γεωμετρία της θεμελίωσης ο ελάχιστος τοποθετούμενος καμπτικός οπλισμός είναι 29 cm²/m.



Γράφημα 7-7: Μέγιστος ακτινικός οπλισμός κάτω πέλματος για μεταβλητή εξωτερική ακτίνα



Γράφημα 7-8: Μέγιστος ακτινικός οπλισμός κάτω πέλματος για μεταβλητή εξωτερική ακτίνα

Σχετικά με τους μέγιστους οπλισμούς κάτω πέλματος, παρατηρούνται παρόμοιες τάσεις για τον ακτινικό και τον περιφερειακό οπλισμό. Πιο συγκεκριμένα, σε εξωτερική ακτίνα 11 m ξεκινάνε αμφότεροι με μέγιστη τιμή και στη συνέχεια ελαχιστοποιούνται περί την ακτίνα των 12-12.5 m. Τέλος, από τα 13 m, η απαίτηση αρχίζει να αυξάνεται ξανά. Όσον αφορά τον μέγιστο οπλισμό διάτμησης, μειώνεται με τη αύξηση της εξωτερικής ακτίνας, μια μείωση η οποία είναι ανεπαίσθητη.

Εν κατακλείδι, σύμφωνα με τα παραπάνω, η απαίτηση οπλισμού δείχνει να ελαχιστοποιείται στην εξωτερική ακτίνα των 12.5 m. Η εξωτερική ακτίνα 12.5 m μπορεί να θεωρηθεί ως η καταλληλότερη επιλογή, λαμβάνοντας υπόψιν και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν. Έτσι λοιπόν, στην επόμενη παράγραφο θα μεταβληθεί η εσωτερική ακτίνα, διατηρώντας σταθερή την εξωτερική στα 12.5 m.

7.2 Παραμετρική διερεύνηση εσωτερικής ακτίνας και συμπεράσματα

Σε συνέχεια της προηγούμενης παραγράφου, διεξάγονται παραμετρικές διερευνήσεις της εσωτερικής ακτίνας της θεμελίωσης, με σταθερή την εξωτερική ακτίνα στα 12.5 m. Αυτές οι παραμετρικές αναλύσεις ξεκινούν με ακτίνα 5 m και καταλήγουν σε ακτίνα 6 m. Το βήμα αύξησης είναι 0.5 m, για τα τρία εδάφη με δείκτη εδάφους k_1 , k_2 και k_3 . Σε κάθε ακτίνα καταγράφονται τα εξής χαρακτηριστικά:

- ✓ Ποσοστό αδρανούς περιοχής (%)
- ✓ Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση εδάφους (kN/m²)
- ✓ Μέγιστη καθίζηση (cm)
- ✓ Στροφή (deg)
- ✓ Μέγιστος απαιτούμενος οπλισμός κάμψης

Μετέπειτα, παρουσιάζονται οι απαιτήσεις οπλισμού κάμψης, κατά την ακτινική και την περιφερειακή διεύθυνση στην άνω και κάτω επιφάνεια της θεμελίωσης. Τέλος, όλα τα αποτελέσματα δίνονται σε μορφή διαγραμμάτων και καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

- Δείκτης εδάφους $k_1=15 \text{ MN/m}^3$

Πίνακας 7-8: Χαρακτηριστικά για δείκτη εδάφους $k_1=15 \text{ MN/m}^3$ με σταθερή εξωτερική ακτίνα ίση με 12.5 m και μεταβλητή εσωτερική

ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ $k_1=15 \text{ MN/m}^3$			
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΑΚΤΙΝΑ (m)		
-	5	5.5	6
Ποσοστό αδρανούς περιοχής (%)	35	44	46
Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση (kN/m^2)	315	384	395
Μέγιστη καθίζηση (cm)	6.4	8.2	8.4
Στροφή (μοίρες)	0.23	0.35	0.38

- Δείκτης εδάφους $k_2=25 \text{ MN/m}^3$

Πίνακας 7-9: Χαρακτηριστικά για δείκτη εδάφους $k_2=25 \text{ MN/m}^3$ με σταθερή εξωτερική ακτίνα 12.5 m και μεταβλητή εσωτερική

ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ $k_2=25 \text{ MN/m}^3$			
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΑΚΤΙΝΑ (m)		
-	5	5.5	6
Ποσοστό αδρανούς περιοχής (%)	34	40	42
Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση (kN/m^2)	310	313	317
Μέγιστη καθίζηση (cm)	3.8	3.8	3.9
Στροφή (μοίρες)	0.14	0.14	0.16

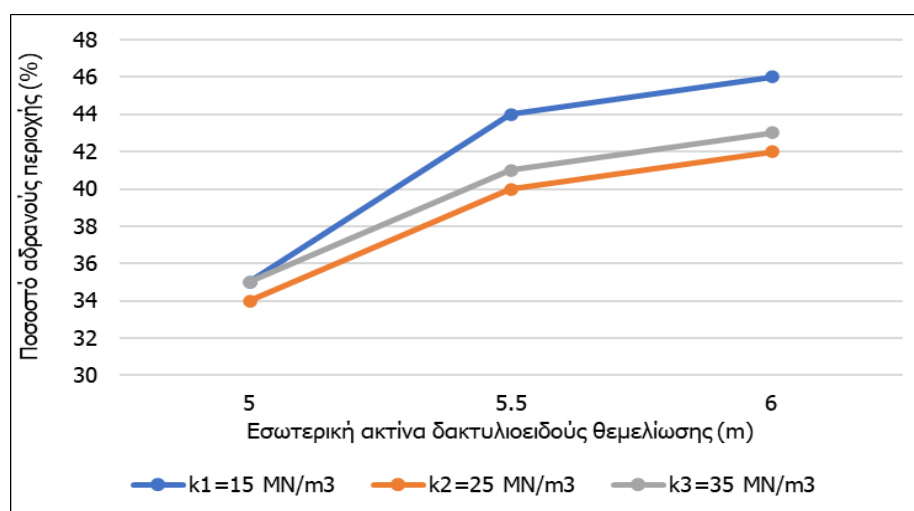
- Δείκτης εδάφους $k_3=35 \text{ MN/m}^3$

Πίνακας 7-10: Χαρακτηριστικά για δείκτη εδάφους $k_3=35 \text{ MN/m}^3$ με σταθερή εξωτερική ακτίνα 12.5 m και μεταβλητή εσωτερική

ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ $k_3=35 \text{ MN/m}^3$			
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΑΚΤΙΝΑ (m)		
	5	5.5	6
-	5	5.5	6
Ποσοστό αδρανούς περιοχής (%)	35	41	43
Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση (kN/m^2)	304	307	311
Μέγιστη καθίζηση (cm)	2.7	2.7	2.7
Στροφή (μοίρες)	0.10	0.11	0.11

Ακολουθεί η συγκεντρωτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων ως προς τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, καθώς και ο σχολιασμός τους.

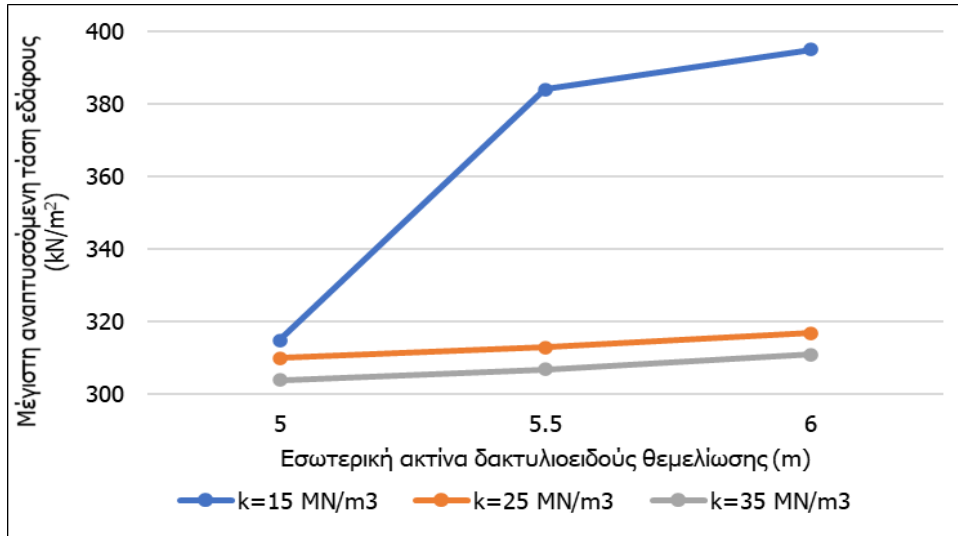
- ❖ Ποσοστό αδρανούς περιοχής



Γράφημα 7-9: Ποσοστό αδρανούς περιοχής ανά εσωτερική ακτίνα για τους 3 δείκτες εδάφους

Η αδρανής περιοχή αυξάνεται με αύξηση της εσωτερικής ακτίνας, γεγονός που είναι αναμενόμενο, καθώς όσο μειώνεται η επιφάνεια της θεμελίωσης, μειώνεται και το βάρος αυτής. Συνεπώς, μεγαλύτερο τμήμα της θεμελίωσης ανασηκώνεται. Για έδαφος με δείκτη εδάφους k_1 , η αύξηση της εσωτερικής ακτίνας στα 6 m, μοιάζει να είναι απαγορευτική.

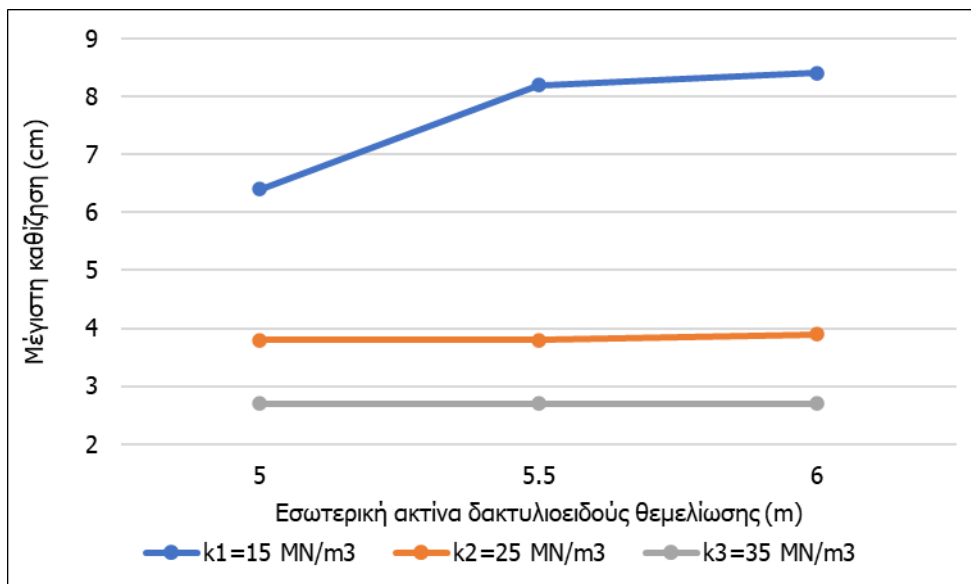
❖ Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση εδάφους



Γράφημα 7-10: Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση εδάφους ανά εσωτερική ακτίνα για τους 3 δείκτες εδάφους

Από το γράφημα 7-10, προκύπτει πως για τους δείκτες εδάφους k_2 και k_3 η αύξηση της εσωτερικής ακτίνας στα 6 m, δεν επηρεάζει αισθητά τις αναπτυσσόμενες τάσεις εδάφους. Απεναντίας, για το δείκτη εδάφους k_1 , είναι αξιοσημείωτη η απότομη αύξηση των αναπτυσσόμενων τάσεων εδάφους από την αύξηση της εσωτερικής ακτίνας από τα 5 m στα 6 m.

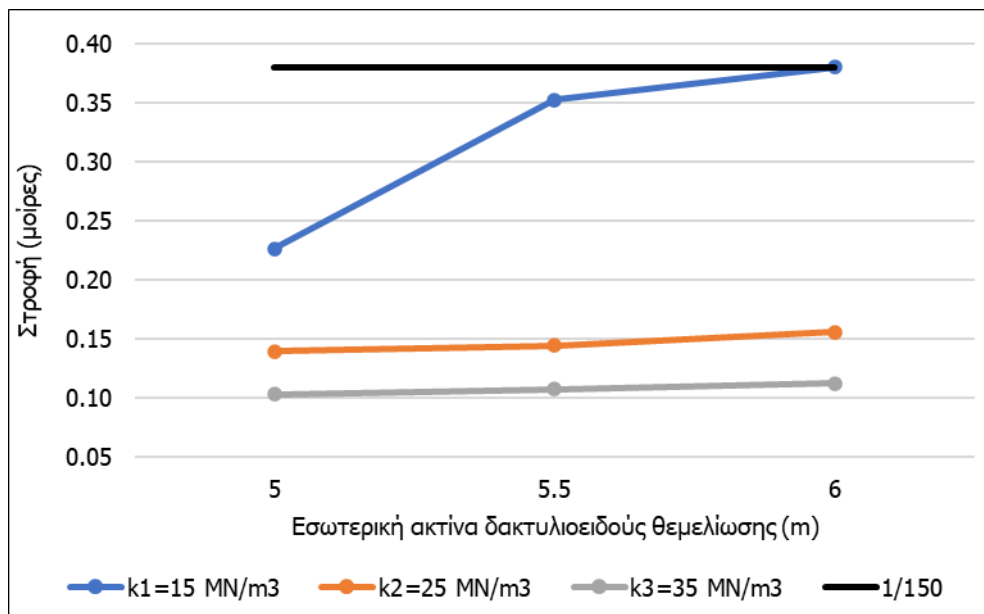
❖ Μέγιστη καθίζηση



Γράφημα 7-11: Μέγιστη καθίζηση εδάφους ανά εσωτερική ακτίνα για τους 3 δείκτες εδάφους

Η μέγιστη καθίζηση παραμένει αμετάβλητη με την αύξηση της εξωτερικής ακτίνας για εδάφη δείκτη k_2 και k_3 . Για τον δείκτη k_1 , η καθίζηση σημειώνει αύξηση.

❖ Στροφή



Γράφημα 7-12: Μέγιστη καθίζηση εδάφους ανά εσωτερική ακτίνα για τους 3 δείκτες εδάφους

Ομοίως, στη στροφή για δείκτες εδάφους k_2 και k_3 , η αύξηση της εσωτερικής ακτίνας οδηγεί σε ανεπιθύητη αύξηση της στροφής, ενώ για το έδαφος k_1 , η αύξηση της στροφής είναι αρκετά μεγάλη και απαγορευτική για εσωτερική ακτίνα ίση με 6 m (πίνακας 7-6).

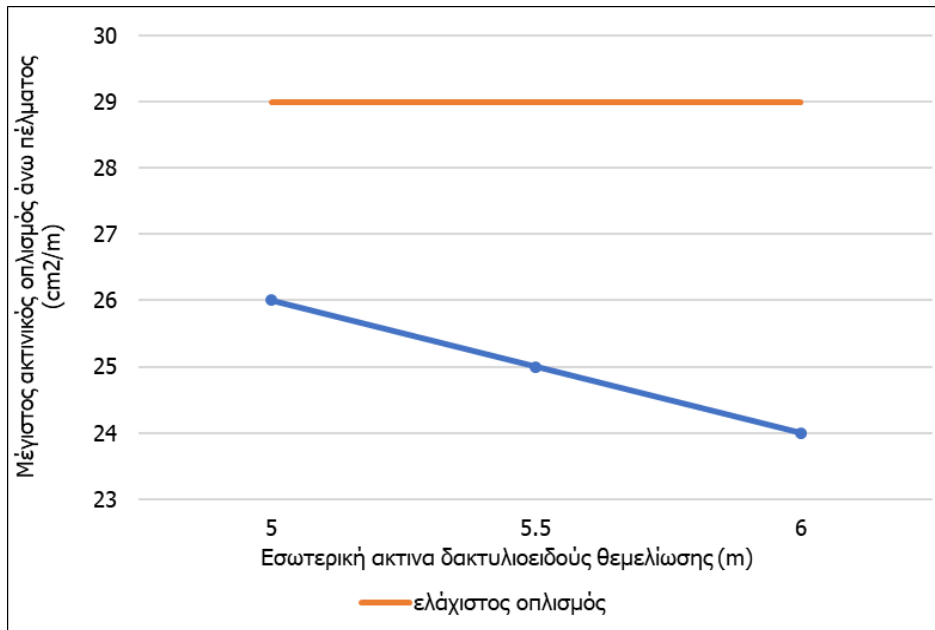
Συνολικά, παρατηρείται πως η αύξηση της εσωτερικής ακτίνας, δεν προκαλεί μεγάλες επιδράσεις στα παραπάνω χαρακτηριστικά, σε εδάφη με δείκτες k_2 και k_3 . Όμως, στο έδαφος με δείκτη k_1 , σημειώνονται μεγάλες αυξήσεις των τιμών των παραπάνω χαρακτηριστικών. Παρόμοιες απότομες αυξήσεις, εντοπίστηκαν και στην προηγούμενη παραμετρική διερεύνηση, όταν η εξωτερική ακτίνα μειωνόταν. Συνεπώς, η αύξηση εσωτερικής ακτίνας για δείκτη εδάφους k_1 απαιτείται η διενέργεια διεξοδικών ελέγχων.

❖ Οπλισμός κάμψης

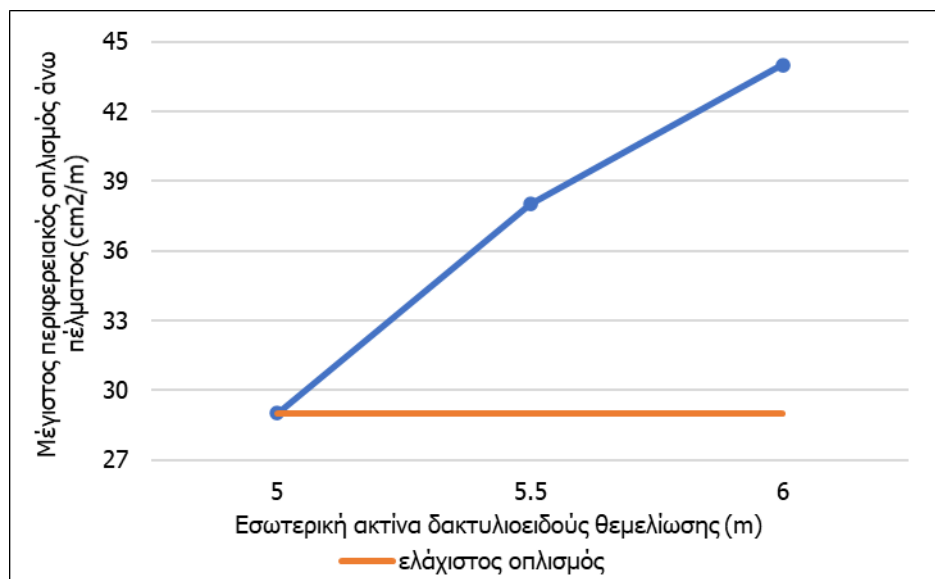
Παρουσιάζονται οι μέγιστες απαιτήσεις σε οπλισμό κάμψης για τον περιφερειακό και ακτινικό οπλισμό άνω και κάτω πέλματος, συναρτήσει της αύξησης της εσωτερικής ακτίνας.

Πίνακας 7-11: Μέγιστοι οπλισμοί κάμψης για μεταβλητή εσωτερική ακτίνα

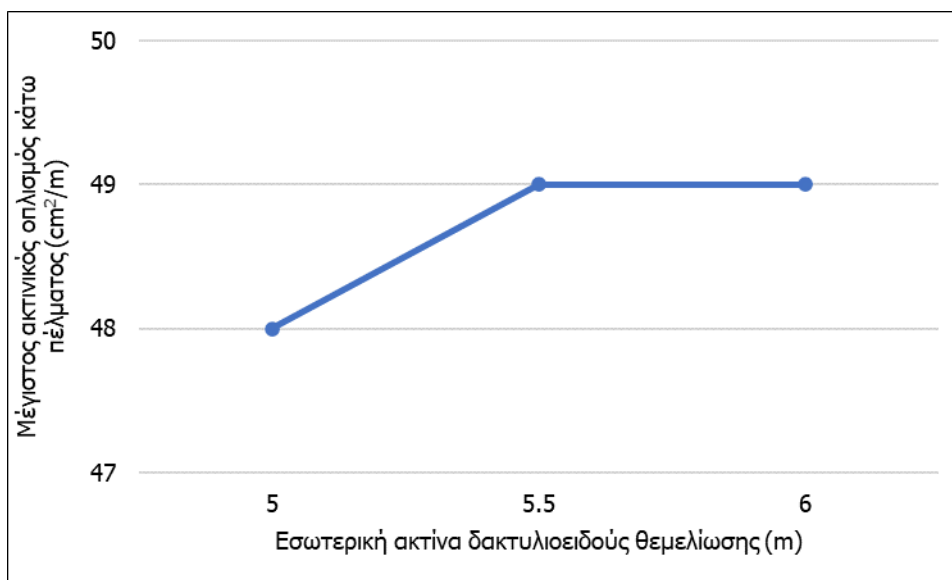
ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΚΑΜΠΤΙΚΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ	ΑΚΤΙΝΑ (m)		
	5	5.5	6
Ακτινικός άνω πέλματος (cm ² /m)	26	25	24
Περιφερειακός άνω πέλματος (cm ² /m)	29	38	44
Ακτινικός κάτω πέλματος (cm ² /m)	48	49	49
Περιφερειακός κάτω πέλματος (cm ² /m)	59	64	71



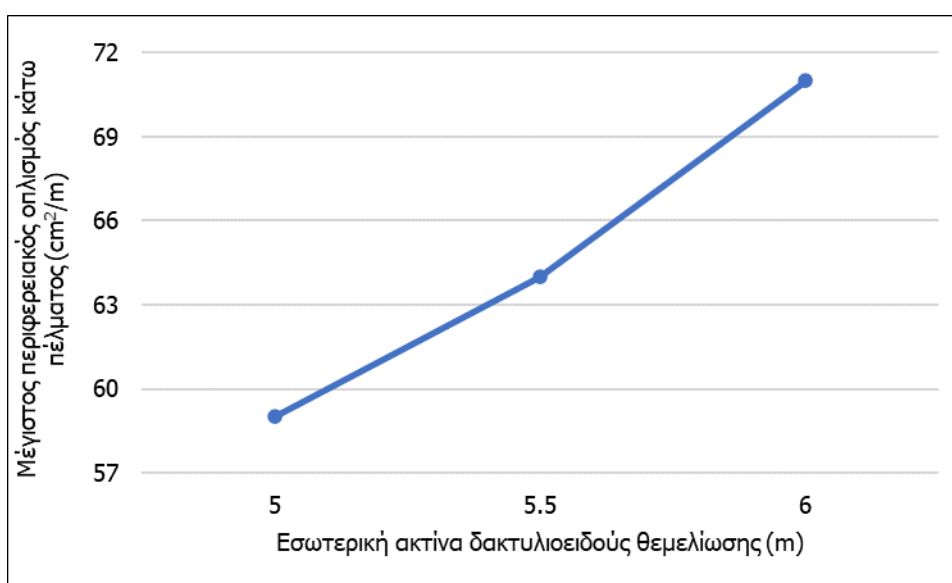
Γράφημα 7-13: Μέγιστος αξονικός οπλισμός άνω πέλματος για μεταβλητή εσωτερική ακτίνα



Γράφημα 7-14: Μέγιστος περιφερειακός οπλισμός άνω πέλματος για μεταβλητή εσωτερική ακτίνα



Γράφημα 7-15: Μέγιστος ακτινικός οπλισμός κάτω πέλματος για μεταβλητή εσωτερική ακτίνα



Γράφημα 7-16: Μέγιστος ακτινικός οπλισμός κάτω πέλματος για μεταβλητή εσωτερική ακτίνα

Όπως αναδεικνύεται από τα παραπάνω διαγράμματα, η αύξηση της εσωτερικής ακτίνας οδηγεί σε αύξηση της απαίτησης οπλισμών. Ιδιαίτερα στους περιφερειακούς οπλισμούς άνω και κάτω πέλματος, παρατηρείται αύξηση περί το 40% και 20% αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, από εσωτερική ακτίνα 5 m σε ακτίνα 6 m. Ο μοναδικός οπλισμός που παρουσιάζει μείωση είναι ο άνω ακτινικός από 26 cm²/m σε 24 cm²/m. Αυτή η μείωση δεν είναι χρήσιμη, καθώς, όπως έχει αναφερθεί, για τη δεδομένη γεωμετρία θεμελίωσης, ο ελάχιστος οπλισμός είναι 29 cm²/m.

Η αύξηση απαίτησης καμπτικού οπλισμού οδηγεί στην επιλογή της εσωτερικής ακτίνας 5 m. Πέραν αυτού, ακόμα και αν τα αποτελέσματα ήταν αποδεκτά για την επιλογή εσωτερικής ακτίνας 6 m, τότε θα

έπρεπε να επανεκτελεστούν οι έλεγχοι διάτρησης. Σε αυτήν την περίπτωση, τα κατακόρυφα στοιχεία θα απέχουν από την άκρη μόλις 1.5 m, γεγονός που θα οδηγήσει στη θεώρηση του κατακόρυφου στοιχείου από εσωτερικό υποσύλωμα σε οριακά περιμετρικό (εικόνα 6-3). Η αύξηση του συντελεστή β, καθιστά αρκετά πιθανή την τοποθέτηση οπλισμού διάτρησης και ενδεχομένως την αλλαγή γεωμετρίας, μέσω αύξησης πάχους της θεμελίωσης.

Εν κατακλείδι, λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, οι αναλύσεις θα συνεχιστούν με εσωτερική ακτίνα ίση με 5 m.

8 ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΦΟΡΕΑΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

Σε συνέχεια των προηγούμενων κεφαλαίων, και αφού αναδείχθηκαν συγκεκριμένες διαστάσεις για το μεταλλικό τμήμα και τη δακτυλιοειδή θεμελίωση, πραγματοποιείται η σύνθεση των μοντέλων. Στο σύνθετο αυτό φορέα, καταγράφονται τα αποτελέσματα βασικών χαρακτηριστικών της βάσης ανεμογεννήτριας, τα οποία συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των προηγούμενων αναλύσεων. Τα αποτελέσματα του σύνθετου φορέα αναμένονται να προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματικότητα. Ακολούθως, γίνεται προσπάθεια υπολογισμού της ιδιοσυχνότητας της κατασκευής, καθώς η ύπαρξη μη γραμμικών ελατηρίων στη θεμελίωση, δεν καθιστά εφικτή την εκτέλεση ιδιομορφικής ανάλυσης. Τέλος, πραγματοποιείται ο έλεγχος συντονισμού της κατασκευής, ο οποίος είναι και ο πιο κρίσιμος για τη παρούσα διπλωματική.

8.1 Ανάλυση σύνθετου φορέα και σύγκριση αποτελεσμάτων

Σε αυτήν την παράγραφο, καταγράφονται διάφορα χαρακτηριστικά της κατασκευής, κυρίως της θεμελίωσης, που προκύπτουν από το σύνθετο μοντέλο και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα από τα ξεχωριστά μοντέλα, δηλαδή το μοντέλο της μεταλλικής κατασκευής (Κεφάλαιο 4) και εκείνο της θεμελίωσης (Κεφάλαιο 6). Τα χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- ✓ Μετακίνηση κορυφής βάσης
- ✓ Ποσοστό αδρανούς περιοχής θεμελίωσης
- ✓ Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση εδάφους θεμελίωσης
- ✓ Μέγιστη Καθίζηση θεμελίωσης
- ✓ Στροφή θεμελίωσης
- ✓ Οπλισμοί κάμψης

Πίνακας 8-1: Μετακινήσεις κορυφής βάσης

Θεμελίωση	$U_{\text{κορ}}$ (m)	
Χωρίς θεμελίωση-Αρθρωμένα στοιχεία	0.30	H/200
Θεμελίωση με δείκτη $k_1 = 15 \text{ MN/m}^3$	0.5	H/120
Θεμελίωση με δείκτη $k_2 = 25 \text{ MN/m}^3$	0.4	H/150
Θεμελίωση με δείκτη $k_3 = 35 \text{ MN/m}^3$	0.36	H/167

Όπως, είχε αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, οι μετακινήσεις κορυφής αναμένονταν να είναι μεγαλύτερες λόγω της στροφής της θεμελίωσης. Όσο πιο σκληρό είναι το έδαφος, τόσο λιγότερο τείνει να στρίψει η θεμελίωση. Συνεπώς, στο πιο σκληρό έδαφος, εκείνο με δείκτη k_3 , αναμένεται η μικρότερη απόκλιση, από τα αποτελέσματα του μοντέλου χωρίς θεμελίωση. Γεγονός που αποδεικνύεται και από τα αποτελέσματα του πίνακα 8-1.

Πίνακας 8-2: Σύγκριση χαρακτηριστικών θεμελίωσης

Μοντέλο	Ποσοστό αδρανούς περιοχής (%)			Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση εδάφους (kN/m^2)			Μέγιστη καθίζηση (cm)			Στροφή (μοίρες)		
	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
Φορέας θεμελίωσης	35	34	35	315	310	304	6.4	3.8	2.7	0.23	0.14	0.10
Σύνθετος Φορέας	35	34	35	316	311	306	6.1	3.8	2.6	0.22	0.14	0.10

Πίνακας 8-3: Σύγκριση μέγιστων απαιτούμενων οπλισμών κάμψης

Μέγιστος απαιτούμενος καμπτικός οπλισμός	Μοντέλο	
	Φορέας θεμελίωσης	Σύνθετος Φορέας
Ακτινικός άνω πέλματος (cm^2/m)	26	24
Περιφερειακός άνω πέλματος (cm^2/m)	29	27
Ακτινικός κάτω πέλματος (cm^2/m)	48	47
Περιφερειακός κάτω πέλματος (cm^2/m)	59	57

Από τους πίνακες 8-2 και 8-3 παρατηρείται, ότι τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών και του καμπτικού οπλισμού της θεμελίωσης είναι σχεδόν τα ίδια (με ελάχιστες αποκλίσεις) με τα αποτελέσματα του σύνθετου φορέα. Η παρατήρηση αυτή θεωρείται σημαντική, καθώς η ανάλυση του φορέα θεμελίωσης πραγματοποιείται 6 φορές γρηγορότερα από αυτή του σύνθετου φορέα. Συνεπώς, για την ανάλυση της θεμελίωσης, αυτή καθ' αυτή, συνίσταται η χρήση του μοντέλου του απλό φορέα θεμελίωσης (Κεφάλαιο 6) και όχι του σύνθετου (Κεφάλαιο 8), για εξοικονόμηση χρόνου.

8.2 Έλεγχος συντονισμού της κατασκευής

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, ο υπολογισμός της ιδιοσυχνότητας της κατασκευής μέσω του σύνθετου μοντέλου είναι ανέφικτη, εξαιτίας των μη γραμμικών επιφανειακών ελατηρίων, που είναι τοποθετημένα στη θεμελίωση. Έτσι, λοιπόν, χρησιμοποιούνται άλλοι τρόποι, για να υπολογισθεί η ιδιοσυχνότητα βάσης ανεμογεννήτριας μαζί με τον πυλώνα ανεμογεννήτριας. Αφού υπολογιστεί η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής θα είναι δυνατός ο έλεγχος συντονισμού.

8.2.1 Ιδιοσυχνότητα μέσω στροφικής δυσκαμψίας και μη γραμμικής στατικής ανάλυσης

Αν θεωρηθεί ολόκληρη η βάση ανεμογεννήτριας ως «έδραση» της ανεμογεννήτριας, καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός της ιδιοσυχνότητας της κατασκευής, μέσω του γραφήματος 8-1. Το παρακάτω γράφημα, παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της ιδιοσυχνότητας, μέσω της στροφικής δυσκαμψίας της «θεμελίωσης» της ανεμογεννήτριας [7]. Έτσι λοιπόν, στην κορυφή της «θεμελίωσης», δηλαδή στην κορυφή της βάσης ανεμογεννήτριας και συγκεκριμένα στο master node (σχήμα 4-2), επιβάλλεται μια ροπή ίση με 100 MNm. Μέσω της εκτέλεσης, της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης προκύπτει η στροφή φ , με την οποία διαιρείται η δρώσα ροπή ώστε να προκύψει η ζητούμενη στροφική δυσκαμψία, δηλαδή εφαρμόζοντας την παρακάτω εξίσωση:

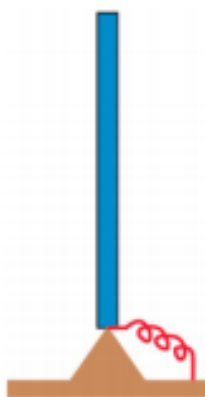
$$M_y = K_R \times r_y \quad (8-1)$$

Όπου:

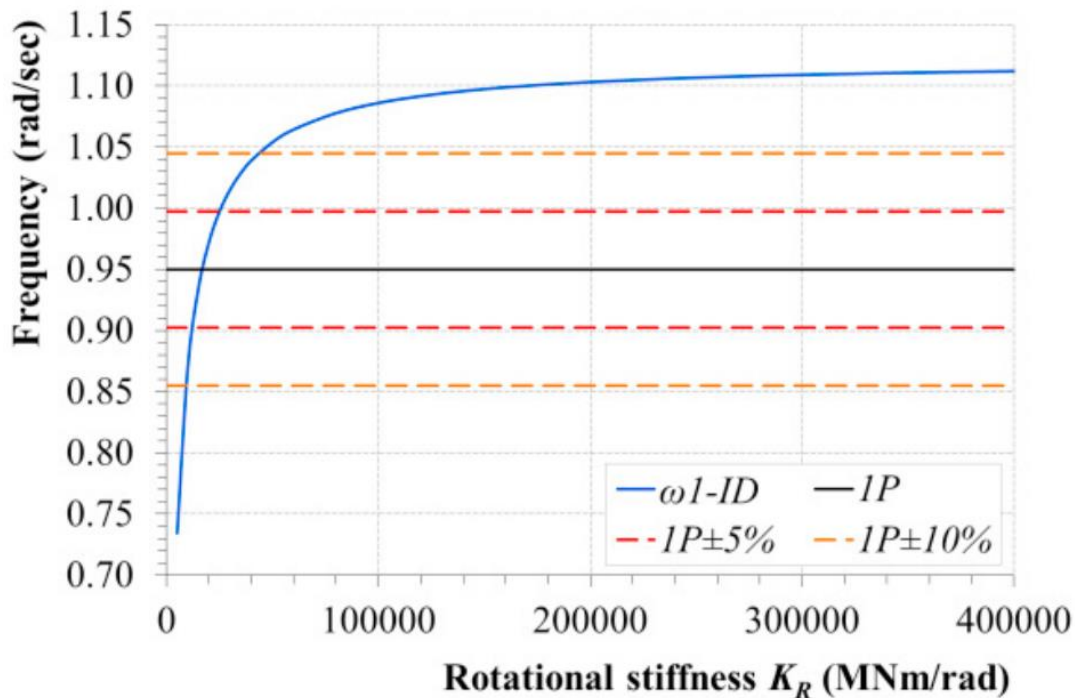
M_y : Δρώσα ροπή στο master node

K_R : Στροφική δυσκαμψία

r_y : Στροφή στο master node



Σχήμα 8-1: Στροφικό ελατήριο [7]



Γράφημα 8-1: Συσχέτιση πρώτης ιδιοσυχνότητας με τη στροφική δυσκαμψία του ελατηρίου στην έδραση [7]

Στον πίνακα 8-4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στροφικής δυσκαμψίας και της ιδιοσυχνότητας που προκύπτει από το γράφημα 8-1, για τους 3 δείκτες εδάφους k_1 , k_2 και k_3 , ώστε να διερευνηθεί και η επίδραση του εδάφους.

Πίνακας 8-4: Στροφική δυσκαμψία και ιδιοσυχνότητα κατασκευής

Για $M_y=100$ MNm	$k_1=15$ MN/m ³	$k_2=25$ MN/m ³	$k_3=35$ MN/m ³
R_y (rad)	0.03515	0.03462	0.03438
K_R (MNm/rad)	2845	2889	2909
ω (rad/sec)	0.60	0.60	0.60

8.2.2 Ιδιοσυχνότητα μέσω ιδιομορφικής ανάλυσης

Η παρουσία των μη γραμμικών επιφανειακών ελατηρίων, δεν επιτρέπει στο πρόγραμμα τον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας. Αν δεν υπήρχαν τα μη γραμμικά επιφανειακά ελατήρια, τότε με την τοποθέτηση ενός μοντέλου πυλώνα ανεμογεννήτριας στο master node της κορυφής της βάσης ανεμογεννήτριας, θα ήταν εφικτή η ιδιομορφική ανάλυση και ο υπολογισμός της ιδιοσυχνότητας της συνολικής κατασκευής. Η εξάλειψη των μη γραμμικών επιφανειακών ελατηρίων από το μοντέλο, θα επιτευχθεί με τον εξής τρόπο:

Αρχικά, επιβάλλεται στο σύνθετο φορέα και συγκεκριμένα στο master node μια ροπή ίση με 100 MNm. Μετά την εκτέλεση της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης, προκύπτει μια θλιβόμενη περιοχή στη θεμελίωση, η οποία είναι και η περιοχή όπου τα μη γραμμικά ελατήρια λειτουργούν, επειδή λειτουργούν μόνο σε θλίψη. Στη μη θλιβόμενη περιοχή τα μη γραμμικά ελατήρια δεν λειτουργούν. Κατά συνέπεια, τοποθετούνται στα πεπερασμένα στοιχεία της θλιβόμενης περιοχής της θεμελίωσης, γραμμικά επιφανειακά ελατήρια στον κατακόρυφο άξονα. Ακολουθώντας τον ίδιο συλλογισμό, στη μη θλιβόμενη περιοχή δεν τοποθετούνται ελατήρια στο κατακόρυφο άξονα, για να ανασκώνεται

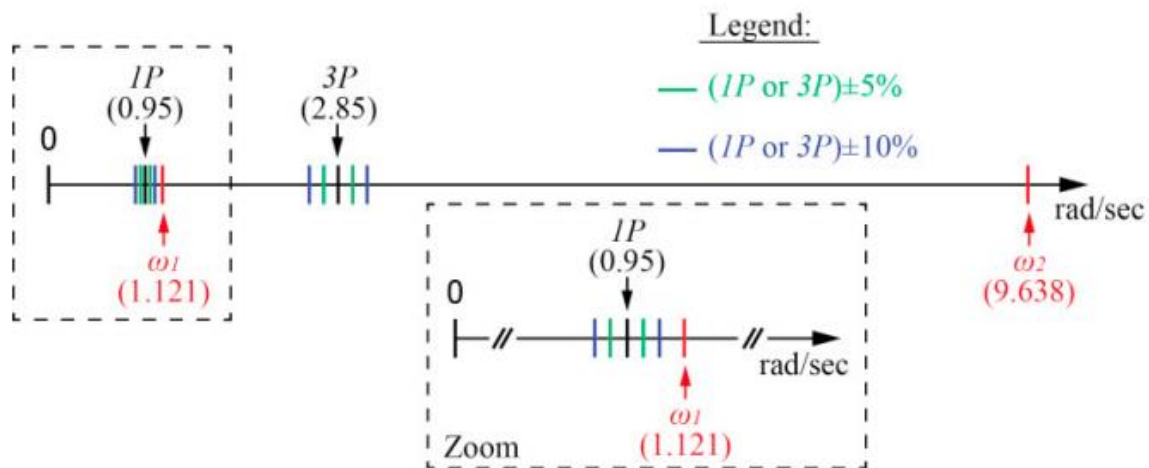
ελεύθερα η συγκεκριμένη περιοχή. Αφού το εμπόδιο των μη γραμμικών ελατηρίων ξεπεράστηκε, τοποθετείτε πυλώνες ανεμογεννήτριας ύψους 117.5 m, στην κορυφή της βάσης ανεμογεννήτριας και εκτελείται ιδιομορφική ανάλυση, για τον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας ολόκληρης της κατασκευής.



Σχήμα 8-2: Βάση ανεμογεννήτριας με στοιχεία πυλώνα ανεμογεννήτριας 117.5 m στην κορυφή της

Πίνακας 8-5: Ιδιοσυχνότητα ολόκληρης της κατασκευής μέσω ιδιομορφικής ανάλυσης

Δείκτης εδάφους	ω_1 (rad/sec)	ω_2 (rad/sec)	
k_1	0.580	4.381	
k_2	0.588	4.645	
k_3	0.591	4.773	
no rmod no cross	ω_1 (rad/sec)	ω_2 (rad/sec)	ω_3 (rad/sec)
k_1	0.580	<u>1.068</u>	<u>4.314</u>
k_2	0.588	<u>1.068</u>	<u>4.314</u>
k_3	0.591	<u>1.068</u>	<u>4.314</u>



Σχήμα 8-3: Ιδιοσυχνότητα συμβατικής ανεμογεννήτριας 117.5 m σε σύγκριση με 1P και 3P [7]

Από τους πίνακες 8-4 και 8-5, παρατηρείται πως η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα ολόκληρης της κατασκευής κατατάσσεται εκτός απαγορευτικού εύρους $\pm 10\%$ της 1P και 3P (σχήμα 8-3). Με την αφαίρεση των RMOD & CROSS στοιχείων, η δεύτερη ιδιοσυχνότητα πλησιάζει πολύ το απαγορευτικό εύρος της 1P. Επιπλέον, παρατηρείται πως τα RMOD & CROSS δεν προσφέρουν στην καμπτική δυσκαμψία, όμως ενισχύουν σημαντικά τη στρεπτική δυσκαμψία της κατασκευής. Συνεπώς, συνολικά η κατασκευή αποφεύγει τον συντονισμό για τιμή $P = 0.95$ rad/sec.

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε βάση ανεμογεννήτριας ύψους 60 m αποτελούμενη εσωτερικό κυλινδρικό κέλυφος και εξωτερικό πλαίσιακό φορέα, κατάλληλα διασυνδεδεμένα μεταξύ τους. Σκοπός της εργασίας ήταν να διερευνηθεί, εάν η συνολική κατασκευή (βάση και πυλώνας ανεμογεννήτριας) είναι σε θέση να ικανοποιήσει τους στατικούς ελέγχους και κυρίως εάν δύναται να έχει την απαιτούμενη ιδιοσυχνότητα, ώστε να αποφευχθεί ο συντονισμός.

Καταρχάς, πραγματοποιήθηκε γραμμική στατική και ιδιομορφική ανάλυση στο μεταλλικό τμήμα της βάσης της ανεμογεννήτριας. Οι μεγάλες στρεπτικές ιδιοπερίοδοι, που προέκυψαν, οδήγησαν σε ενίσχυση του πλαίσιακού φορέα, ώστε να γίνει όσο το δυνατόν πιο δύσκαμπτη η βάση ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια, έπειτα από πολλές δοκιμές, προέκυψαν οι διατομές των στοιχείων του πλαίσιακού φορέα. Οι διατομές επιλέχθηκαν με εκμετάλλευση περί το 90% και περί το 70%. Η εκμετάλλευση περί το 70%, πραγματοποιήθηκε για να αφεθεί περιθώριο στις διατομές, επειδή σε όλη τη διαδικασία δεν έχει ληφθεί υπόψιν ο άνεμος που καταπονεί τη βάση ανεμογεννήτριας. Με αφορμή τη δεύτερη περίπτωση εκμετάλλευσης, παρατηρούνται οι επιδράσεις της αλλαγής αυτής στην κατασκευή και κυρίως ως προς τη δυσκαμψία. Όλα τα δομικά στοιχεία ελέγχθηκαν κατά EN1993.

Σε επόμενο στάδιο, διεξήχθη παραμετρική διερεύνηση ως προς την ακτίνα του εξωτερικού πλαίσιακού φορέα. Οι στόχοι που τέθηκαν ήταν, πρώτον να προκύψει η βέλτιστη ακτίνα ως προς τη δυσκαμψία και δεύτερον να επιτυγχάνεται εκμετάλλευση, με όσο το δυνατόν οικονομικότερο τρόπο, των στοιχείων του εξωτερικού πλαίσιακού φορέα.

Μετά την επιλογή της βέλτιστης ακτίνας εξωτερικού πλαίσιακού φορέα, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η επιρροή στην απόκριση της ευκαμψίας της θεμελίωσης. Πραγματοποιήθηκε μη γραμμική στατική ανάλυση στο φορέα της δακτυλιοειδούς θεμελίωσης, επειδή το έδαφος προσομοιώθηκε με μη γραμμικά επιφανειακά ελατήρια. Η θεμελίωση ελέγχθηκε ως προς την επάρκεια της σε διάτμηση και διάτρηση, κατά EN1992, και οπλίστηκε σε κάμψη και διάτμηση. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε παραμετρική διερεύνηση ως προς την εξωτερική και εσωτερική ακτίνα της δακτυλιοειδούς θεμελίωσης,

για να προσδιορισθεί η γεωμετρία με τα βέλτιστα χαρακτηριστικά και την ελάχιστη δυνατή απαίτηση οπλισμού.

Τέλος, το μοντέλο της θεμελίωσης ενσωματώθηκε σε εκείνο του μεταλλικού τμήματος της βάσης ανεμογεννήτριας. Μετά την ανάλυση του σύνθετου φορέα, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων του, με εκείνα των δύο μεμονωμένων μοντέλων (μεταλλικής κατασκευής και θεμελίωσης). Ακολούθησε ο υπολογισμός της ιδιοσυχνότητας της συνολικής κατασκευής και ο έλεγχος συντονισμού της κατασκευής.

Από την παρούσα διπλωματική εργασία, προέκυψαν ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεταγενέστερες έρευνες, με στόχο την περαιτέρω εξέλιξη των ιδεών που αναπτύσσονται.

- ✓ Η βάση ανεμογεννήτριας με ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα περί τα 7.5 m, αποτελεί την πιο δύσκαμπτη επιλογή.
- ✓ Για ακτίνα εξωτερικού πλαισιακού φορέα περί τα 7.5 m βελτιστοποιείται η εκμετάλλευση όλων των ομάδων των στοιχείων, που απαρτίζουν τον εξωτερικό πλαισιακό φορέα ως προς το βάρος, άρα και η οικονομία του υλικού.
- ✓ Για δακτυλιοειδή θεμελίωση με δείκτη εδάφους $k_1=15 \text{ MN/m}^3$, απαιτείται η διεξαγωγή διεξοδικών ελέγχων. Ορισμένα χαρακτηριστικά της θεμελίωσης τείνουν να αυξάνονται απότομα, κατά την απόπειρα μείωσης της επιφάνειας της θεμελίωσης, είτε μέσω αύξησης της εσωτερικής, είτε μείωσης της εξωτερικής ακτίνας της δακτυλιοειδούς θεμελίωσης.
- ✓ Η δακτυλιοειδής θεμελίωση με πάχος 2 m, εσωτερική ακτίνα περί τα 5 m και εξωτερική περί τα 12.5 m, ελαχιστοποιεί τον οπλισμό κάμψης που απαιτεί η θεμελίωση.
- ✓ Τα αποτελέσματα του σύνθετου φορέα (Κεφάλαιο 8) και του απλού φορέα θεμελίωσης (Κεφάλαιο 6), έχουν εξαιρετικά μικρές αποκλίσεις. Το εύρημα αυτό θεωρείται πρωταρχικής σημασίας, διότι ο απλός φορέας απαιτεί 6 φορές μικρότερο υπολογιστικό κόστος συγκριτικά με το σύνθετο φορέα.
- ✓ Τα στοιχεία RMOD και CROSS, που τοποθετήθηκαν στη βάση ανεμογεννήτριας, δεν προσφέρουν αύξηση της καμπτικής, όμως ενισχύουν τη στρεπτική δυσκαμψία.
- ✓ Ο συντονισμός της κατασκευής αποφεύγεται για τιμή $P=0.95 \text{ rad/sec}$. Για μεγαλύτερη τιμή της P , τα στοιχεία RMOD και CROSS είναι απαραίτητα για την αποφυγή συντονισμού.

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Committee for Standardization, Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-6: "Strength and Stability of Shell Structures", 2007
- [2] European Committee for Standardization, Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2005
- [3] European Committee for Standardization, Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004
- [4] International Standard, IEC 61400-1: Wind turbines – Part 1: "Design requirements", 3rd Edition 2005-08
- [5] Det Norske Veritas (DNV), Wind Energy Department, Risø National Laboratory, "Guidelines for Design of Wind Turbines", 2001
- [6] Germanischer Lloyd, "Guideline for the Certification of Wind Turbines"
- [7] Resonance Investigation and its Effects on Weight Optimization of Tubular Steel Wind Turbine Towers, 2019
- [8] Ι. Κατσικαδέλης, "Δυναμική ανάλυση των κατασκευών – Θεωρία και Εφαρμογές", Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, Ελλάδα 2004.
- [9] Α.Γ. Αναγνωστόπουλος – Β.Π. Παπαδόπουλος, "Σχεδιασμός Θεμελιώσεων", Εκδόσεις Συμμετών, Αθήνα, Ελλάδα 2016
- [10] <https://wwindea.org/>
- [11] Wind energy in Europe 2020 Statistics and the outlook for 2021-2025 (windeurope.org)
- [12] <https://arborwind.com/vertical-axis-wind-turbines/>
- [13] Goedkoop, M., R. Heijungs, et al. (2009). ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, Netherlands.
- [14] <https://www.renewableuk.com/>

- [15] The Economics of Wind Energy by the European Wind Energy Association, EWEA, 2009
- [16] Global Wind Energy Outlook report, GWEC, 2016
- [17] Stehly, Tyler J., Heimiller, Donna M., & Scott, George N., 2016, Cost of Wind Energy Review, United States
- [18] SAP2000: Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures
- [19] CONCRETE SHELL REINFORCEMENT DESIGN Technical Note Design Information
- [20] BJERRUM, L., (1963), "Discussion to European Conf. on Soil Mech. and Found." Eng., Weisbaden
- [21] POLSHIN, D.E. and TOKAR, R.A., (1957), "Maximum Allowable Differential Settlement of Structures", Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng.
- [22] Robert W. Righter (1996) Wind Energy in America: A History, University of Oklahoma Press, p.44
- [23] Jacobson, M. Z. (2009). "Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security." Energy & Environmental Science 2, p.148.