



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Διπλωματική εργασία:

ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Παπαθωμά Σ.Χριστοφιλίνα

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Ν. Λαγαρός Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Απρίλιος 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νίκο Λαγαρό για την καθοδήγηση και πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, τον κ. Αναστασόπουλο και την κα. Μητροπούλου Χαρά που συνέβαλαν κι αυτοί με τη σειρά τους σε κάποια βασικά θέματα για τη διεκπεραίωση της εργασίας.

Κυρίως, όμως, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση τους και τη συμβολή τους, ώστε σε αυτά τα τελευταία 5,5 χρόνια να συγκεντρώσω εμπειρίες και αναμνήσεις ανεκτίμητης αξίας, οι οποίες θα με συνοδεύουν τα επόμενα χρόνια. Ευχαριστώ!

Περίληψη

Η Αιολική Ενέργεια καταγράφει εντυπωσιακή ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, ενώ η σημασία της προστασίας του περιβάλλοντος παράλληλα με την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του ανθρώπου έχει έρθει στην επιφάνεια. Καινούργιες τεχνολογίες καθιστούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο πιο οικονομική σε αντίθεση με την αυξανόμενη τάση του κόστους στην εξόρυξη ορυκτών καυσίμων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί συνέχεια και επέκταση της μεθοδολογίας της διπλωματικής εργασίας «Βέλτιστος Δομικός Σχεδιασμός Ανεμογεννητριών» (Μπίρδας Μιχαήλ, Νοέμβριος 2012) και σκοπός της είναι η μελέτη της επιρροής της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επιρροής της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών. Γίνεται βελτιστοποίηση του δομικού σχεδιασμού, με βάση το κόστος ενός χαλύβδινου σωληνοειδή πύργου που στηρίζει μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα, συναρτήσεως του ύψους του. Στη συνέχεια διερευνάται το κέρδος με βάση την παραγωγή ενέργειας από κάθε τύπο ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη το κόστος του πύργου και της θεμελίωσής του.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου σχεδιάζονται στο πρόγραμμα SAP2000 πέντε μοντέλα του πύργου της ανεμογεννήτριας σε τέσσερα διαφορετικά ύψη των 80, 100, 120, 140 μέτρων, με διαφορετικό τύπο ανεμογεννήτριας Vestas V80-MW, V90-MW, V112-MW. Εφαρμόζονται τα φορτία που ενεργούν στον πύργο και σχεδιάζεται και η θεμελίωση του κάθε μοντέλου. Τρεις τύποι θεμελίωσης χρησιμοποιούνται, πάκτωση, επιφανειακό πέδιλο και πάσσαλοι και δύο ποιότητες χάλυβα(S235, S450). Στη συνέχεια, τα μοντέλα εισάγονται στο πρόγραμμα βελτιστοποίησης Optimus, στο οποίο διατυπώνεται πλήρως το πρόβλημα βελτιστοποίησης που αφορά τον στόχο σχεδιασμού, τις μεταβλητές σχεδιασμού, τις προκαθορισμένες παραμέτρους και τους σχεδιαστικούς περιορισμούς. Το πρόγραμμα Optimus χρησιμοποιώντας αλγόριθμο βελτιστοποίησης με βάση την μέθοδο διαφορικής εξέλιξης δίνει το βέλτιστο σχεδιασμό με βάση το κόστος.

Κατόπιν, επεκτείνεται η μεθοδολογία που υπολογίζει τις παραγόμενες κιλοβατώρες για κάθε ύψος του πύργου στον κύκλο ζωής της ανεμογεννήτριας (20 χρόνια), για ένα φάσμα μέσων ετήσιων ταχυτήτων του ανέμου που στηρίζεται σε επί τόπου μετρήσεις σε ύψος 10 μέτρων. Από τις παραγόμενες κιλοβατώρες υπολογίζονται τα αναμενόμενα μικτά κέρδη από τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας και ύστερα από αφαίρεση του αρχικού συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας υπολογίζεται το αναμενόμενο κέρδος για κάθε ένα από τα βελτιστοποιημένα μοντέλα ανεμογεννήτριας για όλο το εξεταζόμενο φάσμα μέσων ετήσιων ταχυτήτων αναφοράς. Τέλος, μελετάται η επιρροή του διαφορετικού τύπου θεμελίωσης στο κόστος και κατά συνέπεια στο κέρδος για το κάθε μοντέλο.

Abstract

Wind Energy shows impressive growth over the last years, while the importance of protecting the environment as the energy needs of human are covered, has come to the surface. New technologies make electricity generation from the wind more economical, in contrast to the increasing cost of fossil fuel extraction.

This thesis is a continuation and extension of the methodology of the thesis "Optimal Structural Design of Wind Turbines" (Birdas Michail, November 2012) and its aim is to study the influence of the foundation to optimal design of wind turbines.

The aim of this thesis is to study the influence of the foundation to optimal design of wind turbines. The structural design is optimized, based on the cost of a tubular steel tower which supports a standard horizontal axis wind turbine in relation with its height. Then, the gain on the output power from each turbine type is examined, taking into account the cost of the tower and its foundation.

To achieve this goal, four models of the tower of the wind turbine were designed in the SAP2000 at four different heights of 80, 100, 120, 140 meters, with a different type of wind turbine Vestas V80-MW, V90-MW, V112-MW. Loads acting on the tower were applied and the foundation of every model was designed. Three types of foundation are used, compaction, surface slab and piles and two steel grades (S235 and S450). Then, the models were inserted in the Optimus programme using optimization algorithm in which the full optimization problem was stated, regarding the objective design, the design variables, default parameters and design constraints. The Optimus programme using optimization algorithm based on differential evolution method gives the optimal design based on cost.

In addition, a methodology that calculates the kilowatt per hour (kWh) generated for each level of the tower in the life cycle of a wind turbine (20 years) was developed, for a range of average annual wind speed, based on in situ measurements at a height of 10 meters. From the kWh generated, the expected gross profits from the operation of the wind turbine were calculated and after deducting the initial total cost of the wind turbine the expected profit for each of the optimized wind turbine models is calculated for the entire range of reference speeds' annual average. Finally, the impact of the different types of foundation on the cost and consequently on the profit for each model is examined.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	8
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	8
1.1.1 Μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	8
1.2 Αιολική ενέργεια.....	9
1.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αιολικής ενέργειας- ανεμογεννήτριας.....	12
1.2.2 Επιτροπή 20-20-20 και ορισμένα οφέλη.....	13
1.3 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.....	15
1.4 Σκοπός της εργασίας.....	15
2. Ανεμογεννήτριες.....	17
2.1 Τύποι ανεμογεννητριών.....	17
2.1.1 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα.....	17
2.1.2 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα.....	19
2.1.2.1 Βασικά μέρη τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.....	19
2.2 Οι ανεμογεννήτριες Vestas- Καμπύλη ισχύος (Power curve).....	21
2.2.1 Οι ανεμογεννήτριες Vestas.....	21
2.2.2 Καμπύλη ισχύος (Power curve).....	21
2.3 Πύργος της ανεμογεννήτριας.....	23
3. Απαιτήσεις-Ανάλυση σχεδιασμού πύργου.....	26
3.1 Απαιτήσεις σχεδιασμού.....	26
3.2 Ανάλυση σχεδιασμού.....	27
3.2.1 Φορτία πύργου.....	27
3.2.2 Συνδυασμοί φορτίσεων-Οριακές καταστάσεις σχεδιασμού.....	29
3.2.3 Ανάλυση συχνοτήτων.....	39
3.2.4 Ανάλυση φλαντζών συνδέσεως.....	40
3.2.5 Ανάλυση συγκολλητών συνδέσεων.....	43
4. Θεμελίωση πύργου ανεμογεννήτριας.....	44
4.1 Τύποι θεμελίωσης.....	45
4.1.1 Επιφανειακή θεμελίωση.....	45

4.1.2 Θεμελίωση με πασσάλους.....	46
4.2 Υπολογισμοί.....	47
4.2.1 Υπολογισμοί επιφανειακού πεδίου.....	47
4.2.2 Υπολογισμοί πασσάλων.....	50
4.2.2.1 Αξονική θλιπτική φόρτιση – Εγκάρσια φόρτιση.....	51
4.2.2.2 Φέρουσα ικανότητα πασσάλου.....	52
4.3 Στατικές δυσκαμψίες.....	55
5. Βέλτιστος σχεδιασμός του πύργου.....	59
5.1 Βελτιστοποίηση.....	59
5.2 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.....	60
5.2.1 Μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης.....	60
5.2.2 Εξελικτικές μέθοδοι βελτιστοποίησης (Evolutionary Algorithms).....	61
5.2.3 Η μέθοδος της Διαφορικής Εξέλιξης (Differential Evolution-DE).....	62
5.3 Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης πύργου ανεμογεννήτριας.....	64
5.3.1 Στόχος σχεδιασμού.....	64
5.3.2 Μεταβλητές σχεδιασμού.....	64
5.3.3 Καθορισμένες παράμετροι.....	64
5.3.4 Περιορισμοί.....	65
6. Εφαρμογή – Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....	67
6.1 Περιγραφή της μεθοδολογίας.....	67
6.2 Στοιχεία δεδομένων.....	70
6.2.1 Στοιχεία αιολικού δυναμικού.....	70
6.2.2 Στοιχεία για την πυκνότητα του αέρα.....	72
6.2.3 Στοιχεία ηλεκτροπαραγωγής.....	72
6.2.4 Οικονομικά στοιχεία.....	74
6.3 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....	76
6.3.1 Κόστος κατασκευής πύργου.....	76
6.3.2 Κόστος θεμελίωσης.....	80
6.3.3 Συνολικό κόστος κατασκευής.....	80
6.3.4 Καθαρό κέρδος στον Κύκλο Ζωής της ανεμογεννήτριας.....	82

7. Συμπεράσματα – Προτάσεις για επιπλέον έρευνα.....	93
7.1 Συμπεράσματα.....	93
7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	93
8. Βιβλιογραφία.....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα που απασχολεί τους ανθρώπους γενικά και τους μηχανικούς ειδικότερα, είναι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών κάθε χώρας. Καθώς προσανατολιζόμαστε προς μια πολιτική πιο ευαισθητοποιημένη περιβαλλοντικά, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) καθίστανται απαραίτητες. Συγκεκριμένα, το ενδιαφέρον για τις Α.Π.Ε. εμφανίστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 εξαιτίας της πετρελαϊκής κρίσης και παγιώθηκε την τελευταία δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Είναι γνωστό ότι τα αποθέματα στερεών καυσίμων, αργού πετρελαίου και φυσικού αερίου, υπολογίζεται πώς θα εξαντληθούν σε μερικές δεκαετίες. Εάν σε αυτό συνυπολογίσουμε και την έκλυση δισεκατομμυρίων τόνων ρύπων στην ατμόσφαιρα από την καύση των ορυκτών και συμβατικών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) καταλήγουμε ότι είναι επιτακτική για την ανθρωπότητα η στροφή στις Α.Π.Ε., ώστε να απεξαρτοποιηθεί η παραγωγή ενέργειας από τους εξαντλήσιμους ενεργειακούς πόρους.

Αρχικά, οι εγκαταστάσεις των Α.Π.Ε. αποτελούσαν πειραματικές εφαρμογές και είχαν ιδιαίτερα υψηλό κόστος. Η αύξηση της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος τους, όμως, έχει επιφέρει συνεχή βελτίωση των εφαρμοζόμενων τεχνολογιών και μείωση του κόστους παραγωγής του τελικού προϊόντος. Ειδικά η αιολική, η υδροηλεκτρική ενέργεια και η βιομάζα ανταγωνίζονται πλέον σε μεγάλο βαθμό παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια. Τελευταία, από την Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και από πολλά μεμονωμένα κράτη, υιοθετούνται νέες πολιτικές για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που προάγουν τέτοιες εσωτερικές πολιτικές για τα κράτη μέλη. Οι Α.Π.Ε. αποτελούν τη βάση του μοντέλου οικονομικής ανάπτυξης της πράσινης οικονομίας και κεντρικό σημείο εστίασης του οικολογικού κινήματος.

1.1.1 Μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Ως *ανανεώσιμες πηγές ενέργειας* (Α.Π.Ε.) ή «*ήπιες μορφές ενέργειας*» ορίζονται οι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες, υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον και ανανεώνονται μέσω φυσικών φαινομένων μόνιμου κύκλου. Τα είδη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι :

- **Αιολική Ενέργεια** : Η κινητική ενέργεια που παράγεται από την δύναμη του ανέμου και μετατρέπεται σε απολήψιμη μηχανική ενέργεια και σε ηλεκτρική ενέργεια.
- **Ηλιακή Ενέργεια** : Αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται τόσο την θερμότητα όσο και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του ήλιου. Υπάρχουν τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα, τα παθητικά ηλιακά και υβριδικά συστήματα που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια για θέρμανση, κλιματισμό ή

φωτισμό κτιρίων, και τα φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια.

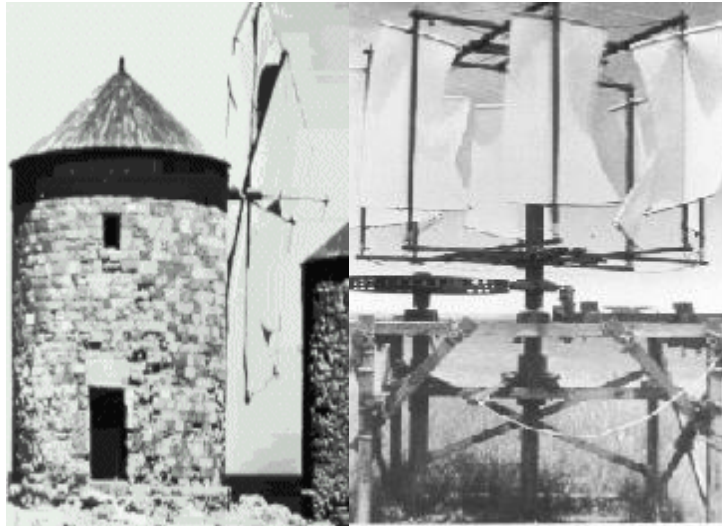
- **Υδροηλεκτρική Ενέργεια :** Εκμεταλλεύεται τις υδατοπτώσεις και τη ροή των υδάτων με κύριο στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή το σχηματισμό της σε απολήψιμη μηχανική ενέργεια.
- **Βιομάζα :** Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε απ' το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθεί πλατιά στο μέλλον.
- **Γεωθερμική Ενέργεια :** Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού.
- **Ενέργεια από τη θάλασσα :** Χωρίζεται σε 3 κατηγορίες:
 - την ενέργεια από παλίρροιες η οποία εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό.
 - την ενέργεια από κύματα η οποία προκύπτει από την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας
 - την ενέργεια από τους ωκεανούς η οποία εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων (αυτής της μορφής παραγωγή ενέργειας βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας).

1.2 Αιολική Ενέργεια

Αιολική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας, η οποία δημιουργείται από τη διαρκή κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα, ο οποίος περιβάλλει τη γη, εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας, της ανομοιογένειας του ανάγλυφου του εδάφους και της περιστροφικής κίνησης της Γης γύρω από τον άξονά της. Η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο προκαλεί την μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μία περιοχή στην άλλη, δημιουργεί δηλαδή τους ανέμους.

Ο άνεμος είναι δυνατό να περιστρέφει ανεμοτροχούς, να προωθεί ιστιοφόρα πλοία ή να κινεί αντικείμενα, η ενέργειά του δηλαδή μπορεί να καταστεί εκμεταλλεύσιμη. Η πηγή αυτής της ενέργειας είναι πρακτικά ανεξάντλητη, ανανεώνεται συνεχώς, γι' αυτό και ονομάζεται *ανανεώσιμη*. Από θερμοδυναμικής απόψεως, η ενέργεια αυτή είναι υψηλής ποιότητας και γι' αυτόν το λόγο προσφέρεται ιδιαίτερα για μετατροπή σε ηλεκτρική ή χρήσιμη μηχανική ενέργεια.

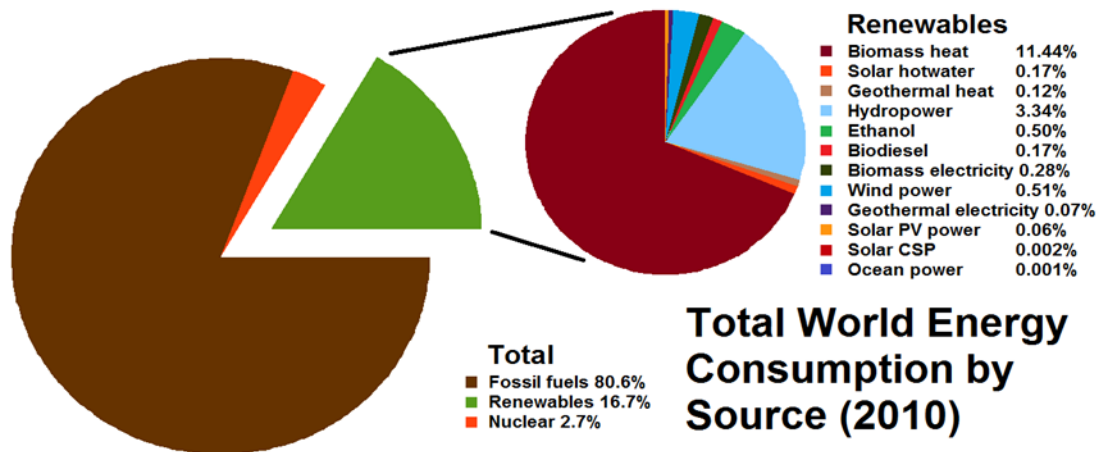
Η ενέργεια του ανέμου χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο ήδη από την αρχαιότητα. Μάλιστα, τόσο είχε εκτιμηθεί η σπουδαιότητα και η χρησιμότητα των ανέμων, ώστε ο ίδιος ο Δίας, κατά την ελληνική μυθολογία, είχε ορίσει ειδικό «διαχειριστή» των ανέμων τον Αίοιο, ο οποίος τους κατήλυε από τη μυθική νήσο του, την Αιολία. Εξάλλου, ο εγκλωβισμός των ανέμων στον ασκό του Αιόλου, κατά τον Όμηρο, δείχνει ακριβώς την ανάγκη των ανθρώπων να διαθέτουν τους ανέμους στον τόπο και το χρόνο που ήθελαν. Για πολλές εκατοντάδες χρόνια, η κίνηση των πλοίων στηριζόταν στην δύναμη του ανέμου, ενώ γινόταν εκτεταμένη χρήση του ανεμόμυλου, ως κινητήρια μηχανή, κυρίως στον αγροτικό τομέα.



Εικόνα 1.1 Ανεμόμυλος και ανεμογεννήτρια παλιάς εποχής

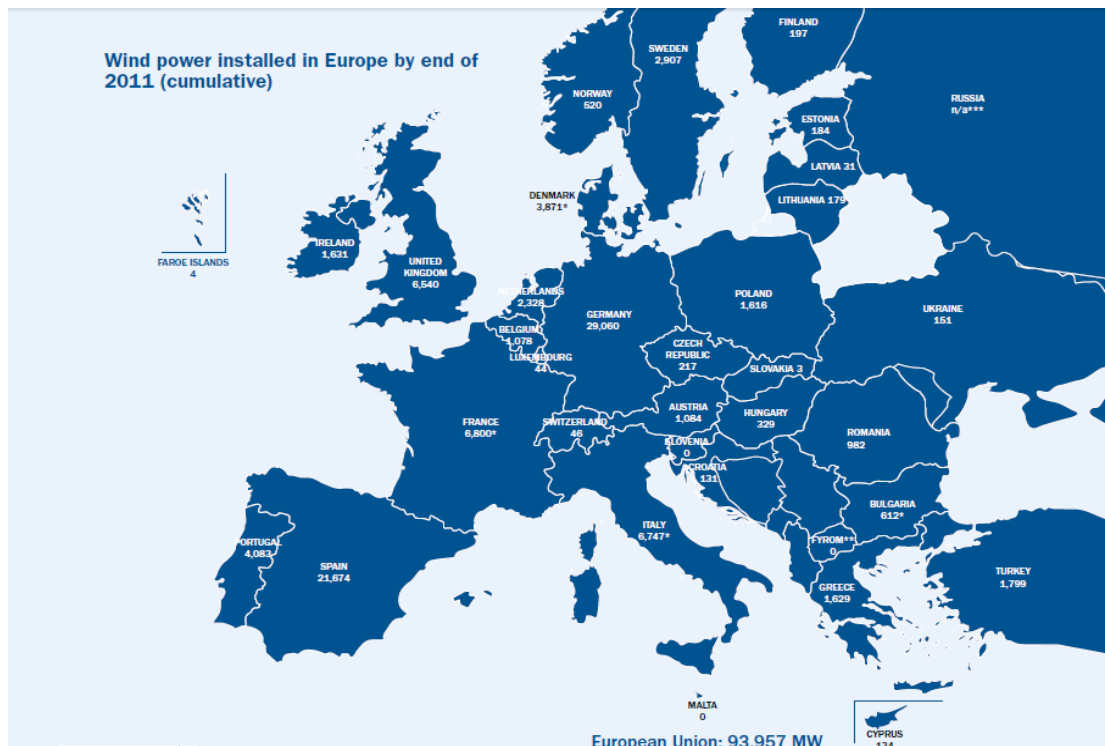
Η χρήση της όμως άρχισε να ατονεί περίπου στις αρχές του αιώνα, λόγω της εμφάνισης “άφθονων” και φθηνών ορυκτών καυσίμων. Αργότερα, το ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου, κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, εκδηλώθηκε έντονα περί τα μέσα της δεκαετίας του '70 και ήταν αποτέλεσμα της πετρελαϊκής κρίσης, που είχε εν τω μεταξύ ξεσπάσει. Από τότε, μέχρι σήμερα υπάρχει μία συνεχώς αυξανόμενη τάση για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της εκμετάλλευσης της ενέργειας του ανέμου.

Στη σημερινή εποχή η αιολική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλους μηχανισμούς και διατάξεις, τις ανεμογεννήτριες. Η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική και ακολούθως σε ηλεκτρική, μέσω των ανεμογεννητριών. Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών παρουσίασε μεγάλη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια με αντίστοιχη μείωση του κόστους παραγωγής της παραγόμενης ενέργειας. Μείωση του κόστους επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση περισσότερων ανεμογεννητριών στην ίδια τοποθεσία, οπότε σχηματίζονται τα λεγόμενα *αιολικά πάρκα*.



Εικόνα 1.2 Συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά πηγή

Εάν υπήρχε η δυνατότητα, με τη σημερινή τεχνολογία, να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της Γης εκτιμάται ότι η παραγόμενη σε ένα χρόνο ενέργεια από τον άνεμο θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια της ανθρωπότητας στο ίδιο διάστημα. Δυστυχώς, εκτιμάται πως μόνο ένα ποσοστό μεταξύ 1,5% έως 2,5% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια αερίων μαζών στην ατμόσφαιρα. Ακόμη, υπολογίζεται ότι το 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ταχύτητας πάνω από 5,1 μέτρα το δευτερόλεπτο, σε ύψος 10 μέτρων πάνω από το έδαφος. Όταν σε μία περιοχή οι άνεμοι πνέουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτήν την τιμή, τότε το αιολικό δυναμικό του τόπου θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα.



Εικόνα 1.3 Συνολική εγκατεστημένη αιολική ενέργεια στην Ευρώπη μέχρι το τέλος του 2011 [Πηγή: <http://www.ewea.org>]

Χώρα	MW	%	Χώρα	MW	%
US	35159	22	Greece	1198	0.7
China	25853	16.1	Ireland	1187	0.7
Germany	25813	16.1	Brazil	935	0.6
Spain	18784	11.7	Poland	849	0.5
India	10827	6.8	Other Asia Pacific	796	0.5
Italy	4845	3	Belgium	605	0.4
France	4775	3	Egypt	552	0.3
United Kingdom	4340	2.7	New Zealand	467	0.3
Portugal	3474	2.2	Mexico	453	0.3
Other Europe& Eurasia	3423	2.1	Other S. & Cent. America	321	0.2
Denmark	3408	2.1	Morocco	254	0.2
Canada	3321	2.1	Other Africa	208	0.1
Netherlands	2226	1.4	Costa Rica	129	0.1
Japan	2208	1.4	Finland	117	0.1
Australia	1886	1.2	Iran	91	0.1
Sweden	1537	1	Argentina	33	0

Πίνακας 1.1 Χρήση αιολικής ενέργειας, Εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW) και ποσοστό της (%) στον κόσμο (2009)

1.2.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Αιολικής Ενέργειας - Ανεμογεννητριών

Παρακάτω παρουσιάζονται περιληπτικά ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας:

Πλεονεκτήματα

- Ο άνεμος είναι ανανεώσιμος , παρέχεται δωρεάν και εξαρτάται από τον άνθρωπο αν θα τον εκμεταλλευτεί προς όφελός του.
- Η παραγωγή ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες είναι φιλική προς το περιβάλλον, καθώς δεν εκπέμπονται επικίνδυνοι αέριοι ρύποι ,όπως συμβαίνει κατά την καύση ορυκτών καυσίμων στους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Κάθε εγκατεστημένο MW αιολικής ενέργειας αποσοβεί την έκλυση 3-3.5 χιλιάδων τόνων διοξειδίου του άνθρακα ετησίως. Η λειτουργία ενός τυπικού αιολικού πάρκου, ισχύος 10 MW προσφέρει ετήσια την ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζονται 4,000 οικογένειες.
- Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας συμβάλλει στην ενεργειακή ανεξαρτησία των χωρών και επίσης στην τοπική ανάπτυξη. Οι ανεμογεννήτριες διατίθενται σε ποικιλία μεγεθών, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες ενεργειακές ανάγκες, από μεμονωμένα νοικοκυριά έως επιχειρήσεις ιδιωτικές ή δημόσιες.
- Οι ανεμογεννήτριες καταλαμβάνουν μία μικρή περιοχή για την βάση τους και επομένως δεν εμποδίζουν την χρήση της γης για άλλους σκοπούς, όπως η γεωργία.

- Με τις νέες τεχνολογίες που συνεχώς αναπτύσσονται η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται πιο αποτελεσματική, μειώνεται το κόστος κατασκευής και λειτουργίας, οπότε και η τιμή της κιλοβατώρας γίνεται πιο χαμηλή. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την ολοένα αυξανόμενη τιμή των ορυκτών καυσίμων λόγω εξάντλησης των αποθεμάτων τους.

Μειονεκτήματα

- Ο άνεμος δεν είναι συνεχής ούτε σταθερός σε ένταση, επομένως οι ανεμογεννήτριες δεν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια σε μόνιμη βάση και σε ίδια ποσότητα. Επίσης, η αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας σε μπαταρίες ή με άλλες μεθόδους δεν είναι ακόμα αρκετά αναπτυγμένη.
- Από το σύνολο της απορροφούμενης αιολικής ενέργειας από μία ανεμογεννήτρια, μόνο ένα περιορισμένο μέρος της μετατρέπεται σε ωφέλιμη ενέργεια λόγω των αεροδυναμικών και των μηχανικών απωλειών και περιορισμών. Οι ανεμογεννήτριες κατά μέσο όρο παράγουν λιγότερη ενέργεια απ' ό τι ένας συμβατικός σταθμός παραγωγής ενέργειας, οπότε απαιτούνται πολλαπλές ανεμογεννήτριες για το ίδιο αποτέλεσμα.
- Είναι αναγκαία η ανάπτυξη δικτύου μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα αιολικά πάρκα καθώς αυτά είναι συνήθως απομακρυσμένα από τα αστικά κέντρα.
- Η ηχορρύπανση που προκαλείται από μία ανεμογεννήτρια μπορεί να είναι παρόμοια με ένα μικρό κινητήριο τζετ, οπότε είναι λογικές οι διαμαρτυρίες των κατοίκων που ζουν λίγα μέτρα μακριά από αυτή. Βέβαια, τα επίπεδα της ηχορρύπανσης μειώνονται με την εξέλιξη της τεχνολογίας.
- Η επίπτωση στην αισθητική του φυσικού τοπίου, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η πρόσκρουση των πουλιών πάνω στις ανεμογεννήτριες είναι μερικοί ακόμα λόγοι προβληματισμού των πολιτών απέναντι στις ανεμογεννήτριες, οι οποίοι όμως είναι δυνατό να περιορισθούν με περεταίρω έρευνα και μελέτη.

1.2.2 Επιτροπή 20-20-20 και ορισμένα οφέλη

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει την Επιτροπή 20-20-20 και για το σύνολο των Κρατών-Μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέχρι το 2020, προβλέπεται:

- α) 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 σύμφωνα με την Οδηγία 2009/29/EK,
- β) 20% διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/EK και
- γ) 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας.

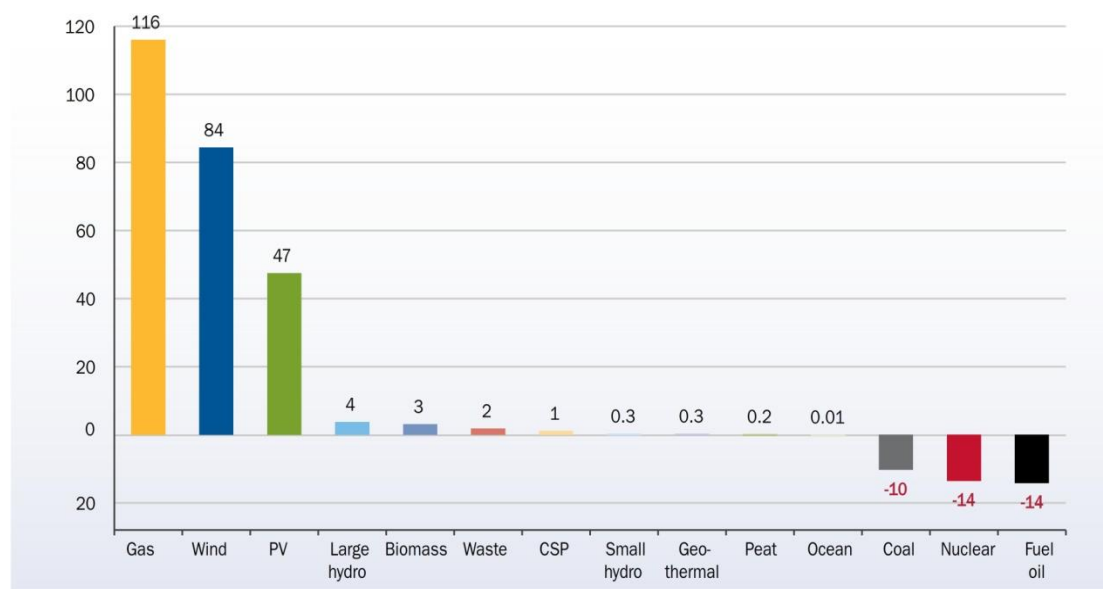
Ειδικά για την Ελλάδα, ο στόχος για τις εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου είναι μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005 και 18% διείσδυση των Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση. Η επιδιωκόμενη αναλογία εγκατεστημένης ισχύος ανά τεχνολογία Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.) και κατηγορία παραγωγού και η κατανομή της στο χρόνο καθορίζονται στον ακόλουθο πίνακα, με χρονικό ορίζοντα τα έτη 2014 και 2020 :

	2014	2020
Υδροηλεκτρικά	3700	4650
<i>Μικρά (0-15MW)</i>	300	350
<i>Μεγάλα (>15MW)</i>	3400	4300
Φωτοβολταϊκά	1500	2200
<i>Εγκαταστάσεις από επαγγελματίες αγρότες της περίπτωσης (β) της παρ.6 του άρθ.15 του ν.3851/2010</i>	500	750
<i>Λοιπές Εγκαταστάσεις</i>	1000	1450
Ηλιοθερμικά	120	250
Αιολικά (περιλαμβανομένων θαλασσιών)	4000	7500
Βιομάζα	200	350

Πίνακας 1.2 Όρια εγκατεστημένης ισχύος (MW) ανά τεχνολογία Α.Π.Ε. και κατηγορία παραγωγού

NET ELECTRICITY GENERATING INSTALLATIONS IN EU 2000-2011 IN GW

FIGURE 2.2



Εικόνα 1.4 Καινούργιες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος στην ΕΕ την περίοδο 2000-2011

Σύμφωνα με την EWEA (European Wind Energy Association), 15,1 θέσεις εργασίας δημιουργήθηκαν στην ΕΕ για κάθε εγκατεστημένο MW. Επιπρόσθετα, 0,4 θέσεις εργασίας δημιουργούνται ανά εγκατεστημένο MW από την λειτουργία, τη συντήρηση και τις παράπλευρες δραστηριότητες. Περίπου οι μισές από αυτές τις θέσεις εργασίας σχετίζονται με την κατασκευή της ανεμογεννήτριας και των συνοδευτικών της.

Τα 84 GW της αιολικής ενέργειας που έχουν εγκατασταθεί μέχρι τα τέλη του 2010 στην ΕΕ, αποφεύγουν την εκπομπή 119 εκατομμυρίων τόνων CO₂. Επιπλέον, η αναμενόμενη επένδυση των € 192 δισεκατομμυρίων στην αιολική ενέργεια την περίοδο 2011 - 2020 θα αποφύγει € 85 δισεκατομμύρια σε αξία του κόστους εκπομπής CO₂ κατά τη διάρκεια της ίδιας περιόδου.

Η Ευρώπη εισάγει σήμερα περισσότερο από το ήμισυ της ενέργειας της, ποσοστό που αναμένεται να φτάσει το 70% μέσα στα επόμενα 20 με 30 χρόνια. Η εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας μέχρι το τέλος του 2010 ήταν, σε ένα σύνηθες έτος ανέμου, ίση με το

5,3% της ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Από το 2011 - 2020 η αιολική ενέργεια θα αποφύγει € 138 δισεκατομμύρια σε κόστος ορυκτών καυσίμων.

1.3 Η Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι μια χώρα που διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό και η αιολική ενέργεια μπορεί να γίνει σημαντικός μοχλός ανάπτυξής της. Από τις πλέον πρόσφορες περιοχές για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι οι παράλιες περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας και κυρίως τα νησιά του Αιγαίου, στα οποία πνέουν ισχυροί άνεμοι. Ενέργειες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχουν γίνει σε ολόκληρη τη χώρα, ενώ στο γεγονός αυτό έχει συμβάλλει και η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις ΑΠΕ, η οποία ενθαρρύνει και επιδοτεί επενδύσεις στις ήπιες μορφές ενέργειας. Σε εθνική κλίμακα, ο νέος αναπτυξιακός νόμος 3299/04, σε συνδυασμό με το νόμο για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας 3468/06, παρέχει ισχυρότητα κίνητρα ακόμα και για επενδύσεις μικρής κλίμακας. Οι πρώτες δραστηριότητες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα άρχισαν το 1975, με την πραγματοποίηση από τη ΔΕΗ μετρήσεων των ανεμολογικών στοιχείων σε πολλές περιοχές της χώρας. Από τα στοιχεία αυτά προέκυψε ότι η Ελλάδα διαθέτει ορισμένες από τις καλύτερες θέσεις παγκοσμίως για την εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου. Έτσι, από το 1982, οπότε και εγκαταστάθηκε το πρώτο αιολικό πάρκο στην Κύθνο, έως σήμερα αιολικά πάρκα έχουν κατασκευαστεί σε Άνδρο, Νάξο, Εύβοια, Λήμνο, Σαμοθράκη, Λέσβο, Χίο, Σάμο, Κεφαλλονιά, Κάρπαθο, Κω, Ρόδο και Κρήτη.



Εικόνα 1.5 Αιολικό πάρκο στο Ημεροβίγλι Κεφαλλονιάς και στο όρος Όχη της Νότιας Εύβοιας

1.4 Σκοπός-Δομή της εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο βέλτιστος δομικός σχεδιασμός με βάση το κόστος ενός χαλύβδινου σωληνοειδούς πύργου στον οποίο στηρίζεται μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα, συναρτήσει του ύψους και του τύπου θεμελίωσής του. Εξετάζεται η επιρροή του τύπου της θεμελίωσης στο δομικό σχεδιασμό του πύργου της ανεμογεννήτριας.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ειδικά για την αιολική ενέργεια. Καταγράφονται θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά της αιολικής ενέργειας και της εκμετάλλευσής της με τη χρήση ανεμογεννητριών.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται τα είδη των ανεμογεννητριών και παρουσιάζονται τα μοντέλα της Vestas τα οποία χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Σημειώνονται, ακόμα, τα είδη των πύργων που στηρίζουν την ανεμογεννήτρια.

Στο Κεφάλαιο 3 δίνονται οι απαιτήσεις σχεδιασμού του πύργου της ανεμογεννήτριας. Επιπρόσθετα αναλύεται ο σχεδιασμός του πύργου με βάση τους Ευρωκώδικες.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι τύποι θεμελίωσης του πύργου της ανεμογεννήτριας και αναφέρονται οι εξισώσεις υπολογισμού για τον σχεδιασμό τους.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένα θεωρητικά στοιχεία για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, καταγράφονται οι κατηγορίες και οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι. Τέλος, διατυπώνεται το μαθηματικό πρόβλημα της βελτιστοποίησης, όπως θα περαστεί στη συνέχεια στο υπολογιστικό πρόγραμμα.

Στο Κεφάλαιο 6 καταγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της βελτιστοποίησης των μοντέλων.

Στο Κεφάλαιο 7 δίνονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Ανεμογεννήτρια ονομάζεται η μηχανή που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την αιολική. Θεωρείται η εξέλιξη του ανεμόμυλου με την συμβολή της ανάπτυξης της τεχνολογίας. Σήμερα κατασκευάζονται πολλών ειδών ανεμογεννήτριες κάθετου και οριζόντιου άξονα, μικρές για φόρτιση μπαταρίας ή βοηθητικές, μεγάλες για παραγωγή εμπορικής ηλεκτρικής ενέργειας.

2.1 Τύποι ανεμογεννητριών

Κύριος διαχωρισμός γίνεται με βάση τον τρόπο που εκμεταλλεύονται τον άνεμο. Έτσι έχουμε ανεμογεννήτριες:

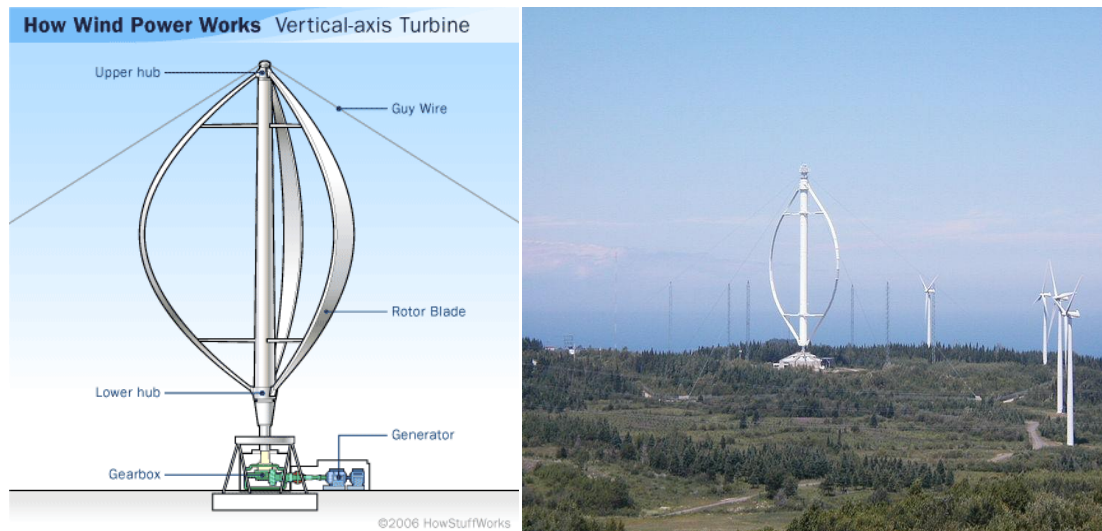
- Οριζόντιου άξονα, των οποίων ο άξονας είναι συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους
- Κατακόρυφου άξονα, των οποίων ο άξονας παραμένει σταθερός και κάθετος στην επιφάνεια του εδάφους

Άλλες κατηγορίες προκύπτουν ανάλογα με το μέγεθος και την ισχύ, τον αριθμό των πτερυγίων, την ταχύτητα περιστροφής τους. Σήμερα, κυριαρχούν αυτές οριζόντιου άξονα, με τρία πτερύγια.

2.1.1 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα

Σε αυτό τον τύπο ανεμογεννητριών η κατακόρυφη συμμετρία συνεπάγεται αυτόματο προσανατολισμό του δρομέα προς τον άνεμο. Πρόκειται για απλές κατασκευές με χαμηλό κατασκευαστικό κόστος στις οποίες η γεννήτρια και οι υπόλοιποι μηχανισμοί είναι κοντά στο έδαφος, οπότε είναι πιο εύκολη η λειτουργία και η συντήρησή τους. Έχουν, όμως, μικρή περιστροφική ταχύτητα, άρα και μικρό συντελεστή ισχύος και εκμεταλλεύονται μικρές ταχύτητες ανέμου, αφού βρίσκονται κοντά στο έδαφος. Ακόμη, συχνά απαιτείται υποβοήθηση για να ξεκινήσουν, ενώ σε πολύ δυνατό άνεμο μπορεί να καταστραφούν αν δεν ελεγχθούν σωστά. Οι δύο πιο γνωστοί τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι οι μηχανές Darrieus και Savonius, οι οποίες εφευρέθηκαν τις δεκαετίες '20 και '30 αντίστοιχα:

- Οι τύπου *Darrieus* διαθέτουν δύο κάθετα προσανατολισμένες λεπίδες που περιστρέφονται γύρω από ένα κατακόρυφο άξονα. Αυτός ο τύπος συνδυάζει υψηλή ταχύτητα με χαμηλή μηχανική ροπή και είναι κατάλληλος για την παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Γενικά, δεν μπορούν να εκκινήσουν από μόνες τους, έτσι χρησιμοποιούν κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας για να τεθούν σε λειτουργία.



Εικόνα 2.1 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα τύπου Darrieus

- Οι ανεμογεννήτριες τύπου *Savonius* ξεκινούν τη λειτουργία τους μόνο χειροκίνητα και περιστρέφονται αργά με μεγάλη μηχανική ροπή. Είναι κατασκευές σχήματος S σε κάτοψη και αποτελούνται από δύο ή περισσότερα πτερύγια με κοίλες και κυρτές επιφάνειες. Χρησιμοποιούνται σε υψηλής αξιοπιστίας, αλλά χαμηλής απόδοσης γεννήτριες ηλεκτρικής ισχύος. Αν και οι περισσότερες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν την δύναμη άνωσης από την αεροτομή των λεπίδων (πτερυγίων) του ρότορα, μια ανεμογεννήτρια τύπου Savonius χρησιμοποιεί την δύναμη αντίστασης και για αυτό τον λόγο δεν μπορεί να περιστραφεί γρηγορότερα από την ταχύτητα του ανέμου που την διαπερνάει, πράγμα που την κάνει λιγότερο αποδοτική.



Εικόνα 2.2 Ανεμογεννήτρια Κατακόρυφου Άξονα τύπου Savonius

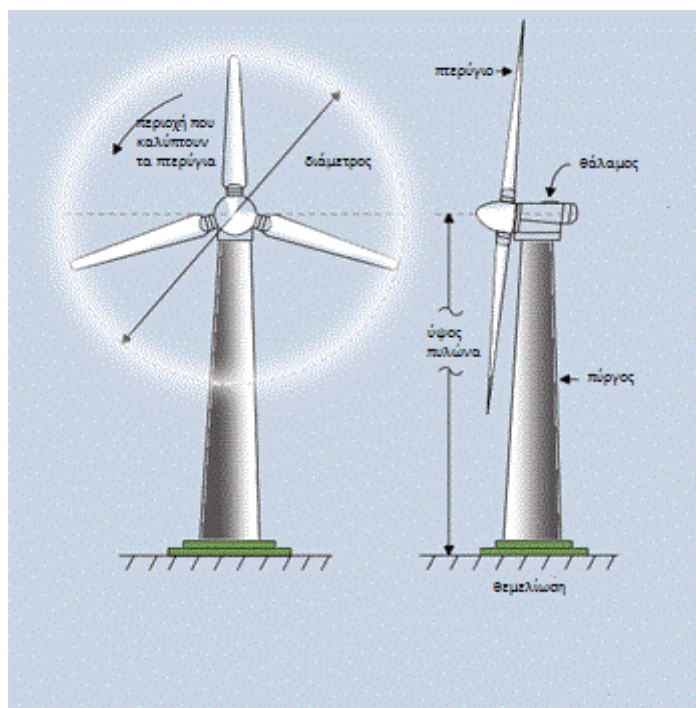
2.1.2 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα

Οι σύγχρονες αιολικές μηχανές έχουν συνήθως δύο πτερύγια και είναι οριζόντιου άξονα, ο οποίος είναι τοποθετημένος πάνω σε ένα κατακόρυφο ιστό. Ο ρότορας μπορεί να έχει μία, δύο, τρεις ή πολλές λεπίδες. Οι ρότορες με φτερωτή μιας λεπίδας χρειάζονται αντίβαρο στο άλλο μέρος του άξονα για τον περιορισμό των δονήσεων. Αυτός ο τύπος δεν είναι πρακτικός εκεί που επικρατεί ψύχος, γιατί μπορεί να σχηματιστεί πάγος στο ρότορα, οπότε παύει να είναι ζυγοσταθμισμένος. Οι ρότορες με δύο λεπίδες είναι πιο δημοφιλείς, γιατί είναι ανθεκτικοί και πιο φθηνοί να κατασκευαστούν. Ο ρότορας με τρεις λεπίδες διανέμει πιο ομοιόμορφα τις καταπονήσεις, ειδικότερα όταν ο άνεμος αλλάζει κατεύθυνση.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τοποθετημένους στην κορυφή του πύργου την κύρια άτρακτο που περιέχει την ηλεκτρογεννήτρια, καθώς και τον ρότορα ο οποίος πρέπει να είναι πάντα προσανατολισμένος προς την φορά που φυσάει ο άνεμος. Οι μικρές ανεμογεννήτριες προσανατολίζονται από ένα απλό ανεμοδείκτη, ενώ οι μεγάλες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν ένα αισθητήρα ανέμου σε συνδυασμό με ένα μηχανισμό περιστροφής του ρότορα. Ανάλογα με το αν ο άνεμος συναντά πρώτα τον δρομέα ή τον θάλαμο με τη γεννήτρια διακρίνονται σε ανεμογεννήτριες ανάντη (up-wind) και κατάντη (down-wind) της ροής αντίστοιχα.

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν ένα κιβώτιο ταχυτήτων, το οποίο μετατρέπει την αργή περιστροφή των λεπίδων του ρότορα σε μια ταχύτερη περιστροφή, ώστε την κάνει πιο αποδοτική. Τα πτερύγια κατασκευάζονται δύσκαμπτα έτσι ώστε να είναι πιο δύσκολο να ωθούνται πάνω στον πύργο σε περίπτωση ισχυρών ανέμων. Επιπροσθέτως, τα πτερύγια τοποθετούνται σε μία σημαντική απόσταση μπροστά από τον πύργο και πολλές φορές με μια μικρή κλίση προς την φορά του ανέμου.

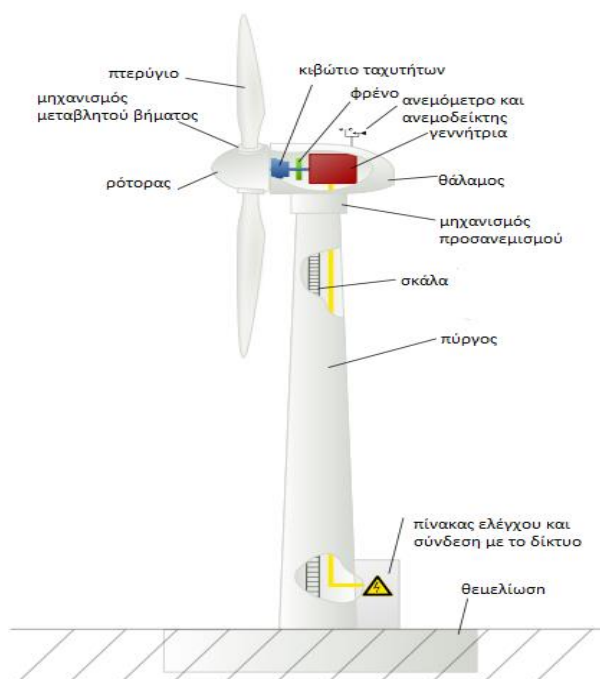
2.1.2.1 Βασικά μέρη τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα



Εικόνα 2.3 Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Συνοπτικά μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Πύργος (tower): στηρίζει όλη την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση, μεταφέρει τα φορτία από το θάλαμο στη θεμελίωση και είναι συνήθως χαλύβδινος σωληνωτής μορφής. Όσο ψηλότερος είναι, τόσο περισσότερη ενέργεια είναι δυνατό να παραχθεί, αφού ψηλότερα υπάρχει καλύτερο αιολικό δυναμικό και μικρότερη επιρροή των εμποδίων του εδάφους (κτίρια, δέντρα).
- Ρότορας (rotor): είναι το σύστημα πτερυγίων και κεφαλής του ρότορα, περιστρέφεται γύρω από τον κεντρικό άξονα που είναι κατασκευασμένος από ενισχυμένο και σκληρυμένο χάλυβα. Τα πτερύγια σχεδιάζονται για βέλτιστη απόδοση, ελαχιστοποίηση του θορύβου και της αντανάκλασης του φωτός. Κάθε πτερύγιο έχει ένα σύστημα προστασίας από κεραυνούς που αποτελείται από υποδοχείς κεραυνού στην άκρη του και έναν χάλκινο συρμάτινο αγωγό στο εσωτερικό του πτερυγίου.
- Θάλαμος (nacelle): περιέχει τα μηχανικά υποσυστήματα και τον εξοπλισμό, όπως τη γεννήτρια (generator), το κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox), το φρένο (brake system), τους άξονες υψηλής και χαμηλής ταχύτητας, τη μονάδα ψύξης και κλιματισμού, το ανεμόμετρο, το μηχανισμό περιστροφής προσανεμισμού (yaw system) και το υδραυλικό σύστημα ελέγχου της γωνίας των πτερυγίων. Τοποθετείται στην κορυφή του πύργου και κατασκευάζεται συνήθως από fiberglass. Ένα άνοιγμα στο δάπεδο παρέχει πρόσβαση στο θάλαμο από τον πύργο. Το τμήμα της οροφής είναι εξοπλισμένο με φεγγίτες, οι οποίοι μπορούν να ανοιχθούν για πρόσβαση στην οροφή και στους αισθητήρες του ανέμου.
- Πίνακας ελέγχου: συνήθως βρίσκεται στη βάση του πύργου και παρακολουθεί κι ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας με σκοπό την ορθή λειτουργία της.
- Θεμελίωση : είναι η κατασκευή η οποία μεταφέρει τα φορτία στο έδαφος. Το είδος της εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους στο οποίο θα τοποθετηθεί ο πύργος και μπορεί να είναι επιφανειακή ή με πασσάλους.



Εικόνα 2.4 Στοιχεία ανεμογεννήτριας

2.2 Οι ανεμογεννήτριες Vestas- Καμπύλη ισχύος

2.2.1 Οι ανεμογεννήτριες Vestas

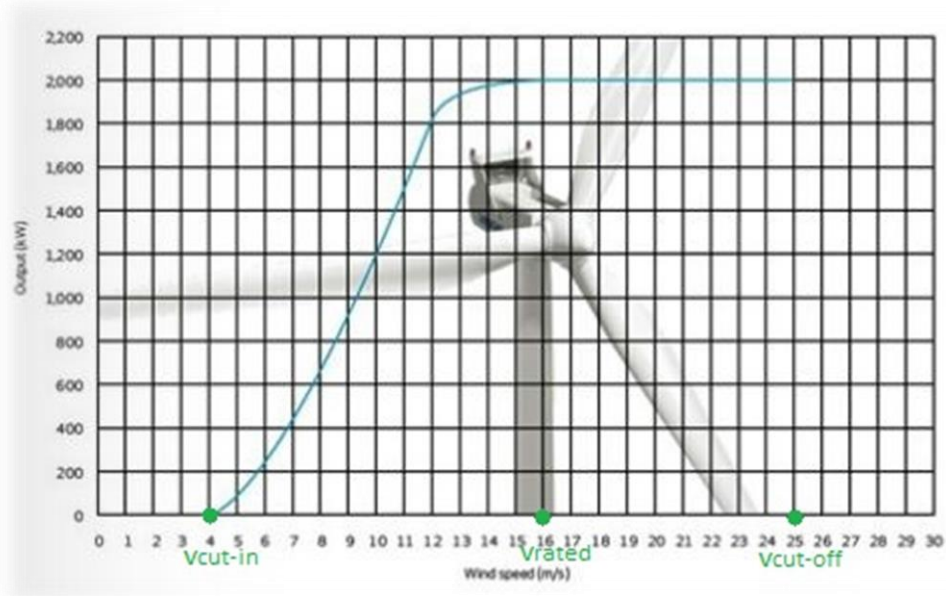
Τα μοντέλα Vestas V80-2MW, V90-3MW, V112-3MW έχουν ρότορα διαμέτρου 80, 90, 112 μέτρων αντίστοιχα, με ενεργό μηχανισμό προσανατολισμού. Αποτελούνται από τρία πτερύγια και είναι εξοπλισμένα με το σύστημα OptiTip το οποίο τοποθετείται στην πλήμνη, στην κωνική μύτη του θαλάμου. Πρόκειται για ένα ειδικό σύστημα της εταιρίας ελέγχου βήματος των πτερυγίων (pitch control). Τα πτερύγια μπορούν να περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονά τους, ώστε πάντοτε να έχουν τη βέλτιστη γωνία προς τον άνεμο ανάλογα με τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες. Αυτό, σε συνδυασμό με το σύστημα OptiSpeed, το οποίο επιτρέπει στο ρότορα να λειτουργεί σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής (RPM) οδηγούν στη βέλτιστη παραγωγή ενέργειας και στη μείωση των επιπέδων του θορύβου που δημιουργείται.

2.2.2 Καμπύλη ισχύος (Power curve)

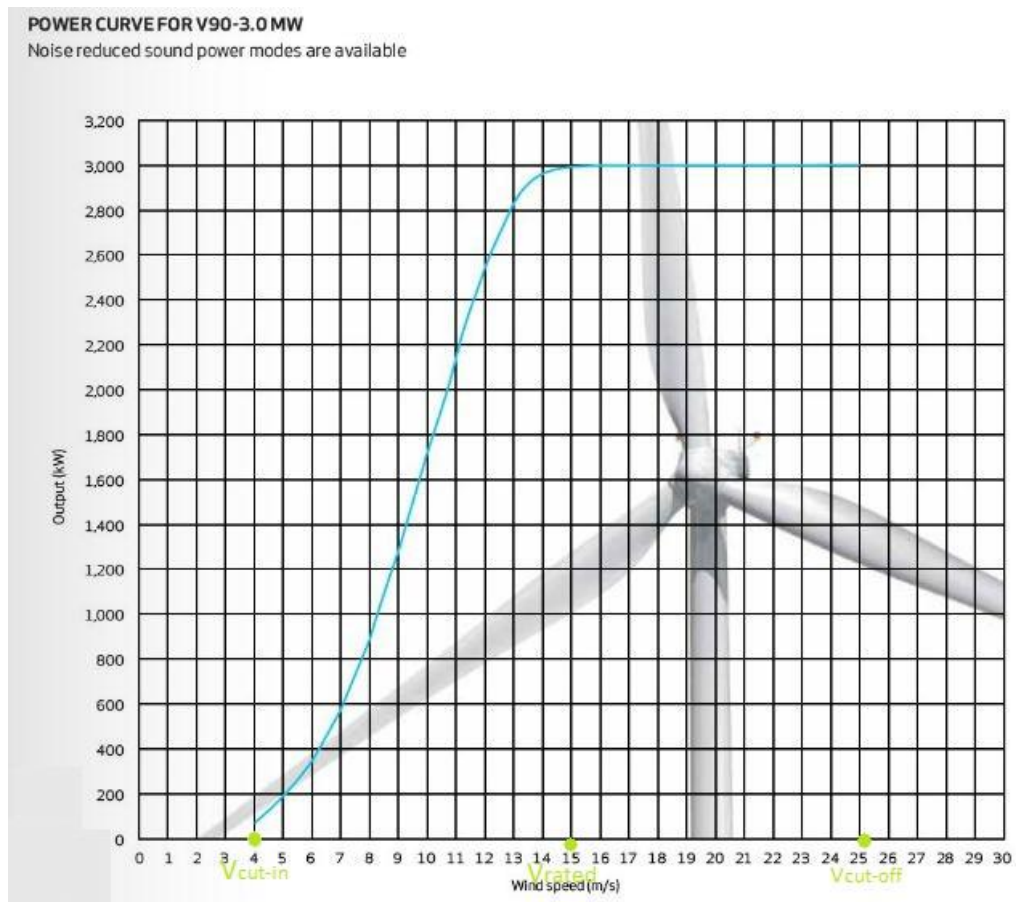
Η καμπύλη ισχύος παρουσιάζει την σχέση της παραγόμενης ισχύος σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου. Η σχέση αυτή εξαρτάται από τη διάμετρο και την αεροδυναμική ποιότητα των πτερυγίων, την πυκνότητα του αέρα και από τη μηχανική απόδοση της γεννήτριας. Η κατασκευάστρια εταιρία παρέχει την καμπύλη ισχύος κάθε ανεμογεννήτριας η οποία είναι μοναδική για κάθε μοντέλο και σε ορισμένες περιπτώσεις μοναδική για συγκεκριμένη τοποθεσία.

Η καμπύλη χωρίζεται σε 4 περιοχές. Από αυτές, η ανεμογεννήτρια παράγει και παρέχει ισχύ μόνο στο εύρος των ταχυτήτων του ανέμου που καθορίζονται από τις περιοχές 2 και 3. Στην περιοχή 1 (κάτω από την ταχύτητα εκκίνησης) δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια στον άνεμο, ώστε να παραχθεί εκμεταλλεύσιμη ισχύς. Στην περιοχή 4 (πέρα από την ταχύτητα διακοπής) η παραγόμενη ισχύς διατηρείται σταθερή ή αρχίζει να μειώνεται, ενώ σε πολύ δυνατούς ανέμους μπορεί και να διακόπτεται η λειτουργία της για να αποτραπεί κάποια ζημιά σε αυτή. Τότε, οι άνεμοι είναι πάρα πολύ δυναμικοί για να δικαιολογηθεί η πρόσθετη δομική αντοχή και το επιπλέον κόστος σχετικά με το μικρό αριθμό ωρών ανά έτος κατά τις οποίες παρατηρούνται ταχύτητες ανέμου εντός της περιοχής 4. Γενικά, οι περισσότερες ανεμογεννήτριες αρχίζουν την παραγωγή ενέργειας σε ταχύτητα ανέμου 4m/s (9mph), πετυχαίνουν μέγιστη απόδοση σε ταχύτητα 13m/s (29 mph) και διακόπτουν τη λειτουργία τους σε ταχύτητα 25 m/s (56mph). Αξιοσημείωτο είναι ότι κατά μέσο όρο λειτουργεί 35% από την ολική της ικανότητα σ' ένα χρόνο, εξ αιτίας της συνεχούς αλλαγής του ανέμου.

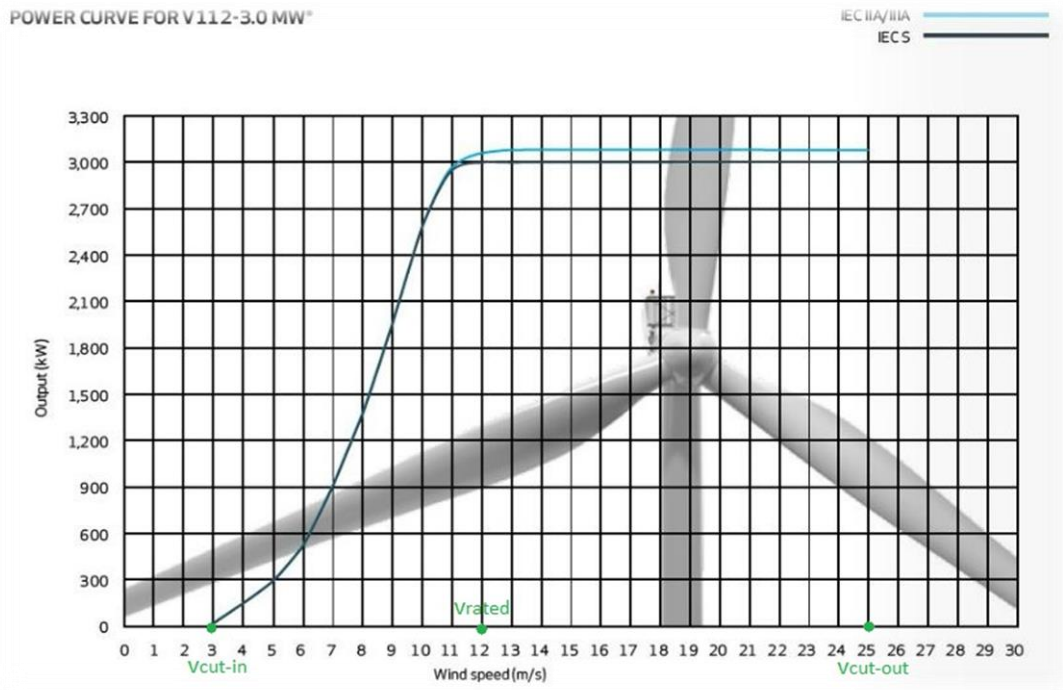
Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες ισχύος των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα μας.



Εικόνα 2.5 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας V80-2MW



Εικόνα 2.6 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας V90-3MW



Εικόνα 2.7 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας V112-3MW

2.3 Πύργος Ανεμογεννήτριας

Ο πύργος μπορεί να κατασκευαστεί από διάφορα υλικά και υπάρχουν διάφορες μορφές που μπορούμε να συναντήσουμε. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το σπλισμένο σκυρόδεμα, ο χάλυβας και ο συνδυασμός τους. Σχετικά με τη μορφή του σημειώνονται οι εξής: μονοπολική διάταξη σωλήνα (tubular), δικτυωτός (lattice), τριποδική διάταξη σωλήνων (three-legged), μονοπολική διάταξη με αντιστήριξη καλωδίων (guy-wired pole tower).



Εικόνα 2.8 Διαφορετικοί σχεδιασμοί πύργων ανεμογεννήτριας

Δικτυωτός πύργος (lattice tower)

Οι δικτυωτοί πύργοι χρησιμοποιήθηκαν πολύ κατά το παρελθόν, όπου οι ανεμογεννήτριες ήταν πιο μικρές σε μέγεθος (λιγότερο από 1 MW), αλλά χρησιμοποιούνται πλέον σπάνια. Το μεγαλύτερο τους μειονέκτημα είναι το κακό οπτικά και αισθητικά αντίκτυπο, καθώς επίσης και μεγαλύτερο κατασκευαστικό κόστος στο εργοτάξιο και κόστος συντήρησης. Αντίθετα είναι σαφές ότι είναι ελαφρύτερη από οποιαδήποτε άλλη διάταξη σχεδιασμού, χρησιμοποιώντας λιγότερο υλικό, περίπου ίσο με 50% του υλικού ενός μονοπολικού σωληνοειδούς πύργου. Επίσης δημιουργούν λιγότερες αναταράξεις αέρα καθώς είναι διαπερατές. Η φυσική σημασία αυτής της εξοικονόμησης υλικού οφείλεται στα μεγάλα πλάτη των κάτω τμημάτων. Η ανάγκη του υλικού να παραλάβει ένταση είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το πλάτος. Με μια σωληνοειδής λεπτότοιχη κατασκευή, υπάρχει ο κίνδυνος λυγισμού, κάτι το οποίο περιορίζει τη μέγιστη διάμετρο. Ένα σχέδιο δικτυώματος δεν λυγίζει σαν ένα κέλυφος. Ο κίνδυνος λυγισμού των επιμέρους μελών περιορίζεται με εισαγωγή πολλών δοκών που δίνουν στο δικτυωτό πύργο την χαρακτηριστική εμφάνιση του.

Ο ψηλότερος δικτυωτός πύργος βρίσκεται στο Laasow (Brandenburg) στη Γερμανία, με το θάλαμο της ανεμογεννήτριας να βρίσκεται σε ύψος 160 μέτρων. Ο συγκεκριμένος πύργος έχει πλάτος στην κορυφή του ίσο με 2,9 μέτρα, ενώ στην βάση του, το πλάτος του φτάνει τα 29 μέτρα.



Εικόνα 2.9 Ο ψηλότερος δικτυωτός πύργος στο Laasow (Brandenburg)

Σωληνοειδής χαλύβδινος πύργος (tubular steel tower)

Ο μονοπολικός σωληνοειδής πύργος είναι ο τύπος του πύργου που έχει επικρατήσει και κατασκευάζεται ευρέως. Το υλικό κατασκευής του είναι ο χάλυβας. Συνήθως έχουν κολουροκωνικό σχήμα και διάμετρο που κυμαίνεται από περίπου 4,5 μέτρα στη βάση σε 2 μέτρα στην κορυφή, διαιρούμενη σε 3 ή 4 τμήματα τα οποία συναρμολογούνται στο αιολικό πάρκο (συνήθως με προεντεταμένους κοχλίες). Το μήκος ενός τμήματος μπορεί να ποικίλει από 20 έως 30 μέτρα. Βασικά κατασκευάζονται από ελάσματα φύλλων χάλυβα κομμένα, επεξεργασμένα και συγκολλημένα μεταξύ τους. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι ότι

προσομοιάζονται με απλό στατικό σύστημα προβόλου και είναι πολύ εύκολος υπολογισμός των διατομών και των ιδιοτήτων τους.

Οι νέοι πύργοι που υπερβαίνουν τα 100 μέτρα έχουν διάμετρο βάσης πάνω από 5 μέτρα το οποίο είναι πρόβλημα σε πολλές χώρες, καθώς το μέγιστο μεταφερόμενο οδικώς μέγεθος είναι μικρότερο από 4,9 μέτρα. Στο επόμενο κεφάλαιο διατυπώνεται αναλυτικά οι απαιτήσεις και η ανάλυση σχεδιασμού για τον συγκεκριμένο σχεδιασμό

Υβριδικός πύργος σκυροδέματος/χάλυβα (concrete/steel hybrid tower).

Η ιδέα πίσω από τη δημιουργία ενός υβριδικού πύργου σκυροδέματος / χάλυβα είναι η χρήση σκυροδέματος για το ευρύ κάτω μέρος και χάλυβα στο άνω μέρος του πύργου. Στο άνω μέρος σχεδιάζεται ένας συμβατικός χαλύβδινος σωληνοειδής πύργος χωρίς να υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης με τους περιορισμούς μεταφοράς, καθώς θα έχει μικρότερο ύψος και συμπερασματικά μικρότερη διάμετρο βάσης. Επίσης, καθιστά ευκολότερο το σχεδιασμό του μέρους του σκυροδέματος ώστε να πάρει τις ιδιοσυχνότητες που θέλουμε. Βέβαια υπάρχει ένα επιπλέον κόστος που πρέπει να συμπεριληφθεί που αφορά την σύνδεση του μέρους του σκυροδέματος με το μέρος του χαλύβδινου πύργου.

Μία άλλη εφαρμογή των υβριδικών πύργων σκυροδέματος/χάλυβα είναι σε περιοχές όπου το κόστος του χάλυβα είναι πολύ ψηλό (όπως για παράδειγμα στη Βραζιλία). Επιπλέον η ευκολότερη μεταφορά λόγω μικρότερων διαστάσεων των τμημάτων του πύργου μειώνει το συνολικό κόστος. Από την άλλη μεριά, το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι το αυξημένο βάρος. Υβριδικοί πύργοι χρησιμοποιούνται ευρέως από την πολυεθνική εταιρία κατασκευής ανεμογεννητριών Epercon.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΥΡΓΟΥ

Με σκοπό τον σχεδιασμό του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται ορισμένοι έλεγχοι και απαιτήσεις κανονισμών που αφορούν τις διαστάσεις, την πλαστική ροπή αντοχής, το λυγισμό, τη μετατόπιση της κορυφής του πύργου, τις φλάντζες συνδέσεως και των συγκολλήσεων.

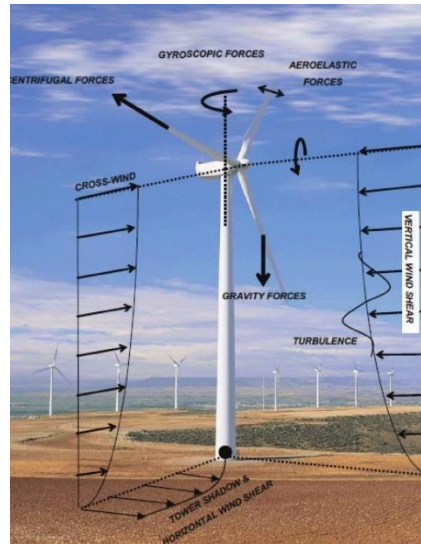
3.1 Απαιτήσεις σχεδιασμού

- ✓ Η εξωτερική διάμετρος δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 6 m και το πάχος της κυλινδρικής διατομής ορίζεται , ώστε να μπορεί να επεξεργαστεί ο χάλυβας και να πάρει την τελική του μορφή.
- ✓ Στην οριακή κατάσταση αστοχίας ελέγχονται οι μέγιστες τάσεις von- Mises σε κάθε σημείο του πύργου και συγκρίνονται με το όριο θραύσης του χάλυβα
- ✓ Ελέγχονται οι επιτρεπόμενες τάσεις στην οριακή κατάσταση λυγισμού σε κάθε σημείου του πύργου.
- ✓ Η μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση της κορυφής του πύργου τίθεται 1,00% του ύψους του πύργου, έτσι ώστε να αποφευχθεί υπερβολική κίνηση που παρεμπόδιζει την ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας.
- ✓ Για να αποφευχθεί το φαινόμενο του συντονισμού, η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα της κατασκευής πρέπει να είναι σε ασφαλή απόσταση από τις συχνότητες διέγερσης στη φάση λειτουργίας του ρότορα της ανεμογεννήτριας. Συνηθισμένες τιμές για συχνότητες λειτουργίας είναι ανάμεσα σε 0,23 με 0,52 Hz για μικρές ανεμογεννήτριες και 0,10 με 0,30 για μεγάλες ανεμογεννήτριες. Η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα του πύργου θα πρέπει να παραμείνει πάνω από την μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας μιας συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας πολλαπλασιασμένη με έναν συντελεστή, τυπικά ανάμεσα σε 1,1 και 2, έτσι ώστε να αποφευχθεί ο συντονισμός σε οποιοδήποτε σημείο κατά το διάστημα λειτουργίας.
- ✓ Η σύνδεση των τμημάτων του πύργου γίνεται μέσω κυκλικών φλαντζών μαζί με υψηλά προεντεταμένους κοχλίες (HV) και ελέγχεται η σύνδεση αυτή στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Οι προεντεταμένοι κοχλίες οφείλουν να ελεγχθούν και σε κόπωση.
- ✓ Ελέγχονται οι επιτρεπόμενες τάσεις στην οριακή κατάσταση αστοχίας σε κάθε σημείο κατά ύψος του πύργου όπου υπάρχει σύνδεση με συγκόλληση.

3.2 Ανάλυση σχεδιασμού

3.2.1 Φορτία πύργου

Τα φορτία που λαμβάνονται υπόψη είναι το βάρος του θαλάμου και του ροτόρα τα οποία ασκούνται στην κορυφή του πύργου και δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρία και το ίδιο βάρος του πύργου και ο άνεμος τα οποία υπολογίζονται.



Εικόνα 3.1 Φορτία που ασκούνται στον πύργο της ανεμογεννήτριας

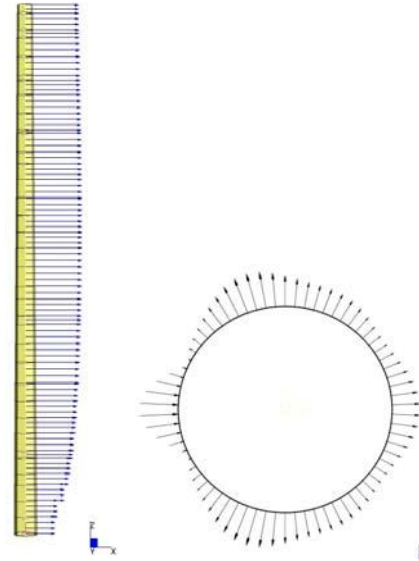
- ❖ Ίδιο βάρος πύργου : υπολογίζεται αυτόματα από το λογισμικό συναρτήσει του χάλυβα και των διαστάσεων της κατασκευής. Σημειώνεται πως είναι δυνατό να παραβλεφθεί ο βοηθητικός εξοπλισμός, όπως οι σκάλες.
- ❖ Άνεμος : σύμφωνα με τον Μπανιωτόπουλο Χ. (Topics on the design of tubular steel turbine towers) η φόρτιση του ανέμου απλοποιητικά δίνεται με τους παρακάτω τύπους :

$$z \leq 2m \quad : F_w = 0.51 \cdot D$$

$$z > 2m \quad : F_w = 0.013 \cdot \ln(20z) \cdot [(\ln(20z)+7)D]$$

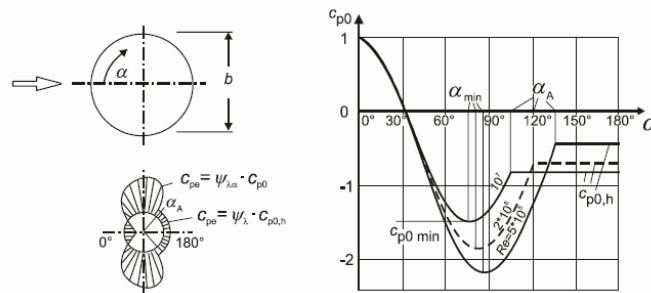
όπου z (m) το ύψος του πύργου, D (m) η εξωτερική διάμετρος της διατομής του πύργου, F_w (kN/m) πίεση του ανέμου.

Η εξωτερική διάμετρος μεταβάλλεται καθ' ύψος και είναι διαφορετική για το συνολικό ύψος (H) του κάθε μοντέλου που εξετάζεται.



Εικόνα 3.2 Κατανομή του φορτίου του ανέμου κατά ύψος και γύρω από την περιφέρεια

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1-4 η κατανομή της ανεμοπίεσης δίνεται όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



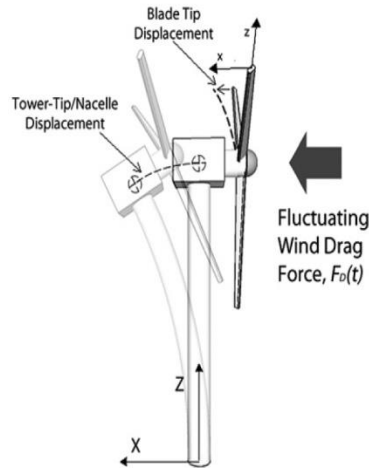
Εικόνα 3.3 Κατανομή ανεμοπίεσης γύρω από την περιφέρεια κατά ΕΚ1-4

Παράλληλα, ασκείται και μια οριζόντια συγκεντρωμένη δύναμη στην κορυφή του πύργου και δίνεται από τον παρακάτω τύπο (Nigam N, Narayanan S. Applications of random vibrations Delhi: Springer-Verlag, 1994):

$$F_D(t) = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot [V(t)]^2$$

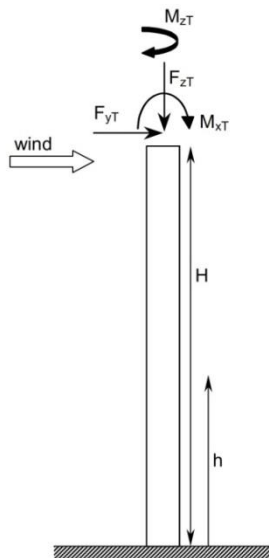
όπου C_D ο συντελεστής διαδραστικότητας, ρ πυκνότητα του αέρα, A επιφάνεια επιρροής, $V(t)$ ταχύτητα του ανέμου.

Αυτή η δύναμη δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρία και εξαρτάται από την μέση ταχύτητα του ανέμου, τις αναταράξεις στην επιφάνεια του ρότορα, την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων, την πυκνότητα του αέρα, το αεροδυναμικό σχήμα της μηχανής.



Εικόνα 3.4 Συγκεντρωμένη δύναμη στην κορυφή του πύργου $F_D(t)$

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω απλοποιημένο γραμμικό μοντέλο προβόλου με τα φορτία του, με F_{yT} οριζόντια δύναμη του ανέμου, F_{zT} κατακόρυφο ίδιο βάρος θαλάμου-ρότορα M_{xT} ροπή κάμψης λόγω ανέμου, M_{zT} ροπή συστροφής (αμελείται συνήθως) :



Εικόνα 3.5 Φορτία στην κορυφή του πύργου

3.2.2 Συνδυασμοί φορτίσεων-Οριακές καταστάσεις σχεδιασμού

Τα φορτία που ασκούνται στον πύργο είναι τα μόνιμα [G] και τα κινητά [W]. Θα εξεταστούν δύο συνδυασμοί φορτίσεων :

- a) $G+1.5 \cdot W$
- b) $G+W$

[G]: περιλαμβάνεται το ίδιο βάρος του πύργου, του ρότορα και του θαλάμου

[W]: περιλαμβάνεται η ανεμοπίεση καθ' ύψος του πύργου και η συγκεντρωμένη δύναμη στην κορυφή.

Με τον συνδυασμό (a) γίνεται έλεγχος στην οριακή κατάσταση αστοχίας (ULS) και ελέγχεται η πλαστική οριακή κατάσταση (LS1) και η οριακή κατάσταση λυγισμού (LS3), ενώ με τον συνδυασμό (b) εξετάζεται η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS) στην οποία υπολογίζεται η μέγιστη μετατόπιση στην κορυφή του πύργου.

Για πλήρη έλεγχο απαιτείται και έλεγχος στην οριακή κατάσταση κόπωσης (LS4), αλλά δεν αποτελεί μέρος της εργασίας.

Πλαστική οριακή κατάσταση (LS1)

Πλαστική οριακή κατάσταση ορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία η ικανότητα της κατασκευής να αντέξει τα φορτία που της επιβάλλονται έχει εξαντληθεί, καθώς το υλικό φτάνει στην διαρροή. Η αντοχή της κατασκευής στην πλαστική οριακή κατάσταση μπορεί να υπολογίζεται ως το πλαστικό φορτίο κατάρρευσης σε μηχανισμό που βασίζεται στην θεωρία μικρών μετατοπίσεων. Κατά τον έλεγχο αυτής της κατάστασης μπορεί να θεωρηθεί πλαστική ή μερικώς πλαστική συμπεριφορά της κατασκευής. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι η φόρτιση που μπορεί να αντέξει δεν μπορεί να αυξηθεί χωρίς σημαντική αλλαγή στην γεωμετρία της κατασκευής.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα [3-1-6,παρ.4] οι ακόλουθες μέθοδοι ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των τάσεων σχεδιασμού :

- ✓ Θεωρία μεμβρανών
- ✓ Γραμμική ελαστική ανάλυση (linear elastic analysis, LA)
- ✓ Μη γραμμική ανάλυση στο υλικό (materially nonlinear analysis, MNA)
- ✓ Μη γραμμική ανάλυση στο υλικό και στην γεωμετρία του (geometrically and materially non-linear analysis with imperfections included, GMNA)
- ✓ Χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις στα παραρτήματα A, B του Ευρωκώδικα [3-1-6]

Μολονότι οι τάσεις σχεδιασμού βασίζονται στην ελαστική ανάλυση, μπορούν ωστόσο να προβλέψουν με ακρίβεια την πλαστική οριακή κατάσταση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί, σύμφωνα με το θεώρημα κάτω ορίου, για να δώσει μια συντηρητική εκτίμηση της πλαστικής αντοχής την στιγμή της κατάρρευσης. Αυτή η εκτίμηση αντιπροσωπεύει την πλαστική κατάσταση.

Χρησιμοποιώντας την γραμμική ελαστική ανάλυση (LA) οι αξονικές τάσεις μπορούν να υπολογιστούν από τον τύπο:

$$\sigma_d = \left| \frac{Nd}{A} \right| + \left| \frac{Md}{W} \right|$$

όπου σ_d η τιμή σχεδιασμού για τις αξονικές τάσεις, N_d η τιμή σχεδιασμού για την αξονική δύναμη, A το εμβαδόν της διατομής, M_d η τιμή σχεδιασμού για την ροπή κάμψης, W η ροπή αντίστασης της διατομής

Αφού πρόκειται για σωληνοειδή τμήματα του πύργου το εμβαδόν και η ροπή αντίστασης της διατομής δίνονται αντίστοιχα από τους τύπους :

$$A = 2\pi \cdot r \cdot t \quad \text{και} \quad W = \pi \cdot r^2 \cdot t$$

όπου r και t η μέση ακτίνα και το πάχος της εγκάρσιας διατομής που εξετάζεται αντίστοιχα.

Οι διατμητικές τάσεις λόγω δυνάμεων διάτμησης υπολογίζονται ως εξής :

$$\tau_d = \frac{2 \cdot V_d}{A}$$

όπου V_d είναι η τιμή σχεδιασμού για την τέμνουσα δύναμη.

Επιπρόσθετα, διατμητικές δυνάμεις λόγω συστροφής μπορούν να υπολογιστούν από τον πρώτο τύπο του Bredt :

$$\tau_d = \frac{M_{z,d}}{2\pi \cdot r^2 \cdot t}$$

όπου $M_{z,d}$ είναι η τιμή σχεδιασμού της ροπής συστροφής, r είναι η μέση ακτίνα του κυλινδρικού τμήματος και t είναι το πάχος του κυλίνδρου.

Αν και των δύο ο λόγος μεταξύ τάσεων σχεδιασμού και αντοχής είναι μεγαλύτερος του 0,5 πρέπει να υπολογιστούν οι ισοδύναμες τάσεις. Για αυτό τον λόγο μπορεί να θεωρηθεί η κατανομή των τάσεων “ von-Mises” ως εξής :

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_x \cdot \sigma_z + \sigma_y \cdot \sigma_z + 3\tau_{xy}^2 + 3\tau_{xz}^2 + 3\tau_{yz}^2}$$

Ο υπολογιστικός τύπος για τις ισοδύναμες τάσεις σ_v μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής :

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

Οι επιτρεπόμενες τάσεις υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους :

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_y}{\gamma_M} \qquad \tau_{R,d} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M}$$

όπου $\sigma_{R,d}$ η ορθή τάση αντοχής, $\tau_{R,d}$ η διατμητική τάση αντοχής, f_y το όριο αντοχής του χάλυβα που χρησιμοποιείται και γ_M ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας του υλικού, όπως ορίζεται από τον εκάστοτε εθνικό κανονισμό.

Οριακή κατάσταση λυγισμού (LS3)

Οριακή κατάσταση λυγισμού θεωρείται η κατάσταση κατά την οποία όλη ή μέρος της κατασκευής ξαφνικά αναπτύσσει πολύ μεγάλες μετατοπίσεις κάθετα στην επιφάνεια του κελύφους, εξ αιτίας της απώλειας σταθερότητας υπό την επίδραση θλιπτικών ή διατμητικών τάσεων στο τοίχωμα του κελύφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία να αντέξει οποιαδήποτε αύξηση των συνισταμένων τάσεων, πιθανότατα προκαλώντας καταστροφική βλάβη.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα [3-1-6,παρ.4.1.3] οι ακόλουθες μέθοδοι ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των τάσεων σχεδιασμού κατά των έλεγχο της LS3:

- ✓ Θεωρία μεμβρανών για αξονοσυμμετρικές καταστάσεις μόνο
- ✓ Γραμμική ελαστική ανάλυση (linear elastic analysis, LA), που δίνει την ελάχιστη απαίτηση για τις τάσεις σχεδιασμού, κάτω από γενικές συνθήκες φόρτισης
- ✓ Γραμμική ελαστική ανάλυση με διχοτόμηση (linear elastic bifurcation analysis, LBA), που απαιτείται για κελύφη κάτω από γενικές συνθήκες φόρτισης όταν χρησιμοποιείται το κριτήριο της κρίσιμης αντοχής λυγισμού
- ✓ Μη γραμμική ανάλυση υλικού (materially nonlinear analysis, MNA), που απαιτείται για κελύφη κάτω από γενικές συνθήκες φόρτισης αν χρησιμοποιείται το κριτήριο της πλαστικής αντοχής.
- ✓ GMNIA (geometrically and materially non-linear analysis with imperfections included) μαζί με MNA, LBA και GMNA, συμπεριλαμβάνοντας ατέλειες και βαθμονομημένους συντελεστές
- ✓ Μέσω απευθείας εκφράσεων του παραρτήματος Α του Ευρωκώδικα[3-1-6]

Επειδή η στερεότητα στην οριακή κατάσταση λυγισμού LS3 εξαρτάται έντονα από την ποιότητα της κατασκευής, η αξιολόγηση της αντοχής πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις συναφείς απαιτήσεις στα όρια ανοχής της παραγωγής του υλικού και της κατασκευής. Για το λόγο αυτό ο Ευρωκώδικας [3-1-6] προτείνει τρεις κατηγορίες ποιότητας κατασκευής στην παραγωγή :

Κατηγορία Α : Εξαιρετική

Κατηγορία Β : Υψηλή

Κατηγορία Γ : Κανονική

Σύμφωνα με αυτές τις κατηγορίες ποιότητας κατασκευής προτείνεται από τον Ευρωκώδικα [3-1-6,παρ.8.4] να λαμβάνονται κατά την ανάλυση στην LS3 τρεις κύριες περιπτώσεις ατελειών :

a) Μη στρογγυλότητα διατομής

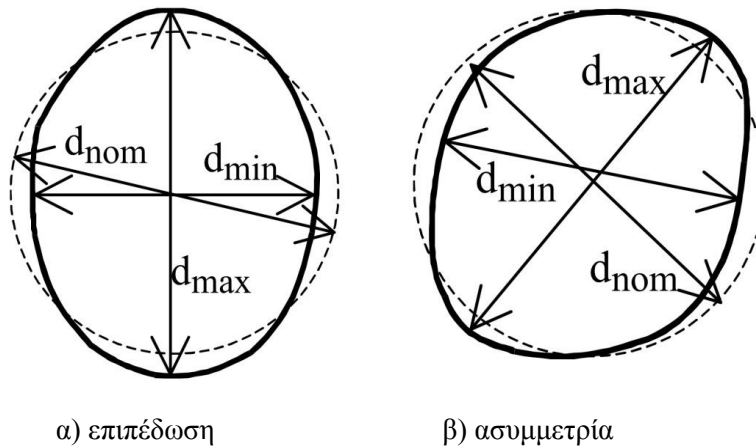
Η εκτός στρογγυλότητας ανοχή θα πρέπει να αξιολογείται μέσω της παραμέτρου U_r (Εικόνα 3.6) που υπολογίζεται από τον τύπο :

$$U_r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}}$$

όπου : d_{\max} η μέγιστη μετρούμενη εσωτερική διάμετρος

d_{\min} η ελάχιστη μετρούμενη εσωτερική διάμετρος

d_{nom} η ονομαστική εσωτερική διάμετρος



Εικόνα 3.6 Μέτρηση των διαμέτρων για την αξιολόγηση της μη στρογγυλότητας

Η παράμετρος U_r θα πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη :

$$U_r \leq U_{r,max}$$

όπου $U_{r,max}$ η παράμετρος ανοχής για τη σχετική κατηγορία ποιότητας κατασκευής όπως δίνεται στον Πίνακα 3.1 από τον Ευρωκώδικα[3-1-6,παρ.8.4.2,πιν.8.1] :

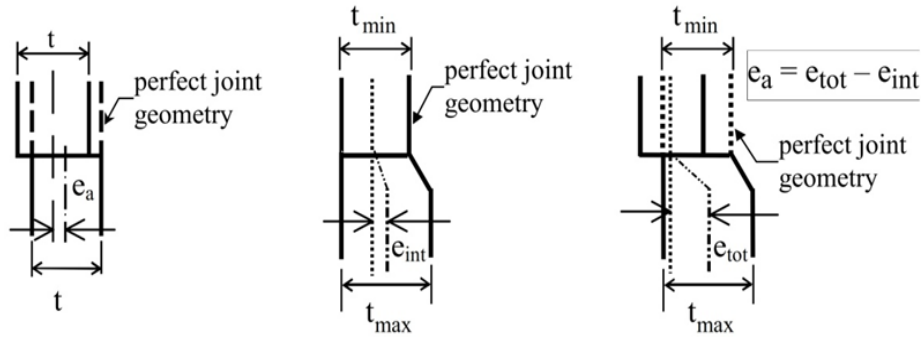
	Diameter range	$d \leq 0,50m$	$0,50m < d < 1,25m$	$1,25m \leq d$
Fabrication tolerance quality class	Description	Value of $U_{r,max}$		
Class A	Excellent	0,014	$0,007 + 0,0093(1,25-d)$	0,007
Class B	High	0,020	$0,010 + 0,0133(1,25-d)$	0,010
Class C	Normal	0,030	$0,015 + 0,0200(1,25-d)$	0,015

Πίνακας 3.1 Τιμές της παραμέτρου ανοχής για μη στρογγυλότητα $U_{r,max}$

b) Τυχαία εκκεντρότητα συνδέσεων

Στις συνδέσεις των τοιχωμάτων του κελύφους, που είναι κάθετες στις θλιπτικές δυνάμεις, η τυχαία εκκεντρότητα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.7 θα πρέπει να υπολογίζεται από την μετρήσιμη συνολική εκκεντρότητα, e_{tot} , και την προβλεπόμενη αντιστάθμιση, e_{int} , από τον τύπο :

$$e_a = e_{tot} - e_{int}$$



Εικόνα 3.7 Τυχαία εκκεντρότητα και προβλεπόμενη αντιστάθμιση σε μια σύνδεση

Η τυχαία εκκεντρότητα, e_a , θα πρέπει να είναι μικρότερη από τις μέγιστες επιτρεπόμενες εκκεντρότητες, που προβλέπονται από τις αντίστοιχες κατηγορίες ποιότητας κατασκευής, όπως δίνονται στον Πίνακα 3.2 (ΕΚ 3-1-6, παρ.8.4.3, πιν.8.2) :

Fabrication tolerance quality class	Description	Maximum permitted accidental eccentricity
Class A	Excellent	$e_a \leq 2 \text{ mm}$
Class B	High	$e_a \leq 3 \text{ mm}$
Class C	Normal	$e_a \leq 4 \text{ mm}$

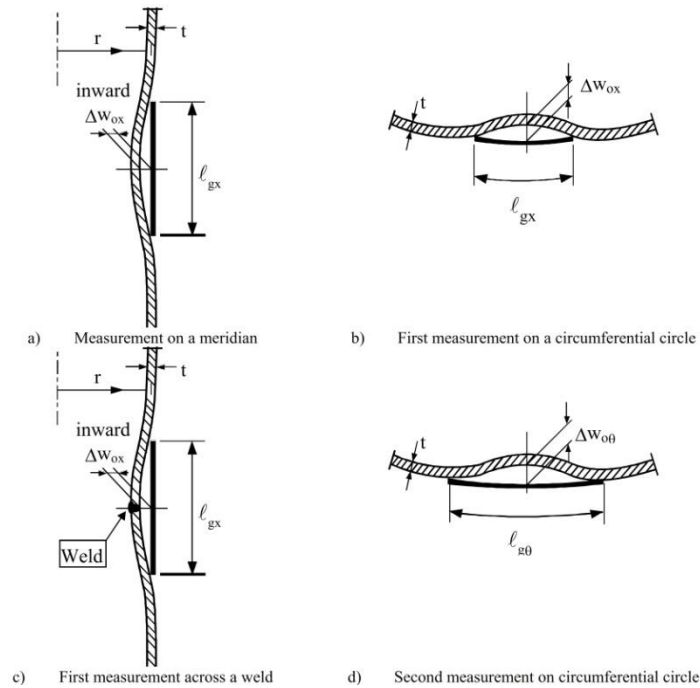
Πίνακας 3.2 Τιμές για τις μέγιστες επιτρεπόμενες τυχαίες εκκεντρότητες

c) Βαθουλώματα τοιχωμάτων

Μια μέτρηση βαθουλωμάτων θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε κάθε θέση τόσο στην μεσημβρινή όσο και στην περιφερειακή κατεύθυνση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8. Η παράμετρος αξιολόγησης δίνεται από τον τύπο :

$$U_{0,\max} = \frac{\Delta_{w0}}{l_g}$$

όπου Δ_{w0} το μετρούμενο βάθος βαθουλώματος και l_g το μήκος του εξεταζόμενου τμήματος



Εικόνα 3.8 Μετρήσεις βαθουλωμάτων

Η παράμετρος βαθουλωμάτων, $U_{0,max}$, θα πρέπει να είναι μικρότερη από τις μέγιστες επιτρεπόμενες παραμέτρους που προβλέπονται από τις αντίστοιχες κατηγορίες ποιότητας κατασκευής, όπως δίνονται στον Πίνακα 3.3 (EK 3-1-6,παρ.8.4.4,πιν.8.4) :

Fabrication tolerance quality class	Description	Value of $U_{0,max}$
Class A	Excellent	0,006
Class B	High	0,010
Class C	Normal	0,016

Πίνακας 3.3 Τιμές για τις μέγιστες επιτρεπόμενες παραμέτρους βαθουλωμάτων

Παρακάτω παρατίθενται οι τρεις κύριες αριθμητικές διαδικασίες κατά τον Ευρωκώδικα [3-1-6] για την αξιολόγηση του πύργου της ανεμογεννήτριας έναντι λυγισμού:

- Σχεδιασμός χρησιμοποιώντας ανάλυση GMNIA [EK 3-1-6,παρ.8.7]

Αυτή είναι χωρίς αμφιβολία η πιο προηγμένη σχεδιαστική διαδικασία που προτείνεται από τον Ευρωκώδικα. Είναι η πιο εξεζητημένη και χρειάζεται καλή κατανόηση των εφαρμοζόμενων ατελειών και του συντελεστή βαθμονόμησης.

Η αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού μπορεί να οριστεί ως ένας φορτικός συντελεστής R_d εφαρμοσμένος πάνω στα φορτία σχεδιασμού F_d των συνδυασμών φόρτισης, θα πρέπει δηλαδή :

$$F_d \leq R_d \cdot F_d \quad \text{ή} \quad R_d \geq 1$$

Η αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού R_d υπολογίζεται ως εξής :

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_{M1}}$$

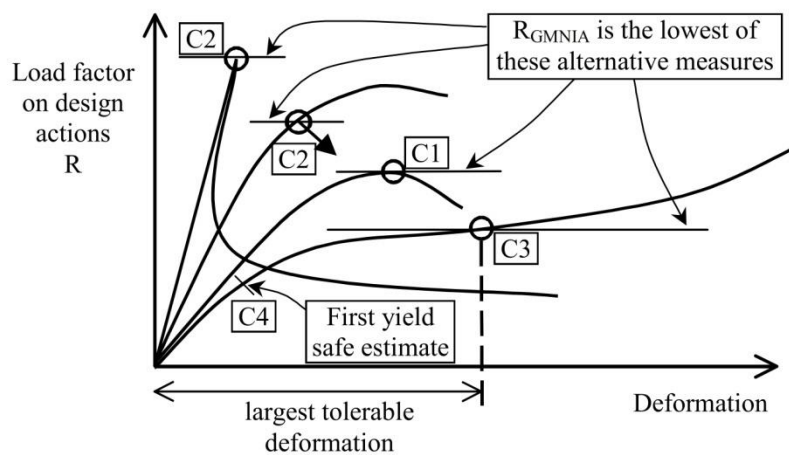
όπου γ_{M1} ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για λυγισμό όπως ορίζεται από τον εκάστοτε εθνικό κανονισμό και εάν δεν ορίζεται δεν πρέπει να τίθεται μικρότερος της τιμής $\gamma_{M1} = 1,1$ και R_k η χαρακτηριστική αντοχή λυγισμού

Η χαρακτηριστική αντοχή λυγισμού, R_k , μπορεί να βρεθεί από την ατελώς ελαστοπλαστική κρίσιμη αντοχή λυγισμού, R_{GMNIA} , προσαρμοσμένη με έναν συντελεστή βαθμονόμησης, k_{GMNIA} ως εξής :

$$R_k = k_{GMNIA} \cdot R_{GMNIA}$$

Η τιμή του συντελεστή k_{GMNIA} κυμαίνεται στο διάστημα $0,8 < k_{GMNIA} < 1,2$, ενώ όπου δεν υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές για την εύρεση του, τίθεται με την χαμηλότερη τιμή 0,8 υπέρ της ασφαλείας.

Για να προσδιοριστεί η R_{GMNIA} , πρέπει να εκτελεστεί ανάλυση GMNIA στο γεωμετρικά ατελές κέλυφος κάτω από όλους του συνδυασμούς φορτίσεων μαζί με ιδιομορφική ανάλυση για να εντοπιστούν πιθανά σημεία διακλάδωσης στο φορτικό μονοπάτι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8 από τον Ευρωκώδικα [3-1-6,παρ.8.7.2,πιν.8.6] :



Εικόνα 3.8 Ορισμός της αντοχής λυγισμού που προέρχεται από ανάλυση GMNIA

Η τιμή της R_{GMNIA} που αντιπροσωπεύει τον φορτικό συντελεστή, είναι η μικρότερη τιμή που προέρχεται από την χρησιμοποίηση τριών κριτηρίων C1, C2, C3 ως εξής :

Κριτήριο C1 : ο μέγιστος φορτικός συντελεστής του οριακού φορτίου.

Κριτήριο C2 : ο φορτικός συντελεστής, ο οποίος αντιστοιχεί στο σημείο διακλάδωσης της καμπύλης φορτίου-παραμόρφωσης.

Κριτήριο C3 : ο φορτικός συντελεστής, ο οποίος αντιστοιχεί στις μέγιστες ανεκτές μετατοπίσεις και στην καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης βρίσκεται πριν φτάσει το σημείο διακλάδωσης ή το οριακό φορτίο.

- Σχεδιασμός χρησιμοποιώντας ανάλυση MNA και LBA [EK 3-1-6,παρ.8.6]

Αυτή είναι η προτιμότερη σχεδιαστική διαδικασία έναντι λυγισμού. Εδώ οι ατέλειες εισάγονται έμμεσα μέσω ενός συντελεστή. Η αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού μπορεί να οριστεί ως ένας φορτικός συντελεστής R_d εφαρμοσμένος πάνω στα φορτία σχεδιασμού F_d των συνδυασμών φόρτισης και θα πρέπει :

$$F_d \leq R_d \cdot F_d \quad \text{ή} \quad R_d \geq 1$$

Η αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού R_d υπολογίζεται ως εξής :

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_{M1}}$$

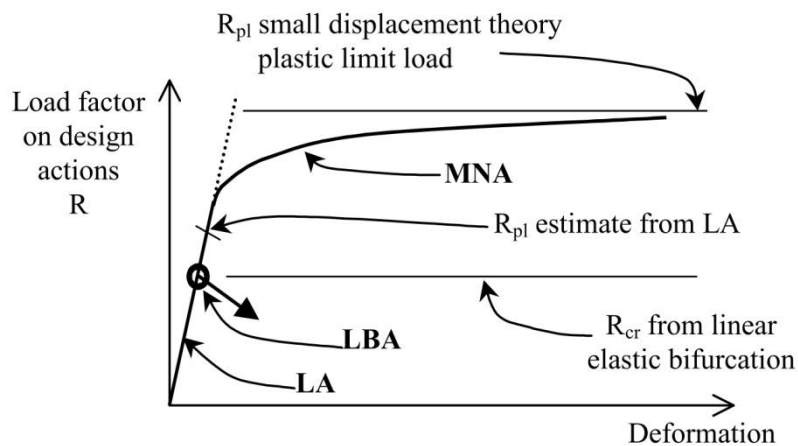
όπου γ_{M1} ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για λυγισμό, όπως ορίζεται από τον εκάστοτε εθνικό κανονισμό, κι εάν δεν ορίζεται δεν πρέπει να τίθεται μικρότερος της τιμής $\gamma_{M1} = 1,1$. R_k η χαρακτηριστική αντοχή λυγισμού.

Η χαρακτηριστική αντοχή λυγισμού R_k βρίσκεται από τον τύπο :

$$R_k = \chi_{ov} \cdot R_{pl}$$

όπου R_{pl} συντελεστής πλαστικής αντοχής και χ_{ov} συνολικός μειωτικός συντελεστής λυγισμού.

Ο συντελεστής πλαστικής αντοχής, R_{pl} , πρέπει να βρίσκεται από μη-γραμμική ανάλυση του υλικού (MNA) και είναι το πλαστικό οριακό φορτίο κάτω από όλους του συνδυασμούς φόρτισης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.9 από τον Ευρωκώδικα [3-1-6,παρ.8.6.2,πιν.8.5]:



Εικόνα 3.9 Ορισμός της πλαστικής αντοχής αναφοράς R_{pl} και της κρίσιμης αντοχής λυγισμού που προέρχεται από ανάλυση MNA και LBA.

Ο συνολικός μειωτικός συντελεστής λυγισμού, χ_{ov} , είναι συνάρτηση των παραμέτρων λ_{ov} , $\lambda_{ov,0}$, α_{ov} , β_{ov} , π_{ov} ,

όπου $\lambda_{ov} = \sqrt{\frac{R_{pl}}{R_{cr}}}$, η σχετική λυγηρότητα του κελύφους και

$\lambda_{ov,0} = 0,20$, η μεσημβρινή οριακή λυγηρότητα [EK 3-1-6,παράρτημα D,παρ. 1.2.2]

$\beta_{ov} = 0,60$, συντελεστής του πλαστικού εύρους [EK 3-1-6,παράρτημα D,παρ. 1.2.2]

$n_{ov} = 1,00$, ο εκθέτης αλληλεπίδρασης [EK 3-1-6,παράρτημα D,παρ. 1.2.2]

$$a_{ov} = \frac{0,62}{1 + \left(\frac{1,91}{Q}\right)^{1,44} \left(\frac{r}{t}\right)^{0,72}} , \text{ συντελεστής μεσημβρινής ελαστικής ατέλειας}$$

με r , t η ακτίνα και το πάχος αντίστοιχα και Q η παράμετρος ποιότητας κατασκευής που παίρνει τιμές από τον Πίνακα 3.4 [EK 3-1-6,παράρτημα D,παρ. 1.2.2, πιν. D.2] που δίνεται παρακάτω:

Fabrication tolerance quality class	Description	Q
Class A	Excellent	40
Class B	High	25
Class C	Normal	16

Πίνακας 3.4 Οι τιμές των παραμέτρων ποιότητας κατασκευής Q

Τελικά ο συνολικός μειωτικός συντελεστής λυγισμού, χ_{ov} , υπολογίζεται ως εξής :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \chi_{ov} = 1 & \text{για } \lambda_{ov} \leq \lambda_{ov,0} \\ \chi_{ov} = 1 - \beta_{ov} \left[\frac{(\lambda_{ov} - \lambda_{ov,0})}{(\lambda_p - \lambda_{ov,0})} \right]^n & \text{για } \lambda_{ov,0} < \lambda_{ov} < \lambda_p \\ \chi_{ov} = \frac{\alpha_{ov}}{\lambda_{ov}^2} & \text{για } \lambda_p \leq \lambda_{ov} \end{array} \right.$$

και όπου $\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}}$, η σχετική λυγηρότητα στο πλαστικό όριο

- Σχεδιασμός χρησιμοποιώντας ανάλυση με βάση τις τάσεις σχεδιασμού [EK 3-1-6,παρ.8.5]

Αυτή η σχεδιαστική διαδικασία δίνει αρκετά συντηρητικές τιμές που οδηγεί σε μη αποδεκτά μεγάλα πάχη και καταλήγουμε αναπόφευκτα στην χρησιμοποίηση δαχτυλιδιών ακαμψίας κατά ύψος στο εσωτερικό του πύργου. Οι τιμές σχεδιασμού των τάσεων, $\sigma_{\chi,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$, $\tau_{\chi\theta,Ed}$ πρέπει να υπολογίζονται από την γραμμική ανάλυση (LA) του κελύφους.

Η αντοχή έναντι λυγισμού αντιπροσωπεύεται από τις τάσεις λυγισμού ως εξής :

$$\sigma_{\chi,Rd} = \frac{\sigma_{\chi,Rk}}{\gamma_{M1}} , \quad \sigma_{\theta,Rd} = \frac{\sigma_{\theta,Rk}}{\gamma_{M1}} , \quad \tau_{\chi\theta,Rd} = \frac{\tau_{\chi\theta,Rk}}{\gamma_{M1}}$$

όπου γ_{M1} ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για λυγισμό όπως ορίζεται από τον εκάστοτε εθνικό κανονισμό κι εάν δεν ορίζεται δεν πρέπει να τίθεται μικρότερος από την τιμή $\gamma_{M1} = 1,1$,

$\sigma_{\chi,Rk}$, $\sigma_{\theta,Rk}$, $\tau_{\chi\theta,Rk}$ οι χαρακτηριστικές τάσεις λυγισμού.

Οι χαρακτηριστικές τάσεις λυγισμού υπολογίζονται ως εξής :

$$\sigma_{\chi,Rk} = \chi_{\chi} f_{y,k} \quad , \quad \sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} f_{y,k} \quad , \quad \tau_{\chi\theta,Rk} = \frac{\chi_{\theta} \cdot f_{y,k}}{\sqrt{3}}$$

όπου : χ ο μειωτικός συντελεστής λυγισμού που υπολογίζεται όπως προηγουμένως, $f_{y,k}$ η χαρακτηριστική τιμή της διαρροής του χάλυβα.

Τελικά ο έλεγχος που πρέπει να ικανοποιείται δίνεται παρακάτω :

$$\sigma_{\chi,Ed} \leq \sigma_{\chi,Rd} \quad , \quad \sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} \quad , \quad \tau_{\chi\theta,Ed} \leq \tau_{\chi\theta,Rd}$$

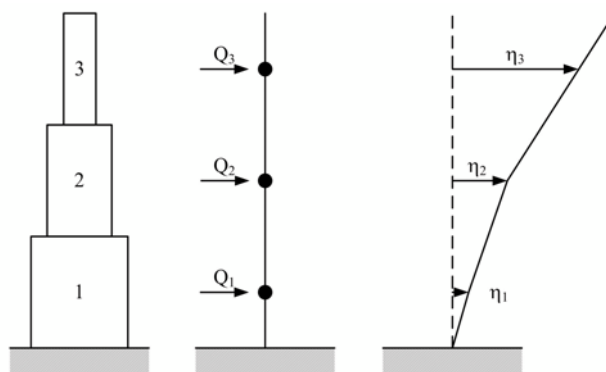
3.2.3 Ανάλυση συχνότητων

Ο υπολογισμός των ιδιοσυχνοτήτων του πύργου είναι κρίσιμος για τον σχεδιασμό. Αν χρησιμοποιηθούν υπολογιστικά μοντέλα οι ιδιοσυχνότητες μπορούν να προσδιοριστούν σχετικά εύκολα. Σε μερικές περιπτώσεις συνίσταται να υπολογίζεται η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα με εμπειρικούς υπολογιστικούς τύπους. Μία απλή προσέγγιση είναι αυτή που βασίζεται στον Morleigh :

$$\omega^2 = g \cdot \frac{\sum Qi \cdot ni}{\sum Qi \cdot ni^2}$$

με την ιδιοσυχνότητα ω σε [1/Hz], τη βαρύτητα g , το ίδιο βάρος Qi εφαρμοσμένο στο κέντρο βάρους του τμήματος i , και την αντίστοιχη μετατόπισή του ni .

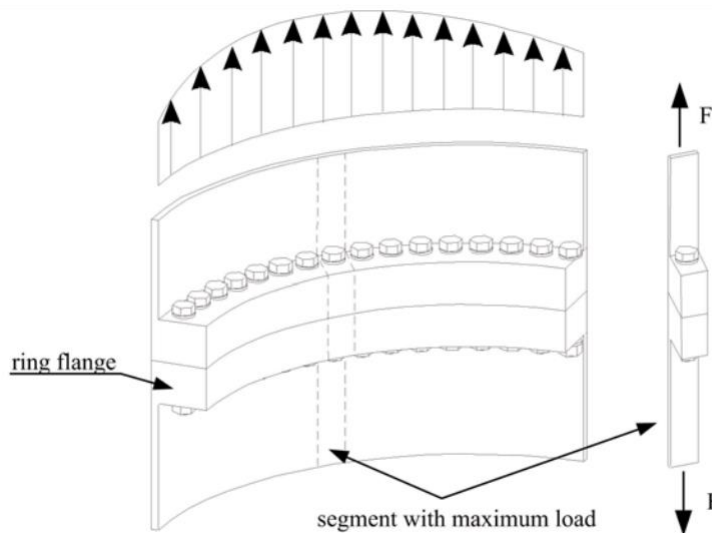
Σε πρώτη φάση, υπολογίζεται το ίδιο βάρος του κάθε τμήματος ξεχωριστά και στην συνέχεια εφαρμόζεται σαν κατακόρυφο φορτίο στο κέντρο βάρους του καθενός. Ακολούθως υπολογίζεται η καμπύλη μετατόπισης λαμβάνοντας υπόψη τα ίδια βάρη. Τέλος η ιδιοσυχνότητα υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση.



Εικόνα 3.10 Διακριτοποίηση των τμημάτων ενός σωληνωτού πύργου (Schaumann et al. (2007-01))

3.3 Ανάλυση σχεδιασμού των φλαντζών συνδέσεως

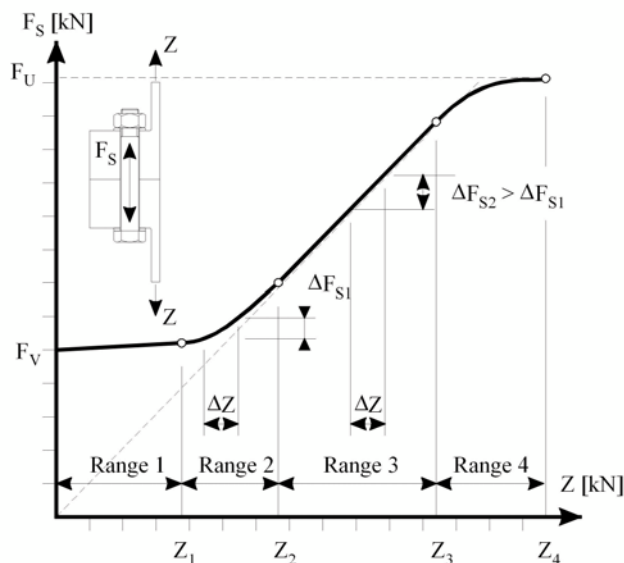
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η σύνδεση των επιμέρους τμημάτων του πύργου επιτυγχάνεται με κυκλικές φλάντζες μαζί με υψηλά προεντεταμένους κοχλίες (HV) με διαμέτρους ανάμεσα σε M30 και M48. Κάθε κυκλική φλάντζα αποτελείται από 70 μέχρι 120 κοχλίες. Για σύγχρονες κατασκευές ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται επίσης HV-ομάδες των M64 με ονομαστικό βάρος κάθε κοχλία ίσο με 20 κιλά. Για τον σχεδιασμό των υψηλά προεντεταμένων κοχλίων λαμβάνεται μόνο το μέγιστο φορτίο του κάθε κοχλία. Η θεώρηση αυτή ολόκληρης της σύνδεσης από ένα κομμάτι με τον μέγιστα φορτισμένο κοχλία οδηγεί σε ένα απλό αριθμητικά μοντέλο με μικρή υπολογιστική προσπάθεια (Εικόνα 3.11). Επιπρόσθετα, ατέλειες στο κέλυφος των κυκλικών φλάντζών δεν συνυπολογίζονται αν και η επιρροή τους στην φέρουσα ικανότητα των συνδέσεων είναι σημαντική.



Εικόνα 3.11 Κοινή προσέγγιση του σχεδιασμού για συνδέσεις με κυκλική φλάντζα (Seidel (2001) , σελ.7)

Στην οριακή κατάσταση αστοχίας, η προένταση του κοχλία πρέπει να αμεληθεί, και αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία σχεδιασμού του κοχλία μπορεί να γίνει όμοια με των κανονικά κοχλιωτών συνδέσεων.

Στην οριακή κατάσταση κόπωσης, οι προεντάσεις των κοχλίων πρέπει να ληφθούν υπόψη υπολογίζοντας τις πιέσεις που ασκούνται στις φλάντζες. Οι δυνάμεις των κοχλίων πρέπει να υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μη γραμμική ανάλυση κοχλία-δύναμης. Λόγω της εκκεντρότητας του άξονα των κοχλίων με τον άξονα χαλύβδινου τοιχώματος του κελύφους, η δύναμη του κοχλία επηρεάζεται σημαντικά από το άνοιγμα της κυκλικής φλάντζας υπό την επίδραση των αυξανόμενων φορτίων. Η Εικόνα 3.12 δείχνει την σχέση κοχλία δύναμης για έναν προεντεταμένο κοχλία σε μία σύνδεση με κυκλική φλάντζα σε έναν σωληνοειδή πύργο.



Εικόνα 3.12 Σχέση κοχλία δύναμης για HV-ομάδες σε συνδέσεις με κυκλική φλάντζα (Seidel (2001))

Το θεωρούμενο επίπεδο της προέντασης των κοχλιών εξαρτάται από τα διαστήματα συντήρησης της κατασκευής. Αν οι κοχλίες που χρησιμοποιούνται στις φλάντζες συνδέσεως στον πύργο της ανεμογεννήτριας τοποθετούνται και συντηρούνται τουλάχιστον 2 χρόνια μετά, η προένταση μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο :

$$F_v = 0,7 \cdot A_s \cdot f_{y,b,k}$$

όπου A_s εφελκόμενη εντατική επιφάνεια και $f_{y,b,k}$ είναι το όριο διαρροής του υλικού των κοχλιών. Αν η δύναμη του κοχλία ελέγχεται το πρώτο μισό του χρόνου μετά την ανέγερση αλλά όχι αμέσως μετά την ανάθεση, ο παράγοντας 0,7 μπορεί να αυξηθεί σε 0,9.

Η σχέση δύναμης κοχλία των προεντεταμένων κοχλιωτών συνδέσεων αποτελείται από τέσσερα σημαντικά εύρη εντάσεως. Στην αρχή ο κοχλίας (Εικόνα 3.12 , range 1) φορτίζεται από την προένταση F_v . Η δύναμη στον κοχλία αυξάνει γραμμικά με εφελκυστικές δυνάμεις Z . Εξαιτίας της δημιουργίας κενών στο εξωτερικό μέρος της κυκλικής φλάντζας η σχέση δύναμης κοχλία γίνεται μη γραμμική(range 2). Μία αυξανόμενη ένωση των κενών οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της σχέσης δύναμη κοχλία μέχρι που η κυκλική φλάντζα είναι σχεδόν τελείως ανοιχτή. Το τρίτο εύρος δείχνει μια τελείως ανοιχτή ένωση. Μόνο η εσωτερική άκρη της κυκλικής φλάντζας και ο κοχλίας μπορούν να αναλάβουν εφελκυστικές δυνάμεις Z . Αν οι εφελκυστικές τάσεις στον κοχλία υπερβούν την τιμή της εφελκυστικής αντοχής, η σύνδεση θα πλαστικοποιηθεί μέχρι ολοκληρωτικής αστοχίας (range 4).

Λόγω της εξαιρετικά μη γραμμικής σχέσης δύναμης κοχλία προτείνεται η χρήση υπολογιστικών μοντέλων για το σχεδιασμό των προεντεταμένων κοχλιών στην κυκλική φλάντζα συνδέσεως συνυπολογίζοντας τα κενά και τις ατέλειες της κυκλικής φλάντζας. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις δύναμης κοχλία που προτείνεται από τον Seidel (2001) ή Schmidt/Neuper (1997).

Όσο αφορά τον σχεδιασμό των κυκλικών φλαντζών σύνδεσης όπως είδαμε χρησιμοποιούνται συχνά υπολογιστικά μοντέλα. Παρ' όλα αυτά, είναι αρκετά βοηθητικές οι τιμές για τις

γεωμετρικές διαστάσεις από απλή προμελέτη. Σύμφωνα με τον Seidel (2001) οι ακόλουθες σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια απλή προμελέτη :

$$b + s/2 \leq 2 \cdot d$$

$$a \geq 1,45 \cdot (b + s/2)$$

$$c/d \leq 2 \cdot d/s \leq 10$$

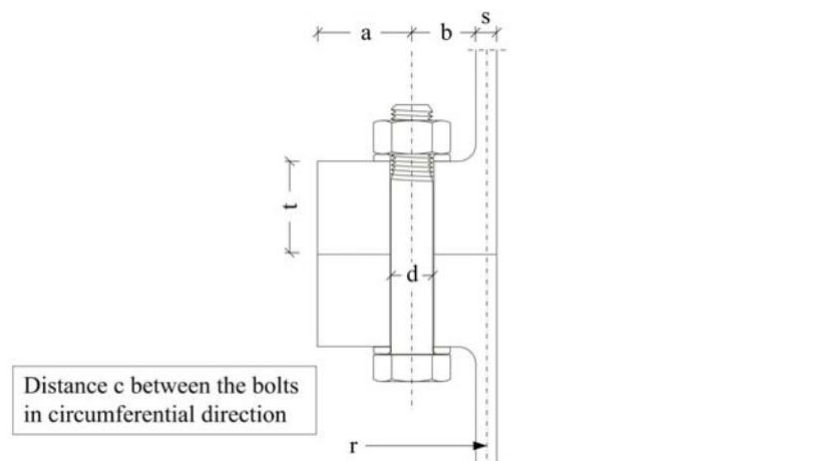
$$t \geq 1,5 \cdot d$$

$$\text{με : } t \geq 4 \cdot s \text{ για } r/s \leq 50$$

$$t \geq 3 \cdot s \text{ για } r/s = 100$$

$$t \geq 2 \cdot s \text{ για } r/s \geq 200$$

όπου t το πάχος της φλάντζας, s το πάχος του τοιχώματος του κελύφους, d η διάμετρος του κοχλίου, b η απόσταση μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του τοιχώματος και του άξονα του κοχλίου, a η απόσταση μεταξύ του άξονα του κοχλίου και της άκρης της κυκλικής φλάντζας.



Εικόνα 3.13 Συμβολισμοί για συνιστώμενες διαστάσεις φλάντζα (Seidel (2001), σελ.2)

Όλοι οι συμβολισμοί πρέπει να υπολογίζονται σε χιλιοστά (mm). Οι ελάχιστες τιμές για τις διαστάσεις των κυκλικών φλαντζών μπορούμε να τις πάρουμε από τον Seidel (2001):

	M16	M20	M22	M24	M27	M30	M36	M39	M42	M48
min (b-s/2)	30	35	40	40	45	45	50	55	55	65
min c	45	55	60	65	70	75	90	95	100	110

Πίνακας 3.5 Ελάχιστες τιμές για τις διαστάσεις των κυκλικών φλαντζών σε [mm]

3.2.5 Ανάλυση σχεδιασμού των συγκολλητών συνδέσεων

Ο έλεγχος των συγκολλήσεων βασίζεται στην σύγκριση των επιβαλλόμενων τάσεων στην συγκόλληση με τις επιτρεπόμενες τάσεις. Ανάλογα με την ποιότητα του χάλυβα και την γεωμετρία της συγκόλλησης η αντοχή μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα [3-1-8].

Για την σχεδιασμό των συγκολλητών συνδέσεων στην οριακή κατάσταση αστοχίας η ακόλουθη σχέση πρέπει να ικανοποιείται :

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}$$

όπου $F_{w,Ed}$ είναι η τιμή σχεδιασμού για τη δύναμη στη συγκόλληση ανά μονάδα μήκους και $F_{w,Rd}$ είναι η αντοχή της συγκόλλησης ανά μονάδα μήκους. Η αντοχή των λουριδωτών συγκολλήσεων δίνεται από τον τύπο :

$$F_{w,Rd} = \alpha \cdot f_{vw,d} = \alpha \cdot \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

όπου $f_{vw,d}$ η διατμητική αντοχή σχεδιασμού, α το πάχος επιρροής στο λαιμό της συγκόλλησης, β_w ο κατάλληλος συντελεστής συσχέτισης, γ_{M2} ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας του υλικού. Ο συντελεστής ασφαλείας γ_{M2} μπορεί να θεωρείται ίσος με 1,25 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα [3-1-8,παρ.6.1] και ο συντελεστής συσχέτισης β_w λαμβάνεται ανάλογα με την ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιείται από τον Ευρωκώδικα [3-1-8,πίνακας 4.1].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΠΥΡΓΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Οι ανεμογεννήτριες θεμελιώνονται σε μια ποικιλία τύπων θεμελίων, τα οποία για μηχανικούς λόγους επιλέγονται συναρτήσει των γεωτεχνικών συνθηκών και της μεθόδου θεμελίωσης με σκοπό την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του εδάφους στο οποίο θεμελιώνεται ο πύργος, το βέλτιστο σύστημα θεμελίωσης πρέπει να επιλεγεί (επιφανειακό πέδιλο, πάσσαλοι, κ.ά.).

Η αρμοδιότητα της θεμελίωσης είναι η διασφάλιση της σταθερότητας για την ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια της ζωής της. Αυτό γίνεται μεταφέροντας και διανέμοντας στο έδαφος τα φορτία που ασκούνται στη θεμελίωση. Η κατακόρυφη φόρτιση που ασκείται κυρίως στο θεμέλιο είναι τα μόνιμα φορτία (ίδιο βάρος πύργου, θαλάμου, ρότορα). Η κυριότερη φόρτιση στο θεμέλιο προέρχεται από τον άνεμο. Εξ αιτίας του μεγάλου ύψους του πύργου, η οριζόντια δύναμη απ' τον άνεμο προκαλεί μία σημαντική καμπτική ροπή στο θεμέλιο. Η θεμελίωση πρέπει να έχει επαρκή δυσκαμψία, ώστε να μεγιστοποιείται η φυσική συχνότητα του συστήματος μέσα στα επιτρεπτά όρια. Ένα τέτοιο σύστημα επιτρέπει μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες, οπότε και καλύτερη απόδοση.

Οι μεταλλικοί πυλώνες ανεμογεννητριών σχήματος λεπτότοιχου κολουροκωνικού κελύφους, αν και αποτελούν φαινομενικά απλές κατασκευές, διακρίνονται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, τα οποία καθιστούν το σχεδιασμό τους ιδιαίτερο. Η βασική ιδιαιτερότητα τους έγκειται στο ότι υποβάλλονται διαρκώς σε δυναμικές διεγέρσεις, όπως ο άνεμος και δευτερευόντως ο σεισμός, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις απαιτείται θεμελίωση σε μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς. Υπό αυτές τις συνθήκες η απόκριση ενδέχεται να επηρεάζεται από το φαινόμενο της δυναμικής αλληλεπίδρασης ανώδομής – θεμελίωσης – εδάφους.

Κατά τη μελέτη και τον σχεδιασμό των θεμελιώσεων θα πρέπει να εξασφαλίζεται:

- Η επάρκεια των εδαφικών χαρακτηριστικών και η σωστή διαστασιολόγηση της θεμελίωσης που επιλέχθηκε.
- Η ανάπτυξη μικρών μόνο μετακινήσεων της θεμελίωσης (εδαφικές καθιζήσεις, στροφές) που δεν θέτουν σε κίνδυνο την στατικότητα και τη λειτουργικότητα της κατασκευής.

Επιτρεπόμενη τιμή φέρουσας ικανότητας – Συντελεστής ασφαλείας:

Οι τιμές που εκτιμώνται για τα χαρακτηριστικά του εδάφους παρουσιάζουν σημαντικές αβεβαιότητες και αποκλίσεις στο πεδίο, η εδαφική στρωματογραφία δεν είναι πλήρως προσδιορισμένη στην πλειονότητα των μελετών θεμελίωσης. Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες γίνεται κατανοητή η χρήση μεγάλων τιμών συντελεστή ασφαλείας κατά τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας. Παράλληλα, οι μέθοδοι υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας εμπεριέχουν σε σημαντικό βαθμό απλοποιήσεις και παραδοχές

4.1 Τύποι θεμελίωσης

Υπάρχουν πολλοί τρόποι θεμελίωσης μιας ανεμογεννήτριας, οι οποίοι μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: εκτενές θεμέλιο(πέδιλο) και θεμελίωση με πασσάλους. Και για τους δύο αυτούς τύπους απαιτείται μια διασύνδεση μεταξύ του πύργου και του εδάφους ως συνέπεια αυτού, ακόμα και η θεμελίωση με πασσάλους έχει μια πλάκα από σκυρόδεμα.

4.1.1 Επιφανειακή θεμελίωση

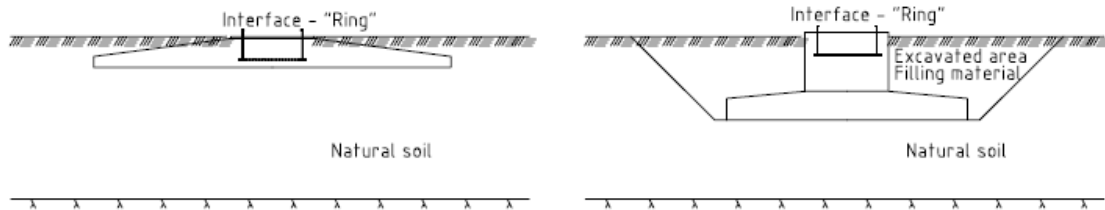
Η πιο απλή μορφή είναι η *εκτεταμένη θεμελίωση (spread foundation ή slab foundation)* που είναι κυρίως ένα πέδιλο βαρύτητας που στηρίζεται στο υπερκείμενο έδαφος και το σκυρόδεμα για να παρέχει επαρκές βάρος, ώστε να αντιστέκεται στην ανατροπή από τη δύναμη του ανέμου και να διανέμει τα φορτία σε μία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



Εικόνα 4.1 Θεμελίωση με πέδιλο-πλάκα

Αυτού του τύπου θεμελίωση είναι κατάλληλη για καλά εδάφη που δε δίνουν μεγάλες καθιζήσεις, δηλαδή για εδάφη με μεγάλη γωνία τριβής ή αλλουβιακά εδάφη και όχι για άργιλο ή ιλυώδη άργιλο, επιχώματα, οργανικά εδάφη ή άλλα με μικρό μέτρο ελαστικότητας και αντοχή. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις επιφανειακής θεμελίωσης :

- *ρηχή θεμελίωση (shallow foundation)*: εδράζεται στην επιφάνεια του εδάφους ή ακριβώς από κάτω. Απαιτείται μεγάλο εμβαδό για να αποφεύγεται η ανατροπή. Μια μεγάλου πάχους βαριά κατασκευή εμποδίζει την ανατροπή καθώς η αντίδραση από το έδαφος είναι πιο κοντά στο κέντρο. Το πλεονέκτημα της ρηχής θεμελίωσης είναι ότι κατασκευάζεται εύκολα και χρειάζεται μικρή εκσκαφή και επαναχωμάτωση.
- *θεμελίωση βαρύτητας (gravity foundation)*: εδράζεται σε απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους που σημαίνει ότι κάποια ποσότητα εδάφους πρέπει να εκσκαφτεί και ένα υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται πάνω από την θεμελίωση αφού κατασκευαστεί. Θεωρείται καλή εφαρμογή της όταν υπάρχει μια στρώση μαλακού εδάφους επιφανειακά οπότε με την εκσκαφή απομακρύνεται, οπότε η θεμελίωση εδράζεται σε ένα καλύτερο έδαφος.



Εικόνα 4.2 Αριστερά: spread foundation on the ground και Δεξιά: gravity foundation

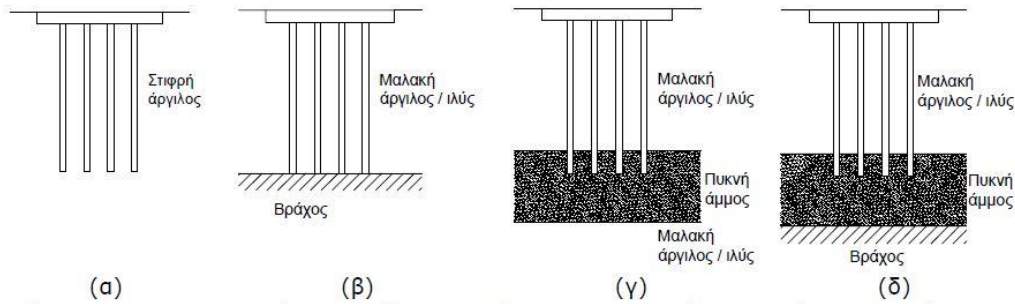
Οι επιφανειακές θεμελιώσεις πρέπει να ελέγχονται έναντι:

- ανατροπής
- αστοχίας φέρουσας ικανότητας (DIN 4017)
- ολίσθησης
- άνωσης
- καθιζήσεων (DIN V 4019-100)

4.1.2 Θεμελίωση με πασσάλους

Οι *πάσσαλοι* ως στοιχεία θεμελιώσεων χρησιμοποιούνται συνήθως όταν μαλακά εδάφη υπέρκεινται στιφρών, για μεταβίβαση στο έδαφος υψηλών φορτίων με ταυτόχρονο περιορισμό καθιζήσεων, για την ανάληψη υψηλών φορτίων με τρόπο που να μην επηρεάζουν υπάρχουσες κατασκευές με επιφανειακή θεμελίωση, για την ανάληψη οριζόντιων φορτίων κ.λπ. Αν οι ιδιότητες του εδάφους δεν επαρκούν για να εδρασθεί η θεμελίωση επιφανειακά, μία καλή λύση είναι η τοποθέτηση πασσάλων οι οποίοι οδηγούν το φορτίο σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα αυξημένης αντοχής και δυστημσίας. Από άποψη λειτουργίας, η μεταφορά των φορτίων στο περιβάλλον έδαφος πραγματοποιείται τόσο μέσω της βάσης έδρασης των πασσάλων όσο και (κυρίως) μέσω της παράπλευρης επιφάνειάς τους, γεγονός το οποίο αποτελεί και τη βασική διαφορά σε σχέση με τις επιφανειακές θεμελιώσεις. Κατά συνέπεια οι πάσσαλοι είναι δυνατόν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες με βάση το μηχανισμό μεταφοράς των φορτίων στο περιβάλλον έδαφος:

Στην περίπτωση κατά την οποία το έδαφος θεμελίωσης αποτελείται κυρίως από στιφρή άργιλο σημαντικού πάχους οι *"πάσσαλοι τριβής"* μεταβιβάζουν τα φορτία μέσω της πλευρικής τριβής που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους, ενώ στις περιπτώσεις κατά τις οποίες ένα στρώμα μαλακής αργίλου / ιλύος υπέρκειται ενός στρώματος πυκνής άμμου, αμμοχάλικου ή βράχου οι πάσσαλοι μεταφέρουν τα φορτία μέσω της αιχμής τους και κατά συνέπεια ονομάζονται *"πάσσαλοι αιχμής"*. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εδαφικής διαστρωμάτωσης στις οποίες ενδείκνυται η χρησιμοποίηση πασσάλων δίνονται στην Εικόνα 4.3 (Αναγνωστόπουλος et al. 2004).



Εικόνα 4.3 Κατηγοριοποίηση πασσάλων με βάση το μηχανισμό μεταφοράς των φορτίων στο περιβάλλον έδαφος: (α) πάσσαλοι τριβής, (β), (γ), (δ) πάσσαλοι αιχμής

Εξ αιτίας της μεγάλης καμπτικής ροπής από τον άνεμο, οι πάσσαλοι μπορεί να εκτεθούν σε εφελκυστικά φορτία, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Η σύνδεση μεταξύ των πασσάλων και της πλάκας είναι σημαντική για τη κατανομή του φορτίου. Γενικά, η πλάκα (κεφαλόδεσμος) είναι μέσα στο έδαφος, οπότε το έδαφος στην περίμετρο μπορεί να αντιστέκεται στις οριζόντιες δυνάμεις.

4.2 Υπολογισμοί

4.2.1 Υπολογισμοί επιφανειακού πεδίου

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένοι υπολογισμοί και έλεγχοι για τον ορθό σχεδιασμό του επιφανειακού πεδίου:

I. Ανάλυση ευστάθειας

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

$$e = \frac{M}{V} < B/2$$

όπου M η καμπτική ροπή που ασκείται στη βάση της κατασκευής, V το κατακόρυφο φορτίο λαμβάνοντας υπόψιν το ίδιο βάρος του, B το πλάτος του πεδίου.

II. Φέρουσα ικανότητα

$$q_b = c N_c s_c d_c i_c g_c b_c + q N_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0.5 \gamma' B_{ef} N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma ,$$

όπου :

q_b : η φέρουσα ικανότητα του πεδίου

c : η συνοχή

q : το περιβάλλον φορτίο στο επίπεδο της θεμελίωσης

γ' : η ενεργός πυκνότητα του εδάφους

B_{ef} : το ενεργό πλάτος του πεδίου

N_c, N_q, N_g : συντελεστές φέρουσας ικανότητας που εξαρτώνται από τη γωνία τριβής

s_c, s_q, s_γ : διορθωτικοί συντελεστές σχήματος

d_c, d_q, d_γ : διορθωτικοί συντελεστές βάθους

i_c, i_q, i_γ : διορθωτικοί συντελεστές για λοξό φορτίο

g_c, g_q, g_γ : διορθωτικοί συντελεστές για λοξή επιφάνεια εδάφους

b_c, b_q, b_γ : διορθωτικοί συντελεστές για κεκλιμένη επιφάνεια πεδίου

Για το κυκλικό πέδιλο η ενεργή περιοχή εκφράζεται σαν ορθογωνική που προέρχεται από μια ελλειπτική:

$$A_{eff} = 2 \left[R^2 \arccos\left(\frac{e}{R}\right) - e\sqrt{R^2 - e^2} \right]$$

Με ελλειπτικούς κύριους άξονες :

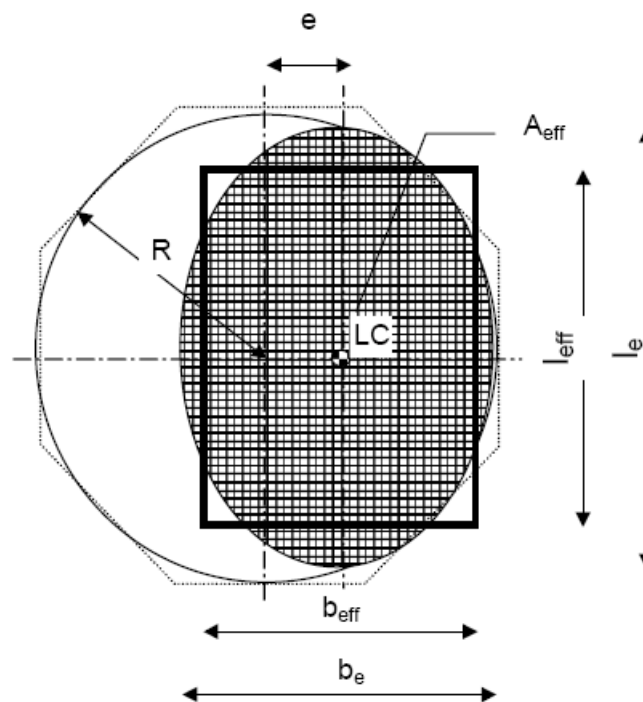
$$b_e = 2(R - e)$$

$$l_e = 2R\sqrt{1 - \left(1 - \frac{b_e}{2R}\right)^2}$$

και τις ισοδύναμες διαστάσεις:

$$L_{eff} = \sqrt{A_{eff} \frac{l_e}{b_e}}$$

$$B_{eff} = \frac{L_{eff}}{l_e} b_e$$



Εικόνα 4.4 Ενεργή περιοχή για κυκλικό θεμέλιο

Οι συντελεστές φέρουσας ικανότητας υπολογίζονται από τους εξής τύπους:

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} e^{\pi \tan \phi}$$

$$N_c = \begin{cases} \pi + 2, \phi = 0 \\ \frac{N_{q-1}}{\tan \phi}, \phi > 0 \end{cases}$$

$$N_\gamma = F(\phi) \left[\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} e^{\left(\frac{3\pi}{2} \tan \phi\right)} - 1 \right]$$

όπου $F(\phi) = 0.08705 + 0.3231 \sin(2\phi) - 0.04836 \sin^2(2\phi)$

Οι συντελεστές σχήματος ορίζονται ως εξής:

$$s_c = \begin{cases} 1 + 0.2 \frac{B_{ef}}{L_{ef}}, \phi = 0 \\ 1 + \frac{N_q}{N_c} \frac{B_{ef}}{L_{ef}}, \phi > 0 \end{cases}$$

$$s_q = 1 + \frac{B_{ef}}{L_{ef}} \tan(\phi)$$

$$s_\gamma = 1 - 0.4 \frac{B_{ef}}{L_{ef}}$$

Οι διορθωτικοί συντελεστές βάθους ορίζονται ως εξής:

$$d_c = d_q = 1 + 0.35 \frac{d}{B_{ef}}; d_c, d_q \leq 1.7$$

$$d_\gamma = 1$$

Οι διορθωτικοί συντελεστές για λοξό φορτίο ορίζονται ως εξής:

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + B_{ef} L_{ef} c \cot \phi} \right)^m$$

$$i_c = \begin{cases} 1 - \frac{mH}{B_{ef} L_{ef} c N_c}, \phi = 0 \\ i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \tan \phi}, \phi > 0 \end{cases}$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{H}{V + B_{ef} L_{ef} c \cot \phi} \right)^{m+1}$$

όπου H το οριζόντιο διάνυσμα φορτίου, V το κατακόρυφο διάνυσμα φορτίου

$$m = \begin{cases} m_B = \frac{2 + \frac{B_{ef}}{L_{ef}}}{1 + \frac{B_{ef}}{L_{ef}}} \\ m_L = \frac{2 + \frac{L_{ef}}{B_{ef}}}{1 + \frac{L_{ef}}{B_{ef}}} \end{cases}$$

όπου η πρώτη εξίσωση χρησιμοποιείται όταν το H δρα στην διεύθυνση του πλάτους και η δεύτερη όταν δρα στην διεύθυνση του μήκους.

Οι διορθωτικοί συντελεστές για λοξή επιφάνεια εδάφους είναι:

$$g_c = \begin{cases} 1 - \frac{2\beta}{N_c}, \phi = 0 \\ e^{-2\beta \tan \phi}, \phi > 0 \end{cases}$$

$$g_q = g_\gamma = -\sin 2\beta$$

όπου β η κλίση του εδάφους σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο

Οι διορθωτικοί συντελεστές για κεκλιμένη επιφάνεια πεδύλου είναι:

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \tan \phi)^2$$

$$b_c = \begin{cases} 1 - \frac{2a}{\pi + 2}, \phi = 0 \\ b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \tan \phi}, \phi > 0 \end{cases}$$

Θεμέλια που υπόκεινται σε οριζόντια φορτία πρέπει να ελέγχονται για επαρκή αντίσταση σε ολίσθηση. Αυτός ο όρος πραγματοποιείται με την ακόλουθη έκφραση:

$$\frac{A_{eff} c + B \tan \phi}{H} > 1 \quad \text{και επιπλέον πρέπει} \quad \frac{H}{V} < 0.4$$

4.2.2 Υπολογισμοί ομάδας πασσάλων

Κατά τον σχεδιασμό θεμελιώσεων με πασσάλους απαιτείται ο έλεγχος έναντι οριακών καταστάσεων, βασικοί τύποι των οποίων είναι οι ακόλουθοι :

- Οριακές καταστάσεις αστοχίας :
 - Τύπου GEO : Αστοχία στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους λόγω υπέρβασης της θλιπτικής αξονικής φέρουσας ικανότητας του πασσάλου
 - Τύπου GEO : Εξόλκευση πασσάλου λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αξονικής φέρουσας ικανότητας
 - Τύπου GEO : Αστοχία του εδάφους γύρω από τον πάσσαλο λόγω εγκάρσιων φορτίων
 - Τύπου STR : Δομικού τύπου αστοχία του πασσάλου σε θλίψη, εφελκυσμό ή κάμψη
 - Συνδυασμένη αστοχία εδάφους και πασσάλου
 - Απώλεια συνολικής ευστάθειας του εδάφους που περιβάλλει τον πάσσαλο (π.χ. μέσω κύκλου ολισθήσεως)
- Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας :
 - Υπερβολικές καθιζήσεις ή ανυψώσεις μεμονωμένου πασσάλου ή πασσαλομάδας
 - Πλευρικές μετατοπίσεις πέραν των ανεκτών ορίων
 - Μη αποδεκτές ταλαντώσεις

Στους πασσάλους, οι οριακές καταστάσεις STR και GEO αποτελούν τις συνηθέστερες και σπουδαιότερες οριακές καταστάσεις αστοχίας, εξετάζονται δε παραλλήλως - συγχρόνως, δεδομένου ότι δεν είναι πάντα σαφές αν κατά τη συνεχή αύξηση π.χ. των εξωτερικών φορτίσεων επί της θεμελίωσης θα προηγηθεί αστοχία του εδάφους, ή αστοχία της θεμελίωσης ως δομικού στοιχείου, ή συγχρόνως θα αστοχήσει και το έδαφος και το δομικό στοιχείο.

Τελικό ζητούμενο από μια μελέτη πασσαλοθεμελίωσης είναι ο υπολογισμός της απαιτούμενης διαμέτρου, του μήκους και του αριθμού των πασσάλων προκειμένου να φέρουν τα φορτία ανωδομής, και στη συνέχεια η διαστασιολόγησή τους

4.2.2.1 Αξονική θλιπτική φόρτιση – Εγκάρσια φόρτιση

Για μεμονωμένο πάσσαλο φορτιζόμενο από θλιπτική, αξονική φόρτιση ή και για ομάδα πασσάλων, ο έλεγχος επάρκειας έναντι οριακής κατάστασης αστοχίας γίνεται μέσω της σχέσης :

$$F_{c,d} \leq R_{c,d}$$

όπου $F_{c,d}$ η τιμή σχεδιασμού του αξονικού θλιπτικού φορτίου στην κεφαλή του πασσάλου και $R_{c,d}$ η τιμή σχεδιασμού της αντίστασης (φέρουσας ικανότητας) του πασσάλου.

Η αντίσταση σχεδιασμού $R_{c,d}$ υπολογίζεται από την χαρακτηριστική τιμή της αντίστασης ($R_{c,k}$) με εφαρμογή των κατάλληλων συντελεστών γ_R , δηλαδή

$$R_{c,d} = R_{c,k} / \gamma_R$$

Η χαρακτηριστική αντοχή $R_{c,k}$ επέχει ουσιαστικώς τη θέση του οριακού φορτίου υπό θλιπτική φόρτιση, αλλά σύμφωνα με τη λογική επιλογής των χαρακτηριστικών τιμών απαιτείται προσεκτική-συντηρητική επιλογή του μεγέθους αυτού. Όπως λοιπόν είναι σαφές,

προκειμένου να ελεγχθεί η ισχύς της ανωτέρω ανισώσεως απαιτείται η εκτίμηση της χαρακτηριστικής αντοχής, $R_{c,k}$.

Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών τιμών αντοχής $R_{b,k}$, $R_{s,k}$ καθώς και της αντοχής σχεδιασμού $R_{c,d}$ γίνεται ως κατωτέρω :

$$R_{b,k} = A_b q_{b,k}$$

$$R_{s,k} = \sum R_{s,i} = (\sum A_{s,i} q_{s,i,k})$$

$$R_{c,d} = \left(\frac{1}{\gamma_m} \right) \left[\frac{R_{b,k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s,k}}{\gamma_s} \right]$$

όπου:

$q_{b,k}$: χαρακτηριστική τιμή της μοναδιαίας αντίστασης αιχμής του πασσάλου

A_b : εμβαδόν αιχμής του πασσάλου

$q_{s,i,k}$: χαρακτηριστική τιμή της τάσεως συνάφειας στην παράπλευρη επιφάνεια της i στρώσεως

$A_{s,i}$: εμβαδόν της παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου στη στρώση i

γ_m : συντελεστής προσομοίωσης (καλύπτει τις πρόσθετες αβεβαιότητες που εισάγονται μέσω των μεθόδων εκτιμήσεως και υπολογισμών).

Το πρόβλημα της εγκάρσιας φορτίσεως κατακόρυφων πασσάλων είναι αρκετά σύνθετο, δεδομένου ότι σε αυτό υπεισέρχονται πολλοί παράγοντες, όπως:

- Οι εδαφικές ιδιότητες και παράμετροι.
- Η οριζόντια φόρτιση και τα αποτελέσματά της (π.χ. οι ροπές κάμψης του πασσάλου).
- Η αντοχή του πασσάλου, ως δομικού στοιχείου (π.χ. η χαρακτηριστική αντοχή σε καμπτική καταπόνηση).
- Η ανάπτυξη των πλευρικών, εδαφικών αντιδράσεων και οι αντίστοιχες πλευρικές μετατοπίσεις.

4.2.2.2 Φέρουσα ικανότητα πασσάλου

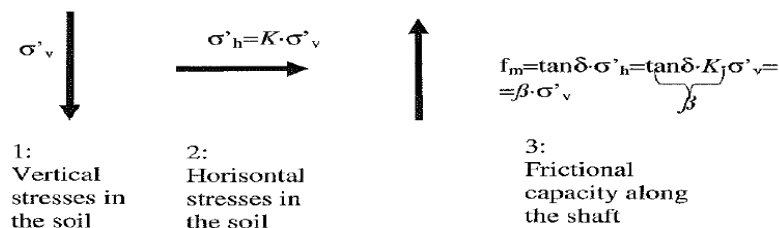
$$R_{tot} = R_{toe} + R_{shaft} = f_{toe} A_{toe} + f_{shaft} A_{shaft}$$

όπου R η αντίσταση, f_{toe} αντοχή σε θραύση της αιχμής πασσάλου, A_{toe} επιφάνεια αιχμής πασσάλου, f_{shaft} οριακή τιμή πλευρικής τριβής, A_{shaft} παράπλευρος επιφάνεια πασσάλου.

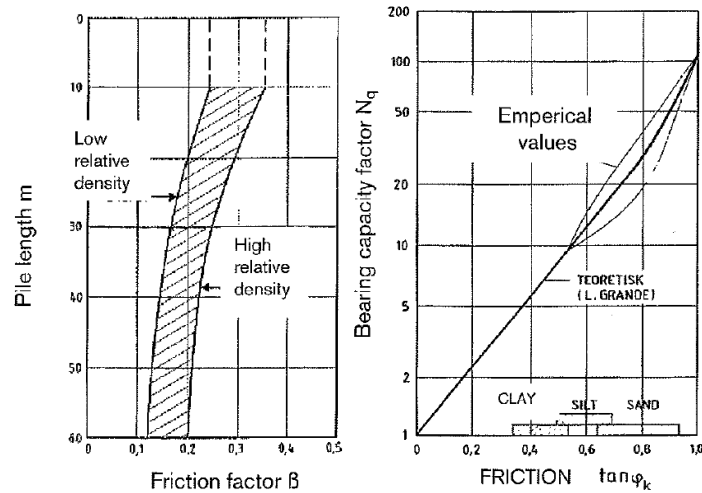
Για πασσάλους τριβής (Friction piles) :

$$f_{toe} = N_q \sigma'_v \quad \text{και} \quad f_{shaft} = \beta \bar{\sigma}'_v ,$$

όπου σ'_v η ενεργή τάση στην αιχμή του πασσάλου, $\bar{\sigma}'_v$ η μέση ενεργή κατακόρυφη τάση κατά μήκος του πασσάλου.



Εικόνα 4.5 Οριζόντια και κατακόρυφη τάση



Εικόνα 4.6 Διαγράμματα συντελεστή β και N_q

Για πασσάλους συνοχής (Cohesion piles):

$$f_{shaft} = a\tau(z)$$

Δομική φέρουσα ικανότητα

Η δομική φέρουσα ικανότητα αφορά την ικανότητα του ίδιου του πασσάλου. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι αστοχίας :

- Αστοχία λόγω της αντοχής του υλικού

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,$$

όπου N_{Ed} , M_{Ed} φορτία διατομής και N_{Rd} , M_{Rd} η αντοχή του υλικού

- Αστοχία λόγω αστάθειας

$$P_{cr} = 2\sqrt{k_d d E_d I}$$

$$L_{cr} = \pi \sqrt[4]{\frac{E_d I}{k_d d}}$$

όπου P_{cr} το κρίσιμο φορτίο του πασσάλου

k_d η τιμή σχεδιασμού για την αντίδραση της θεμελίωσης

d η διάμετρος του πασσάλου

E_d το μέτρο ελαστικότητας του πασσάλου

I η ροπή αδράνειας του πασσάλου

L_{cr} κρίσιμο μήκος του πασσάλου

Η ανάλυση της απόκρισης πασσάλων υπό εγκάρσια φόρτιση αντιμετώπισε αρχικά το έδαφος ως μια σειρά από ελατήρια κατά μήκος του πασσάλου γνωστό και ως μοντέλο Winkler. Η ακαμψία του ελατηρίου k ορίζεται ως μέτρο δείκτη εδάφους, εκφράζοντας το φορτίο που

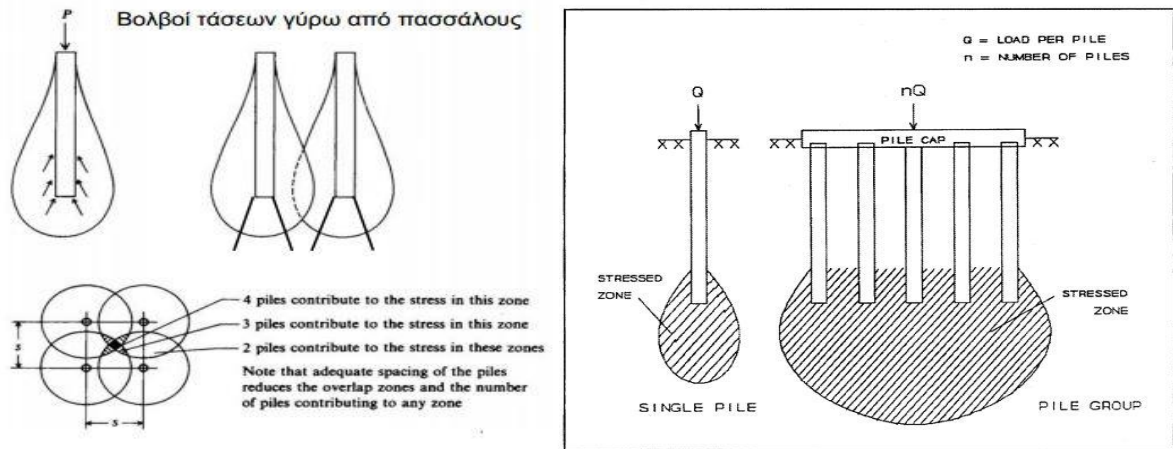
επιβάλλεται ανά μονάδα μήκους του πασσάλου και προκαλείται για μοναδιαία πλευρική μετατόπιση. Αν θεωρηθεί ότι ο δείκτης εδάφους k παραμένει σταθερός ανεξαρτήτως βάθους, τότε αναλυτικές λύσεις δύναται να δώσουν την παραμορφωμένη μορφή του πασσάλου καθώς και την κατανομή τεμνουσών δυνάμεων και καμπτικών ροπών κατά μήκος του (Matlock και Reese, 1960). Για έναν πάσσαλο με δεδομένο μέτρο ελαστικότητας E και ροπή αδράνειας I_p σε έδαφος με δείκτη εδάφους k υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος πέραν του οποίου ο πάσσαλος συμπεριφέρεται σαν να ήταν απείρως μακρύς. Η επίδραση του φορτίου που εφαρμόζεται στην κορυφή του πασσάλου είναι μηδενική από κάποια συγκεκριμένη τιμή του βάθους και έπειτα.

Ομάδα πασσάλων

Η αντίσταση αιχμής (Q_{pu}) συνήθως δεν επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση των πασσάλων της ομάδας (σε πολύ μικρές αποστάσεις πασσάλων, η αντίσταση αιχμής αυξάνει). Η αντίσταση πλευρικής τριβής (Q_{su}) ενίοτε μειώνεται λόγω της αλληλεπίδρασης των πασσάλων της ομάδας. Μία πολύ συντηρητική εκτίμηση της απομείωσης της αντίστασης πλευρικής τριβής του μεμονωμένου πασσάλου (Q_{su}) λόγω της ομάδας δίνεται από τη σχέση Converse Labarre ($Q_{su,g}$ = πλευρική τριβή πασσάλου ομάδας, σε ομάδα πασσάλων σε κάρναβο $N = m \times n$ πασσάλων, διαμέτρου D , με αποστάσεις « s » μεταξύ πασσάλων) :

$$Q_{su,g} = fQ_{su} \qquad f = 1 - \frac{\theta}{90} \left(2 - \frac{1}{m} - \frac{1}{n} \right) \qquad \theta = \arctan \frac{D}{s}$$

$$Q_{ug} = N(Q_{pu} + fQ_{su})$$



Εικόνα 4.7 Βολβοί τάσεων γύρω από πασσάλους

Σκοπός της απομείωσης της $\Phi.I.$ της ομάδας μέσω του συντελεστή « f » είναι κυρίως ο περιορισμός της καθίζησης της ομάδας (επειδή η καθίζηση της ομάδας είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αποδοτικότητας λαμβάνεται συντηρητικά ίσος με τη μονάδα.

Έλεγχος καθιζήσεων

Η συνολική καθίζηση που αναμένεται να υποστεί η ομάδα των πασσάλων θα οφείλεται αποκλειστικά στην άμεση καθίζηση του αμμόδους στρώματος στο οποίο γίνεται η έμπηξη της αιχμής των πασσάλων. Για τον υπολογισμό της καθίζησης του συστήματος των πασσάλων γίνεται η παραδοχή ότι ο κεφαλόδεσμος των πασσάλων είναι άκαμπτος οπότε οι

πάσσαλοι παρουσιάζουν κοινή καθίζηση. Αν συμβολίσουμε με p_g την κοινή καθίζηση των πασσάλων, τότε για την καθίζηση p_i κάθε πασσάλου i θα ισχύει:

$$p_i = p_g = p'P_i + p' \sum_{j=1, j \neq i}^n (P_j a_{ij})$$

όπου: p' η καθίζηση μεμονωμένου πασσάλου λόγω μοναδιαίου φορτίου

$p' \times P_i$ η καθίζηση του πασσάλου i λόγω του φορτίου του P_i

a_{ij} ο συντελεστής αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων i και j .

$P_i \times a_{ij}$ η καθίζηση του πασσάλου i λόγω του φορτίου P_j του πασσάλου j .

Για τον υπολογισμό της καθίζησης p' (m/kN) εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση:

$$p' = P \times I / (E_s \times D)$$

όπου: $P = 1$ kN, το μοναδιαίο φορτίο

$$E_s = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n (E_{s,i} L_i)$$
 ,ο βαρυκεντρικός μέσος όρος των μέτρων ελαστικότητας των

εδαφικών στρώσεων.

$I = I_0 \times R_k \times R_b \times R_v$, συντελεστής καθίζησης για πασσάλους αιχμής, καθώς μεγαλύτερη συνεισφορά στην φέρουσα ικανότητα των πασσάλων προκύπτει ότι έχει η αντίσταση αιχμής του πασσάλου.

4.3 Στατικές δυσκαμψίες

Η δυναμική απόκριση ανεμογεννητριών, οι οποίες βρίσκονται θεμελιωμένες σε εδαφικούς σχηματισμούς και υποβάλλονται σε δυναμικές διεγέρσεις (άνεμος ή σεισμός), επηρεάζεται άμεσα από το φαινόμενο της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους – θεμελίωσης – ανωδομής. Η απόκριση ενδέχεται να είναι ιδιαίτερος ευαίσθητη στα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υποκείμενων εδαφικών σχηματισμών και η αλληλεπίδραση είναι πιθανόν να επηρεάσει ακόμη και επιβαρυντικά την καταπόνηση της ανωδομής.

Για στοιχεία πεδύλων, για παράδειγμα, που αποτελούν άκαμπτα στοιχεία που αλληλεπιδρούν με το έδαφος, η αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να αποτυπωθεί με κατάλληλες γεωτεχνικές σχέσεις φορτίου-μετατόπισης. Από πολλές απόψεις, η προσομοίωση των εδαφικών ελατηρίων είναι ανάλογη με αυτή των στοιχείων της ανωδομής. Αναζητείται η σχέση μεταξύ της δύναμης που επιβάλλεται σε ένα δομικό στοιχείο και της αντίστοιχης μετατόπισης. Εξαιτίας της φύσης του εδαφικού υλικού, υπάρχουν αβεβαιότητες και συνεπώς κάποιες προσεγγίσεις είναι αναγκαίες. Γι' αυτό και πολλές φορές εκλέγονται τιμές των εδαφικών ιδιοτήτων με σχετικά ελλιπή πληροφόρηση, μέσω της αξιοποίησης κάποιων απλοποιημένων παραμετρικών μελετών, έτσι ώστε να προκύψει μια προσεγγιστική εκτίμηση σχετικά με τη σημασία του κάθε κατασκευαστικού και εδαφοτεχνικού χαρακτηριστικού. Κλείνοντας ως επαναλάβουμε πόσο σημαντική είναι η ορθή κρίση και η εμπειρία του δομοστατικού και του γεωτεχνικού μηχανικού, ώστε να ληφθούν οι κατάλληλες αποφάσεις για την προσομοίωση. Η

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών

αλληλεπίδραση εδάφους–θεμελίωσης–ανωδομής επηρεάζει την καταπόνηση των πυλώνων ανεμογεννητριών, είτε ελαφρυντικά είτε επιβαρυντικά, ανάλογα με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες και την εκάστοτε δυναμική διέγερση. Κατόπιν τούτου, γίνεται σαφές ότι επιβάλλεται να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό των ανεμογεννητριών.

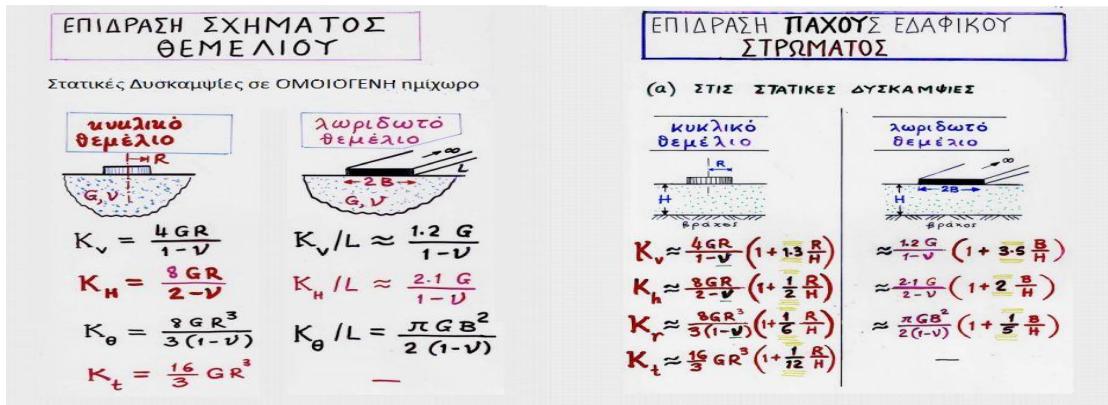
Στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση του εδάφους, στο υπολογιστικό πρόγραμμα SAP2000, χρησιμοποιούνται ελατήρια τόσο στην περίπτωση του επιφανειακού θεμελίου, όσο και στη θεμελίωση με πασσάλους.

Ο Γκαζέτας (1983), υπολογίζει την κατακόρυφη και οριζόντια στατική δυσκαμψία επιφανειακού θεμελίου σε ομοιογενές έδαφος ως εξής:

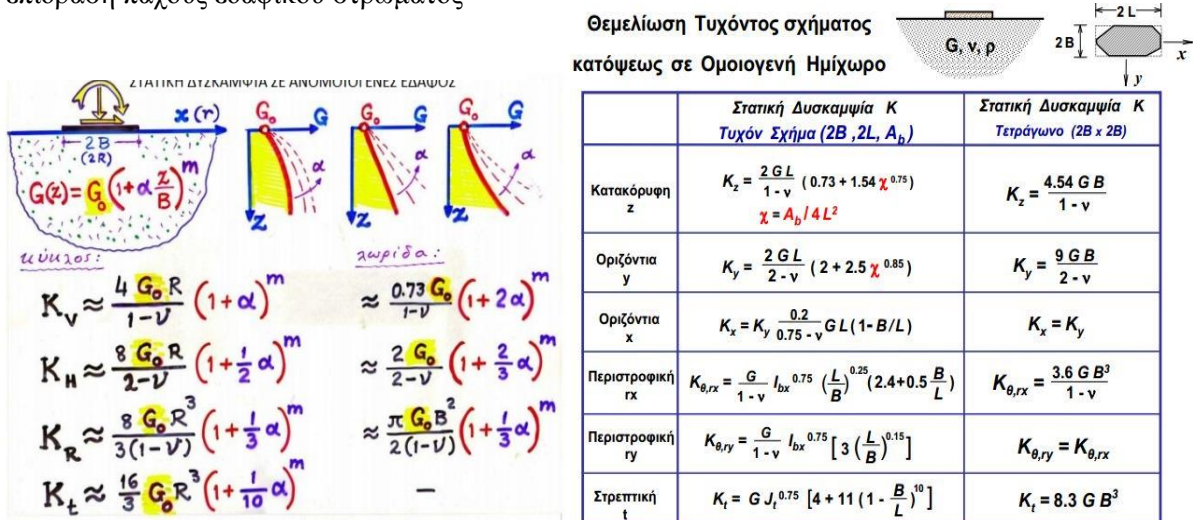
$$\text{Κατακόρυφη δυσκαμψία: } K_V = \frac{4GR}{1-\nu}$$

$$\text{Οριζόντια δυσκαμψία: } K_H = \frac{8GR}{2-\nu}$$

όπου G το μέτρο διάτμησης του εδάφους (MPa), R η ακτίνα του πεδύλου (m), ν ο λόγος Poisson.



Εικόνα 4.8 Στατικές δυσκαμψίες με επίδραση σχήματος θεμελίου σε ομοιογενές έδαφος και επίδραση πάχους εδαφικού στρώματος



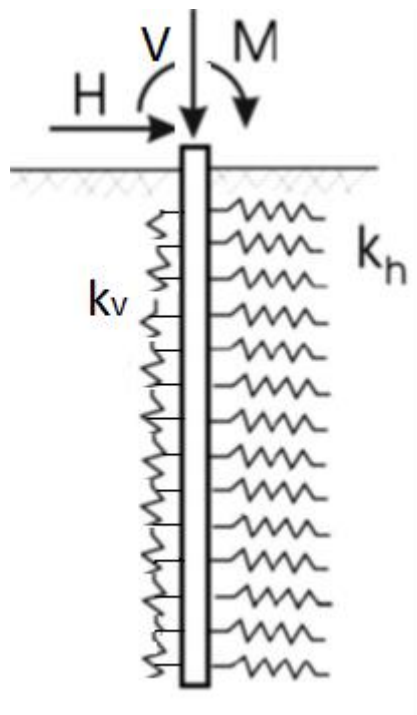
Εικόνα 4.9 Στατική δυσκαμψία σε ανομοιογενές έδαφος και τυχόντος σχήματος σε ομοιογενές

Είναι κοινώς αποδεκτό ότι ο απλούστερος τρόπος προσομοίωσης της δυναμικής αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους είναι μέσω σειράς ελατηρίων Winkler ομοιόμορφα κατανομημένων κατά μήκος της παρειάς του πασσάλου. Αν και προσεγγιστικό, το προσομοίωμα Winkler χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη τόσο για αξονικά όσο και για πλευρικά φορτιζόμενους πασσάλους υποκειμένους σε στατική ή δυναμική φόρτιση (McClelland & Focht 1958, Novak 1974, Randolph & Wroth 1978, Scott 1981, Mylonakis 2001). Η δημοτικότητά του πηγάζει πρωτίστως από την ικανότητά του να παρέχει ρεαλιστικές προβλέψεις για την απόκριση του πασσάλου, να προσομοιώνει τη μεταβολή των εδαφικών ιδιοτήτων με το βάθος και την ακτινική απόσταση από τον πάσσαλο, να προσομοιώνει φαινόμενα ομάδας και να απαιτεί σημαντικά μικρότερο υπολογιστικό κόπο από αυστηρές υπολογιστικές μεθόδους

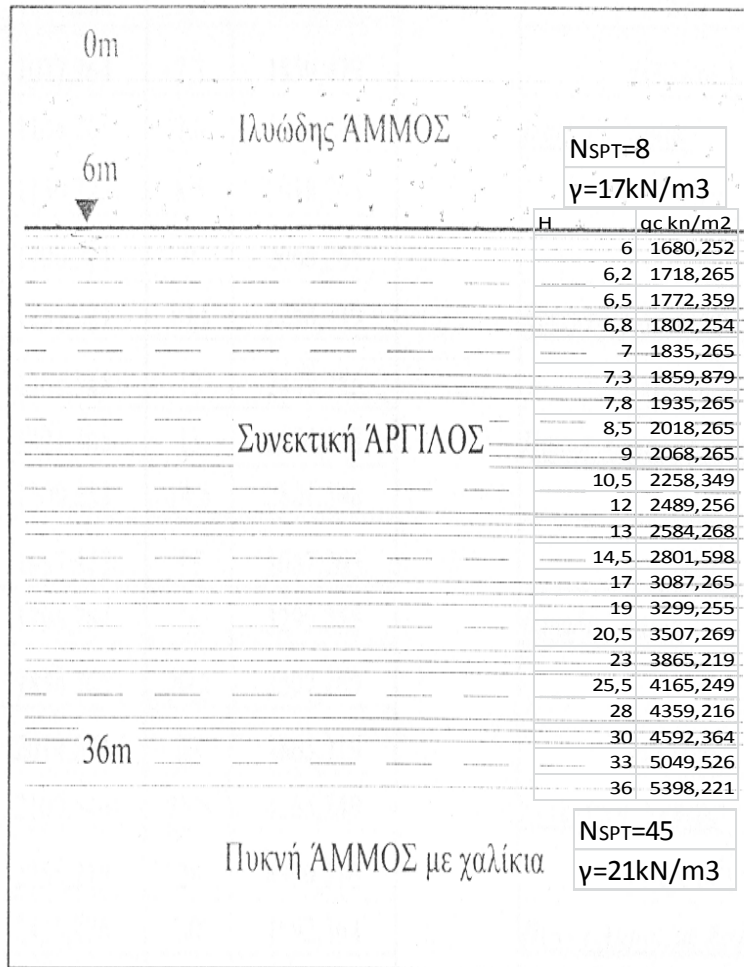
Για τη θεμελίωση με πασσάλους χρησιμοποιούνται ελατήρια οριζόντια και κατακόρυφα κατά μήκος του κάθε πασσάλου με τις εξής σταθερές (Γκαζέτας) :

Οριζόντια ελατήρια $K_h = 1.5 \frac{E_s}{D}$ (kN/m³/m)

Κατακόρυφα ελατήρια $K_v = 0.5 K_h$ (kN/m³/m)



Εικόνα 4.10 Προσομοίωμα του εδάφους κατά το μοντέλο Winkler



Εικόνα 4.11 Στρωματογραφία εδάφους θεμελίωσης με πασσάλους

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΥΡΓΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

5.1 Βελτιστοποίηση

Ο όρος “βέλτιστος σχεδιασμός κατασκευής” μπορεί να ερμηνευθεί με διαφορετικούς τρόπους. Για να αποφευχθούν οι παρεξηγήσεις, είναι σημαντικό να οριστεί ο όρος κατασκευή σύμφωνα με τις αρχές της μηχανικής. Ο όρος αυτός περιγράφει τη διευθέτηση των στοιχείων και /ή των υλικών με σκοπό τη δημιουργία ενός συστήματος ικανού να αναλάβει φορτία σύμφωνα με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Η μέθοδος που εφαρμόζεται για τον σχεδιασμό των κατασκευών είναι μια επαναληπτική διαδικασία η οποία στοχεύει στο βέλτιστο σχεδιασμό.

Η πρόοδος της πληροφορικής δημιούργησε περισσότερες απαιτήσεις στην μηχανική των κατασκευών. Οι βασικές απαιτήσεις που τίθενται γενικά για μία κατασκευή, είναι αυτές της αντοχής και της λειτουργικότητας. Σκοπός του μηχανικού ήταν ανέκαθεν η αυστηρή τήρηση των παραπάνω περιορισμών, σε συνδυασμό όμως με την ικανοποίηση – κατά το δυνατό και άλλων, κυρίως οικονομικής φύσεως απαιτήσεων με τελικό στόχο τη μέγιστη δυνατή απόδοση του έργου. Έτσι, ο βέλτιστος σχεδιασμός, είναι το αντικείμενο έρευνας κάθε μηχανικού ο οποίος στοχεύει στη σχεδίαση ενός μηχανήματος, ενός εξαρτήματος ή ενός κτιρίου το οποίο καλείται να εξυπηρετήσει κάποιες λειτουργικές ανάγκες. Βέλτιστος ονομάζεται ένας σχεδιασμός ο οποίος ικανοποιεί τις κατασκευαστικές προδιαγραφές και τις λειτουργικές απαιτήσεις, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια, όπως είναι το κόστος και το βάρος της κατασκευής. Ως βελτιστοποίηση κατασκευών, μπορεί να οριστεί η λογική διαδικασία διερεύνησης κάποιου σχεδιασμού ο οποίος να υπερτερεί από κάθε άλλη λύση μέσα σε ένα πλαίσιο αντικειμενικών, γεωμετρικών και χαρακτηριστικών περιορισμών.

Στόχος του μηχανικού είναι να βρει έναν συνδυασμό ανεξάρτητων μεταβλητών που λαμβάνουν πραγματικές ή ακέραιες τιμές και ονομάζονται παράμετροι ή μεταβλητές σχεδιασμού (design variables), έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) του προβλήματος. Στα προβλήματα βελτιστοποίησης τίθενται περιορισμοί, όπως είναι το εύρος μέσα στο οποίο παίρνουν τιμές οι παράμετροι σχεδιασμού (move limits), το οποίο καθορίζει το εύρος αναζήτησης, αλλά και άλλες περιοριστικές συναρτήσεις (constraint functions), όπως εκείνες των τάσεων και παραμορφώσεων, που καθορίζουν το χώρο των αποδεκτών λύσεων του προβλήματος.

Για τον υπολογισμό του βέλτιστου σχεδιασμού ακολουθούνται δύο βασικά βήματα :η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης και η επιλογή κατάλληλου αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των παραμέτρων σχεδιασμού, την σχέση μεταξύ τους, ώστε να καθοριστεί η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί του προβλήματος. Η διαδικασία βελτιστοποίησης ολοκληρώνεται επιλέγοντας τον κατάλληλο αλγόριθμο βελτιστοποίησης και τον συνδυασμό του με το δομοστατικό μοντέλο και το μοντέλο βελτιστοποίησης. Βασική προϋπόθεση στην περίπτωση δομικών συστημάτων είναι η έκφραση με μαθηματικούς όρους της συμπεριφοράς του συστήματος, δηλαδή της απόκρισης σε στατικά και δυναμικά φορτία, όπως τάσεις μετατοπίσεις, ιδιοτιμές, φορτία λυγισμού, κλπ.

5.2 Μέθοδοι βέλτιστου σχεδιασμού

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες μεθόδων:

- Μαθηματικές ή αιτιοκρατικές μέθοδοι βελτιστοποίησης
- Εξελικτικές ή δαρβίνειες μέθοδοι βελτιστοποίησης

5.2.1 Μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης

Είναι οι πρώτοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκαν σε προβλήματα κατασκευών, είναι δανεισμένοι από τους τομείς των οικονομικών, των μαθηματικών και της επιχειρησιακής έρευνας και βασίζονται στον μαθηματικό προγραμματισμό (mathematical programming). Αυτές οι τεχνικές βελτιστοποίησης είναι ιδιαίτερα εύχρηστες και αποδοτικές και μπορούν να οδηγήσουν στη βέλτιστη επίλυση προβλημάτων με μεγάλο εύρος πρακτικών εφαρμογών.

Οι τεχνικές βελτιστοποίησης που βασίζονται στις αρχές του μαθηματικού προγραμματισμού γενικά να ταξινομούνται σε πέντε μεγάλες κατηγορίες:

(i) **Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming – LP)**. Οι μέθοδοι γραμμικού προγραμματισμού αντιμετωπίζουν προβλήματα στα οποία τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και οι συναρτήσεις περιορισμών είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών σχεδιασμού. Σε αυτήν την περίπτωση η βέλτιστη λύση βρίσκεται επί του συνόρου μίας ή περισσότερων συναρτήσεων περιορισμού. Σε προβλήματα αυτού του είδους (κυρτά) ένα τοπικό ελάχιστο είναι οπωσδήποτε και καθολικό ελάχιστο του προβλήματος.

(ii) **Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (Non Linear Programming – NLP)**. Είναι οι πιο διαδεδομένες τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού, ιδιαίτερα σε προβλήματα βελτιστοποίησης κατασκευών. Πρόκειται για προβλήματα που έχουν μη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση και/ή μη γραμμικούς περιορισμούς. Τα μη γραμμικά προβλήματα διατυπώνονται ουσιαστικά όπως τα γραμμικά. Η διαφορά εντοπίζεται στα μαθηματικά που χρησιμοποιούνται για την επίλυση τους. Σκοπός είναι η απαρίθμηση των δυνατών λύσεων και η επιλογή της βέλτιστης. Σε αντίθεση με τον γραμμικό προγραμματισμό η επιτρεπτή περιοχή πιθανόν να μην είναι κυρτό σύνολο και η βέλτιστη λύση δεν είναι απαραίτητα να είναι ακραίο σημείο της επιτρεπτής περιοχής του μη γραμμικού προγραμματισμού.

(iii) **Ακέραιος Προγραμματισμός (Integer Programming – IP)**. Οι μέθοδοι αυτές αντιμετωπίζουν προβλήματα στα οποία οι παράμετροι σχεδιασμού δεν είναι συνεχείς, αλλά παίρνουν διακριτές τιμές από κάποιο συγκεκριμένο σύνολο τιμών. Ουσιαστικά αποτελεί πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού του οποίου μερικές ή όλες οι μεταβλητές δέχονται τιμές ακεραίων. Οι επιμέρους κατηγορίες του αποτελούν προβλήματα ακέραιης, μικτής και δυαδικής μορφής.

(iv) **Γεωμετρικός προγραμματισμός (Geometric Programming – GP)**. Αναφέρεται σε μία ειδική κατηγορία προβλημάτων όπου οι συναρτήσεις περιορισμών αλλά και η αντικειμενική συνάρτηση είναι πολυωνυμικής μορφής συναρτήσεις των παραμέτρων σχεδιασμού. Σε προβλήματα αυτού του είδους πρέπει να ισχύει πάντα η αυστηρή προϋπόθεση ότι οι παράμετροι σχεδιασμού λαμβάνουν πάντα θετικές τιμές.

(v) **Δυναμικός προγραμματισμός (Dynamic Programming – DP)**. Χρησιμοποιείται τόσο σε ντετερμινιστικά όσο και σε στοχαστικά προβλήματα. Κύριος στόχος αυτών των μεθόδων είναι να διασπασθεί ένα σχετικά μεγάλο πρόβλημα βελτιστοποίησης σε μικρότερα τα οποία

μπορούν να αντιμετωπισθούν ως ξεχωριστά προβλήματα βέλτιστου σχεδιασμού. Κάθε υποπρόβλημα περιέχει μέρος από τα στοιχεία του καθολικού προβλήματος και μπορεί να επιλυθεί με κάποια από τις προαναφερθείσες μεθοδολογίες. Είναι ουσιαστικά μία τεχνική διαμερισμού μεγάλων προβλημάτων βελτιστοποίησης σε μικρότερα.

5.2.2 Εξελικτικές μέθοδοι βελτιστοποίησης (Evolutionary Algorithms)

Οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι μιμούνται τη διαδικασία της εξέλιξης των ειδών στη φύση, όπως την παρουσίασε πρώτος ο Κάρολος Δαρβίνος. Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική σε ένα ευρύτερο πεδίο προβλημάτων σε σχέση με το πεδίο εφαρμογής των μεθόδων μαθηματικού προγραμματισμού. Σε αντίθεση με τις μεθόδους μαθηματικού προγραμματισμού, χρησιμοποιούν έναν “πληθυσμό” πιθανών λύσεων του προβλήματος. Οι λύσεις αυτές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και μπορούν να αντιμετωπιστούν επίσης ανεξάρτητα η μία από την άλλη, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα αποδοτική την εφαρμογή των μεθόδων αυτών σε παράλληλο υπολογιστικό περιβάλλον. Ο αρχικός πληθυσμός επιλέγεται με τυχαίο τρόπο και στη συνέχεια με τη χρήση κατάλληλων γενετικών μηχανισμών, όπως είναι η *Επιλογή* (Selection), ο *Ανασυνδυασμός* (Recombination) και η *Μετάλλαξη* (Mutation), εξελίσσεται κινούμενος σε όλο και καλύτερες περιοχές του χώρου αναζήτησης μέσω της αρχής της επικράτησης του ισχυρότερου (Survival of the fittest) επιτυγχάνεται ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης.

Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται σήμερα συχνά στο βέλτιστο σχεδιασμό των κατασκευών, με ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι λόγω της τυχαμικότητας στην διερεύνηση του χώρου αναζήτησης έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες για την εύρεση του απόλυτα βέλτιστου σχεδιασμού σε σχέση με τις μαθηματικές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν νομοτελειακά καθορισμένες σχέσεις. Από την άλλη, το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι ο μεγάλος αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, παρόλο που το υπολογιστικό κόστος της κάθε μίας από αυτές είναι σχετικά μικρό, αφού δεν εμπεριέχεται ανάλυση ευαισθησίας.

Οι σημαντικότερες από τις μεθόδους αυτές είναι:

(α) **Η μέθοδος των Γενετικών Αλγορίθμων (Genetic Algorithms – GA).** Η μέθοδος των ΓΑ αναπτύχθηκε από τον J. Holland και τους συνεργάτες του στο πανεπιστήμιο του Michigan. Πρόκειται για μία από τις κυριότερες εξελικτικές μεθόδους, που λόγω της απλής δομής και της ευχρηστίας της έχει βρει εφαρμογή στη βελτιστοποίηση κατασκευών. Βασίζονται στην τυχαία ανασυγκρότηση ενός πληθυσμού και την αξιολόγηση των μελών του μέσω μίας συνάρτησης ποιότητας (Fitness ή Quality function), που σε προβλήματα βελτιστοποίησης ισούται με το άθροισμα της αντικειμενικής συνάρτησης και των παραβιάσεων των συναρτήσεων περιορισμού. Τα μέλη του πληθυσμού των ΓΑ κωδικοποιούνται σε δυαδική (binary) μορφή, ώστε να προσομοιάζουν καλύτερα τα βιολογικά χρωμοσώματα (strings). Με τη χρήση των γενετικών τελεστών του συνδυασμού και της μετάλλαξης, οι ΓΑ επιλέγουν το καλύτερο μέλος του πληθυσμού, δηλαδή αυτό που δίνει την καλύτερη τιμή στη συνάρτηση ποιότητας.

(β) **Η μέθοδος των Στρατηγικών Εξέλιξης (Evolution Strategies – ES).** Η μέθοδος των ΣΕ αναπτύχθηκε αρχικά από τον I. Rechenberg και εν συνεχεία από τον H.P. Schwefel και την ερευνητική του ομάδα. Η μέθοδος αυτή αποτελεί το κύριο αντικείμενο έρευνας της παρούσας διπλωματικής εργασίας και θα περιγραφεί διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

(γ) **Η μέθοδος του Εξελικτικού Προγραμματισμού (Evolutionary Programming – EP)**. Η μέθοδος του ΕΠ αναπτύχθηκε από τους L.J. Fogel et al. και βασίζεται αποκλειστικά στην αρχή της επιλογής του καλύτερου και όχι στη διαδικασία της αναπαραγωγής των ειδών για τον λόγο αυτό έχει μειωμένες δυνατότητες και περιορισμένη αποτελεσματικότητα.

(δ) **Η μέθοδος του Γενετικού Προγραμματισμού (Genetic Programming – GP)**. Η μέθοδος του ΓΠ, η οποία αναπτύχθηκε από τον J.R. Koza, διαφέρει κατά πολύ από τις προαναφερθείσες εξελικτικές μεθοδολογίες· έχει ως στόχο την αυτόματη παραγωγή προγραμμάτων H/Y για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων (π.χ. γεννήτρια τυχαίων αριθμών).

(ε) **Η μέθοδος διαφορικής εξέλιξης (Differential Evolution-DE)**. Η μέθοδος αυτή δίδεται παρακάτω αναλυτικά καθώς είναι η μέθοδος που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσης εργασίας.

5.2.3 Η μέθοδος της Διαφορικής Εξέλιξης (Differential Evolution-DE)

Οι Kenneth Price και Rainer Storn πρότειναν το 1997 μια νέα τεχνική εξελικτικών αλγορίθμων την οποία ονόμασαν Μέθοδο της Διαφορικής Εξέλιξης· αυτή βασίζεται στη λειτουργία της γενετικής για τη δημιουργία απογόνων από χρωμοσώματα των γονέων και όχι από τη διαδικασία της διασταύρωσης.

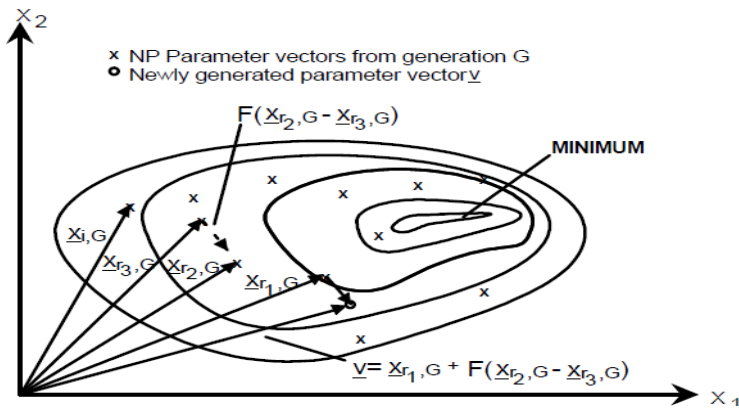
Η μέθοδος της Διαφορικής Εξέλιξης ένα πληθυσμό από NP παραμετρικά διανύσματα $x_{i,g}$, $i=0, 1, 2, \dots, NP-1$, για κάθε γενιά g . Ο αρχικός πληθυσμός επιλέγεται τυχαία αν δεν δίνονται δεδομένα για το σύστημα. Η μέθοδος αυτή δημιουργεί νέα διανύσματα προσθέτοντας το διάνυσμα της σταθμισμένης διαφοράς δύο διανυσμάτων του πληθυσμού σε ένα τρίτο. Αν το νέο διάνυσμα αντιστοιχεί σε μία καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με ένα άλλο μέλος του πληθυσμού, τότε αυτό το νέο διάνυσμα αντικαθιστά το αρχικό. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ του νέου διανύσματος και όλων των μελών του πληθυσμού εκτός των τριών που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του. Επιπλέον, σε κάθε γενιά ορίζεται το διάνυσμα $x_{best,g}$, το οποίο δίνει την καλύτερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση, ώστε να παρακολουθείται η πρόοδος κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Σημειώνεται ότι κάθε απόφαση έχει την ίδια πιθανότητα να ληφθεί αν δεν ορίζεται διαφορετικά.

Παραλλαγή DE1

Σύμφωνα με την πρώτη παραλλαγή, δημιουργείται ένα δοκιμαστικό διάνυσμα $v_{i,g+1}$ το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$v_{i,g+1} = x_{r1,g} + F \cdot (x_{r2,g} - x_{r3,g})$$

όπου r_1, r_2, r_3 είναι διανύσματα που επιλέγονται τυχαία από το διάστημα $[0, NP-1]$ και είναι διαφορετικά μεταξύ τους. Ο συντελεστής μετάλλαξης F είναι πραγματική σταθερά ($F > 0$) και ρυθμίζει την αύξηση της διαφοράς $(x_{r2,g} - x_{r3,g})$. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα δισδιάστατο πρόβλημα και τα διανύσματα που συμμετέχουν στη μέθοδο DE1.



Εικόνα 5.1 Δισδιάστατο παράδειγμα αντικειμενικής συνάρτησης που δείχνει τις περιβάλλουσες γραμμές και την διαδικασία δημιουργίας διανύσματος v με την παραλλαγή DE1.

Στη συνέχεια, η διαδικασία της διασταύρωσης δημιουργεί το δοκιμαστικό διάνυσμα $u_{i,g+1} = [u_{1,i,g+1}, u_{2,i,g+1}, \dots, u_{D,i,g+1}]^T$ το οποίο ορίζεται από στοιχεία του διανύσματος $x_{i,g}$ και του δοκιμαστικού διανύσματος $v_{i,g+1}$ ανάλογα με το αν η τιμή του $v_{i,g+1}$ είναι διαφορετική από εκείνη του $x_{i,g}$. Τέλος, με τη διαδικασία της σύγκρισης των διανυσμάτων x και u επιλέγεται το καλύτερο με κριτήριο τη βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης f :

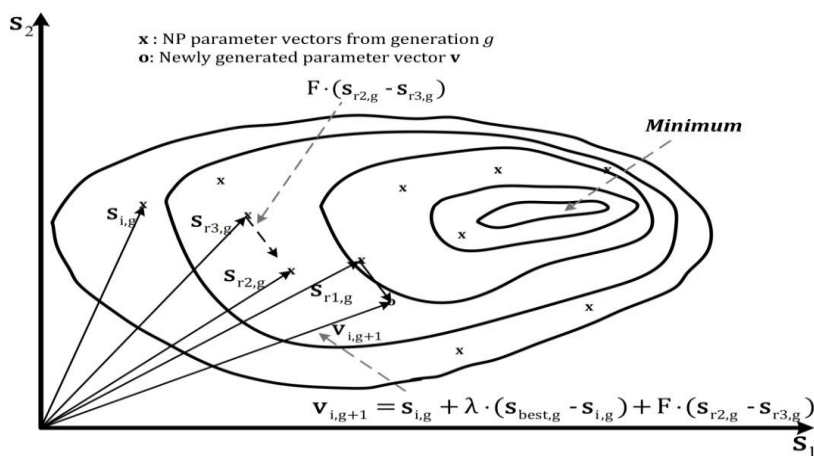
$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g+1}, & \text{αν } f(u_{i,g+1}) \leq f(x_{i,g}) \\ \text{αλλιώς} \\ x_{i,g} \end{cases}$$

Παραλλαγή DE2

Η παραλλαγή αυτή έχει παρόμοια λειτουργία με την DE1, μόνο που στην περίπτωση αυτή το διάνυσμα $v_{i,g+1}$ δημιουργείται με την σχέση:

$$v_{i,g+1} = x_{i,g} + \lambda \cdot (x_{best,g} - x_{i,g}) + F \cdot (x_{r2,g} - x_{r3,g})$$

πριν τον υπολογισμό του $x_{i,g+1}$. Η παράμετρος λ είναι μια επιπλέον μεταβλητή ρύθμισης που εισάγει το διάνυσμα $x_{best,g}$ για να ενισχύσει την αξιοπιστία της παραλλαγής. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο για μη κρίσιμες αντικειμενικές συναρτήσεις.



Εικόνα 5.2 Παράδειγμα δύο διαστάσεων μιας αντικειμενικής συνάρτησης που δείχνει τις περιβάλλουσες γραμμές και την διαδικασία δημιουργίας διανύσματος v με την παραλλαγή DE2

5.3 Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης πύργου ανεμογεννήτριας

Για την διατύπωση του προβλήματος της βελτιστοποίησης πρέπει αρχικά να καθοριστούν οι στόχοι σχεδιασμού του συστήματος. Έπειτα, γίνεται η επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού και των προκαθορισμένων παραμέτρων και τέλος τίθενται οι σχεδιαστικοί περιορισμοί.

5.3.1 Στόχος σχεδιασμού

Σε κάθε πρόβλημα μπορεί να υπάρχουν πολλές διαφορετικές λύσεις, άλλες καλύτερες και άλλες χειρότερες ` μία μόνο όμως είναι η βέλτιστη. Για να γίνει ο διαχωρισμός των σχεδιασμών είναι αναγκαίο να υπάρχουν κάποιο κριτήριο για την αξιολόγηση της κάθε σχεδιαστικής λύσης και για τη μεταξύ τους σύγκριση. *Στόχος λειτουργίας* ονομάζεται η λειτουργία η οποία προσδιορίζει αυτό το κριτήριο και εξαρτάται από τις μεταβλητές σχεδιασμού. Στόχος λειτουργίας είναι η βελτιστοποίηση του βάρους, η ελαχιστοποίηση του κόστους, η μεγιστοποίηση του κέρδους και το πρόβλημα των απωλειών ενέργειας. Η κατάλληλη επιλογή του στόχου λειτουργίας είναι πολύ σημαντική κατά τη διατύπωση του μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης, με την ταυτόχρονη ορθή επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού.

Όσο αφορά τον πύργο της ανεμογεννήτριας, ο επιτυχημένος δομικός σχεδιασμός του περιλαμβάνει την εξασφάλιση της υψηλής απόδοσης, της ασφάλειας και του οικονομίας του συστήματος. Ο πύργος φέρει τα φορτία της μηχανής, δέχεται την ανεμοπίεση, στηρίζει όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό του συστήματος. Χρειάζεται να είναι εύκολη η μεταφορά των τμημάτων στο σημείο κατασκευής, η συναρμολόγηση και η ανέγερση τους. Η πρόσβαση οφείλει να είναι εύκολη, για την τοποθέτηση αλλά και την συντήρηση του. Τέλος, η αισθητική ολόκληρης της κατασκευής πρέπει να συνυπολογίζεται καθώς και η τελική μορφή αφού καλό είναι να εναρμονίζεται με το περιβάλλον όσο το δυνατό καλύτερα. Δυστυχώς δεν υπάρχει ένα κριτήριο που να συμπεριλαμβάνει όλες αυτές τις παραμέτρους. Είναι λογικό λοιπόν το γεγονός ότι ο πετυχημένος δομικός σχεδιασμός του πύργου να περιορίζεται στην επιθυμία για επίτευξη της καλής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.

Στην παρούσα εργασία, ο δομικός σχεδιασμός με το ελάχιστο βάρος της κατασκευής αποτελεί τον κύριο στόχο. Το βάρος έχει σημαντικό ρόλο τόσο στη λειτουργία όσο και του κόστους της κατασκευής.

5.3.2 Μεταβλητές σχεδιασμού

Μεταβλητές σχεδιασμού είναι οι παράμετροι με τις τιμές των οποίων ορίζεται το πρόβλημα του σχεδιασμού. Η ορθή επιλογή αυτών είναι βασική για την διατύπωση του προβλήματος, διαφορετικά ο βέλτιστος σχεδιασμός που λαμβάνεται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης μπορεί να μην είναι εφικτός. Πέρα από την επιλογή σημαντικό είναι η λειτουργία προς βελτιστοποίηση να είναι επαρκώς εξαρτημένη από όλες τις παραμέτρους σχεδιασμού.

Στον πύργο της ανεμογεννήτριας επιλέγεται να αλλάζουν η εξωτερική διάμετρος D και το πάχος, t , του τοιχώματος του πύργου κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

5.3.3 Καθορισμένες παράμετροι

Στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης που εξετάζεται ορισμένοι παράμετροι έχουν προκαθορισμένες τιμές, ώστε να περιοριστεί η διάστασή του:

- ✓ σωληνοειδής μονοπολική διαμόρφωση
- ✓ το συνολικό ύψος H, (80m, 100m, 120m, 140m)
- ✓ η ποιότητα του χάλυβα (S235,S450)
- ✓ ο τύπος της εξίσωσης που δίνει την μείωση της διαμέτρου κατά ύψος είναι $D(z) = -a \cdot z/15 + D_0$ (γραμμική), όπου z το μεταβαλλόμενο ύψος και D_0 η διάμετρος στη βάση.
- ✓ το πάχος της διατομής ανά 2,5m διατηρείται σταθερό

5.3.4 Περιορισμοί

Για να πετύχει ο σχεδιασμός του δομικού συστήματος, οι σχεδιαστικές παράμετροι πρέπει να πάρουν συγκεκριμένες τιμές. Το εύρος των τιμών που είναι δυνατόν να πάρουν ορίζεται με μορφή ανισοτήτων και ισοτήτων οι οποίες ανταποκρίνονται σε όλες τις κανονιστικές διατάξεις που λαμβάνονται υπόψιν και εισάγονται στο μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης. Είναι αναγκαίο, βέβαια, οι περιορισμοί αυτοί να είναι εξαρτημένοι με τουλάχιστον μία σχεδιαστική μεταβλητή.

Σε δομοστατικά προβλήματα οι συνήθεις περιορισμοί αφορούν τις τάσεις και παραμορφώσεις, των οποίων οι τιμές δεν πρέπει να ξεπερνούν συγκεκριμένα όρια. Πολλές φορές, ο μηχανικός θέτει επιπλέον περιορισμούς λόγω αβεβαιότητας κατά τον καθορισμό του προβλήματος ή εξαιτίας της απειρίας του. Αυτοί συνήθως δεν απαιτούνται καθώς είναι εξαρτημένοι από άλλους ήδη υπάρχοντες περιορισμούς. Η χρήση πρόσθετων περιορισμών μπορεί να χρειάζεται παραπάνω υπολογιστική προσπάθεια, τελικά, χωρίς κανένα πρακτικό κέρδος.

Για τον πύργο της ανεμογεννήτριας που εξετάζεται εισάγονται σχεδιαστικοί περιορισμοί που αφορούν την εξωτερική διάμετρο της βάσης και της κορυφής του πύργου, το πάχος του τοιχώματος, τη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα του πύργου, την πλαστική οριακή αντοχή του, την αντοχή σε λυγισμό και τη μετατόπιση της κορυφής:

- Περιορισμός στην εξωτερική διάμετρο της βάσης του πύργου

Η εξωτερική διάμετρος, D_0 , δεν μπορεί να ξεπερνά τα 6 μέτρα. Το κάτω όριο που τίθεται είναι τέτοιο ώστε να είναι μεγαλύτερη η διάμετρος της βάσης και να μειώνεται καθ' ύψος. Έτσι έχουμε :

$$D_t \leq D_0 \leq 6$$

- Περιορισμός στην εξωτερική διάμετρο της κορυφής του πύργου

Η εξωτερική διάμετρος της κορυφής, D_t , του πύργου δεν μπορεί να ξεπερνά το πλάτος του θαλάμου (nacelle) της ανεμογεννήτριας. Για τους τύπους της ανεμογεννήτριας που εξετάζονται έχουμε τα 3.4m, 3.65m, 4m για τους τύπους V80,V90,V112 αντίστοιχα. Επιπλέον πρέπει να τεθεί ένα κάτω όριο ώστε η εξωτερική διάμετρος να μην μηδενίζεται κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Έτσι έχουμε αντίστοιχα :

$$2 \leq D_t \leq 3.4$$

$$2 \leq D_t \leq 3.65$$

$$2 \leq D_t \leq 4$$

- Περιορισμός στο πάχος του τοιχώματος

Για να μπορεί να επεξεργαστεί ο χάλυβας σε κυλινδρική μορφή το μέγιστο πάχος που μπορεί να έχει είναι:

$$\frac{D_i}{t} \leq 90\varepsilon^2, \quad \text{όπου } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

- Περιορισμός στη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα του πύργου

Η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα του πύργου, f_n , πρέπει να παραμείνει πάνω από τη μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας, f_r , του κάθε τύπου ανεμογεννήτριας που εξετάζεται πολλαπλασιαζόμενη με ένα συντελεστή ασφαλείας μεταξύ 1,1 και 2, ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο του συντονισμού κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Θέτοντας τον συντελεστή ασφαλείας 1,1 έχουμε:

$$1.1 \cdot f_r \leq f_n$$

- Περιορισμός στη μετατόπιση της κορυφής του πύργου

Η μέγιστη μετατόπιση της κορυφής του πύργου, u_t , δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% του συνολικού ύψους του πύργου, H , ώστε να αποτραπεί υπερβολική μετακίνηση της ανεμογεννήτριας:

$$u_t \leq 0.01H$$

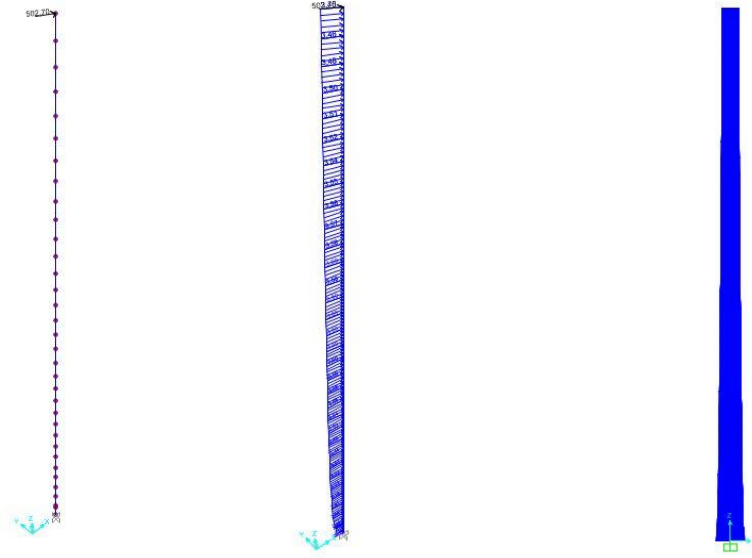
ΕΦΑΡΜΟΓΗ –ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στα προηγούμενα κεφάλαια, παρουσιάστηκε θεωρητικά κυρίως η ανάλυση σχεδιασμού του πύργου της ανεμογεννήτριας, της θεμελίωσής της καθώς και της βελτιστοποίησης μαζί με την διατύπωση του προβλήματος για το βέλτιστο σχεδιασμό του πύργου. Η εφαρμογή της βελτιστοποίησης και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δίνονται σε αυτό το κεφάλαιο και επιπλέον γίνεται σύγκριση και σχολιασμός αυτών.

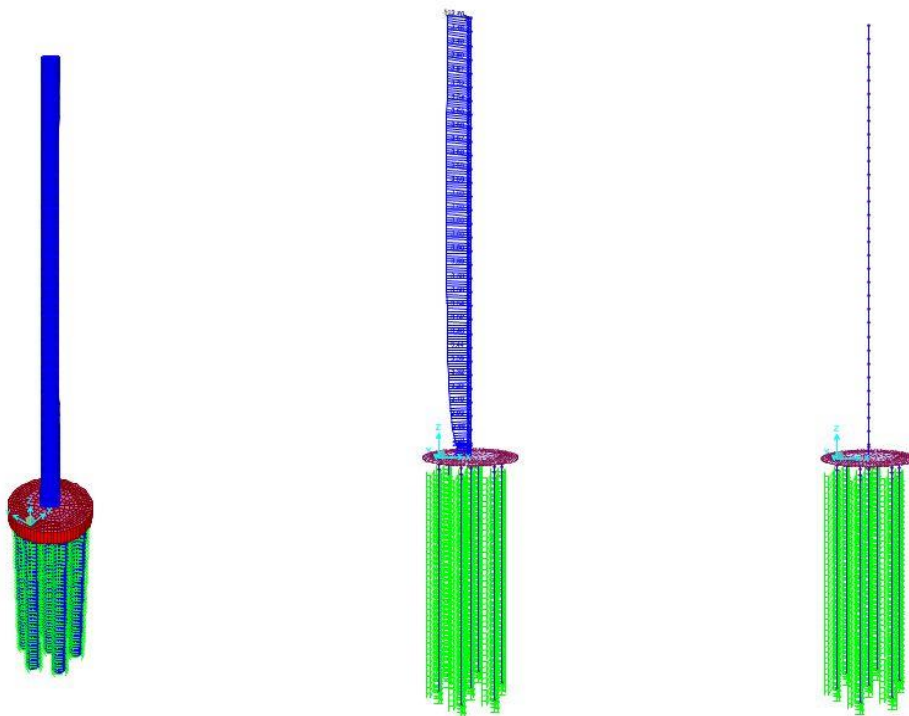
6.1 Περιγραφή της μεθοδολογίας

Αρχικά σχεδιάστηκαν τα απαιτούμενα μοντέλα τα οποία προσομοιάζουν τον πύργο της ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων SAP2000. Τα μοντέλα έχουν ύψος 80, 100, 120, 140 μέτρα το καθένα. Ο σχεδιασμός έγινε με στοιχεία δοκού (beam elements) μεταβλητής διατομής με γραμμικό τρόπο καθ' ύψος με σταθερό πάχος του τοιχώματος ανά 2,5μέτρα. Δημιουργήθηκαν μοντέλα με πάκτωση στη βάση τους, με πλάκα σκυροδέματος και με ομάδα πασσάλων.

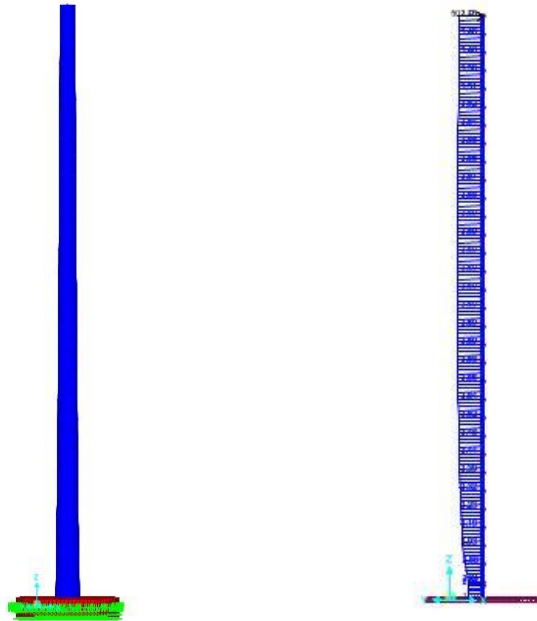
Κατόπιν, εφαρμόστηκαν τα φορτία που ασκούνται στον πύργο όπως αναλύονται στο Κεφάλαιο 3. Το βάρος της ανεμογεννήτριας προσομοιώνεται με ένα κατακόρυφο φορτίο που ασκείται στην κορυφή του πύργου και μία συγκεντρωμένη ροπή λόγω της εκκεντρότητας του σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα του πύργου. Το βάρος είναι σε κάθε μοντέλο διαφορετικό, ανάλογα με ποιο τύπο ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούμε κάθε φορά.(Vestas V80-2MW, V90-3MW, V112-3MW) και δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρία ως άθροισμα του βάρους του θαλάμου και του ρότορα. Σημειώνεται ότι το συγκεντρωμένο οριζόντιο φορτίο λόγω του ανέμου είναι διαφορετικό για κάθε τύπο ανεμογεννήτριας και εξαρτάται από το μήκος των πτερυγίων. Επιπλέον, για το κατανεμημένο φορτίο του ανέμου καθ' ύψος του πύργου εφαρμόστηκε ο προσεγγιστικός τύπος που δίνει την κατανομή της ανεμοπίεσης (Κεφάλαιο 3, παρ.3.2.1) και όχι όπως ορίζεται από τον Ευρωκώδικα. Τέλος, εφαρμόστηκαν οι συνδυασμοί φορτίσεως, όπως αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3 (παρ. 3.2.2) και παράλληλα τοποθετήθηκαν οι διαφορετικοί τύποι θεμελίωσης στα μοντέλα (πάκτωση, πέδιλο και πάσσαλοι). Παρακάτω (Εικόνα 6.1) παρατίθεται ενδεικτικά η σχεδιαστική προσομοίωση του πύργου και μαζί με τα φορτία για το μοντέλο των 80 μέτρων. Παρομοίως σχεδιάστηκαν και οι υπόλοιποι τρεις πύργοι ύψους 100,120,140 μέτρων.



Εικόνα 6.1 Συγκεντρωμένη δύναμη ανέμου στην κορυφή και κατανομή ανεμοπίεσης στο μοντέλο πάκτωση 80m V80-2MW



Εικόνα 6.2 Συγκεντρωμένη δύναμη ανέμου στην κορυφή και κατανομή ανεμοπίεσης στο μοντέλο πασσάλι 80m V80-2MW



Εικόνα 6.3 Συγκεντρωμένη δύναμη ανέμου στην κορυφή και κατανομή ανεμοπίεσης στο μοντέλο επιφανειακό πέδιλο 80m V80-2MW

Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή των μοντέλων στο πρόγραμμα βελτιστοποίησης Optimus. Στο πρόγραμμα διατυπώθηκε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης με βάση τις μεταβλητές σχεδιασμού, τις προκαθορισμένες παραμέτρους και τους σχεδιαστικούς περιορισμούς σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 5. Η βελτιστοποίηση έγινε για δύο ποιότητες χάλυβα (S235,S450) για κάθε ένα από τα μοντέλα με βάση τους Ευρωκώδικες.

Το βέλτιστο βάρος της κατασκευής για κάθε περίπτωση υπολογίστηκε αυτόματα από το πρόγραμμα ως συνάρτηση των γεωμετρικών της στοιχείων, δηλαδή της διαμέτρου και πάχους της εγκάρσιας διατομής καθ' ύψος, με το υλικό κατασκευής (χάλυβα). Για να υπολογιστεί το κόστος κατασκευής, το βάρος κάθε κατασκευής πολλαπλασιάστηκε με αυξητικό συντελεστή ανάλογο της ποιότητας του κάθε χάλυβα. Οι συντελεστές αυτοί συμπεριλαμβάνουν το κόστος παραγωγής και επεξεργασίας του υλικού, τη μεταφορά, τη συναρμολόγηση, καθώς και δευτερεύοντα στοιχεία της κατασκευής, όπως φλάντζες συνδέσεως, κοχλίες, σκάλες κ.ά.

Ακολούθως, για να υπολογιστεί το συνολικό κόστος της ανεμογεννήτριας προστέθηκε στο παραπάνω κόστος κατασκευής του πύργου, το κόστος του ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού της ανεμογεννήτριας και το κόστος της θεμελίωσης. Το κόστος του ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού δεν είναι γενικά σταθερό, αλλά υπόκειται στους νόμους της αγοράς και της ζήτησης.

6.2 Στοιχεία δεδομένων

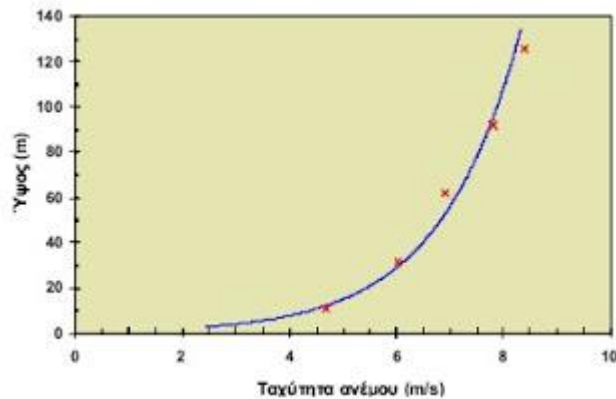
Παρακάτω παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας όσο αφορά τα στοιχεία της παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, του αιολικού δυναμικού και τα οικονομικά στοιχεία.

6.2.1 Στοιχεία αιολικού δυναμικού

Η σχέση για την εξαγόμενη ισχύ από μια Α/Γ δείχνει ότι η ενεργειακή παραγωγή της Α/Γ εξαρτάται από την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στη θέση, την πυκνότητα του αέρα, το μέγεθος του δρομέα και τον τεχνικό σχεδιασμό.

Ειδικά, το ύψος του πύργου επηρεάζει σημαντικά την ενεργειακή παραγωγή, λόγω της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος επάνω από το επίπεδο του εδάφους, φαινόμενο γνωστό ως διάτμηση του ανέμου. Ο βαθμός της διάτμησης του ανέμου εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες, την ατμοσφαιρική μίξη και την τραχύτητα του εδάφους.

Η τραχύτητα του εδάφους επιδρά στη διάτμηση του ανέμου καθορίζοντας το πόσο επιβραδύνεται ο άνεμος κοντά το έδαφος. Σε περιοχές με υψηλό βαθμό τραχύτητας, όπως τα δάση ή οι πόλεις, οι ταχύτητες του ανέμου κοντά στην επιφάνεια τείνουν να είναι μικρές και η διάτμηση του ανέμου μεγάλη, ενώ το αντίστροφο ισχύει σε περιοχές με μικρή τραχύτητα, όπως είναι οι επίπεδοι, ανοικτοί αγροί. Η διάτμηση του ανέμου μπορεί να ελαττωθεί πολύ ή να εξαλειφθεί όπου υπάρχει μια απότομη αλλαγή στο ύψος του πεδίου, όπως μια απότομη ακρογιαλιά ή κορυφογραμμή.



Εικόνα 6.4 Πιθανή μορφή του οριακού στρώματος της ταχύτητας του ανέμου. Εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου από το ύψος

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών

Ο άνεμος θεωρήθηκε ότι φυσάει κατά μία και μοναδική ευνοϊκή διεύθυνση και οι ταχύτητες αναφοράς, δηλαδή η μέση ετήσια ταχύτητα προέκυψε από επί τόπου μετρήσεις σε ύψος 10 μέτρων, μια συνηθισμένη διαδικασία μέτρησης αιολικού δυναμικού. Το φάσμα των ταχυτήτων είναι από 3 m/s έως 12 m/s με βήμα 0,5m/s. Για να γίνει αναγωγή στο προκαθορισμένα ύψη των ανεμογεννητριών χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος :

$$V_h = \overline{V_{ref}} \frac{\ln \frac{h}{z_o}}{\ln \frac{h_{ref}}{z_o}}$$

όπου V_h είναι η ταχύτητα του ανέμου (m/s) στο υψόμετρο που βρίσκεται η τουρμπίνα της ανεμογεννήτριας, V_{ref} είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς h_{ref} (10m) και z_o το μήκος τραχύτητας της περιοχής (m). Η περιοχή θεωρείται ύπαιθρος ,χωρίς ψηλά κτίρια και πυκνή βλάστηση, άρα ισούται με 0,01.

Τα αποτελέσματα της αναγωγής με εφαρμογή του παραπάνω τύπου υπολογίστηκαν με χρήση του EXCEL και παρατίθενται παρακάτω :

Ταχ.αναφοράς στα 10m Vref (m/s)	Ταχύτητα ανέμου (Vh) σε m/s			
	80m	100m	120m	140m
3	3,9031	4,0000	4,0792	4,1461
3,5	4,5536	4,6667	4,7590	4,8371
4	5,2041	5,3333	5,4389	5,5282
4,5	5,8546	6,0000	6,1188	6,2192
5	6,5051	6,6667	6,7986	6,9102
5,5	7,1557	7,3333	7,4785	7,6012
6	7,8062	8,0000	8,1584	8,2923
6,5	8,4567	8,6667	8,8382	8,9833
7	9,1072	9,3333	9,5181	9,6743
7,5	9,7577	10,0000	10,1980	10,3653
8	10,4082	10,6667	10,8778	11,0563
8,5	11,0588	11,3333	11,5577	11,7474
9	11,7093	12,0000	12,2375	12,4384
9,5	12,3598	12,6667	12,9174	13,1294
10	13,0103	13,3333	13,5973	13,8204
10,5	13,6608	14,0000	14,2771	14,5114
11	14,3113	14,6667	14,9570	15,2025
11,5	14,9618	15,3333	15,6369	15,8935
12	15,6124	16,0000	16,3167	16,5845

Πίνακας 6.1 Ταχύτητες ανέμου στο ύψος κάθε πύργου

Παρατηρούμε ότι για ταχύτητα αναφοράς ίση με 3 m/s η ανεμογεννήτρια σε ύψος 80 μέτρων με αναγωγή της ταχύτητας στο υψόμετρο αυτό δεν υπερβαίνει την οριακή ταχύτητα των 4 m/s που χρειάζονται τα μοντέλα ανεμογεννήτριας για να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα, οπότε αυτή η τιμή θα εξαιρεθεί από τους επόμενους υπολογισμούς.

6.2.2 Στοιχεία για την πυκνότητα του αέρα

Η πυκνότητα του αέρα αλλάζει σε συνάρτηση με την ατμοσφαιρική πίεση και τη θερμοκρασία σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\rho = 1.225 \frac{288.15}{T} \frac{p}{1013.3}$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3), T η θερμοκρασία (K) και p η ατμοσφαιρική πίεση (mb).

Η θερμοκρασία θεωρείται σταθερή και ίση με 20°C ($=293\text{K}$), η δε ατμοσφαιρική πίεση εξαρτάται από το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται οι ανεμογεννήτριες και δίνεται από τον τύπο :

$$p = 0.1325(1 - 0.000022557z)^{5.25588}$$

όπου z το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται κάθε ανεμογεννήτρια.

Με εφαρμογή των παραπάνω τύπων στο EXCEL προκύπτει:

Ύψος(m)	Πίεση p(mb)	Πυκνότητα $\rho(\text{kg/m}^3)$
80	100367,661	1,19328135
100	100129,4744	1,190449525
120	99891,7457	1,187623144
140	99654,47425	1,1848022

Πίνακας 6.2 Ατμοσφαιρική πίεση-πυκνότητα στο ύψος κάθε πύργου

6.2.3 Στοιχεία ηλεκτροπαραγωγής

Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μιας ανεμογεννήτριας δίνεται από την σχέση:

$$P_{el} = \frac{1}{2} n \rho A c_p v_w^3$$

όπου P_{el} είναι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (Watt), n η συνολική απόδοση της γεννήτριας (δίνεται από τους κατασκευαστές μέσω του συντελεστή c_p), ρ η πυκνότητα του αέρα ($\rho=1,225\text{kg/m}^3$) στο επίπεδο της θάλασσας, A επιφάνεια σάρωσης (m^2), c_p ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος, v_w η ταχύτητα του ανέμου(m/s).

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών

Η επιφάνεια σάρωσης για κάθε τύπο ανεμογεννήτριας φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

μοντέλο	A(m ²)
V80 2MW	5027
V90 3MW	6362
V112 3MW	9852

Πίνακας 6.3 Επιφάνεια σάρωσης

Επομένως προκύπτει:

Vref (m/s)	Vestas V80-2MW		Vestas V90-3MW			Vestas V112-3MW		
	Παραγόμενη ισχύς		παραγόμενη ισχύς Pel(kW)			παραγόμενη ισχύς Pel(kW)		
	80m	100m	80m	100m	120m	100m	120m	140m
3	73,11916	78,51523	92,53711	99,36619	112,8272	153,8755	174,7208	183,0295
3,5	116,1105	124,6793	146,9455	157,7898	179,1655	244,3486	277,4502	290,644
4	173,3195	186,1102	219,3472	235,5347	267,4423	364,7419	414,1531	433,8476
4,5	246,7771	264,9889	312,3128	335,3609	380,7919	519,3297	589,6828	617,7244
5	338,5146	363,4964	428,4126	460,0287	522,3483	712,3864	808,8927	847,3586
5,5	450,5629	483,8137	570,2171	612,2982	695,2456	948,1864	1076,636	1127,834
6	584,9532	628,1218	740,2969	794,9296	902,6179	1231,004	1397,767	1464,236
6,5	743,7166	798,6016	941,2224	1010,683	1147,599	1565,113	1777,137	1861,647
7	928,8841	997,4342	1175,564	1262,319	1433,324	1954,788	2219,602	2325,152
7,5	1142,487	1226,8	1445,892	1552,597	1762,926	2404,304	2730,013	2859,835
8	1386,556	1488,881	1754,778	1884,277	2139,539	2917,935	3000	3000
8,5	1663,122	1785,858	2104,791	2260,121	2566,297	3499,955	3000	3000
9	1974,217	2000	2498,502	2682,887	3000	3000	3000	3000
9,5	2000	2000	2938,482	3000	3000	3000	3000	3000
10	2000	2000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
10,5	2000	2000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
11	2000	2000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
11,5	2000	2000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
12	2000	2000	3000	3000	3000	3000	3000	3000

Πίνακας 6.4 Παραγόμενη Ηλεκτρική Ισχύς για κάθε πύργο και τύπο ανεμογεννήτριας

Για τον υπολογισμό των παραγόμενων κιλοβατώραν ανά έτος πολλαπλασιάζουμε την παραγόμενη συνολική ισχύ με 365 (μέρες) επί 24 (ώρες) επί ενός συντελεστή ίσο με 0,30 που

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών

είναι οι ώρες που φυσάει ο άνεμος ως ποσοστό των συνολικών ωρών του έτους. Με εφαρμογή των παραπάνω στο EXCEL παίρνουμε :

Vref (m/s)	Vestas V80-2MW		Vestas V90-3MW			Vestas V112-3MW		
	KWh		KWh			kW		
	80m	100m	80m	100m	120m	100m	120m	140m
3	192157,1	206338	243187,5	261134,4	296510	404384,7	459166,3	481001,4
3,5	305138,4	327657,1	386172,8	414671,7	470846,9	642148	729139,2	763812,4
4	455483,6	489097,5	576444,5	618985,1	702838,5	958541,6	1088394	1140151
4,5	648530,3	696390,8	820757,9	881328,5	1000721	1364798	1549686	1623380
5	889616,4	955268,6	1125868	1208955	1372731	1872152	2125770	2226858
5,5	1184079	1271462	1498531	1609120	1827105	2491834	2829400	2963949
6	1537257	1650704	1945500	2089075	2372080	3235078	3673331	3848011
6,5	1954487	2098725	2473532	2656075	3015891	4113117	4670317	4892408
7	2441107	2621257	3089382	3317374	3766775	5137184	5833113	6110499
7,5	3002455	3224031	3799805	4080224	4632968	6318512	7174474	7515647
8	3643869	3912780	4611556	4951881	5622708	7668333	7884000	7884000
8,5	4370685	4693234	5531390	5939598	6744229	9197881	7884000	7884000
9	5188243	5256000	6566063	7050628	7884000	7884000	7884000	7884000
9,5	5256000	5256000	7722330	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000
10	5256000	5256000	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000
10,5	5256000	5256000	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000
11	5256000	5256000	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000
11,5	5256000	5256000	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000
12	5256000	5256000	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000

Πίνακας 6.5 Παραγόμενες κιλοβατώρες ανά έτος για κάθε πύργο και τύπο ανεμογεννήτριας

6.2.4 Οικονομικά στοιχεία

Η τιμή του χάλυβα ανά κιλό περιλαμβάνει το κόστος παραγωγής και επεξεργασίας του υλικού, τη μεταφορά, τη συναρμολόγηση, καθώς και άλλα δευτερεύοντα στοιχεία της κατασκευής, όπως φλάντζες συνδέσεως, κοχλίες, σκάλες κ.ά.. Δίνεται για κάθε ποιότητα χάλυβα ως εξής :

χάλυβας S235 → 1,7 ευρώ / kg

χάλυβας S450 → 2,7 ευρώ / kg

Το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού του μοντέλου της ανεμογεννήτριας υπόκειται στους νόμους της αγοράς και της ζήτησης, οπότε δεν υπάρχει κάποια σταθερή αξία. Ωστόσο, το κόστος του μπορεί να θεωρηθεί ως 1€/kW, δηλαδή 2.000.000€ σύνολο για το μοντέλο Vestas V80-2MW και 3.000.000€ για τα V90-3MW και V112-3MW.

Η τιμή πώλησης της κιλοβατώρας (kWh) μπορεί να θεωρηθεί με βάση τα νέα ευρωπαϊκά δεδομένα ως 0,05 €/KWh. Αυτή η τιμή είναι η τελική και έχουν αφαιρεθεί το κόστος

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών

συντήρησης και επισκευής κατά την λειτουργία της ανεμογεννήτριας ανά κιλοβατώρα (kWh). Με εφαρμογή αυτών, μπορούμε να βρούμε τα μεικτά κέρδη κάθε ανεμογεννήτριας για κάθε ύψος και για ένα έτος:

Vref (m/s)	Vestas V112-3MW			Vestas V90-3MW			Vestas V80-2MW	
	Μεικτά κέρδη σε ευρώ			ΜΕΙΚΤΑ ΚΕΡΔΗ ΣΕ ΕΥΡΩ			ΜΕΙΚΤΑ ΚΕΡΔΗ ΣΕ ΕΥΡΩ	
	Τιμή πώλησης 0,05 €/KWh			Τιμή πώλησης 0,05 €/KWh			Τιμή πώλησης 0,05 €/KWh	
	100m	120m	140m	80m	100m	120m	80m	100m
3	20219,24	22958,32	24050,07	12159,38	13056,72	14825,5	9607,85698	10316,90057
3,5	32107,4	36456,96	38190,62	19308,64	20733,58	23542,34	15256,921	16382,85599
4	47927,08	54419,72	57007,57	28822,23	30949,26	35141,92	22774,1795	24454,87542
4,5	68239,92	77484,32	81168,99	41037,9	44066,42	50036,06	32426,5173	34819,53941
5	93607,58	106288,5	111342,9	56293,41	60447,77	68636,57	44480,8194	47763,42855
5,5	124591,7	141470	148197,4	74926,53	80455,98	91355,27	59203,9706	63573,1234
6	161753,9	183666,5	192400,6	97275,01	104453,7	118604	76862,8559	82535,20453
6,5	205655,9	233515,8	244620,4	123676,6	132803,7	150794,5	97724,3601	104936,2525
7	256859,2	291655,7	305525	154469,1	165868,7	188338,7	122055,368	131062,8479
7,5	315925,6	358723,7	375782,4	189990,3	204011,2	231648,4	150122,765	161201,5713
8	383416,6	394200	394200	230577,8	247594,1	281135,4	182193,436	195639,0033
8,5	459894	394200	394200	276569,5	296979,9	337211,5	218534,266	234661,7244
9	394200	394200	394200	328303,2	352531,4	394200	259412,139	262800
9,5	394200	394200	394200	386116,5	394200	394200	262800	262800
10	394200	394200	394200	394200	394200	394200	262800	262800
10,5	394200	394200	394200	394200	394200	394200	262800	262800
11	394200	394200	394200	394200	394200	394200	262800	262800
11,5	394200	394200	394200	394200	394200	394200	262800	262800
12	394200	394200	394200	394200	394200	394200	262800	262800

Πίνακας 6.6 Μεικτά κέρδη κάθε ανεμογεννήτριας για κάθε ύψος και για ένα έτος

6.3 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

6.3.1 Κόστος κατασκευής πύργου

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για τις δύο διαφορετικές ποιότητες χάλυβα(S235,S450) για κάθε μοντέλο (ύψος και τύπο ανεμογεννήτριας) δίνονται παρακάτω σε πίνακα και διάγραμμα (οι τιμές σε ευρώ €):

Για χάλυβα ποιότητας S235:

πάκτωση	Κόστος πύργου €			
	80m	100m	120m	140m
V80	1.787.867,88	2.542.693,71		
V90	1.787.867,88	2.926.479,33	3.873.281,67	
V112		3.335.929,26	4.941.348,39	6.715.243,93

πάσσαλοι	Κόστος πύργου €			
	80m	100m	120m	140m
V80	1.886.683,07	2.647.407,03		
V90	1.886.683,07	3.031.178,27	3.990.304,15	
V112		3.452.951,73	5.068.710,56	6.842.606,10

πέδιλο επ.	Κόστος πύργου €			
	80m	100m	120m	140m
V80	1.865.946,77	2.636.160,98		
V90	1.882.697,25	3.028.603,27	5.085.438,60	
V112		3.489.824,35	5.121.145,95	6.942.186,01

Πίνακας 6.7 Κόστος πύργου για τους διαφορετικούς τύπους θεμελίωσης, για χάλυβα ποιότητας S235

Για χάλυβα ποιότητας S450:

πάκτωση	Κόστος πύργου €			
	80m	100m	120m	140m
V80	2.041.940,20	3.469.669,89		
V90	2.041.940,20	3.469.669,89	3.998.434,23	
V112		4.038.395,89	5.382.396,30	6.941.444,16

πάσσαλοι	Κόστος πύργου €			
	80m	100m	120m	140m
V80	2.198.881,96	3.635.979,28		
V90	2.198.881,96	3.635.979,28	4.184.293,46	
V112		4.224.255,12	5.584.677,39	7.143.725,25

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών

πέδιλο επ.	Κόστος πύργου €			
	80m	100m	120m	140m
V80	2.165.947,84	3.618.117,90		
V90	2.192.551,55	3.631.866,73	5.611.245,46	
V112		4.282.817,52	5.667.957,14	7.301.881,58

Πίνακας 6.8 Κόστος πύργου για τους διαφορετικούς τύπους θεμελίωσης, για χάλυβα ποιότητας S450

ποιότητα χάλυβα	80m		100m			120m		140m
	V80	V90	V80	V90	V112	V90	V112	V112
S235	1.787.867,88	1.787.867,88	2.542.693,71	2.926.479,33	3.335.929,26	3.873.281,67	4.941.348,39	6.715.243,93
S450	2.041.940,20	2.041.940,20	3.469.669,89	3.469.669,89	4.038.395,89	3.998.434,23	5.382.396,30	6.941.444,16

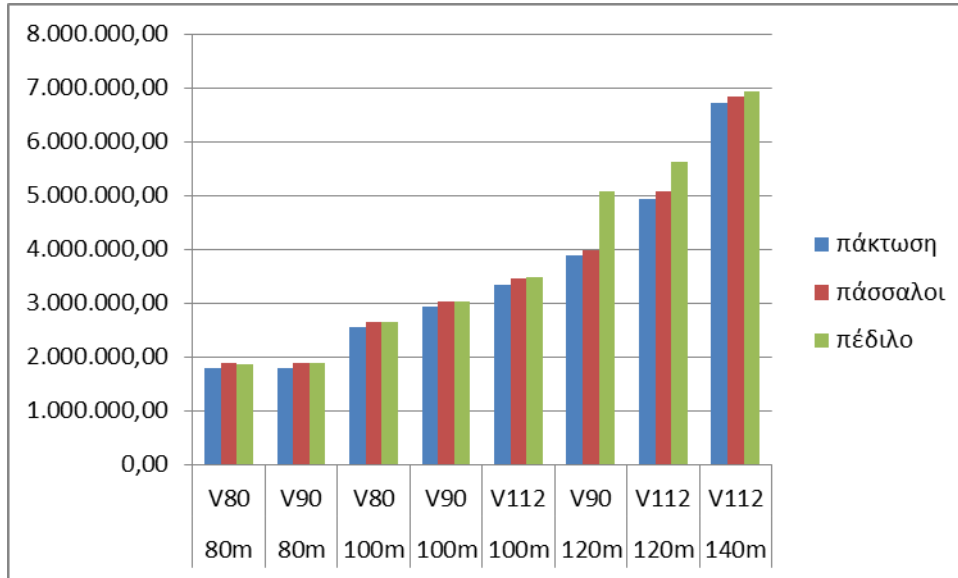
Πίνακας 6.9 Σύγκριση κόστους πύργου ανάλογα με την ποιότητα χάλυβα (για πάκτωση)

ποιότητα χάλυβα	80m		100m			120m		140m
	V80	V90	V80	V90	V112	V90	V112	V112
S235	1.886.683,07	1.886.683,07	2.647.407,03	3.031.178,27	3.452.951,73	3.990.304,15	5.068.710,56	6.842.606,10
S450	2.198.881,96	2.198.881,96	3.635.979,28	3.635.979,28	4.224.255,12	4.184.293,46	5.584.677,39	7.143.725,25

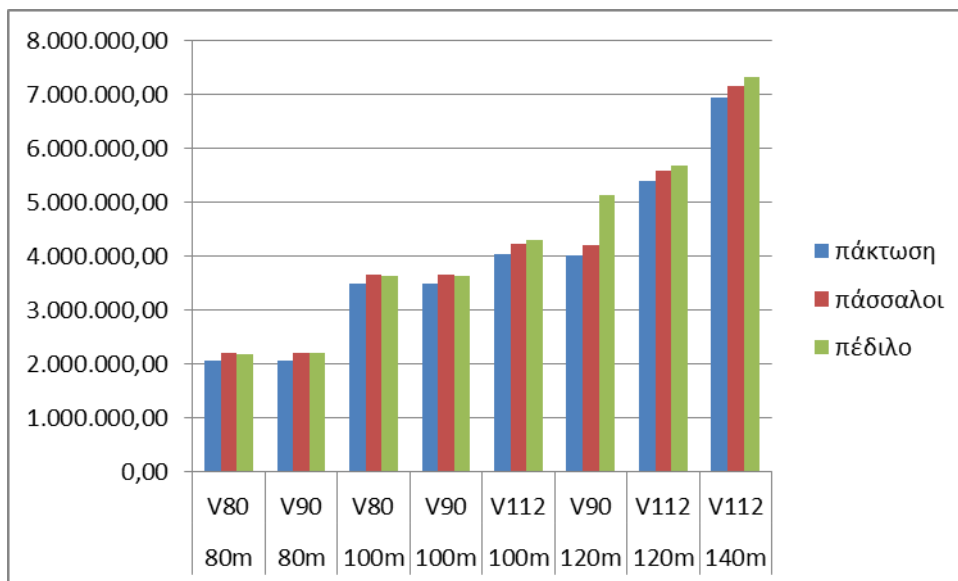
Πίνακας 6.10 Σύγκριση κόστους πύργου ανάλογα με την ποιότητα χάλυβα (για πασσάλους)

ποιότητα χάλυβα	80m		100m			120m		140m
	V80	V90	V80	V90	V112	V90	V112	V112
S235	1.865.946,77	1.882.697,25	2.636.160,98	3.028.603,27	3.489.824,35	5.085.438,60	5.611.245,46	6.942.186,01
S450	2.165.947,84	2.192.551,55	3.618.117,90	3.631.866,73	4.282.817,52	5.121.145,95	5.667.957,14	7.301.881,58

Πίνακας 6.11 Σύγκριση κόστους πύργου ανάλογα με την ποιότητα χάλυβα (για πέδιλο)



Γράφημα 6.1 Κόστος πύργου για χάλυβα S235



Γράφημα 6.2 Κόστος πύργου για χάλυβα S450

Όπως αναμενόταν το κόστος κατασκευής του πύργου αυξάνει σε κάθε σχεδόν περίπτωση συναρτήσει του ύψους. Όσον αφορά τις ποιότητες του χάλυβα κατασκευής, παρατηρούμε ότι σε όλα τα ύψη οικονομικότερη κατασκευή προκύπτει με τον χάλυβα S235.

6.3.2 Κόστος θεμελίωσης

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το κόστος θεμελίωσης για κάθε μοντέλο. Σημειώνεται ότι οι υπολογίστηκαν τυπικά το πέδιλο και οι πάσσαλοι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σχεδιασμού, χωρίς όμως να έχει γίνει βέλτιστος σχεδιασμός και για αυτά τα μεγέθη. Επομένως, λογικό είναι τα μεγέθη να είναι κατά προσέγγιση. Επίσης, για να μειωθεί ο αριθμός των μοντέλων, είναι κατά ομάδες υπολογισμένα, με αποτέλεσμα να είναι κάποια υπερδιαστασιοποιημένα και το κόστος να αυξάνει σημαντικά.

Θεωρήθηκαν τα εξής:

Συμβατική Θεμελίωση από οπλισμένο σκυρόδεμα : Κόστος C1 \approx 230÷250 €/m³

Εκσκαφή σε έδαφος γαιώδες – ημιβραχώδες (και σε μαλακά εδάφη): Κόστος C2 \approx 15 €/m³

Εκσκαφή σε έδαφος βραχώδες: Κόστος C3 \approx 30 €/m³

Πάσσαλοι Θεμελίωσης (με τη διάνοιξη και τον οπλισμό): Κόστος C4 \approx 300 €/m³

Σε κάθε περίπτωση δεν πρέπει να ξεχνούμε ότι αυτό που επηρεάζει περισσότερο το κόστος της κάθε εργασίας, είναι το κόστος κινητοποίησης του αντίστοιχου μηχανήματος στην απομακρυσμένη και δύσβατη περιοχή που πρόκειται να τοποθετηθεί η ανεμογεννήτρια. Οπότε όσο περισσότερα τα κυβικά εκσκαφών, θεμελίων ή πασσάλων τόσο και χαμηλότερο το κόστος ανά κυβικό μέτρο που θα προκύπτει.

Κόστος θεμελίωσης				
ύψος	τύπος A/Γ	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι
80m	V80	213.645,60 €	195.841,80 €	623.133,00 €
	V90	163.342,80 €	149.730,90 €	623.133,00 €
100m	V80	198.385,20 €	181.853,10 €	878.444,44 €
	V90	195.535,65 €	179.241,01 €	878.444,44 €
	V112	321.952,05 €	295.122,71 €	1.552.268,81 €
120m	V90	301.440,00 €	276.320,00 €	1.552.268,81 €
	V112	376.140,60 €	344.795,55 €	2.264.381,25 €
140m	V112	474.768,00 €	435.204,00 €	2.264.381,25 €

Πίνακας 6.12 Κόστος θεμελίωσης για κάθε μοντέλο

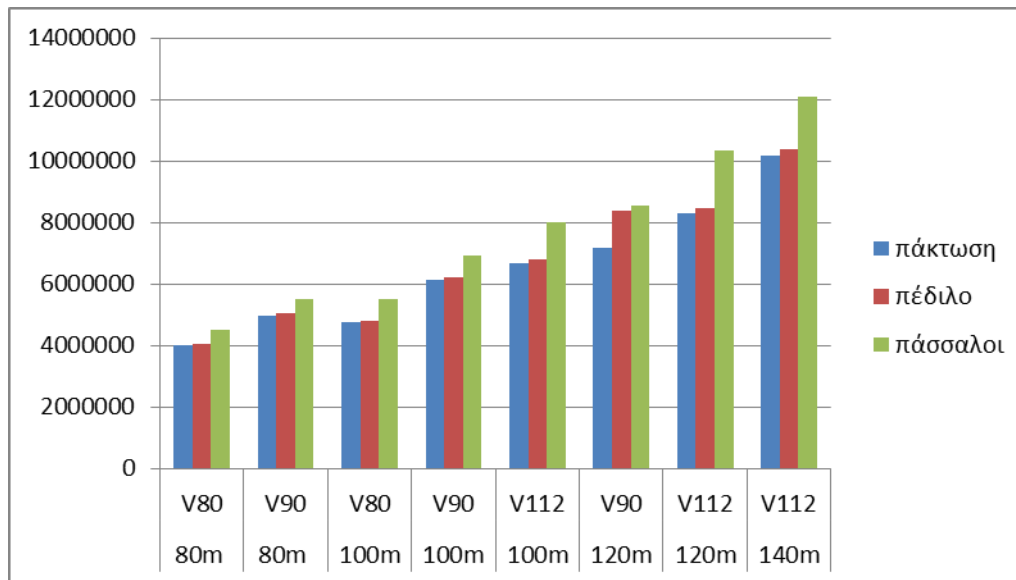
6.3.3 Συνολικό κόστος κατασκευής

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ S235											
ύψος	τύπος Α/Γ	ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ			ΠΥΡΓΟΣ S235			Α/Γ	ΣΥΝΟΛΟ		
		πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι		πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι
80m	V80	213645,6	195841,8	623133	1787867,88	1865947	1886683	2000000	4001513,484	4061789	4509816
	V90	163342,8	149730,9	623133	1787867,88	1882697	1886683	3000000	4951210,684	5032428	5509816
100m	V80	198385,2	181853,1	878444,44	2542693,71	2636161	2647407	2000000	4741078,911	4818014	5525851
	V90	195535,7	179241	878444,44	2926479,33	3028603	3031178	3000000	6122014,981	6207844	6909623
	V112	321952,1	295122,7	1552268,8	3335929,26	3489824	3452952	3000000	6657881,306	6784947	8005221
120m	V90	301440	276320	1552268,8	3873281,67	5085439	3990304	3000000	7174721,671	8361759	8542573
	V112	376140,6	344795,6	2264381,2	4941348,39	5121146	5068711	3000000	8317488,989	8465942	10333092
140m	V112	474768	435204	2264381,2	6715243,93	6942186	6842606	3000000	10190011,93	10377390	12106987

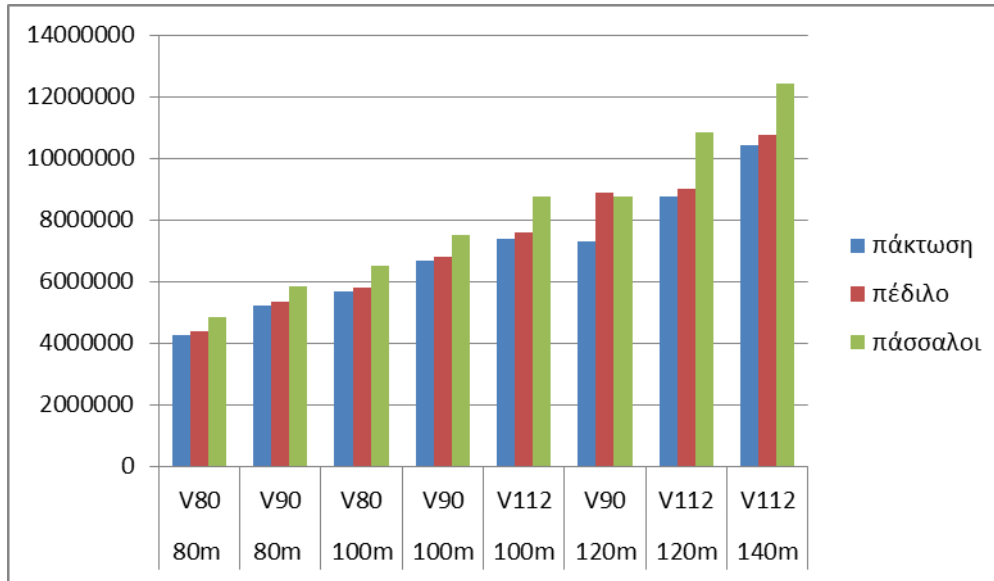
Πίνακας 6.13 Συνολικό κόστος κατασκευής για χάλυβα S235

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ S450											
ύψος	τύπος Α/Γ	ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ			ΠΥΡΓΟΣ S450			Α/Γ	ΣΥΝΟΛΟ		
		πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι		πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι
80m	V80	213645,6	195841,8	623133	2041940,2	2165948	2198882	2000000	4255585,801	4361790	4822015
80m	V90	163342,8	149730,9	623133	2041940,2	2192552	2198882	3000000	5205283,001	5342282	5822015
100m	V80	198385,2	181853,1	878444,44	3469669,89	3618118	3635979	2000000	5668055,086	5799971	6514424
100m	V90	195535,7	179241	878444,44	3469669,89	3631867	3635979	3000000	6665205,536	6811108	7514424
100m	V112	321952,1	295122,7	1552268,8	4038395,89	4282818	4224255	3000000	7360347,943	7577940	8776524
120m	V90	301440	276320	1552268,8	3998434,23	5611245	4184293	3000000	7299874,232	8887565	8736562
120m	V112	376140,6	344795,6	2264381,2	5382396,3	5667957	5584677	3000000	8758536,899	9012753	10849059
140m	V112	474768	435204	2264381,2	6941444,16	7301882	7143725	3000000	10416212,16	10737086	12408106

Πίνακας 6.13 Συνολικό κόστος κατασκευής για χάλυβα S450



Γράφημα 6.4 Συνολικό Κόστος κατασκευής για χάλυβα S235



Γράφημα 6.4 Συνολικό Κόστος κατασκευής για χάλυβα S450

6.3.4 Καθαρό κέρδος στον Κύκλο Ζωής της ανεμογεννήτριας

Στην προηγούμενη παράγραφο έχουν υπολογιστεί τα μεικτά κέρδη του κάθε ύψους του πύργου για διαφορετικές μέσες ετήσιες ταχύτητες για ένα έτος. Αυτά ανάγονται στα 20 χρόνια που θεωρείται, συμβατικά, η διάρκεια ζωής μιας ανεμογεννήτριας με απλό πολλαπλασιασμό. Από τα αποτελέσματα αυτά αφαιρούνται οι προηγούμενες τιμές του συνολικού κόστους κατασκευής και βρίσκουμε το καθαρό κέρδος της ανεμογεννήτριας στα 20 χρόνια για τα εξεταζόμενα ύψη, για κάθε ποιότητα χάλυβα του πύργου και για κάθε τύπο θεμελίωσης. Παρακάτω δίνονται σε πίνακες και διαγράμματα τα αντίστοιχα καθαρά κέρδη των ανεμογεννητριών, χρησιμοποιώντας τα διαφορετικά μοντέλα Vestas, για ένα φάσμα μέσων ετήσιων ταχυτήτων αναφοράς (μετρημένων στα 10 μέτρα) από 3-12 m/s με βήμα 0,5 m/s, ανοιγμένες στα αντίστοιχα εκάστοτε ύψη.

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών

Ταχ.αναφοράς στα 10m	v80 80m			v80 100m		
	κέρδος			κέρδος		
	πάκτωση	πέδλο	πάσσαλοι	πάκτωση	πέδλο	πάσσαλοι
3	-3.809.356,34 €	-3.869.631,86 €	-4.317.658,86 €	-4.534.740,90 €	-4.611.675,99 €	-5.319.512,99 €
3,5	-3.696.375,06 €	-3.756.650,58 €	-4.204.677,58 €	-4.413.421,79 €	-4.490.356,88 €	-5.198.193,88 €
4	-3.546.029,89 €	-3.606.305,41 €	-4.054.332,41 €	-4.251.981,40 €	-4.328.916,49 €	-5.036.753,49 €
4,5	-3.352.983,14 €	-3.413.258,65 €	-3.861.285,65 €	-4.044.688,12 €	-4.121.623,21 €	-4.829.460,21 €
5	-3.111.897,10 €	-3.172.172,61 €	-3.620.199,61 €	-3.785.810,34 €	-3.862.745,43 €	-4.570.582,43 €
5,5	-2.817.434,07 €	-2.877.709,59 €	-3.325.736,59 €	-3.469.616,44 €	-3.546.551,53 €	-4.254.388,53 €
6	-2.464.256,37 €	-2.524.531,88 €	-2.972.558,88 €	-3.090.374,82 €	-3.167.309,91 €	-3.875.146,91 €
6,5	-2.047.026,28 €	-2.107.301,80 €	-2.555.328,80 €	-2.642.353,86 €	-2.719.288,95 €	-3.427.125,95 €
7	-1.560.406,12 €	-1.620.681,63 €	-2.068.708,63 €	-2.119.821,95 €	-2.196.757,04 €	-2.904.594,04 €
7,5	-999.058,18 €	-1.059.333,69 €	-1.507.360,69 €	-1.517.047,48 €	-1.593.982,57 €	-2.301.819,57 €
8	-357.644,76 €	-417.920,28 €	-865.947,28 €	-828.298,84 €	-905.233,93 €	-1.613.070,93 €
8,5	369.171,83 €	308.896,31 €	-139.130,69 €	-47.844,42 €	-124.779,51 €	-832.616,51 €
9	1.186.729,29 €	1.126.453,77 €	678.426,77 €	514.921,09 €	437.986,00 €	-269.851,00 €
9,5	1.254.486,52 €	1.194.211,00 €	746.184,00 €	514.921,09 €	437.986,00 €	-269.851,00 €
10	1.254.486,52 €	1.194.211,00 €	746.184,00 €	514.921,09 €	437.986,00 €	-269.851,00 €
10,5	1.254.486,52 €	1.194.211,00 €	746.184,00 €	514.921,09 €	437.986,00 €	-269.851,00 €
11	1.254.486,52 €	1.194.211,00 €	746.184,00 €	514.921,09 €	437.986,00 €	-269.851,00 €
11,5	1.254.486,52 €	1.194.211,00 €	746.184,00 €	514.921,09 €	437.986,00 €	-269.851,00 €
12	1.254.486,52 €	1.194.211,00 €	746.184,00 €	514.921,09 €	437.986,00 €	-269.851,00 €

Πίνακας 6.14 Καθαρά κέρδη για χάλυβα S235

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών

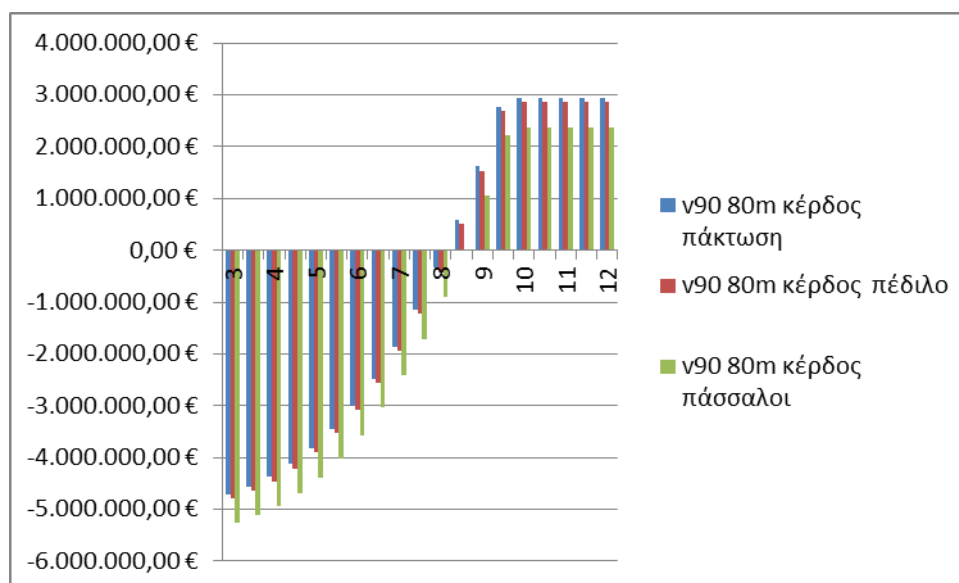
Ταχ.αναφοράς στα 10m	v80 80m			v80 100m		
	κέρδος			κέρδος		
	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι
3	-4.063.428,66 €	-4.169.632,86 €	-4.629.857,86 €	-5.461.717,07 €	-5.593.632,99 €	-6.308.085,99 €
3,5	-3.950.447,38 €	-4.056.651,58 €	-4.516.876,58 €	-5.340.397,97 €	-5.472.313,88 €	-6.186.766,88 €
4	-3.800.102,21 €	-3.906.306,41 €	-4.366.531,41 €	-5.178.957,58 €	-5.310.873,49 €	-6.025.326,49 €
4,5	-3.607.055,45 €	-3.713.259,65 €	-4.173.484,65 €	-4.971.664,30 €	-5.103.580,21 €	-5.818.033,21 €
5	-3.365.969,41 €	-3.472.173,61 €	-3.932.398,61 €	-4.712.786,52 €	-4.844.702,43 €	-5.559.155,43 €
5,5	-3.071.506,39 €	-3.177.710,59 €	-3.637.935,59 €	-4.396.592,62 €	-4.528.508,53 €	-5.242.961,53 €
6	-2.718.328,68 €	-2.824.532,88 €	-3.284.757,88 €	-4.017.351,00 €	-4.149.266,91 €	-4.863.719,91 €
6,5	-2.301.098,60 €	-2.407.302,80 €	-2.867.527,80 €	-3.569.330,04 €	-3.701.245,95 €	-4.415.698,95 €
7	-1.814.478,43 €	-1.920.682,63 €	-2.380.907,63 €	-3.046.798,13 €	-3.178.714,04 €	-3.893.167,04 €
7,5	-1.253.130,49 €	-1.359.334,69 €	-1.819.559,69 €	-2.444.023,66 €	-2.575.939,57 €	-3.290.392,57 €
8	-611.717,08 €	-717.921,28 €	-1.178.146,28 €	-1.755.275,02 €	-1.887.190,93 €	-2.601.643,93 €
8,5	115.099,51 €	8.895,31 €	-451.329,69 €	-974.820,60 €	-1.106.736,51 €	-1.821.189,51 €
9	932.656,97 €	826.452,77 €	366.227,77 €	-412.055,09 €	-543.971,00 €	-1.258.424,00 €
9,5	1.000.414,20 €	894.210,00 €	433.985,00 €	-412.055,09 €	-543.971,00 €	-1.258.424,00 €
10	1.000.414,20 €	894.210,00 €	433.985,00 €	-412.055,09 €	-543.971,00 €	-1.258.424,00 €
10,5	1.000.414,20 €	894.210,00 €	433.985,00 €	-412.055,09 €	-543.971,00 €	-1.258.424,00 €
11	1.000.414,20 €	894.210,00 €	433.985,00 €	-412.055,09 €	-543.971,00 €	-1.258.424,00 €
11,5	1.000.414,20 €	894.210,00 €	433.985,00 €	-412.055,09 €	-543.971,00 €	-1.258.424,00 €
12	1.000.414,20 €	894.210,00 €	433.985,00 €	-412.055,09 €	-543.971,00 €	-1.258.424,00 €

Πίνακας 6.15 Καθαρά κέρδη για χάλυβα S450

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών

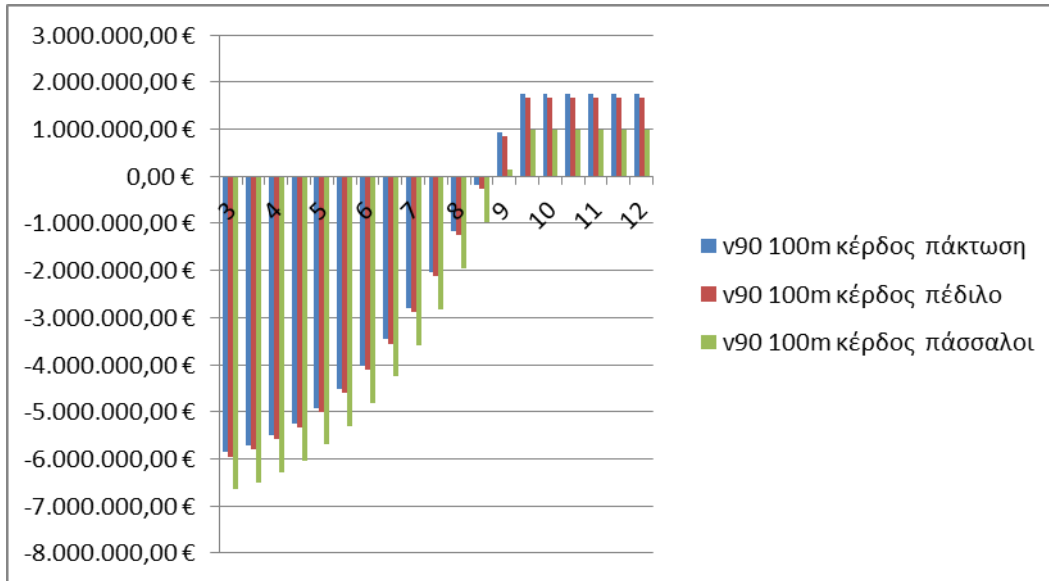
Ταχ. αναφοράς στα 10m	v90 80m			v90 100m			v90 120m		
	κέρδος			κέρδος			κέρδος		
	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι
3	-4.708.023,15 €	-4.789.240,47 €	-5.266.628,47 €	-5.860.880,62 €	-5.946.709,64 €	-6.648.488,64 €	-6.878.211,69 €	-8.065.249,02 €	-8.246.063,02 €
3,5	-4.565.037,89 €	-4.646.255,21 €	-5.123.643,21 €	-5.707.343,29 €	-5.793.172,31 €	-6.494.951,31 €	-6.703.874,81 €	-7.890.912,14 €	-8.071.726,14 €
4	-4.374.766,16 €	-4.455.983,48 €	-4.933.371,48 €	-5.503.029,83 €	-5.588.858,85 €	-6.290.637,85 €	-6.471.883,20 €	-7.658.920,53 €	-7.839.734,53 €
4,5	-4.130.452,76 €	-4.211.670,08 €	-4.689.058,08 €	-5.240.686,52 €	-5.326.515,53 €	-6.028.294,53 €	-6.174.000,49 €	-7.361.037,82 €	-7.541.851,82 €
5	-3.825.342,48 €	-3.906.559,80 €	-4.383.947,80 €	-4.913.059,61 €	-4.998.888,63 €	-5.700.667,63 €	-5.801.990,29 €	-6.989.027,62 €	-7.169.841,62 €
5,5	-3.452.680,11 €	-3.533.897,42 €	-4.011.285,42 €	-4.512.895,38 €	-4.598.724,40 €	-5.300.503,40 €	-5.347.616,20 €	-6.534.653,53 €	-6.715.467,53 €
6	-3.005.710,43 €	-3.086.927,75 €	-3.564.315,75 €	-4.032.940,10 €	-4.118.769,12 €	-4.820.548,12 €	-4.802.641,84 €	-5.989.679,17 €	-6.170.493,17 €
6,5	-2.477.678,24 €	-2.558.895,56 €	-3.036.283,56 €	-3.465.940,03 €	-3.551.769,05 €	-4.253.548,05 €	-4.158.830,83 €	-5.345.868,16 €	-5.526.682,16 €
7	-1.861.828,34 €	-1.943.045,65 €	-2.420.433,65 €	-2.804.641,44 €	-2.890.470,46 €	-3.592.249,46 €	-3.407.946,76 €	-4.594.984,09 €	-4.775.798,09 €
7,5	-1.151.405,50 €	-1.232.622,82 €	-1.710.010,82 €	-2.041.790,61 €	-2.127.619,62 €	-2.829.398,62 €	-2.541.753,26 €	-3.728.790,59 €	-3.909.604,59 €
8	-339.654,53 €	-420.871,84 €	-898.259,84 €	-1.170.133,78 €	-1.255.962,80 €	-1.957.741,80 €	-1.552.013,93 €	-2.739.051,26 €	-2.919.865,26 €
8,5	580.179,80 €	498.962,48 €	21.574,48 €	-182.417,24 €	-268.246,26 €	-970.025,26 €	-430.492,39 €	-1.617.529,72 €	-1.798.343,72 €
9	1.614.852,67 €	1.533.635,36 €	1.056.247,36 €	928.612,74 €	842.783,72 €	141.004,72 €	709.278,33 €	-477.759,00 €	-658.573,00 €
9,5	2.771.119,32 €	2.689.902,00 €	2.212.514,00 €	1.761.985,02 €	1.676.156,00 €	974.377,00 €	709.278,33 €	-477.759,00 €	-658.573,00 €
10	2.932.789,32 €	2.851.572,00 €	2.374.184,00 €	1.761.985,02 €	1.676.156,00 €	974.377,00 €	709.278,33 €	-477.759,00 €	-658.573,00 €
10,5	2.932.789,32 €	2.851.572,00 €	2.374.184,00 €	1.761.985,02 €	1.676.156,00 €	974.377,00 €	709.278,33 €	-477.759,00 €	-658.573,00 €
11	2.932.789,32 €	2.851.572,00 €	2.374.184,00 €	1.761.985,02 €	1.676.156,00 €	974.377,00 €	709.278,33 €	-477.759,00 €	-658.573,00 €
11,5	2.932.789,32 €	2.851.572,00 €	2.374.184,00 €	1.761.985,02 €	1.676.156,00 €	974.377,00 €	709.278,33 €	-477.759,00 €	-658.573,00 €
12	2.932.789,32 €	2.851.572,00 €	2.374.184,00 €	1.761.985,02 €	1.676.156,00 €	974.377,00 €	709.278,33 €	-477.759,00 €	-658.573,00 €

Πίνακας 6.16 Καθαρά κέρδη για χάλυβα S235



Γράφημα 6.5 Συνολικό κέρδος- ζημιά για χάλυβα S235,Α/ΓV90 80m

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών

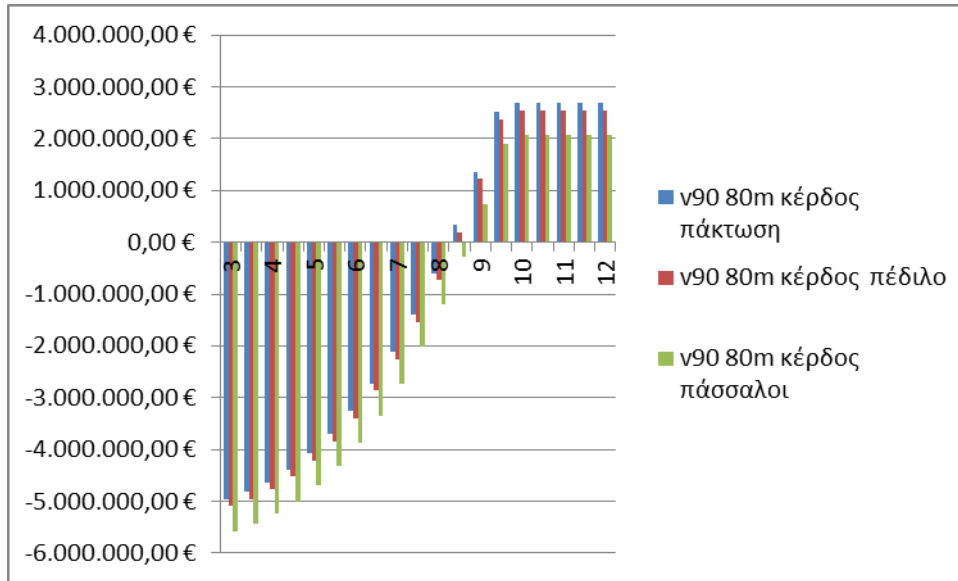


Γράφημα 6.6 Συνολικό κέρδος- ζημιά για χάλυβα S235,Α/ΓV90 100m

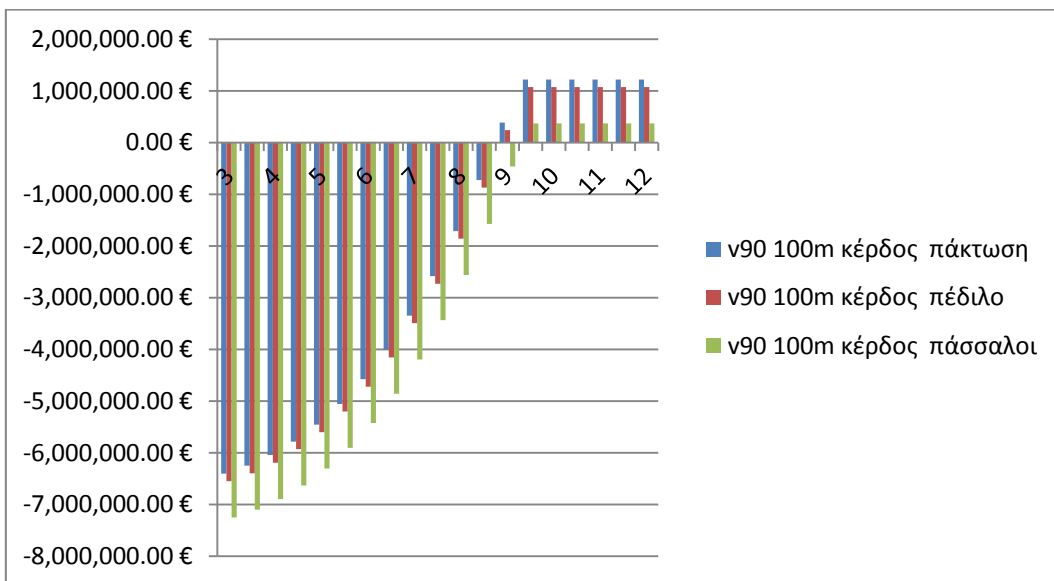
Παρατηρούμε πως για ταχύτητα 8 m/sec και κάτω έχουμε ζημιά ενώ για τιμές μεγαλύτερες επέρχεται κέρδος. Επίσης η ζημιά για θεμελίωση με πασσάλους είναι μεγαλύτερη ενώ το κέρδος μικρότερο σε αντίθεση με τη θεμελίωση με πάκτωση όπου η ζημιά είναι μικρότερη και το κέρδος μεγαλύτερο.

Ταχ.αναφοράς στα 10m	v90 80m			v90 100m			v90 120m		
	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι
3	-4.962.095,47 €	-5.099.094,47 €	-5.578.827,47 €	-6.404.071,18 €	-6.549.973,64 €	-7.253.289,64 €	-7.003.364,25 €	-8.591.055,02 €	-8.440.052,02 €
3,5	-4.819.110,21 €	-4.956.109,21 €	-5.435.842,21 €	-6.250.533,84 €	-6.396.436,31 €	-7.099.752,31 €	-6.829.027,37 €	-8.416.718,14 €	-8.265.715,14 €
4	-4.628.838,48 €	-4.765.837,48 €	-5.245.570,48 €	-6.046.220,39 €	-6.192.122,85 €	-6.895.438,85 €	-6.597.035,76 €	-8.184.726,53 €	-8.033.723,53 €
4,5	-4.384.525,08 €	-4.521.524,08 €	-5.001.257,08 €	-5.783.877,07 €	-5.929.779,53 €	-6.633.095,53 €	-6.299.153,06 €	-7.886.843,82 €	-7.735.840,82 €
5	-4.079.414,80 €	-4.216.413,80 €	-4.696.146,80 €	-5.456.250,17 €	-5.602.152,63 €	-6.305.468,63 €	-5.927.142,85 €	-7.514.833,62 €	-7.363.830,62 €
5,5	-3.706.752,42 €	-3.843.751,42 €	-4.323.484,42 €	-5.056.085,94 €	-5.201.988,40 €	-5.905.304,40 €	-5.472.768,76 €	-7.060.459,53 €	-6.909.456,53 €
6	-3.259.782,75 €	-3.396.781,75 €	-3.876.514,75 €	-4.576.130,66 €	-4.722.033,12 €	-5.425.349,12 €	-4.927.794,41 €	-6.515.485,17 €	-6.364.482,17 €
6,5	-2.731.750,56 €	-2.868.749,56 €	-3.348.482,56 €	-4.009.130,59 €	-4.155.033,05 €	-4.858.349,05 €	-4.283.983,39 €	-5.871.674,16 €	-5.720.671,16 €
7	-2.115.900,65 €	-2.252.899,65 €	-2.732.632,65 €	-3.347.832,00 €	-3.493.734,46 €	-4.197.050,46 €	-3.533.099,32 €	-5.120.790,09 €	-4.969.787,09 €
7,5	-1.405.477,82 €	-1.542.476,82 €	-2.022.209,82 €	-2.584.981,16 €	-2.730.883,62 €	-3.434.199,62 €	-2.666.905,82 €	-4.254.596,59 €	-4.103.593,59 €
8	-593.726,84 €	-730.725,84 €	-1.210.458,84 €	-1.713.324,34 €	-1.859.226,80 €	-2.562.542,80 €	-1.677.166,49 €	-3.264.857,26 €	-3.113.854,26 €
8,5	326.107,48 €	189.108,48 €	-290.624,52 €	-725.607,80 €	-871.510,26 €	-1.574.826,26 €	-555.644,96 €	-2.143.335,72 €	-1.992.332,72 €
9	1.360.780,36 €	1.223.781,36 €	744.048,36 €	385.422,19 €	239.519,72 €	-463.796,28 €	584.125,77 €	-1.003.565,00 €	-852.562,00 €
9,5	2.517.047,00 €	2.380.048,00 €	1.900.315,00 €	1.218.794,46 €	1.072.892,00 €	369.576,00 €	584.125,77 €	-1.003.565,00 €	-852.562,00 €
10	2.678.717,00 €	2.541.718,00 €	2.061.985,00 €	1.218.794,46 €	1.072.892,00 €	369.576,00 €	584.125,77 €	-1.003.565,00 €	-852.562,00 €
10,5	2.678.717,00 €	2.541.718,00 €	2.061.985,00 €	1.218.794,46 €	1.072.892,00 €	369.576,00 €	584.125,77 €	-1.003.565,00 €	-852.562,00 €
11	2.678.717,00 €	2.541.718,00 €	2.061.985,00 €	1.218.794,46 €	1.072.892,00 €	369.576,00 €	584.125,77 €	-1.003.565,00 €	-852.562,00 €
11,5	2.678.717,00 €	2.541.718,00 €	2.061.985,00 €	1.218.794,46 €	1.072.892,00 €	369.576,00 €	584.125,77 €	-1.003.565,00 €	-852.562,00 €
12	2.678.717,00 €	2.541.718,00 €	2.061.985,00 €	1.218.794,46 €	1.072.892,00 €	369.576,00 €	584.125,77 €	-1.003.565,00 €	-852.562,00 €

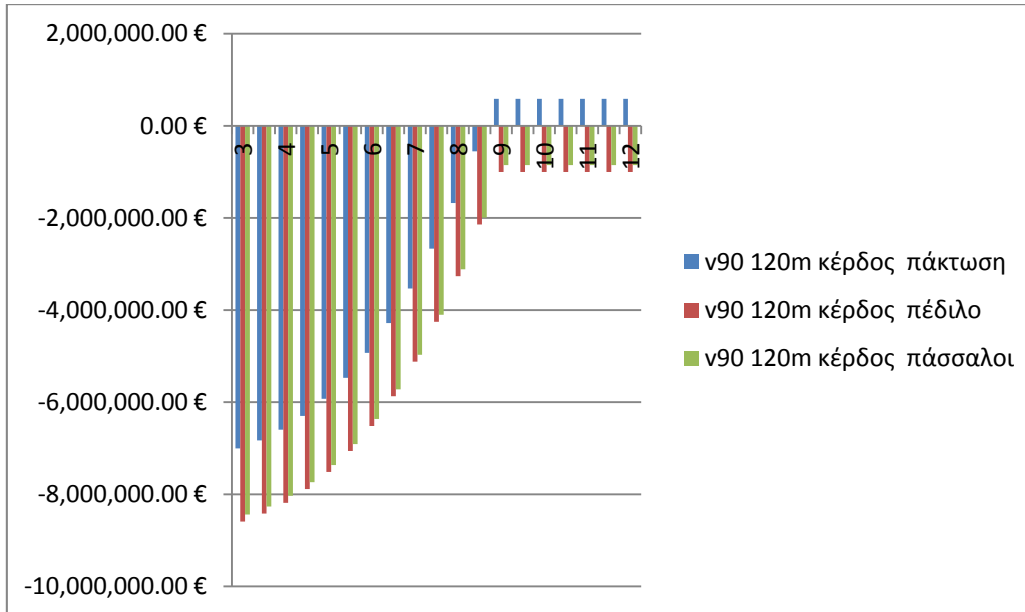
Πίνακας 6.17 Καθαρά κέρδη για χάλυβα S450



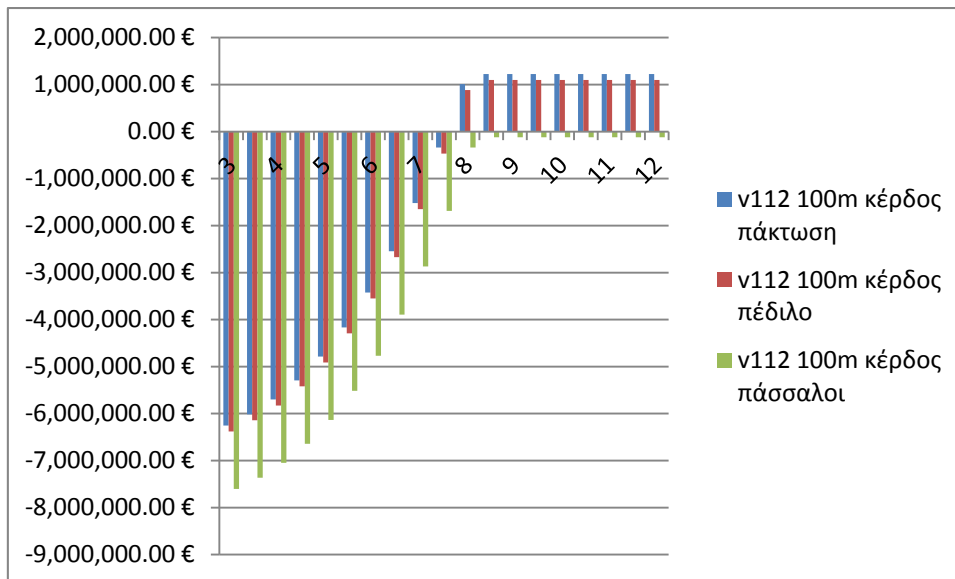
Γράφημα 6.7 Συνολικό κέρδος- ζημιά για χάλυβα S450,A/GV90 80m



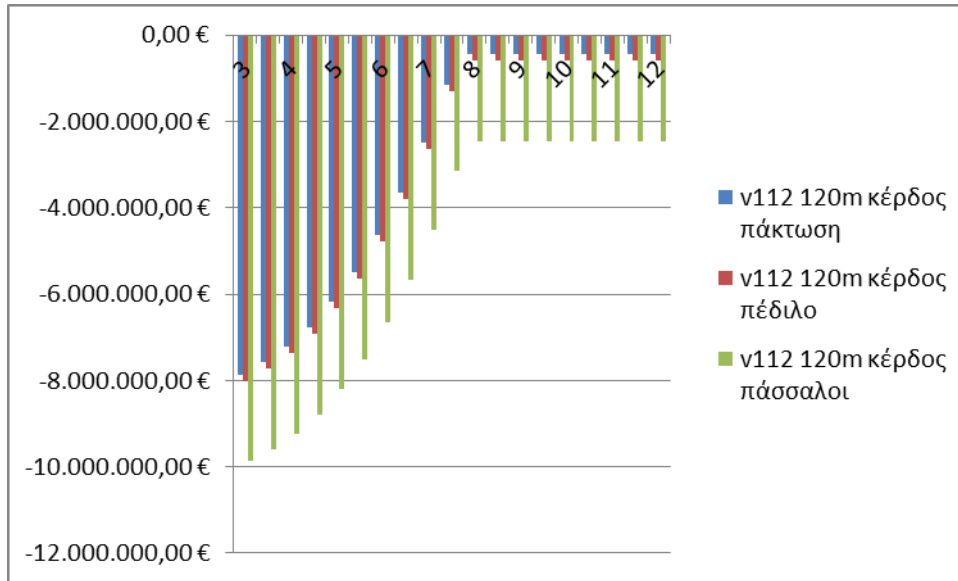
Γράφημα 6.8 Συνολικό κέρδος- ζημιά για χάλυβα S450,A/GV90 100m



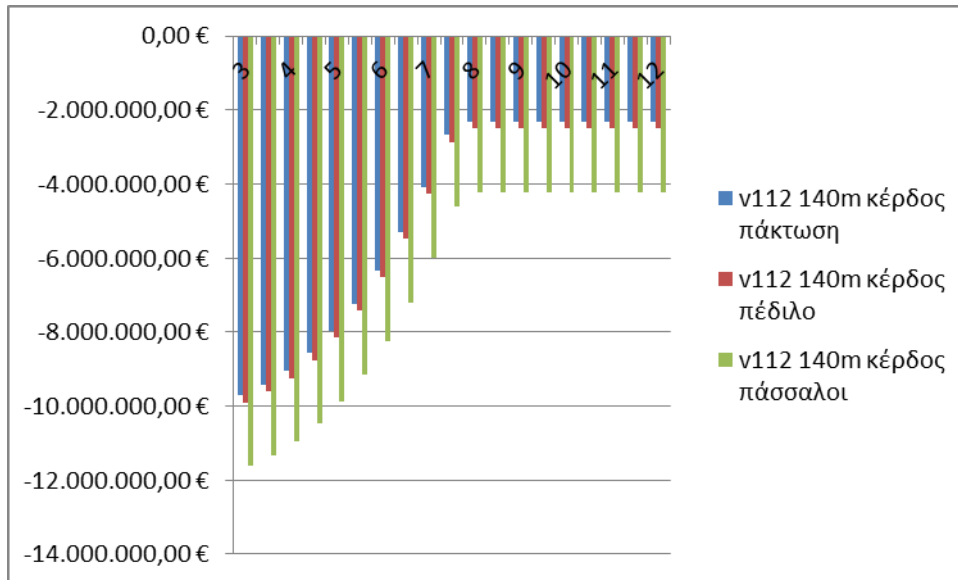
Γράφημα 6.9 Συνολικό κέρδος- ζημιά για χάλυβα S450,A/GV90 120m



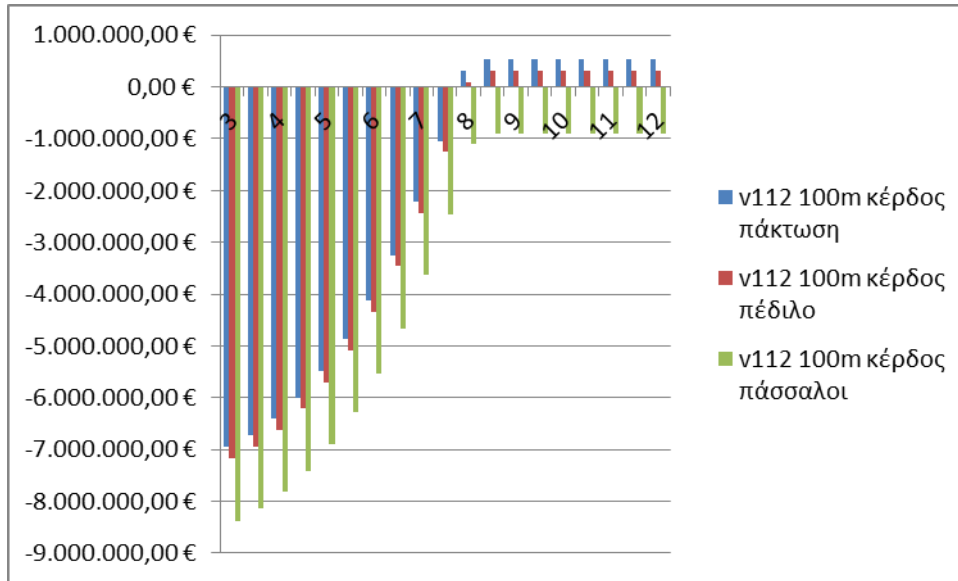
Γράφημα 6.10 Συνολικό κέρδος- ζημιά για χάλυβα S235,A/G V112 100m



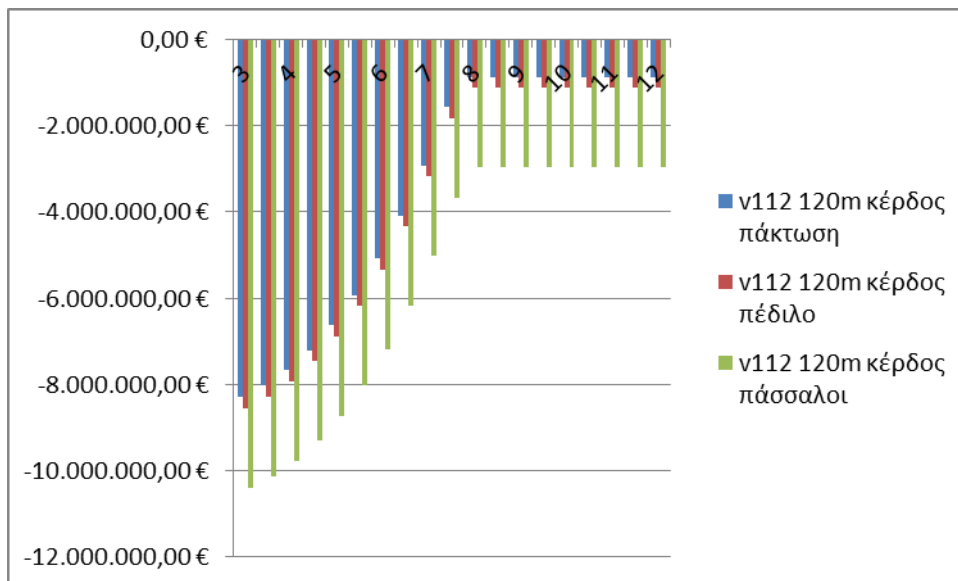
Γράφημα 6.11 Συνολικό κέρδος- ζημιά για χάλυβα S235,A/Γ V112 120m



Γράφημα 6.12 Συνολικό κέρδος- ζημιά για χάλυβα S235,A/Γ V112 140m

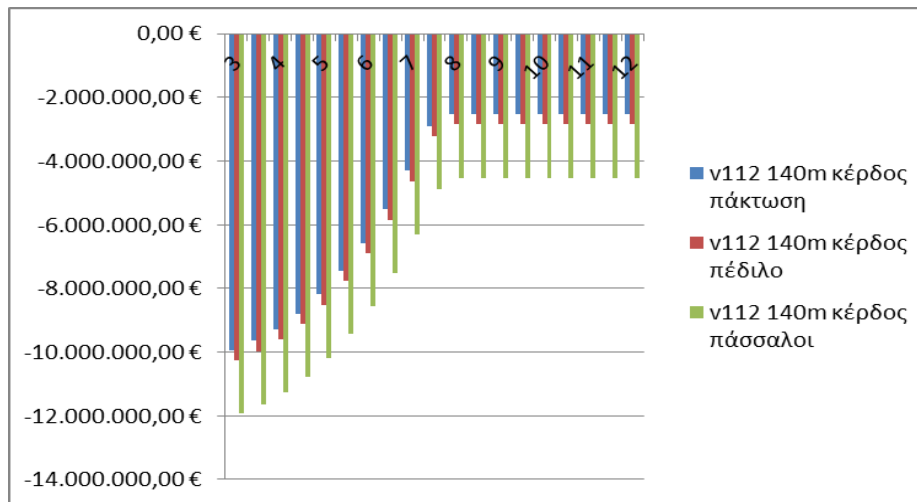


Γράφημα 6.13 Συνολικό κέρδος- ζημιά για χάλυβα S450,A/GV112 100m



Γράφημα 6.14 Συνολικό κέρδος- ζημιά για χάλυβα S450,A/G V112 120m

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών



Γράφημα 6.15 Συνολικό κέρδος- ζημιά για χάλυβα S450, A/GV112 140m

Ταχ. αναφοράς στα 10m	v112 100m			v112 120m			v112 140m		
	κέρδος			κέρδος			κέρδος		
	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι
3	-6527143	-6681037,7	-7510341	-8166981,5	-8346779	-9741915,5	-1E+07	-10350241	-11493975,97
3,5	-6289379	-6443274,4	-7272578	-7897008,7	-8076806	-9471942,7	-9840488	-10067430	-11211164,96
4	-5972986	-6126880,8	-6956184	-7537753,6	-7717551	-9112687,5	-9464148	-9691090,5	-10834825,89
4,5	-5566729	-5720623,9	-6549927	-7076461,5	-7256259	-8651395,4	-8980920	-9207862,2	-10351597,62
5	-5059376	-5213270,8	-6042574	-6500377,8	-6680175	-8075311,7	-8377442	-8604383,6	-9748118,995
5,5	-4439694	-4593588,7	-5422892	-5796747,8	-5976545	-7371681,8	-7640351	-7867293,5	-9011028,868
6	-3696449	-3850344,5	-4679648	-4952817,1	-5132615	-6527751,1	-6756289	-6983230,7	-8126966,087
6,5	-2818410	-2972305,4	-3801609	-3955830,9	-4135628	-5530764,9	-5711892	-5938834,1	-7082569,502
7	-1794343	-1948238,5	-2777542	-2793034,7	-2972832	-4367968,6	-4493801	-4720742,6	-5864477,963
7,5	-613016	-766910,86	-1596214	-1451673,7	-1631471	-3026607,7	-3088653	-3315594,9	-4459330,319
8	736805,5	582910,43	-246392,8	-742147,89	-921945	-2317081,8	-2720300	-2947242	-4090977,385
8,5	952472,7	798577,58	-30725,65	-742147,89	-921945	-2317081,8	-2720300	-2947242	-4090977,385
9	952472,7	798577,58	-30725,65	-742147,89	-921945	-2317081,8	-2720300	-2947242	-4090977,385
9,5	952472,7	798577,58	-30725,65	-742147,89	-921945	-2317081,8	-2720300	-2947242	-4090977,385
10	952472,7	798577,58	-30725,65	-742147,89	-921945	-2317081,8	-2720300	-2947242	-4090977,385
10,5	952472,7	798577,58	-30725,65	-742147,89	-921945	-2317081,8	-2720300	-2947242	-4090977,385
11	952472,7	798577,58	-30725,65	-742147,89	-921945	-2317081,8	-2720300	-2947242	-4090977,385
11,5	952472,7	798577,58	-30725,65	-742147,89	-921945	-2317081,8	-2720300	-2947242	-4090977,385
12	952472,7	798577,58	-30725,65	-742147,89	-921945	-2317081,8	-2720300	-2947242	-4090977,385

Πίνακας 6.18 Καθαρά κέρδη για χάλυβα S235

Επιρροή της θεμελίωσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννητριών

Ταχ. αναφοράς στα 10m	v112 100m			v112 120m			v112 140m		
	κέρδος			κέρδος			κέρδος		
	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι	πάκτωση	πέδιλο	πάσσαλοι
3	-7229609	-7474031	-8281644	-8608029	-8893590	-10257882	-1E+07	-1,1E+07	-11795095
3,5	-6991846	-7236268	-8043881	-8338057	-8623617	-9987909,5	-1E+07	-1E+07	-11512284
4	-6675452	-6919874	-7727487	-7978801	-8264362	-9628654,4	-9690349	-1E+07	-11135945
4,5	-6269195	-6513617	-7321231	-7517509	-7803070	-9167362,3	-9207120	-9567558	-10652717
5	-5761842	-6006264	-6813877	-6941426	-7226987	-8591278,5	-8603642	-8964079	-10049238
5,5	-5142160	-5386582	-6194195	-6237796	-6523357	-7887648,6	-7866552	-8226989	-9312148
6	-4398916	-4643338	-5450951	-5393865	-5679426	-7043717,9	-6982489	-7342926	-8428085,2
6,5	-3520877	-3765299	-4572912	-4396879	-4682440	-6046731,7	-5938092	-6298530	-7383688,7
7	-2496810	-2741232	-3548845	-3234083	-3519643	-4883935,4	-4720001	-5080438	-6165597,1
7,5	-1315482	-1559904	-2367517	-1892722	-2178282	-3542574,5	-3314853	-3675291	-4760449,5
8	34338,89	-210083	-1017696	-1183196	-1468757	-2833048,7	-2946500	-3306938	-4392096,5
8,5	250006	5584,417	-802029	-1183196	-1468757	-2833048,7	-2946500	-3306938	-4392096,5
9	250006	5584,417	-802029	-1183196	-1468757	-2833048,7	-2946500	-3306938	-4392096,5
9,5	250006	5584,417	-802029	-1183196	-1468757	-2833048,7	-2946500	-3306938	-4392096,5
10	250006	5584,417	-802029	-1183196	-1468757	-2833048,7	-2946500	-3306938	-4392096,5
10,5	250006	5584,417	-802029	-1183196	-1468757	-2833048,7	-2946500	-3306938	-4392096,5
11	250006	5584,417	-802029	-1183196	-1468757	-2833048,7	-2946500	-3306938	-4392096,5
11,5	250006	5584,417	-802029	-1183196	-1468757	-2833048,7	-2946500	-3306938	-4392096,5
12	250006	5584,417	-802029	-1183196	-1468757	-2833048,7	-2946500	-3306938	-4392096,5

Πίνακας 6.19 Καθαρά κέρδη για χάλυβα S450

Παρατηρούμε ότι για την ποιότητα χάλυβα S450 τα κέρδη μειώνονται σημαντικά και έχουμε και ζημιά. Αυτό ίσως να οφείλεται και στον τρόπο υπολογισμού και τοποθέτησης της θεμελίωσης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

7.1 Συμπεράσματα

Ένα από τα κυριότερα συμπεράσματα μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι ότι σε όλα τα εξεταζόμενα ύψη ο βέλτιστος σχεδιασμός του πύργου της ανεμογεννήτριας με βάση το κόστος προκύπτει για χάλυβα S235.

Όσον αφορά την ανάλυση των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με το κέρδος στον κύκλο ζωής της ανεμογεννήτριας και το βέλτιστο ύψος τοποθέτησης της αυτή έδειξε τα εξής :

- Για διαθέσιμο αιολικό δυναμικό κάτω από 8 m/s → έχουμε ζημία για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.
- Για την ανεμογεννήτρια Vestas V80-2MW βέλτιστη θέση τοποθέτησης είναι ο πύργος 80 μέτρων από χάλυβα S235 με καθαρό κέρδος 1.254.486,52 € για θεώρηση πάκτωσης, 1.194.211€ για επιφανειακό πέδιλο και 746.184€ για πασσαλοθεμελίωση.
- Για την ανεμογεννήτρια Vestas V90-3MW βέλτιστη θέση τοποθέτησης είναι ο πύργος 80 μέτρων από χάλυβα S235 με καθαρό κέρδος 2.932.789,32€, 2.851.572,00 € και 2.374.184,00 € αντίστοιχα.
- Για την ανεμογεννήτρια Vestas V112-3MW βέλτιστη θέση τοποθέτησης είναι ο πύργος 100 μέτρων από χάλυβα S235 καθώς επίσης παρατηρούμε ότι είναι πλήρως αντιοικονομική η τοποθέτησή της οπουδήποτε αλλού.
- Η θεμελίωση επηρεάζει το κόστος ιδιαίτερα στην περίπτωση της Vestas V80-2MW όπου παρατηρείται σημαντική μείωση του καθαρού κέρδους για θεμελίωση με πασσάλους

7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Συνοπτικά κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα ή/και συνέχιση και επέκταση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία παρατίθενται παρακάτω :

- ✓ Βελτιστοποίηση πύργου χρησιμοποιώντας αναλυτικότερο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που να προσομοιάζει τις συνδέσεις και το άνοιγμα της πόρτας στη βάση.
- ✓ Βελτιστοποίηση πύργου με έλεγχο κόπωσης στις συνδέσεις.
- ✓ Βελτιστοποίηση συστήματος πύργου-θεμελίωσης.
- ✓ Εφαρμογή ίδιας μεθοδολογίας με άλλα μοντέλα ανεμογεννήτριας (μικρότερης ισχύος για διαθέσιμο αιολικό δυναμικό <6,5m/s και μεγαλύτερης ισχύος για >10m/s).
- ✓ Αναλυτική αεροδυναμική ανάλυση για εύρεση των ακριβών φορτίων που ενεργούν στον πύργο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Baniotopoulos, Charalambos; Borri, Claudio; Stathopoulos, Theodore (2011) - Environmental Wind Engineering and Design of Wind Energy Structures.
- [2] Hani M. Negm, Karam Y. Maalawi, (1999)-Structural design optimization of wind turbine towers
- [3] Eurocode 3.1.06. Strength and Stability of Shell Structures (2004)
- [4] Νίκος Λαγαρός (2000) - Βελτιστοποίηση κατασκευών με τη χρήση εξελικτικών αλγόριθμων και νευρωνικών δικτύων.
- [5] Ευάγγελος Ε. Πλεύρης (2001) - Βέλτιστος σχεδιασμός κατασκευών με πολλαπλά κριτήρια με χρήση στρατηγικών εξέλιξης
- [6] Design Of Foundations For Wind Turbines Master's Dissertation by Henrik Svensson Copyright © 2010 by Structural Mechanics, LTH, Sweden
- [7] Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδος Σημειώσεις για τον Ευρωκώδικα 7 (EN 1997)
- [8] Εμμανουήλ Ν. Ροβίθης, Διδακτορική Διατριβή: Δυναμική Ανάλυση Συζευγμένων Συστημάτων Εδαφους-Πασσαλοθεμελίωσης-Ανωδομής.
- [9] Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους και Πυλώνων Ανεμογεννητριών, Ψαρροπουλος, Π., Παναγιωτου, Μ., Γαντες, Χ., Γκαζέτας, Γ.
- [10] Guidelines for Design of Wind Turbines Guidelines for Design of Wind Turbines – DNV/Risø
- [11] STAAD.pro 2007 Design of Wind Turbine Foundations By RAM/STAAD Solution Center 2nd November 2007
- [12] Optimized frequency-based foundation design for wind turbine towers utilizing soil–structure interaction, Mohammad AlHamaydeha, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, American University of Sharjah, Sharjah, UAE, Saif Hussain President, Seismic Structures International, Los Angeles, CA, USA, Available online 24 April 2010
- [13] Αλληλεπίδραση Εδάφους Κατασκευής Γ. Γκαζέτας & Μ. Καββαδάς 2010
- [14] Θεμελιώσεις με πασσάλους, Επιφανειακές θεμελιώσεις Α.Αναγνωστόπουλος, Β.Παπαδόπουλος
- [15] www.ypeka.gr
- [16] http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/Wind_in_power_2011_European_statistics.pdf
- [17] http://www.awea.org/learnabout/publications/upload/20percent_Wind_factsheet.pdf

- [18] Wind Turbine Technology Overview Brian McCaffrey, P.E. Available at: www.powernaturally.org October 2005, NYS Energy Research & Development Authority
- [19] Μπίρδας Μιχαήλ (Νοέμβριος 2012) - Βέλτιστος Δομικός Σχεδιασμός Ανεμογεννητριών, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ.