

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ



Διπλωματική Εργασία :

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΔΟΜΙΚΟΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Μπίρδας Μιχαήλ

Επιβλέπων : Ν.Λαγαρός Λέκτορας ΕΜΠ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νίκο Λαγαρό για την άψογη καθοδήγηση και βοήθεια στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μου.

Επίσης θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους, ιδιαίτερα κατά τον τελευταίο χρόνο των σπουδών μου.

Περίληψη

Η Αιολική Ενέργεια παρουσιάζει εντυπωσιακή ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια με έναν από τους κύριους λόγους να αποτελεί το γεγονός ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως δεσμευτικό στόχο το 20% του ενεργειακού της εφοδιασμού να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές μέχρι το 2020. 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 εργασία έχει θέσει έναν διπλό στόχο. Ο πρώτος στόχος αφορά την βελτιστοποίηση του δομικού σχεδιασμού με βάση το κόστος ενός χαλύβδινου σωληνοειδή πύργου που στηρίζει μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα, συναρτήσει του ύψους του. Ο δεύτερος στόχος αφορά την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας που αφορά την εύρεση του βέλτιστου ύψους τοποθέτησης μιας ανεμογεννήτριας με βάση το κέρδος στον κύκλο ζωής της, συναρτήσει του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού μιας περιοχής.

Για την επίτευξη αυτού του διπλού στόχου σχεδιάζονται στο πρόγραμμα SAP2000 πέντε μοντέλα του πύργου σε πέντε διαφορετικά ύψη των 80, 100, 120, 140, 160 μέτρων, επιλέγεται ο τύπος της ανεμογεννήτριας Vestas V90-MW να τοποθετηθεί σε όλους τα μοντέλα και σε αυτά εφαρμόζονται όλα τα φορτία που ενεργούν στον πύργο. Στη συνέχεια τα μοντέλα περνάνε 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 για έξι περιπτώσεις (3 ποιοτήτων χάλυβα και 2 γεωμετρικών μορφών του πύργου) για κάθε ένα από τα 5 μοντέλα διαφορετικού ύψους.

Για την επίτευξη του δεύτερου στόχου αναπτύσσεται μια 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 μεικτά κέρδη από την 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 (6 περιπτώσεις για κάθε ύψος) για όλο το εξεταζόμενο φάσμα μέσων ετήσιων ταχυτήτων αναφοράς.

Συμπερασματικά, η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται προτείνοντας τόσο το βέλτιστο ύψος τοποθέτησης της Vestas V90-3MW για 3 διακριτές περιπτώσεις διαθέσιμου αιολικού δυναμικού όσο και το βέλτιστο δομικό σχεδιασμό του αντίστοιχου υποστηρικτικού πύργου, με βάση το κέρδος στον κύκλο ζωής της.

Abstract

Wind Energy is growing rapidly over the last years and main reason for this would be the European Union's firm target to produce a significant amount of its energy (20%) from renewable sources by 2020. New technologies lower the cost of harvesting energy from the wind and on the other hand the cost of extracting fossil fuel is growing.

This thesis raises a dual purpose. First objective would be the optimal minimum cost structural design of a horizontal-axis wind turbine tubular steel tower, depending on its size. Second objective would be to develop a methodology for finding the optimal placement of a wind turbine based on the profit of its life cycle, as a function of the available wind energy potential of a region.

To achieve this dual objective five models of the tower were designed in the SAP2000 finite element program, in five different heights of 80, 100, 120, 140, 160 meters. The wind turbine model of Vestas V90-MW was decided to be placed in all 5 models and all loads acting on the tower were applied. Then the models were passed into the Optimus optimization program in which the full optimization problem regarding the objective design, the design variables, default parameters and design constraints, was stated. The Optimus program using optimization algorithm based on differential evolution method gives the optimal design based on the cost of six cases (3 steel grades and 2 geometric shapes of the tower) for each of the 5 models of different heights.

To achieve the second objective a methodology was developed that calculates the kilowatt per hour (kWh) generated for each level of the tower in the life cycle of a wind turbine (20 years), for a range of average annual wind speed based on 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 (6 cases for each height) for the whole range of average annual reference wind speed was calculated.

As a result, this thesis concludes by suggesting the optimum mounting height of the Vestas V90-3MW on 3 separate available wind resources occasions and the optimal structural design of the corresponding supporting tower, based on the maximum profit obtained in the lifecycle of the wind turbine.

Στην Πόπη, τον Στέφανο, την Μαργαρίτα, την Σοφία...

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	9
1.1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	9
1.1.1. Είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	10
1.2. Αιολική ενέργεια.....	11
1.2.1. Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα.....	12
1.2.2. Ο ρόλος της αιολικής ενέργειας στην οικονομία.....	14
1.2.3. Ο ρόλος του πολιτικού μηχανικού στην αιολική ενέργεια.....	15
1.3. Ανεμογεννήτριες.....	16
1.3.1. Κατηγορίες ανεμογεννητριών.....	17
1.3.2. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.....	17
1.3.3. Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα	19
1.3.4. Vestas V90-3MW.....	22
1.3.5. Ο πύργος της ανεμογεννήτριας.....	26
1.4. Σκοπός – δομή της εργασίας.....	30
2. Απαιτήσεις – ανάλυση σχεδιασμού του πύργου.....	31
2.1 Απαιτήσεις σχεδιασμού.....	31
2.2 Ανάλυση σχεδιασμού.....	33
2.2.1 Φορτία πύργου.....	33
2.2.2 Συνδυασμοί φορτίσεων – οριακές καταστάσεις σχεδιασμού.....	36
2.2.3 Ανάλυση συχνότητων.....	49
2.2.4 Ανάλυση φλαντζών συνδέσεως.....	50
2.2.5 Ανάλυση συγκολλητών συνδέσεων.....	53
3. Βέλτιστος σχεδιασμός του πύργου.....	54
3.1 Βελτιστοποίηση.....	54
3.2 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.....	55

3.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση βέλτιστου σχεδιασμού πύργου.....	61
3.4 Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης.....	63
4. Εφαρμογή- αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....	69
4.1 Γενικά.....	69
4.2 Διατύπωση στόχων.....	69
4.3 Περιγραφή μεθοδολογίας.....	70
4.4 Στοιχεία δεδομένων – επεξεργασία.....	73
4.4.1 Στοιχεία ανεμογεννήτριας.....	73
4.4.2 Στοιχεία αιολικού δυναμικού.....	74
4.4.3 Στοιχεία πυκνότητας αέρα.....	75
4.4.4 Στοιχεία ηλεκτροπαραγωγής.....	77
4.4.5 Οικονομικά στοιχεία.....	79
4.5 Επίτευξη στόχων – Αποτελέσματα.....	81
4.5.1 Κόστος κατασκευής – Ύψος πύργου.....	81
4.5.2 Συνολικό κόστος ανεμογεννήτριας – Ύψος πύργου.....	82
4.5.3. Καθαρό κέρδος στον κύκλο ζωής της ανεμογεννήτριας.....	84
4.5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	97
4.6 Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελεσμάτων.....	98
5. Συμπεράσματα – προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	103
6. Βιβλιογραφία.....	104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

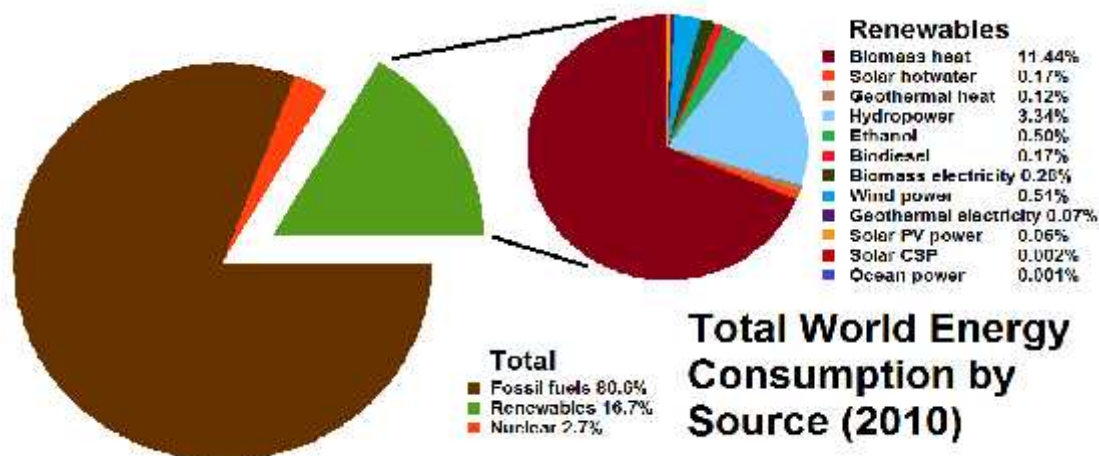
Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από κάθε πηγή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ανανεώνεται μέσω φυσικών φαινομένων μόνιμου κύκλου. Εκμεταλλεύεται την ήδη υπάρχουσα ροή ενέργειας στη φύση χωρίς να χρειάζεται κάποια ενεργητική παρέμβαση όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας. Πρόκειται για καθαρές μορφές ενέργειας, φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεδυμούν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως οι άλλες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι οι ΑΠΕ θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη.

Οι ΑΠΕ έχουν μελετηθεί ως λύση στο πρόβλημα της αναμενόμενης εξάντλησης των (μη ανανεώσιμων) αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων. 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 και για τα κράτη μέλη. Οι ΑΠΕ αποτελούν τη βάση του μοντέλου οικονομικής ανάπτυξης της πράσινης οικονομίας και κεντρικό σημείο εστίασης της σχολής των οικολογικών οικονομικών, η οποία έχει κάποια επιρροή στο οικολογικό κίνημα.

Χρησιμοποιούνται είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση) είτε μετατρεπόμενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια). Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό απ' τις ήπιες μορφές ενέργειας είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Η υψηλή όμως μέχρι πρόσφατα τιμή των νέων ενεργειακών εφαρμογών, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής καθώς και πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες που έχουν να κάνουν με τη διατήρηση του παρόντος στάτους κβο στον ενεργειακό τομέα εμπόδισαν την εκμετάλλευση έστω και μέρους αυτού του δυναμικού.

1.1.1 Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

- Αιολική ενέργεια: Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές (π.χ. την άλεση στους ανεμόμυλους). Έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως για ηλεκτροπαραγωγή.
- Ηλιακή ενέργεια. Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι) ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, με την βοήθεια της πολιτικής προώθησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από το ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.
- Υδραυλική ενέργεια. Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.
- 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
 - Ενέργεια από παλίρροιες. 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.
 - Ενέργεια από κύματα. Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.
 - Ενέργεια από τους ωκεανούς. Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας.



Σχήμα 1.1 Συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά πηγή

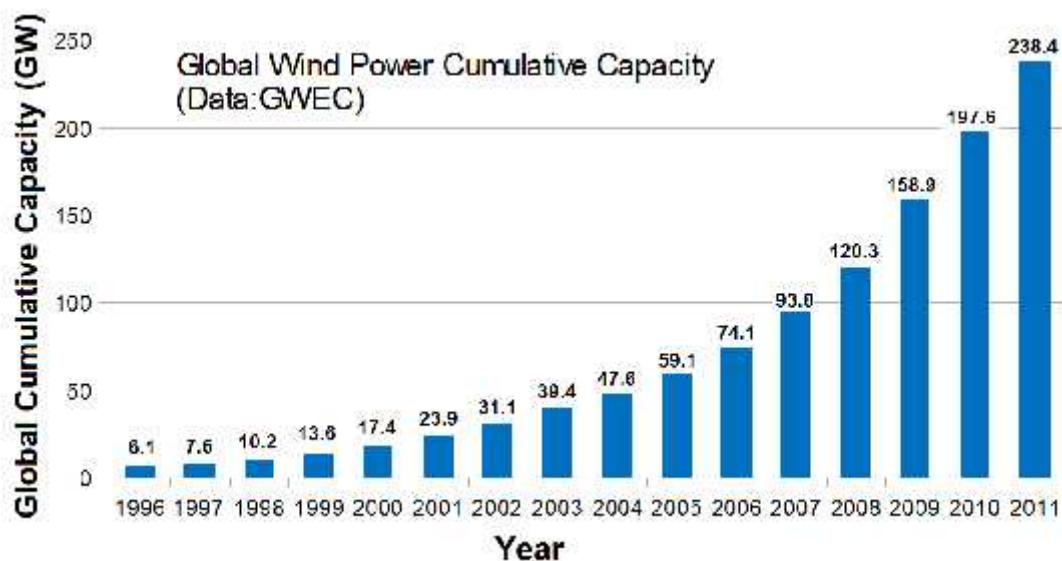
1.2 Αιολική Ενέργεια

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται "ήπια μορφή ενέργειας" και περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές, όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους. Η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας ήταν τα ιστία (πανιά) των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων και πολύ αργότερα οι ανεμόμυλοι στην ξηρά. Ονομάζεται αιολική γιατί στην ελληνική μυθολογία ο Αίολος ήταν ο θεός του ανέμου.

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. Με την εγκατάσταση περισσότερων ανεμογεννητριών στην ίδια θέση, σχηματίζονται αιολικά πάρκα. Ένα μεγάλο αιολικό πάρκο μπορεί να αποτελείται από αρκετές εκατοντάδες μεμονωμένες ανεμογεννήτριες οι οποίες συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Υπεράκτια αιολικά πάρκα μπορούν να αξιοποιήσουν πιο συχνούς και ισχυρούς ανέμους από τις χερσαίες εγκαταστάσεις και έχουν λιγότερο ορατή επίπτωση στο τοπίο, αλλά το κόστος κατασκευής είναι σημαντικά υψηλότερο.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια θερμοκηπίου και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι

μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επίσης, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.



Σχήμα 1.2 Παγκόσμια συνολική δυναμικότητα αιολικής ενέργειας

1.2.1 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Αιολικής Ενέργειας

Συνοπτικά τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την χρησιμοποίηση της αιολικής ενέργειας έχουν ως εξής:

Πλεονεκτήματα:

- Ο άνεμος παρέχεται δωρεάν και είναι ανανεώσιμος δηλαδή η Γη θα συνεχίσει να τον προσφέρει για πάντα και είναι στο χέρι των ανθρώπων να τον χρησιμοποιήσουν και να τον εκμεταλλευτούν προς όφελός τους.
- Η αιολική ενέργεια είναι φιλική προς το περιβάλλον, καθώς δεν καίγονται ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρισμού, δεν επιβαρύνει δηλαδή το τοπικό περιβάλλον με επικίνδυνους αέριους ρύπους, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου, καρκινογόνα μικροσωματίδια όπως γίνεται με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι ανεμογεννήτριες καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο από το μέσο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες καταλαμβάνουν μόνο μερικά τετραγωνικά μέτρα για τη βάση τους, και αυτό επιτρέπει στο έδαφος γύρω από την

μονάδα να χρησιμοποιηθεί για πολλούς σκοπούς, όπως για παράδειγμα τη γεωργία.

- Νεότερες τεχνολογίες κάνουν την εξαγωγή της αιολικής ενέργειας πολύ πιο αποτελεσματική και κατά επέκταση οικονομική. Το αρχικό κόστος κατασκευής και λειτουργίας θα συνεχίσει να μειώνεται, συμπαρασύροντας την τιμή της κιλοβατώρας (KWh) σε αντίθεση με την τιμή των ορυκτών καυσίμων που θα συνεχίσει να ανεβαίνει λόγω εξάντλησης των αποθεμάτων και τις δυσκολίες εξόρυξης των καινούργιων αποθεμάτων σε μεγάλα βάθη.
- Απομακρυσμένες περιοχές, όπως ορεινά χωριά, που δεν είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιήσουν ανεμογεννήτριες για να παράγουν το δικό τους ηλεκτρικό ρεύμα.
- Οι ανεμογεννήτριες είναι διαθέσιμες σε μια ποικιλία μεγεθών, που σημαίνει ένα ευρύ φάσμα ανθρώπων και επιχειρήσεων μπορούν να τις χρησιμοποιήσουν. Μονομελή νοικοκυριά σε μικρές πόλεις και χωριά μπορούν να κάνουν καλή χρήση του φάσματος των ανεμογεννητριών που είναι διαθέσιμες σήμερα.

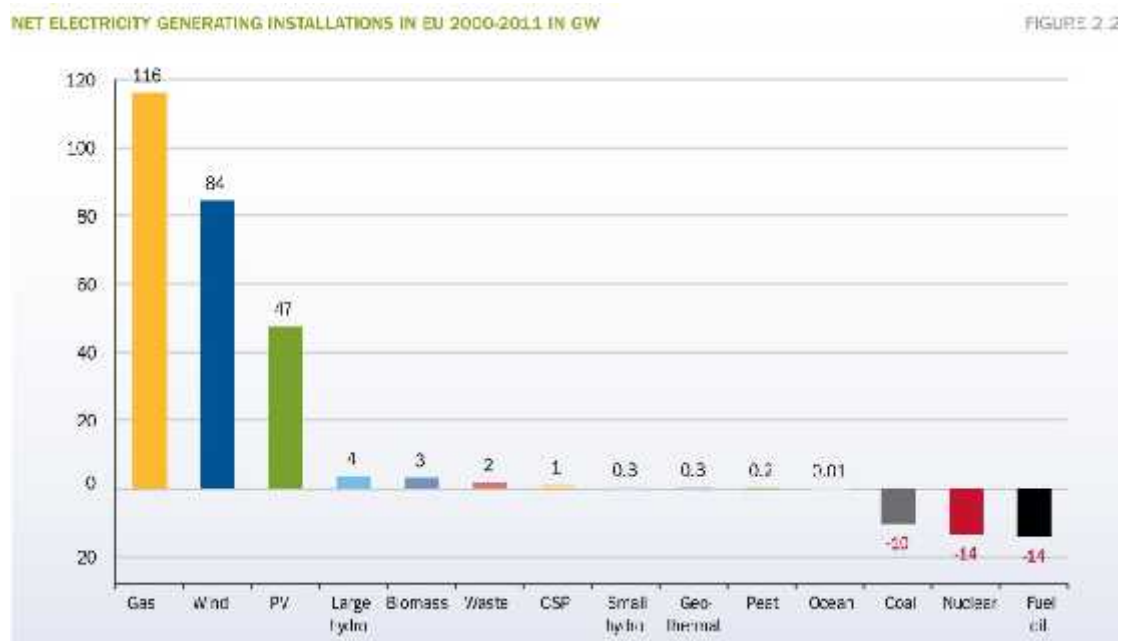
Μειονεκτήματα:

- Η δύναμη του ανέμου δεν είναι σταθερή και κυμαίνεται από μηδέν έως και δύναμη επιπέδου καταιγίδας. Αυτό σημαίνει ότι οι ανεμογεννήτριες δεν παράγουν την ίδια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας όλη την ώρα. Σε πολλές περιοχές, η ένταση ανέμων είναι πολύ χαμηλή για να υποστηρίξει μια ανεμογεννήτρια ή ένα αιολικό πάρκο
- Οι ανεμογεννήτριες παράγουν γενικά λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια κατά μέσο όρο από έναν σταθμό παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιεί ορυκτά καύσιμα, οπότε απαιτούνται να κατασκευαστούν πολλαπλές ανεμογεννήτριες, ώστε να έχει το ίδιο αντίκτυπο.
- Η μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα εξ αποστάσεως μπορεί να είναι ένα σημαντικό εμπόδιο για τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, δεδομένου ότι πολλές φορές οι ανεμογεννήτριες δεν βρίσκονται γύρω από τα αστικά κέντρα.
- Διαμαρτυρίες και / ή αναφορές αντιμετωπίζει συνήθως κάθε προτεινόμενη ανάπτυξη αιολικών πάρκων. Οι άνθρωποι αισθάνονται ότι η ύπαιθρος θα πρέπει να μείνει ανέπαφη και να μπορούν όλοι να απολαύσουν την ομορφιά της.
- Η αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες, με τη μορφή των μπαταριών, υδρογόνου ή άλλων μορφών εξακολουθεί να χρειάζεται έρευνα και ανάπτυξη για να καταστούν εμπορικά βιώσιμες.
- Η ηχορύπανση από τις εμπορικές ανεμογεννήτριες είναι μερικές φορές παρόμοια με ένα μικρό κινητήρα τζετ και αποτελεί πρόβλημα σε όσους κατοικούν μέσα σε λίγες εκατοντάδες μέτρα από μια ανεμογεννήτρια. Ωστόσο νέες τεχνολογίες έχουν μειώσει αισθητά τα επίπεδα της ηχορύπανσης.
- Μερικοί περιβαλλοντολόγοι έχουν παραπονεθεί ότι οι μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι επικίνδυνες όταν τοποθετούνται πάνω στις μεταναστευτικές διαδρομές των πουλιών.

1.2.2 Ο Ρόλος της Αιολικής Ενέργειας στην Οικονομία

Η αξιοποίηση της βιώσιμης ενέργειας από τον άνεμο είναι μια από τις πιο θετικές εξελίξεις που δημιουργήθηκε από τη σημερινή θύελλα αβεβαιότητας που εξαπέλυσε, ως αποτέλεσμα της ανόδου των τιμών του πετρελαίου, η κλιματική αλλαγή, την υποβάθμιση του περιβάλλοντος, την εξάντληση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων και την εξάρτηση από εξωτερικές πηγές ενέργειας.

Πράγματι, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως δεσμευτικό στόχο του 20% του ενεργειακού της εφοδιασμού να προέρχεται από αιολική ενέργεια και άλλες ανανεώσιμες πηγές μέχρι το 2020. Για την επίτευξη αυτού του στόχου του 20% της ενέργειας, περισσότερο από το ένα τρίτο της ευρωπαϊκής ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με την αιολική ενέργεια να αναμένεται να συνεισφέρει 14-18%.



Σχήμα 1.3 Καινούργιες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος στην ΕΕ την περίοδο 2000-2011.

Μερικά από τα πολλά οφέλη της αιολικής ενέργειας που σχετίζονται με την οικονομία:

- Η οικονομική ανάπτυξη και δημιουργία θέσεων εργασίας. Το 2010, οι επενδύσεις σε νέα αιολικά πάρκα στην Ευρώπη ανήλθαν σε € 13 δισ., συμπεριλαμβανομένων των € 2,6 δισεκατομμυρίων offshore. Το 2010, πάνω από το 40% όλων των νέων εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ ήταν από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η αιολική ενέργεια μόνο αντιπροσώπευε το 17%. Περίπου 190.000 άνθρωποι στην ΕΕ ήταν σε σχετική με την αιολική ενέργεια απασχόληση το 2010. Η βιομηχανία αιολικής ενέργειας θα μπορούσε να δημιουργήσει έως και 271.000 νέες θέσεις εργασίας στην ΕΕ μέχρι το 2020.
- Καθαρισμός του περιβάλλοντος. 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 ενεργειακή ανεξαρτησία. 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.

1.2.3 Ο Ρόλος του Πολιτικού Μηχανικού στην Αιολική Ενέργεια

Ο ρόλος του πολιτικού μηχανικού στον τομέα της αιολικής ενέργειας είναι ο σχεδιασμός, το χτίσιμο και η συντήρηση των δομικών έργων στα οποία στηρίζεται οι εγκαταστάσεις της αιολικής ενέργειας όπως ο πυλώνας και τα θεμέλια των ανεμογεννητριών. Εμπλέκεται επίσης σε όλα τα στάδια των έργων από τη μελέτη έως τον τελικό λεπτομερή σχεδιασμό όσον αφορά τόσο στα νέα έργα όσο και στην αναβάθμιση των υπάρχοντων εγκαταστάσεων και ως εκ τούτου περνάει τον χρόνο του μεταξύ των γραφείων σχεδιασμού/υποστήριξης και της επιτόπιας επίβλεψης της κατασκευής ή επιθεώρησης των υπαρχουσών εγκαταστάσεων.

Το επάγγελμα του πολιτικού μηχανικού στον τομέα της αιολικής ενέργειας απαιτεί εκτέλεση εργασιών σε μία υψηλής ποιότητας πολυτομεακή ομάδα μηχανικών και τεχνολόγων. Θα χρειαστεί επομένως να διαθέτει καλές δεξιότητες επικοινωνίας και διαπροσωπικά προσόντα όπως π.χ. ικανότητα αποτελεσματικής επικοινωνίας με τα μέλη της ομάδας και άσκηση επιρροής στις πράξεις τους. Επίσης απαιτούνται καλή ικανότητα τήρησης του προγράμματος ώστε να εκτελούνται τα έργα χωρίς να ξεφεύγουν από τον

οικονομικό προϋπολογισμό και εντός του καθορισμένου χρονοδιαγράμματος. Επιπλέον είναι απαραίτητες δεξιότητες τεχνολογίας πληροφοριών περιλαμβανομένης της ικανότητας να εργάζεται με μοντέλα υπολογιστών. Τέλος οφείλει να έχει ευελιξία μετακίνησης στις διάφορες τοποθεσίες που εκτελούνται τα έργα πολλές φορές σε απομακρυσμένες περιοχές.

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

- Δομικός σχεδιασμός των υποστηρικτικών κατασκευών της ανεμογεννήτριας(θεμελίωση-πυλώνας).
- Σχεδιασμός οδοστρωμάτων, εκχωματώσεων και υποδομών για δίκτυο αγωγών. Το έργο μπορεί να περιλαμβάνει εξειδικεύσεις όπως παράκτιες και θαλάσσιες κατασκευές.
- Χειρισμό της διαδικασίας ‘υποβολής προσφορών’ για τη σύγκριση των προσφορών των εργολάβων (αυτό μπορεί να περιλαμβάνει λεπτομερή έλεγχο των σχεδίων, και των συγγραφών υποχρεώσεων αναθεώρησης και έγκρισης).
- Συνεργασία για την παράδοση συγκεκριμένων εργασιών για δοσμένα έργα – περιλαμβανομένης της επιτήρησης της κατασκευής.
- Επιθεωρήσεις και αναλύσεις των υπάρχοντων διαρθρώσεων και κατά επέκταση λήψη ενεργειών για αποκατάσταση και αναγέννηση αυτών.

1.3 Ανεμογεννήτριες

Η ανεμογεννήτρια είναι η συσκευή που μετατρέπει την κινητική ενέργεια, από τον άνεμο, σε μηχανική. Εάν η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η συσκευή μπορεί να ονομάζεται ανεμογεννήτρια ή αιολικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής. Εάν η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την οδήγηση μηχανημάτων, όπως για το άλεσμα δημητριακών ή την άντληση του νερού, η συσκευή ονομάζεται ανεμόμυλος ή αντλία αέρα. Ομοίως, μπορεί να ονομάζεται φορτιστής άνεμου όταν χρησιμοποιείται για τη φόρτιση μπαταριών.

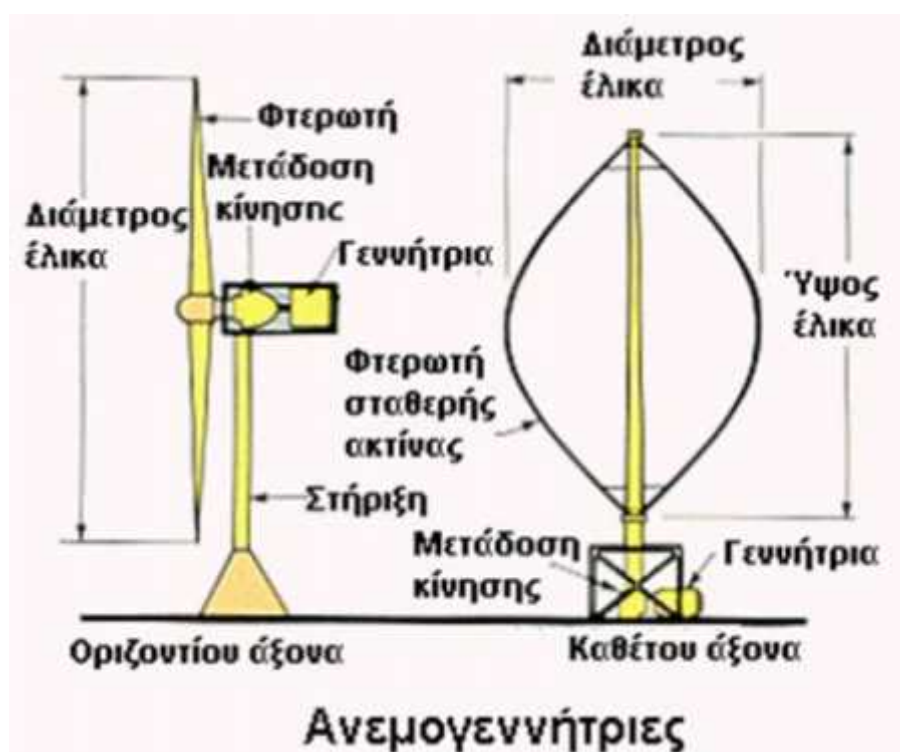
Το αποτέλεσμα της πάνω από μια χιλιετίας ανάπτυξη του ανεμόμυλου και των σύγχρονων τεχνολογιών, είναι οι ανεμογεννήτριες να κατασκευάζονται σήμερα σε ένα ευρύ φάσμα τύπων κάθετου και οριζόντιου άξονα. Μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές όπως η φόρτιση της μπαταρίας ή βοηθητική ισχύς των πλοίων. Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες, διασυνδεδεμένες σε συστοιχίες, συμβάλουν στην ολοένα και πιο σημαντική πηγή της αιολικής ενέργειας για παραγωγή εμπορικής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται για να εκμεταλλεύονται την αιολική ενέργεια που υπάρχει σε μια δεδομένη περιοχή. Χρησιμοποιείται αεροδυναμική ανάλυση και

μοντελοποίηση για να καθοριστεί το βέλτιστο ύψος του πύργου, τα συστήματα ελέγχου, ο αριθμός και το σχήμα των λεπίδων.

1.3.1 Κατηγορίες Ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένα κριτήρια. Η κυριότερη κατηγορία έχει να κάνει με τον τρόπο που εκμεταλλεύονται τον άνεμο. Ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής διακρίνονται σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα η κατεύθυνση του ανέμου είναι πάντα παράλληλη με τον άξονα περιστροφής ενώ αντίθετα στις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, ο άξονας περιστροφής είναι πάντα κάθετος στο έδαφος και στην κατεύθυνση του ανέμου. Σε άλλες κατηγορίες χωρίζονται ανάλογα με το μέγεθος και την ισχύ που παράγουν, σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανεμογεννήτριες, ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων τους διακρίνονται σε μονοπτέρυγες και πολυπτέρυγες ενώ ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους διακρίνονται σε αργόστροφες και πολύστροφες.

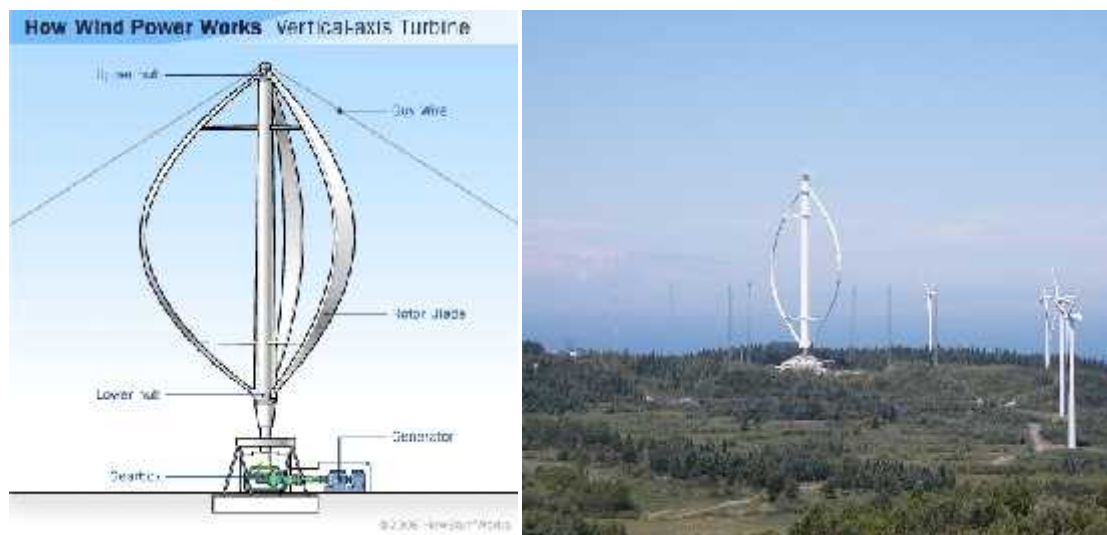


Σχήμα 1.4 : Οι 2 κύριοι τύποι ανεμογεννητριών

1.3.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Ο τύπος αυτός των ανεμογεννητριών έχει τοποθετημένο τον άξονα περιστροφής του ρότορα κατακόρυφα στο έδαφος και στην διεύθυνση του ανέμου. Βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι οι ανεμογεννήτριες δεν χρειάζεται να είναι προσανατολισμένες προς την φορά που φυσάει ο άνεμος για να είναι αποτελεσματικές καθώς εκμεταλλεύονται τον άνεμο από όλες τις διευθύνσεις. Αυτό είναι σημαντικό πλεονέκτημα σε τοποθεσίες και χώρους όπου η κατεύθυνση του ανέμου είναι εξαιρετικά μεταβλητή. Επίσης η γεννήτρια και οι λοιποί μηχανισμοί βρίσκονται κοντά στο έδαφος κάτι που διευκολύνει την συντήρηση και επισκευή τους. Αντίθετα βασικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι έχουν μικρή περιστροφική ταχύτητα και επομένως μικρό συντελεστή ισχύος. Επιπλέον συνήθως χρειάζονται υποβοήθηση για να ξεκινήσουν ενώ σε περιπτώσεις δυνατού ανέμου, εάν δεν ελεγχθούν σωστά, υπάρχει κίνδυνος καταστροφής τους. Τέλος εκμεταλλεύονται μικρές ταχύτητες ανέμου καθώς βρίσκονται κοντά στο έδαφος.

Οι δύο πιο δημοφιλείς μορφές ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι τύπου Darrieus και τύπου Savonius. Οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus εφευρέθηκε από τον Γάλλο μηχανικό George Darrieus το 1931. 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 απαιτούν μια αρχική ώθηση από κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας για να τεθεί σε λειτουργία καθώς έχουν χαμηλή στροφική ροπή εκκίνησης.



Σχήμα 1.5 : Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα τύπου Darrieus

Αντίθετα οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius περιστρέφονται αργά με μεγάλη μηχανική ροπή. 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 που την αεροτομή των λεπίδων(πτερύγιων) 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. Επιπλέον μια τέτοια τύπου ανεμογεννήτρια μπορεί να ξεκινήσει την λειτουργία της μόνο χειροκίνητα, ενώ η μικρή περιστροφική ταχύτητα αυξάνει το κόστος της και ως αποτέλεσμα την κάνει λιγότερο αποδοτική.

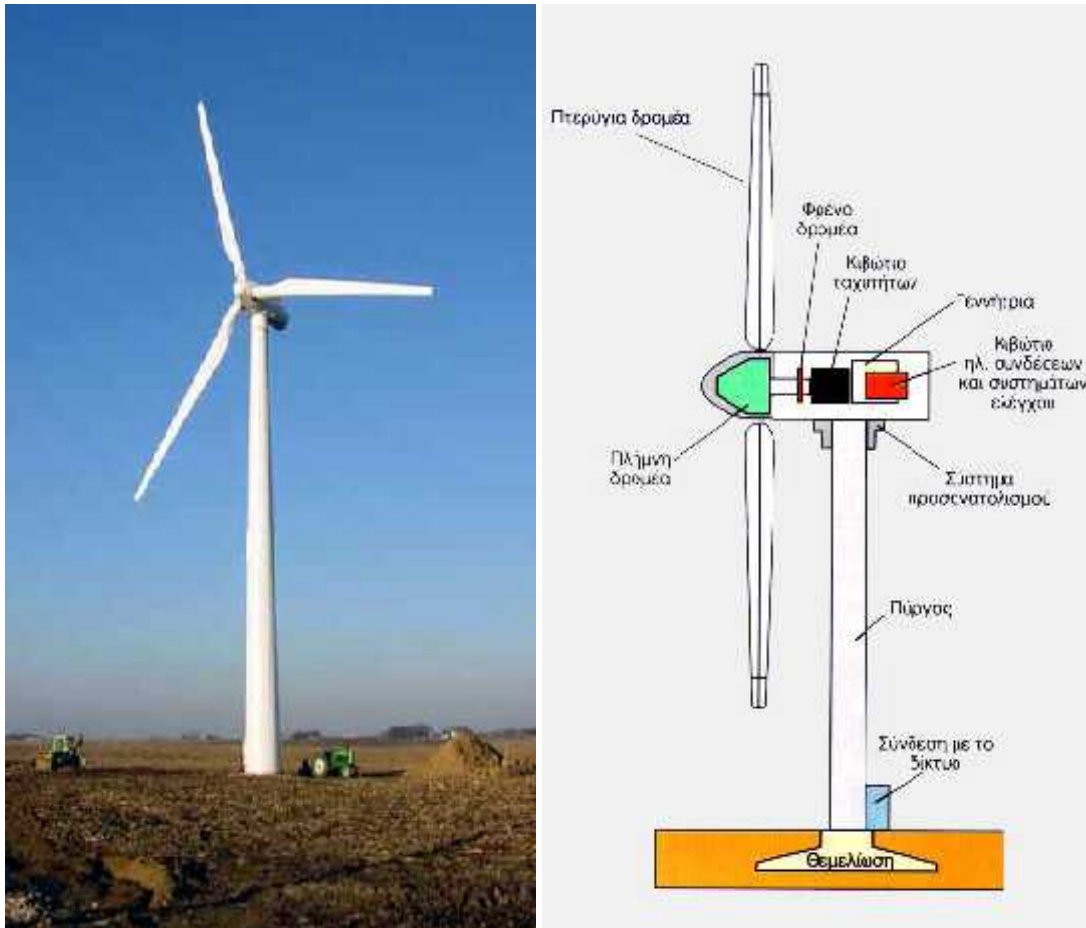


Σχήμα 1.6 : Ανεμογεννήτρια Κατακόρυφου Άξονα τύπου Savonius

1.3.3 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν τοποθετημένα 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 γενικά ένα αισθητήρα ανέμου σε συνδυασμό με ένα μηχανισμό περιστροφής του ρότορα. Οι περισσότερες έχουν ένα κιβώτιο ταχυτήτων, το

οποίο μετατρέπει την αργή περιστροφή των λεπίδων του ρότορα σε μια ταχύτερη περιστροφή που είναι πιο κατάλληλη για να αποδώσει μία ηλεκτρική γεννήτρια.

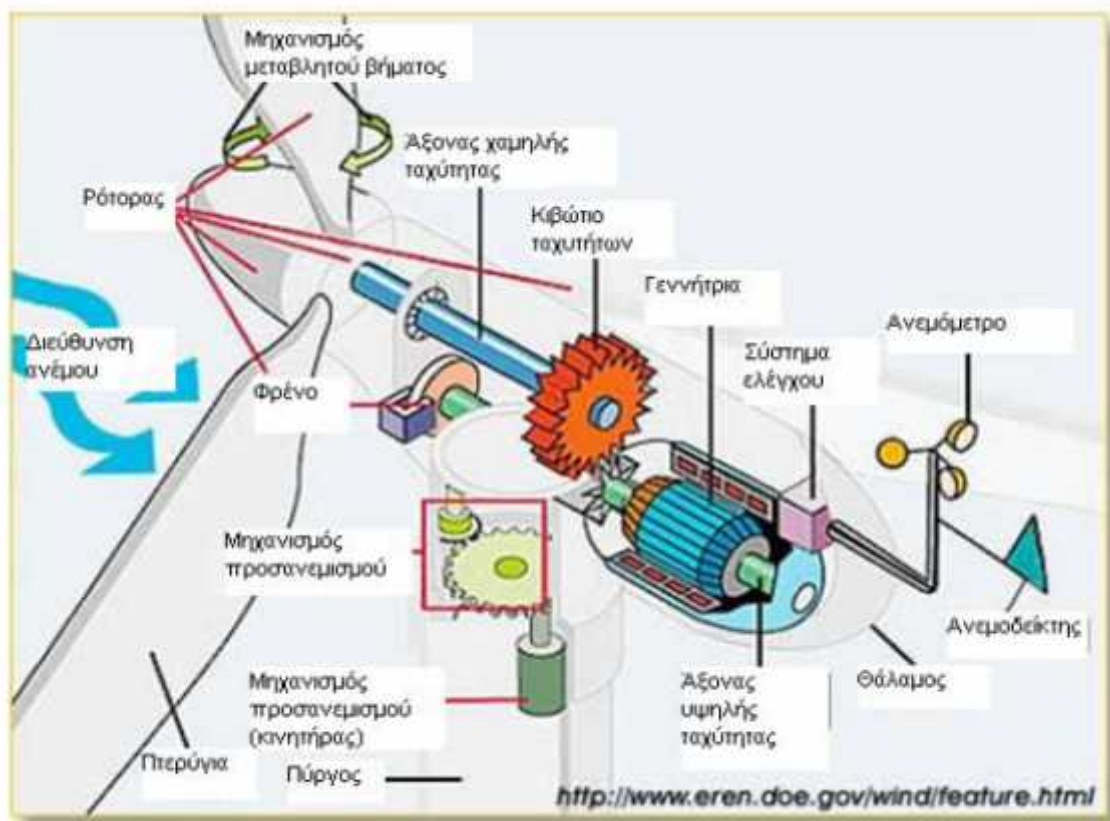


Σχήμα 1.7 : Ανεμογεννήτρια Οριζόντιου Άξονα

Δεδομένου ότι ένας πύργος παράγει αναταράξεις ανέμου πίσω από αυτόν, ο ρότορας είναι συνήθως τοποθετημένα προσήνεμα της υποστήριξης του πύργου. Τα πτερύγια κατασκευάζονται δύσκαμπτα έτσι ώστε να τα εμποδίζει από το 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.

Συνοπτικά τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα δίνονται παρακάτω :

- Πύργος (tower). Αποτελεί την βάση της στήριξης της ανεμογεννήτριας είναι συνήθως κυλινδρικής μορφής και κατασκευασμένος από χάλυβα. Εκτενέστερη ανάλυση θα γίνει σε επόμενη ενότητα.
- Ρότορας (rotor). Ονομάζεται το σύστημα που αποτελούν τα πτερύγια (blades) και η κεφαλή του ρότορα. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες αποτελούνται πλέον από τρία πτερύγια. Ο ρότορας περιστρέφεται από τον κεντρικό άξονα που είναι κατασκευασμένος συνήθως από ενισχυμένο και σκληρυμένο χάλυβα.
- Θάλαμος (nacelle). Περιέχει τα βασικά τεχνικά μέρη της ανεμογεννήτριας που συνήθως είναι : τη γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας , το φρένο, την μονάδα ψύξης, ανεμόμετρο, το μηχανισμό περιστροφής προσανεμισμού, και το υδραυλικό σύστημα που ελέγχει τη γωνία των πτερυγίων. Βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και κατασκευάζεται συνήθως από fiber glass.



Σχήμα 1.8 : Τεχνικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα

1.3.4 Η ανεμογεννήτρια Vestas V90-3MW

Το μοντέλο Vestas V90-3MW έχει ρότορα διαμέτρου 90 μέτρων με ενεργό μηχανισμό προσανατολισμού και ονομαστικής ισχύος 3,0MW. Αποτελείται από τρία πτερύγια και χρησιμοποιεί έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (pitch control), δηλαδή αυτά έχουν την δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον διαμήκη άξονα τους. Επομένως είναι δυνατό ο έλεγχος της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου με αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της αποκομισθείσας αεροδυναμικής ισχύος ανάλογα με τις συνθήκες. Η γεννήτρια χρησιμοποιεί την καινοτόμα τεχνολογία OptiTip και έχει τη δυνατότητα λειτουργίας το ρότορα με μεταβλητή ταχύτητα. Με αυτά τα χαρακτηριστικά έχει τη δυνατότητα διατήρησης της ονομαστικής ισχύος ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες του ανέμου, ανεξάρτητα από την θερμοκρασία και την πυκνότητα του αέρα. Σε χαμηλές ταχύτητες του ανέμου το σύστημα OptiTip και η λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας μεγιστοποιούν την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος δίνοντας την βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής (RPM) και γωνία/κλίση των πτερυγίων, το οποίο επίσης ελαχιστοποιεί την εκπομπή θορύβου από την γεννήτρια.

1.3.4.1 Περιγραφή του Θαλάμου (nacelle)

Ο θάλαμος είναι κατασκευασμένο 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. Οι αισθητήρες ανέμου καθώς και τα προειδοποιητικά φώτα, τοποθετούνται στη στέγη του θαλάμου.



Σχήμα 1.9 Ακριβής προσομοίωση του εσωτερικού του θαλάμου της V90-3MW

Ο θάλαμος του συγκεκριμένου μοντέλου περιέχει τα εξής τεχνικά μέρη :

- Πλάκα εδράσεως (machine foundation). Το μπροστινό μέρος της πλάκας εδράσεως της ατράκτου είναι η βάση για το σύστημα κίνησης το οποίο μεταδίδει τις δυνάμεις και τη ροπή από το δρομέα στον πύργο μέσω του συστήματος περιστροφής και είναι κατασκευασμένο από χυτό χάλυβα. Το κάλυμα του θαλάμου συναρμολογείται επί της πλάκας εδράσεως.
- Κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox). Είναι ο κύριος μηχανισμός που μεταδίδει τη ροπή από τον ρότορα στη γεννήτρια και είναι βιδωμένο στην πλάκα εδράσεως.
- Σύστημα προσανεμισμού (yaw system). Το σύστημα προσανεμισμού επιτρέπει να περιστρέφει ο θάλαμος με τον ρότορα προς την κατεύθυνση που φυσάει ο άνεμος και είναι ένα απλό σύστημα με ρουλεμάν με ενσωματωμένη τριβή. Το σύστημα μεταδίδει τις δυνάμεις από τον θάλαμο και ρότορα στον πύργο.
- Σύστημα πέδησης (brake system). Η ανεμογεννήτρια φρενάρει με πλήρη μεταβολή του βήματος των πτερυγίων. Επιπλέον μέσω υδραυλικού συστήματος ασκείται πίεση σε ένα δισκόφρενο που βρίσκεται στον κύριο άξονα υψηλής ταχύτητας. Αυτό το δισκόφρενο χρησιμεύει κ ως φρένο στάθμευσης.
- Γεννήτρια (generator). Η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος είναι ασύγχρονη τετραπολική και υδρόψυκτη. Η μεταβλητή ταχύτητα επιτρέπει την μεταβολή της ταχύτητας του ρότορα εντός μιας ευρείας περιοχής ταχυτήτων. Αυτό, μειώνεται τις διακυμάνσεις στην παροχή ρεύματος στο σύστημα ηλεκτρικού δικτύου καθώς και ελαχιστοποιεί τα φορτία σε ζωτικά μέρη του στροβίλου. Επιπλέον, το σύστημα μεταβλητής ταχύτητας βελτιστοποιεί την παραγωγή ενέργειας, ειδικότερα σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου.
- Το σύστημα ψύξης και κλιματισμού. Εάν η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό της ατράκτου υπερβεί ένα ορισμένο επίπεδο, βαλβίδες τύπου θυρίδας θα ανοίγουν προς τα έξω. Ένας ανεμιστήρας φέρνει εξωτερικό αέρα για την ψύξη του εσωτερικού της ατράκτου.

1.3.4.2 Περιγραφή του ρότορα

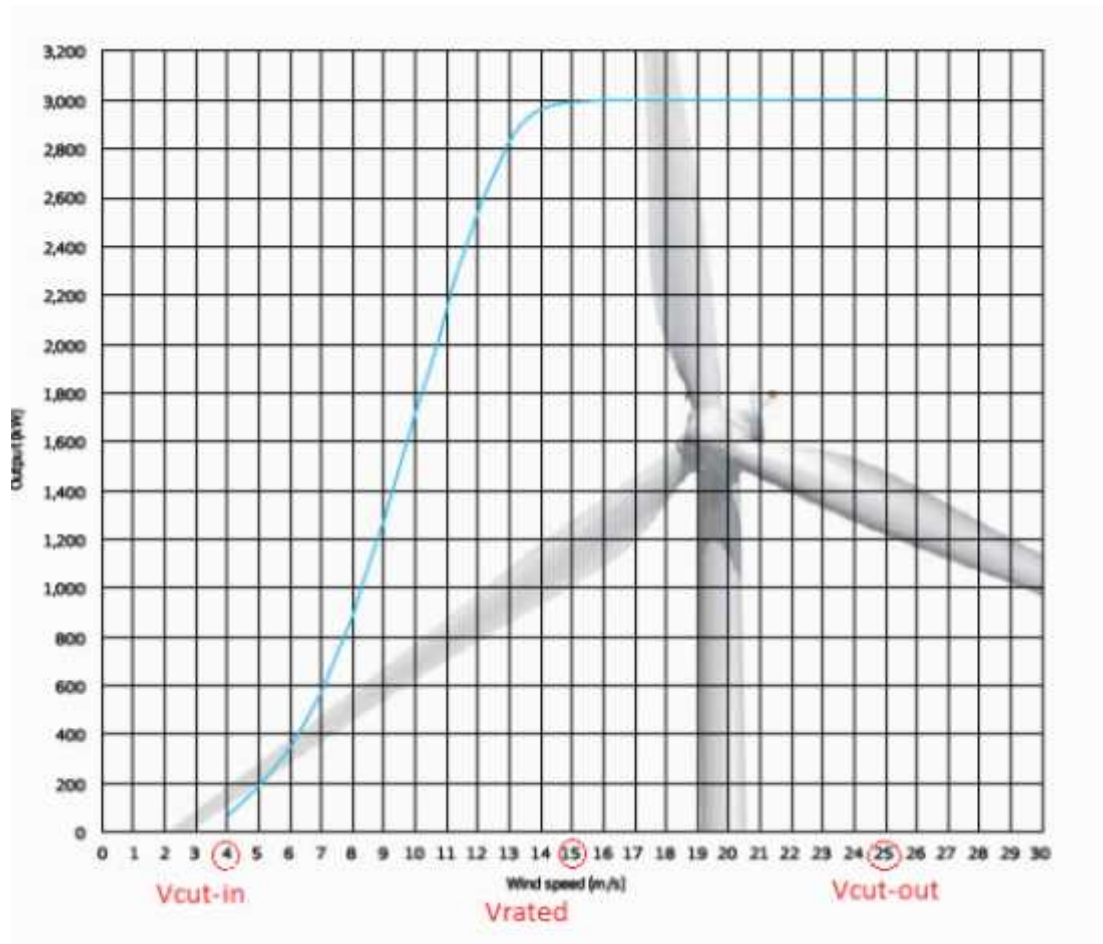
Τα πτερύγια είναι κατασκευασμένα από fiber glass ενισχυμένου εποξειδικού μίγματος και ανθρακονήματα. Κάθε πτερύγιο αποτελείται από μία εσωτερική δοκό περιβαλλόμενη από δύο κελύφη. Τα πτερύγια έχουν σχεδιαστεί για βέλτιστη απόδοση και ελαχιστοποίηση του θορύβου και της αντανάκλασης του φωτός. Κάθε πτερύγιο έχει ένα σύστημα προστασίας από κεραυνούς που αποτελείται από υποδοχείς κεραυνού στην άκρη του και έναν χάλκινο συρμάτινο αγωγό στο εσωτερικό του πτερυγίου.

Η πλήμνη (κωνική μύτη) είναι τοποθετημένη απευθείας πάνω στο κιβώτιο ταχυτήτων, απαλείφοντας με αυτό τον τρόπο τον κύριο άξονα που χρησιμοποιείτο παραδοσιακά για την μεταβίβαση της παραγόμενης αιολικής ενέργειας στη γεννήτρια μέσω του κιβώτιου ταχυτήτων.

Η V90 είναι εξοπλισμένη με ένα σύστημα ελέγχου του βήματος(κλίση) των πτερυγίων μέσω ενός μικροεπεξεργαστή που ονομάζεται OptiTip. Με βάση τις επικρατούσες συνθήκες ανέμου, τα πτερύγια τοποθετούνται συνεχώς στην βέλτιστη γωνία βήματος. Ο μηχανισμός αυτός τοποθετείται στην πλήμνη. Οι μεταβολές της γωνίας του βήματος γίνεται με υδραυλικούς κυλίνδρους, οι οποίοι είναι σε θέση να περιστρέφουν το πτερύγιο 95 °. Κάθε πτερύγιο έχει το δικό του υδραυλικό κύλινδρο ελέγχου του βήματος.

1.3.4.3 Καμπύλη ισχύος (power curve)

Η καμπύλη ισχύος δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρία (VESTAS) και δίνει την σχέση της παραγόμενης ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Η καμπύλη αυτή εξαρτάται από την διάμετρο των πτερυγίων, την αεροδυναμική τους ποιότητα, τις συνθήκες του ανέμου, την πυκνότητα του αέρα και τέλος της μηχανικής απόδοσης της γεννήτριας.



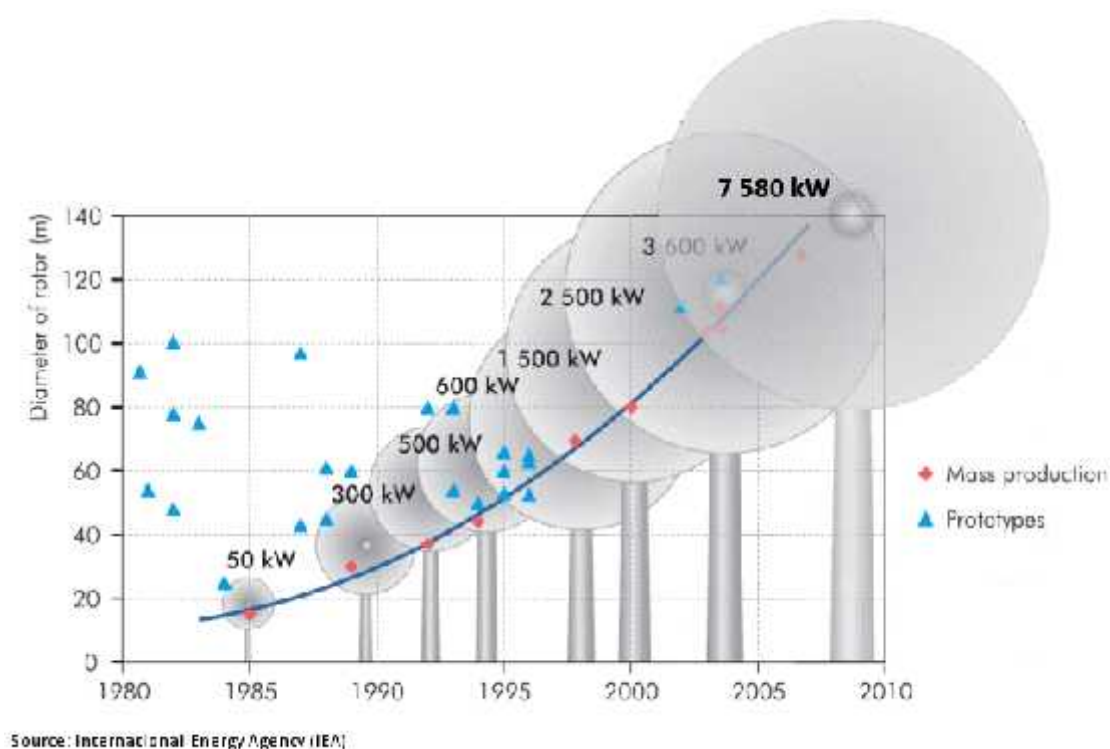
Σχήμα 1.10 Καμπύλη Ισχύος της V90-3MW

Η καμπύλη παρέχει τρεις χαρακτηριστικές τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Η πρώτη είναι η ταχύτητα κατά την οποία η ανεμογεννήτρια ξεκινάει να λειτουργεί και να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα (Vcut-in) και ισούται με 4(m/s). Η δεύτερη αποτελεί την τιμή της ταχύτητας του ανέμου κατά την οποία η ανεμογεννήτρια ξεκινάει να παράγει ρεύμα ίσο με την ονομαστική ισχύ της (Vrated), δηλαδή 3,0 MW, και ισούται με 15(m/s). Η τρίτη χαρακτηριστική τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι εκείνη κατά την οποία η ανεμογεννήτρια σταματά την λειτουργία της για λόγους ασφαλείας (Vcut-out) και ισούται με 25 (m/s).

1.3.5 Ο Πύργος της ανεμογεννήτριας (wind turbine tower)

Ο πύργος είναι ένα σημαντικό στοιχείο στη δομή της ανεμογεννήτριας, όχι μόνο για δομικούς λόγους (μεταφέρουν τα φορτία από τη νασέλα στα θεμέλια), αλλά και για οικονομικούς λόγους: όσο υψηλότερος είναι ο πύργος, τόσο μεγαλύτερο το ποσό της ενέργειας που παράγεται.

Για παράδειγμα, με αύξηση κατά 20 μέτρα από το ένα πρότυπο ύψος 80 μέτρων μπορεί να επιτευχθεί μία επιπλέον παραγωγή ενέργειας γύρω στο 5%. Κατά τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η τάση για κατασκευή ολοένα κ ψηλότερων πύργων. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει ψηλότερα υπάρχει καλύτερο διαθέσιμο αιολικό δυναμικό και μειώνεται η επιρροή των εμποδίων του εδάφους, όπως δέντρων και κτηρίων, που δημιουργούν αναταράξεις στην ροή του ανέμου. Στο μέλλον αναμένονται ακόμα ψηλότεροι πύργοι, επίσης, γιατί στην ώριμη πλέον αγορά αιολικής ενέργειας οι πιο παραγωγικές θέσεις έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 1.11 : Η πορεία αύξησης του ύψους του πύργου την περίοδο 1985-2010

Το μέσο ύψος των πύργων που έχουν εγκατασταθεί στην Ευρώπη είναι περίπου 80 μέτρα. Οι σύγχρονοι πύργοι έχουν ένα εσωτερικό ανελκυστήρα ή/και μια σκάλα και αρκετές ενδιάμεσες πλατφόρμες. Ένα άλλο στοιχείο που μπορεί να φιλοξενηθεί στον

πύργο, συνήθως στο κάτω μέρος, είναι ο μετασχηματιστής MW.

Ο πύργος μπορεί να κατασκευαστεί από διάφορα υλικά και με διαφορετικούς σχεδιασμούς. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ο χάλυβας και το οπλισμένο σκυρόδεμα, τις περισσότερες φορές προεντεταμένο, καθώς και συνδυασμός αυτών των δύο. Συνθετικά υλικά κατασκευής όπως το fiber glass βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο. Όσον αφορά τον σχεδιασμό έχουν ακολουθηθεί διαφορετικές έννοιες κατά καιρούς όπως μονοπολική διάταξη σωλήνα (tubular tower), δικτυωτός πύργος (lattice tower), με τριποδική διάταξη σωλήνων (three-legged tower) και μονοπολική διάταξη με αντιστήριξη καλωδίων (guy-wired pole tower).



Σχήμα 1.12 : Διαφορετικοί σχεδιασμοί πύργων ανεμογεννήτριας

Στη σύγχρονη εποχή έχουν επικρατήσει τρεις διαφορετικοί δομικοί σχεδιασμοί, οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί σε μεγάλη κλίμακα ανά τον κόσμο και παρατίθενται παρακάτω :

Δικτυωτός πύργος (lattice tower).

Οι δικτυωτοί πύργοι χρησιμοποιήθηκαν πολύ κατά το παρελθόν, όπου οι ανεμογεννήτριες ήταν πιο μικρές σε μέγεθος (λιγότερο από ένα 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 ελαφρύτερες 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 την νασέλα 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.

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 κωνικό 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, καθώς και ο πολύ εύκολος υπολογισμός των διατομών και των ιδιοτήτων αυτών.

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 ιδιουσυχνότητες 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 στην 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 Enercon.



Σχήμα 1.13 : Υβριδικός πύργος σκυροδέματος/χάλυβα

1.4 Σκοπός – Δομή εργασίας.

Η παρούσα εργασία έχει θέσει έναν διπλό στόχο. Ο πρώτος στόχος αφορά την βελτιστοποίηση του δομικού σχεδιασμού με βάση το κόστος ενός χαλύβδινου σωληνοειδή πύργου που στηρίζει μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα, συναρτήσει του ύψους του. Ο δεύτερος στόχος αφορά την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας που αφορά την εύρεση του βέλτιστου ύψους τοποθέτησης μιας ανεμογεννήτριας με βάση το κέρδος στον κύκλο ζωής της, συναρτήσει του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού μιας περιοχής.

Στο Κεφάλαιο 1 δίνονται εισαγωγικά στοιχεία γενικά για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ειδικά για την αιολική ενέργεια. Αναλύονται τα είδη των ανεμογεννητριών και εξετάζεται αναλυτικά το μοντέλο της Vestas V90-3MW το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Τέλος γίνεται αναφορά στα είδη των πύργων που στηρίζουν την ανεμογεννήτρια.

Στο Κεφάλαιο 2 δίνονται οι απαιτήσεις σχεδιασμού του πύργου την ανεμογεννήτριας. Επιπρόσθετα αναλύεται ο σχεδιασμός του πύργου με βάση τους Ευρωκώδικες.

Στο Κεφάλαιο 3 δίνονται συνοπτικά κάποια θεωρητικά στοιχεία για την βελτιστοποίηση, παρουσιάζονται συνοπτικά οι κατηγορίες και οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι μέθοδοι. Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των επιστημονικών εργασιών που έχουν γίνει πάνω σε βελτιστοποίηση πύργου ανεμογεννήτριας. Τέλος διατυπώνεται το μαθηματικό πρόβλημα της βελτιστοποίησης όπως θα περαστεί στη συνέχεια στο υπολογιστικό πρόγραμμα.

Στο Κεφάλαιο 4 δίνονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης και γίνεται επεξεργασία των στοιχείων για να επιτευχθούν οι αρχικοί στόχοι της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 5 δίνονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.

2.1 Απαιτήσεις σχεδιασμού

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ένας ικανοποιητικός σχεδιασμός του πύργου της ανεμογεννήτριας πρέπει να ικανοποιηθούν ορισμένες απαιτήσεις ως προς τις διαστάσεις, την πλαστική ροπή αντοχής, τον λυγισμό, της μετατόπισης της κορυφής του πύργου, τις φλάντζες συνδέσεως και των συγκολλήσεων. Επίσης όρια στην θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα του πύργου πρέπει να εξεταστούν.

- Διαστάσεις. Εξαιτίας περιορισμών στην μεταφορά, η εξωτερική διάμετρος του πύργου δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 4,5 m. Επιπρόσθετα λόγω περιορισμών του χάλυβα που μπορεί να επεξεργαστεί σε κύλινδρο χρησιμοποιώντας βασικό εξοπλισμό το πάχος δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 40 mm.
- Πλαστική οριακή ανάλυση. Στην οριακή κατάσταση αστοχίας ελέγχονται οι μέγιστες τάσεις von Mises σε κάθε σημείο του πύργου και συγκρίνονται με το όριο θραύσης του χάλυβα.
- Λυγισμός. Ελέγχονται οι επιτρεπόμενες τάσεις στην οριακή κατάσταση λυγισμού σε κάθε σημείο του πύργου.
- Μετατόπιση της κορυφής του πύργου. Η μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση της κορυφής του πύργου τίθεται 1,00% του ύψους του πύργου έτσι ώστε να αποφευχθεί υπερβολική κίνηση που θα παρεμπόδιζε την ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας.
- Θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα. Για να αποφύγουμε το φαινόμενο του συντονισμού, η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα της κατασκευής πρέπει να είναι σε ασφαλή απόσταση από τις συχνότητες διέγερσης στην 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.

- Κυκλικές Φλάντζες Συνδέσεως. Η σύνδεση των τμημάτων του πύργου γίνεται μέσω κυκλικών φλάντζών μαζί με υψηλά προεντεταμένους κοχλίες (HV) και ελέγχεται η σύνδεση αυτή στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Επίσης οι προεντεταμένοι κοχλίες οφείλουν να ελεγχθούν και σε κόπωση.
- Συγκολλήσεις. Ελέγχονται οι επιτρεπόμενες τάσεις στην οριακή κατάσταση αστοχίας σε κάθε σημείο κατά ύψος του πύργου όπου υπάρχει σύνδεση με συγκόλληση.

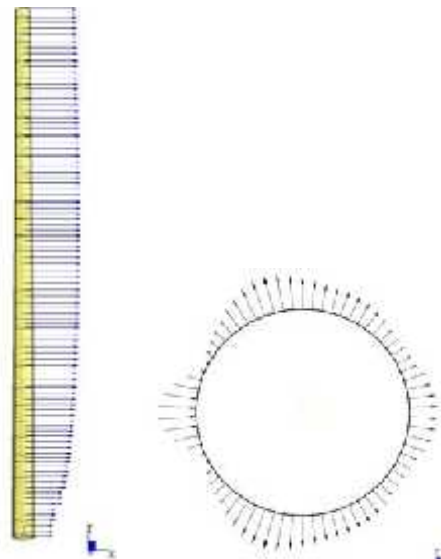
απλοποιητική εξίσωση κατανομής που προτείνεται από τον C.C.Baniotopoulos (Topics on the design of tubular steel turbine towers)ως εξής:

Η κατανομή της ανεμοπίεσης καθ' ύψος [z] του πύργου δίνεται ως συνάρτηση της διαμέτρου [D], από τις εξισώσεις (z, D σε [m], F_w σε [kN/m]):

$$Z \leq 2,00m \quad : \quad F_w = 0,51 \cdot D$$

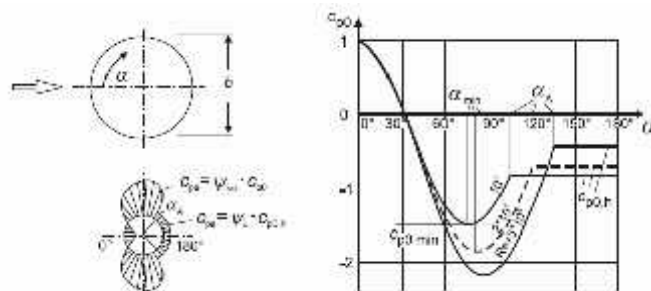
$$Z > 2,00m \quad : \quad F_w = 0,013 \cdot \ln(20 \cdot z) \cdot ([\ln(20 \cdot z) + 7]) \cdot D$$

Όπου η εξωτερική διάμετρος D μεταβάλλεται κατά ύψος και η συνάρτηση μεταβολής είναι διαφορετική για κάθε συνολικό ύψος [H] του εκάστοτε πύργου ανεμογεννήτριας που εξετάζεται.



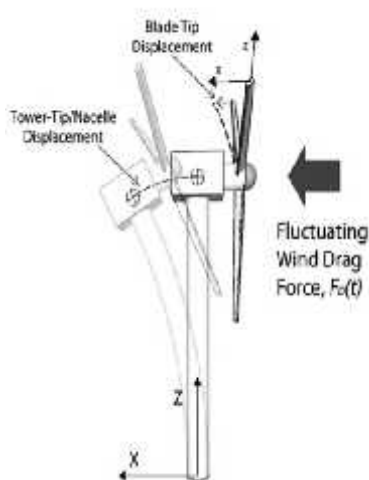
Σχήμα {...} Κατανομή του φορτίου του ανέμου κατά ύψος και γύρω από την περιφέρεια

Η κατανομή της ανεμοπίεσης γύρω από την επιφάνεια εκφράζεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα [1-4] :



Σχήμα {...} Κατανομή ανεμοπίεσης γύρω από την περιφέρεια κατά ΕΚ[1-4]

Επιπλέον της κατανεμημένης κατά ύψος ανεμοπίεσης, στην κορυφή του πύργου επιδρά μια συγκεντρωμένη δύναμη και ροπή που δίνονται συνήθως από την κατασκευάστρια εταιρία για διάφορες ακραία τυχαίες περιπτώσεις. Στην ανάλυση της κατασκευής χρησιμοποιείται το δυσμενέστερο δίδυμο φορτίων. Εξαρτάται από την μέση ταχύτητα του ανέμου και τις αναταράξεις στην επιφάνεια του ρότορα, την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων, την πυκνότητα του αέρα, το αεροδυναμικό σχήμα των εξαρτημάτων που αποτελούν την γεννήτρια και τις διαδραστικές επιπτώσεις τους, συμπεριλαμβανομένου αερολαστικών επιπτώσεων.



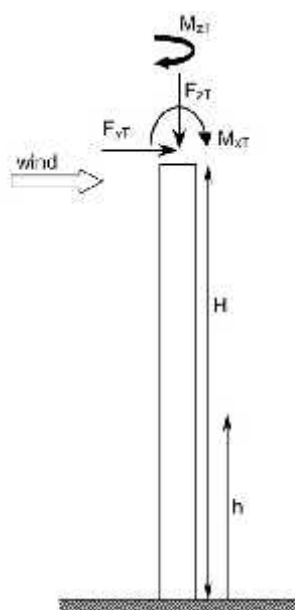
Σχήμα {...} Συγκεντρωμένη δύναμη στην κορυφή του πύργου $F_D(t)$

Ο μαθηματικός τύπος που υπολογίζει την τιμή της δύναμης $F_D(t)$ δίνεται σύμφωνα με τον τύπο όπως προτείνεται από τους 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 συντελεστής διαδραστικότητας
 ρ πυκνότητα του αέρα
 A επιφάνεια επιρροής
 $V(t)$ ταχύτητα του ανέμου

Παρακάτω δίνεται ένα απλοποιημένο γραμμικό μοντέλο προβόλου όπου φαίνονται συγκεντρωτικά όλα τα φορτία στην κορυφή του πύργου :



όπου : F_{yT} οριζόντια δύναμη του ανέμου
 F_{zT} κατακόρυφο ίδιο βάρος νασέλας-ρότορα
 M_{xT} ροπή κάμψης λόγω ανέμου
 M_{zT} ροπή συστροφής (αμελείται συνήθως)

2.2.2. Συνδυασμοί φορτίσεων - Οριακές καταστάσεις σχεδιασμού

Χωρίζοντας τα φορτία που επιδρούν στον πύργο σε μόνιμα [G] και σε κινητά [W] εξετάζονται 2 συνδυασμοί φορτίσεων :

- 1) $G + 1,50 \cdot W$
- 2) $G + W$

Όπου [G] περιλαμβάνεται το ίδιο βάρος του πύργου ,του ρότορα και της νασέλας και στα [W] η ανεμοπίεση κατά ύψος του πύργου και η συγκεντρωμένη δύναμη και ροπή στην κορυφή.

Με τον συνδυασμό 1) ελέγχεται η οριακή κατάσταση αστοχίας (ultimate limit state, ULS) και συγκεκριμένα η πλαστική οριακή κατάσταση(plastic limit state, LS1) και η οριακή κατάσταση λυγισμού (buckling limit state, LS3) ενώ με τον συνδυασμό 2) ελέγχεται η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (serviceability limit state, SLS) από όπου υπολογίζεται η

μέγιστη μετατόπιση της κορυφής του πύργου. Για να είναι ολοκληρωμένος ο έλεγχος της κατασκευής πρέπει να γίνει έλεγχος και στην οριακή κατάσταση κόπωσης (fatigue limit state, LS4), που δεν αποτελεί όμως αντικείμενο αυτής της εργασίας.

2.2.2.1 Πλαστική οριακή κατάσταση (LS1)

Η πλαστική οριακή κατάσταση ορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία η ικανότητα της κατασκευής να αντέξει τα φορτία που της επιβάλλονται έχει εξαντληθεί με την διαρροή του υλικού. 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 αυτής της οριακής κατάστασης 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 nonlinear 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:

$$\sigma_d = \left| \frac{N_d}{A} \right| + \left| \frac{M_d}{W} \right|$$

όπου : σ_d η τιμή σχεδιασμού για τις αξονικές τάσεις
 N_d η τιμή σχεδιασμού για την αξονική δύναμη
 A το εμβαδόν της διατομής

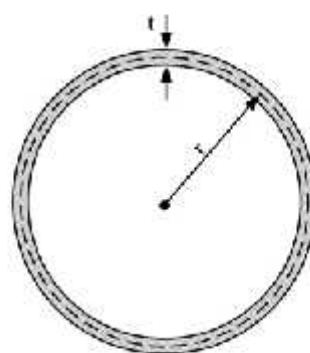
M_d η τιμή σχεδιασμού για την ροπή κάμψης

W η ροπή αντίστασης της διατομής

Εφόσον 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 , t η αντίστοιχη μέση ακτίνα και πάχος της εγκάρσιας διατομής που εξετάζεται.



Σχήμα {...} Σωληνοειδής χαλύβδινος πύργος και εγκάρσια διατομή

Οι διατμητικές τάσεις λόγω δυνάμεων διάτμησης υπολογίζεται ως :

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

όπου V_d είναι η τιμή σχεδιασμού για την τέμνουσα δύναμη. Επιπρόσθετα διατμητικές δυνάμεις λόγω συστολής μπορούν να υπολογιστούν από τον 1ο 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 συστολής, 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 μπορούν να υπολογιστούν 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.

2.2.2.2 Οριακή κατάσταση λυγισμού (LS3)

Η οριακή κατάσταση λόγω λυγισμού θεωρείται η κατάσταση κατά την οποία όλη ή μέρος της κατασκευής ξαφνικά αναπτύσσει πολύ μεγάλες μετατοπίσεις κάθετα στην επιφάνεια του κελύφους, εξαιτίας απώλειας σταθερότητας κάτω από την επίδραση θλιπτικών ή διατμητικών τάσεων στο τοίχωμα του κελύφους. Αυτό οδηγεί σε 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:

- θεωρεία 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 nonlinear analysis with imperfections included) μαζί με MNA, LBA και GMNA, συμπεριλαμβάνοντας ατέλειες και βαθμονομημένους συντελεστές.
- μέσω απευθείας εκφράσεων του παραρτήματος A 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 τον 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 :

(1) Μη στρογγυλότητα διατομής

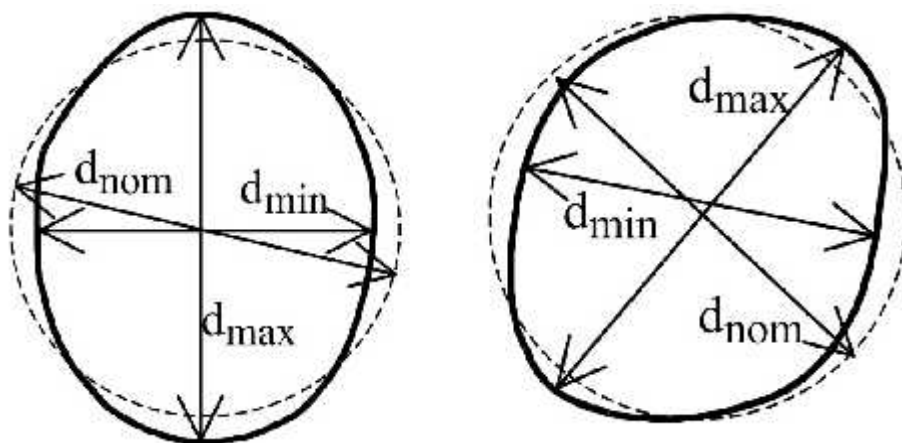
Η εκτός στρογγυλότητας ανοχή θα πρέπει να αξιολογείται μέσω της παραμέτρου U_r (βλ. σχήμα {...}) που υπολογίζεται από τον τύπο :

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

όπου : d_{max} η μέγιστη μετρούμενη εσωτερική διάμετρος

d_{min} η ελάχιστη μετρούμενη εσωτερική διάμετρος

d_{nom} η ονομαστική εσωτερική διάμετρο



α) επιπέδωση

β) ασυμμετρία

Σχήμα {...} Μέτρηση των διαμέτρων για την αξιολόγηση της μη στρογγυλότητας

Η παράμετρος U_r θα πρέπει να ικανοποιεί την συνθήκη :

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

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

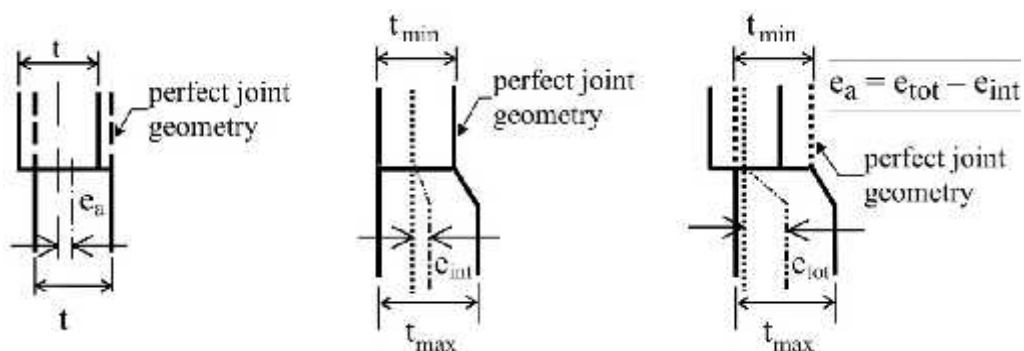
Fabrication tolerance quality class	Diameter range Description	Value of $U_{r,max}$		
		$d \leq 0,50m$	$0,50m < d < 1,25m$	$1,25m \leq d$
Class A	Excellent	0,014	$0,007 + 0,0093(1,25-d)$	0,007
Class B	High	0,020	$0,010 + 0,0133(1,25-d)$	0,010
Class C	Normal	0,030	$0,015 + 0,0200(1,25-d)$	0,015

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

(2) Τυχαία εκκεντρότητα συνδέσεων

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

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



Σχήμα {...} 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 {...} (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 {...} Τιμές για τις μέγιστες επιτρεπόμενες τυχαίες εκκεντρότητες

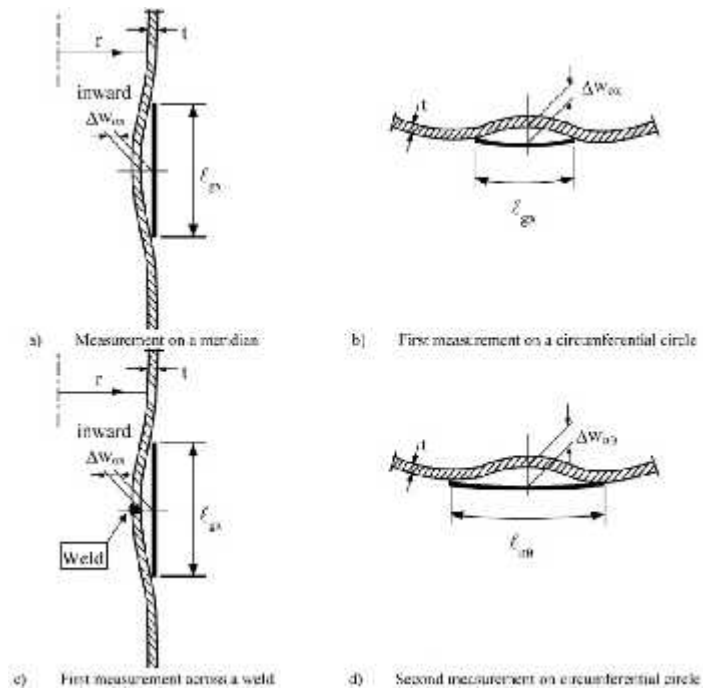
(3) Βαθουλώματα τοιχωμάτων

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

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

όπου : Δ_{w0} το μετρούμενο βάθος βαθουλώματος

l_g το μήκος του εξεταζόμενου τμήματος



Σχήμα {...} 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 {...} (ΕΚ 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 {...} 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 :

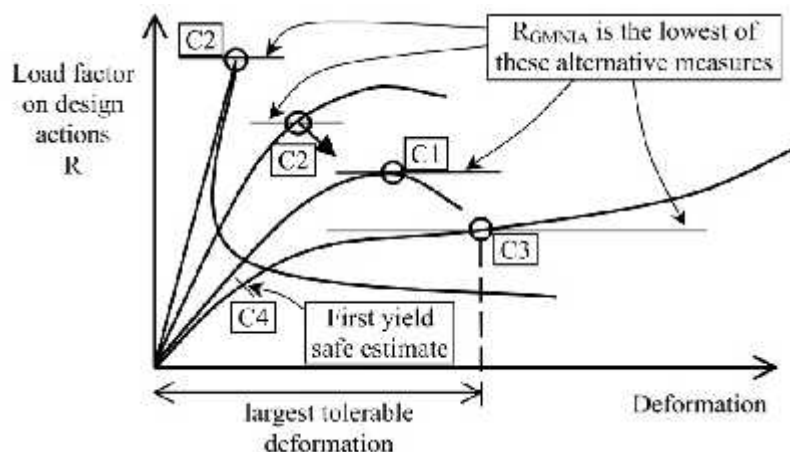
- γ_{M1} ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για λυγισμό όπως ορίζεται από τον εκάστοτε εθνικό κανονισμό και εάν δεν ορίζεται δεν πρέπει να τίθεται μικρότερος της τιμής $\gamma_{M1} = 1,1$.
- R_k η χαρακτηριστική αντοχή λυγισμού

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 στο σχήμα {...} από τον Ευρωκώδικα [3-1-6,παρ.8.7.2,πιν.8.6] :



Σχήμα {...} 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 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 κ εάν δεν ορίζεται δεν πρέπει να τίθεται μικρότερος της τιμής $\gamma_{M1} = 1,1$.
- R_k η χαρακτηριστική αντοχή λυγισμού

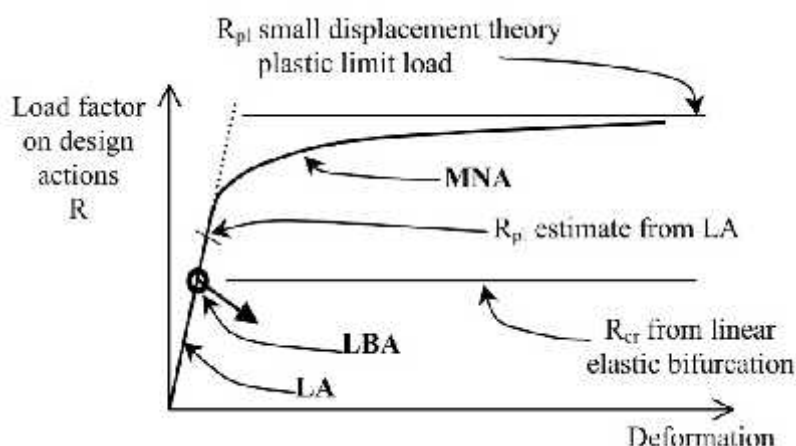
Η χαρακτηριστική αντοχή λυγισμού R_k βρίσκεται από τον τύπο :

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

όπου R_{pl} : συντελεστής πλαστικής αντοχής

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 κ στο σχήμα {...} από τον Ευρωκώδικα [3-1-6,παρ.8.6.2,πιν.8.5]:



Σχήμα {...} 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} , η_{ov} :

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

$\lambda_{ov,0} = 0,20$, η μεσημβρινή οριακή λυγηρότητα [ΕΚ 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]

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

η ακτίνα και το πάχος αντίστοιχα και Q η παράμετρος ποιότητας κατασκευής που παίρνει τιμές από τον πίνακα {...} [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 {...} Οι τιμές των παραμέτρων ποιότητας κατασκευής Q

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

$$\chi_{ov} = 1 \quad \text{για } \lambda_{ov} \leq \lambda_{ov,0}$$

$$\chi_{ov} = 1 - \beta_{ov} \cdot [(\lambda_{ov} - \lambda_{ov,0}) / (\lambda_p - \lambda_{ov,0})]^{\eta} \quad \text{για } \lambda_{ov,0} < \lambda_{ov} < \lambda_p$$

$$\chi_{ov} = \alpha_{ov} / \lambda_{ov}^2 \quad \text{για } \lambda_p \leq \lambda_{ov}$$

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

- Σχεδιασμός χρησιμοποιώντας ανάλυση με βάση τις τάσεις σχεδιασμού [ΕΚ 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 :

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

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 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 :

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

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 :

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

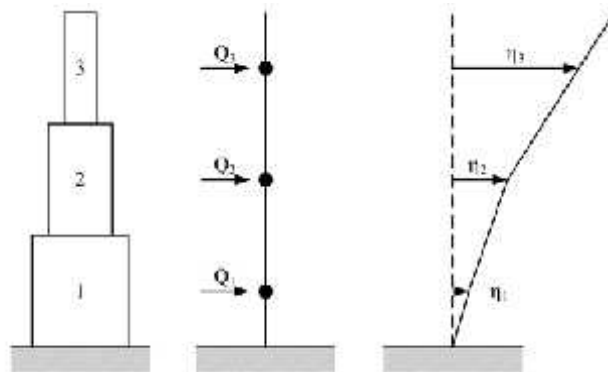
2.2.3 Ανάλυση συχνοτήτων

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], την βαρύτητα g , το ίδιο βάρος Qi εφαρμοσμένο στο κέντρο βάρους του τμήματος i , και την αντίστοιχη μετατόπισή του ni .

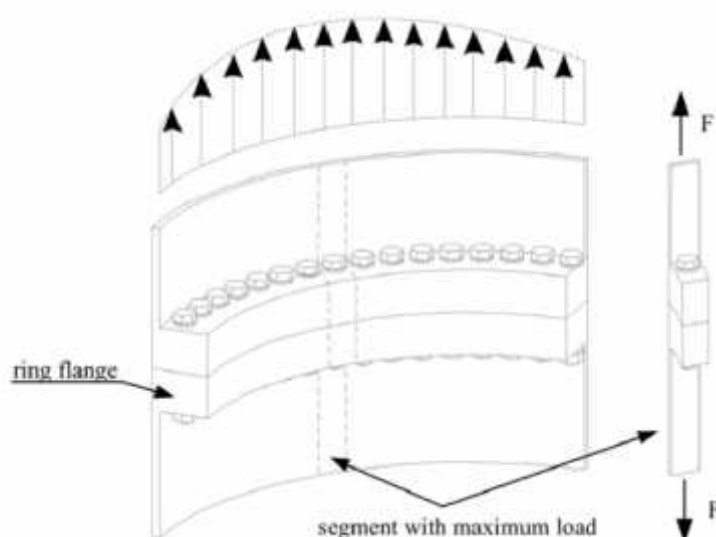
Σε πρώτη φάση υπολογίζεται το ίδιο βάρος του κάθε τμήματος ξεχωριστά και στην συνέχεια εφαρμόζεται σαν κατακόρυφο φορτίο στο κέντρο βάρους του καθενός. Ακολούθως υπολογίζεται η καμπύλη μετατόπισης λαμβάνοντας υπόψη τα ίδια βάρη. Τέλος η ιδιοσυχνότητα υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση.



Σχήμα{...} Διακριτοποίηση των τμημάτων ενός σωληνωτού πύργου (βλ. Schaumann et al. (2007-01))

2.2.4 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 κοχλιών λαμβάνεται μόνο το μέγιστο φορτίο του κάθε κοχλία. Η θεώρηση αυτή ολόκληρης της σύνδεσης από ένα κομμάτι με τον μέγιστο φορτισμένο κοχλία οδηγεί σε ένα απλό αριθμητικό μοντέλο με μικρή υπολογιστική προσπάθεια (βλ. σχήμα {...}). Επιπρόσθετα, ατέλειες στο κέλυφος των κυκλικών φλαντζών δεν συυπολογίζονται αν και η επιρροή τους στην φέρουσα ικανότητα των συνδέσεων είναι σημαντική.

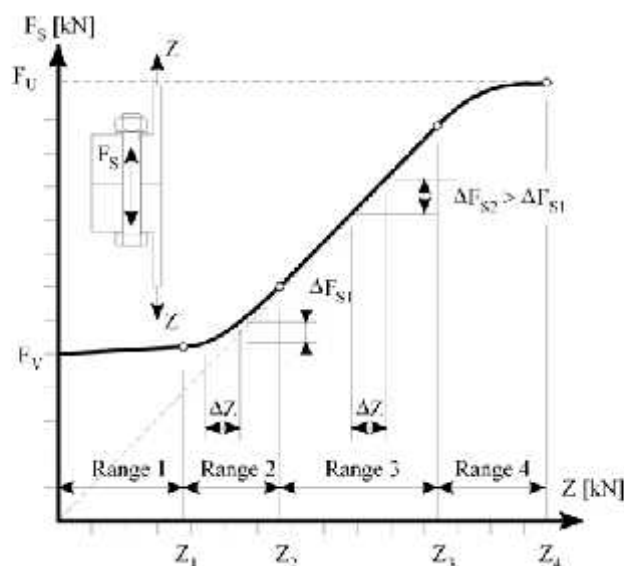


Σχήμα{...} Κοινή προσέγγιση του σχεδιασμού για συνδέσεις με κυκλική φλάντζα (βλ. Seidel (2001) , σελ.7)

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 κοχλιών πρέπει να ληφθούν υπόψη υπολογίζοντας τις πιέσεις που ασκούνται στις φλάντζες. Οι δυνάμεις των κοχλιών πρέπει να υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μη γραμμική ανάλυση κοχλία-δύναμης. Λόγω της εκκεντρότητας του άξονα των κοχλιών 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. Το σχήμα {...} δείχνει την σχέση κοχλία δύναμης για έναν προεντεταμένο κοχλία σε μία σύνδεση με κυκλική φλάντζα σε έναν σωληνοειδή πύργο.



Σχήμα{...} Σχέση κοχλία δύναμης για HV-ομάδες σε συνδέσεις με κυκλική φλάντζα (βλ. 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 εφελκούμενη 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 προεντεταμένα κοχλιωτών συνδέσεων αποτελείται από τέσσερα σημαντικά εύρη εντάσεως. Στην αρχή ο κοχλίας (σχήμα{...}, 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

Ζ. 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 προτείνετε από τον Seidel (2001) ή Schmidt/Neuper (1997).

Όσον αφορά τον σχεδιασμό των κυκλικών φλαντζών σύνδεσης όπως είδαμε χρησιμοποιείται συχνά υπολογιστικά μοντέλα. Παρ' όλα αυτά, είναι αρκετά βοηθητικές τιμές για τις γεωμετρικές διαστάσεις από απλή προμελέτη. Σύμφωνα με τον Seidel (2001) οι ακόλουθες σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια απλή προμελέτη :

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

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

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

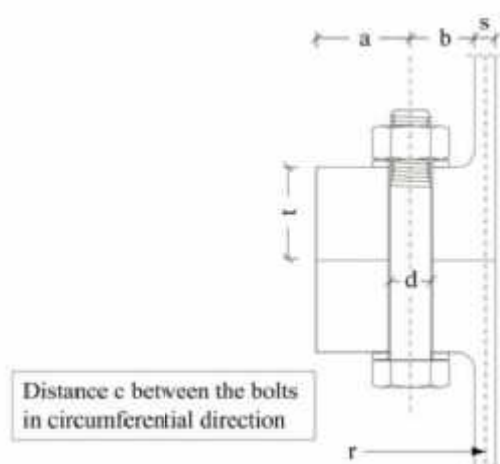
$$t \geq 1,5 \cdot d$$

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

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

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

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



Σχήμα{...} Συμβολισμοί για συνιστώμενες διαστάσεις φλάντζα (βλ. 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) βλέπε πίνακα {...}.

	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 {...} Ελάχιστες τιμές για τις διαστάσεις των κυκλικών φλαντζών σε [mm]

2.2.5 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 κ τη 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 την 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 την 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 3 : ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΥΡΓΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

3.1 Βελτιστοποίηση.

Ο χώρος της βελτιστοποίησης στα εφαρμοσμένα μαθηματικά αναφέρεται στην αναζήτηση βέλτιστων παραμέτρων ενός - συνήθως περίπλοκου - συστήματος. Προβλήματα βελτιστοποίησης απαντώνται σε πολλά επιστημονικά πεδία όπως π.χ. στη φυσική, στη χημεία, στην οικονομία κ.α.. Στην επιστημονική περιοχή της Υπολογιστικής Μηχανικής, η βελτιστοποίηση ενός δομικού σχεδιασμού αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση συγκεκριμένων κριτηρίων όπως είναι το βάρος και/ ή το κόστος της κατασκευής, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις λειτουργικές προδιαγραφές της κατασκευής. Μία βασική προϋπόθεση της βελτιστοποίησης προβλημάτων κατασκευών είναι η διατύπωση με μαθηματικούς όρους της συμπεριφοράς των κατασκευών (δομοστατικό μοντέλο). Στην περίπτωση των δομικών συστημάτων η συμπεριφορά παραπέμπει στην τυπική απόκριση στα στατικά και δυναμικά φορτία, όπως παραμορφώσεις, τάσεις, ιδιοτιμές, φορτία λυγισμού κλπ.

Στόχος του μηχανικού που επιχειρεί τον βέλτιστο δομικό σχεδιασμό είναι να εξευρεθεί ένας συνδυασμός ανεξάρτητων μεταβλητών που λαμβάνουν πραγματικές ή ακέραιες τιμές και ονομάζονται παράμετροι ή μεταβλητές σχεδιασμού (design variables), έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος (objective function). Τα προβλήματα βελτιστοποίησης υπόκεινται σε περιορισμούς, όπως είναι το εύρος μέσα στο οποίο κινούνται οι παράμετροι σχεδιασμού το οποίο καθορίζει τον χώρο αναζήτησης, αλλά και άλλες συναρτήσεις περιορισμού (constraint functions), όπως λόγου χάρη είναι εκείνες των τάσεων και παραμορφώσεων, οι οποίες καθορίζουν τον χώρο των αποδεκτών λύσεων του προβλήματος.

Για τον υπολογισμό του βέλτιστου σχεδιασμού είναι απαραίτητα δύο βήματα που δίνονται παρακάτω :

- **Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης.** Η διατύπωση στο μοντέλο της βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τον ορισμό των παραμέτρων σχεδιασμού, της σχέσης μεταξύ των παραμέτρων αυτών, τον καθορισμό της προς βελτιστοποίηση συνάρτησης καθώς επίσης και τον ορισμό των περιορισμών του προβλήματος.
- **Επιλογή κατάλληλου αλγόριθμου βελτιστοποίησης.** Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης επιλέγεται με κριτήριο τον καλύτερο συνδυασμό του με το δομοστατικό μοντέλο και το μοντέλο βελτιστοποίησης.

3.2 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης χωρίζονται γενικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες μεθόδων :

- Μαθηματικές μεθόδους βελτιστοποίησης.
- Μεταευριστικές μεθόδους βελτιστοποίησης.

3.2.1 Μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης.

Οι μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης ονομάζονται και αιτιοκρατικές μέθοδοι. Είναι οι πρώτοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκαν σε δομικά προβλήματα και ήταν δανεισμένοι από τους τομείς των οικονομικών, των μαθηματικών και της επιχειρησιακής έρευνας και βασίζονταν στον μαθηματικό προγραμματισμό (mathematical programming). Αυτές οι τεχνικές 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 μπορούν γενικά να ταξινομηθούν σε πέντε μεγάλες κατηγορίες:

- 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.
- 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.

- 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 ακέραιας, μικτής και δυαδικής μορφής.
- 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.
- 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.

3.2.2 Μεταευριστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης.

Οι μεταευριστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης ονομάζονται και δαρβίνειες μέθοδοι. 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, πράγμα 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), ο πληθυσμός εξελίσσεται κινούμενος σε όλο και καλύτερες περιοχές του χώρου αναζήτησης και μέσω της αρχής της επικράτησης του ισχυρότερου (Survival of the fittest) επιτυγχάνεται ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης.

Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται σήμερα συχνά στον βέλτιστο σχεδιασμό των κατασκευών, με ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι λόγω της τυχαμιακότητας 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 μειονέκτημα των μεθόδων αυτών 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:

- 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. Οι ΓΑ βασίζονται στην τυχαία ανασυγκρότηση ενός πληθυσμού και την αξιολόγηση των μελών του πληθυσμού 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.
- 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 γι' αυτό θα ασχοληθούμε διεξοδικά μαζί της στο επόμενο κεφάλαιο.
- 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.

- 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 και απλά έχει ως στόχο την αυτόματη παραγωγή προγραμμάτων Η/Υ για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων (π.χ. γεννήτρια τυχαίων αριθμών).
- 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.

3.2.3 Μέθοδος της Διαφορικής Εξέλιξης

Το 1997 οι Kenneth Price και Rainer Storn πρότειναν μία νέα τεχνική εξελικτικών αλγορίθμων, που την ονόμασαν μέθοδο της Διαφορικής Εξέλιξης, και βασιζόταν σε μια λειτουργία της γενετικής για την δημιουργία απογόνων από χρωμοσώματα των γονέων και όχι από την κλασική διαδικασία της διασταύρωσης. Η ευκολία στην εφαρμογή της μεθόδου αλλά και στον ορισμό των παραμέτρων συνέβαλε στη ευρεία χρήση της.

Η μέθοδος της Διαφορικής Εξέλιξης χρησιμοποιεί NP παραμετρικά διανύσματα:

$$x_{i, G}, \quad i=0, 1, 2, \dots, NP-1$$

για κάθε «γενιά» G. Το πλήθος κάθε «γενιάς» παραμένει σταθερό κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης ενώ ο αρχικός πληθυσμός επιλέγεται τυχαία αν δεν δίνονται δεδομένα για το σύστημα. Η μέθοδος δημιουργεί νέα διανύσματα προσθέτοντας τη σταθμισμένη διαφορά μεταξύ δύο διανυσμάτων ενός πληθυσμού σε ένα τρίτο διάνυσμα. Αν για το διάνυσμα που προκύπτει, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μικρότερη, το διάνυσμα αυτό αντικαθιστά το αρχικό. Η σύγκριση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται μεταξύ εκείνων που προκύπτουν από τα υπόλοιπα διανύσματα του πληθυσμού πλην των τριών που προαναφέρθηκαν. Επιπλέον, σε κάθε «γενιά» ορίζεται το διάνυσμα $x_{best, G}$, που δίνει την καλύτερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση ώστε να παρακολουθείται η εξέλιξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Πρέπει να τονισθεί ότι στη μέθοδο, κάθε απόφαση έχει την ίδια πιθανότητα να ληφθεί, αν δεν ορίζεται διαφορετικά.

Υπάρχουν δύο παραλλαγές της μεθόδου που χρησιμοποιούνται ευρέως και παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

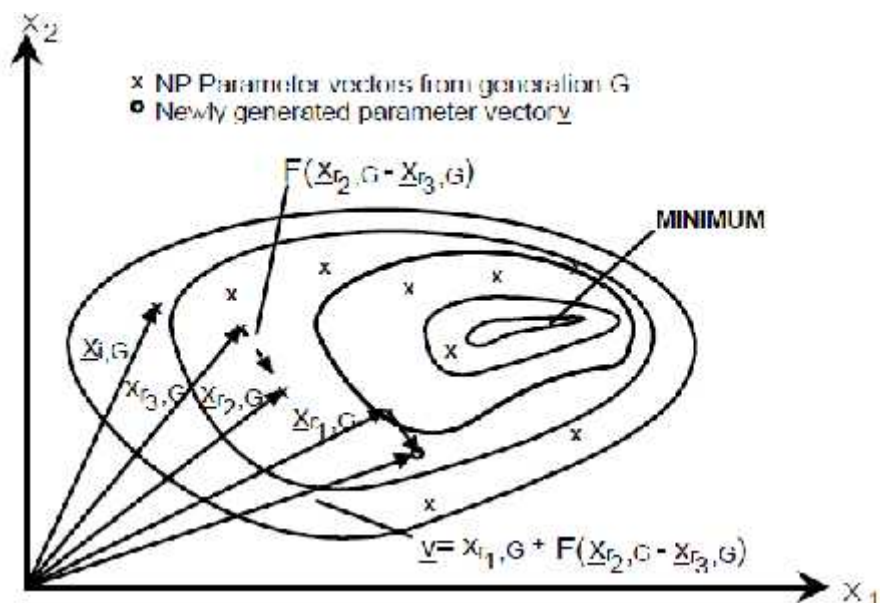
Παραλλαγή DE1

Σύμφωνα με την πρώτη παραλλαγή, για κάθε διάνυσμα $x_{i,G}$, $i=0, 1, 2, \dots, NP-1$, δημιουργείται ένα δοκιμαστικό διάνυσμα v που ορίζεται:

$$v_{i,G+1} = x_{r_1,G} + F \cdot (x_{r_2,G} - x_{r_3,G}) \quad (3.12)$$

όπου r_1, r_2, r_3 είναι διανύσματα του πληθυσμού G διαφορετικά μεταξύ τους και $F > 0$.

Τα διανύσματα επιλέγονται τυχαία από το διάστημα $[0, NP-1]$. Ο συντελεστής F είναι πραγματική σταθερά που ρυθμίζει την αύξηση της διαφοράς $(x_{r_2,G} - x_{r_3,G})$. Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα δυσδιάστατο πρόβλημα και τα διανύσματα που συμμετέχουν στην μέθοδο DE1.



Σχήμα 3.1. Παράδειγμα δύο διαστάσεων μιας αντικειμενικής συνάρτησης που δείχνει τις περιβάλλουσες γραμμές και την διαδικασία δημιουργίας διανύσματος v με την παραλλαγή DE1.

Στο επόμενο βήμα, με την διαδικασία της διασταύρωσης, δημιουργείται το δοκιμαστικό διάνυσμα $u_{i,G+1} = (u_1, u_2, \dots, u_D)^T$, με τιμές είτε από τον αρχικό πληθυσμό των $x_{i,G}$ είτε από τα δοκιμαστικά διανύσματα $v_{i,G+1}$ ανάλογα με το αν η τιμή του $v_{i,G+1}$ είναι διαφορετική από εκείνη του $x_{i,G}$.

Το τελευταίο βήμα περιλαμβάνει την διαδικασία της σύγκρισης των διανυσμάτων $x_{i,G}$ και $u_{i,G+1}$ και της επιλογής του καλύτερου με κριτήριο την βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης f :

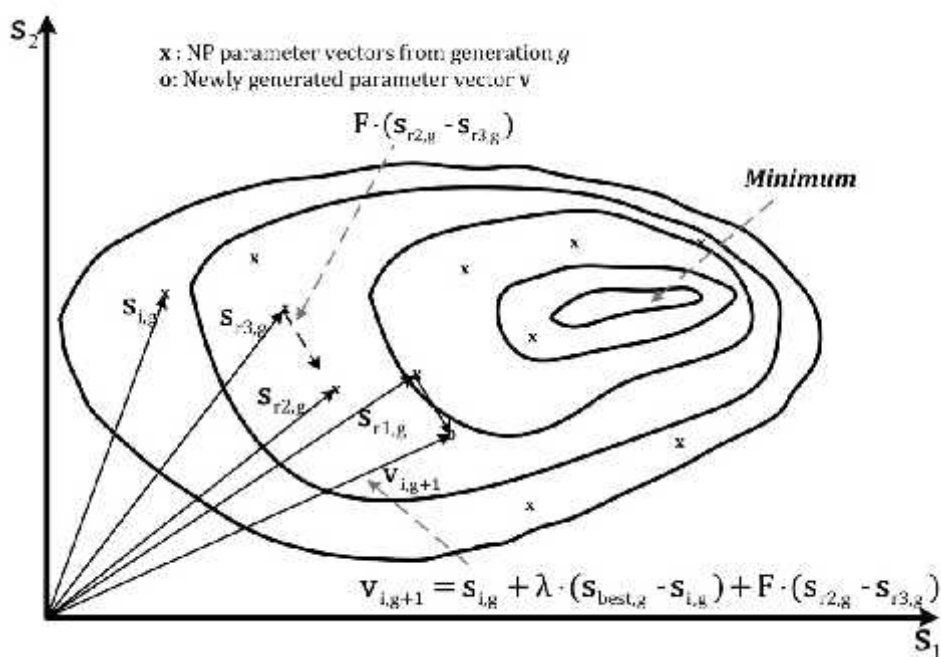
$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G+1}, & \text{αν } f(u_{i,G+1}) \leq f(x_{i,G}) \\ \text{αλλιώς} \\ x_{i,G} \end{cases}$$

Παραλλαγή DE2

Η δεύτερη παραλλαγή λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο αλλά στην περίπτωση αυτή το διάνυσμα $v_{i,G+1}$, πριν τον υπολογισμό του $x_{i,G+1}$, δημιουργείται σύμφωνα με την σχέση:

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

όπου 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. Στο σχήμα (3.2) παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας του διανύσματος $v_{i,G+1}$.



Σχήμα 3.2 : Παράδειγμα δύο διαστάσεων μιας αντικειμενικής συνάρτησης που δείχνει τις περιβάλλουσες γραμμές και την διαδικασία δημιουργίας διανύσματος v με την παραλλαγή DE2.

3.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση βέλτιστου σχεδιασμού πύργου ανεμογεννήτριας.

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί αρκετές μεθοδολογίες όσον αφορά την βελτιστοποίηση του πύργου της ανεμογεννήτριας, οι κυριότερες των οποίων δίνονται περιληπτικά παρακάτω :

- Structural design optimization of wind turbine towers
Hani M. Negm, Karam Y. Maalawi, (1999)

Η εργασία περιγράφει διάφορα μοντέλα βελτιστοποίησης για τον σχεδιασμό της κατασκευής ενός τυπικού πυλώνα ανεμογεννήτριας. Το κύριο σώμα του πύργου θεωρείται ότι κατασκευάζεται από ενιαία τμήματα, όπου οι μεταβλητές σχεδιασμού επιλέγεται να είναι το εμβαδόν διατομής, η ακτίνα περιστροφής και το ύψος του κάθε τμήματος. Το σύστημα νασέλας/ρότορα θεωρείται ως μία άκαμπτη, μη περιστρεφόμενη μάζα που συνδέεται στην κορυφή του πύργου. Αναπτύσσονται και ελέγχονται πέντε στρατηγικές βελτιστοποίησης που είναι οι εξής : ελάχιστο βάρος, μέγιστη ακαμψία, μέγιστη αναλογία ακαμψίας-μάζας, ελάχιστα επίπεδα δονήσεων μέσω συγκεκριμένα επιλεγμένων ιδιοσυχνοτήτων σε επιθυμητά όρια ή απευθείας μεγιστοποίησης αυτών. Η απευθείας μεγιστοποίηση της θεμελιώδους

ιδιοσυχνότητας αποδεικνύεται ότι είναι και η καλύτερη. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως ένα μη γραμμικό μαθηματικό πρόβλημα προγραμματισμού και εφαρμόζεται για τον σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας 100-kW (ERDA-NASA MOD-0), όπου καταφέρνει να φτάσει σε σημαντικές βελτιώσεις στην συνολική απόδοση του συστήματος σε σύγκριση με έναν τυπικό σχεδιασμό.

- Optimization of a steel tower for a wind turbine structure
P.E. Uys, J. Farkasb, K. J'armai, F. van Tonder, (2006)

Ο σκοπός της αυτής της εργασίας είναι ένας σχεδιασμός του πύργου της ανεμογεννήτριας που να ελαχιστοποιεί το κόστος. Ο πύργος που εξετάζεται, ύψους 45m, κατασκευάζεται από τρία κυλινδρικά κελύφη, το καθένα με σταθερή διάμετρο και πάχος, ύψους 15m. Η δύναμη του ανέμου υπολογίζεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα [1-2-4]. Εξετάζονται οι σχεδιαστικοί περιορισμοί για τον λυγισμό του κελύφους και τον τοπικό λυγισμό των επίπεδων δακτυλίων ακαμψίας. Η συνάρτηση κόστους που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί περιλαμβάνει το κόστος υλικού και κόστος παραγωγής. Για τον υπολογισμό του κόστους παραγωγής, εξετάζεται το κόστος επεξεργασίας για το σχηματισμό των κελυφών σε σχεδόν κυλινδρικά σχήματα, καθώς και το κόστος για τη συναρμολόγηση και τη συγκόλληση των τμημάτων. Η βελτιστοποίηση αφορά το πάχος των κελυφών, τον αριθμό των δακτυλίων ακαμψίας και οι διαστάσεις των δακτυλίων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το ελάχιστο κόστος αντιστοιχεί στον ελάχιστο αριθμό των δακτυλίων ακαμψίας.

- Optimization of Wind Turbine Tubular Towers
Rajesh katyal, S Gomathinayagam, Saleem Akhtar, and Siraj Ahmed, (2012)

Σε αυτή την εργασία έχει γίνει μια προσπάθεια να πραγματοποιηθεί παραμετρική βελτιστοποίηση του κυλινδρικού πύργου της ανεμογεννήτριας ,χρησιμοποιώντας δεδομένο μοντέλο ταχύτητας του ανέμου(NWP), για μια λοφώδη επιφάνεια στην περιοχή της Κεράλα, Ινδία. Το μοντέλο NWP έχει επικυρωθεί με επιτόπου καταγραφή της ταχύτητας με στόχο να υπολογιστεί η δύναμη διάτμησης του ανέμου, που είναι ο βασικός παράγοντας που ενεργεί στην κορυφή του πύργου. Στη συνέχεια αναλύθηκαν διάφορες γεωμετρικές διαμορφώσεις του πύργου σε δύο ύψη, 30m και 73m, χρησιμοποιώντας το STAADPRO για να φτάσει στο βέλτιστο, με ελάχιστο βάρος, σχεδιασμό, εντός των επιτρεπόμενων ορίων εκτροπής των λεπίδων του ρότορα. Η μεταβλητή σχεδιασμού ήταν η διάμετρος βάσης ενώ η διάμετρος στην κορυφή κρατήθηκε σταθερά η ελάχιστη δυνατή, όπως απαιτείται για την στέγαση της νασέλας .

- A model for yawing dynamic optimization of a wind turbine structure

Karam Y. Maalawi,(2007)

Η εργασία αναπτύσσει ένα νέο μοντέλο βελτιστοποίησης σχεδιασμού για την βέλτιστη τοποθέτηση των συχνοτήτων μιας κατασκευής πύργου/νασέλας/ρότορα. Ο κύριος στόχος είναι να αποφευχθούν τα μεγάλα εύρη από τις προσκληθείσες δονήσεις λόγω περιστροφής των πτερυγίων. Αυτό μπορεί να είναι μια σημαντική αιτία αστοχίας λόγω κόπωσης και μπορεί να κάνει σημαντική ζημιά στο σύστημα πύργου-νασέλας-ρότορα. Διάφορες περιπτώσεις μελέτης εξετάζονται για τις διαφορετικές τιμές των παραμέτρων ακαμψίας και στροφικής αδράνειας. Χρήσιμα σχεδιαστικά διαγράμματα αναπτύσσονται για την τοποθέτηση των συχνοτήτων στις αναγκαίες τιμές στόχων τους, χωρίς την αύξηση του συνολικού δομικού βάρους του συστήματος.

- Wind turbine tower optimization under various requirements using genetic algorithm. Serdar Yildirim, İbrahim Özkol (2010)

Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι να βελτιστοποιηθεί η μάζα του πύργου ανεμογεννήτριας 1.5 MW εκτελώντας μέθοδο γενετικού αλγορίθμου (GA). Σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASCE 7-98, AISC-89 και IEC61400-1, ο αντίκτυπος των φορτίων στον πύργο υπολογίζεται μέσα στους υψηλότερους όρους ασφάλειας ενάντια στη δύναμη λυγισμού για κάθε ένα τμήμα του πύργου με τη βοήθεια των κωδίκων GA. Εν γένει, τα πάχη του πύργου έχουν αξιολογηθεί χωριστά σε κάθε ένα τμήμα 1m κατά μήκος του ύψους του πύργου και κυμαίνονται ανάμεσα σε 26mm στην βάση και 12mm στην κορυφή του πύργου. Η ακαμψία κατά μήκος του πύργου εξασφαλίζεται εξ ολοκλήρου ενώ η μάζα του πύργου μετριάζεται και βελτιστοποιείται.

- Formulations for the optimal design of RC wind turbine towers Marcelo A Silva, Revolando MLRF Brasil, Jasbir S Arora

Στην εργασία εξετάζονται διαφορετικού ύψους πύργοι ανεμογεννητριών από οπλισμένο σκυρόδεμα και στόχος είναι να βρεθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα στο κόστος, τον υπολογιστικό χρόνο, τις τεχνικές κατασκευής και την ακρίβεια των δομικών προτύπων. Οι πύργοι υποβλήθηκαν στα δυναμικά φορτία του ανέμου και σε δονήσεις λόγω της λειτουργίας της γεννήτριας. Οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι οι γεωμετρικές ιδιότητες και ο όγκος του χάλυβα των δομικών στοιχείων. Για τον υπολογισμό της συνάρτησης κόστους θεωρούνται οι δαπάνες του σκυροδέματος και του χάλυβα. Οι περιορισμοί που εισάγονται αφορούν τις τάσεις, τις μετατοπίσεις και τις συχνότητες της δόνησης.

3.4 Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης πύργου

Στην διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, τρία βασικά στάδια πρέπει να θεωρηθούν :

- Καθορισμός των στόχων σχεδιασμού του συστήματος.
- Επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού και των προκαθορισμένων παραμέτρων.
- Καθορισμός των σχεδιαστικών περιορισμών.

3.4.1 Στόχος σχεδιασμού

Κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης περιγράφεται από έναν μεγάλο αριθμό εφικτών σχεδιασμών μερικά από τα οποία είναι καλύτερα, μερικά είναι χειρότερα αλλά μόνο ένα δίνει την καλύτερη δυνατή λύση. Για να γίνει αυτός ο διαχωρισμός μεταξύ καλών και καλύτερων σχεδιασμών είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα κριτήριο για σύγκριση και αξιολόγηση των σχεδιαστικών λύσεων. Αυτό το κριτήριο ορίζεται από μία λειτουργία που εξαρτάται από τις μεταβλητές σχεδιασμού. Αυτή η λειτουργία καλείται στόχος λειτουργίας ή στόχος σχεδιασμού και εξαρτάται από τις μεταβλητές σχεδιασμού. Η κατάλληλη επιλογή του στόχου λειτουργίας είναι πολύ σημαντικό βήμα στην διαδικασία διατύπωσης του μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης μαζί με την επιλογή κατάλληλων μεταβλητών σχεδιασμού. Μερικά παραδείγματα λειτουργικών στόχων από την βιβλιογραφία είναι : ελαχιστοποίηση του κόστους, βελτιστοποίηση του βάρους, το πρόβλημα των απωλειών ενέργειας, και μεγιστοποίηση του κέρδους.

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας είναι η κύρια κατασκευή που στηρίζει τον ρότορα, τους μεταφορείς ηλεκτρικής ενέργειας και τον εξοπλισμό ελέγχου, και ανυψώνει τα περιστρεφόμενα πτερύγια πάνω από το επίπεδο της στάθμης της Γής. Ένας επιτυχημένος δομικός σχεδιασμός του πύργου πρέπει να εξασφαλίζει αποδοτικό, ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό του συνολικού συστήματος της ανεμογεννήτριας. Πρέπει να παρέχει εύκολη πρόσβαση για συντήρηση των εξαρτημάτων του ρότορα και των επιμέρους εξαρτημάτων του, εύκολη μεταφορά στο σημείο κατασκευής, εύκολη συναρμολόγηση και ανέγερση. Καλός σχεδιασμός οφείλει να περιλαμβάνει και αισθητικά χαρακτηριστικά του συνολικού κατασκευαστικού και μηχανολογικού σχήματος.

Επί της ουσίας δεν υπάρχει ένα απλό κριτήριο που να περιλαμβάνει και να μετράει όλα τα παραπάνω. Ωστόσο θα πρέπει να αναγνωριστεί ότι η επιτυχία ενός δομικού σχεδιασμού του πύργου κρίνεται στο βαθμό που επιτυγχάνεται η κύρια λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

Στην παρούσα εργασία στόχος είναι ένας δομικός σχεδιασμός με το ελάχιστο βάρος το οποίο είναι πρωταρχικής σημασίας για την επιτυχημένη και οικονομική λειτουργία μιας

ανεμογεννήτριας. Η ελαχιστοποίηση του δομικού βάρους είναι επωφελής από την μεριά της παραγωγής και του κόστους.

3.4.2 Μεταβλητές σχεδιασμού

Οι παράμετροι των οποίων οι τιμές μόλις λαμβάνονται ο σχεδιασμός ορίζεται πλήρως, ονομάζονται μεταβλητές σχεδιασμού. Η σωστή επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού είναι ένα σημαντικό πρώτο βήμα για την κατάλληλη διατύπωση του προβλήματος. Σε περίπτωση που η επιλογή των μεταβλητών δεν είναι σωστή τότε η διατύπωση μπορεί να μην είναι σωστή ή στην χειρότερη περίπτωση ο βέλτιστος σχεδιασμός που λαμβάνεται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να μην είναι εφικτός. Κατά την διατύπωση του μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης η λειτουργία προς βελτιστοποίηση θα πρέπει να είναι επαρκώς εξαρτημένη από όλες τις παραμέτρους σχεδιασμού.

Όσον αφορά τον πύργο της ανεμογεννήτριας οι μεταβλητές σχεδιασμού που μπορούν να αλλάξουν κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης επιλέγεται να είναι η εξωτερική διάμετρος, D , και το πάχος του τοιχώματος του πύργου, t .

3.4.3 Προκαθορισμένοι παράμετροι

Οι παρακάτω παράμετροι του πύργου θα παίρνουν προκαθορισμένες τιμές έτσι ώστε να μειωθεί η διάσταση του προβλήματος βελτιστοποίησης :

- σωληνοειδής μονοπολική διαμόρφωση.
- το συνολικός ύψος H , (80m, 100m, 120m, 140m, 160m)
- η ποιότητα του χάλυβα (S235, S275, S355)
- ο τύπος της εξίσωσης παραβολής που δίνει την μείωση της διαμέτρου κατά ύψος, $D(z) = -a \cdot \sqrt{z} + D_0$ (παραβολική), $D(z) = -a \cdot z + D_0$ (γραμμική), όπου z το μεταβαλλόμενο ύψος και D_0 η διάμετρος στη βάση.
- ο τύπος της εξίσωσης που δίνει το πάχος συναρτήσει της διαμέτρου, $t(z) = b \cdot D(z)$ (γραμμική).

3.4.4 Σχεδιαστικοί περιορισμοί

Ο σχεδιασμός ενός δομικού συστήματος επιτυγχάνεται όταν οι σχεδιαστικές παράμετροι πάρουν συγκεκριμένες τιμές. Ως σχεδιασμός μπορεί να θεωρηθεί οποιοδήποτε αυθαίρετα ορισμένο στατικό σύστημα, όπως κυκλική διατομή με αρνητική ακτίνα ή αρνητικό πάχος τοιχώματος, ακόμα και μη κατασκευαστικά δομικά συστήματα. Όλες οι μηχανικές ή κανονιστικές διατάξεις εισάγονται στο μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης με την μορφή ανισοτήτων και ισοτήτων, οι οποίες ονομάζονται σχεδιαστικοί περιορισμοί. Αυτοί οι περιορισμοί για να έχουν ουσιώδης συνεισφορά στην μαθηματική διατύπωση του προβλήματος πρέπει να είναι εξαρτημένες τουλάχιστον σε μία σχεδιαστική μεταβλητή.

Οι σχεδιαστικοί περιορισμοί που επιβάλλονται συνήθως σε δομοστατικά προβλήματα είναι περιορισμοί τάσεων-παραμορφώσεων, των οποίων οι τιμές δεν επιτρέπεται να υπερβούν συγκεκριμένα όρια. Μερικές φορές οι μηχανικοί επιβάλλουν πρόσθετους σχεδιαστικούς περιορισμούς που μπορεί να είναι άχρηστοι, που είναι δηλαδή εξαρτημένοι από άλλους περιορισμούς ή παραμένουν πάντα στην ασφαλή περιοχή. Αυτό συμβαίνει λόγω παρουσίας αβεβαιοτήτων στον καθορισμό του προβλήματος ή λόγω απειρίας. Η χρήση πρόσθετων περιορισμών μπορεί να χρειάζεται παραπάνω υπολογιστική προσπάθεια χωρίς κανένα πρακτικό κέρδος.

Όσον αφορά τον πύργο της ανεμογεννήτριας οι σχεδιαστικοί περιορισμοί που εισάγονται είναι στην εξωτερική διάμετρο της βάσης και της κορυφής του πύργου, στο πάχος του τοιχώματος του κελύφους, στην θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα του πύργου, στην πλαστική οριακή αντοχή του, στην αντοχή του έναντι λυγισμού, στην μετατόπιση της κορυφής του πύργου:

- Περιορισμοί στην εξωτερική διάμετρο της βάσης του πύργου

Λόγω κανονισμών του οδικού δικτύου και των μέσων μεταφοράς η εξωτερική διάμετρος της βάσης του πύργου, D_o , δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 4,5 μέτρα. Επίσης πρέπει να θέσουμε ένα κάτω όριο στην εξωτερική διάμετρος της βάσης του πύργου έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε ότι η τιμή της θα παραμείνει μεγαλύτερη του μηδενός κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης. Θέτοντας αυτό το κάτω όριο ίσο με 0,1 έχουμε :

$$0,1 \leq D_o \leq 4,5$$

- Περιορισμοί στην εξωτερική διάμετρο της κορυφής του πύργου

Η εξωτερική διάμετρος της κορυφής του πύργου, D_t , δεν μπορεί να υπερβαίνει το πλάτος της νασέλας της ανεμογεννήτριας. Για τους τύπους των ανεμογεννητριών που θα εξεταστούν παρακάτω λαμβάνεται να είναι ίση με 3,4 μέτρα. Επίσης πρέπει να θέσουμε ένα κάτω όριο στην εξωτερική διάμετρος της κορυφής του πύργου έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε ότι η τιμή της θα παραμείνει μεγαλύτερη του μηδενός κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης. Θέτοντας αυτό το κάτω όριο ίσο με 0,1 έχουμε :

$$0,1 \leq D_t \leq 3,4$$

- Περιορισμοί στο πάχος του τοιχώματος του πύργου

Εξαιτίας περιορισμών στο πάχος του χάλυβα που μπορεί να επεξεργαστεί σε κυλινδρική μορφή με βασικό εξοπλισμό, το μέγιστο πάχος μπορεί να είναι 40 χιλιοστά. Επιπλέον, πρέπει να θέσουμε ένα κάτω όριο στο πάχος του τοιχώματος του πύργου έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε ότι η τιμή της θα παραμείνει μεγαλύτερη του μηδενός κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης. Θέτοντας αυτό το κάτω όριο ίσο με 0,001 έχουμε :

$$0,001 \leq t \leq 0,040$$

- Περιορισμοί στην θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα του πύργου

Όπως έχει αναφερθεί και στις απαιτήσεις σχεδιασμού, η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης του πύργου, f_n , πρέπει να παραμείνει πάνω από την μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας της εκάστοτε ανεμογεννήτριας που εξετάζεται, f_r , πολλαπλασιαζόμενη με έναν συντελεστή ασφαλείας ανάμεσα σε 1,1 και 2, έτσι ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο του συντονισμού σε οποιοδήποτε σημείο κατά την διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Αν θέσουμε 1,1 τον συντελεστή ασφαλείας έχουμε :

$$1,1 \cdot f_r \leq f_n$$

- Περιορισμοί στην μετατόπιση της κορυφής του πύργου

Η μέγιστη μετατόπιση της κορυφής του πύργου, u_t , περιορίζεται σε μία επιτρεπόμενη μετατόπιση της τάξης του 1,00% του συνολικού ύψους του πύργου, H , που εξετάζεται έτσι ώστε να αποφευχθεί υπερβολική κίνηση της ανεμογεννήτριας. Έχουμε λοιπόν :

$$u_t \leq 0,0100 \cdot H$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

4.1 Γενικά

Στα προηγούμενα κεφάλαια δόθηκε μια θεωρητική παρουσίαση όσον αφορά την ανάλυση σχεδιασμού του πύργου της ανεμογεννήτριας καθώς και θεωρητικά στοιχεία της βελτιστοποίησης μαζί με την διατύπωση του προβλήματος για τον βέλτιστο σχεδιασμό του πύργου. Η εφαρμογή και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης επιλέγεται να γίνει σύμφωνα με συγκεκριμένη μεθοδολογία και επίτευξη προκαθορισμένων στόχων που παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

4.2 Διατύπωση των στόχων

Πρωταρχικός στόχος του βέλτιστου δομικού σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας αποτελεί ο τελικός σχεδιασμός του πύργου με βάση το ελάχιστο δυνατό βάρος και κατά επέκταση με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Η λύση που προκύπτει από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης είναι μια και μοναδική. Επιπλέον τίθενται τρεις διακριτοί στόχοι για την συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του αλγόριθμου βελτιστοποίησης οι οποίοι είναι :

- **Κόστος κατασκευής πύργου – ύψος πύργου.** Παρουσιάζεται συγκριτικά το κόστος κατασκευής του πύργου συναρτήσει του ύψους του. Εξετάζονται βέλτιστοι σχεδιασμοί με τρεις διαφορετικές ποιότητες χάλυβα, δύο διαφορετικές γεωμετρικές μορφές του πύργου και για πέντε διαφορετικά ύψη κατασκευής.
- **Συνολικό κόστος ανεμογεννήτριας – ύψος πύργου.** Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του προηγούμενου στόχου, παρουσιάζονται συγκριτικά για τις ίδιες περιπτώσεις το συνολικό κόστος μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει του ύψους της. Συνοπτικά στα παραπάνω αποτελέσματα του κόστους κατασκευής του πύργου προστίθενται το κόστος της ηλεκτρικής γεννήτριας (Vestas V90-3MW) καθώς και το κόστος θεμελίωσης.
- **Κέρδος στον κύκλο ζωής της ανεμογεννήτριας.** Παρουσιάζεται το κέρδος που αποφέρει η λειτουργία της ανεμογεννήτριας στο κύκλο ζωής της (20 χρόνια), για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, συναρτήσει του ύψους της και για διαφορετικές μέσες ταχύτητες ανέμου. Τα αποτελέσματα αναλύονται συγκριτικά μεταξύ τους καθώς η επιλογή της χρησιμοποίησης μέσω ετήσιων ταχυτήτων ανέμου σε βάθος 20 χρόνων είναι μη ρεαλιστική.

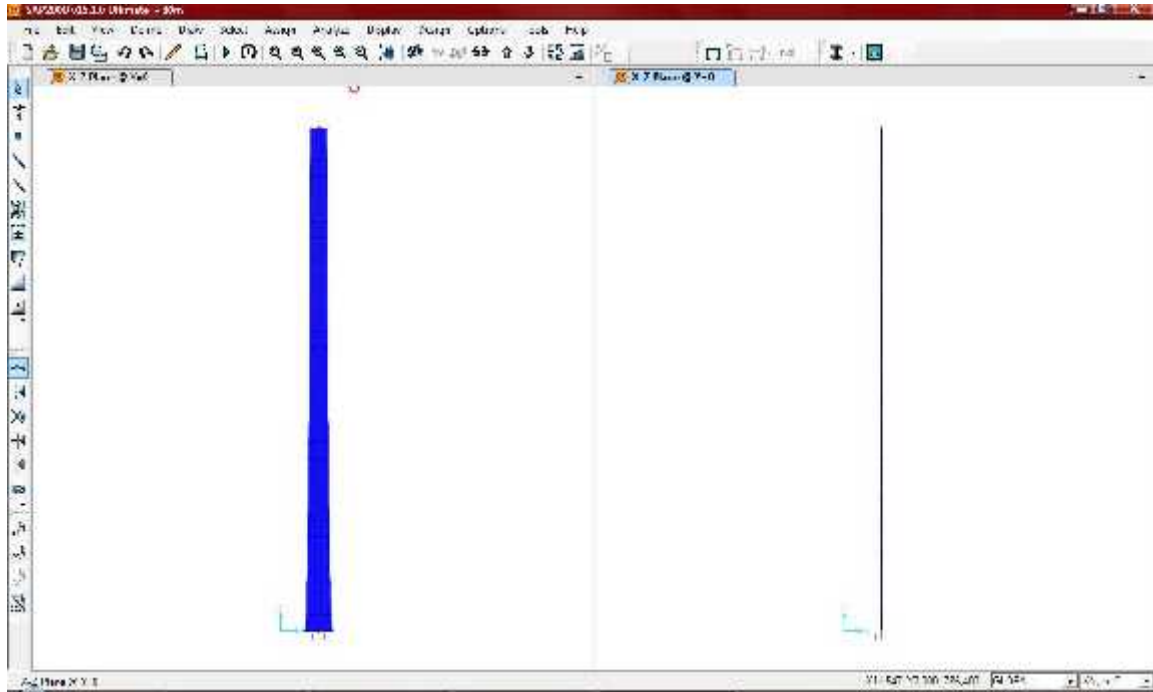
Συνοψίζοντας παρόλο που οι στόχοι δεν αναφέρονται σε κάποια υπάρχουσα κατασκευή ή δεδομένη τοποθεσία, έχει μεγάλη αξία η συγκριτική τους παρουσίαση. Ως αξιολόγηση αυτών των αποτελεσμάτων θα προκύψουν ενδιαφέροντα στοιχεία που αφορούν την βέλτιστη ποιότητα χάλυβα, γεωμετρική μορφή, ύψος ανεμογεννήτριας για κάθε μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου μέσα σε ένα σύνηθες φάσμα ταχυτήτων. Αυτά τα αποτελέσματα εμπλουτισμένα με συγκεκριμένα στοιχεία μιας περιοχής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια αρχική φάση προμελέτης κατασκευής ανεμογεννήτριας.

4.3 Περιγραφή της μεθοδολογίας

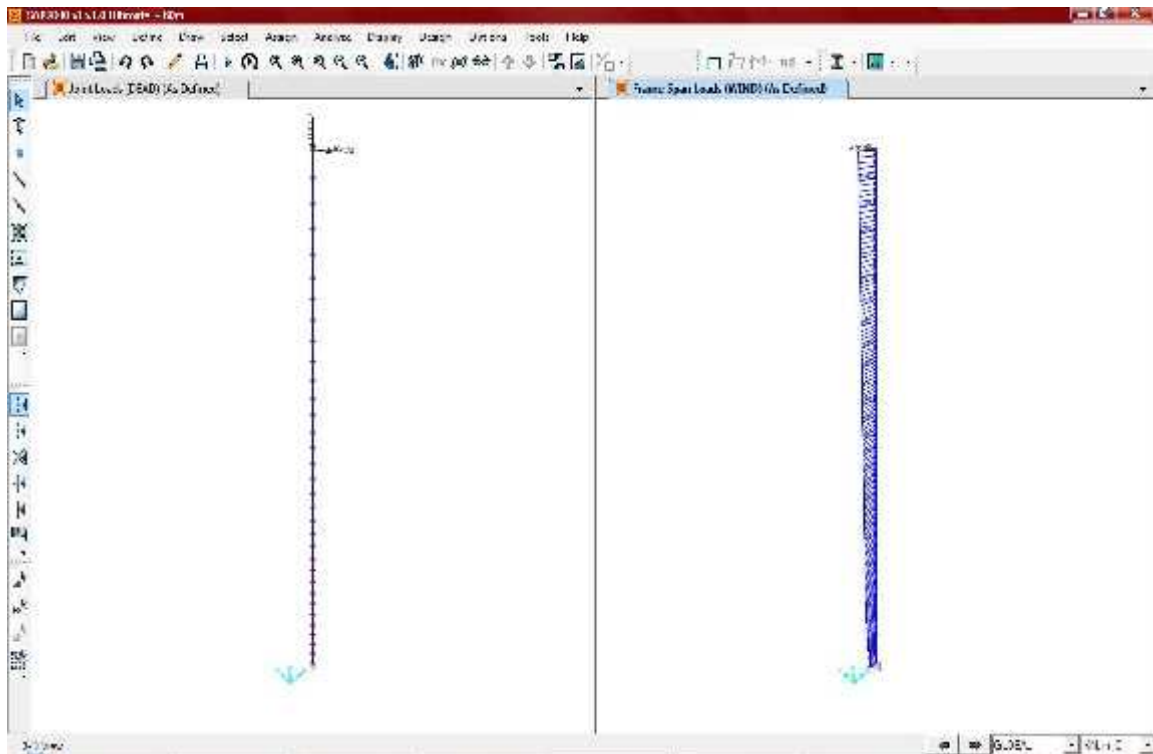
Αρχικά σχεδιάστηκαν πέντε μοντέλα που προσομοιάζουν τον πύργο της ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων SAP2000. Τα μοντέλα ήταν ύψους 80, 100, 120, 140, 160 μέτρων το καθένα. Σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας στοιχεία δοκού (beam elements) μεταβλητής κυκλικής διατομής ύψους 2,5 μέτρων το καθένα. Με αυτό τον τρόπο το μοντέλο των 80 μέτρων αποτελείται από 32 στοιχεία δοκού, το μοντέλο των 100 μέτρων από 40 στοιχεία δοκού, το μοντέλο των 120 μέτρων από 48 στοιχεία δοκού, το μοντέλο των 140 μέτρων από 56 στοιχεία δοκού και το μοντέλο των 160 μέτρων από 64 στοιχεία δοκού.

Τα μοντέλα θεωρήθηκαν πακτωμένα στην βάση τους. Ως εκ τούτου δεν λήφθηκε υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής. Ωστόσο τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκ των υστέρων για τον ανεξάρτητο σχεδιασμό της θεμελίωσης.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν τα φορτία που ενεργούν στον πύργο όπως περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 (παρ. 3.1) αυτής της εργασίας. Το κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο που ενεργεί στην κορυφή του πύργου αντιπροσωπεύει το βάρος της ανεμογεννήτριας (Vestas V90-3MW) που εφαρμόστηκε και στα πέντε μοντέλα, είναι ίσο με 1100(KN) και βρίσκεται στα στοιχεία του κατασκευαστή ως άθροισμα της νασέλας και του ρότορα. Αντίστοιχα η συγκεντρωμένη ροπή στην κορυφή είναι ίση με 804,75(KNm) και αφορά την εκκεντρότητα του ρότορα (0,75 m) ως προς τον κατακόρυφο κεντρικό άξονα της ανεμογεννήτριας. Όσον αφορά το μέγιστο συγκεντρωμένο φορτίο λόγω ανέμου στην κορυφή είναι σταθερό και ίδιο και για τα πέντε μοντέλα, δίδεται δε από την κατασκευάστρια εταιρία για το συγκεκριμένο μοντέλο της ίσο με 600(KN). Επίσης για το κατανεμημένο φορτίο του ανέμου που ενεργεί κατά ύψος του πύργου εφαρμόστηκε ο προσεγγιστικός τύπος που δίνει αυτή την κατανομή(Κεφ. 3 παρ. 3.1.2)και όχι ο αναλυτικός τύπος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα. Τέλος εφαρμόστηκαν οι συνδυασμοί φορτίσεως όπως αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3 (παρ.3.1.3).Παρακάτω (σχήμα 4.1)παρατίθενται ενδεικτικά η σχεδιαστική προσομοίωση του πύργου και μαζί με τα φορτία(σχήμα 4.2) για το μοντέλο των 80 μέτρων. Παρομοίως σχεδιάστηκαν και οι υπόλοιποι τέσσερις πύργοι ύψους 100,120,140,160 μέτρων.



Σχήμα 4.1 : Το μοντέλο του πύργου 80m



Σχήμα 4.2 : Με σταθερά φορτία(αριστερά),με κινητά φορτία (δεξιά)

Στη συνέχεια τα μοντέλα εισήχθησαν στο πρόγραμμα βελτιστοποίησης Optimus (βλ. Κεφάλαιο 3 παρ.--). Στο πρόγραμμα διατυπώθηκε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης με βάση τις μεταβλητές σχεδιασμού, τις προκαθορισμένες παραμέτρους και τους σχεδιαστικούς περιορισμούς όπως αναφέρονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 (παρ.--). Η βελτιστοποίηση έγινε για τρεις ποιότητες χάλυβα (S235,S275,S355) και για δύο γεωμετρικές μορφές του πύργου, μία γραμμική και μία παραβολική, για κάθε ένα από τα πέντε μοντέλα των 80,100,120,140,160 μέτρων και 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 κατά ύψος, με το υλικό κατασκευής (χάλυβας). 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 και υπόκειται στους νόμους της αγοράς και της ζήτησης. Όσον αφορά το κόστος της θεμελίωσης δόθηκε προσεγγιστικά ως ένα σταθερό ποσοστό 20% του κόστους κατασκευής του κάθε πύργου. Αν και αυτή η τιμή είναι απλά μια εκτίμηση, ωστόσο το κόστος της θεμελίωσης μπορεί να θεωρηθεί ανάλογο των φορτίων που καλείται να παραλάβει από τον πύργο και να τα μεταβιβάσει με ασφάλεια στο έδαφος.

Τέλος για τον υπολογισμό του κέρδους στο κύκλο ζωής του έργου, υπολογίστηκε η αναμενόμενη ηλεκτρική ισχύς σε ένα έτος που μπορεί να παραχθεί για μέσες ετήσιες ταχύτητες ανέμου σε ένα φάσμα ταχυτήτων αναφοράς από 3 έως 12 (m/s) με βήμα 0,5 (m/s). Η ταχύτητες ανέμου αυτές αναφέρονται σε θεωρητικές επί τόπου μετρήσεις σε ύψος αναφοράς 10 μέτρων και ανάγονται με κατάλληλους μαθηματικούς τύπους στα αντίστοιχα ύψη των 80,100,120,140,160 μέτρων που εξετάζονται. Από αυτήν την ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς βρίσκεται το σύνολο των παραγόμενων κιλοβατώραν, επί 365 μέρες επί 24 ώρες, μαζί με ένα συντελεστή 0,30 όσο περίπου είναι το ποσοστό που φυσάει ο άνεμος μέσα στον χρόνο. Οι κιλοβατώρες ανάγονται στα 20 χρόνια, οι οποίες πολλαπλασιασμένες με κατάλληλο συντελεστή δίνουν τα συνολικά μεικτά κέρδη της ανεμογεννήτριας. Ο συντελεστής αυτός συμπεριλαμβάνει το κόστος επισκευής και συντήρησης για κάθε παραγόμενη κιλοβατώρα. Το καθαρό κέρδος της ανεμογεννήτριας προκύπτει με αφαίρεση του συνολικού κόστους κατασκευής της ανεμογεννήτριας από τα μεικτά κέρδη για κάθε περίπτωση.

4.4 Στοιχεία δεδομένων

Τα στοιχεία δεδομένων αφορούν όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διατύπωση της μεθοδολογίας και αφορούν στοιχεία παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, στοιχεία του αιολικού δυναμικού, συγκεντρωμένα στοιχεία της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε και τέλος τα οικονομικά στοιχεία.

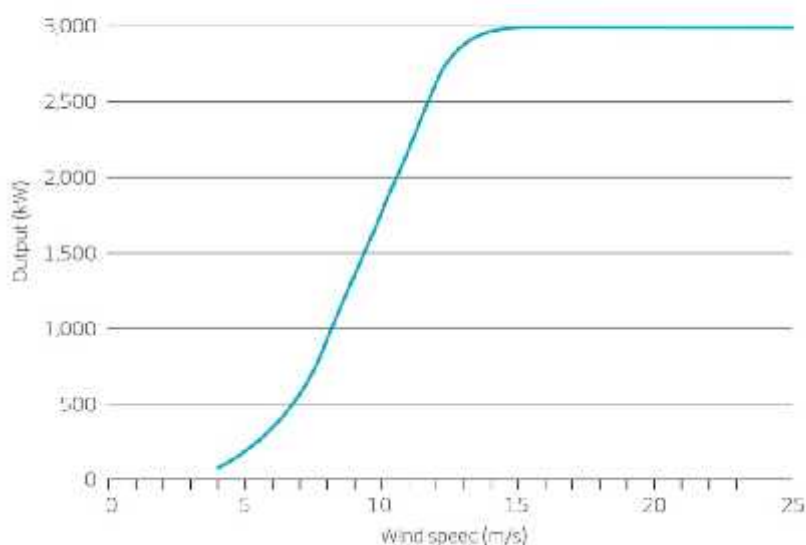
4.4.1 Στοιχεία ανεμογεννήτριας

Η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις είναι η Vestas V90 ονομαστικής ισχύος 3MW και συγκεντρωτικά τα στοιχεία της δίνονται παρακάτω :

- Διάμετρος ρότορα : 90 m
- Επιφάνεια σάρωσης : 6,362 m²
- Ταχύτητα έναρξης (Vcut-in) : 4m/s
- Ονομαστική ταχύτητα (Vrated) : 15 m/s
- Ταχύτητα αποκοπής (Vcut-out) : 25 m/s
- Καμπύλη ισχύος ($C_p = 0,41$)

Power curve V90-3.0 MW

Noise reduced sound power modes are available.



Σχήμα 4.3 Καμπύλη ισχύος της V90-3.0MW

4.4.2 Στοιχεία αιολικού δυναμικού

Ο άνεμος θεωρήθηκε ότι φυσάει κατά μία και μοναδική ευνοϊκή διεύθυνση και ότι 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

$$V_h = V_{ref} * \frac{\ln \frac{h}{z_0}}{\ln \frac{h_{ref}}{z_0}}$$

Όπου, V_h είναι η ταχύτητα του ανέμου (m/s) στο υψόμετρο που θα βρίσκεται η τουρμπίνα της ανεμογεννήτριας, V_{ref} είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου (m/s) στο ύψος αναφοράς h_{ref} (10 m) και z_0 είναι το μήκος τραχύτητας της περιοχής (m). Η περιοχή θεωρείται υπαιθρος, χωρίς ψηλά κτίρια και πυκνή βλάστηση, άρα το $z_0 = 0,01$.

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	160m
3	3,90309	4	4,079181	4,146128	4,20412
3,5	4,553605	4,666667	4,759045	4,837149	4,904807
4	5,20412	5,333333	5,438908	5,528171	5,605493
4,5	5,854635	6	6,118772	6,219192	6,30618
5	6,50515	6,666667	6,798635	6,910213	7,006867
5,5	7,155665	7,333333	7,478499	7,601235	7,707553
6	7,80618	8	8,158362	8,292256	8,40824
6,5	8,456695	8,666667	8,838226	8,983277	9,108927
7	9,10721	9,333333	9,51809	9,674299	9,809613
7,5	9,757725	10	10,19795	10,36532	10,5103
8	10,40824	10,66667	10,87782	11,05634	11,21099
8,5	11,05875	11,33333	11,55768	11,74736	11,91167
9	11,70927	12	12,23754	12,43838	12,61236
9,5	12,35978	12,66667	12,91741	13,12941	13,31305
10	13,0103	13,33333	13,59727	13,82043	14,01373
10,5	13,66081	14	14,27713	14,51145	14,71442
11	14,31133	14,66667	14,957	15,20247	15,41511
11,5	14,96184	15,33333	15,63686	15,89349	16,11579
12	15,61236	16	16,31672	16,58451	16,81648

Πίνακας 4.1 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 χρειάζεται το συγκεκριμένο μοντέλο ανεμογεννήτριας για να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα, οπότε αυτή η τιμή θα εξαιρεθεί από τους επόμενους υπολογισμούς.

4.4.3 Στοιχεία για την πυκνότητα του αέρα

Η πυκνότητα του αέρα δεν είναι σταθερή και αλλάζει συναρτήσει της ατμοσφαιρικής πίεσης και της θερμοκρασίας σύμφωνα με τον τύπο :

$$\rho = 1,225 * \frac{288,15}{T} * \frac{p}{1013,3}$$

Όπου,

ρ = πυκνότητα αέρα (kg/m^3)

T = θερμοκρασία (K)

p = ατμοσφαιρική πίεση (mb)

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

$$p = 01325 \cdot (1 - 0,000022557 \cdot Z)^{5,25588}$$

όπου Z το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται η κάθε ανεμογεννήτρια. Με τη εφαρμογή των παραπάνω τύπων στο EXCEL βρίσκουμε :

Υψος(m)	Πίεση (P)	Πυκνότητα (ρ)
80	100367,7	1,19328135
100	100129,5	1,190449525
120	99891,75	1,187623144
140	99654,47	1,1848022
160	99417,66	1,181986683

Πίνακας 4.2 Ατμοσφαιρική πίεση-πυκνότητα στο ύψος κάθε πύργου

4.4.4 Στοιχεία ηλεκτροπαραγωγής

Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μιας ανεμογεννήτριας δίνεται από την σχέση:

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

Όπου,

P_{el} = η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (Watt)

η = η συνολική απόδοση της γεννήτριας (δίνεται από τους κατασκευαστές μέσω του συντελεστή

c_p)

ρ = η πυκνότητα του ανέμου ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ στο επίπεδο της θάλασσας)

A = επιφάνεια σάρωσης (m^2)

c_p = ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

v_w = η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Η επιφάνεια σάρωσης (A) για το μοντέλο της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε (Vestas V90-3MW) είναι $6,362 \text{ m}^2$. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος δεν είναι σταθερός και εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Ωστόσο από την καμπύλη ισχύος που δίνεται από τον κατασκευαστή μπορεί να υπολογιστεί ένας μέσος όρος μερικών χαρακτηριστικών συνδυασμών ισχύος και ταχύτητας ανέμου. Αυτός ο συντελεστής υπολογίζεται με αυτή την διαδικασία ίσως με 0,41.

Χρησιμοποιώντας τα προηγούμενα στοιχεία του αιολικού δυναμικού και πυκνότητας του αέρα, με εφαρμογή του παραπάνω τύπου στο EXCEL προκύπτει :

Ταχ. αναφοράς στα 10m Vref (m/s)	Παραγόμενη ισχύς (Pel) σε KW /έτος				
	80m	100m	120m	140m	160m
3	92,53711	99,36619	112,8272	183,0295	190,3641
3,5	146,9455	157,7898	179,1655	290,644	302,2912
4	219,3472	235,5347	267,4423	433,8476	451,2335
4,5	312,3128	335,3609	380,7919	617,7244	642,4789
5	428,4126	460,0287	522,3483	847,3586	881,3154
5,5	570,2171	612,2982	695,2456	1127,834	1173,031
6	740,2969	794,9296	902,6179	1464,236	1522,913
6,5	941,2224	1010,683	1147,599	1861,647	1936,25
7	1175,564	1262,319	1433,324	2325,152	2418,329
7,5	1445,892	1552,597	1762,926	2859,835	2974,439
8	1754,778	1884,277	2139,539	3000	3000
8,5	2104,791	2260,121	2566,297	3000	3000
9	2498,502	2682,887	3000	3000	3000
9,5	2938,482	3000	3000	3000	3000
10	3000	3000	3000	3000	3000
10,5	3000	3000	3000	3000	3000
11	3000	3000	3000	3000	3000
11,5	3000	3000	3000	3000	3000
12	3000	3000	3000	3000	3000

Πίνακας 4.3 Παραγόμενη Ηλεκτ. Ισχύς ανα έτος για κάθε πύργο

Για να βρούμε τις παραγόμενες κιλοβατώρες ανα έτος πολλαπλασιάζουμε την παραγόμενη συνολική ισχύ με 356 (μέρες) επί 24 (ώρες) επί ενός συντελεστή ίσο με 0,30 που είναι οι ώρες που φυσάει ο άνεμος ως ποσοστό των συνολικών ώρων του έτους. Με εφαρμογή των παραπάνω στο EXCEL παίρνουμε :

Ταχ. αναφοράς στα 10m Vref (m/s)	KWh				
	80m	100m	120m	140m	160m
3	243187,5318	261134,3501	296509,9784	481001,4122	500275,901
3,5	386172,7935	414671,6921	470846,8638	763812,4277	754421,1899
4	576444,5198	618985,1498	702838,4672	1140151,496	1185841,543
4,5	820757,9198	881328,4552	1000721,177	1623379,766	1688434,541
5	1125868,203	1208955,371	1372731,381	2226358,39	2316095,764
5,5	1498530,578	1609119,598	1827105,469	2963948,517	3082724,792
6	1945500,254	2089074,88	2372079,827	3848011,298	4002215,208
6,5	2473532,441	2656074,349	3015890,845	4892407,883	5088454,59
7	3089382,348	3317373,537	3766774,91	6110499,422	6355359,52
7,5	3799805,184	4080224,376	4632968,412	7515647,066	7816825,577
8	4611556,159	4951881,198	5622707,738	7884000	7884000
8,5	5531390,48	5939597,736	6744229,276	7884000	7884000
9	6566063,359	7050627,722	7884000	7884000	7884000
9,5	7722330,003	7884000	7884000	7884000	7884000
10	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000
10,5	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000
11	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000
11,5	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000
12	7884000	7884000	7884000	7884000	7884000

Πίνακας 4.4 : Παραγώμενες κιλοβατώρες ανα έτος για κάθε πύργο

4.4.5 Οικονομικά στοιχεία

Η τιμή του χάλυβα ανα κιλό που περιλαμβάνει το κόστος παραγωγής και επεξεργασίας του υλικού, τη μεταφορά, τη συναρμολόγηση καθώς και 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 S275 → 2,0 ευρώ / kg

χάλυβας S355 → 2,3 ευρώ / kg

Το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού του μοντέλου της ανεμογεννήτριας υπόκειται στους νόμους της αγοράς και της ζήτησης. Ωστόσο μπορεί να θεωρηθεί ως 1

ευρώ / KW αρκετά συντηρητικά, δηλαδή στα 3.000.000 ευρώ σύνολο για το κόστος του μοντέλου Vestas V90 – 3MW.

Η τιμή πώλησης της κιλοβατώρας μπορεί να θεωρηθεί με βάση τα νέα ευρωπαϊκά δεδομένα ως 0,05 ευρώ / kWh. Αυτή η τιμή είναι η τελική και έχουν αφαιρεθεί το κόστος συντήρησης και επισκευής κατά την λειτουργία της ανεμογεννήτριας ανα κιλοβατώρα. Με εφαρμογή αυτών μπορούμε να βρούμε τα μεικτά κέρδη της ανεμογεννήτριας για κάθε ύψος και για ένα έτος :

Ταχ. αναφοράς στα 10m Vref (m/s)	ΜΕΙΚΤΑ ΚΕΡΔΗ ΣΕ ΕΥΡΩ				
	Τιμή πώλησης 0,05 €/kWh				
	80m	100m	120m	140m	160m
3	12159,38	13056,72	14825,5	24050,07	25013,85
3,5	19308,64	20733,58	23542,34	38190,62	39721,06
4	28822,23	30949,26	35141,92	57007,57	59292,08
4,5	41037,9	44066,42	50036,06	81168,99	84421,73
5	56293,41	60447,77	68636,57	111342,9	115804,8
5,5	74926,53	80455,98	91355,27	148197,4	154136,2
6	97275,01	104453,7	118604	192400,6	200110,8
6,5	123676,6	132803,7	150794,5	244620,4	254423,2
7	154469,1	165868,7	188338,7	305525	317768,5
7,5	189990,3	204011,2	231648,4	375782,4	390841,3
8	230577,8	247594,1	281135,4	394200	394200
8,5	276569,5	296979,9	337211,5	394200	394200
9	328303,2	352531,4	394200	394200	394200
9,5	386116,5	394200	394200	394200	394200
10	394200	394200	394200	394200	394200
10,5	394200	394200	394200	394200	394200
11	394200	394200	394200	394200	394200
11,5	394200	394200	394200	394200	394200
12	394200	394200	394200	394200	394200

Πίνακας 4.5 : Μεικτά Κέρδη ανα έτος για κάθε πύργο

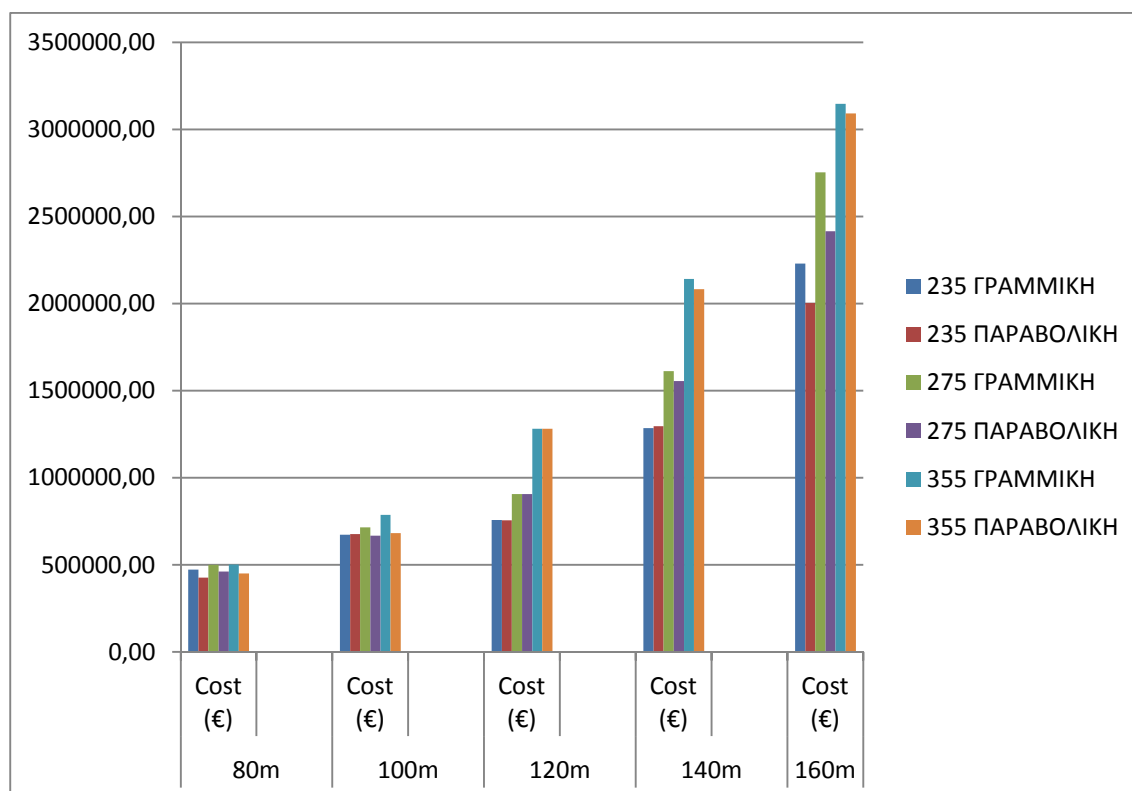
4.5 Επίτευξη Στόχων – Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

4.5.1 Κόστος Κατασκευής Πύργου – Ύψος Πύργου

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για τις τρεις διαφορετικές ποιότητες χάλυβα (S235,S275,S355) και τις δύο γεωμετρικές μορφές, γραμμική(linear), παραβολική(nonlinear)κατά ύψος του πύργου δίδονται παρακάτω σε πίνακα και διάγραμμα (οι τιμές σε ευρώ) :

		ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΥΡΓΟΥ				
		80m	100m	120m	140m	160m
		Cost (€)	Cost (€)	Cost (€)	Cost (€)	Cost (€)
235	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	473712,36	672541,91	757676,30	1285365,51	2230019,05
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	427015,30	676145,65	756118,66	1296204,39	2003990,33
275	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	500713,85	716212,37	906832,62	1612663,37	2753564,81
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	462113,53	668288,23	906804,28	1554713,06	2415255,75
355	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	502029,67	786980,62	1281128,87	2142167,72	3146168,55
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	451245,52	683284,85	1281431,30	2082465,76	3091282,04

Πίνακας 4.6 : Κόστος Κατασκευής για κάθε ύψος Πύργου



Σχήμα 4.4 : Διάγραμμα Κόστους Κατασκευής για κάθε ποιότητα χάλυβα και μορφής πύργου.

Όπως αναμενόταν το κόστος κατασκευής του πύργου αυξάνει σε κάθε σχεδόν περίπτωση συναρτήσει του ύψους. Ως γενική παρατήρηση, στην παραβολική μορφή κατά ύψος του πύργου βλέπουμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις έχουμε εξοικονόμηση υλικού και χρημάτων σε σχέση με την γραμμική μορφή. Στα ύψη 80, 100 και 140 μέτρων η εξοικονόμηση είναι μικρή σχετικά, στα 120 μέτρα υπάρχει εξισορρόπηση των δύο μορφών, ενώ στα ύψη των 160 μέτρων βλέπουμε μια εξοικονόμηση που στην περίπτωση κατασκευής από χάλυβα S275 ξεπερνάει τις 300.000 ευρώ.

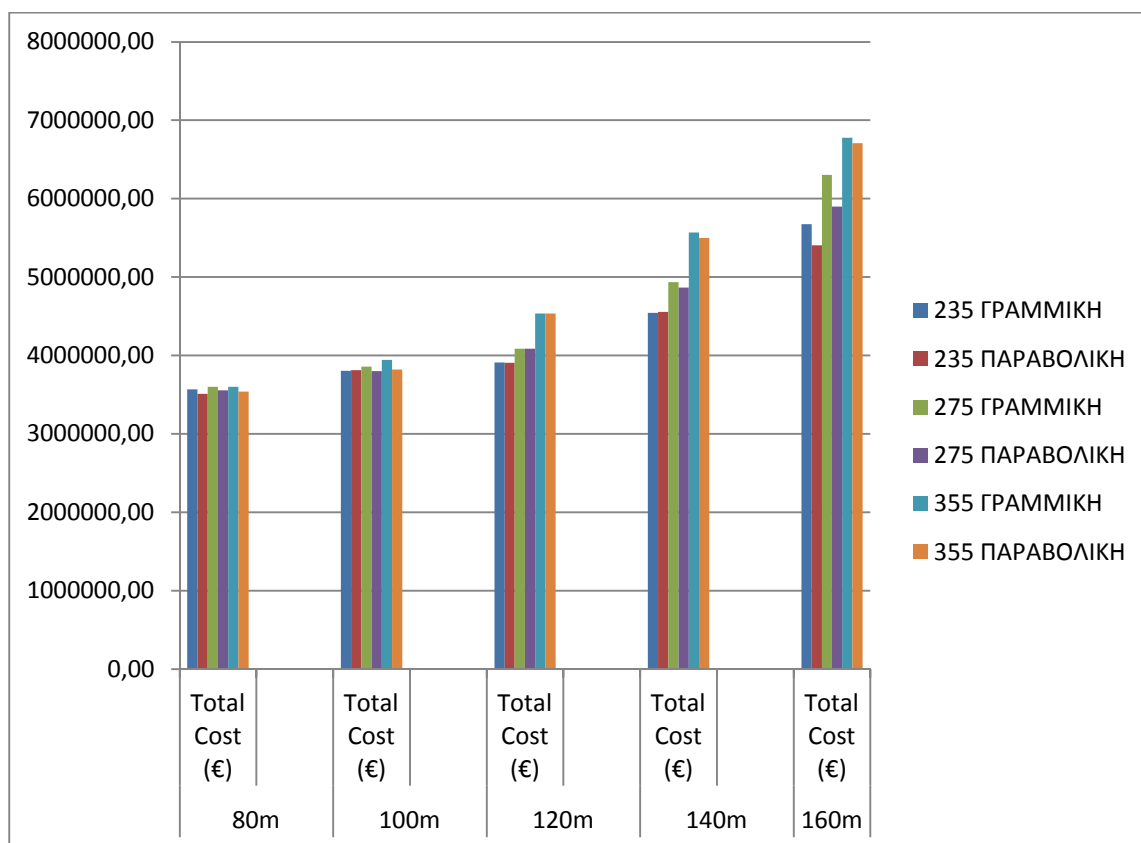
Όσον αφορά τις ποιότητες του χάλυβα κατασκευής παρατηρούμε ότι σε όλα τα ύψη οικονομικότερη κατασκευή προκύπτει με τον χάλυβα S235 και μάλιστα με την παραβολική μορφή του πύργου (non-linear). Για τη συγκεκριμένη ποιότητα χάλυβα, η διαφορά μεταξύ γραμμικής και μη γραμμικής μορφής είναι αμελητέα στην περίπτωση των 100,120,140 μέτρων. Λίγο μεγαλύτερη της τάξης των 50.000 ευρώ είναι η διαφορά στο ύψος των 80 μέτρων ενώ στο ύψος κατασκευής των 160 μέτρων η εξοικονόμηση φτάνει τις 230.000 ευρώ, όσον αφορά τον χάλυβα S235 πάντα.

4.5.2 Συνολικό Κόστος Ανεμογεννήτριας – Ύψος Πύργου

Για να βρούμε το συνολικό κόστος της ανεμογεννήτριας προσθέτουμε το κόστος θεμελίωσης, προσαυξάνοντας το κόστος κατασκευής κατά 20% και προσθέτουμε το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Εξαιτίας αυτής της μεθοδολογίας δεν περιμένουμε διαφοροποιήσεις σε αυτή τη φάση, σε σύγκριση με την προηγούμενη παράγραφο, αλλά ο πίνακας και το διάγραμμα θα βοηθήσουν στην επίτευξη του επόμενου στόχου που είναι ο υπολογισμός του καθαρού κέρδους στον κύκλο ζωής του έργου.

		ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ				
		80m	100m	120m	140m	160m
		Total Cost (€)	Total Cost (€)	Total Cost (€)	Total Cost (€)	Total Cost (€)
235	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	3568454,83	3807050,29	3909211,56	4542439,93	5676022,87
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	3512418,36	3811374,78	3907342,39	4555445,99	5404788,40
275	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	3600356,62	3859454,84	4088159,14	4935196,65	6304277,77
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	3554536,24	3801545,87	4088165,14	4865655,67	5898306,92
355	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	3602435,61	3944376,74	4537354,65	5570601,27	6775402,27
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	3541454,63	3819541,82	4537717,56	5498958,91	6705538,45

Πίνακας 4.7 : Συνολικό Κόστος κατασκευής ανεμογεννήτριας για κάθε ύψος πύργου



Σχήμα 4.5 : Διάγραμμα Συνολικού Κόστους Ανεμογεννήτριας για κάθε ποιότητα χάλυβα και μορφή του πύργου.

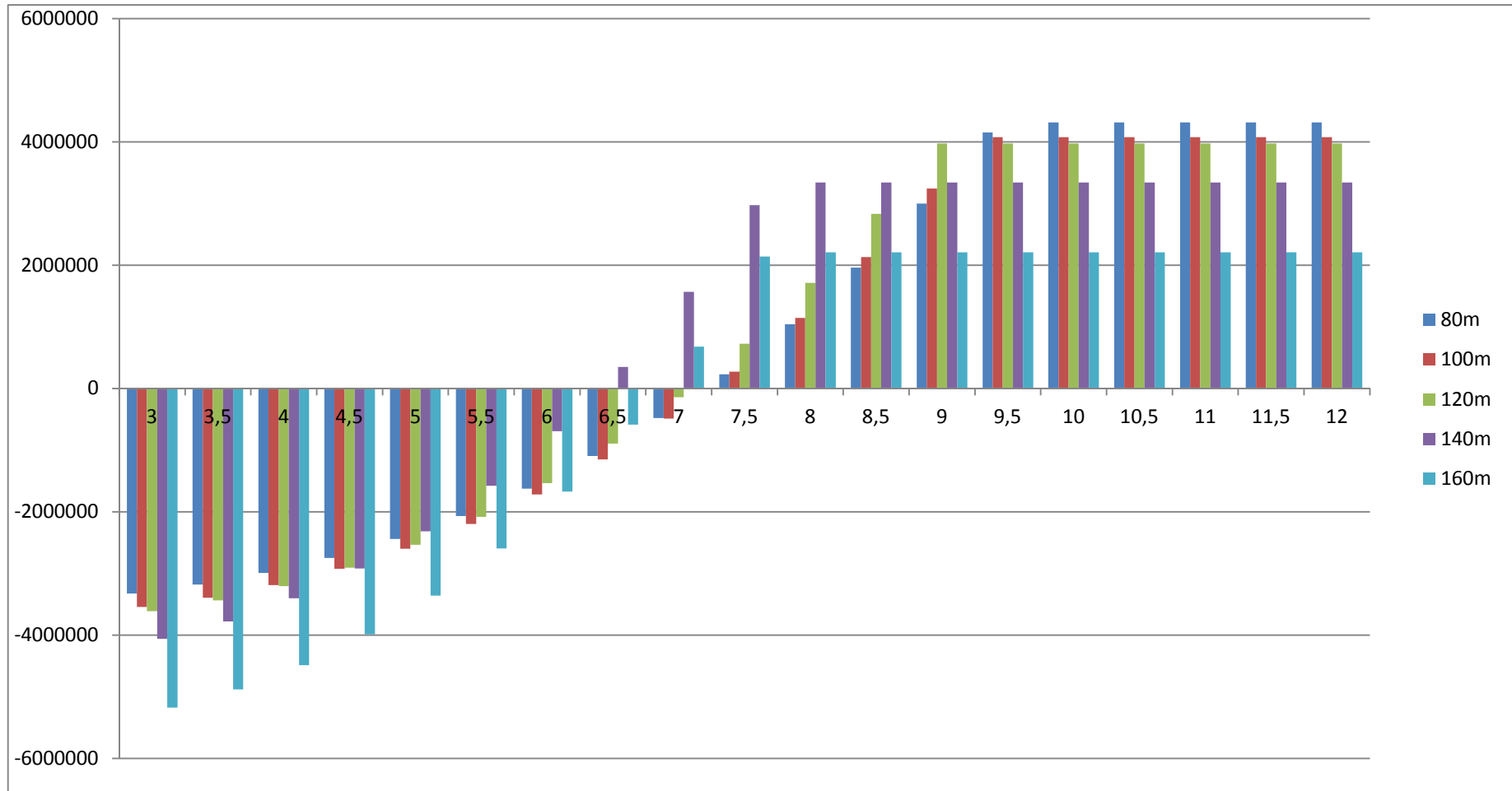
4.5.3 Καθαρό Κέρδος στον Κύκλο Ζωής της Ανεμογεννήτριας

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 και για κάθε ποιότητα χάλυβα και γεωμετρικής μορφής του πύργου. Παρακάτω δίνονται σε πίνακες και διαγράμματα για τις 6 περιπτώσεις, δηλαδή τις τρεις ποιότητες χάλυβα και δύο γεωμετρικές μορφές του πύργου, τα αντίστοιχα καθαρά κέρδη των ανεμογεννητριών, χρησιμοποιώντας το μοντέλο Vestas V90-3MW, 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

4.5.3.1 Πίνακας-Διάγραμμα για γραμμική μορφή πύργου και Χάλυβα S235.

Vref	ΧΑΛΥΒΑΣ S235 - ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΟΡΦΗ				
	80m	100m	120m	140m	160m
3	-3325267	-3545916	-3612702	-4061439	-5175746
3,5	-3182282	-3392379	-3438365	-3778628	-4881602
4	-2992010	-3188065	-3206373	-3402288	-4490181
4,5	-2747697	-2925722	-2908490	-2919060	-3987588
5	-2442587	-2598095	-2536480	-2315582	-3359926
5,5	-2069924	-2197931	-2082106	-1578491	-2593298
6	-1622955	-1717975	-1537132	-694429	-1673808
6,5	-1094922	-1150975	-893321	349968	-587558
7	-479072	-489677	-142437	1568059	679347
7,5	231350	273174	723757	2973207	2140804
8	1043101	1144831	1713496	3341560	2207977
8,5	1962936	2132547	2835018	3341560	2207977
9	2997609	3243577	3974788	3341560	2207977
9,5	4153875	4076950	3974788	3341560	2207977
10	4315545	4076950	3974788	3341560	2207977
10,5	4315545	4076950	3974788	3341560	2207977
11	4315545	4076950	3974788	3341560	2207977
11,5	4315545	4076950	3974788	3341560	2207977
12	4315545	4076950	3974788	3341560	2207977

Πίνακας 4.8 : Καθαρό Κέρδος σε (€) κάθε ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα αναφοράς με γραμμική μορφή πύργου και ποιότητα χάλυβα S235.



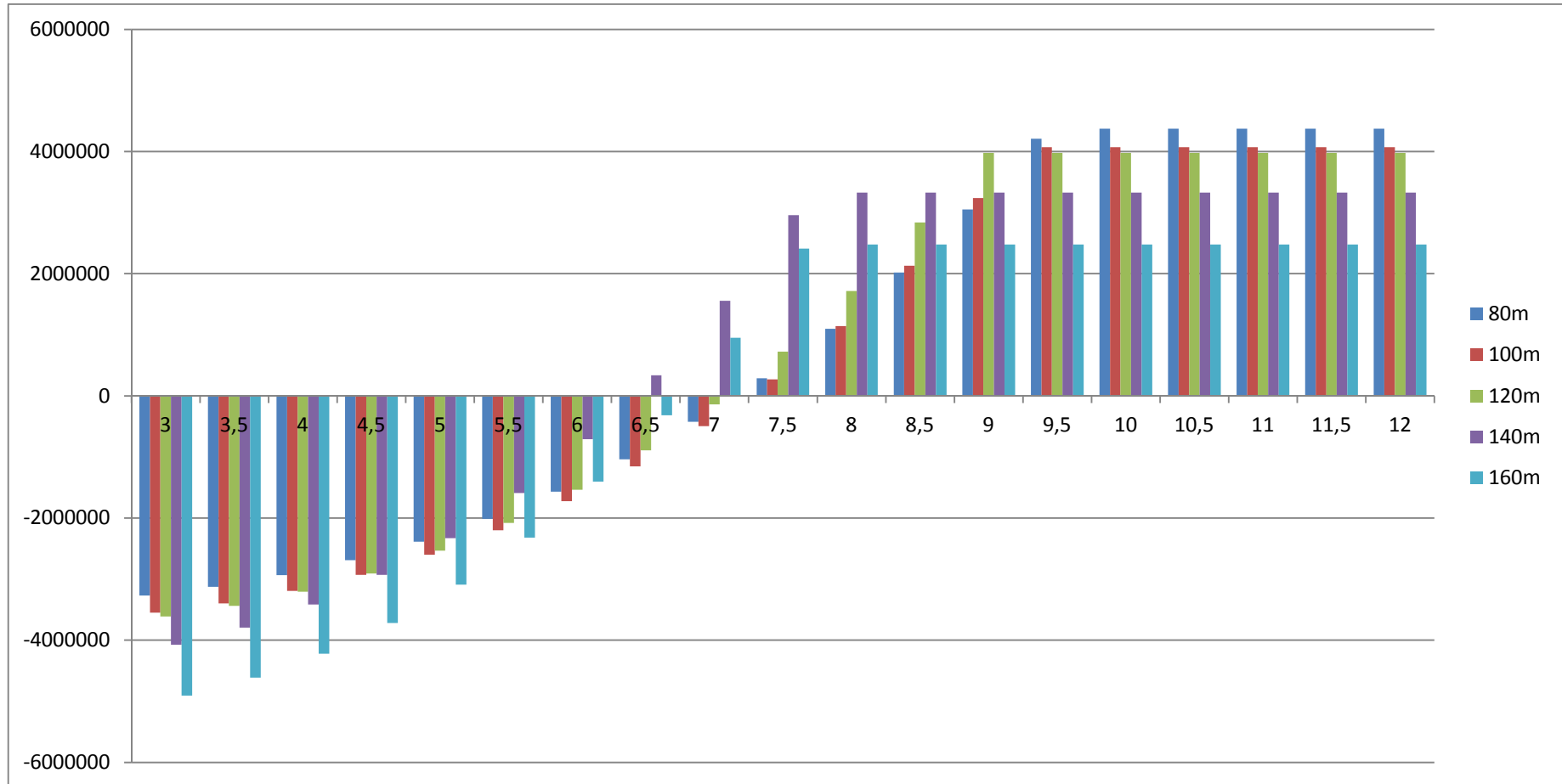
Σχήμα 4.6 : Καθαρό Κέρδος σε (€) κάθε ανεμογεννήτριας με γραμμική μορφή πύργου και ποιότητα χάλυβα S235.

4.5.3.2 Πίνακας-Διάγραμμα για παραβολική μορφή πύργου και Χάλυβα S235.

ΧΑΛΥΒΑΣ S235 - ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ					
Vref	80m	100m	120m	140m	160m
3	-3269231	-3550240	-3610832	-4074445	-4904511
3,5	-3126246	-3396703	-3436496	-3791634	-4610367
4	-2935974	-3192390	-3204504	-3415294	-4218947
4,5	-2691660	-2930046	-2906621	-2932066	-3716354
5	-2386550	-2602419	-2534611	-2328588	-3088692
5,5	-2013888	-2202255	-2080237	-1591497	-2322064
6	-1566918	-1722300	-1535263	-707435	-1402573
6,5	-1038886	-1155300	-891452	336962	-316324
7	-423036	-494001	-140567	1555053	950581
7,5	287387	268850	725626	2960201	2412038
8	1099138	1140506	1715365	3328554	2479212
8,5	2018972	2128223	2836887	3328554	2479212
9	3053645	3239253	3976658	3328554	2479212
9,5	4209912	4072625	3976658	3328554	2479212
10	4371582	4072625	3976658	3328554	2479212
10,5	4371582	4072625	3976658	3328554	2479212
11	4371582	4072625	3976658	3328554	2479212
11,5	4371582	4072625	3976658	3328554	2479212
12	4371582	4072625	3976658	3328554	2479212

Πίνακας 4.9 : Καθαρό Κέρδος σε (€) κάθε ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα αναφοράς με παραβολική μορφή πύργου και ποιότητα χάλυβα S235.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΔΟΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



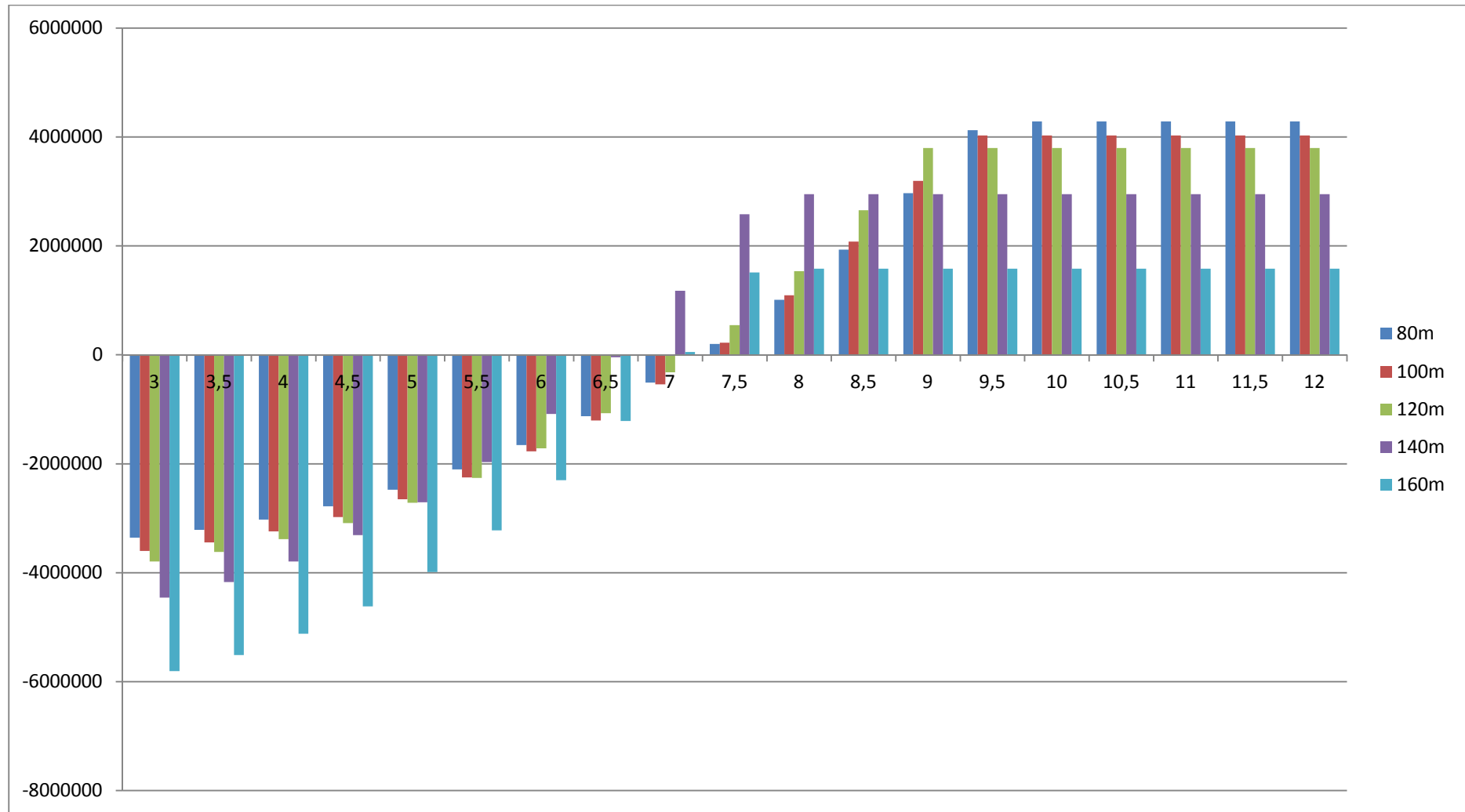
Σχήμα 4.7 : Καθαρό Κέρδος σε (€) κάθε ανεμογεννήτριας με παραβολική μορφή πύργου και ποιότητα χάλυβα S235.

4.5.3.3 Πίνακας-Διάγραμμα για γραμμική μορφή πύργου και Χάλυβα S275.

ΧΑΛΥΒΑΣ S275 - ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΟΡΦΗ					
Vref	80m	100m	120m	140m	160m
3	-3357669	-3598320	-3791689	-4454195	-5804001
3,5	-3214684	-3444783	-3617352	-4171384	-5509857
4	-3024412	-3240470	-3385361	-3795045	-5118436
4,5	-2780099	-2978126	-3087478	-3311817	-4615843
5	-2474988	-2650499	-2715468	-2708338	-3988181
5,5	-2102326	-2250335	-2261094	-1971248	-3221553
6	-1655356	-1770380	-1716119	-1087185	-2302063
6,5	-1127324	-1203380	-1072308	-42789	-1215813
7	-511474	-542081	-321424	1175303	51092
7,5	198949	220770	544769	2580450	1512549
8	1010700	1092426	1534509	2948803	1579722
8,5	1930534	2080143	2656030	2948803	1579722
9	2965207	3191173	3795801	2948803	1579722
9,5	4121473	4024545	3795801	2948803	1579722
10	4283143	4024545	3795801	2948803	1579722
10,5	4283143	4024545	3795801	2948803	1579722
11	4283143	4024545	3795801	2948803	1579722
11,5	4283143	4024545	3795801	2948803	1579722
12	4283143	4024545	3795801	2948803	1579722

Πίνακας 4.10 : Καθαρό Κέρδος σε (€) κάθε ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα αναφοράς με γραμμική μορφή πύργου και ποιότητα χάλυβα S275.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΔΟΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΗΤΡΙΩΝ



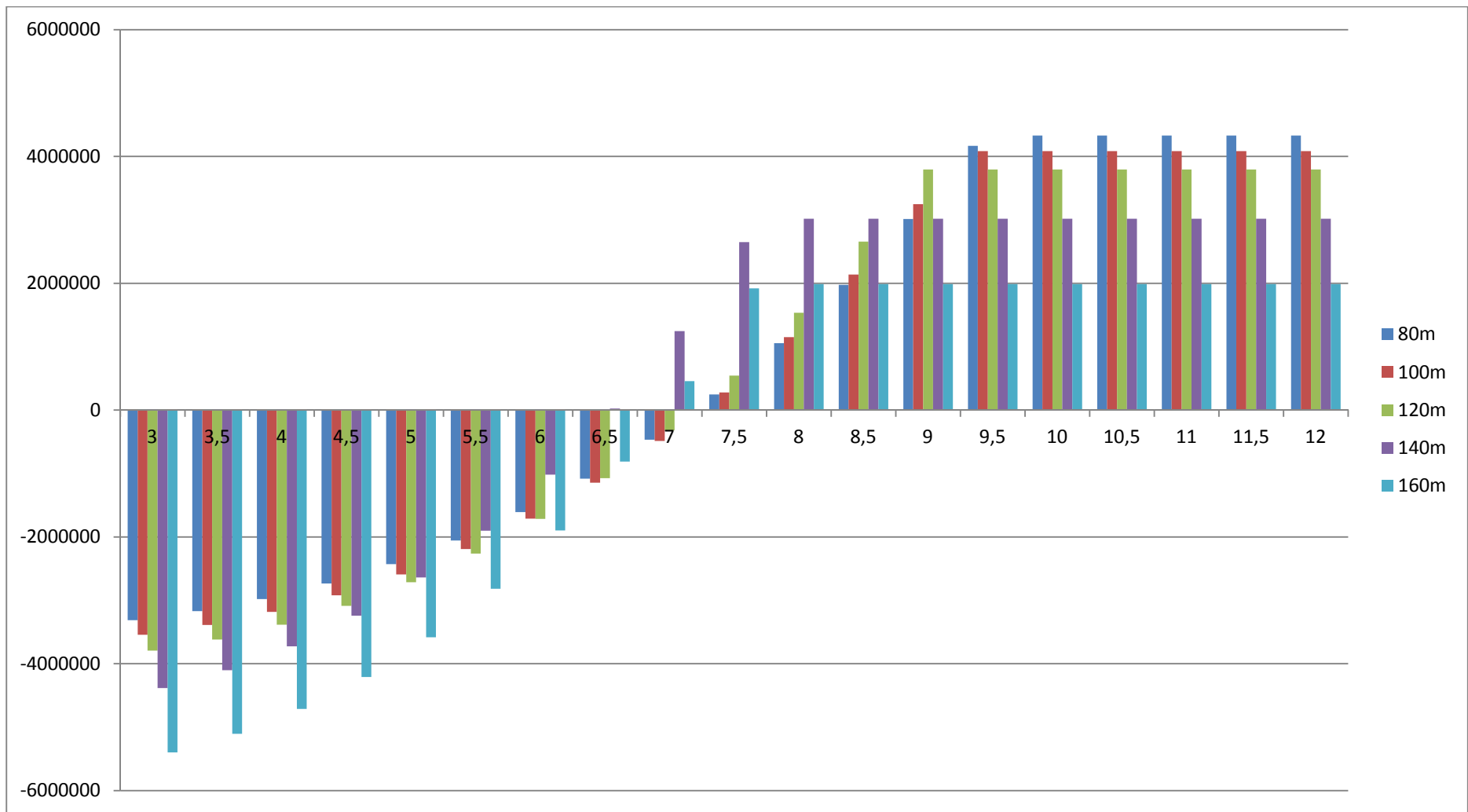
Σχήμα 4.8 : Καθαρό Κέρδος σε (€) κάθε ανεμογεννήτριας με γραμμική μορφή πύργου και ποιότητα χάλυβα S275.

4.5.3.4 Πίνακας-Διάγραμμα για παραβολική μορφή πύργου και Χάλυβα S275.

ΧΑΛΥΒΑΣ S275 - ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ					
Vref	80m	100m	120m	140m	160m
3	-3311349	-3540812	-3791655	-4384654	-5398030
3,5	-3168363	-3387274	-3617318	-4101843	-5103886
4	-2978092	-3182961	-3385327	-3725504	-4712465
4,5	-2733778	-2920617	-3087444	-3242276	-4209872
5	-2428668	-2592991	-2715434	-2638797	-3582210
5,5	-2056006	-2192826	-2261060	-1901707	-2815582
6	-1609036	-1712871	-1716085	-1017644	-1896092
6,5	-1081004	-1145871	-1072274	26752	-809842
7	-465154	-484572	-321390	1244844	457063
7,5	245269	278279	544803	2649991	1918520
8	1057020	1149935	1534543	3018344	1985693
8,5	1976854	2137652	2656064	3018344	1985693
9	3011527	3248682	3795835	3018344	1985693
9,5	4167794	4082054	3795835	3018344	1985693
10	4329464	4082054	3795835	3018344	1985693
10,5	4329464	4082054	3795835	3018344	1985693
11	4329464	4082054	3795835	3018344	1985693
11,5	4329464	4082054	3795835	3018344	1985693
12	4329464	4082054	3795835	3018344	1985693

Πίνακας 4.11 : Καθαρό Κέρδος σε (€) κάθε ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα αναφοράς με παραβολική μορφή πύργου και ποιότητα χάλυβα S275.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΔΟΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΗΤΡΙΩΝ



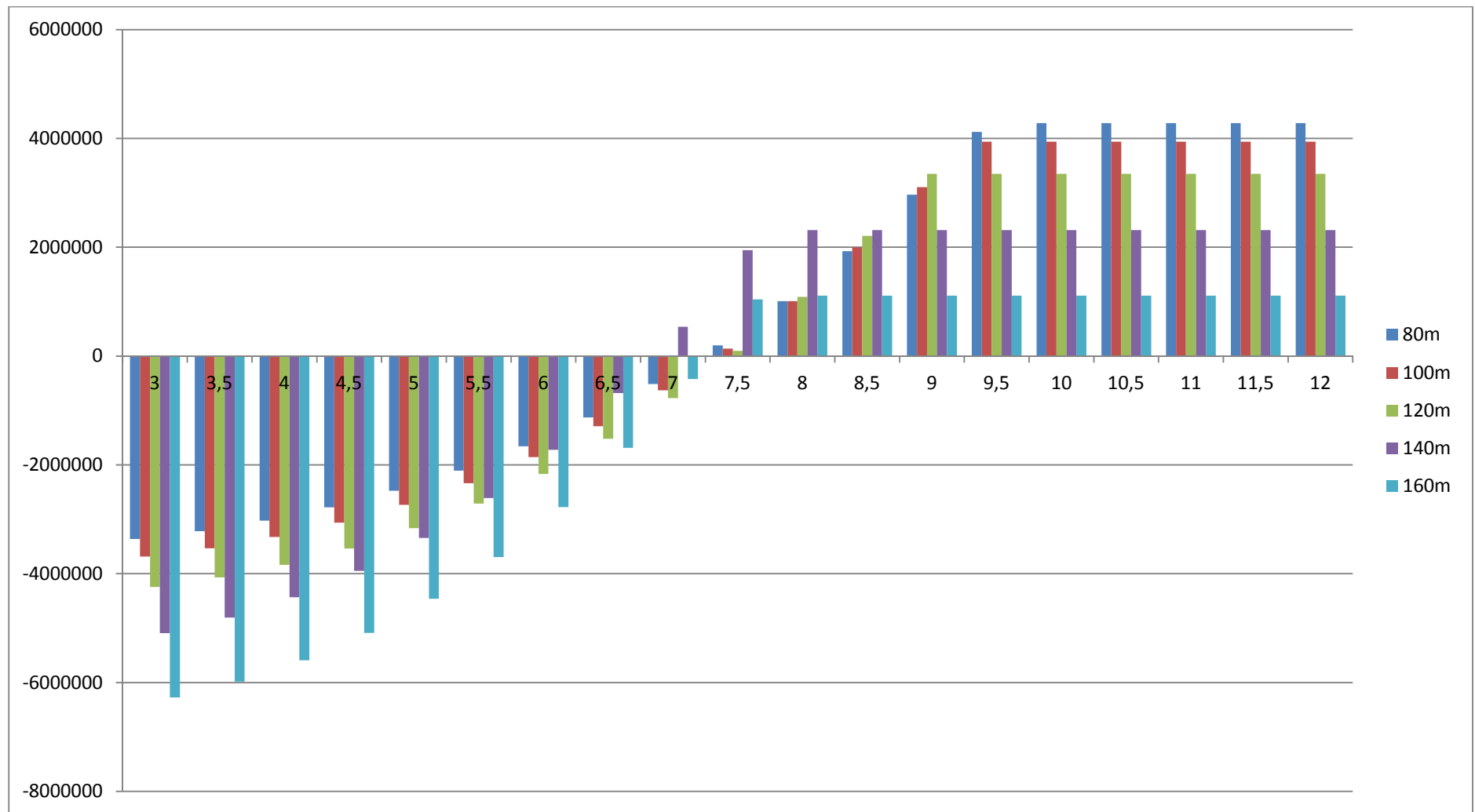
Σχήμα 4.9 : Καθαρό Κέρδος σε (€) κάθε ανεμογεννήτριας με παραβολική μορφή πύργου και ποιότητα χάλυβα S275

4.5.3.5 Πίνακας-Διάγραμμα για γραμμική μορφή πύργου και Χάλυβα S355.

ΧΑΛΥΒΑΣ S355 - ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΟΡΦΗ					
Vref	80m	100m	120m	140m	160m
3	-3359248	-3683242	-4240845	-5089600	-6275125
3,5	-3216263	-3529705	-4066508	-4806789	-5980981
4	-3025991	-3325392	-3834516	-4430450	-5589561
4,5	-2781678	-3063048	-3536633	-3947222	-5086968
5	-2476567	-2735421	-3164623	-3343743	-4459306
5,5	-2103905	-2335257	-2710249	-2606653	-3692677
6	-1656935	-1855302	-2165275	-1722590	-2773187
6,5	-1128903	-1288302	-1521464	-678193	-1686938
7	-513053	-627003	-770580	539898	-420033
7,5	197370	135848	95614	1945046	1041424
8	1009121	1007504	1085353	2313399	1108598
8,5	1928955	1995221	2206875	2313399	1108598
9	2963628	3106251	3346645	2313399	1108598
9,5	4119894	3939623	3346645	2313399	1108598
10	4281564	3939623	3346645	2313399	1108598
10,5	4281564	3939623	3346645	2313399	1108598
11	4281564	3939623	3346645	2313399	1108598
11,5	4281564	3939623	3346645	2313399	1108598
12	4281564	3939623	3346645	2313399	1108598

Πίνακας 4.12 : Καθαρό Κέρδος σε (€) κάθε ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα αναφοράς με γραμμική μορφή πύργου και ποιότητα χάλυβα S355.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΔΟΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



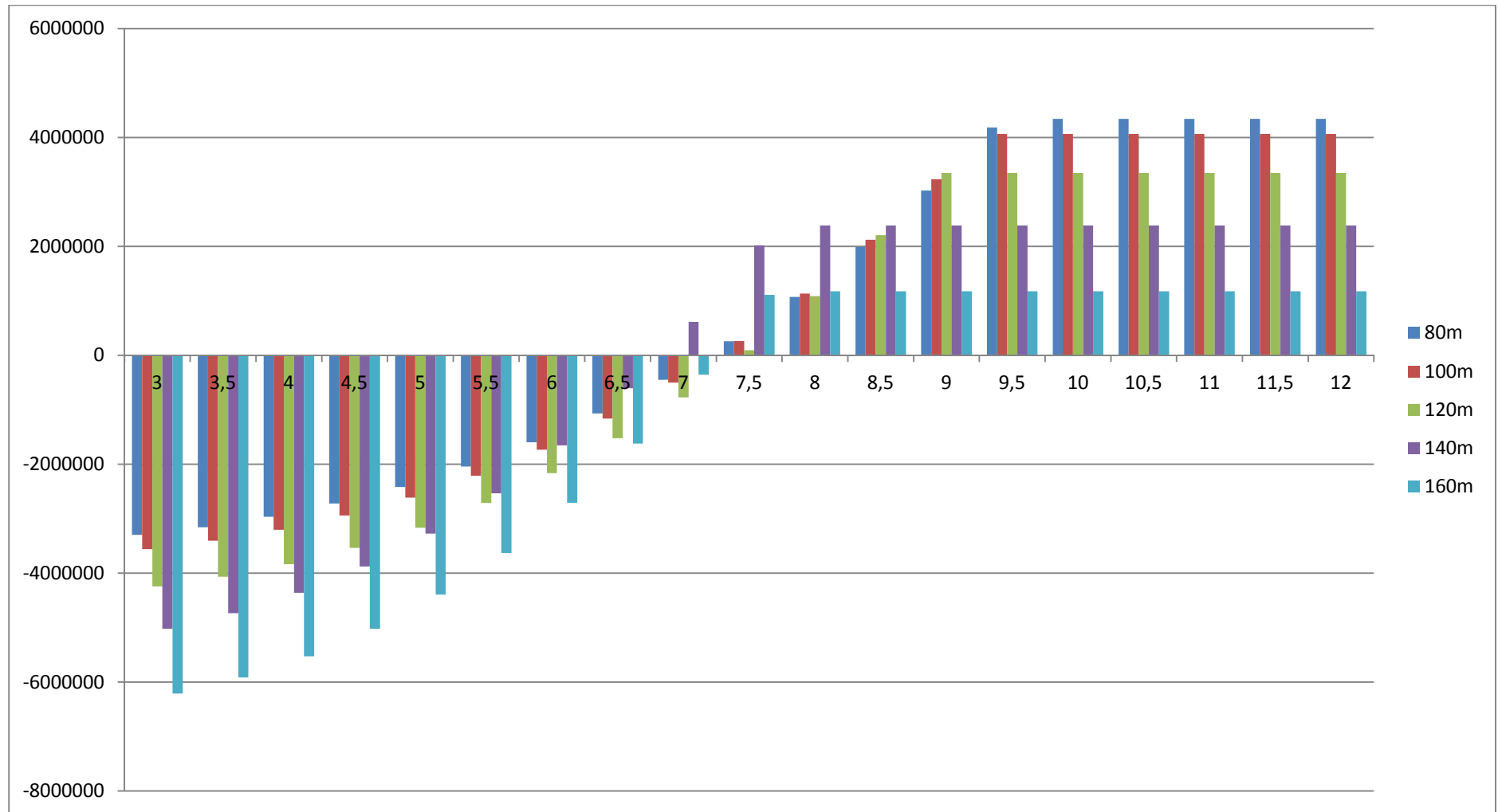
Σχήμα 4.10 : Καθαρό Κέρδος σε (€) κάθε ανεμογεννήτριας με γραμμική μορφή πύργου και ποιότητα χάλυβα S355.

4.5.3.6 Πίνακας-Διάγραμμα για παραβολική μορφή πύργου και Χάλυβα S355.

ΧΑΛΥΒΑΣ S355 - ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ					
Vref	80m	100m	120m	140m	160m
3	-3298307	-3558807	-4241208	-5017957	-6209262
3,5	-3155322	-3405270	-4066871	-4735146	-5915117
4	-2965050	-3200957	-3834879	-4358807	-5523697
4,5	-2720737	-2938613	-3536996	-3875579	-5021104
5	-2415626	-2610986	-3164986	-3272101	-4393442
5,5	-2042964	-2210822	-2710612	-2535010	-3626814
6	-1595994	-1730867	-2165638	-1650948	-2707323
6,5	-1067962	-1163867	-1521827	-606551	-1621074
7	-452112	-502568	-770943	611541	-354169
7,5	258311	260283	95251	2016688	1107288
8	1070062	1131939	1084990	2385041	1174462
8,5	1989896	2119656	2206512	2385041	1174462
9	3024569	3230686	3346282	2385041	1174462
9,5	4180835	4064058	3346282	2385041	1174462
10	4342505	4064058	3346282	2385041	1174462
10,5	4342505	4064058	3346282	2385041	1174462
11	4342505	4064058	3346282	2385041	1174462
11,5	4342505	4064058	3346282	2385041	1174462
12	4342505	4064058	3346282	2385041	1174462

Πίνακας 4.13 : Καθαρό Κέρδος σε (€) κάθε ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα αναφοράς με γραμμική μορφή πύργου και ποιότητα χάλυβα S355.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΔΟΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



Σχήμα 4.11 : Καθαρό Κέρδος σε (€) κάθε ανεμογεννήτριας με παραβολική μορφή πύργου και ποιότητα χάλυβα S355.

4.5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Όπως παρατηρούμε τα έξι διαγράμματα που αναφέρονται στο κέρδος σε βάθος είκοσι χρόνων από την λειτουργία της ανεμογεννήτριας με τους συνδυασμούς τριών ποιοτήτων χάλυβα κατασκευής και δυο μορφών του πύργου της ανεμογεννήτριας έχουν πολλά κοινά σημεία τα οποία παρατίθενται συνοπτικά παρακάτω :

- Για μέσες ετήσιες ταχύτητες αναφοράς(στα 10m) ανέμου μικρότερες ή ίσες από 6,5 m/s το συγκεκριμένο μοντέλο ανεμογεννήτριας κρίνεται ως ζημιόγνο σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις με εξαίρεση την τοποθέτηση του στον πύργο ύψους 140 μέτρων κατασκευής από χάλυβα S235,όπου παρουσιάζει οριακά κέρδη της τάξης των 350.000€ σε βάθος 20 χρόνων. Το παραπάνω ισχύει μόνο στην περίπτωση για μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου ίση με 6,5 m/s και είναι μη αποδεκτό ποσοστό κέρδους με βάση το ύψος της αρχικής επένδυσης που είναι της τάξης των 3.500.000€.Είναι σαφές ότι για αυτό το εύρος ταχυτήτων καταλληλότερη είναι μια ανεμογεννήτρια μικρότερης ισχύος, άρα και μικρότερου κόστους.
- Για μέσες ετήσιες ταχύτητες αναφοράς του ανέμου ανάμεσα σε 7 m/s και 8,5 m/s η πλέον κερδοφόρα τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας είναι στα 140 μέτρα για όλους του συνδυασμούς. Παρακάτω θα εξεταστούν αναλυτικότερα οι συνδυασμοί για τη μέση ταχύτητα (8m/s) αυτού του διαστήματος.
- Για μέση ετήσια ταχύτητα αναφοράς του ανέμου στα 9m/s η τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας στον πύργο ύψους 120 μέτρων παρουσιάζει το μέγιστο κέρδος στα 20 χρόνια ζωής του συστήματος(συμβατικά). Παρακάτω θα εξεταστούν αναλυτικότερα οι συνδυασμοί αυτής της περίπτωσης.
- Για μέση ετήσια ταχύτητα αναφοράς του ανέμου από 9,5 m/s και πάνω, πλέον κερδοφόρα αποδεικνύεται να είναι η τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας στο χαμηλότερο από τα εξεταζόμενα ύψη, αυτό των 80 μέτρων. Επιπλέον για ταχύτητες ανέμου από 10 m/s και πάνω η ανεμογεννήτρια αποδίδει το μέγιστο των δυνατοτήτων της αποφέροντας και το μεγαλύτερο κέρδος σε βάθος 20 χρόνων. Για την τελευταία περίπτωση θα εξεταστούν αναλυτικά όλες οι περιπτώσεις συνδυασμών ποιότητας χάλυβα και μορφής του πύργου παρακάτω.

4.6 Χαρακτηριστικές περιπτώσεις των αποτελεσμάτων.

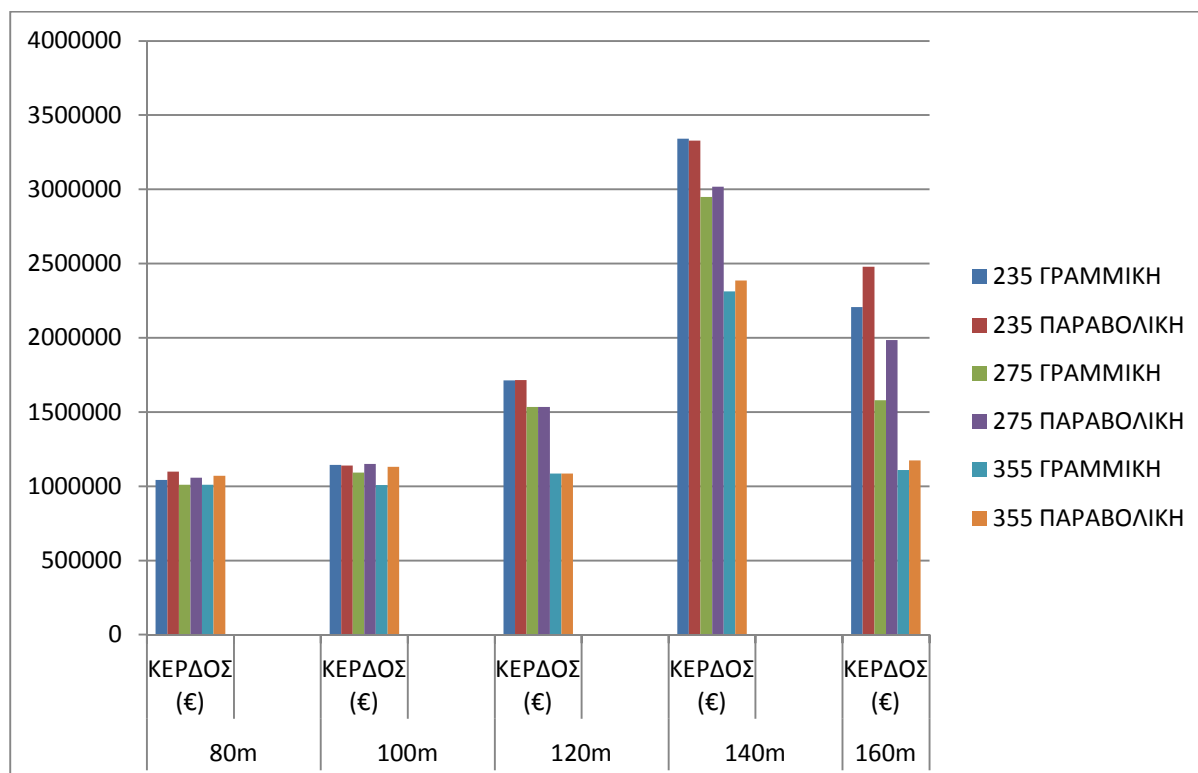
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο ξεχωρίζουν τρεις ειδικές περιπτώσεις ως αποτέλεσμα της παραπάνω μεθοδολογίας. Συγκεκριμένα θα εξεταστούν οι περιπτώσεις για μέσες ετήσιες ταχύτητες αναφοράς του ανέμου με τιμές 8, 9, 10 m/s που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς αντιστοιχούν σε διαφορετικά βέλτιστα ύψη του πύργου της ανεμογεννήτριας.

4.6.1 Μέση ετήσια ταχύτητα αναφοράς ανέμου 8 m/s.

Για μέση ετήσια ταχύτητα αναφοράς(στα 10m) του ανέμου ίση με 8 m/s είδαμε ότι καταλληλότερο ύψος του πύργου για όλες τις περιπτώσεις είναι στα 140m. Παρακάτω δίνεται σε πίνακα και διάγραμμα το καθαρό κέρδος στα 20 χρόνια που παράγεται από την μέση ετήσια ταχύτητα αναφοράς του ανέμου 8 m/s.

		Vref = 8 m/s				
		80m	100m	120m	140m	160m
		ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΚΕΡΔΟΣ (€)
235	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	1043101	1144831	1713496	3341560	2207977,13
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	1099137,80	1140505,42	1715365,35	3328554,01	2479211,60
275	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	1010699,54	1092425,36	1534508,60	2948303,35	1579722,23
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	1057019,92	1149935,33	1534542,60	3018344,33	1985693,08
355	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	1009120,55	1007504,46	1085353,09	2313398,73	1108597,73
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	1070061,53	1131933,38	1084990,18	2385041,09	1174461,55

Πίνακας 4.14 : Καθαρό Κέρδος σε (€) για κάθε ύψος πύργου από μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 8 m/s.



Σχήμα 4.12 : Καθαρό Κέρδος σε (€) για κάθε ύψος πύργου από μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 8 m/s.

Στο παραπάνω πίνακα και στο αντίστοιχο διάγραμμα φαίνεται καθαρά ότι για την συγκεκριμένη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου (8 m/s), το μεγαλύτερο καθαρό κέρδος προκύπτει για τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας στα 140 μέτρα. Η βέλτιστη ποιότητα του χάλυβα κατασκευής του πύργου είναι S235 ενώ η διαφορά μεταξύ γραμμικής και παραβολικής μορφής είναι αμελητέα(20.000 €). Σε αυτή την περίπτωση το καθαρό κέρδος είναι 3.335.000€ περίπου και ισοδυναμεί με το 74% του αρχικού συνολικού κόστους επένδυσης (4.550.000€).

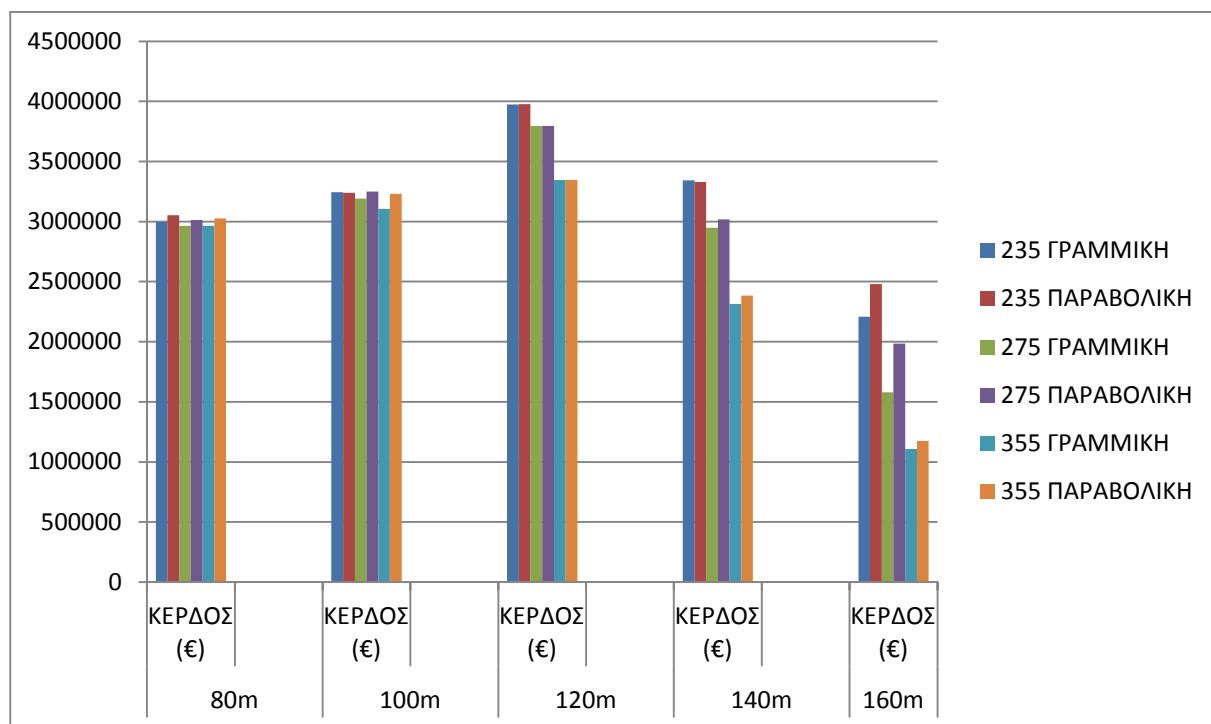
Η διαφορά, για το ίδιο ύψος των 140m, της βέλτιστης ποιότητας χάλυβα S235 με την ποιότητα S275 είναι 350.000€ ενώ η ποιότητα S355 στα 140m κρίνεται συγκριτικά λιγότερο συμφέρουσα καθώς έχει μικρότερο καθαρό κέρδος από τον πύργο ύψους 160m και ποιότητας S235(παραβολικής μορφής). Βεβαίως ο τελευταίος μπορεί να έχει μεγαλύτερο απόλυτο καθαρό κέρδος από τον πύργο S355 στα 140m, αλλά ως ποσοστό του συνολικού κόστους επένδυσης είναι πολύ χαμηλό (46%).

4.6.2 Μέση ετήσια ταχύτητα αναφοράς ανέμου 9 m/s.

Για μέση ετήσια ταχύτητα αναφοράς(στα 10m) του ανέμου ίση με 8 m/s είδαμε ότι καταλληλότερο ύψος του πύργου για όλες τις περιπτώσεις είναι στα 140m. Παρακάτω δίνεται σε πίνακα και διάγραμμα το καθαρό κέρδος στα 20 χρόνια που παράγεται από την μέση ετήσια ταχύτητα αναφοράς του ανέμου 8 m/s.

		Vref = 9 m/s				
		80m	100m	120m	140m	160m
		ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΚΕΡΔΟΣ (€)
235	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	2597609	3243577	3574788	3341560	2207977,13
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	3053645,00	3239252,94	3976657,61	3328554,01	2479211,60
275	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	2965206,74	3191172,88	3795800,86	2948803,35	1579722,23
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	3011527,12	3248681,85	3795834,86	3018344,33	1935693,08
355	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	2963627,75	3106250,98	3346645,35	2313398,73	1108597,73
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	3024568,73	3230685,90	3346282,44	2385041,09	1174461,55

Πίνακας 4.15 : Καθαρό Κέρδος σε (€) για κάθε ύψος πύργου από μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 9 m/s.



Σχήμα 4.13 : Καθαρό Κέρδος σε (€) για κάθε ύψος πύργου από μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 9 m/s.

Παρατηρούμε ότι για την συγκεκριμένη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου (9 m/s), το μεγαλύτερο καθαρό κέρδος προκύπτει για τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας στα 120 μέτρα. Η βέλτιστη ποιότητα του χάλυβα κατασκευής του πύργου είναι S235 ενώ η διαφορά μεταξύ γραμμικής και παραβολικής μορφής είναι απολύτως αμελητέα. Σε αυτή την περίπτωση το καθαρό κέρδος είναι αγγίζει τις 4.000.000€ περίπου και ξεπερνάει το 100% του αρχικού συνολικού κόστους επένδυσης (3.910.000€).

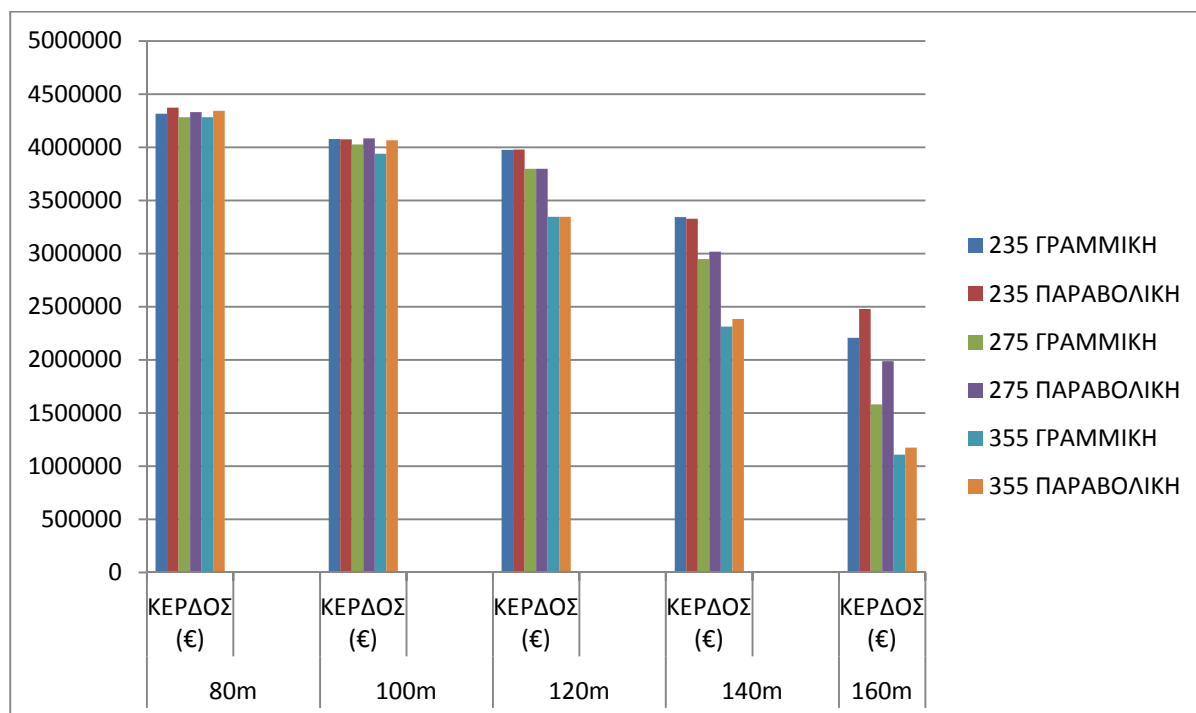
Η διαφορά, για το ίδιο ύψος των 120m, της βέλτιστης ποιότητας χάλυβα S235 με την ποιότητα S275 είναι περίπου 180.000€ ενώ η ποιότητα S355 στα 120m αποφέρει το ίδιο κέρδος με τον πύργο ύψους 140 μέτρων με S235 και το ίδιο με την παραβολική μορφή του πύργου 100m, και των τριών ποιοτήτων χάλυβα, που είναι γύρω στα 3.300.000€.

4.6.3 Μέση ετήσια ταχύτητα αναφοράς ανέμου 10 m/s.

Για μέση ετήσια ταχύτητα αναφοράς (στα 10m) του ανέμου ίση με 10 m/s είδαμε ότι καταλληλότερο ύψος του πύργου για όλες τις περιπτώσεις είναι στα 80m. Η περίπτωση αυτή παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον καθώς από αυτή την τιμή του ανέμου κ πάνω αναμένεται το μεγαλύτερο καθαρό κέρδος ως απόλυτο νούμερο κ ως ποσοστό του αρχικού κόστους. Παρακάτω δίνεται σε πίνακα και διάγραμμα το καθαρό κέρδος στα 20 χρόνια που παράγεται από την μέση ετήσια ταχύτητα αναφοράς του ανέμου 8 m/s.

		Vref = 10 m/s				
		80m	100m	120m	140m	160m
		ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΚΕΡΔΟΣ (€)
235	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	4315545	4076950	3974788	3341560	2207977,13
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	4371581,64	4072625,22	3976657,61	3328554,01	2479211,60
275	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	4283143,38	4024545,16	3795800,86	2948803,35	1579722,23
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	4329463,76	4082054,13	3795834,86	3018344,33	1985693,08
355	ΓΡΑΜΜΙΚΗ	4281564,39	3939623,26	3346645,35	2313398,73	1108597,73
	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗ	4342505,37	4064058,18	3346282,44	2385041,09	1174461,55

Πίνακας 4.16 : Καθαρό Κέρδος σε (€) για κάθε ύψος πύργου από μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 10 m/s.



Σχήμα 4.14 : Καθαρό Κέρδος σε (€) για κάθε ύψος πύργου από μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 10 m/s.

Παρατηρούμε ότι για την συγκεκριμένη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου (10 m/s), το μεγαλύτερο καθαρό κέρδος προκύπτει για τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας στα 80 μέτρα. Οι διαφορές μεταξύ των ποιοτήτων χάλυβα και μορφής του πύργου είναι μικρές. Η βέλτιστη ποιότητα του χάλυβα κατασκευής του πύργου είναι S235 με παραβολική μορφή και αποδίδει καθαρό κέρδος 4.370.000€ το οποίο αποτελεί ως ποσοστό το 125% του αρχικού συνολικού κόστους κατασκευής (3.510.000€). Στη δεύτερη θέση έρχονται οι συνδυασμοί S235 με γραμμική μορφή, S275 και S355 με παραβολική μορφή με περίπου 40.000€ καθαρό κέρδος λιγότερα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το παραπάνω κέρδος (4.370.000€) είναι το μέγιστο δυνατό καθαρό κέρδος που μπορεί να αποφέρει αυτό το μοντέλο ανεμογεννήτριας για μέσες ετήσιες ταχύτητες αναφοράς ανέμου 10 m/s και πάνω. Αυτό σημαίνει ότι όσο παραπάνω και να αυξηθεί η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου το καθαρό κέρδος θα είναι το ίδιο και σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να εξετασθεί με ανεμογεννήτρια με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ ή με ίδιας ονομαστικής ισχύος αλλά με μεγαλύτερη διάμετρο ρότορα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 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. Για την παραβολική μορφή του πύργου από χάλυβα S235 βέλτιστο σχεδιασμό έχουμε στα ύψη των 80, 120, 160 μέτρων, ενώ στα ενδιάμεσα ύψη των 100, 140 μέτρων οριακά πιο οικονομική είναι η γραμμική μορφή του πύργου.

Όσον αφορά την ανάλυση των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με το κέρδος στον κύκλο ζωής της ανεμογεννήτριας Vestas V90-3MW και το βέλτιστο ύψος τοποθέτησης της αυτή έδειξε τα εξής :

- Για διαθέσιμο αιολικό δυναμικό κάτω από 6,5 m/s → έχουμε ζημία για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.
- Για διαθέσιμο αιολικό δυναμικό από 7 έως 8,5 m/s → βέλτιστη τοποθέτηση σε πύργο 140 μέτρων γραμμικής μορφής από χάλυβα S235.
- Για διαθέσιμο αιολικό δυναμικό 9 m/s → βέλτιστη τοποθέτηση σε πύργο 120 μέτρων παραβολικής μορφής από χάλυβα S235.
- Για διαθέσιμο αιολικό δυναμικό πάνω από 10 m/s → βέλτιστη τοποθέτηση σε πύργο 80 μέτρων παραβολικής μορφής από χάλυβα S235.

5.2 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 πεπ.στοιχείων που να προσομοιάζει τις συνδέσεις και το άνοιγμα της πόρτας στην 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 6 : 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] P.E. Uys, J. Farkasb, K. J´armai, F. van Tonder, (2006) - Optimization of a steel tower for a wind turbine structure.
- [4] Rajesh katyal, S Gomathinayagam, Saleem Akhtar, and Siraj Ahmed, (2012) - Optimization of Wind Turbine Tubular Towers.
- [5] Karam Y. Maalawi, (2007) - A model for yawing dynamic optimization of a wind turbine structure.
- [6]_Serdar Yıldırım, İbrahim Özkol (2010) - Wind turbine tower optimization under various requirements using genetic algorithm.
- [7] Marcelo A Silva, Reyolando MLRF Brasil, Jasbir S Arora, - Formulations for the optimal design of RC wind turbine towers
- [8] Eurocode 3.1.06. Strength and Stability of Shell Structures (2004)
- [9] Νίκος Λαγαρός (2000) - Βελτιστοποίηση κατασκευών με τη χρήση εξελικτικών αλγόριθμων και νευρωνικών δικτύων.
- [10] Παχύ Παρασκευή (2012) - Βελτιστοποίηση απόδοσης πάρκου ανεμογεννητριών με εφαρμογή μεταευσιστικών μεθόδων.
- [11] Ευάγγελος Ε. Πλεύρης (2001) - Βέλτιστος σχεδιασμός κατασκευών με πολλαπλά κριτήρια με χρήση στρατηγικών εξέλιξης
- [12] Ευαγγελία Ταμπακάκη (2012) - Βέλτιστος Σχεδιασμός Ειδικών Κατασκευών.

