



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Στοχαστική Προσομοίωση και Υπολογισμός Εδράνων Ανεμογεννήτριας για Βελτιστοποίηση Σεναρίου Αντικατάστασης



Διπλωματική Εργασία

Αντρέας Ορφανού

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Βασίλειος Σπιτάς

Χανιά 2010

Στους γονείς μου

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη μελέτη εκπονήθηκε υπό την καθοδήγηση του καθηγητή μου Δρ. Βασίλειου Σπιτά, ο οποίος κάθε στιγμή ήταν πρόθυμος να με βοηθήσει στις διάφορες δυσκολίες που είχα να αντιμετωπίσω. Η συμβολή του στην αποπεράτωση της παρούσας εργασίας ήταν καθοριστική και τον ευχαριστώ ιδιαιτέρως. Τον ευχαριστώ για τις ώρες που αφιέρωσε για να μου μεταδώσει μέρος των γνώσεών του και να με βοηθήσει να κατανοήσω καλύτερα πώς σκέφτεται ένας μηχανικός.

Ευχαριστώ τους καθηγητές Δρ. Αριστομένη Αντωνιάδη και Δρ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη, οι οποίοι με τίμησαν αποδεχόμενοι να συμμετάσχουν ως μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου την αδελφή μου και το θείο μου Ιωσήφ Ορφανού οι οποίοι ήταν πάντα δίπλα μου σε όλα τα στάδια του κύκλου των προπτυχιακών μου σπουδών. Τους ευχαριστώ για την ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν απλόχερα έστω και από μακριά αφού ήταν αδύνατο να βρίσκονται κοντά μου.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου με τους οποίους συνεργάστηκα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και με τους οποίους πέρασα αξέχαστες και όμορφες στιγμές.

Αντρέας Ορφανού

Χανιά 2010

Περιεχόμενα

Περίληψη	9
Κεφάλαιο 1.....	11
1.1 Παρουσίαση της Αιολικής Ενέργειας.....	11
1.1.1 Αιολική Ενέργεια	11
1.1.2 Εξέλιξη της Αιολικής Ενέργειας στην Παγκόσμια Αγορά	11
1.1.3 Όρια Χρήσης Αιολικής Ενέργειας.....	13
1.1.4 Τύποι Ανεμογεννητριών και Καινοτόμες Εφαρμογές	14
1.2 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα	16
1.2.1 Σύνομη Περιγραφή	16
1.2.2 Αστοχίες Λειτουργίας.....	18
1.2.3 Προληπτικός Έλεγχος και Προληπτική Συντήρηση Ανεμογεννητριών.....	20
Κεφάλαιο 2.....	23
2.1 Άνεμος	23
2.1.1 Ένταση και Ριπές του Ανέμου	23
2.1.1 Κατανομή Weibull ταχυτήτων ανέμου.....	24
2.1.2 Η Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος	25
2.2 Ενέργεια από τον άνεμο	26
2.2.1 Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας	27
2.2.2 Ετήσιος υπολογισμός ενέργειας	28
2.3 Θεωρία του δίσκου ενέργειας	29
2.3.1 Υπολογισμός ώσης για ονομαστική ταχύτητα ανέμου	32
Κεφάλαιο 3.....	35
3.1 Μελέτη και Σχεδιασμός Κύριας Ατράκτου	35
3.1.1 Γενική εποπτεία	35
3.1.2 Εξωτερικά φορτία	35
3.1.3 Ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος	35
3.1.4 Επιλογή εδράνων κύλισης	36
3.1.5 Υπολογισμός Βάρους Κύριας Ατράκτου	37
3.1.6 Υπολογισμός φορτίσεως των εδράνων κύλισης	37
3.1.7 Διαγράμματα εσωτερικών εντατικών μεγεθών	38
3.1.8 Έλεγχος Αντοχής.....	40
3.1.8.1 Ισοδύναμη Καταπόνηση.....	40
3.1.8.2 Υπολογισμός Κόπωση.....	41
3.1.8.3 Συντελεστής Ασφαλείας.....	42
3.1.8.4 Διάρκεια ζωής	42
3.1.9 Κριτήριο Miner	43
3.2 Σχεδίαση Ατράκτου	44
Κεφάλαιο 4.....	47
4.1 Στοχαστική Προσομοίωση	47
4.1.1 Περιγραφή του Αλγορίθμου Προσομοίωσης.....	47
4.1.2 Γεννήτρια τυχαίων αριθμών	48
4.1.3 Παρουσίαση αλγορίθμου	48
4.1.4 Ταξινόμηση των ταχυτήτων	50
4.1.5 Υπολογισμός w.....	52

4.1.6	Υπολογισμός F_a , P , L_h	53
4.1.7	Ονομαστική διάρκεια ζωής εδράνου	54
Κεφάλαιο 5.....		55
5.1.1	Αιολικό δυναμικό της Κύπρου	55
5.1.2	Μετρήσεις Ταχύτητας και Διεύθυνσης Ανέμου	55
5.1.3	Αποτελέσματα Αλγορίθμου	58
Κεφάλαιο 6.....		63
6.1	Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας Ανεμογεννήτριας	63
6.1.1	Διαδικασία αντικατάστασης εδράνου	63
6.1.2	Συνιστώσες του κόστους	64
6.2	Εναλλακτικές αντικατάστασης	65
6.2.1	Σύγκριση εναλλακτικών αντικατάστασης	65
6.3	Βελτιστοποίηση του Σεναρίου Αντικατάστασης	69
6.3.1	Εναλλακτικές Στρατηγικές Αντικατάστασης	69
Συμπεράσματα		73
Παράρτημα Α.....		75
Παράρτημα Β.....		79
Παράρτημα Γ		85
Παράρτημα Δ		87
Βιβλιογραφία		93

Περίληψη

Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα εξελίχθηκε και συνεχίζει να εξελίσσεται με γοργούς ρυθμούς. Παρά τη σύγχρονη τεχνολογία που διαθέτουν, οι ανεμογεννήτριες όπως όλα τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα μπορούν να εκδηλώσουν σοβαρές βλάβες με την πάροδο των ετών λειτουργίας τους. Δεδομένου ότι είναι αδύνατον να απαλλαγεί κανείς από την εμφάνιση βλάβης σε κάποιο εξάρτημα προσπαθεί να εκτιμήσει όσο το δυνατό καλύτερα τη διάρκεια ζωής του, ώστε με την έγκαιρη αντικατάσταση του να έχει τη μικρότερη δυνατή οικονομική επιβάρυνση (ζημία).

Ένα από τα συστήματα που απαρτίζουν μια ανεμογεννήτρια και το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το σύστημα μετάδοσης κίνησης το οποίο δεν υφίσταται συχνά βλάβες αλλά, στην περίπτωση που υποστεί, χρειάζεται πολύ μεγάλο χρόνο αποκατάστασης. Ένα από τα βασικά εξαρτήματα του συστήματος μετάδοσης κίνησης το οποίο καταπονείται σημαντικά είναι το μπροστινό έδρανο κύλισης.

Η συγκεκριμένη μελέτη έχει στόχο να εκτιμήσει τη διάρκεια ζωής του μπροστινού εδράνου κύλισης και να προσδιορίσει το βέλτιστο σενάριο αντικατάστασής του, με βάση τις ανεμολογικές συνθήκες που επικρατούν στην υπό μελέτη περιοχή.

Η εργασία χωρίζεται σε τέσσερα βασικά μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται μια αναφορά στην αεροδυναμική σχεδίαση της ανεμογεννήτριας. Στο δεύτερο μέρος γίνεται υπολογισμός και σχεδιασμός της κύριας ατράκτου μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα καθώς και η εκλογή των εδράνων κύλισης στα οποία θα εδράζεται. Στο τρίτο μέρος παρουσιάζεται μια στοχαστική προσομοίωση με την οποία εκτιμάται η διάρκεια ζωής του εδράνου και στο τέταρτο μέρος γίνεται εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου για την περιοχή Καντού, μια περιοχή νοτιοδυτικά της Κύπρου στην οποία προγραμματίζεται η κατασκευή αιολικού πάρκου. Στο τέταρτο μέρος πραγματοποιείται και μια οικονομοτεχνική ανάλυση από την οποία προκύπτουν τα οικονομικά οφέλη από την εκτίμηση της διάρκειας ζωής του μπροστινού εδράνου κύλισης.

Κεφάλαιο 1

1.1 Παρουσίαση της Αιολικής Ενέργειας

1.1.1 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια, είναι μια από τις παλαιότερες φυσικές μορφές ενέργειας η οποία αξιοποιήθηκε από πολύ νωρίς για την παραγωγή μηχανικού έργου και έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας. Η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική επετεύχθη για πρώτη φορά το 1891 στη Δανία, όπου τέθηκε σε λειτουργία μια τετραπτέρυγη ανεμογεννήτρια (Α/Γ) ισχύος 18KW υπό την επίβλεψη του καθηγητή Poul LaCour. Είναι μια θυγατρική μορφή της ηλιακής ενέργειας, αφού ένα μικρό ποσοστό της που προσπίπτει στη γη σε συνδυασμό με την περιστροφή της γύρω από τον άξονα της (δύναμη Coriolis) μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των αέριων μαζών. Πρόκειται για ενέργεια υψηλού δυναμικού που προσφέρεται για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια ή απευθείας σε χρήσιμη μηχανική (π.χ. άντληση νερού).

Η μέση ισχύς του ανέμου σε ολόκληρο τον πλανήτη εκτιμάται σε $3,6 \times 10^8$ MW, ενώ σύμφωνα με εκτιμήσεις του Παγκόσμιου Οργανισμού Μετεωρολογίας, ποσοστό περίπου 5% της ενέργειας αυτής, που ανέρχεται σε 175×10^{12} KWh, είναι διαθέσιμο για αξιοποίηση σε διάφορα μέρη του κόσμου [2].

Από τα προαναφερθέντα γίνεται φανερό ότι ο άνεμος είναι μια αστείρευτη πηγή ενέργειας, με αξιοσημείωτο δυναμικό και με δωρεάν πρώτη ύλη, που δίκαια από μερικούς θεωρείται ως μια από τις πιο κατάλληλες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή ηλεκτρισμού και για άλλες χρήσεις.

1.1.2 Εξέλιξη της Αιολικής Ενέργειας στην Παγκόσμια Αγορά

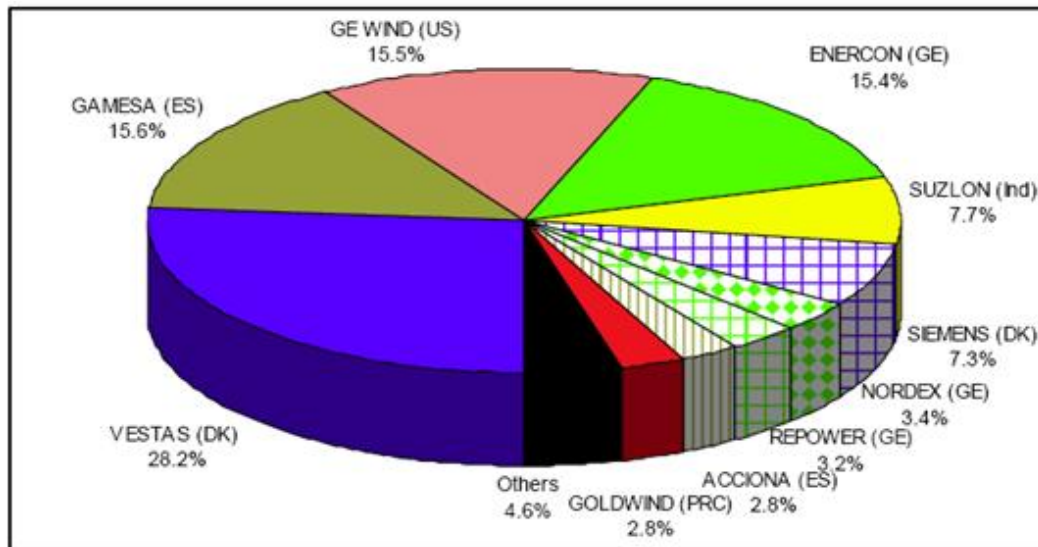
Ο σκληρός ανταγωνισμός μεταξύ των εταιριών κατασκευής Α/Γ, έχει οδηγήσει σε αισθητή μείωση τους με αποτέλεσμα να επικρατήσουν οι ισχυρότερες. Η ξαφνική ενεργοποίηση της αγοράς των Η.Π.Α. στην περιοχή της αιολικής ενέργειας, το χρονικό διάστημα 1981-85, δημιούργησε ένα πλήθος εγχώριων κατασκευαστών, κάθε μεγέθους. Οι εταιρείες αυτές κατά κανόνα δημιουργήθηκαν χωρίς ιδιαίτερη προεργασία με αποτέλεσμα, οι περισσότερες από αυτές να οδηγηθούν σε πτώχευση την περίοδο 1984-87 όταν η συγκεκριμένη αγορά εμφάνισε αισθητή συρρίκνωση. Σημαντική είναι και η μείωση των ευρωπαϊκών εταιριών του τομέα. Συγκεκριμένα από 200 περίπου εταιρείες που αναφέρονταν στα μέσα της δεκαετίας του 80', δέκα χρόνια αργότερα παρέμειναν μόλις 30. Έτσι τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική πολλές εταιρείες έκλεισαν, άλλες συγχωνεύτηκαν όπως η Micon με την Nordtank 1997 από τις οποίες προέκυψε η NEG-Micon και άλλες εξαγοράστηκαν. Μια από τις πιο σημαντικές εξαγορές έγινε τη δεκαετία του 90' όπου η εταιρεία Enron-Zond, η κυριότερη κατασκευάστρια εταιρεία στις Η.Π.Α απορροφάται από την GE Wind Energy (2002-2003) λόγω σοβαρών οικονομικών προβλημάτων της μητρικής Enron.[2]

Στην ευρωπαϊκή αγορά οι μεγάλοι Δανικής προέλευσης κατασκευαστές, όπως η Vestas, η Nordex, η Bonus κ.α., δέχονται ισχυρή πίεση από Γερμανούς και Ισπανούς κατασκευαστές, όπως οι εταιρείες Energon και Gamesa, οι οποίοι με το πλεονέκτημα της έντονης δραστηριότητας της Γερμανικής και Ισπανικής αιολικής αγοράς διεκδικούν με επιμονή την ηγεμονία της διεθνούς αγοράς. Οι 10 σημαντικότεροι παγκόσμιοι εν ενεργεία κατασκευαστές

το 2007 φαίνονται στο *σχήμα 1.1*, με μεγαλύτερο ποσοστό της παγκοσμίας αγοράς να βρίσκεται στα χέρια της Δανέζικης εταιρείας Vestas (28.2%).

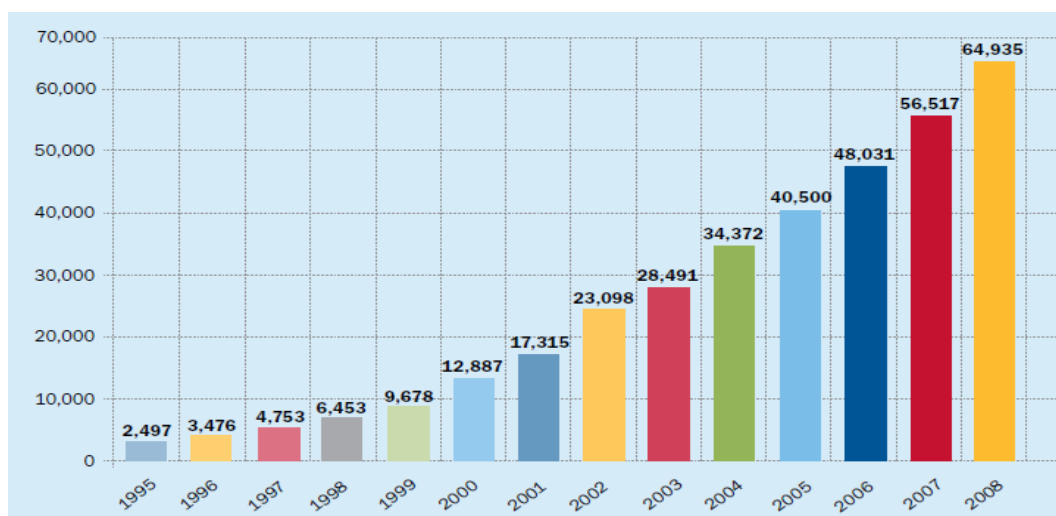
Το θετικό του σκληρού αυτού ανταγωνισμού είναι η συνεχής μείωση του κόστους των Α/Γ, η βελτίωση της απόδοσής τους και η αύξηση της αξιοπιστίας τους. Το σημερινό κόστος διάθεσης μιας Α/Γ είναι περίπου 750\$/KW.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση πρωτοστατεί στην ανάπτυξη νέων Α/Γ και το αποδεικνύει έμπρακτα. Την 1/3/2006 άρχισε το ερευνητικό πρόγραμμα Up Wind διάρκειας 60 μηνών που στοχεύει να δημιουργήσει τις μελλοντικές γενιές Α/Γ ονομαστικής ισχύος 8-10 MW. Οι μηχανές αυτές θα συμβάλουν σε ένα ενεργειακό μέλλον με λιγότερη εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.[4]



Σχήμα 1.1 Ποσοστιαία κατανομή της εγκατεστημένης ισχύος ανά κατασκευαστή Α/Γ [31]

Σε παγκόσμιο επίπεδο το 2008 εγκαταστάθηκαν περισσότερα από 27.000 MW κυρίως στην Β. Αμερική, στην Ευρώπη και στην Ασία. Η παγκόσμια αύξηση ήταν 27 GW, ανεβάζοντας την παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ σε 120.8 GW. Η παγκόσμια αγορά το 2008 ανήλθε σε 36.5 δις ευρώ ή 47.5 δις δολάρια. Στο τέλος του 2008 το σύνολο των αιολικών εγκαταστάσεων στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) ανήρθε σε 64.935 MW, αντιστοιχεί σε αύξηση 15% από το 2007 και ισοδυναμεί με την καθημερινή εγκατάσταση 20 νέων Α/Γ.



Σχήμα 1.2 Διαχρονική εξέλιξη συνολικής εγκατεστημένης ισχύος [31]

Ο ρυθμός αύξησης της αιολικής ενέργειας αναμένεται να είναι 7% ετησίως για την περίοδο 2011-2015. Το 2015 εκτιμάται ότι θα είναι εγκατεστημένα συνολικά 300.000 MW που θα καλύπτουν το 2,93% των ηλεκτρικών αναγκών της ανθρωπότητας. [29]

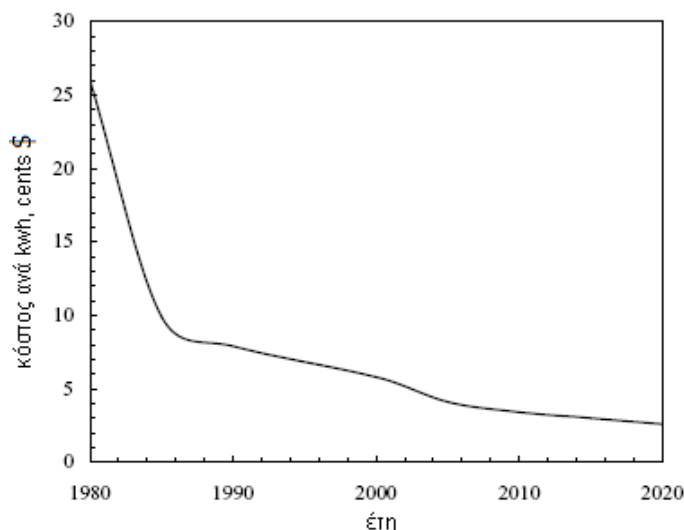
1.1.3 Όρια Χρήσης Αιολικής Ενέργειας

Σύμφωνα με στοιχεία μελέτης της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Περιβάλλοντος, η αιολική ενέργεια θα μπορούσε να τροφοδοτήσει την Ευρώπη σε μεγάλο βαθμό, ενώ το κλειδί βρίσκεται στη χερσαία και παράκτια δυναμική της αιολικής ενέργειας. Η έκθεση δίνει έμφαση στη δυνατότητα της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας το 2020 σε τριπλάσιο βαθμό σε σχέση με τις απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια στην Ευρώπη. Η δυναμική αυτή ενδέχεται να τριπλασιαστεί μέχρι το 2030. Η εν λόγω έκθεση επιβεβαιώνει ότι στόχος της European Wind Energy Association (EWEA) για 230 GW για το 2020 είναι επιτεύξιμος. Έτσι στην ΕΕ θα παράγονται περίπου 600 TWh το χρόνο που ισοδυναμεί με την ενεργειακή ζήτηση 135 εκατομμυρίων νοικοκυριών (60% των νοικοκυριών της ΕΕ), περίπου 14% με 18% της απαίτησης της ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕ (ανάλογα με τη συνολική ζήτηση το 2020). [29]

Η συνεχής αύξηση της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος της αιολικής ενέργειας σε Ευρώπη, Ασία και Αμερική καθώς επίσης και το έντονο ενδιαφέρον από επενδυτές διαφόρων χωρών του κόσμου για αυτή τη μορφή ενέργειας ωθεί τις κατασκευάστριες εταιρείες Α/Γ σε μια συνεχή αύξηση της ονομαστικής τους ισχύος και μείωση του κόστους κατασκευής τους.

Όπως φαίνεται στο *σχήμα 1.3*, το κόστος ανά παραγόμενη κιλοβατώρα από το 1980 – 2005 μειώθηκε κατά 84%. Συγκεκριμένα, από 0,26 \$ που κόστιζε το 1980, το 2005 κόστιζε περίπου 0,05 \$. Από το 2008 μέχρι το 2020 δεν προβλέπεται σημαντική μείωση στο κόστος της αιολικής ενέργειας, προβλέπεται όμως ότι σε αυτό το χρονικό διάστημα το κόστος παραγωγής της παραγόμενης κιλοβατώρας θα είναι ακόμα πιο χαμηλό με τιμή το 2020 περίπου 0,026 \$ ανά

κιλοβατώρα. [19]



Σχήμα 1.3 Διαχρονική μείωση του κόστους της αιολικής ενέργειας [19]

Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε καλύτερα τις μελλοντικές τάσεις της σημερινής αιολικής αγοράς, είναι σημαντικό να λάβουμε υπόψη την ανάπτυξη που παρουσιάζουν τα τελευταία χρόνια οι εμπορικές Α/Γ, η οποία αναμένεται να συνεχιστεί και στο μέλλον. Συγκεκριμένα εκτός από την αύξηση της ονομαστικής τους ισχύος, που σήμερα φτάνει μέχρι και τα 5MW (Α/Γ REpower 5M) και της μείωσης του κόστους κατασκευής τους, οι σύγχρονες Α/Γ

παρουσιάζουν επιπλέον και αλλά σημαντικά πλεονεκτήματα όπως αύξηση της αξιοπιστίας τους, χαμηλή παραγωγή θορύβου, καλύτερη ρύθμιση ισχύος κ.λ.π.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα που προκύπτει από την συνεχή εξέλιξη της αιολικής ενέργειας είναι ότι βοηθά στο να δημιουργηθούν χιλιάδες θέσεις εργασίας δίνοντας έτσι μια ευκαιρία για εργασία σε πολλούς άνεργους επιστήμονες διαφόρων ειδικοτήτων (π.χ. μηχανολόγους και ηλεκτρολόγους μηχανικούς).

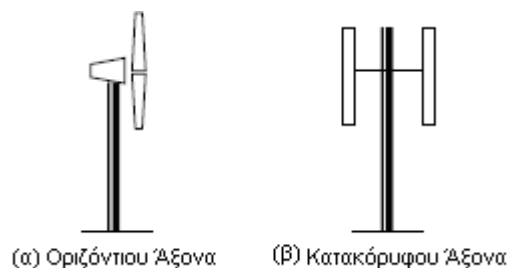
Από όσα έχουν ειπωθεί μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η αιολική ενέργεια είναι μια πλέον ώριμη τεχνολογικά και οικονομικά ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (ΑΠΕ), αλλά και μια από της ελάχιστες ελπίδες του σύγχρονου κόσμου για την αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου και την προστασία του περιβάλλοντος.

1.1.4 Τύποι Ανεμογεννητριών και Καινοτόμες Εφαρμογές

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται μέσω Α/Γ (wind turbines) που μετατρέπουν αρχικά την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική και στη συνέχεια μέσω της ηλεκτρογεννήτριας που διαθέτουν σε ηλεκτρική. Η λειτουργία τους δεν απαιτεί πρώτες ύλες, εκτός από τον άνεμο και δεν εκπέμπει καμιά μορφή ρύπων ή αποβλήτων.

Οι σύγχρονες Α/Γ ταξινομούνται κυρίως σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (horizontal axis wind turbine) και τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (vertical axis wind turbine).

Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος με την επιφάνεια της γης ενώ στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης και κάθετος στην ροή του ανέμου.



Σχήμα 1.4 Κατηγορίες σύγχρονων Α/Γ

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα διαχωρίζονται:

- με βάση τον αριθμό των πτερυγίων τους σε μονοπτέρυγες, διπτέρυγες, τριπτέρυγες, και πολυπτέρυγες.
- με βάση τη θέση του δρομέα ως προς τον πύργο στήριξης σε ανάντι (up wind) και κατάντι (downwind).
- ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους σε ταχύστροφες ή αργόστροφες.

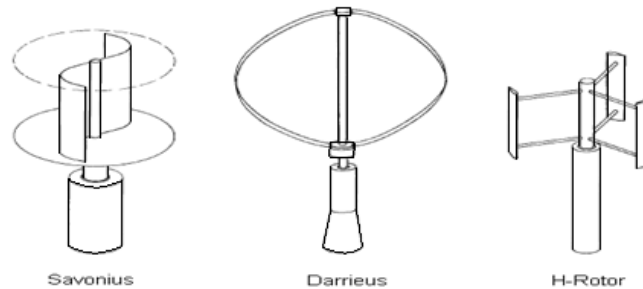
Οι πιο γνωστοί τύποι ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι οι κλασικοί παραδοσιακοί ανεμόμυλοι (π.χ. τύπου «Μυκόνου») καθώς και οι αργόστροφες πολυπτέρυγες Α/Γ «αμερικάνικου τύπου», οι οποίες βρήκαν ευρεία εφαρμογή στην άντληση νερού και σε άλλες γεωργικές χρήσεις.

Οι πλέον διαδεδομένες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα οι οποίες χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα είναι οι Α/Γ τύπου «έλικα». Οι μηχανές αυτού του τύπου φέρουν συνήθως τρία πτερύγια, είναι πολύστροφες και παρουσιάζουν υψηλό αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι Α/Γ αυτού του τύπου συνεχίζουν να αναπτύσσονται μέχρι και σήμερα, ενώ έχουν κατασκευαστεί και κατασκευάζονται μονάδες με ισχύ που κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες W έως και αρκετά MW.

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα είναι πιο απλές κατασκευές και παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου. Οι πιο γνωστοί τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι Α/Γ τύπου «Darrieus» και οι Α/Γ τύπου «Savonius» (σχήμα 1.5).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια συνεχής προσπάθεια για τη βελτίωση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών αυτού του τύπου αιολικών μηχανών.



Σχήμα 1.5 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Ο κλάδος της αιολικής ενέργειας παρουσιάζει μια συνεχή εξέλιξη. Ολοένα και μεγαλύτερα αιολικά πάρκα τίθενται σε λειτουργία τόσο σε στεριά όσο και σε θάλασσα (offshore). Εκτός από τα αιολικά πάρκα, Α/Γ εγκαθίστανται πλέον και σε ψηλά κτίρια όπως στο Παγκόσμιο Κέντρο Εμπορίου του Μπαχρέν (Bahrain World Trade Center), το οποίο αποτελείται από δύο πύργους συνολικού ύψους 240m και στο οποίο έχουν τοποθετηθεί τρεις Α/Γ σε ειδικά διαμορφωμένες γέφυρες που ενώνουν τους δύο πύργους. Οι Α/Γ αυτές, έχουν κατασκευαστεί από τη δανέζικη εταιρεία Norwin και η κάθε μια έχει ισχύ 225kW και διάμετρο πτερυγίων 29m. Για πρώτη φορά τέθηκαν σε λειτουργία στις 8 Απριλίου του 2008. [38]



Σχήμα 1.6 Καινοτόμες εφαρμογές

Η Ηλιακή Καμινάδα (thermal upwind power) είναι μια ιδέα την οποία εμπνεύστηκε ο γερμανός καθηγητής κ. Jorg Schlaich και η οποία εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία για να θερμάνει στρώματα αέρα, που βρίσκονται κάτω από μια μεγάλη γυάλινη επιφάνεια. Ο θερμός αέρας διοχετεύεται σε μια υψηλή καμινάδα στη βάση της οποίας υπάρχουν εγκατεστημένες Α/Γ και μέσω των Α/Γ, η ενέργεια του κινούμενου θερμού αέρα μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική και τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτοί οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής

ενέργειας, προτείνονται για εγκαταστάσεις στις ερήμους όπου αφθονεί ο ήλιος και η άμμος. Ο ήλιος είναι απαραίτητος για την θέρμανση των αέριων μαζών και η άμμος για την παραγωγή τσιμέντου και γυαλιού τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του πύργου και του σκέπαστρου. Έκτος από τον ήλιο και την άμμο οι σταθμοί αυτοί χρειάζονται επίσης και μεγάλες εκτάσεις γης οι οποίες και αυτές αφθονούν στις ερήμους. Συγκεκριμένα μια μονάδα 200MW χρειάζεται μια γυάλινη επίπεδη επιφάνεια διαμέτρου 7Km και μια καμινάδα 1000m. [26] [27]

Η θάλασσα εκτός από το νερό διαθέτει και ένα πολύ καλό αιολικό δυναμικό το οποίο εκτιμάται ότι είναι κατά μέσο όρο 20% υψηλότερο από αυτό της ξηράς και η ροή του ανέμου είναι πιο στρωτή. Αυτό το καλό αιολικό δυναμικό, τον ήλιο και τη θάλασσα των ελληνικών νησιών θέλησαν να αξιοποιήσουν Έλληνες ερευνητές οι οποίοι σχεδίασαν την «Υδριάδα», ένα φιλικό προς το περιβάλλον πλωτό σύστημα αφαλάτωσης θαλάσσιου ύδατος το οποίο χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ενεργειακά βέλτιστη διεργασία αφαλάτωσης. Η «Υδριάδα» είναι η πρώτη στην Ελλάδα πλωτή Α/Γ η οποία μάλιστα, εκμεταλλεύεται άμεσα την παραγόμενη ενέργεια, παράγοντας πόσιμο νερό και από τις 18/06/2007 βρίσκεται σε λειτουργία στην Ηρακλεία των Μικρών Ανατολικών Κυκλάδων παρέχοντας πόσιμο νερό με κόστος συντήρησης περίπου 0,2 ευρώ/κυβικό. [28]

1.2 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα

1.2.1 Σύντομη Περιγραφή

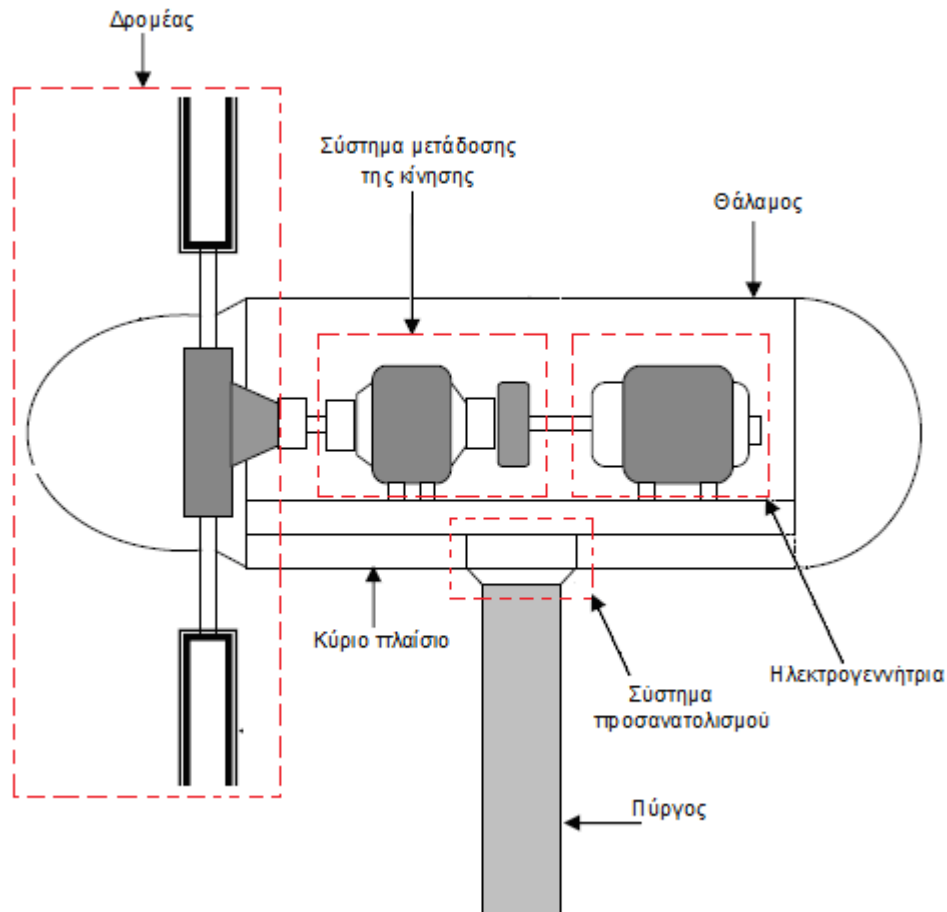
Τα βασικά μέρη μιας σύγχρονης ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, παρουσιάζονται στο σχήμα 1.7 και είναι τα ακόλουθα:

- Δρομέας (rotor)
- Σύστημα μετάδοσης της κίνησης (drive train)
- Κύριο πλαίσιο (main frame)
- Κέλυφος (nacelle)
- Σύστημα προσανατολισμού (yaw system)
- Πύργος (tower)
- Ηλεκτρογεννήτρια (generators)

Ο Δρομέας μίας σύγχρονης Α/Γ οριζόντιου άξονα, αποτελείται συνήθως από τρία πτερύγια των οποίων το σχήμα και η τεχνολογία έχει προέλθει από αντίστοιχα πτερύγια αεροπορικών κινητήρων (π.χ. αεροτομές NACA). Τα πτερύγια αυτά προσαρμόζονται πάνω στην *πλήμνη* (hub) η οποία αποτελεί το δεύτερο συστατικό του δρομέα και είναι συνδεδεμένη με την κύρια άτρακτο της Α/Γ. Στις Α/Γ μεγάλης ονομαστικής ισχύος, η ρύθμιση της ισχύος εξόδου από το δρομέα επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση του βήματος των πτερυγίων (περιστροφή ολόκληρου του πτερυγίου). Αυτό γίνεται με το σύστημα *ρύθμισης βήματος του πτερυγίου* (blade pitch mechanism). Το σύστημα αυτό έχει την ιδιότητα να μεταβάλλει τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου με σκοπό αφενός τον περιορισμό της ισχύος σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, και αφετέρου τη μεγιστοποίηση της ροπής για διευκόλυνση της εκκίνησης της μηχανής. Μια άλλη λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος είναι ότι βοηθά στην ακινητοποίηση του δρομέα σε περίπτωση που καταστεί ανάγκη.

Η μηχανική ισχύς που παράγεται από την περιστροφή των πτερυγίων του δρομέα μεταδίδεται στη γεννήτρια με ένα σύστημα μετάδοσης που βρίσκεται πάνω στο κύριο πλαίσιο της Α/Γ. Αυτό αποτελείται από ένα κιβώτιο οδοντωτών τροχών (gearbox) που παίζει το ρόλο του *Αυξητήρα Στροφών*, την κύρια άτρακτο ή άτρακτο χαμηλών στροφών (από την πλήμνη έως το

κιβώτιο), την άτρακτο υψηλών στροφών (από το κιβώτιο έως την ηλεκτρογεννήτρια) και ένα μηχανικό φρένο το οποίο είναι τοποθετημένο σε μια από τις δυο ατράκτους. Σκοπός του αυξητήρα στροφών είναι ο μετασχηματισμός των χαμηλών ταχυτήτων περιστροφής του δρομέα, σε υψηλότερες σύγχρονες ταχύτητες περιστροφής των ηλεκτρογεννητριών.



Σχήμα 1.7 Τυπική μορφή Α/Γ οριζόντιου άξονα [19]

Το *Κέλυφος* επικαλύπτει τα διάφορα τμήματα της Α/Γ και τα προστατεύει από τις καιρικές συνθήκες. Συγκεκριμένα προστατεύει τα διάφορα ηλεκτρικά και μηχανικά τμήματα από τη βροχή, τον ήλιο, τον παγετό και το χόνι. Είναι κατασκευασμένο από ελαφριά υλικά (π.χ σύνθετα υλικά με υαλονήματα).

Το *Κύριο Πλαίσιο* είναι το τμήμα της Α/Γ στο οποίο είναι προσαρτημένα ο αυξητήρας στροφών, η ηλεκτρογεννήτρια και το δισκόφρενο. Η βάση του είναι κατάλληλα διαμορφωμένη ώστε να μπορεί να εφαρμόζει το σύστημα προσανατολισμού το οποίο στη συνέχεια στερεώνεται στο ανώτατο σημείο του πύργου. Σκοπός του είναι να συγκρατεί σε σταθερή θέση τα τρία προαναφερθέντα τμήματα της Α/Γ και να μεταφέρει όλα τα φορτία από το δρομέα, την ηλεκτρογεννήτρια, και το μηχανικό φρένο στον πύργο.

Για την καλύτερη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας το επίπεδο που σαρώνουν τα περύγια του δρομέα πρέπει να είναι κάθετο στην κατεύθυνση του άνεμου. Οι μεγάλοι μεγέθους σύγχρονες Α/Γ έχουν τοποθετημένο στο πάνω μέρος του πύργου τους ένα ενεργό σύστημα προσανατολισμού (active yaw) το οποίο περιστρέφει την άτρακτο και το δρομέα. Το σύστημα αυτό αποτελείται από το αζιμούθιο έδρανο κύλισης (azimuth bearing) το οποίο έχει δύο βασικούς σκοπούς. Ο πρώτος είναι να εξασφαλίζει την εύκολη περιστροφική κίνηση του

μηχανισμού εκτροπής γύρω από τον πύργο και ο δεύτερος είναι η απόσβεση των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων.

Ο πύργος μιας Α/Γ υποστηρίζει το σύστημα της ατράκτου και ανυψώνει το δρομέα σε ένα ύψος όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι σημαντικά μεγαλύτερη και ο βαθμός τύρβης μικρότερος σε σχέση με το επίπεδο του εδάφους. Η δομή του πρέπει να είναι ανθεκτική ώστε να αντέχει στα σημαντικά φορτία τα οποία οφείλονται στη βαρύτητα, την περιστροφή και την ώση του ανέμου. Σήμερα οι περισσότερες Α/Γ παραδίδονται με σωληνωτούς πύργους (tubular tower) οι οποίοι κατασκευάζονται σε τμήματα με φλάντζες στα άκρα και συναρμολογούνται επιτόπου.

Στο άκρο του συστήματος μετάδοσης κίνησης (άτρακτος υψηλών στροφών) τοποθετείται η ηλεκτρογεννήτρια η οποία μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος και σπανιότερα γεννήτριες συνεχούς ρεύματος.

1.2.2 Αστοχίες Λειτουργίας

Οι Α/Γ σε ένα αιολικό πάρκο μερικές χρονικές περιόδους λόγω κάποιων συγκυριών (σφαλμάτων) αδυνατούν να λειτουργήσουν.

Κατάσταση σφάλματος σε μια Α/Γ θεωρείται οποιαδήποτε κατάσταση (χρόνος) κατά την οποία η Α/Γ δεν παράγει ενέργεια ανεξάρτητα από το αίτιο του σφάλματος. Τα αίτια που κατά συνέπεια επηρεάζουν την πραγματική διαθεσιμότητα ($TR = \Omega_{\text{ρες Παραγωγής}}/8760$) χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

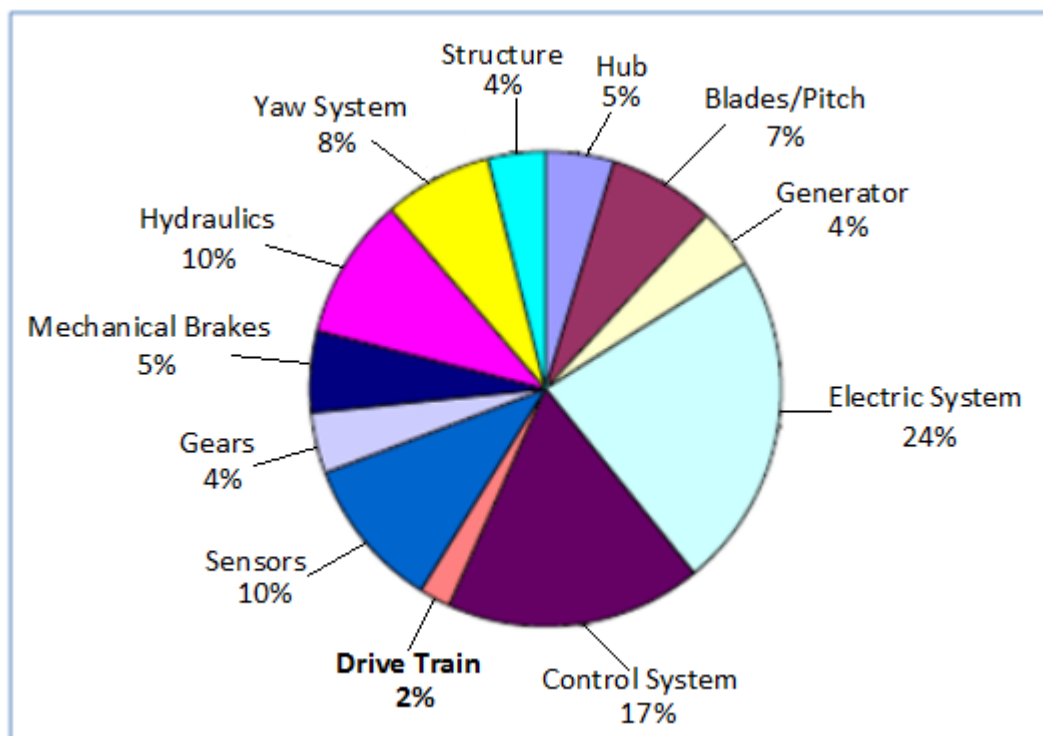
- τα σφάλματα κατά τα οποία η Α/Γ δεν είναι σε θέση να παράγει, παρόλο που είναι τεχνικά διαθέσιμη, για λόγους όπως: χαμηλή ένταση του ανέμου, μη κανονικές συνθήκες δικτύου, ηθελημένη διακοπή, προγραμματισμένη συντήρηση κ.λ.π, η αποκατάσταση των οποίων δεν επιφέρει απρόβλεπτη οικονομική επιβάρυνση του λειτουργικού κόστους
- τα σφάλματα που προκαλούν απρόβλεπτα μια διακοπή της παραγωγής και είναι άμεσα ή έμμεσα συνδεδεμένα με τεχνικά προβλήματα (βλάβες) του εξοπλισμού της Α/Γ και η αποκατάσταση τους επιφέρει απρόβλεπτη οικονομική επιβάρυνση του λειτουργικού κόστους.

Η προγραμματισμένη συντήρηση περιελήφθη σκοπίμως στην πρώτη κατηγορία σφαλμάτων, λόγω του σχετικά μικρού χρόνου που απαιτεί, της πραγματοποίησής της κατά το πλείστον παράλληλα με την αποκατάσταση κάποιας τεχνικής βλάβης, της δυνατότητας υλοποίησης της σε περίοδο άπνοιας, καθώς και λόγω του ότι το κόστος αυτής δεν αποτελεί απρόβλεπτη επιβάρυνση.

Στην παρούσα μελέτη ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σφάλματα της δεύτερης κατηγορίας και συγκεκριμένα τα σφάλματα τα οποία αφορούν στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης μέρος του οποίου είναι η κύρια άτρακτος και τα έδρανα κύλισης τα οποία την στηρίζουν. Πληροφορία για τη συχνότητα εμφάνισης βλαβών καθώς και του χρόνου ακινησίας μιας Α/Γ που οφείλεται σε κάποια συγκεκριμένη βλάβη δίνεται από στατιστικές αναλύσεις βλαβών που πραγματοποιήθηκαν από διάφορες χώρες όπως Σουηδία, Φινλανδία και Γερμανία.

Στο *σχήμα 1.8* και *1.9* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από στατιστική ανάλυση βλαβών για τη Γερμανία. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα προέρχονται από το Wissenschaftliches Mess-und Evaluierungs Programm (WMEP). Το WMEP είναι ένα ερευνητικό πρόγραμμα κατά το οποίο παρακολουθούνται μερικές Α/Γ για μια περίοδο μεγαλύτερη των 15 χρόνων. Στα γραφήματα που ακολουθούν μπορεί κανείς να δει το συνολικό αριθμό βλαβών και χρόνο ακινησίας για όλες τις Α/Γ κατά τη διάρκεια ολόκληρης της έρευνας.

Συγκεκριμένα στο *σχήμα 1.8* παρουσιάζεται η κατανομή των βλαβών των Α/Γ και όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει οι ηλεκτρικές βλάβες (π.χ. το ηλεκτρικό σύστημα, αισθητήρια όργανα, σύστημα ελέγχου) αντιπροσωπεύουν περίπου το 50% των βλαβών, ενώ το άλλο μισό είναι μηχανικές βλάβες.



Σχήμα 1.8 Κατανομή αριθμού βλαβών στη Γερμανία [25]

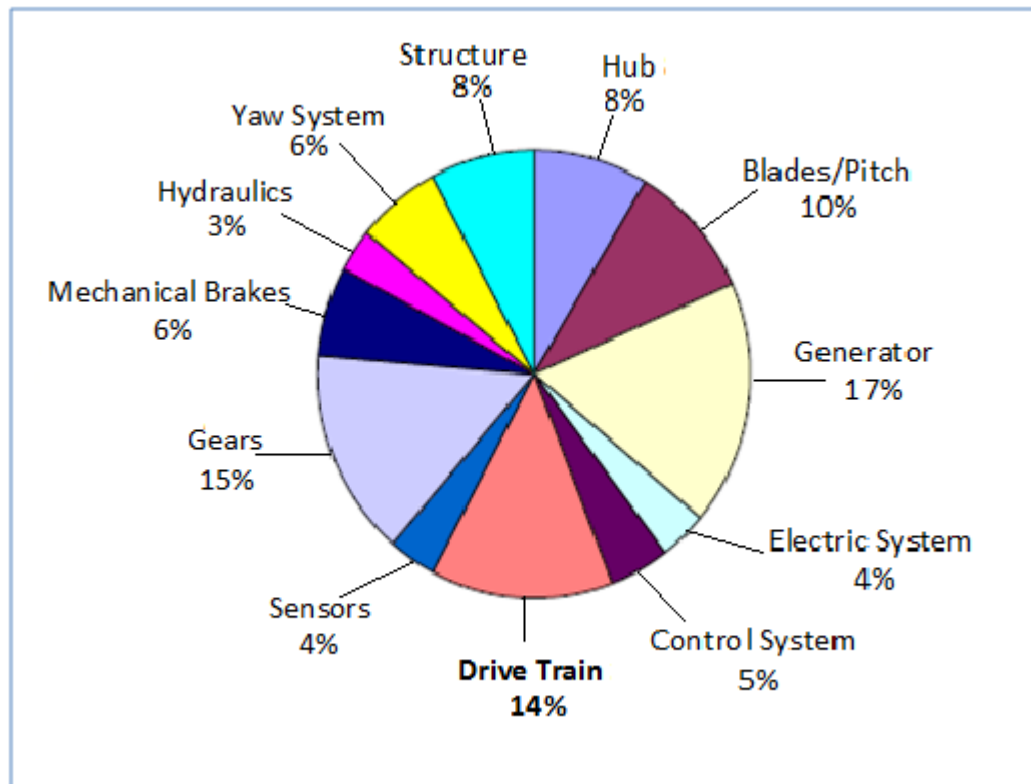
Στο *σχήμα 1.9* παρουσιάζεται η κατανομή του χρόνου ακινησίας ανά βλάβη. Εδώ το σύστημα αύξησης στροφών, η ηλεκτρογεννήτρια και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης αντιπροσωπεύουν εξαρτήματα με μεγάλη διάρκεια ακινησίας της τάξης των 6-8 ημερών. Πιο συχνές βλάβες όπως προβλήματα με το ηλεκτρικό σύστημα μπορούν εύκολα να διορθωθούν και ο χρόνος ακινησίας για αυτού του είδους τα προβλήματα είναι λιγότερος των 2 ημερών.

Το WMEP παρουσίασε επίσης και μια περίληψη της ετήσιας συχνότητας βλαβών και του χρόνου ακινησίας των Α/Γ των γερμανικών αιολικών πάρκων για όλη τη χρονική περίοδο της έρευνας. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης ανάλυσης για το σύστημα μετάδοσης κίνησης βρίσκονται στον *πίνακα 1.1*.

Σύστημα μετάδοσης κίνησης

Αριθμός βλαβών ανά έτος	0,05
Χρόνος ακινησίας ανά έτος	7,4
Χρόνος ακινησίας ανά βλάβη (ώρες)	137,3

Πίνακας 1.1 Συχνότητα ακινησίας συστήματος μετάδοσης κίνησης στην Γερμανία



Σχήμα 1.9 Κατανομή του χρόνου ακινησίας [25]

Το κύριο συμπέρασμα από τη γερμανική στατιστική μελέτη είναι ότι ο αυξητήρας στοφών, το σύστημα μετάδοσης κίνησης και η γεννήτρια, είναι κρίσιμα εξαρτήματα για τις Α/Γ των γερμανικών αιολικών πάρκων.

Στον πίνακα 1.2 φαίνονται οι συχνότητες χρόνου ακινησίας και βλαβών του συστήματος μετάδοσης κίνησης για τα αιολικά πάρκα της Γερμανίας, Σουηδίας και Φιλανδίας.

	Συνολικός αριθμός βλαβών 2000-2004 [n]	Μέσος αριθμός βλαβών/χρόνο/Α/Γ	Μέσος χρόνος ακινησίας/βλάβη (ώρες/βλάβη)
Γερμανία	80	0,05	137,3
Σουηδία	13	0,004	291,4
Φιλανδία	0	0	0

Πίνακας 1.2 Συχνότητες ακινησίας συστήματος μετάδοσης κίνησης

1.2.3 Προληπτικός Έλεγχος και Προληπτική Συντήρηση Ανεμογεννητριών

Όπως όλα τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα, έτσι και οι Α/Γ μπορούν να εκδηλώσουν σοβαρές βλάβες με την πάροδο των ετών λειτουργίας τους. Οι λειτουργικές παράμετροι των Α/Γ, όπως μέτρηση της στάθμης δονήσεων/κραδασμών των κινούμενων μερών τους, κατάσταση ζυγοστάθμισης πτερυγίων, θερμοκρασία μέρων τους κ.λ.π, πρέπει να μετριοούνται και να παρακολουθούνται συνεχώς από ηλεκτρονικά monitors για την πρόβλεψη πιθανών βλαβών. Τα ηλεκτρονικά monitors δίνουν μια εικόνα της κατάστασης που βρίσκεται μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή το έδρανο χωρίς όμως να μπορούν να εκτιμήσουν τον εναπομείναντα χρόνο ζωής του.

Επομένως τα συστήματα monitors μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της κατάστασης του εδράνου αλλά δεν μπορούν να δώσουν απάντηση πόσο χρόνο ζωής έχει ένα έδρανο με βάση τις ανεμολογικές συνθήκες που επικρατούν στην υπό μελέτη περιοχή. Απάντηση στο ερώτημά πόση είναι η διάρκεια ζωής του εδράνου μπορεί να δώσει το μοντέλο που ανατήχθηκε στην παρούσα μελέτη και το οποίο δίνει μια πρώτη εκτίμηση της διάρκειας ζωής του εδράνου.

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι:

- δυνατότητα εκτίμησης της διάρκειας ζωής του εδράνου πριν την κατασκευή του αιολικού πάρκου
- λαμβάνει υπόψιν τις ανεμολογικές συνθήκες της περιοχής του αιολικού πάρκου
- χαμηλό κόστος
- δε χρειάζεται ειδικευμένο τεχνικό προσωπικό και εξοπλισμό

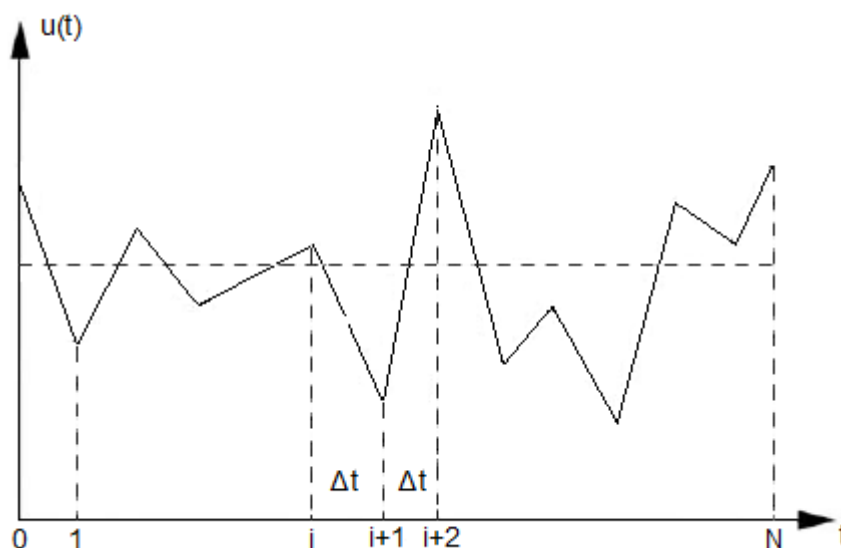
Κεφάλαιο 2

2.1 Άνεμος

Για την εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου είναι απαραίτητη η λεπτομερής εξέταση των ανεμολογικών συνθηκών σε μια περιοχή. Αρχικά, πρέπει να γνωρίζουμε τους επικρατούντες ανέμους και την ταχύτητά τους, όχι μόνο κατά τη διάρκεια του χρόνου και της ημέρας, αλλά ακόμη και σε πολύ μικρότερα χρονικά διαστήματα. Ο λόγος που ενδιαφέρεται κανείς για μικρότερα διαστήματα ταχύτητας ανέμου είναι γιατί η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας δεν καθορίζει επακριβώς την ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από τον άνεμο. Επομένως, είναι απαραίτητη η σχεδίαση ανεμογραμμμάτων που να μπορούν να ακολουθούν και να δίνουν ωριαίες μετρήσεις της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου. Ακολουθώντας πρέπει να είναι γνωστή η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος, έτσι ώστε να καθοριστεί η απόσταση από το έδαφος στην οποία θα τοποθετηθεί η Α/Γ. Τέλος, θα πρέπει να είναι γνωστά τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία ο άνεμος θα έχει την απαιτούμενη εκμεταλλεύσιμη ισχύ, τις περιόδους νηνεμίας και τις μέγιστες ταχύτητες του ανέμου για τον υπολογισμό της αντοχής της Α/Γ.

2.1.1 Ένταση και Ριπές του Ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου είναι ένα ιδιαίτερα μεταβλητό μέγεθος, το οποίο εμφανίζει διακυμάνσεις τόσο σε χρονικά διαστήματα εκατοστών του δευτερολέπτου όσο και σε διαστήματα ωρών (σχήμα 2.1). Η μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου έχει ιδιαίτερη σημασία για τη λειτουργική απόδοση των Α/Γ καθώς επίσης και για τον υπολογισμό της αντοχής διαφόρων εξαρτημάτων (πύργος, πτερύγια, έδρανα κ.τ.λ), τα οποία λόγω των κυμαινόμενων φορτίων που αναπτύσσονται οδηγούνται σε κόπωση.



Σχήμα 2.1 Στιγμαία ταχύτητα ανέμου

Προβλήματα στην ομαλή λειτουργία μιας αιολικής εγκατάστασης δημιουργούνται και από τους ξαφνικούς ανέμους ιδιαίτερα μεγάλης έντασης και μικρής διάρκειας, οι όποιοι καλούνται

ριπές ανέμου (gusts). Συγκεκριμένα, ριπή ανέμου ορίζεται μια ξαφνική μικρής διάρκειας ($\leq 20\text{sec}$) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου ($\geq 9,3\text{sec}$), η οποία διαφέρει από τη μέση τιμή της ταχύτητας στο διάστημα που προηγήθηκε και ακολουθεί κατά τουλάχιστον $4,6 \text{ m/s}$, ενώ η ταχύτητα του ανέμου επανέρχεται στη συνέχεια στα προηγούμενα επίπεδα τιμών. Οι ξαφνικές ριπές του ανέμου και η διάρκεια τους συνδέονται άμεσα με τη φόρτιση των πτερυγίων και τη διάρκεια ζωής των εδράνων της κύριας ατράκτου της Α/Γ. [2]

2.1.1 Κατανομή Weibull ταχυτήτων ανέμου

Η καμπύλη διάρκειας ταχυτήτων ανέμου, ή καμπύλη συχνότητας ταχύτητας ανέμου μπορεί να περιγραφεί μέσω μιας συνεχούς μαθηματικής συνάρτησης. Η συνάρτηση που φαίνεται να αντιπροσωπεύει καλύτερα τη στατιστική της ταχύτητας του ανέμου είναι η κατανομή κατά Weibull. Για την κατανομή Weibull, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f(V)$ της ταχύτητας του ανέμου V δίνεται από τη σχέση:

$$f(V) = p(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad 2.1$$

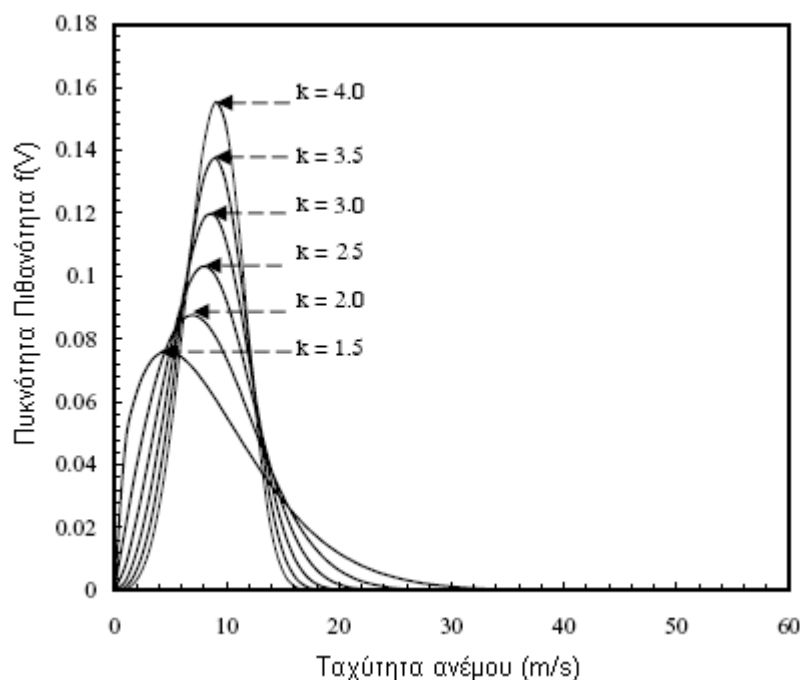
όπου,

V : ταχύτητα του ανέμου (m/s)

c : παράμετρος κλίμακας ταχύτητας (scale factor)

k : παράμετρος μορφής (shape factor)

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull της ταχύτητας του ανέμου για σταθερή παράμετρο κλίμακας ($c=9.8 \text{ m/s}$) και για έξι διαφορετικές τιμές της παραμέτρου μορφής k .



Σχήμα 2.2 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull

2.1.2 Η Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος

Για την περιγραφή της κατακόρυφης διανομής της ταχύτητας του ανέμου έχουν προταθεί διάφορες αναλυτικές σχέσεις, οι οποίες στηρίζονται στην θεωρία των οριακών στρωμάτων. Σαν γενική παρατήρηση πρέπει να λάβουμε υπόψιν ότι η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει σημαντικά με το ύψος από το έδαφος στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις. Συνήθως η μεταβολή αυτή είναι αξιοσημείωτη μέχρι τα πρώτα 100m από το έδαφος, δηλαδή μέχρι το συνηθισμένο πάχος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

Μετά από πολλές μελέτες διαπιστώθηκε ότι η κατακόρυφη μεταβολή του μέτρου της οριζόντιας συνιστώσας του ανέμου, τα πρώτα 1000m περίπου από το έδαφος, μπορεί να εκφραστεί με έναν εκθετικό νόμο (power law). Ο εκθετικός νόμος δίνει την ταχύτητα στο επιθυμητό ύψος ως συνάρτηση του λόγου των δύο υψών στην δύναμη α .

$$V_r = V_0 \left[\frac{H_r}{H_0} \right]^\alpha \quad 2.2$$

όπου

V_r : ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναγωγής (m/s)

V_0 : ταχύτητα του ανέμου στο ύψος όπου έγιναν οι μετρήσεις (m/s)

H_r : ύψος αναγωγής (m)

H_0 : ύψος στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις (m)

α : συντελεστής τραχύτητας

Ο συντελεστής τραχύτητας εκφράζει μια ένδειξη της τραχύτητας της επιφάνειας του εδάφους. Στον πίνακα 2.1 φαίνεται ο συντελεστής τραχύτητας του εδάφους για διάφορες κατηγορίες εδαφών.

Χαρακτηριστικά εδάφους	Συντελεστής τραχύτητας α
Επιφάνεια θάλασσας (νερού)	0,0002
Ανοικτές περιοχές με λίγα εμπόδια	0,03
Καλλιεργήσιμη γη με μερικά εμπόδια που απέχουν περισσότερο από 1 Km	0,1
Αστικές περιοχές και καλλιεργήσιμη γη με πολλά εμπόδια	0,4
Πυκνοκατοικημένη αστική περιοχή ή δάσος	1,6

Πίνακας 2.1 Συντελεστής τραχύτητας για διάφορες κατηγορίες εδαφών [8]

Ανάλογες σχέσεις χρησιμοποιούνται για την αναγωγή των παραμέτρων κλίμακας “c” και μορφής “k” της εξίσωσης Weibull

Η εξίσωση (2.3) αναφέρεται στην αναγωγή της παραμέτρου “c”:

$$\frac{c}{c_0} = \left(\frac{H_r}{H_0} \right)^\alpha \quad 2.3$$

και αντίστοιχα η εξίσωση (2.4) αναφέρεται στην αναγωγή της παραμέτρου “k”

$$k = k_0 \frac{[1 - 0.088 \ln(H_0/10)]}{[1 - 0.088 \ln(H_r/10)]} \quad 2.4$$

όπου,

c_0 : παράμετρος κλίμακας στο ύψος που έγιναν οι μετρήσεις

c : παράμετρος κλίμακας στο ύψος αναγωγής

k_0 : παράμετρος μορφής στο ύψος που έγιναν οι μετρήσεις

k : παράμετρος μορφής στο ύψος αναγωγής

H_r : ύψος αναγωγής (m)

H_0 : ύψος στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις (m)

α : συντελεστής τριβής

2.2 Ενέργεια από τον άνεμο

Οι μεγάλες μάζες του ανέμου που διαρκώς μετακινούνται στην ατμόσφαιρα περιέχουν τεράστια ποσά ενέργειας που προσφέρονται περισσότερο από κάθε άλλη μορφή ενέργειας για μετατροπή και εκμετάλλευση.

Η στιγμιαία ισχύς που παρέχεται σε ένα ρεύμα αέρα διατομής A ομοιόμορφης στιγμιαίας ταχύτητας V και πυκνότητας ρ_a υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_a A V^3 \quad 2.5$$

Η ωφέλιμη ισχύς που παράγει η Α/Γ (P_t) είναι το γινόμενο της ισχύος του ανέμου (P_a) με το βαθμό απόδοσης της Α/Γ:

$$P_t = n_o P_a \quad 2.6$$

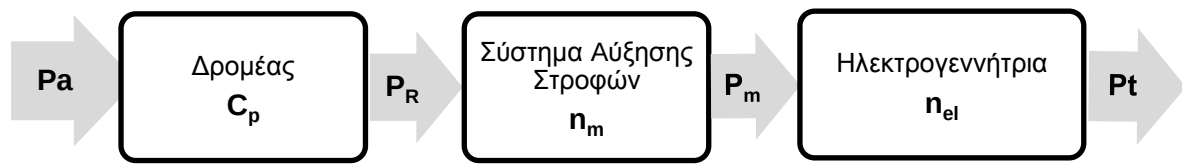
Το $n_o = c_p n_m n_{el}$ και ονομάζεται βαθμός απόδοσης της Α/Γ (power coefficient)

όπου,

c_p : αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης

n_m : μηχανικός βαθμός απόδοσης

n_{el} : ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης



Σχήμα 2.3 Ροή ισχύος Α/Γ

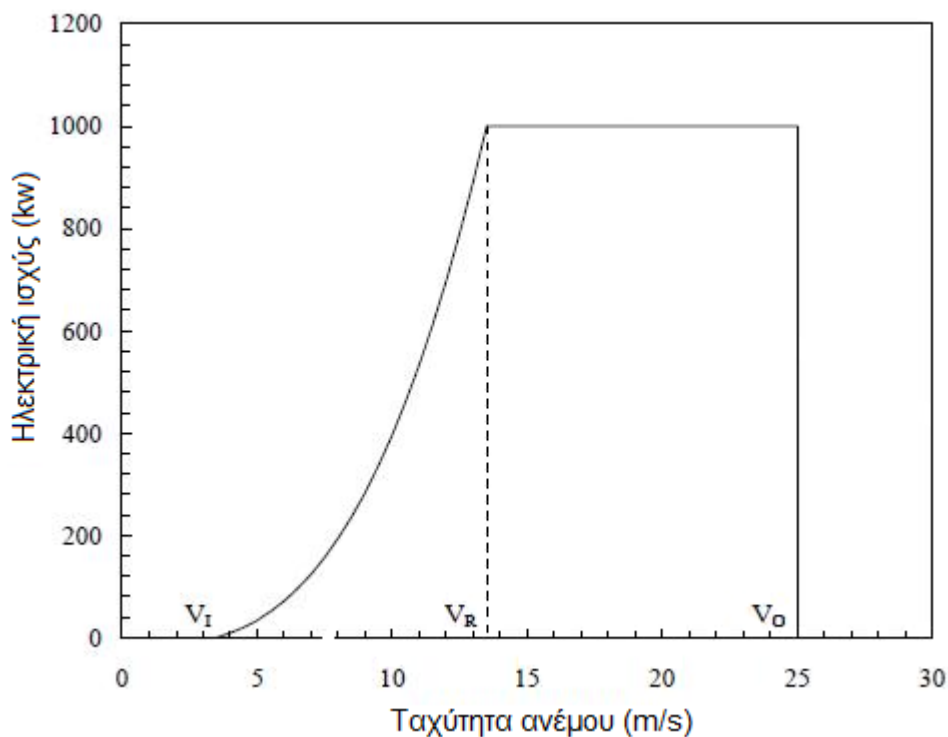
Από τις σχέσεις (2.5) και (2.6) η ισχύς της Α/Γ προκύπτει ότι είναι ίση με:

$$P_t = c_p n_m n_{el} \frac{1}{2} \rho_a A V^3 \quad 2.7$$

2.2.1 Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας

Η καμπύλη ισχύος (power curve) μιας Α/Γ δείχνει την ισχύ της μηχανής σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου σε συγκεκριμένο ύψος από το έδαφος. Το ύψος αυτό συνήθως είναι το ύψος του άξονα περιστροφής.

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται μια απλοποιημένη αλλά αντιπροσωπευτική μορφή της καμπύλης παραγόμενης ισχύος μιας Α/Γ μεταβλητού βήματος πτερυγίου, συναρτήσει της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου. Οι Α/Γ μεταβλητού βήματος χρησιμοποιούν τη δυνατότητα της κλίσης των πτερυγίων τους, έτσι ώστε σε υψηλές ταχύτητες ανέμου η αποδιδόμενη ισχύς να μην υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας.



Σχήμα 2.4 Καμπύλη ισχύος Α/Γ

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα η Α/Γ εκκινεί μόνο όταν η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης είναι ίση με την *Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας* V_C (Cut-in wind speed). Τότε η Α/Γ αρχίζει να αποδίδει ωφέλιμη ισχύ, αφού η ισχύς του ανέμου είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες κενού φορτίου. Συνεπώς, για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της V_C δεν έχουμε αξιοποίηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού.

Η αποδιδόμενη ισχύς αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η ταχύτητα του ανέμου μέχρι να φτάσει την ονομαστική ισχύ της Α/Γ. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται *Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου* V_R (Rated wind speed). Μετά την επίτευξη της ονομαστικής ισχύος επιδιώκεται σταθερή ισχύς, η οποία στις Α/Γ μεταβλητού βήματος (blade pitch control) επιτυγχάνεται με αλλαγή της γωνίας κλίσεως των πτερυγίων. Στις μηχανές σταθερού βήματος (stall control) παρατηρείται μια φθίνουσα απόδοση για ταχύτητες μεγαλύτερες της V_R .

Τέλος, η Α/Γ είναι εξαρχής σχεδιασμένη για ένα εύρος ταχυτήτων. Λόγοι ασφάλειας επιβάλλουν τη διακοπή λειτουργίας της, πάνω από ένα όριο ταχυτήτων που συνήθως είναι τα 25m/s. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται *Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας* (Cut-out wind speed).

πεδίο{0}	$(V < V_C)$	$P_t = 0$	2.8
πεδίο{1}	$(V_C \leq V < V_R)$	$P_t = \frac{V^n - V_C^n}{V_R^n - V_C^n}$	2.9
πεδίο{2}	$(V_R \leq V \leq V_0)$	$P_t = P_0$	2.10
πεδίο{3}	$(V > V_0)$	$P_t = 0$	2.11

Πίνακας 2.2 Σχέσεις υπολογισμού ισχύος Α/Γ

όπου

V_C : ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (m/s)

V_R : ονομαστική ταχύτητα ανέμου (m/s)

V_0 : ταχύτητα διακοπής λειτουργίας (m/s)

n: συντελεστής συσχέτισης ισχύος-ταχύτητας (velocity-power proportionality)

P_t : ισχύς της Α/Γ (W)

P_r : ονομαστική ισχύς της Α/Γ (W)

2.2.2 Ετήσιος υπολογισμός ενέργειας

Ο υπολογισμός της ετήσιας ενέργειας που παράγεται από μια Α/Γ ενέχει ουσιαστική σημασία για την βιωσιμότητα ενός αιολικού πάρκου. Η μακροχρόνια κατανομή των ταχυτήτων σε συνδυασμό με την καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ, δίνει την παραγόμενη ενέργεια για κάθε ταχύτητα ανέμου και συνεπώς το σύνολο της ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η ενέργεια που παράγεται υπολογίζεται από το γινόμενο της ισχύος με το χρονικό διάστημα που η Α/Γ αποδίδει τη συγκεκριμένη ισχύ.

$$E = HPt \quad 2.12$$

όπου,

E: παραγόμενη ενέργεια KWh

H: χρονικό διάστημα που αποδίδεται η συγκεκριμένη ισχύς (ώρες)

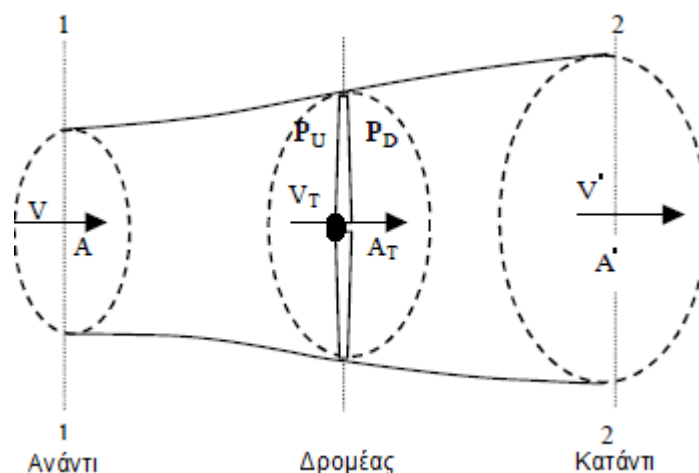
Μετά την ολοκλήρωση του ενεργειακού υπολογισμού μπορεί να υπολογιστεί και ο συντελεστής χρησιμοποίησης c_f (capacity factor) που είναι ένα μέτρο της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης της A/Γ. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης ορίζεται ως ο λόγος της εκτιμώμενης παραχθείσας ενέργειας προς την ενέργεια που θα παραγόταν, εάν η A/Γ λειτουργούσε κάθε ώρα του έτους σε πλήρη ονομαστική ισχύ.

$$c_f = \frac{E}{8760Pr} \quad 2.13$$

2.3 Θεωρία του δίσκου ενέργειας

Για τη μελέτη του αεροδυναμικού πεδίου γύρω από το δίσκο ενέργειας, την περιοχή δηλαδή την οποία σαρώνουν τα πτερύγια του δρομέα μιας A/Γ, εφαρμόζονται οι νόμοι της μηχανικής των ρευστών (εξίσωση συνέχειας, διατήρησης ορμής και διατήρησης ενέργειας). Το *σχήμα 2.5* δείχνει το ροϊκό σωλήνα A/Γ που ορίζεται από τη διάμετρο του δρομέα. Σε μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- η ροή του αέρα είναι ασυμπίεστη
- η εναλλαγή ενέργειας μεταξύ ρευστού και δίσκου γίνεται χωρίς απώλειες
- ο δρομέας αποτελείται από άπειρο αριθμό πτερυγίων
- η πίεση πολύ μακριά (στο άπειρο) ανάντι και πολύ μακριά κατάντι του δίσκου είναι ίση με την ατμοσφαιρική
- το ρεύμα αέρα ανάντι και κατάντι του δρομέα στερείται συστροφής
- το ρευστό εντός του ροϊκού σωλήνα έχει σταθερή ταχύτητα και πίεση πάνω στις διατομές κάθετα στον άξονα του.



Σχήμα 2.5 Ροϊκός σωλήνας

Η μάζα που ρέει μέσα στο ροϊκό σωλήνα διατηρείται σταθερή (εξίσωση συνέχειας)

$$\rho_a A V = \rho_a A_T V_T = \rho_a A' V' \quad 2.14$$

όπου,

ρ_a : : πυκνότητα του αέρα (1.225 kg/m^3)

A, A_T, A' : εμβαδό διατομής ανάντι, στο επίπεδο και κατάντι του δρομέα αντίστοιχα (m^2)

V, V_T, V' : ταχύτητα ανέμου ανάντι, στο επίπεδο και κατάντι του δρομέα αντίστοιχα (m/s)

Εφαρμόζοντας στη συνέχεια το θεώρημα διατήρησης της ορμής μπορούμε να υπολογίσουμε την ώση (Thrust)

$$F = \rho_a A V^2 - \rho_a A' V'^2 \quad 2.15$$

Από τις εξισώσεις (2.14) και (2.15) προκύπτει ότι η δύναμη F είναι ίση με

$$F = \rho_a A_T V_T (V - V') \quad 2.16$$

Την ώση μπορούμε να την ορίσουμε ως την διαφορά πίεσης ανάντι και κατάντι του δρομέα:

$$F = (P_U - P_D) A_T \quad 2.17$$

όπου,

P_U : στατική πίεση του ρευστού ανάντι του δρομέα (N/m^2)

P_D : στατική πίεση του ρευστού κατάντι του δρομέα (N/m^2)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στις παραδοχές, το ρεύμα αέρα στερείται συστροφής ανάντι και κατάντι του δρομέα. Κατά συνέπεια, υπάρχει διατήρηση ενέργειας του ρευστού (εξίσωση Bernoulli) στους δύο ανεξάρτητους υποχώρους πριν και μετά το δίσκο ενέργειας μέσα στο ροϊκό σωλήνα όχι όμως και μεταξύ των δύο υποχώρων, γιατί ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από το ρευστό.

Αρα για τον υποχώρο ανάντι από το δρομέα ισχύει:

$$p + \frac{1}{2} \rho_a V^2 = p_U + \frac{1}{2} \rho_a V_T^2 \quad 2.18$$

και για τον υποχώρο κατάντι:

$$p + \frac{1}{2} \rho_a V'^2 = p_D + \frac{1}{2} \rho_a V_T^2 \quad 2.19$$

Αφαιρώντας τις ενεργειακές σχέσεις του Bernoulli κατά μέλη προκύπτει:

$$P_U - P_D = \frac{1}{2} \rho_a (V^2 - V'^2) \quad 2.20$$

Τέλος αντικαθιστώντας τη σχέση (2.20) στη (2.17) βρίσκουμε ότι η ώση ισούται με:

$$F = \frac{1}{2} \rho_a A_T (V^2 - V'^2) \quad 2.21$$

Από τις εξισώσεις (2.16) και (2.21) βρίσκουμε ότι η ταχύτητα V_T πάνω στο δίσκο ενέργειας είναι ίση με τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου ανάντι και κατάντι

$$V_T = \frac{(V + V')}{2} \quad 2.22$$

Και η ισχύς P_T που απορροφάται από τα πτερύγια ισούται με τη διαφορά της κινητικής ενέργειας ανάντι και κατάντι

$$P_T = \frac{1}{2} \dot{m}(V^2 - V'^2) \quad 2.23$$

όπου,

$\dot{m}$: ροή της μάζας του αέρα (dm/dt)

Το ευκολότερο σημείο για να προσδιοριστεί η ροή $\dot{m}$ της μάζας του αέρα είναι στο επίπεδο του δρομέα, όπου γνωρίζουμε ότι το εμβαδό της εγκάρσιας αυτής διατομής είναι το εμβαδό του «δίσκου ενέργειας».

$$\dot{m} = \rho_a A_T V_T \quad 2.24$$

Από τις εξισώσεις (2.22) (2.23) και (2.24) προκύπτει τελικά ότι η ισχύς P_T είναι ίση με:

$$P_T = \frac{1}{4} \rho_a A_T (V^2 - V'^2)(V + V') \quad 2.25$$

Η διαθέσιμη ισχύς του αέρα που ρέει από την επιφάνεια την οποία σαρώνουν τα πτερύγια είναι:

$$P_o = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3 \quad 2.26$$

Ο λόγος της ισχύος του ανέμου P_T που απορροφάται από τα πτερύγια προς τη διαθέσιμη ισχύ ανέμου που διαπερνά το δίσκο ενέργειας ονομάζεται *αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος* (rotor power coefficient) και συμβολίζεται με C_p :

$$C_p = \frac{P_T}{P_o} \quad 2.27$$

Αντικαθιστώντας τη (2.25) και (2.26) στη (2.27) ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης προκύπτει ότι είναι ίσος με:

$$C_p = \frac{\frac{1}{4} \rho_a A_T (V^2 - V'^2)(V + V')}{\frac{1}{2} \rho_a A_T V^3} \quad 2.28$$

άρα,

$$C_p = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{V'}{V} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{V'}{V} \right] \quad 2.29$$

Ορίζοντας ως w το λόγο της ταχύτητας κατάντι προς την ταχύτητα ανάντι

$$w = \frac{V'}{V} \quad 2.30$$

η σχέση (2.29) γράφεται:

$$C_p = \frac{1}{2}(1 - w^2)(1 + w) \quad 2.31$$

και από τις σχέσεις (2.21) και (2.30) προκύπτει ότι η ώση είναι ίση με:

$$F = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^2 (1 - w^2) \quad 2.32$$

Για να βρεθεί η μέγιστη δυνατή απόδοση του δρομέα, θέτουμε την παράγωγο ως προς w της εξίσωσης (2.31) ίση με μηδέν:

$$\frac{dC_p}{dw} = 0 \text{ που έχει ρίζες } w = -1 \text{ ή } w = \frac{1}{3} \quad 2.33$$

Από τον ορισμό του w (σχέση 2.30), προκύπτει ότι $w > 0$, οπότε από τις παραπάνω δύο λύσεις, η λύση $w = -1$ απορρίπτεται και προκύπτει τελικά ότι η μέγιστη απόδοση του δρομέα επιτυγχάνεται όταν:

$$w = \frac{1}{3} \quad 2.34$$

Με άλλα λόγια, η απόδοση της έλικας θα είναι μέγιστη, αν η ταχύτητα του ανέμου στα κατάντι είναι ίση με $1/3$ της ταχύτητας του ανέμου ανάντι της έλικας.

Αν αντικαταστήσουμε τη (2.34) στη (2.31), βρίσκουμε τη μέγιστη απόδοση του δρομέα:

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad 2.35$$

Το συμπέρασμά αυτό, ότι δηλαδή η μέγιστη θεωρητική απόδοση του δρομέα είναι 59.3% ονομάζεται *νόμος του Betz*.

Για μια δοσμένη ταχύτητα ανέμου, η απόδοση του δρομέα είναι συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Αν ο δρομέας περιστρέφεται πολύ αργά, η απόδοση μειώνεται σημαντικά, επειδή τα πτερύγια της A/Γ αφήνουν πάρα πολύ μεγάλη ποσότητα αέρα να περάσει ανεπηρέαστη. Αν ο δρομέας περιστρέφεται πολύ γρήγορα, η απόδοση μειώνεται καθώς ο στροβιλισμός που προκαλείται από ένα πτερύγιο επηρεάζει το επόμενο πτερύγιο.

2.3.1 Υπολογισμός ώσης για ονομαστική ταχύτητα ανέμου

Με βάση τη θεωρία της καμπύλης ισχύος της A/Γ και του δίσκου ενέργειας θα υπολογιστεί η ώση για $V_R = 13 \text{ m/s}$ (ονομαστική ταχύτητα ανέμου). Η ώση χρειάζεται να υπολογιστεί για να υπάρξει μια ενδεικτική τιμή της αξονικής φόρτισης του εδράνου που θα επιλεγθεί να τοποθετηθεί για την έδραση της ατράκτου.

Για ταχύτητα $V_R = 13 \text{ m/s}$ βρισκόμαστε στο πεδίο $\{2\}$ (πίνακας 2.2) και η ισχύς σε αυτό το εύρος ταχυτήτων είναι $P_t = 1500 \text{ KW}$

Για τον υπολογισμό του αεροδυναμικού βαθμού απόδοσης λύνουμε την εξίσωση (2.7) ως προς C_p

$$C_p = \frac{8 \times 1500 \times 10^3}{1,225 \times 3,14 \times 70^2 \times 0,95 \times 13^3}$$

$$C_p = 0,305$$

Αντικαθιστούμε το C_p στη σχέση (2.31) και λύνουμε ως προς w

$$(1 - w^2)(1 + w) = 0,61$$

Από τη λύση της εξίσωσης προκύπτουν τρεις λύσεις $w=-1,49$ $w=-0,32$ $w=0,815$. Σύμφωνα με τη θεωρία επιλέγεται η θετική τιμή, άρα:

$$w=0,815$$

$$F_a = \frac{\frac{1}{2} \times 1,225 \times 3848,45 \times 13^2 \times (1 - 0,815^2)}{1000}$$

$$F_a=134 \text{ KN}$$

Κεφάλαιο 3

3.1 Μελέτη και Σχεδιασμός Κύριας Ατράκτου

3.1.1 Γενική εποπτεία

Η κύρια άτρακτος ή άτρακτος χαμηλών στροφών συνδέει το δρομέα με το σύστημα αύξησης στροφών. Είναι κατασκευασμένη από ειδικό ενισχυμένο χάλυβα, ώστε να δύναται να μεταφέρει ισχυρές μη μόνιμες στρεπτικές και καμπτικές ροπές, ενώ η έδρασή της επιτυγχάνεται συνήθως με δύο βαρελοειδή έδρανα, ικανά να παραλαμβάνουν τόσο το βάρος της, όσο και τα εξασκούμενα πάνω σε αυτή φορτία (ακτινικό και αξονικό φορτίο).

Η απαραίτητη πληροφορία για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής του μπροστινού εδράνου κύλισης προσδιορίζεται κατά τη μελέτη. Αντικειμενικός σκοπός του υπολογισμού μελέτης είναι η εύρεση των διαστάσεων της διατομής της ατράκτου στις κρίσιμες θέσεις μηχανικής αντοχής σε συνδυασμό με την εκλογή του υλικού της. Ο υπολογισμός αυτός είναι πάντοτε προσεγγιστικός, διότι δεν είναι ακόμη γνωστή η τελική μορφή της ατράκτου με τις διάφορες εγκοπές και διαβαθμίσεις της, που επηρεάζουν αποφασιστικά τη μηχανική αντοχή της.

Τα στάδια του υπολογισμού μιας ατράκτου περιλαμβάνουν:

- υπολογισμό των εξωτερικών της φορτίων
- υπολογισμό των διαγραμμάτων των καμπτικών και στρεπτικών ροπών και των διαγραμμάτων αξονικών και διατρητικών δυνάμεων
- προσδιορισμό των κρίσιμων θέσεων μηχανικής αντοχής
- υπολογισμό της ελάχιστης απαιτούμενης διαμέτρου στις κρίσιμες διατομές σε συνδυασμό με την εκλογή ενός κατάλληλου υλικού για την κατασκευή της ατράκτου

3.1.2 Εξωτερικά φορτία

Τα εξωτερικά φορτία που καταπονούν την κύρια άτρακτο της Α/Γ είναι:

- αξονική δύναμη που οφείλεται στην ταχύτητα του ανέμου
- στρεπτική ροπή
- βάρος ατράκτου
- τυχούσα αζυγοσταθμία

3.1.3 Ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος

Η μελέτη για τον προσδιορισμό της ελάχιστης απαιτούμενης διαμέτρου σε μια κρίσιμη θέση μηχανικής αντοχής μπορεί να γίνει αρχικά με ένα πρόχειρο υπολογισμό, ο οποίος βασίζεται στο γεγονός ότι οι κρίσιμες διατομές μιας ατράκτου καταπονούνται κατά κανόνα από το στρεπτικό φορτίο της. Το μόνο δεδομένο, που χρειάζεται για αυτόν τον υπολογισμό είναι η στρεπτική ροπή, η οποία φορτίζει την άτρακτο.

Η στρεπτική ροπή M_t που καταπονεί μια άτρακτο που περιστρέφεται με n στροφές ανά λεπτό και μεταφέρει μια ισχύ P υπολογίζεται από την σχέση:

$$M_t = \frac{30P}{\pi n} \quad 3.1$$

Άρα η ροπή στρέψης για ισχύ 1500 KW και περιστροφική ταχύτητα 17 rpm είναι:

$$M_t = 843 \text{ KNm}$$

Η κύρια άτρακτος της Α/Γ υπόκειται σε υψηλές καταπονήσεις και για το λόγο αυτό ως υλικό κατασκευής επιλέχτηκε βελτιωμένος χάλυβας 42CrMo4. Η στρεπτική τάση τ_t του συγκεκριμένου χάλυβα δίνεται από διάγραμμα Smith και είναι 380 N/mm^2 . [6].

Η ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος για τη μεταφορά της δεδομένης ισχύος δίνεται από τη σχέση 3.2.

$$d = 1,72 \sqrt[3]{\frac{M_t}{\tau_t}} \quad 3.2$$

Άρα, για στρεπτική ροπή $M_t=843\text{KNm}$ και στρεπτική τάση $\tau_t=380\text{N/mm}^2$ προκύπτει η ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος d:

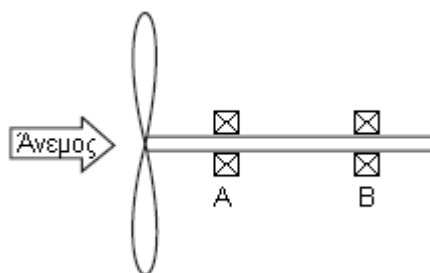
$$d=224 \text{ mm}$$

3.1.4 Επιλογή εδράνων κύλισης

Η εκλογή του κατάλληλου είδους και μεγέθους ενός εδράνου κύλισης εξαρτάται από:

- το είδος και το μέγεθος της ονομαστικής φόρτισης, που πρέπει να παραλάβει
- την ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου
- την ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρο της ατράκτου
- διάφορες ειδικές συνθήκες λειτουργίας (π.χ είδος λίπανσης, τη θερμοκρασία λειτουργίας, τις αυξομειώσεις του ονομαστικού φορτίου, κρούσεις κ.λ.π.)

Η έδραση της κύριας ατράκτου της Α/Γ εξασφαλίζεται με δύο βαρελοειδή αυτορρυθμιζόμενα έδρανα κύλισης διπλής σειράς (spherical roller bearings), τα οποία έχουν την ικανότητα να παραλαμβάνουν τόσο ακτινικά όσο και αξονικά φορτία (σχήμα 3.1). Από τα δύο αυτά έδρανα περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το μπροστινό έδρανο κύλισης (θέση Α), το οποίο παραλαμβάνει ουσιαστικά τα μεγαλύτερα αξονικά φορτία που οφείλονται στην ταχύτητα του ανέμου. Η επιλογή των συγκεκριμένων εδράνων έγινε από κατάλογο της γερμανικής εταιρίας FAG Rolling Bearings. Συγκεκριμένα στη θέση Α θα τοποθετηθεί ένα έδρανο κύλισης 23060K.MB και στη θέση Β ένα έδρανο 23956K.MB. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών εδράνων βρίσκονται στο Παράστημα Α.



Σχήμα 3.1 Θέσεις εδράνων κύριας ατράκτου

3.1.5 Υπολογισμός Βάρους Κύριας Ατράκτου

Για να υπολογίσουμε τη μάζα της ατράκτου αρχικά, τη διαχωρίζουμε με βάση τις διαστάσεις της σε οκτώ διαφορετικά τμήματα, όπου για κάθε τμήμα υπολογίζουμε τον όγκο του και στη συνέχεια δεδομένου ότι η πυκνότητα του χάλυβα είναι $\rho=7860\text{kg/mm}^3$ βρίσκουμε την μάζα του. Τέλος πολλαπλασιάζοντας την κάθε υπολογισθείσα μάζα με την επιτάχυνση της βαρύτητας $g=9,81\text{m/s}^2$ βρίσκουμε τη δύναμη του βάρους που καταπονεί το κάθε τμήμα.

$$V = \pi r^2 h \quad 3.3$$

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζεται το βάρος των επιμέρους τμημάτων της ατράκτου όπως προέκυψε από την εφαρμογή της διαδικασίας που έχει αναφερθεί στην προηγούμενη παράγραφο.

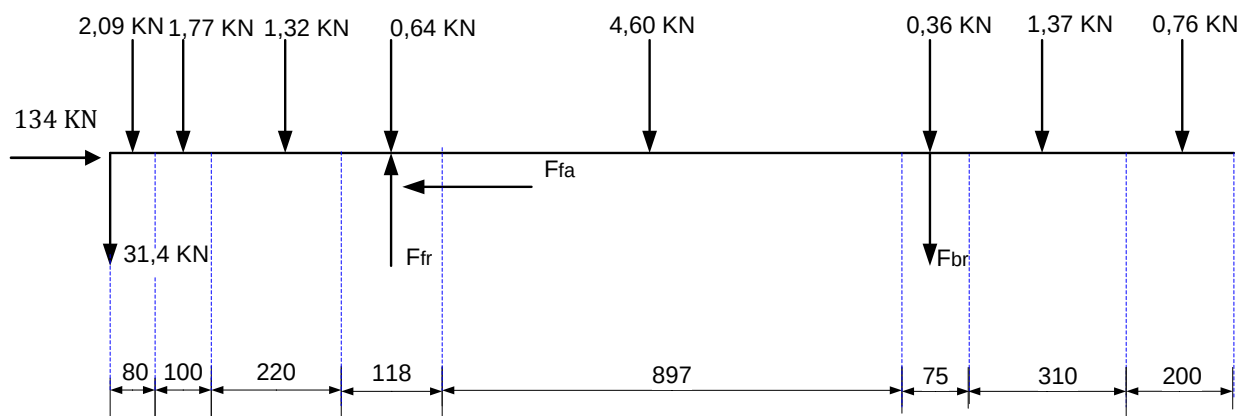
Τμήματα	Σχήμα	Όγκος (m^3)	Μάζα (kg/m^3)	Βάρος (kN)
A	Κύλινδρος-Οπές	0,027	213	2,09
B	Κύλινδρος	0,023	180	1,77
C	Κύλινδρος	0,017	135	1,32
D	Κύλινδρος	0,008	66	0,64
E	Κύλινδρος	0,06	469	4,6
F	Κύλινδρος	0,005	36	0,36
G	Κύλινδρος	0,018	139	1,37
H	Κύλινδρος	0,010	77	0,76

Πίνακας 3.1 Βάρος επιμέρους τμημάτων της ατράκτου

Συνολικό βάρος ατράκτου: 12,9kN.

3.1.6 Υπολογισμός φορτίσεως των εδράνων κύλισης

Όπως έχουμε αναφέρει η έδραση της ατράκτου επιτυγχάνεται με δύο βαρελοειδή έδρανα κύλισης διπλής σειράς. Για τον υπολογισμό των φορτίσεων των εδράνων σχεδιάστηκε το διάγραμμα ελευθέρου σώματος (σχήμα 3.2) και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι τρεις άγνωστες αντιδράσεις (F_{fa} , F_{fr} , F_{br}), οι οποίες καταπονούν τα έδρανα κύλισης.



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος της ατράκτου

Ισορροπία δυνάμεων

$$\sum F_x = 0 \quad F_{fa} = 134 \text{ KN} \quad 3.4 \text{ a}$$

$$\sum F_y = 0 \quad F_{fr} - F_{br} = 44,29 \text{ KN} \quad 3.4 \text{ b}$$

$$\sum M_b = 0 \quad F_{br} = 10,76 \text{ KN} \quad 3.4 \text{ c}$$

αντικαθιστώντας τη δύναμη F_{br} στη σχέση (3.4b) υπολογίζουμε τη δύναμη F_{fr}

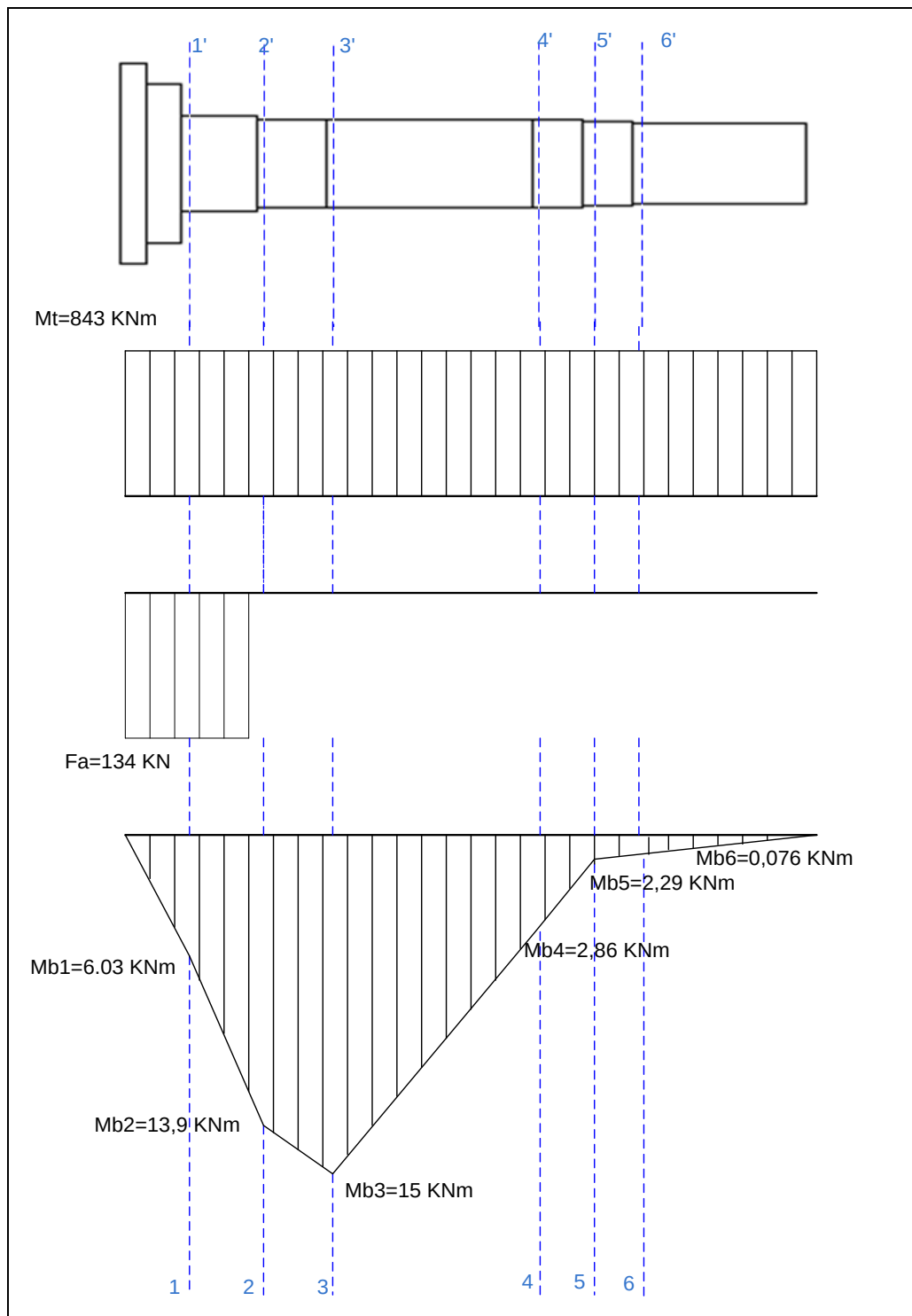
$$F_{fr} = 55,04 \text{ KN}$$

3.1.7 Διαγράμματα εσωτερικών εντατικών μεγεθών

Αφού υπολογίσθηκαν οι αντιδράσεις στήριξης στη συνέχεια καθορίσθηκαν τα κρίσιμα σημεία της ατράκτου και σε κάθε ένα από αυτά υπολογίσθηκε την καμπτική ροπή. Στο *σχήμα 3.3* παρουσιάζονται οι έξι τομές, οι οποίες καθορίζουν τα κρίσιμα σημεία της ατράκτου, το διάγραμμα στρεπτικών ροπών, το διάγραμμα αξονικής φόρτισης και το διάγραμμα καμπτικών ροπών.

Η άτρακτος μεταφέρει μια στρεπτική ροπή $M_t=843\text{KNm}$. Επίσης καταπονείται από μια αξονική φόρτιση η οποία οφείλεται στην ταχύτητα του ανέμου και η οποία έχει μέγιστη τιμή $F_a=134\text{KN}$.

Στον *πίνακα 3.3* παρουσιάζονται τα διαγράμματα στρεπτικών ροπών (M_t) αξονικής φόρτισης F_a και καμπτικών ροπών (M_b)



Σχήμα 3.3 Διαγράμματα M_t , F_a και M_b

3.1.8 Έλεγχος Αντοχής

Η κύρια άτρακτος υπόκειται σε τριών μορφών φορτίσεις:

- σε κυμαινόμενη θλίψη λόγω της έντασης του ανέμου
- εναλλασσόμενη κάμψη λόγω του βάρους της ατράκτου
- κυμαινόμενη στρέψη λόγω της περιστροφής της ατράκτου

Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι σχέσεις οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της αντοχής για τα τρία είδη φορτίσεων τα οποία καταπονούν την υπό μελέτη άτρακτο

	Ροπή Αντίστασης (mm) ³	Αντοχή N/(mm) ²	Μέση Τιμή	Εύρος
Κυμαινόμενη Θλίψη		$\sigma_{dSch} = \frac{F}{A}$	$\sigma_{dSch} / 2$	$\sigma_{dSch} / 2$
Εναλλασσόμενη Κάμψη	$W_b = \frac{\pi d^3}{32}$	$\sigma_{bw} = \frac{M_{bw}}{W_b}$	0	σ_{bw}
Κυμαινόμενη Στρέψη	$W_t = \frac{\pi d^3}{16}$	$\sigma_{tSch} = \frac{M_{tSch}}{W_b}$	$\tau_{tSch} / 2$	$\tau_{tSch} / 2$

Πίνακας 3.2 Συνοπτικός πίνακας φορτίσεων

3.1.8.1 Ισοδύναμη Καταπόνηση

Η μέση τιμή της ισοδύναμης καταπόνησης υπολογίζεται κατά Mises ως:

$$\sigma_{vbm} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{dSch}}{2}\right)^2 + 3\left(\frac{\tau_{tSch}}{2}\right)^2} \quad 3.5$$

και το εύρος της ισοδύναμης καταπόνησης κατά Bach ως:

$$\sigma_{vba} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{dSch}}{2} \frac{\sigma_{bw}}{\sigma_{zw}}\right)^2 + \sigma_{bw}^2 + \left(\frac{\tau_{tSch}}{2} \frac{\sigma_{bw}}{\tau_{tw}}\right)^2} \quad 3.6$$

Από το διάγραμμα Smith για χάλυβα 42CrMo4 προκύπτουν οι τιμές: [6]

$$\sigma_{bw} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{zw} = 380 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{bw} = \sigma_{zw} u_0$$

$$u_0 = 1 + \sqrt{\rho^* s_{\sigma_0}}$$

ρ^* : ισοδύναμη ακτίνα υλικού $\rho^* = 0,006$

$$S_{\sigma_0}: \text{σχετική πτώση τάσης } S_{\sigma_0} = \frac{2}{d} = \frac{2}{10} = 0,2 \text{ mm}^{-1}$$

$$u_0 = \frac{\sigma_{bw}}{\tau_{tw}} = 1,03$$

Αντικαθιστώντας το M_t , σ_{bw} , σ_{zw} και u_0 στη σχέση 3.6 προκύπτει:

$$\sigma_{vba} = \sqrt{\left(1.31 \frac{\sigma_{dSch}}{2}\right)^2 + \sigma_{bw}^2 + \left(1.03 \frac{\tau_{tSch}}{2}\right)^2}$$

	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6
d (mm)	315	300	291	280	270	250
M _t (Nmm)	843x10 ⁶	843x10 ⁶	843x10 ⁶	843x10 ⁶	843x10 ⁶	843x10 ⁶
M _b (Nmm)	6,03x10 ⁶	13,9x10 ⁶	15x10 ⁶	2,86x10 ⁶	2,29x10 ⁶	0,076x10 ⁶
F (N)	-	131x10 ³	-	-	-	-
W _t (mm ³)	6,14x10 ⁶	5,3x10 ⁶	4,86x10 ⁶	4,31x10 ⁶	3,86x10 ⁶	3,07x10 ⁶
W _b (mm ³)	3,07x10 ⁶	2,65x10 ⁶	2,42x10 ⁶	2,16x10 ⁶	1,93x10 ⁶	1,53x10 ⁶
A (mm ²)	-	7,07x10 ⁴	-	-	-	-
τ _{tSch} (N/mm ²)	137	159	174	196	218	275
σ _{bw} (N/mm ²)	1,97	5,24	6,2	133	1,19	0,05
σ _{dSch} (N/mm ²)	-	1,85	-	-	-	-
σ _{vbm} (N/mm ²)	119	138	151	169	189	238
σ _{ba} (N/mm ²)	71,1	82,3	90,4	101	113	142

Πίνακας 3.3 Ισοδύναμη καταπόνηση για κάθε τομή

3.1.8.2 Υπολογισμός Κόπωση

$$\sigma_{bAKN} = \frac{\sigma_{zA} u_d b_s}{a_{kb}} \quad 3.7$$

όπου,

σ_{zA}: αντοχή σε εφελκυσμό-θλίψη (διάγραμμα Smith)b_s: συντελεστής επίδρασης επιφάνειας b_s=0,95u_d: δυναμικός συντελεστής στήριξηςa_{kb}: συντελεστής συγκέντρωσης καμπτικής τάσηςΟ δυναμικός συντελεστής στήριξης δίνεται από τη σχέση $u_d = 1 + \sqrt{\rho^* s_\sigma}$

όπου,

ρ*: ισοδύναμη ακτίνα υλικού ρ*=0,006mm

S_σ: σχετική πτώση τάσης $S_\sigma = \frac{4}{D+d} + \frac{2}{r}$ (mm⁻¹)Ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης $a_{kb} = A + B (X - C)$. Τα A,B,C δίνονται από πίνακα [6] ενώ το $X = \sqrt{d/r}$.

	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6
d (mm)	315	300	291	280	270	250
D (mm)	540	315	300	291	280	270
r (mm)	80	3	7	3	7	7
s_{σ} (mm ⁻¹)	0,03	0,673	0,292	0,674	0,293	0,174
u_d	1,01	1,06	1,04	1,06	1,04	1,03
A	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780
B	0,3346	0,1840	0,1215	0,1840	0,1840	0,2359
X	10,2	10	6,45	11,5	6,21	5,98
a_{kb}	1,44	2,62	1,56	2,56	1,92	1,86
σ_{zA} (N/mm ²)	471	441	459	441	431	462
b_s	0,9	0,95	0,9	0,95	0,9	0,9
σ_{bAKN} (N/mm ²)	297	170	275	174	210	231

Πίνακας 3.4 Αντοχή σε κόπωση για κάθε τομή

3.1.8.3 Συντελεστής Ασφαλείας

Ο διαθέσιμος συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται σε κάθε διατομή από τη σχέση:

$$S = \frac{\sigma_{bAKN}}{\sigma_{vba}} \quad 3.8$$

Όπου

σ_{bAKN} : κόπωση (N/mm²)

σ_{vba} : εύρος της ισοδύναμη καταπόνησης (N/mm²)

	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6
σ_{bAKN} (N/mm ²)	297	170	275	174	210	231
σ_{vba} (N/mm ²)	71,1	82,3	90,4	101	113	142
S	4,09	2,06	3,04	1,72	1,86	1,62

Πίνακας 3.5 Συντελεστής ασφαλείας για κάθε τομή

3.1.8.4 Διάρκεια ζωής

Η ονομαστική διάρκεια ζωής των εδράνων κύλισης, που φορτίζονται με δυναμική καταπόνηση εξαρτάται βασικά από την περιστροφική τους ταχύτητα και από το φορτίο τους. Το τέλος της πραγματικής διάρκειας ζωής του εδράνου κύλισης επισημαίνεται με την εμφάνιση του συμπτώματος της κόπωσης του υλικού, που είναι οι εκκοιλάνσεις, οι οποίες δημιουργούνται κυρίως στην αύλακα κύλισης του εσωτερικού δακτυλίου.

Το μπροστινό βαρελοειδές έδρανο κύλισης που επιλέχτηκε για την έδραση της κύριας ατράκτου όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι το 23060K.MB ικανό να παραλαμβάνει τόσο ακτινικά όσο και αξονικά φορτία.

Η δυναμικά ισοδύναμη φόρτιση P (equivalent dynamic load) για βαρελοειδή έδρανα δίνεται από τη σχέση:

$$P = F_r + YF_a \quad \text{για} \quad \frac{F_a}{F_r} \leq e \quad 3.9$$

και

$$P = 0,67F_r + YF_a \quad \text{για} \quad \frac{F_a}{F_r} > e \quad 3.10$$

όπου,

P : δυναμικά ισοδύναμη φόρτιση (KN)

F_r : ακτινική φόρτιση του εδράνου (KN)

F_a : αξονική φόρτιση του εδράνου (KN)

Y : αξονικός συντελεστής (δίνεται από τον κατασκευαστή)

Ο αξονικός συντελεστής Y και η τιμή του συντελεστή e δίνονται από σχετικό κατάλογο του κατασκευαστή. [Παράρτημα Α]

Η ακτινική φόρτιση του εδράνου κύλισης οφείλεται στο βάρος της ατράκτου και ισούται με 55,04KN, ενώ η αξονική φόρτιση οφείλεται στον άνεμο του οποίου η ένταση μεταβάλλεται συνεχώς. Αποτέλεσμα της συνεχούς διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου είναι και η συνεχής διακύμανση της αξονικής φόρτισης του εδράνου κύλισης.

Από πειραματική έρευνα έχει διαπιστωθεί, ότι μεταξύ της ονομαστικής διάρκειας ζωής L σε εκατομμύρια στροφές, του δυναμικού αριθμού φόρτισης C και του δυναμικά ισοδύναμου φορτίου P υπάρχει μια σαφής σχέση, που μαθηματικώς εκφράζεται με τον ακόλουθο τύπο:

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^k \quad 3.11$$

όπου,

$C=1960\text{KN}$ δυναμικός αριθμός φόρτισης (Παράρτημα Α)

$k=10/3$ για έδρανα με σφαιρικά σώματα κύλισης (ball bearing)

Η ονομαστική διάρκεια ζωής σε ώρες λειτουργίας L_h υπολογίζεται με τον τύπο:

$$L_h = \frac{L10^6}{n60} \quad 3.12$$

$n=17 \text{ rpm}$

Από τις σχέσεις (3.9), (3.10) και (3.11) προκύπτει ότι η διάρκεια ζωής του εδράνου κύλισης είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου.

3.1.9 Κριτήριο Miner

Το κριτήριο Miner συνοψίζεται στην παρακάτω συνθήκη για αστοχία υπό κόπωση, η οποία λέει ότι η κόπωση συσσωρεύεται γραμμικά και όταν το άθροισμα της γίνει ίσο ή ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή επέρχεται η αστοχία:

$$\sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i} = C \quad 3.13$$

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = C \quad 3.14$$

όπου,

n_i : ο αριθμός κύκλων φόρτισης με τάση σ_i που έχει υποστεί μια κατασκευή

N_i : ο αριθμός κύκλων φόρτισης με τάση σ_i που της προκαλεί αστοχία

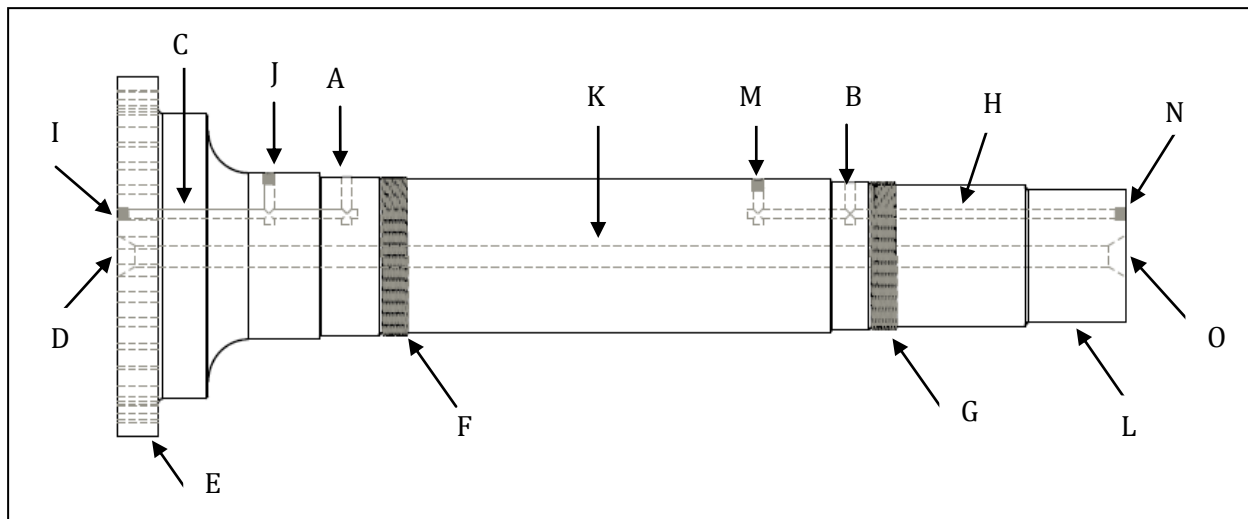
C : σταθερά της οποίας η τιμή κυμαίνεται από 0,8 έως 2,2

Το κριτήριο Miner αποτελεί μέχρι και σήμερα ένα σημαντικό εργαλείο για την πρόβλεψη του χρόνου ζωής των κατασκευών. Αν και χρησιμοποιείται ευρέως δεν μπορεί να εφαρμοστεί παντού ούτε μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα. Το κριτήριο λειτουργεί ικανοποιητικά για το στάδιο έναρξης ρωγμών. Τα κυριότερα προβλήματά του οφείλονται στο ότι :

- οι ακολουθίες φορτίων είναι συνήθως ακανόνιστες
- η σειρά των φορτίσεων παίζει ρόλο στη συσσώρευση των βλαβών
- ο χρόνος ζωής δεν είναι πάντα καθορισμένος με σαφήνεια
- δεν υπάρχει διαβεβαίωση ότι η συσσώρευση της βλάβης είναι γραμμική

3.2 Σχεδίαση Ατράκτου

Η σχεδίαση της ατράκτου πραγματοποιήθηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Pro/Engineer και αναλυτικά τα μηχανολογικά σχέδια παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.



Σχήμα 3.4 Κύρια άτρακτος

Τα έδρανα κύλισης, τα οποία εδράζουν την κύρια άτρακτο θα τοποθετηθούν στις θέσεις Α και Β (σχήμα 3.4) και η στερέωσή τους θα επιτευχθεί με περικόχλιο ατράκτου (shaft nut) [Παράρτημα Α]. Το περικόχλιο θα βιδωθεί στο τραπεζοειδές σπείρωμα, το οποίο θα κοπεί στις θέσεις F και G. Οι ανοχές και η τραχύτητα στις θέσεις που θα τοποθετηθούν τα δύο έδρανα καθορίζονται από τον κατασκευαστή των εδράνων [FAG]. Για τη στεγανοποίηση των εδράνων

θα χρησιμοποιηθούν δακτύλιοι στεγανοποίησης με πύλημα (gap type seals). Το μοντάρισμα και ξεμοντάρισμα επιτυγχάνεται με υδραυλική μέθοδο (hydraulic method) και για αυτό το λόγο έχουν ανοιχτεί δύο εσωτερικές οπές C και H. Οι οπές I και N προέκυψαν από τη διάνοιξη των εσωτερικών αυλάκων και θα στεγανοποιηθούν με την τοποθέτηση πώματος (plug). Για λόγους εργονομίας η υδραυλική αντλία δεν θα τοποθετηθεί στις οπές I και N και θα τοποθετηθεί στις οπές J και M στο άκρο των οποίων υπάρχει εσωτερικό σπείρωμα πάνω στο οποίο θα τοποθετηθεί ο μαστός της υδραυλικής αντλίας.

Στο αριστερό τμήμα υπάρχει μια συγκολλητή φλάντζα (E) πάνω στην οποία θα στερεωθεί η πλήμνη του δρομέα ενώ στο άλλο άκρο (L) θα στερεωθεί ο σύνδεσμος (coupler) του αυξητήρα στροφών. Κατά μήκος της ατράκτου θα ανοιχτεί μια διαμπερής οπή (K) μέσω της οποίας θα περνά το λιπαντικό υγρό το οποίο θα χρησιμεύει για τη λίπανση του συστήματος ρύθμισης βήματος των περυγίων.

Επίσης στα δύο άκρα D και O υπάρχει μια κωνική οπή (κωνικότητα 60°), η οποία χρησιμεύει για στήριξη του εργοτεμαχίου στον τόρνο για την κατεργασία αποπεράτωσης (φινίρισμα) μεταξύ κέντρων (πόντα-πόντα).

Κεφάλαιο 4

4.1 Στοχαστική Προσομοίωση

4.1.1 Περιγραφή του Αλγορίθμου Προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση του αλγορίθμου στοχαστική προσομοίωσης, που βασίζεται στη θεωρία και στους υπολογισμούς των δυο προηγούμενων κεφαλαίων. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος έχει δυο βασικούς σκοπούς, πρώτον, να απαντήσει στο ερώτημα πόση είναι η διάρκεια ζωής του εδράνου κύλισης και δεύτερον πόση ενέργεια θα παραχθεί από την Α/Γ μέχρι να επέλθει η αστοχία του εδράνου. Ο αλγόριθμος επίλυσης παρουσιάζεται αναλυτικά υπό μορφή λογικού διαγράμματος (σχήμα 4.1) και υλοποιήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του προγράμματος MATLAB.

Αρχικά γίνεται η εισαγωγή των προς επεξεργασία δεδομένων τα οποία χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- τα δεδομένα που αναφέρονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά της Α/Γ
- τα δεδομένα που αναφέρονται στο αιολικό δυναμικό της περιοχής ενδιαφέροντος
- τα δεδομένα που αφορούν στην προσομοίωση (συχνότητα δειγματοληψίας)

Αναλυτικά τα δεδομένα που απαιτούνται, για να είναι εφικτή η εκτέλεση του αλγορίθμου, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 4.1).

Σύμβολα	Επεξήγηση	Μονάδες
Pt	Ονομαστική ισχύς Α/Γ	KW
V _C	Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας	m/s
V _R	Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	m/s
V _O	Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας	m/s
d	Διάμετρος πτερυγίων	m
H ₀	Ύψος στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις	m
H _r	Ύψος αναγωγής	m
c ₀	Παράμετρος κλίμακας στο ύψος του ανεμόμετρου	-
k ₀	Παράμετρος μορφής στο ύψος του ανεμόμετρου	-
a	Συντελεστής τραχύτητας	-
s	Αριθμός επαναλήψεων	-

Πίνακας 4.1 Δεδομένα του αλγορίθμου

Η συχνότητα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 20 δευτερόλεπτα, που είναι η μεγαλύτερη δυνατή χρονική διάρκεια που μπορεί να έχει η ταχύτητα του ανέμου και να θεωρείται ριπή. Έτσι, με συχνότητα δειγματοληψίας 20 δευτερολέπτων είναι δυνατός ο εντοπισμός και η καταγραφή των ριπών ανέμου. Μικρότερη συχνότητα δειγματοληψίας αυξάνει κατά πολύ τον υπολογιστικό φόρτο και το χρόνο προσομοίωσης χωρίς να βελτιώνει σημαντικά τα αποτελέσματα για αυτό και έχει αποφευχθεί. Επομένως, για την προσομοίωση μιας ώρας απαιτούνται 180 επαναλήψεις (3600sec/20sec), μιας ημέρας 4320 επαναλήψεις (24*180) και για ένα μήνα ανάλογα με τον αριθμό των ημερών έχει αντίστοιχο αριθμό επαναλήψεων (π.χ ο Ιανουάριος έχει 31*4320 επαναλήψεις).

Εν συνεχεία, αφού εισαχθούν τα δεδομένα ακολουθεί η εκτέλεση του αλγορίθμου με την ολοκλήρωση του οποίου υπολογίζονται οι ακόλουθες παράμετροι (πίνακας 4.2).

Σύμβολα	Επεξήγηση	Μονάδες
c	παράμετρος κλίμακας στο ύψος αναγωγής	-
k	παράμετρος μορφής στο ύψος αναγωγής	-
g	ριπές ανέμου	m/s
C _p	αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης	-
P _t	ωφέλιμη ισχύς που παράγει η Α/Γ	KW
n _o	βαθμός απόδοσης Α/Γ	-
E	παραγόμενη ενέργεια	KWh
w	λόγος ταχυτήτων	-
F _a	αξονική φόρτιση του εδράνου	KN
P	δυναμικά ισοδύναμη φόρτιση	KN
L _h	ονομαστική διάρκεια ζωής	h
M	συσσωρευμένη βλάβη	h ⁻¹
T	διάρκεια ζωής του εδράνου	χρόνια

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα αλγορίθμου

4.1.2 Γεννήτρια τυχαίων αριθμών

Στη συγκεκριμένη στοχαστική προσομοίωση απαιτείται η παραγωγή τυχαίων αριθμών που ακολουθούν την κατανομή Weibull. Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών (random number generators) που χρησιμοποιήθηκε είναι η $x = wblrnd(c,k)$ και βρίσκεται στη βιβλιοθήκη του προγράμματος MATLAB

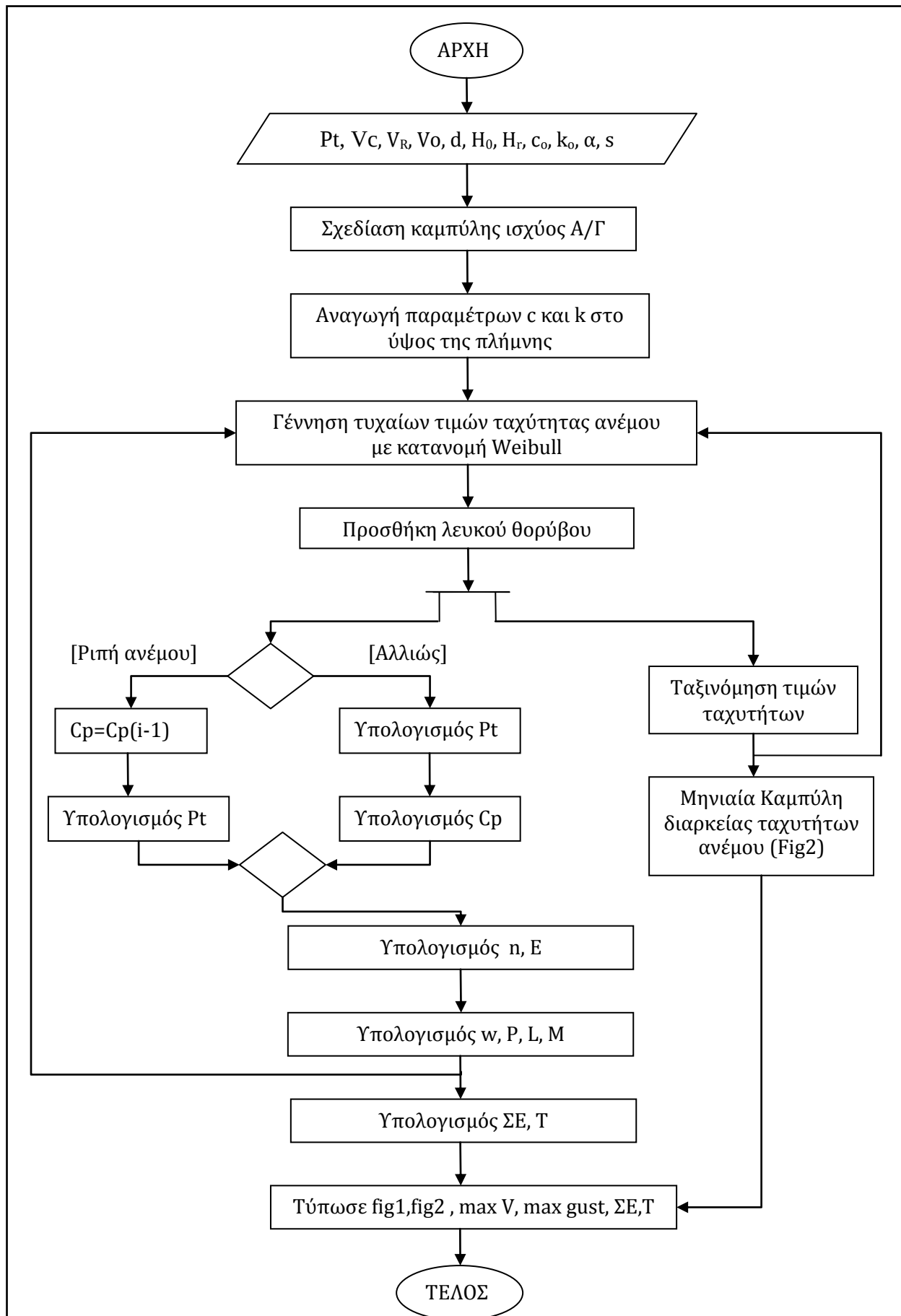
Η συνάρτηση παίρνει ως δεδομένα την παράμετρο μορφής «k» και κλίμακας «c» (στο ύψος της πλήμνης από το έδαφος) και επιστρέφει μια τυχαία τιμή x η οποία αντιπροσωπεύει την ένταση του ανέμου. Για προσομοίωση των τιμών του ανέμου, στις τυχαίες τιμές που δίνει η γεννήτρια προστέθηκε λευκός θόρυβος με μέση τιμή μηδέν και διασπορά 0,3. Ο λευκός θόρυβος λειτουργεί ως διορθωτικός συντελεστής στις τιμές που δίνει η γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Σφάλματα τα οποία διορθώνει ο λευκός θόρυβος οφείλονται στους ακόλουθους παράγοντες:

- στην αξιοπιστία των δεδομένων από τα όργανα μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου
- στην προκαλούμενη επιβράδυνση του ανέμου από τον πυλώνα στήριξης των ανεμομέτρων (αφορά ταχύτητες ανέμου που ρέουν από τον πυλώνα προς το ανεμόμετρο)
- σε τυχόν εμπόδια που βρίσκονται στην περιοχή και δε συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς

Ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων «k» και «c» της κατανομής Weibull, η γεννήτρια τυχαίων αριθμών δίνει διαφορετικές τιμές, οι οποίες παρουσιάζονται υπό μορφή ιστογράμματος που ονομάζεται καμπύλη διάρκειας (duration curve) ταχυτήτων ανέμου ή κατανομή συχνότητας εμφάνισης (frequency distribution) ταχυτήτων ανέμου. Το διάγραμμα αυτό προκύπτει από την κατηγοριοποίηση των ταχυτήτων σε διαστήματα (κλάσεις).

4.1.3 Παρουσίαση αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται υπό μορφή διαγράμματος ροής Στο σχήμα 4.1, γίνεται παρουσίαση όλων των βημάτων της ροής του αλγορίθμου από την εισαγωγή των δεδομένων μέχρι την εκτύπωση των αποτελεσμάτων, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται και επεξηγούνται αναλυτικά τα σημαντικά σημεία της όλης διαδικασίας.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου

4.1.4 Ταξινόμηση των ταχυτήτων

Η ταξινόμηση των ταχυτήτων του ανέμου σε πέντε διαφορετικές κατηγορίες (σχήμα 4.2) είναι απαραίτητη για τον περαιτέρω υπολογισμό της ισχύος της Α/Γ, του αεροδυναμικού βαθμού απόδοσης και της παραγόμενης ενέργειας. Ο λόγος που είναι απαραίτητη η κατηγοριοποίηση αυτή είναι γιατί η Α/Γ δε συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο για όλες τις τιμές ταχυτήτων.

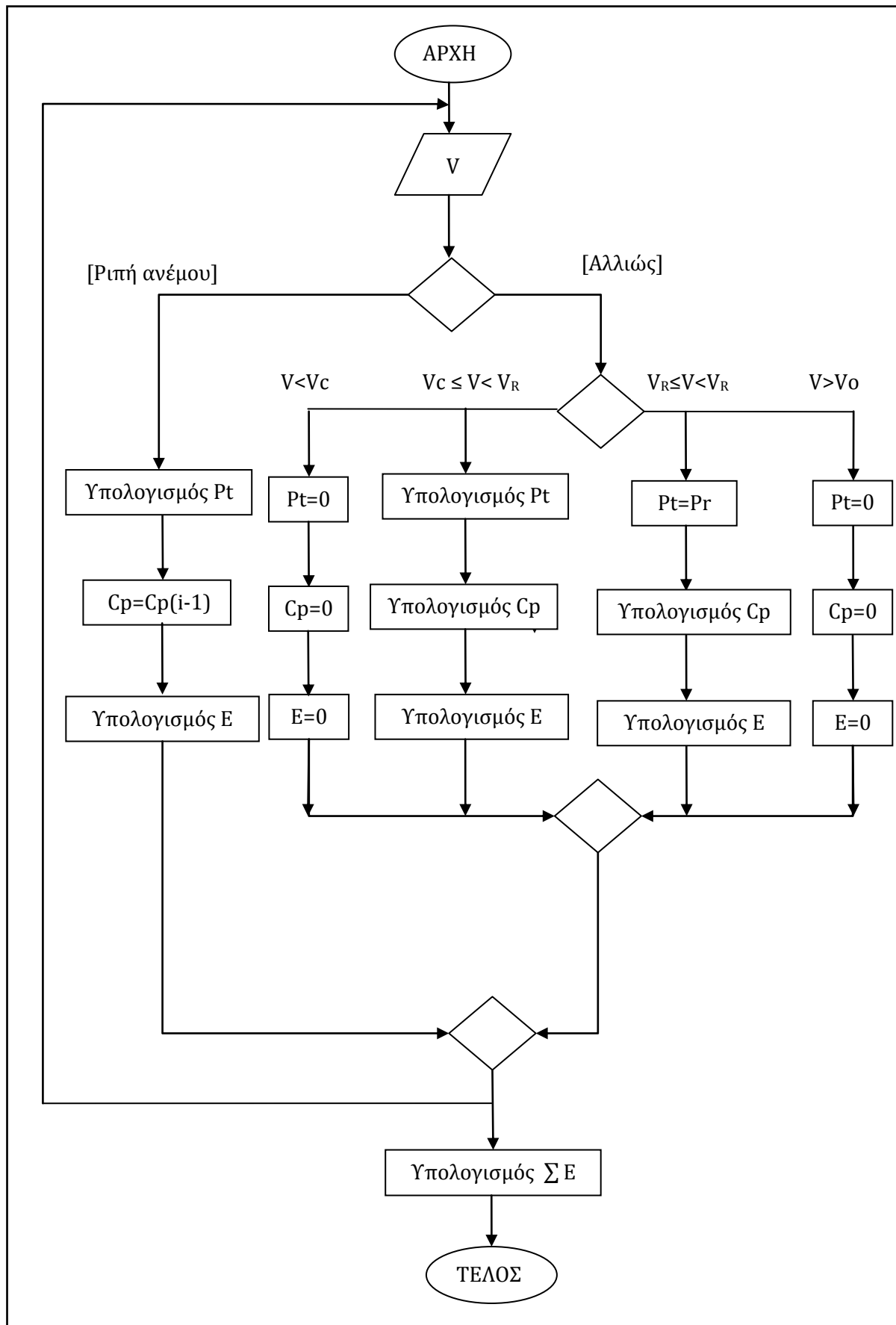
Για τιμές ταχύτητας V μικρότερες της ταχύτητας έναρξης λειτουργίας (V_c) και μεγαλύτερες της ταχύτητας διακοπής λειτουργίας (V_o), η Α/Γ δεν παράγει ωφέλιμη ισχύ και άρα ούτε ηλεκτρική ενέργεια. Στον αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης, για ταχύτητες $V < V_c$ δόθηκε η τιμή 0,38 που αντιστοιχεί σε ταχύτητα $V=4$ m/s, τη μικρότερη δηλαδή ταχύτητα στην οποία μπορεί να υπολογιστεί ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης. Με το ίδιο σκεπτικό για ταχύτητες $V > V_o$ δόθηκε η τιμή 0,043, η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα $V=25$ m/s. Ωφέλιμη ισχύς και παραγωγή ενέργειας υπάρχει όταν η τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι στο πεδίο τιμών $V_c \leq V \leq V_o$. Αναλυτικά οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ισχύος της Α/Γ, του αεροδυναμικού βαθμού απόδοσης, και της παραγόμενης ενέργειας φαίνονται στον πίνακα 4.3.

	Ισχύς Α/Γ P_t (KW)	Αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης C_p	Παραγόμενη ενέργεια E
$V < V_c$	0	0.38	0
$V_c \leq V < V_R$	$Pr \frac{V^n - V_c^n}{V_R^n - V_c^n}$	$\frac{8Pt}{\rho \pi d^2 n_o V^3}$	$E = \left(\frac{20}{3600} \right) Pt$
$V_R \leq V \leq V_o$	$Pt = Pr$	$\frac{8Pr}{\rho \pi d^2 n_o V^3}$	$E = \left(\frac{20}{3600} \right) Pr$
$V > V_o$	0	0.043	0
Ριπή ανέμου	$c_p n_m n_{el} \frac{1}{2} \rho_a V^3$	$C_p = C_p(i - 1)$	$E = \left(\frac{20}{3600} \right) Pt$

Πίνακας 4.3 Υπολογισμοί για διάφορα εύρη ταχυτήτων

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας σε κιλοβατώρες (KWh) πρέπει να μετατραπεί ο χρόνος σε ώρες. Αυτό επιτυγχάνεται διαιρώντας τη συχνότητα δειγματοληψίας (20sec) με τα 3600 δευτερόλεπτα που διαθέτει μία ώρα (20 sec/3600sec)

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση της εμφάνισης ριπής ανέμου. Η ριπή ανέμου σύμφωνα με τον ορισμό έχει πολύ μικρή χρονική διάρκεια η οποία δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη των 20 δευτερόλεπτων. Λόγω του μικρού αυτού χρονικού διαστήματος που διαρκεί η ριπή, η Α/Γ έστω και αν διαθέτει σύστημα ρύθμισης του βήματος του περυγίου είναι αδύνατο να μεταβάλει κατάλληλα την κλίση των πτερυγίων και να αξιοποιήσει την ενέργεια του ανέμου στον καλύτερο δυνατό βαθμό (ελαχιστοποίηση καταπονήσεων). Έτσι, σε περίπτωση ριπής θεωρείται ότι το σύστημα ρύθμισης του βήματος παραμένει αδρανές και ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης είναι ο ίδιος με αυτόν που είχε τα αμέσως προηγούμενά 20 δευτερόλεπτα (υπενθυμίζεται ότι η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 20 δευτερόλεπτα).



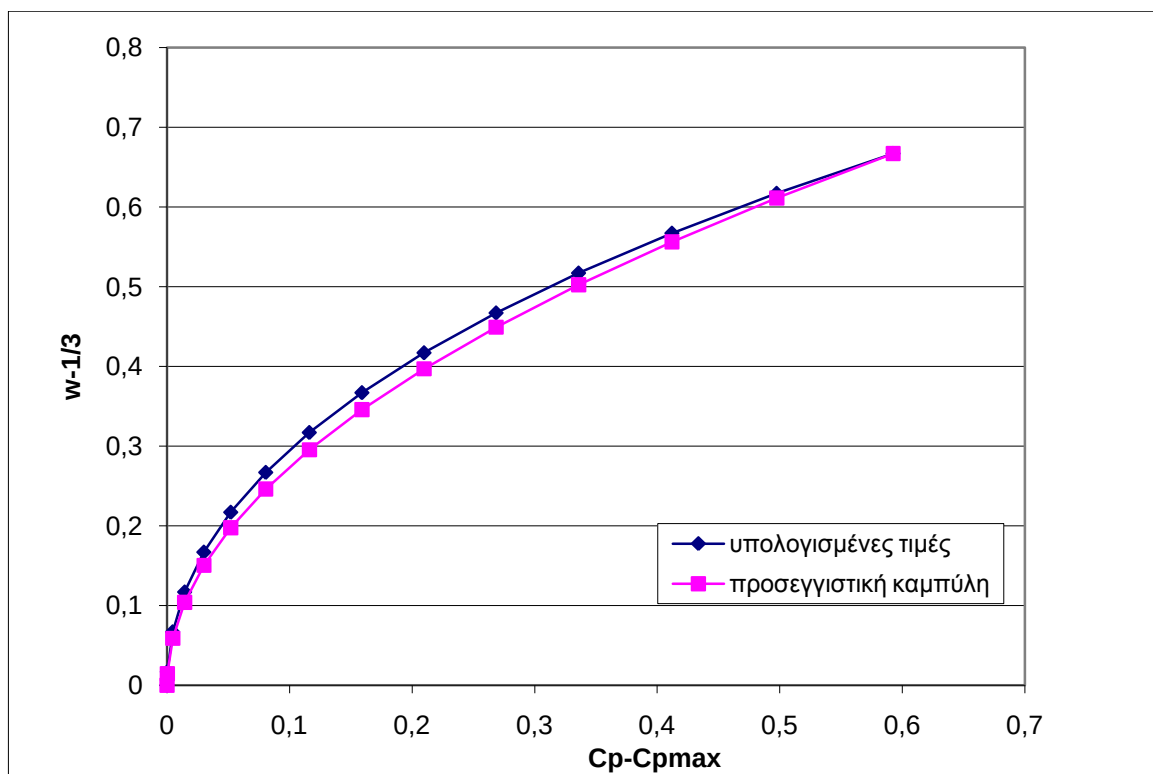
Σχήμα 4.2 Αλγόριθμος ταξινόμησης των ταχυτήτων

4.1.5 Υπολογισμός w

Για να παραμείνουν απλές οι αλγεβρικές πράξεις ορίστηκε με το σύμβολο w ο λόγος της ταχύτητας του ανέμου στα κατάντι προς την ταχύτητα του ανέμου στα ανάντι. Έτσι ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης C_p ο οποίος έχει υπολογιστεί ισούται με την τριτοβάθμια εξίσωση:

$$C_p = \frac{1}{2}(1 - w^2)(1 + w) \quad 4.1$$

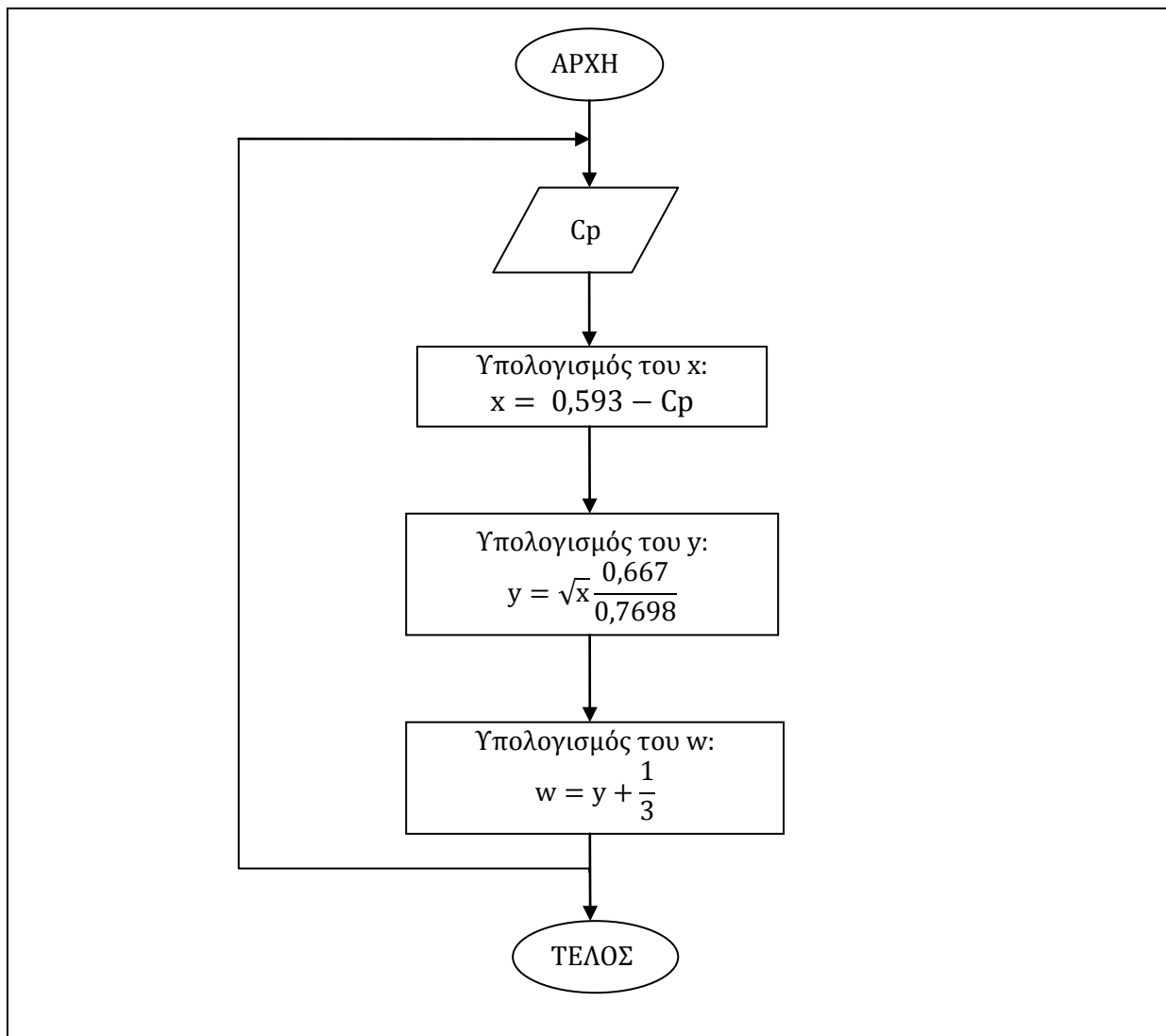
Η λύση της εξίσωσης δίνει τρεις τιμές στο w εκ των οποίων σύμφωνα με την θεωρία (παράγραφος 3.3) πρέπει να είναι θετικές και να μην υπερβαίνουν το $1/3$. Η επίλυση αυτής της εξίσωσης επιφέρει μεγάλο υπολογιστικό φόρτο με αποτέλεσμα η εκτέλεση του αλγορίθμου να απαιτεί αρκετό χρόνο. Για το λόγο αυτό, επιλύθηκε η εξίσωση για τιμές ταχυτήτων 3m/s μέχρι 25m/s ($V_c \leq V \leq V_o$) και υπολογίστηκε το αντίστοιχο για κάθε ταχύτητα C_p και w σύμφωνα με τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν. Επίσης στη θεωρία αναφέρεται ότι η μέγιστη τιμή του $C_p=0,593$ και αντιστοιχεί σε $w = 1/3$. Με βάση αυτά τα δεδομένα σχεδιάστηκε η καμπύλη που φαίνεται στο *σχήμα 4.3*



Σχήμα 4.3 Καμπύλη του C_p συναρτήσει του w

Η μορφή της καμπύλης που σχεδιάστηκε με βάση τις υπολογισθείσες τιμές $C_p - C_{pmax}$ (άξονας x) και $w - 1/3$ (άξονας y) έχει μορφή η οποία προσεγγίζεται ικανοποιητικά από την καμπύλη της εξίσωσης $\sqrt{x}$.

Για κάθε ταχύτητα είναι γνωστό το C_p και αυτό που πρέπει να υπολογιστεί είναι το αντίστοιχο w και πιο συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή του w . Ο αλγόριθμος που οδηγεί στον υπολογισμό του μέγιστου w παρουσιάζεται στο *σχήμα 4.4*.



Σχήμα 4.4 Αλγόριθμος υπολογισμού w

Για απλοποίηση της αλγοριθμικής διαδικασίας υπολογισμού του w με κατάλληλες αντικαταστάσεις προκύπτει ότι

$$w = \sqrt{(0,593 - C_p)} \frac{0,667}{0,7698} + \frac{1}{3} \quad 4.2$$

Με την εφαρμογή της εξίσωσης (4.2) είναι δυνατός ο υπολογισμός του μέγιστου w χωρίς να χρειάζεται σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου να λύνεται η τριτοβάθμια εξίσωση, να υπολογίζονται οι τρεις ρίζες και στη συνέχεια να γίνεται επιλογή της μεγαλύτερης. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται κατά πολύ ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου σε κάθε επανάληψη. Αυτή η βελτίωση έχει πολύ μεγάλη σημασία γιατί ο αριθμός των επαναλήψεων για την προσομοίωση ενός έτους είναι πολύ μεγάλος.

4.1.6 Υπολογισμός Fa, P, Lh

Αφού πρώτα έχουν υπολογιστεί το Cp και w για κάθε τιμή της ταχύτητας υπολογίζεται η ώση F, η δυναμικά ισοδύναμη φόρτιση P και η ονομαστική διάρκεια ζωής του εδράνου Lh σε ώρες λειτουργίας.

Ωση F	$F = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^2 (1 - w^2)$	KN
Δυναμικά ισοδύναμη φόρτιση	$P = F_r + YF_a \quad \text{για} \quad \frac{F_a}{F_r} \leq e$ $P = 0,67F_r + YF_a \quad \text{για} \quad \frac{F_a}{F_r} > e$	KN
Ονομαστική διάρκεια ζωής	$L_h = \frac{1,667 * 10^4 C^{10/3}}{nP^{10/3}}$	h

Πίνακας 4.4 Πίνακας υπολογισμού

4.1.7 Ονομαστική διάρκεια ζωής εδράνου

Με τον κανόνα του Miner υπολογίζεται η διάρκεια ζωής του εδράνου κύλισης. Για κάθε τιμή της ταχύτητας υπολογίζεται μια τιμή.

Κάθε s επαναλήψεις του αλγορίθμου συσσωρεύεται βλάβη M. Μετά από T χρόνια, όταν η συσσωρευμένη βλάβη $T \times M$ γίνει ίση με 1,0 το έδρανο κύλισης αναμένεται να αστοχήσει. Επομένως ο χρόνος ζωής του εδράνου θα είναι $T=1/M$.

Η βλάβη M που συσσωρεύεται σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται με τη σχέση:

$$M = \frac{1}{sL_h} \quad 4.3$$

Δηλαδή σε κάθε επανάληψη (1 επανάληψη = 20sec), θεωρούμε ότι το έδρανο υπόκειται σε ένα κύκλο φόρτισης. Η συσσωρευμένη βλάβη είναι ίση με το πηλίκο του ενός κύκλου φόρτισης ως προς το γινόμενο του συνολικού αριθμού επαναλήψεων με την ονομαστική διάρκεια ζωής του εδράνου. Η διάρκεια ζωής του εδράνου σε κάθε επανάληψη εξαρτάται από την τιμή που δίνει η κατανομή weibull, η οποία αντιπροσωπεύει την ένταση του ανέμου σε m/s.

Η διάρκεια ζωής του εδράνου σε ώρες λειτουργίας προκύπτει από τη σχέση:

$$T = \frac{1}{\sum M} \quad 4.4$$

και διαιρώντας τη διάρκεια ζωής T με τις 8760 ημέρες που έχει ένας χρόνος, εκτιμάται πόσα χρόνια θα λειτουργήσει το συγκεκριμένο έδρανο με βάση τις ανεμολογικές συνθήκες που επικρατούν στην υπό μελέτη περιοχή.

Κεφάλαιο 5

5.1.1 Αιολικό δυναμικό της Κύπρου

Οι ανεμολογικές συνθήκες στην Κύπρο επηρεάζονται από τρεις βασικούς παράγοντες:

- τις υφέσεις και τους αντικυκλώνες που μετακινούνται από δυτικά προς ανατολικά και διέρχονται πάνω από το νησί, καθώς επίσης και από τις επιδράσεις του Σιβηρικού ανακυκλώνα κατά τη χειμερινή περίοδο και το χαμηλό βαρομετρικό που δημιουργείται στην περιοχή των Ινδιών και εκτείνεται μέχρι την Κύπρο κατά την καλοκαιρινή περίοδο.
- τις μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας που δημιουργούνται μεταξύ της ξηράς και της θάλασσας (θαλάσσιες και απόγειες αύρες).
- την επίδραση της τοπογραφίας και του ανάγλυφου της κάθε περιοχής με ενδεχόμενο την ενδυνάμωση των ρευματογραμμών και την ανάπτυξη τοπικών συστημάτων ανέμων (αναβατικοί και καταβατικοί άνεμοι).

Στην Κύπρο υπάρχουν αρκετές περιοχές με αρκετά υψηλές ταχύτητες ανέμου, οι οποίες είναι κατάλληλες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι περιοχές του νησιού που διαθέτουν πλούσιο αιολικό δυναμικό βρίσκονται κυρίως στην επαρχία Λεμεσού και Πάφου, δηλαδή στα νοτιοδυτικά παράλια της Κύπρου και σε μερικές εσωτερικές περιοχές που βρίσκονται στις κορυφές διαφόρων υψωμάτων, όπως τα υψώματα της Αθαλάσσας και του Άρονα.[13]

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί το σενάριο αντικατάστασης των εδράνων κύλισης των Α/Γ ενός αιολικού πάρκου που σχεδιάζεται να κατασκευαστεί στην περιοχή Καντού, πλησίον του φράγματος του Κούρρη [Παράρτημα Γ]. Ο σχεδιασμός του πάρκου προβλέπει την εγκατάσταση τεσσάρων Α/Γ ονομαστικής ισχύος 1500KW.[39]

5.1.2 Μετρήσεις Ταχύτητας και Διεύθυνσης Ανέμου

Οι μετρήσεις της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου αποτελούν την αφετηρία αξιολόγησης του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής ενδιαφέροντος. Μια πρώτη εκτίμηση του αιολικού δυναμικού για την περιοχή Καντού πάρθηκε από τα ανεμολογικά στοιχεία, τα οποία προέκυψαν από τη στατιστική ανάλυση της ταχύτητας του ανέμου που πραγματοποίησε η Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου (Μ.Υ.Κ). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μετεωρολογικής υπηρεσίας η τοπογραφία της περιοχής του φράγματος του Κούρρη επηρεάζει την ταχύτητα του ανέμου και συντείνει στη δημιουργία τοπικών ανέμων. Έτσι κατά τη διάρκεια της ημέρας δημιουργούνται αναβατικοί άνεμοι, ενώ κατά την διάρκεια της νύκτας δημιουργούνται καταβατικοί άνεμοι, οι οποίοι ενισχύονται σημαντικά από τη διαφορά του υψομέτρου που υπάρχει κατά μήκος της ροής του ανέμου.

Ο μετεωρολογικός σταθμός από τον οποίον πάρθηκαν τα δεδομένα απέχει από την ακτή της θάλασσας 6,4 Km και βρίσκεται σε ύψος 180m [Παράρτημα Γ]. Διαθέτει για την καταγραφή της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου ένα μηχανικό ανεμογράφο που είναι εγκατεστημένος σε ύψος 7m, και η περίοδος των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν είναι από το 1990-1992. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η χρονική διάρκεια μετρήσεων δεν μπορεί να είναι

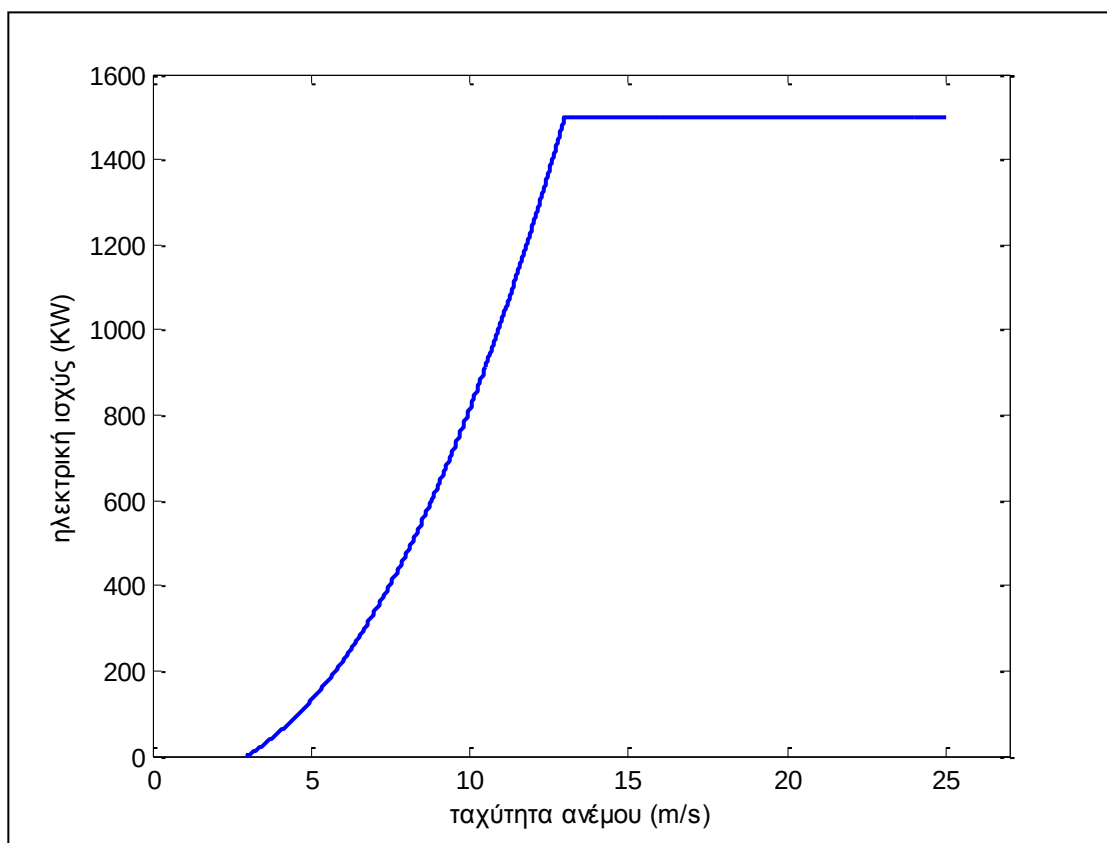
μικρότερη του ενός έτους, ενώ οι μετρήσεις περισσότερων ετών προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την ενεργειακή συμπεριφορά των μηχανών στη διάρκεια ζωής τους. [13]

Για την περίπτωση του αιολικού πάρκου του φράγματος του Κούρρη οι Α/Γ που πρόκειται να εγκατασταθούν θα έχουν ονομαστική ισχύ 1500KW. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά μιας Α/Γ αυτής της τάξης ισχύος φαίνονται στο πίνακα:

Ονομαστική ισχύς (P_r)	1500 Kw
Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας (V_C)	3 m/s
Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου (V_R)	13 m/s
Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας (V_O)	25 m/s

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά Α/Γ

Στο σχήμα 5.1, παρουσιάζεται η μορφή της καμπύλης παραγόμενης ισχύος της υπό μελέτη Α/Γ 1500KW, μεταβλητού βήματος περυγίου, συναρτήσεως της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου. Οι Α/Γ μεταβλητού βήματος χρησιμοποιούν τη δυνατότητα της κλίσης των περυγίων έτσι ώστε σε υψηλές ταχύτητες ανέμου η αποδιδόμενη ισχύς να μην υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας.



Σχήμα 5.1 Καμπύλη ισχύος Α/Γ 1500KW

Η περιοχή στην οποία θα κατασκευαστεί το αιολικό πάρκο είναι δασώδης με πυκνή βλάστηση και ο συντελεστής τραχύτητας ορίστηκε $\alpha=0,25$.

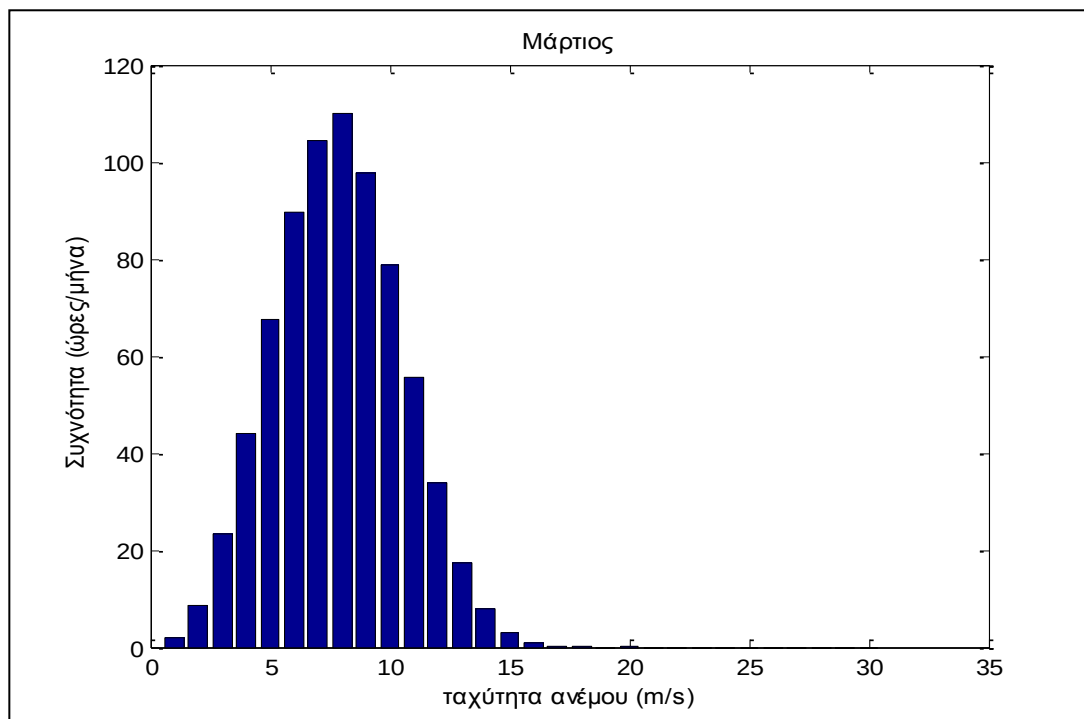
Οι παράμετροι μορφής k_0 και κλίμακας c_0 ανά μήνα για τη συγκεκριμένη περιοχή έχουν υπολογιστεί από την Μ.Υ.Κ..[13] Οι παράμετροι αυτοί ισχύουν για το ύψος των 7m, το ύψος δηλαδή του ανεμογράφου.

Με βάση τα δεδομένα για τις ανεμολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και τις σχέσεις (4.2) και (4.3) υπολογίζονται οι παράμετροι κλίμακας «c» και μορφής «k» στο ύψος αναγωγής που είναι τα 85m. Αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε μήνα φαίνονται στο πίνακα 5.2.

	Ύψος ανεμόμετρου 7m		Ύψος ανεμογεννήτριας 85 m	
	c_0	k_0	c	k
Ιανουάριος	4,8	2,72	8,19	3,35
Φεβρουάριος	4,9	2,65	8,36	3,26
Μάρτιος	4,8	2,55	8,19	3,14
Απρίλιος	5,1	2,44	8,7	3,00
Μάιος	4,9	2,16	8,36	2,66
Ιούνιος	4,6	2,39	7,85	2,94
Ιούλιος	4,5	2,31	7,68	2,85
Αύγουστος	4,7	2,47	8,02	3,04
Σεπτέμβριος	5,0	2,72	8,54	3,35
Οκτώβριος	4,9	2,69	8,36	3,31
Νοέμβριος	4,9	2,76	8,36	3,40
Δεκέμβριος	4,8	2,57	8,19	3,16

Πίνακας 5.2 Παράμετροι 'c' και 'k' για την περιοχή Καντού

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η καμπύλη διάρκειας ταχυτήτων του ανέμου στα 85m (ύψος πλήμνης) για το μήνα Μάρτιο. Αναλυτικά τα αντίστοιχα διαγράμματα για όλους τους μήνες του έτους βρίσκονται στο Παράρτημα Δ.



Σχήμα 5.2 Καμπύλη διάρκειας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Μάρτιο

5.1.3 Αποτελέσματα Αλγορίθμου

Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου στην περιοχή Καντού για τη διάρκεια ενός έτους ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του αλγορίθμου για κάθε μήνα ξεχωριστά (πίνακας 5.4).

Αριθμός Επαναλήψεων	1.576.760
Χρόνος Προσομοίωσης	8760 ώρες
Αριθμός Ριπών ανέμου	58.737
Μέγιστη Ριπή Ανέμου	23,06 m/s
Συνολικά Παραγόμενη Ενέργεια	4.017.230 KWh
Ονομαστική Ενέργεια	13.140.000 KWh
Συντελεστής Χρησιμότητας	0,306
Διάρκεια Ζωής Εδράνου	21 χρόνια

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα αλγορίθμου για ένα έτος

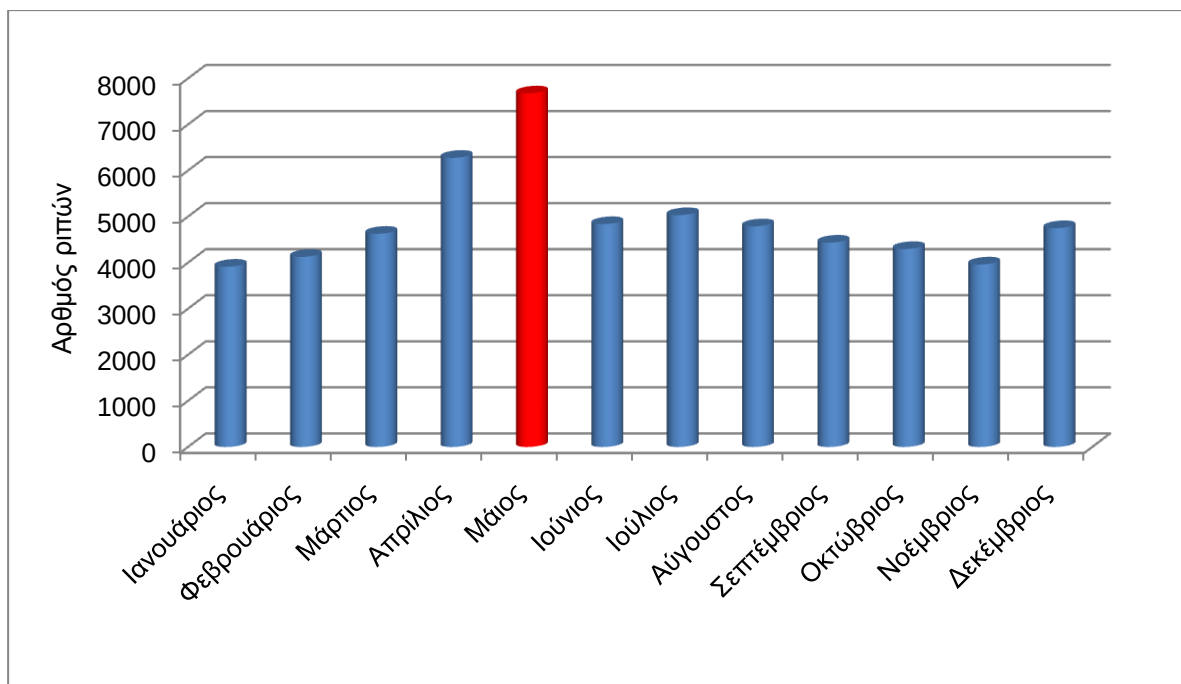
Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το έδρανο κύλισης της κύριας ατράκτου μιας Α/Γ 1500KW, η οποία θα εγκατασταθεί στην υπό μελέτη περιοχή αναμένεται να λειτουργήσει 21 χρόνια. Ο μεγάλος αυτός χρόνος λειτουργίας εξηγείται από το γεγονός ότι στην περιοχή δεν πνέουν ισχυροί άνεμοι ικανοί να το οδηγήσουν σε αστοχία σε μικρό χρονικό διάστημα λειτουργίας. Επομένως, η περιοχή αυτή είναι κατάλληλη για εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου δεδομένου ότι υπάρχει το απαραίτητο αιολικό δυναμικό για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και το οποίο είναι απαλλαγμένο από έντονες διακυμάνσεις ταχύτητας και υψηλές ριπές οι οποίες οδηγούν σε γρήγορη κόπωση τα διάφορα τμήματα της Α/Γ μεταξύ των οποίων και το έδρανο κύλισης.

Στο πίνακα 5.4, παρουσιάζονται ο χρόνος προσομοίωσης και οι υπολογισθέντες παράμετροι ανά μήνα (μέγιστη ριπή, συνολικά παραγόμενη ενέργεια, διάρκεια ζωής εδράνου κ.τ.λ), στο σχήμα 5.3, παρουσιάζεται ο αριθμός ριπών ανά μήνα, στο σχήμα 5.4, η μέγιστη ριπή ανά μήνα, στο σχήμα 5.5, η διάρκεια ζωής εδράνου ανά μήνα και στο σχήμα 5.6, το ποσοστό παραγόμενης ενέργειας ανά μήνα.

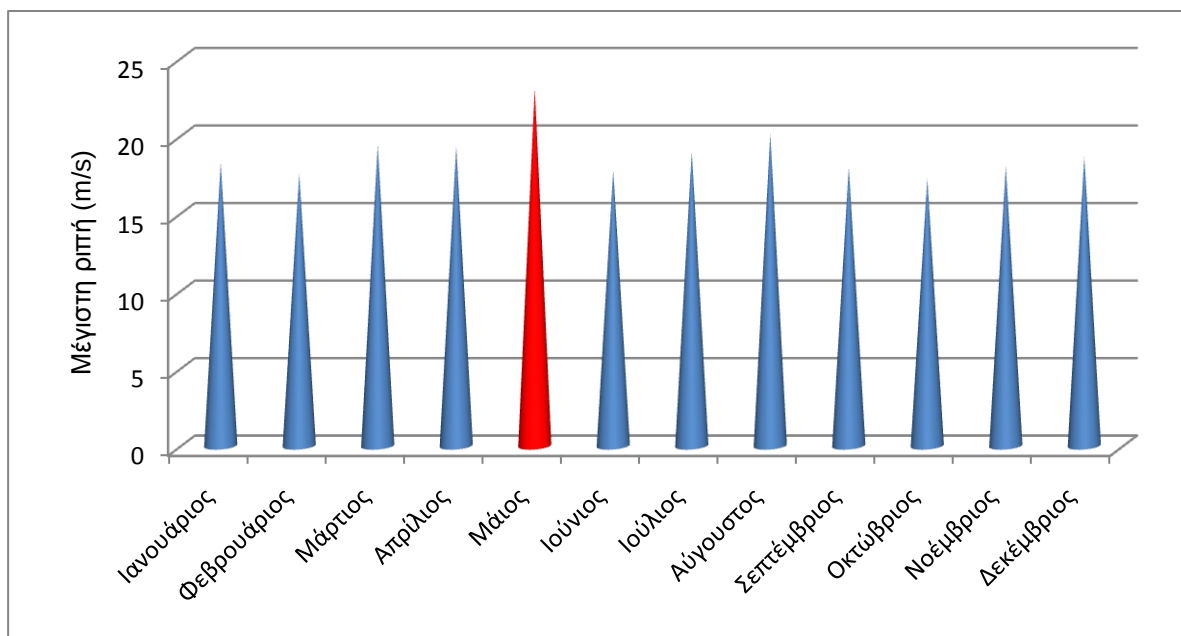
Από τα γραφήματα προκύπτει ότι ο μέγιστος αριθμός ριπών (7677 ριπές), η μέγιστη ριπή (23,06 m/s) και η μικρότερη διάρκεια ζωής (14 χρόνια) από όλους τους μήνες είναι το μήνα Μάιο ενώ ο μεγαλύτερος συντελεστής χρησιμότητας (0,348) και οι περισσότερες κιλοβατώρες (375.640 KWh) αντιστοιχούν στο μήνα Απρίλιο.

	Αριθμός Επαναλήψεων	Χρόνος Προσομοίωσης (Ωρες)	Αριθμός Ριπών ανέμου	Μέγιστη Ριπή Ανέμου (m/s)	Συνολικά Παραγόμενη Ενέργεια (KWh)	Ονομαστική Ενέργεια (KWh)	Συντελεστής Χρησιμότητας	Διάρκεια Ζωής Εδράνου (χρόνια)
Ιανουάριος	133.920	744	3914	18,28	334.690	1.116.000	0,299	24
Φεβρουάριος	120.920	672	4127	17,57	317.230	1.007.700	0,315	21
Μάρτιος	133.920	744	4629	19,42	336.500	1.116.000	0,302	22
Απρίλιος	129.600	720	6278	19,32	375.640	1.080.000	0,348	15
Μάιος	133.920	744	7677	23,06	359.180	1.116.000	0,322	14
Ιούνιος	129.600	720	4839	17,78	297.220	1.080.000	0,275	24
Ιούλιος	133.920	744	5034	18,97	292.440	1.116.000	0,262	25
Αύγουστος	133.920	744	4790	20,14	321.170	1.116.000	0,334	23
Σεπτέμβριος	129.600	720	4437	17,98	357.350	1.080.000	0,331	20
Οκτώβριος	133.920	744	4299	17,24	351.070	1.116.000	0,315	22
Νοέμβριος	129.600	720	3962	18,03	339.200	1.080.000	0,314	23
Δεκέμβριος	133.920	744	4751	18,68	335.540	1.116.000	0,301	22

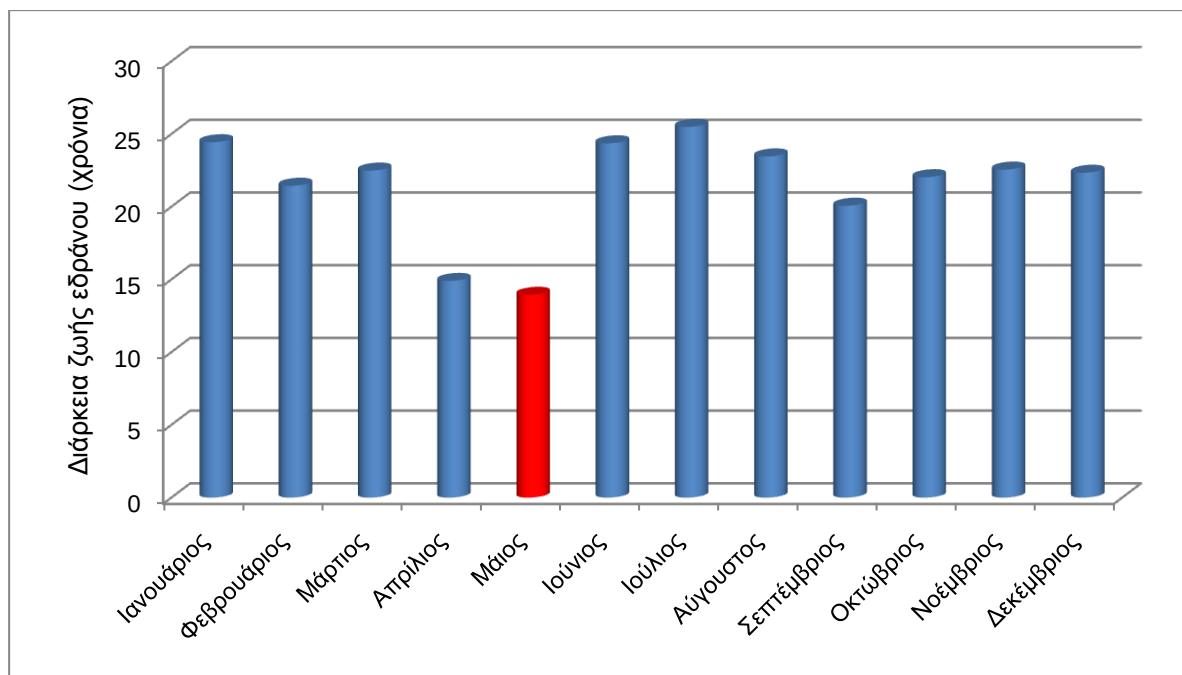
Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα αλγορίθμου ανά μήνα για την περιοχή Καντού



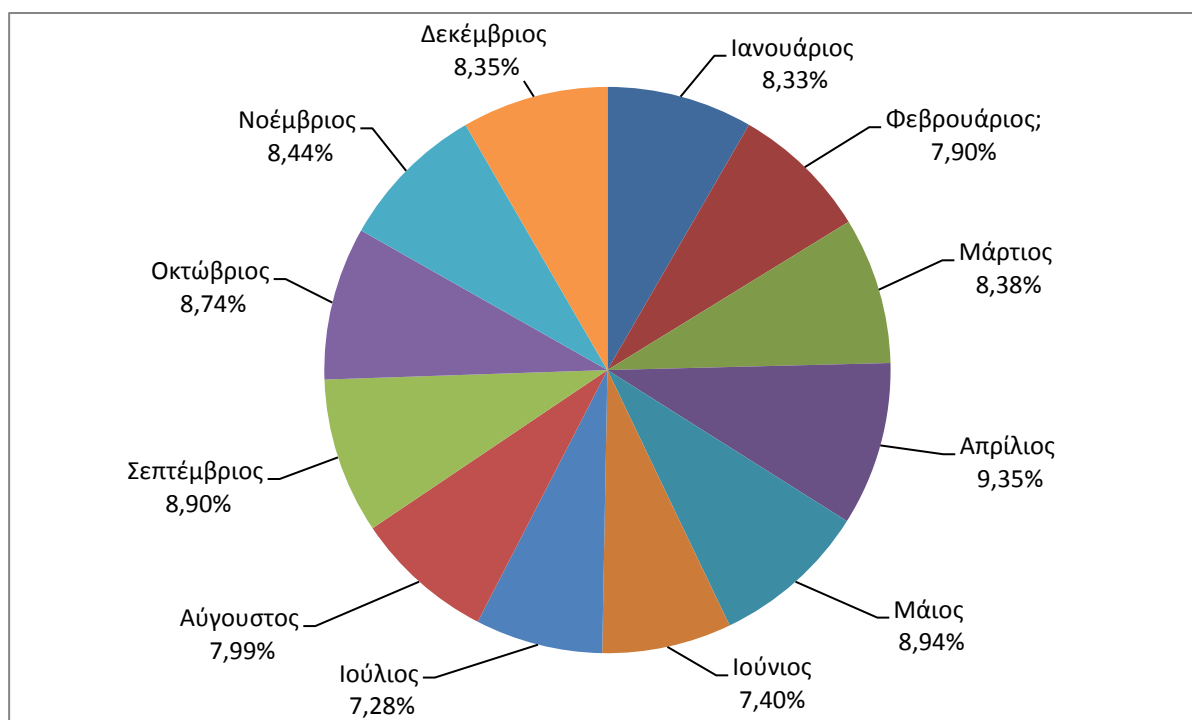
Σχήμα 5.3 Αριθμός ριπών ανά μήνα



Σχήμα 5.4 Μέγιστη ριπή ανά μήνα



Σχήμα 5.5 Διάρκεια ζωής του εδράνου ανά μήνα



Σχήμα 5.6 Ποσοστό παραγόμενης ενέργειας ανά μήνα για ένα έτος

Κεφάλαιο 6

6.1 Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας Ανεμογεννήτριας

Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας μιας Α/Γ χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- το σταθερό κόστος συντήρησης και λειτουργίας, το οποίο περιλαμβάνει το άμεσο κόστος συντήρησης, το έμμεσο κόστος συντήρησης και το κόστος ασφάλισης
- το μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας, το οποίο οφείλεται κυρίως στην αντικατάσταση βασικών τμημάτων της Α/Γ τα οποία έχουν μικρότερο χρόνο ζωής από τη συμβατική διάρκεια ζωής μιας Α/Γ

6.1.1 Διαδικασία αντικατάστασης εδράνου

Η διαδικασία αποξήλωσης του παλιού εδράνου κύλισης και η τοποθέτηση του καινούριου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί στο περιορισμένο χώρο που υπάρχει στο κέλυφος της Α/Γ. Επομένως οι εργασίες αντικατάστασης θα πρέπει να γίνουν επίγεια, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το χρόνο και το κόστος αποκατάστασης της συγκεκριμένης βλάβης.

Για την εκτέλεση των εργασιών θα χρειαστεί η βοήθεια δύο γερανών, ενός κύριου και ενός βοηθητικού. Ο κύριος γερανός θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα ανύψωσης στα 85m φορτίου 35 περίπου τόνων που είναι το βάρος του δρομέα και είναι το εξάρτημα με το μεγαλύτερο βάρος το οποίο θα πρέπει να κατέβει. Άρα, για το κατέβασμα και ανέβασμα του δρομέα θα χρησιμοποιηθεί ένας γερανός 500 τόνων, ο οποίος θα σηκώνει το κύριο βάρος και ένας βοηθητικός γερανός 95 τόνων, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί για την καθοδήγηση των πτερυγίων του δρομέα ώστε να αποφευχθεί πρόσκρουση των πτερυγίων με το έδαφος. Η άτρακτος με τα δύο έδρανα θα κατέβει και αυτή με το γερανό των 500 τόνων.

Η διαδικασία αντικατάστασης του εδράνου κύλισης περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

1. μεταφορά γερανών και εξαρτημάτων στο χώρο του αιολικού πάρκου
2. στήσιμο του κύριου γερανού (αντίβαρα, πλεκτά κ.τ.λ) με τη βοήθεια του μικρού βοηθητικού γερανού
3. κατέβασμα του δρομέα στο έδαφος
4. κατέβασμα της κύριας ατράκτου με τα έδρανα κύλισης στο έδαφος
5. αποξήλωση παλαιού εδράνου και τοποθέτηση καινούργιου (επιτόπου ή σε εργαστήριο)
6. μέτρηση σωστής τοποθέτησης
7. ανέβασμα και τοποθέτηση της κύριας ατράκτου
8. ανέβασμα και τοποθέτηση του δρομέα
9. έλεγχος σωστής λειτουργίας της Α/Γ

Ο χρόνος αποκατάστασης της συγκεκριμένης βλάβης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και γενικά μπορεί να χαρακτηριστεί μια χρονοβόρα διαδικασία. Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας θα χρειαστεί να μεταφερθεί στο αιολικό πάρκο, εκτός από το συνεργείο και τα εξαρτήματα, δύο γερανοί ο ένας εκ των οποίων είναι πολύ μεγάλου μεγέθους. Άρα, για να μειωθεί στο ελάχιστο δυνατό ο χρόνος αντικατάστασης θα πρέπει να υπάρξει σωστός συντονισμός, ώστε έγκαιρα να γίνουν οι απαραίτητες διαδικασίες και να βρίσκονται στο χώρο του αιολικού πάρκου τα μηχανήματα και τα εξαρτήματα.

Για την περίπτωση του αιολικού πάρκου στην Κύπρο χρειάζεται η προετοιμασία αυτή να γίνει αρκετούς μήνες πριν την προγραμματισμένη ημερομηνία που θα πραγματοποιηθούν οι εργασίες. Ο λόγος που χρειάζεται να γίνει αρκετά πριν είναι γιατί στην Κύπρο δεν υπάρχουν γερανοί που να έχουν τη δυνατότητα ανύψωσης 500 τόνων. Επομένως, θα πρέπει να προβούν σε κάποιες ενέργειες μεταφοράς με ειδικό φορτηγό πλοίο ενός γερανού τέτοιων δυνατοτήτων από κάποια γειτονική χώρα η οποία διαθέτει τέτοια μηχανήματα (π.χ. Ελλάδα, Ισραήλ). Επίσης πρέπει να γίνει παραγγελία του συγκεκριμένου εδράνου, γιατί αυτού του είδους έδρανα δεν έχουν ευρεία εφαρμογή, επομένως ένα τέτοιο έδρανο είναι αδύνατο να είναι άμεσα διαθέσιμο στις αποθήκες του εισαγωγέα.

Ένας άλλος βασικός παράγοντας ο οποίος μπορεί να επιφέρει μια απρόβλεπτη καθυστέρηση στην έναρξη των εργασιών είναι οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Σε περίπτωση που πνέουν δυνατοί άνεμοι είναι αδύνατη η πραγματοποίηση των εργασιών έστω και αν τα μηχανήματα και το προσωπικό είναι σε διαθεσιμότητα στο χώρο του αιολικού πάρκου.

Με ένα συντονισμένο και καλά οργανωμένο σχέδιο δράσης ο χρόνος αποκατάστασης της συγκεκριμένης βλάβης είναι περίπου 4+1 ημέρες.

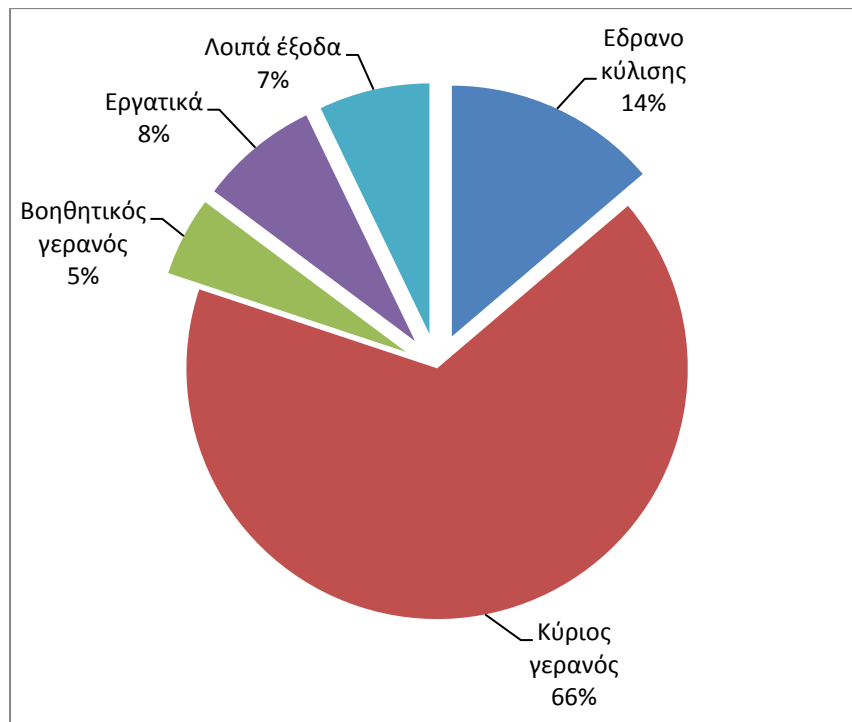
6.1.2 Συνιστώσες του κόστους

Το απαραίτητο τεχνικό προσωπικό για τις εργασίες αντικατάστασης είναι:

- 1 χειριστής και 1 βοηθός για τον κύριο γερανό
- 1 χειρίστης για το βοηθητικό γερανό
- 2 μονταδόροι εναερίτες
- 1 μηχανικός
- 5 βοηθοί

Κόστος	Περιλαμβάνει	Τιμή (ευρώ)	Συνολική Τιμή (ευρώ)
έδρανο κύλισης	αγορά		13.500
	μεταφορικά		
	παραλαβή		
	ανακύκλωση		
κύριος γερανός	μεταφορικά (ακτοπλοϊκά + οδικά)	40.000	65.000
	έξοδα λειτουργίας	25.000	
βοηθητικός γερανός	μεταφορικά (οδικά)	1.000	5.000
	έξοδα λειτουργίας	4.000	
εργατικά	μισθός + ασφάλιση	4.500	7.500
	διαμονή + διακίνηση	3.000	
λοιπά έξοδα		7.000	7.000
			98.000

Πίνακας 6.1 Συνολικό κόστος αντικατάστασης εδράνου



Σχήμα 6.1 Ποσοστιαία παρουσίαση του κόστους αντικατάστασης

6.2 Εναλλακτικές αντικατάστασης

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού της διάρκειας ζωής του εδράνου στην περιοχή Καντού, το έδρανο αναμένεται να λειτουργήσει 21 χρόνια. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι το έδρανο μιας Α/Γ λειτουργεί περίπου 13 χρόνια [18]. Επομένως υπάρχουν δυο εναλλακτικές λύσεις σχετικά με το πότε θα πραγματοποιηθεί η αντικατάσταση του εδράνου. Η πρώτη λύση είναι να αντικατασταθεί σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα μελέτη και είναι τα 21 χρόνια (εναλλακτική λύση μεθοδολογίας) και η δεύτερη είναι να αντικατασταθεί σύμφωνα με τη βιβλιογραφία μετά από 13 χρόνια λειτουργίας (εναλλακτική λύση βιβλιογραφίας).

Η αντικατάσταση μετά από 21 χρόνια λειτουργίας αντί 13 σίγουρα επιφέρει μεγαλύτερα οφέλη. Αυτή η παρατήρηση δεν είναι όμως αρκετή για να πάρει κανείς απόφαση για το πότε θα πρέπει να προχωρήσει στην αντικατάσταση του εδράνου. Για το λόγο αυτό, πρέπει να γίνει μια σύγκριση των δύο εναλλακτικών λύσεων από την οποία θα προκύψει το πραγματικό όφελος από την επιλογή της πρώτης ή δεύτερης εναλλακτικής λύσης. Για τη σύγκριση των σεναρίων θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της παρούσας αξίας (present worth).

6.2.1 Σύγκριση εναλλακτικών αντικατάστασης

Η σύγκριση των δύο εναλλακτικών λύσεων θα γίνει με την εφαρμογή της ευρύτατα διαδεδομένης μεθόδου λήψης οικονομοτεχνικών αποφάσεων, τη μέθοδο της παρούσας αξίας (PW). Με τη μέθοδο της παρούσας αξίας προσπαθούμε να προεκβάλλουμε και να υπολογίσουμε την ισοδύναμη τρέχουσα αξία, όλων των αναμενόμενων εισροών και εκροών μιας επένδυσης στο μέλλον. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία της παρούσας αξίας για την περίπτωση αντικατάστασης του εδράνου.

Παραδοχές

- αρχικό χρονικό σημείο $t=21$
- ετήσια έξοδα συντήρησης $c=0$
- πραγματικό κόστος ευκαιρίας $r=3\%$ (ονομαστικό κόστος ευκαιρίας – πληθωρισμό)
- πληθωρισμός $f=0$

Σκοπός της οικονομοτεχνικής ανάλυσης που θα υλοποιηθεί είναι η σύγκριση των δύο εναλλακτικών λύσεων. Με βάση τις δύο εναλλακτικές, το έδρανο θα λειτουργήσει τουλάχιστον 13 χρόνια (εναλλακτική βιβλιογραφίας). Επομένως πριν τα 13 χρόνια θεωρείται ότι τα δύο έδρανα θα λειτουργούν με την ίδια πιθανότητα αστοχίας και για το λόγο αυτό η περίοδος πριν τα 13 χρόνια δε μελετάται. Επίσης ο πληθωρισμός (inflation) θεωρείται μηδέν, γιατί με τον ίδιο ρυθμό μεταβάλλεται και στις εισροές (έσοδα) και στις εκροές (έξοδα). Χρησιμοποιήθηκε το πραγματικό κόστος ευκαιρίας το οποίο προκύπτει αν αφαιρεθεί ο πληθωρισμός από το ονομαστικό κόστος ευκαιρίας γιατί δεν μπορούμε να έχουμε πληροφορία για την τιμή του πληθωρισμού την χρονική περίοδο που μελετάμε. Τα ετήσια έξοδα συντήρησης δεν συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς, διότι η συντήρηση των εδράνων πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια γενικής συντήρησης της Α/Γ επομένως δεν ακινητοποιείται αποκλειστικά για τα έδρανα της κύριας ατράκτου.

Έστω ότι η αντικατάσταση του εδράνου μετά από 21 χρόνια κοστίζει 98.000 ευρώ. Για να υπολογιστεί το αντίστοιχο κόστος αν αντικατασταθεί μετά από 13 χρόνια λειτουργίας πρέπει να πολλαπλασιαστεί το ποσό των 98.000 με συντελεστή μελλοντικής συσσώρευσης μοναδικού ποσού ή πιο απλά μετασχηματιστή F/P . Ο μετασχηματιστής F/P υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F/P = (1 + r)^N \quad 6.1$$

όπου,

F/P : εύρεση του F από το P

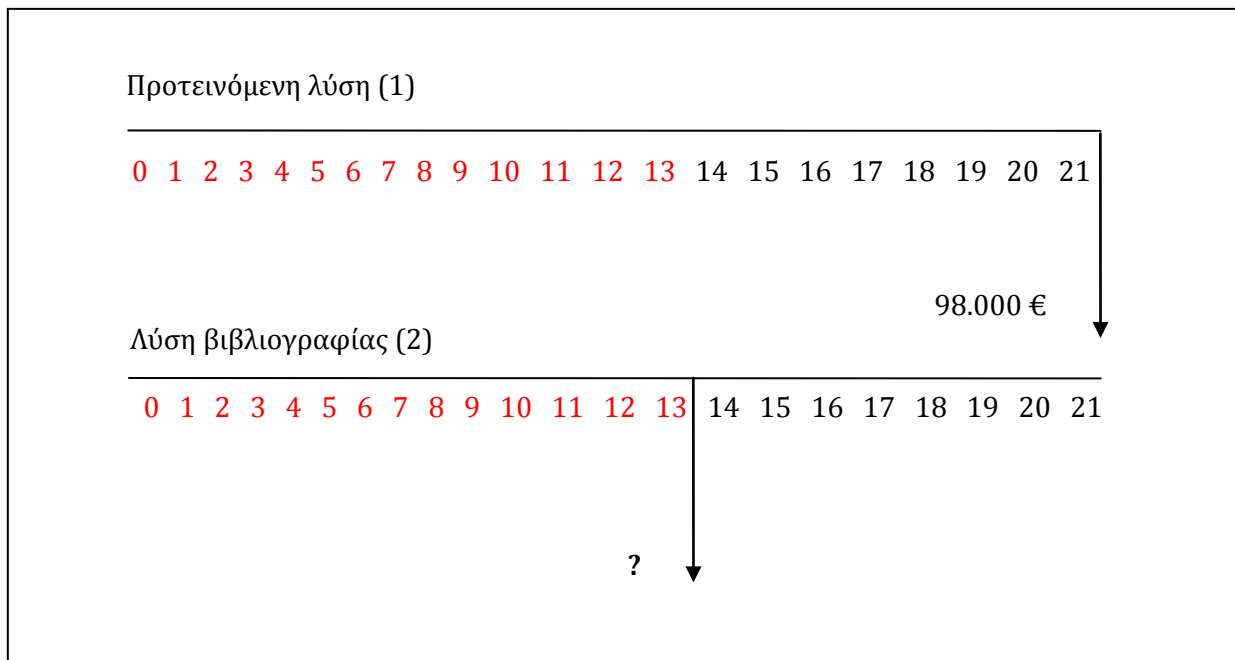
F : μελλοντική αξία ποσού στο τέλος N περιόδων επένδυσης

P : σημερινή αξία ποσού στο αρχικό χρονικό σημείο επένδυσης ($t=21$)

r : πραγματικό κόστος ευκαιρίας (%)

N : αριθμός χρονικών περιόδων (χρόνια)

Το καθαρό κόστος ευκαιρίας είναι το ονομαστικό κόστος ευκαιρίας μείον τον πληθωρισμό.



Σχήμα 6.2 Χρηματοροές των δύο εναλλακτικών λύσεων

Η χρονική περίοδος στην περίπτωση που μελετάμε είναι 8 χρόνια (21-13).

Αν για παράδειγμα, το πραγματικό κόστος ευκαιρίας είναι 3% τότε από τη σχέση 6.1 προκύπτει ότι ο μετασχηματιστής F/P για $N=8$ χρόνια είναι ίσος με

$$(F/P, 8, 3) = 1,2668$$

Η ανάλυση όπως έχουμε αναφέρει γίνεται στο χρόνο $t=21$

άρα,

$$\text{για } t=21 \quad C_1 = 98.000 \text{ ευρώ}$$

$$\text{για } t=13 \quad C_2 = 98.000 \times 1,2668 = 124.143 \text{ ευρώ}$$

όπου C_1 και C_2 είναι το κόστος αντικατάστασης στα 21 και 13 χρόνια αντίστοιχα

Η διαφορά κόστους από την αντικατάσταση στα 13 χρόνια αντί στα 21 είναι:

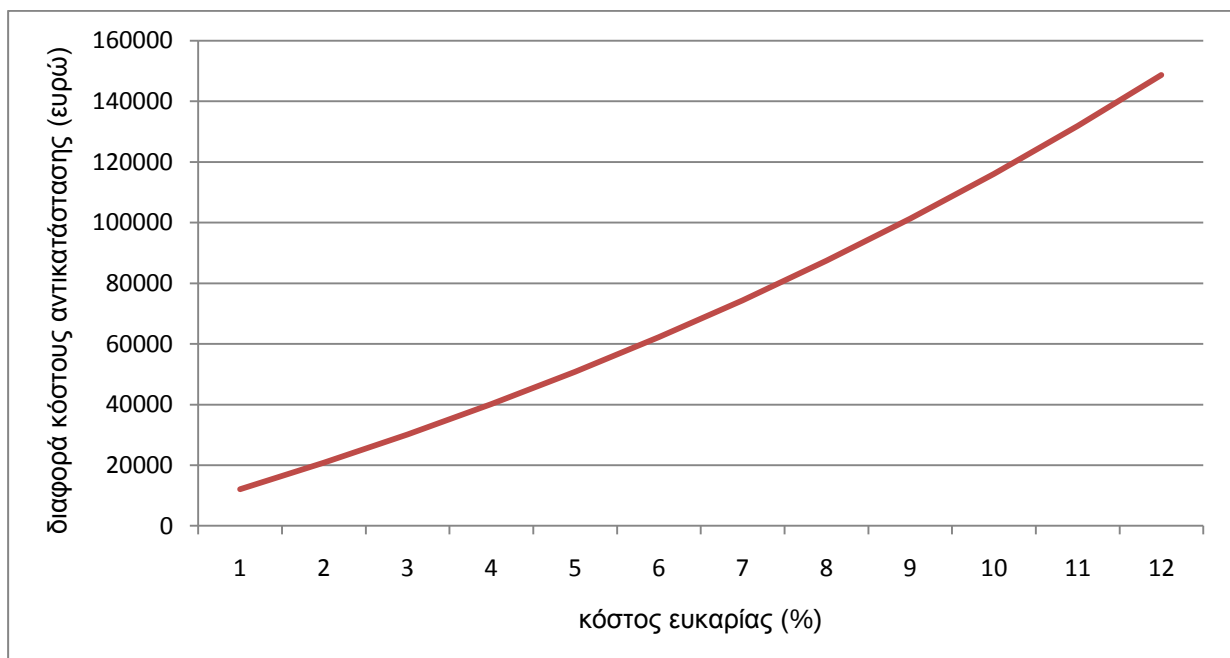
$$C_2 - C_1 = 26.143 \text{ ευρώ}$$

Αν εφαρμόσουμε την ίδια διαδικασία για διάφορα καθαρά κόστη ευκαιρίας προκύπτουν τα αποτελέσματα του πίνακα 6.2

Κόστος Ευκαιρίας (%)	Μετασχηματιστής F/P	Κόστος αντικατάστασης στα 13 χρόνια (ευρώ)	Διαφορά κόστους αντικατάστασης (ευρώ)
0,25	1,0202	99.977	5.977
0,5	1,0407	101.989	7.989
0,75	1,0616	104.037	10.037
1	1,0829	106.120	12.120
2	1,1717	114.823	20.823
3	1,2668	124.143	30.143
4	1,3686	134.120	40.120
5	1,4775	144.791	50.791
6	1,5938	156.197	62.197
7	1,7182	168.382	74.382
8	1,8509	181.391	87.391
9	1,9926	195.271	101.271
10	2,1436	210.072	116.072
11	2,3045	225.845	131.845
12	2,4760	242.644	148.644

Πίνακας 6.2 Κόστος αντικατάστασης εδράνου για διαφορετικά κόστη ευκαιρίας

Στο *σχήμα 6.1* βλέπουμε ότι η διαφορά του κόστους, αν η αντικατάσταση του εδράνου πραγματοποιηθεί στα 13 χρόνια αντί στα 21, είναι ανάλογη του καθαρού κόστους ευκαιρίας. Από την παραπάνω ανάλυση κόστους καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι αντικατάσταση του εδράνου στα 21 χρόνια αντί στα 13 που αναφέρεται στη βιβλιογραφία επιφέρει σημαντική μείωση στο κόστος αντικατάστασης.



Σχήμα 6.3 Διαφορά κόστους αντικατάστασης συναρτήσεως του κόστους ευκαιρίας

Επίσης, αν το έδρανο αντικατασταθεί στα 21 χρόνια, εκτός από το μειωμένο κόστος αντικατάστασης υπάρχει και οικονομικό όφελος από την πώληση της επιπλέον ενέργειας που παράγεται με τη χρήση του αρχικού εδράνου. Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια από μια Α/Γ

1500KW στην περιοχή Καντού υπολογίστηκε και είναι 4.017.230KWh. Σύμφωνα με το σχέδιο χορηγιών για ενθάρρυνση της ηλεκτροπαραγωγής από μεγάλα εμπορικά αιολικά συστήματα, η συνολική τιμή πώλησης της αιολικής ενέργειας είναι 0,166 ευρώ/KWh. [35]

Επομένως τα έσοδα από την παραγόμενη ενέργεια για την κάθε εναλλακτική λύση είναι:

	Χρόνος λειτουργίας (χρόνια)	Παραγόμενη Ενέργεια KWh	Έσοδα (ευρώ)
Αισιόδοξο σενάριο	21	84.361.830	14.004.064
Απαισιόδοξο σενάριο	13	52.223.990	8.669.182

Πίνακας 6.3 Απόδοση σεναρίων αντικατάστασης

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 6.3 παρατηρούμε ότι τα οκτώ επιπλέον χρόνια που θα λειτουργήσει το αρχικό έδρανο θα μας επιφέρει 5.334.882 ευρώ.

Επίσης το κόστος ανά παραγόμενη MWh του αρχικού εδράνου για τις δύο εναλλακτικές είναι:

για $t=21$

$$\frac{13.500 \text{ €}}{84.361.830 \text{ MWh}} = 0,16 \text{ €/MWh}$$

ενώ για $t=13$

$$\frac{13.500 \text{ €}}{52.223.990 \text{ MWh}} = 0,26 \text{ €/MWh}$$

6.3 Βελτιστοποίηση του Σεναρίου Αντικατάστασης

Η αντικατάσταση του εδράνου είναι επιθυμητό να πραγματοποιηθεί ακριβώς τη στιγμή της αστοχίας. Μια αλλαγή εδράνου ακριβώς τη στιγμή της αστοχίας επιφέρει τη μικρότερη οικονομική επιβάρυνση και σίγουρα αυτό είναι και το βέλτιστο σενάριο αντικατάστασης (σενάριο 0). Αυτό το σενάριο είναι πολύ δύσκολο να συμβεί, επομένως ο πραγματικός χρόνος αντικατάστασης θα είναι κάποια χρονική στιγμή πριν ή μετά την αστοχία του εδράνου. Άρα υπάρχουν δύο πιθανά σενάρια αντικατάστασης, το πρώτο είναι η αντικατάσταση να πραγματοποιηθεί πριν αστοχήσει το έδρανο (σενάριο 1) και το δεύτερο είναι η αντικατάσταση να πραγματοποιηθεί αφού αστοχήσει το έδρανο (σενάριο 2). Το κάθε ένα από αυτά τα δύο σενάρια (1 και 2) συγκρινόμενο με το σενάριο 0 παρουσιάζει κάποιο αποθετικό κόστος και κάποιο αποθετικό όφελος. Επομένως, υπάρχουν δύο πιθανά ενδεχόμενα σχετικά με τη χρονική στιγμή που θα πραγματοποιηθεί η αντικατάσταση του εδράνου και τα οποία θα εξεταστούν αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

6.3.1 Εναλλακτικές Στρατηγικές Αντικατάστασης

Σενάριο 0 Είναι το βέλτιστο σενάριο σύμφωνα με το οποίο η προγραμματισμένη αλλαγή πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή t_0 , που είναι ακριβώς η στιγμή στην οποία αστοχεί το έδρανο.

Σενάριο 1 Αλλαγή εδράνου σε κάποια χρονική στιγμή t_1 πριν αστοχήσει το έδρανο ($t_1 < t_0$)

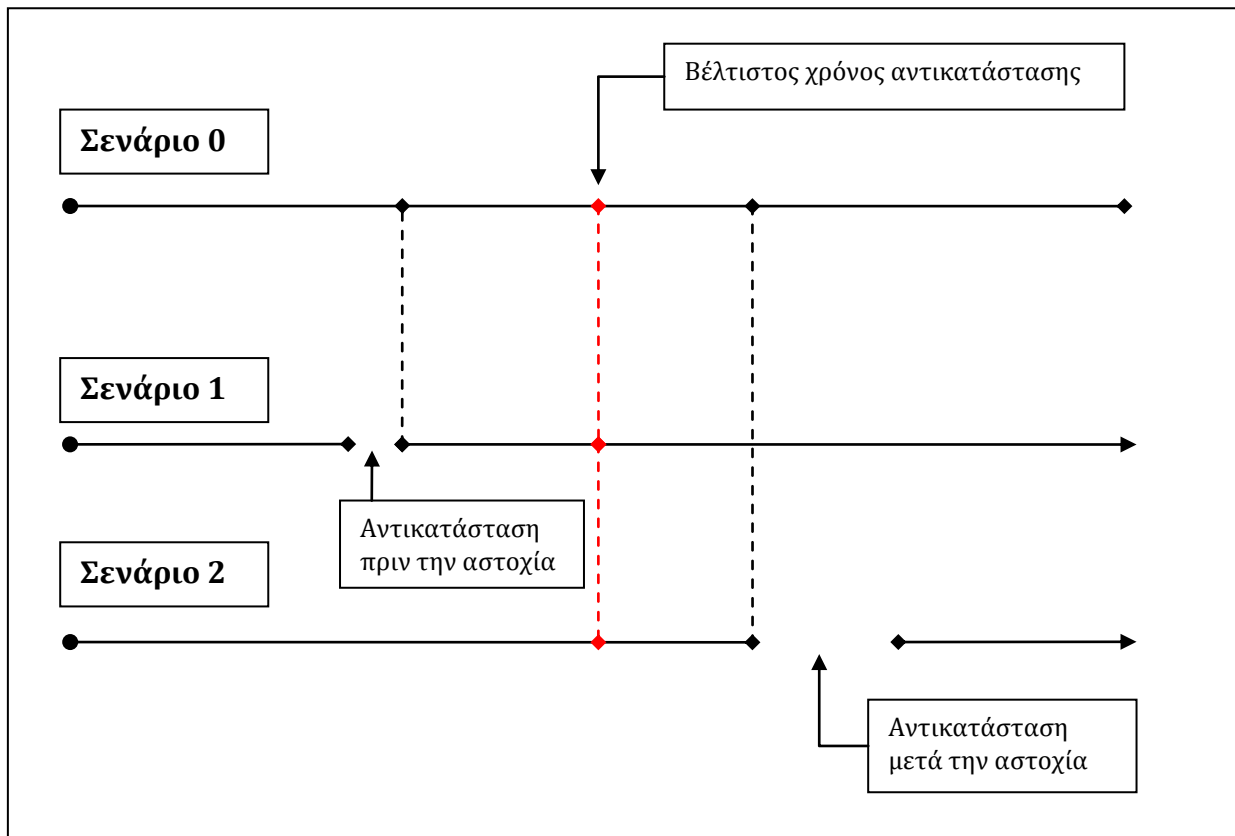
Αποθετικό όφελος

- κόστος ευκαιρίας από την πρόωρη επένδυση των χρημάτων για αντικατάσταση του εδράνου (Σχήμα 6.1)

Σενάριο 2 Αλλαγή εδράνου σε κάποια χρονική στιγμή t_2 αφού αστοχήσει το έδρανο

Αποθετικό όφελος

- Χαμένα έσοδα από τη μη λειτουργία της Α/Γ για μεγάλο χρονικό διάστημα (Σχήμα 6.1)



Σχήμα 6.4 Εναλλακτικές στρατηγικές αντικατάστασης

Αποθετικό κόστος

- Κόστος εξαιτίας της διαθεσιμότητας ενέργειας

Το συγκεκριμένο κόστος αναφέρεται στην ενέργεια η οποία λόγω της βλάβης δεν μπορεί να παραχθεί από την Α/Γ και θα πρέπει να παραχθεί από κάποιο άλλο συμβατικό σταθμό.

Κόστος αιολικής KWh

Το κόστος αγοράς μιας Α/Γ 1500KW ανέρχεται στα 1.300.000 ευρώ και η ονομαστική διάρκεια ζωής της είναι περίπου 25 χρόνια. Με πραγματικό κόστος ευκαιρίας 3% και με τη μέθοδο της ετήσιας αξίας (annual worth) κατανέμουμε το αρχικό κόστος της επένδυσης στα 25 χρόνια οικονομικής ζωής της Α/Γ.

άρα,

Κόστος A/Γ: $P_{A/\Gamma} = 1.300.000 \text{ €}$

Οικονομική ζωή A/Γ: $t_{A/\Gamma} = 25 \text{ χρόνια}$

Πραγματικό κόστος ευκαιρίας: $r = 3\%$

Το ετήσιο κόστος της αιολικής KWh δίνεται από τη σχέση:

$$A = (A/p, 25, 3) P_{A/\Gamma} \quad 6.2$$

Ο μετασχηματιστής A/P για $t_{A/\Gamma}=25$ χρόνια και $r=3\%$ είναι 0,0574 [14]

Επομένως το ετήσιο κόστος της αιολικής KWh είναι:

$$A = 0,0574 \times 1.300.000 \text{ €}$$

$$A = 74.620 \text{ €}$$

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, μια A/Γ ισχύος 1500KW εγκατεστημένη στην περιοχή Καντού παράγει ετησίως 4.017.230 KWh. Το κόστος μιας αιολικής κιλοβατώρας C_A είναι:

$$C_A = \frac{74.620 \text{ €}}{4.017.230 \text{ KWh}}$$

$$C_A = 0,02 \text{ €/KWh}$$

Κόστος συμβατικής KWh

Οι συμβατικοί σταθμοί, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στην Κύπρο, απαρτίζονται από ατμοστρόβιλους και αεριοστρόβιλους με μέσο βαθμό απόδοσης 31,928 % και μέση ειδική κατανάλωση καυσίμων 0,263 Kg/KWh. Η τιμή του καυσίμου είναι περίπου 350 €/M.T.[40]

Επομένως, το κόστος παραγωγής μιας συμβατικής κιλοβατώρας C_Σ είναι:

$$C_\Sigma = \frac{0,263 \text{ Kg/KWh} \times 350 \text{ €}}{1000 \text{ Kg}}$$

$$C_\Sigma = 0,09 \text{ €/KWh}$$

Το κόστος εξαιτίας της διαθεσιμότητας ενέργειας ισούται με την τιμή πώλησης της αιολικής κιλοβατώρας (0,166€) μειωμένη με το άθροισμα του κόστους της συμβατικής κιλοβατώρας (0,09€) και του κόστους της αιολικής κιλοβατώρας (0,02€)

$$C_\Delta = 0,14 \text{ €/KWh}$$

➤ Αύξηση του κόστους αποκατάστασης της βλάβης

Αντικατάσταση του εδράνου αφού αστοχήσει επιφέρει επιπλέον οικονομική επιβάρυνση, η οποία οφείλεται κυρίως σε βεβαιασμένες κινήσεις λόγω της έλλειψης χρόνου και του μεγάλου χρόνου ακινησίας. Έτσι, έχουμε 20% αύξηση του κόστους από την αεροπορική μεταφορά του εδράνου ($13.500 \text{ €} \times 0.20 \text{ €} = 2.700 \text{ €}$), ένα επιπρόσθετο κόστος που οφείλεται στο κόστος

διαθεσιμότητας της ενέργειας και το οποίο αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο και το κόστος το οποίο προκύπτει από τις επιπλέον εργατοώρες που θα χρειαστεί να εργαστεί το τεχνικό προσωπικό. Το κόστος διαθεσιμότητας της ενέργειας, αν θεωρήσουμε ότι η Α/Γ θα είναι ακινητοποιημένη για το χρονικό διάστημα του ενός μηνός και άρα δε θα παραχθούν 334.769KWh, θα επιφέρει επιπρόσθετο κόστος 46.868€ ($334.769\text{KWh} \times 0,14\text{€}$). Αναλυτικά τα επιπρόσθετα κόστη παρουσιάζονται στον πίνακα 6.4:

Επιπρόσθετα κόστη	Περιγραφή	Επιπλέον επιβάρυνση	Τιμή επιπλέον κόστους (€)
Βεβιασμένες κινήσεις	Αεροπορική μεταφορά	20%	2.700
	Διαθεσιμότητα γερανού Διαθεσιμότητα εδράνου	1 μήνα	46.868
	Υπερωρίες	-	-
Κόστος αποξήλωσης	“Κολλημένο” έδρανο	2 ημέρες (3 άτομα)	1.200
	Αστοχία σε άλλα τμήματα του μηχανισμού	1 εβδομάδα (3 άτομα)	2.000
	Έλεγχος αποκατάστασης		
Λοιπά έξοδα			3.000
Συνολικό κόστος			56.000

Πίνακας 6.4 Επιπρόσθετα κόστη εφόσον το έδρανο αστοχήσει

Επομένως, αντικατάσταση του εδράνου αφού αστοχήσει έχει ως αποτέλεσμα αύξηση στο κόστος το οποίο εκτιμάται περίπου στα 56.000 ευρώ. Άρα, αν η αντικατάσταση πραγματοποιηθεί αμέσως μετά την αστοχία τότε το κόστος των δύο εναλλακτικών αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό. Τα κόστη για κάθε εναλλακτική λύση φαίνονται στον πίνακα 6.5

	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Μεθοδολογία t=21 χρόνια	98.000	154.000
Βιβλιογραφία t=13 χρόνια	124.000	-

Πίνακας 6.5 Κόστη πριν και μετά την αστοχία

Η βιβλιογραφική εναλλακτική λύση η οποία αναφέρει αστοχία μετά από 13 χρόνια λειτουργίας θεωρείται πολύ αξιόπιστη, επομένως δεν προβλέπεται αστοχία πριν από αυτό το χρονικό διάστημα.

Συμπεράσματα

Οι Α/Γ κάποια χρονικά διαστήματα αδυνατούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια λόγω απρόβλεπτης διακοπής της λειτουργίας τους η οποία οφείλεται σε κάποια μηχανική βλάβη. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η διάρκεια ζωής των εδράνων κύλισης που στηρίζουν την κύρια άτρακτο της Α/Γ και τα οποία αποτελούν μέρος του συστήματος μετάδοσης κίνησης. Τα έδρανα στήριξης της ατράκτου μπορεί να μην υφίστανται συχνά βλάβη αλλά στην περίπτωση που υποστούν χρειάζεται μεγάλος χρόνος αποκατάστασης και επομένως είναι σημαντικό να υπάρχει μια εκτίμηση της διάρκειας ζωής τους, η οποία εξαρτάται άμεσα από την αξονική φόρτιση στην οποία υπόκεινται και οφείλεται στην ένταση της ταχύτητας του ανέμου. Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διάρκεια ζωής των εδράνων εκτός από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου είναι και οι ριπές ανέμου οι οποίες αν και μικρής διάρκειας προκαλούν μεγάλες καταπονήσεις.

Η σωστή εκτίμηση της διάρκειας ζωής του εδράνου έχει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη οικονομική επιβάρυνση και άρα τη μικρότερη ζημία. Αντικατάσταση μετά την αστοχία επιφέρει αύξηση του κόστους αποκατάστασης και μια επιπλέον επιβάρυνση από το κόστος παραγωγής ενέργειας με χρήση μιας άλλης συμβατικής μονάδας. Αντιθέτως, αντικατάσταση πριν την αστοχία σημαίνει πρόωγη επένδυση των χρημάτων για αποκατάσταση της βλάβης με αποθετικό όφελος το κόστος ευκαιρίας του χρήματος, το κέρδος δηλαδή που θα είχαμε αν χρησιμοποιούσαμε το συγκεκριμένο χρηματικό ποσό σε μια άλλη επένδυση.

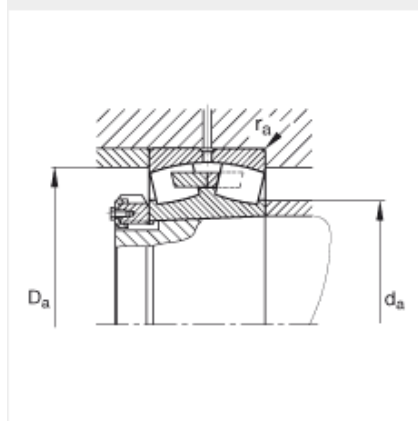
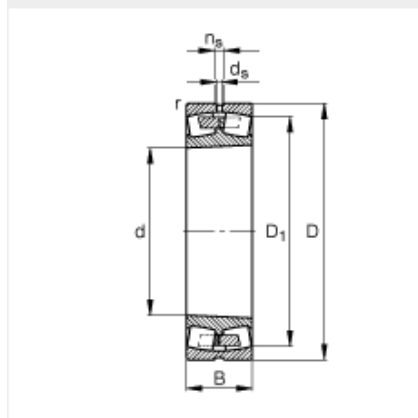
Από οικονομοτεχνική ανάλυση προκύπτει ότι αντικατάσταση του εδράνου μιας Α/Γ που είναι εγκατεστημένη στην περιοχή Καντού στα 13 χρόνια όπου θεωρείται ότι δεν θα αστοχήσει κοστίζει περίπου 124.000 ευρώ ενώ στα 21 χρόνια κοστίζει 98.000 ευρώ. Επομένως, αντικατάσταση στα 13 χρόνια επιφέρει ζημία 26.000 ευρώ και κόστος ανά παραγόμενη MWh του αρχικού εδράνου 0,26 ευρώ έναντι 0,16 ευρώ που κοστίζει αν αντικατασταθεί στα 21 χρόνια. Αν όμως η αντικατάσταση του εδράνου πραγματοποιηθεί μετά την αστοχία του τότε υπάρχει ένα επιπλέον κόστος αντικατάστασης περίπου 56.000 ευρώ και αρα συνολικό κόστος 154.000 ευρώ.

Η μεθοδολογία η οποία αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία δίνει μια πρώτη εκτίμηση για τη διάρκεια ζωής του εδράνου με βάση τις ανεμολογικές συνθήκες, χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την παρούσα κατάστασή του. Παρακολούθηση του εδράνου γίνεται μέσω ηλεκτρονικών monitors, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν κάποιες λειτουργικές παραμέτρους των Α/Γ και να μας δίνουν σε τακτά χρονικά διαστήματα την εικόνα της κατάστασης του εδράνου. Επομένως, ο συνδυασμός της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε με ένα σύστημα monitors μπορεί να μας οδηγήσει σε πιο ακριβή αποτελέσματα και σε εκτίμηση διάρκειας ζωής πολύ πιο κοντά στην πραγματική.

Παράρτημα Α

FAG Spherical roller bearings 23060-K-MB

main dimensions to DIN 635-2, with tapered bore, taper 1:12

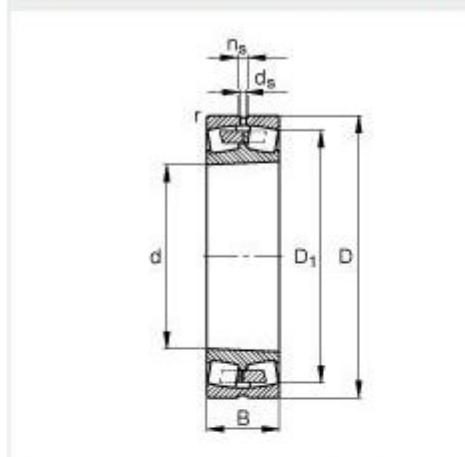


d	300 mm	
D	460 mm	
B	118 mm	
D_1	412,6 mm	
$D_{a \max}$	445,4 mm	
$d_{a \min}$	314,6 mm	
d_s	9,5 mm	
n_s	17,7 mm	
$r_{a \max}$	3 mm	
$r_{\min}$	4 mm	
m	72,2 kg	Mass
C_r	1960000 N	Basic dynamic load rating, radial
e	0,25	
Y_1	2,69	
Y_2	4	
C_{0r}	3650000 N	Basic static load rating, radial
Y_0	2,63	
n_G	1100 1/min	Limiting speed
n_B	960 1/min	Reference speed
C_{ur}	223000 N	Fatigue limit load, radial

Πίνακας 8.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά βαρελοειδούς εδράνου κύλισης 23060-K-MB [32]

FAG Spherical roller bearings 23956-K-MB

main dimensions to DIN 635-2, with tapered bore, taper 1:12

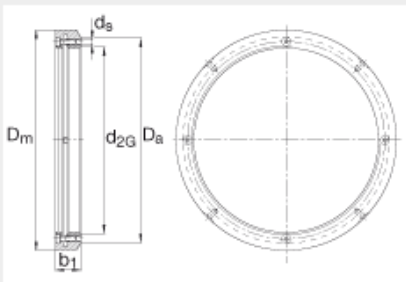


d	280 mm
D	380 mm
B	75 mm

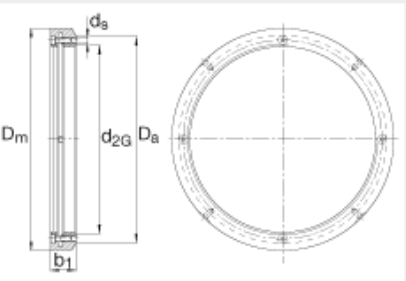
D₁	350 mm
D_{a max}	369,8 mm
d_{a min}	290,2 mm
d_s	8 mm
n_s	15 mm
r_{a max}	2,1 mm
r_{min}	2,1 mm

m	24,7 kg	Mass
C_r	970000 N	Basic dynamic load rating, radial
e	0,18	
Y₁	3,76	
Y₂	5,59	
C_{0r}	2040000 N	Basic static load rating, radial
Y₀	3,67	
n_G	1300 1/min	Limiting speed
n_B	1100 1/min	Reference speed
C_{ur}	129000 N	Fatigue limit load, radial

Πίνακας 8.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά βαρελοειδούς εδράνου κύλισης 23956K.MB [32]

FAG Shaft nuts HMZ3060 trapezoidal thread, with clamping screws		
	d_{2G}	Tr300x4 mm Thread
	D_m	360 mm
	b_1	42 mm
	D_a	336 mm
	Ma_L	54 Nm Tightening torque per clamping screw
	m	10 kg Mass, nut
	d_s	M10 Thread of clamping screw
		4 Clamping screw, quantity

Πίνακας 8.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά περικοχλίου ατράκτου HMZ3060 [32]

FAG Shaft nuts HMZ3056 trapezoidal thread, with clamping screws		
	d_{2G}	Tr280x4 mm Thread
	D_m	330 mm
	b_1	38 mm
	D_a	310 mm
	Ma_L	54 Nm Tightening torque per clamping screw
	m	6,9 kg Mass, nut
	d_s	M10 Thread of clamping screw
		4 Clamping screw, quantity

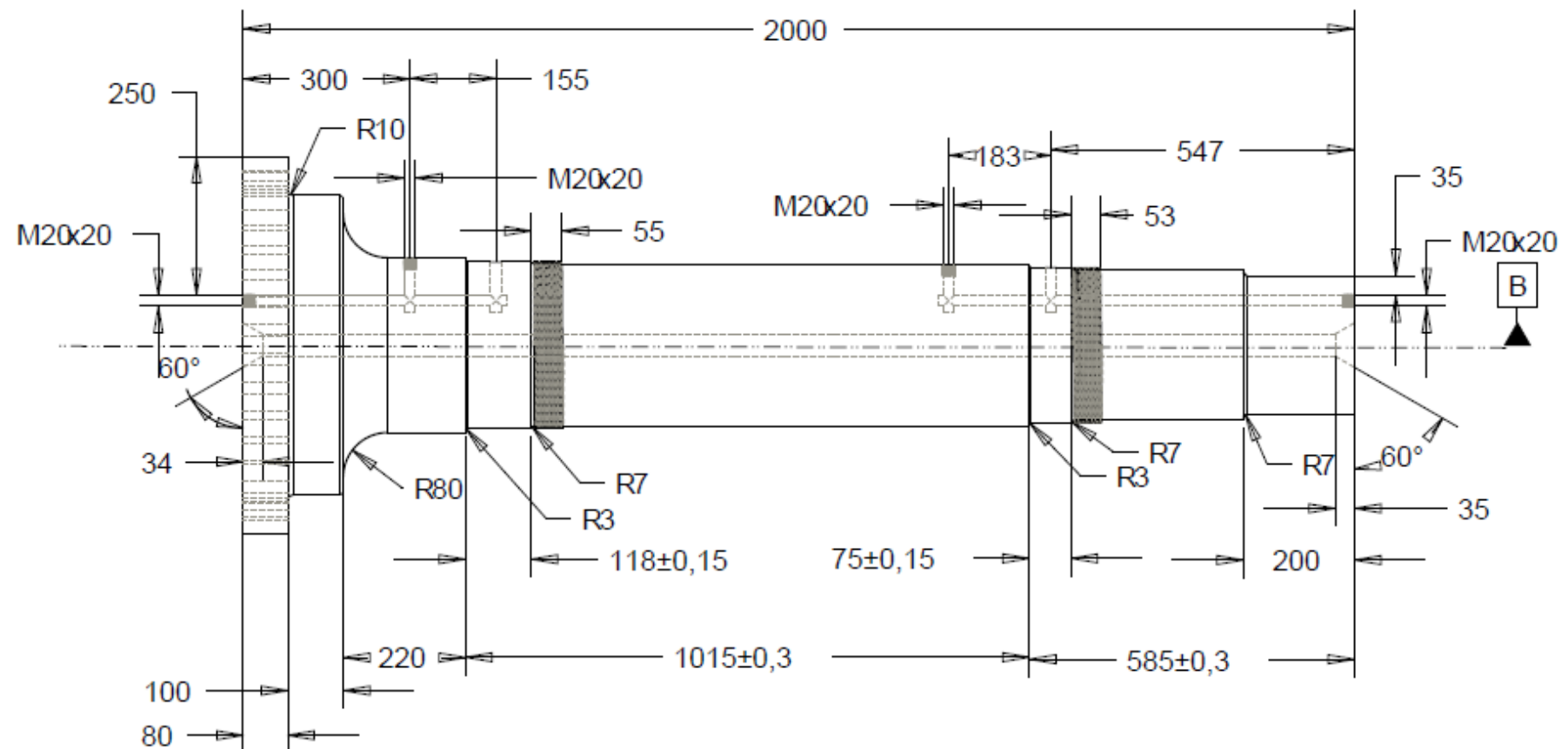
Πίνακας 8.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά περικοχλίου ατράκτου HMZ3056 [32]

Παράρτημα Β

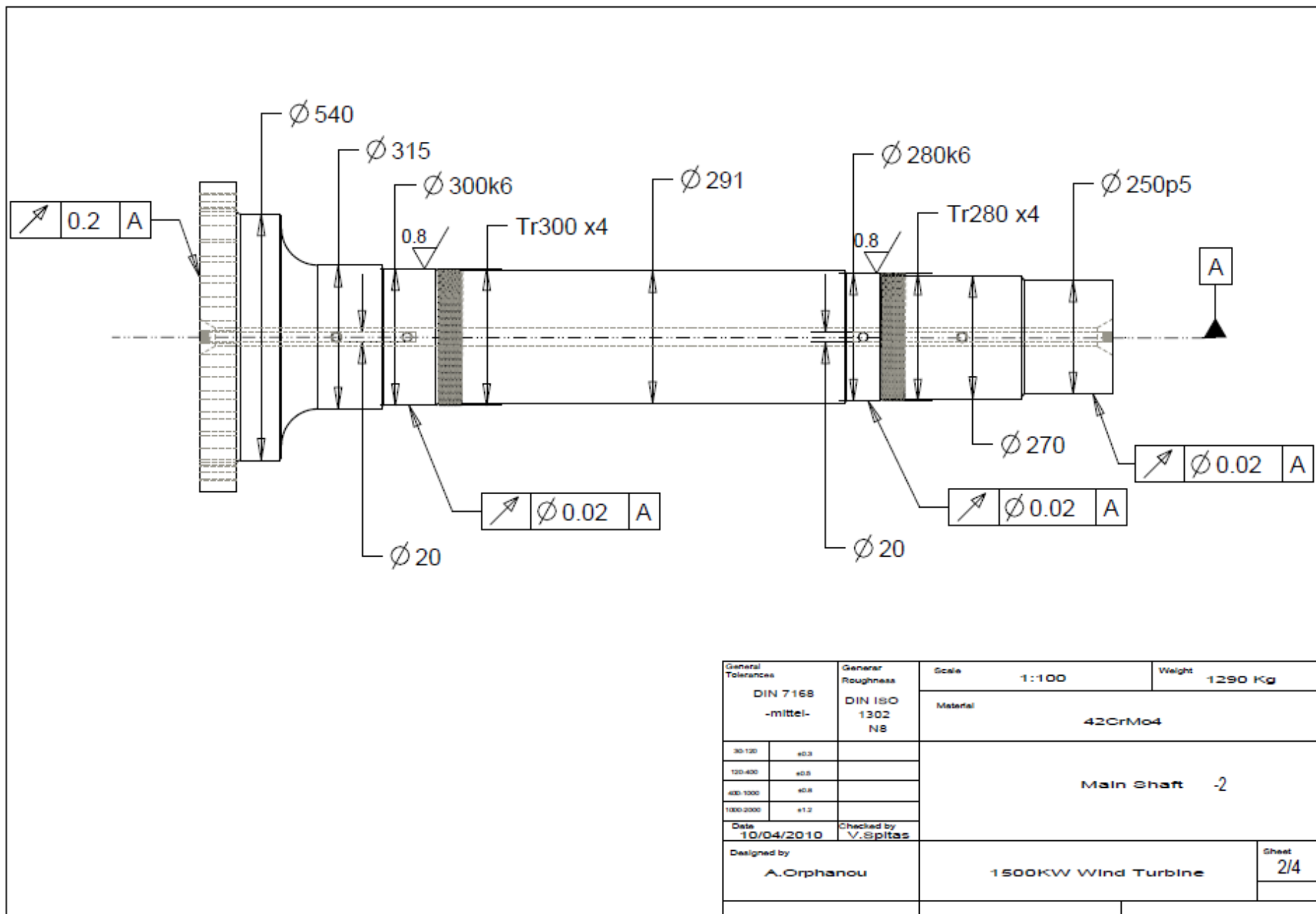
Μηχανολογικά Σχέδια Pro/Engineer

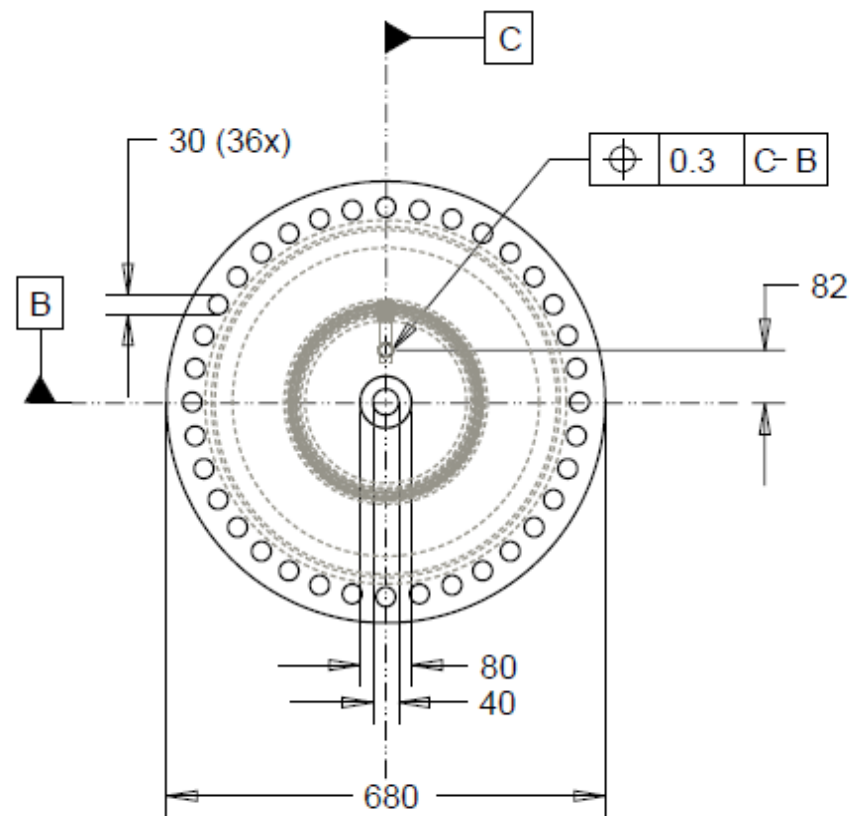


General Tolerances		General Roughness	Scale	1:100	Weight	1290 Kg
DIN 7168 -mittel-			Material 42CrMo4			
30-120	±0.3		Main Shaft			
120-400	±0.5					
400-1000	±0.8					
1000-2000	±1.2					
Date 10/04/2010		Checked by V.Spitias				
Designed by A.Orphanou			1500KW Wind Turbine			Sheet

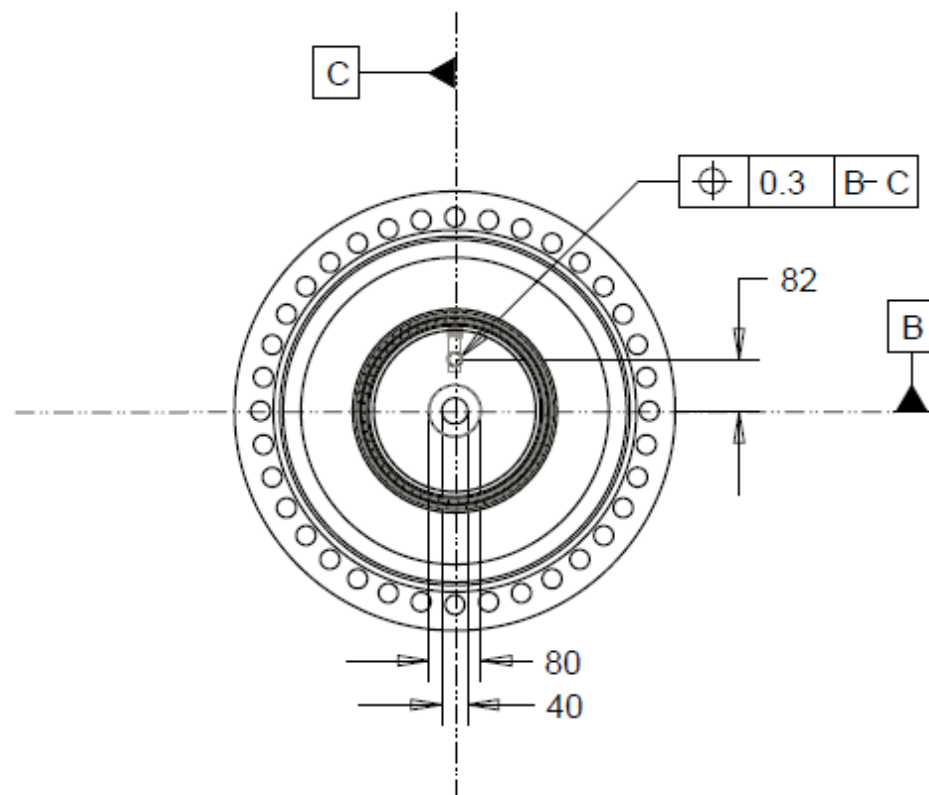


General Tolerances		General Roughness	Scale	1:100	Weight	1290 Kg
DIN 7168		DIN ISO	Material	42CrMo4		
-mittel-		1302				
		N8				
30-120	±0.3					
120-400	±0.5					
400-1000	±0.8		Main Shaft -1			
1000-2000	±1.2					
Date	Checked by					
10/04/2010		V. Spitas				
Designed by			1500KW Wind Turbine			Sheet
A.Orphanou						1/4



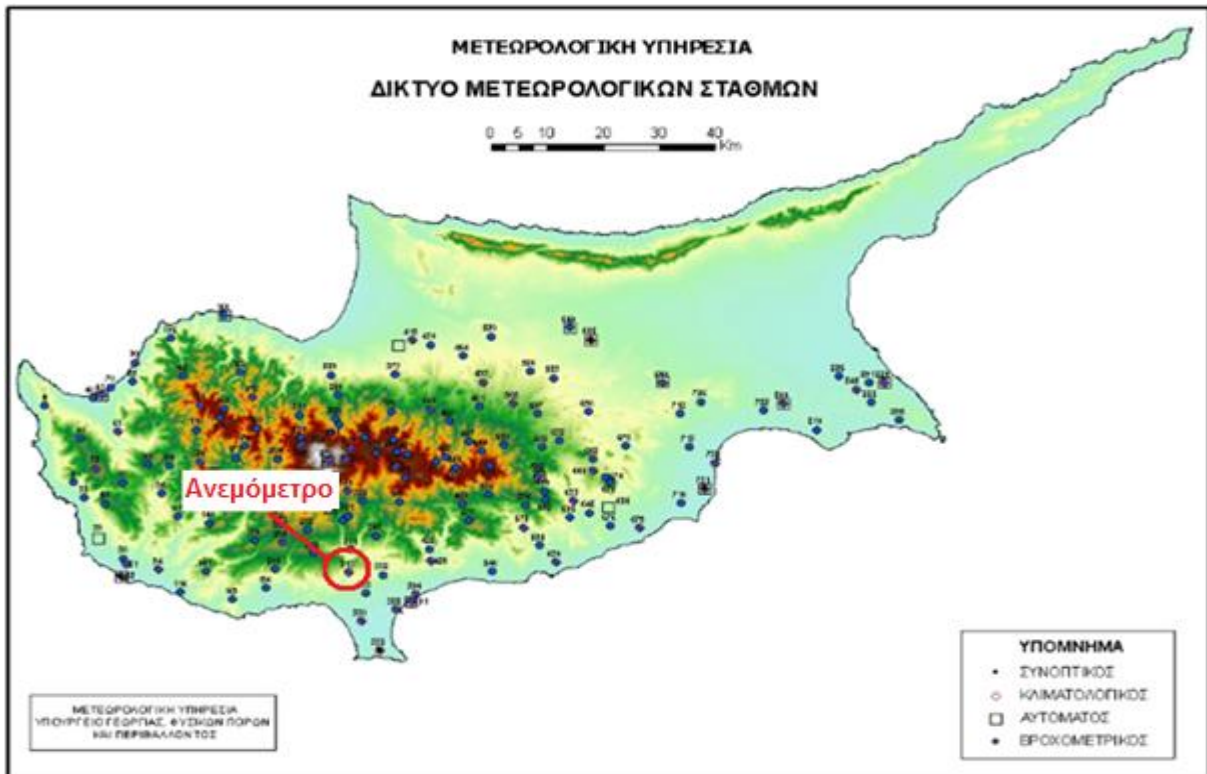


General Tolerances		General Roughness		Scale	1:100	Weight	1290 Kg
DIN 7168 -mittel-		DIN ISO 1302 N8		Material 42CrMo4			
30-120	±0.3	Main Shaft -3					
120-400	±0.5						
400-1000	±0.8						
1000-2000	±1.2						
Date 10/04/2010		Checked by V.Splias		1500KW Wind Turbine			
Designed by A.Orphanou							
				Sheet 3/3			

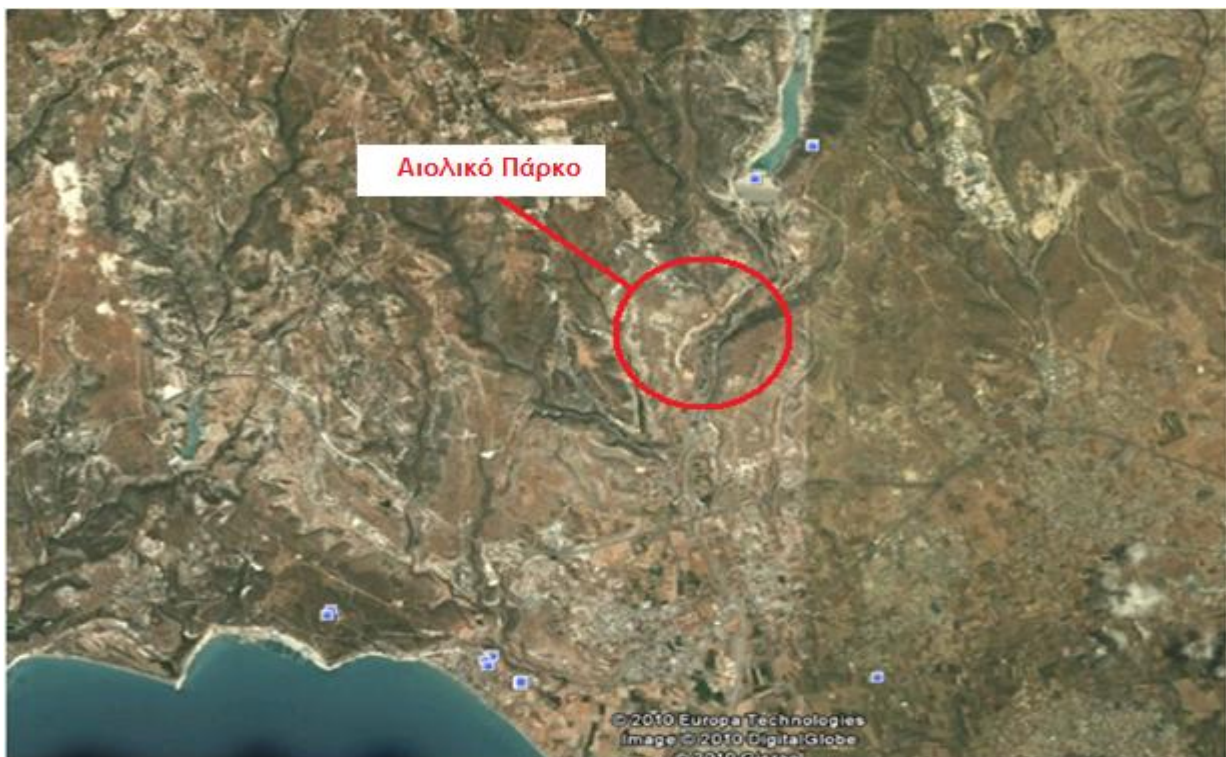


General Tolerances		General Roughness		Scale	1:100	Weight	1290 Kg
DIN 7168 -mittel-		DIN ISO 1302 N8		Material 42CrMo4			
30-120	±0.3	Main Shaft -4					
120-400	±0.5						
400-1000	±0.8						
1000-2000	±1.2						
Date 10/04/2010		Checked by V.Spitas		1500KW Wind Turbine			
Designed by A.Orphanou							
				Sheet 4/4			

Παράρτημα Γ

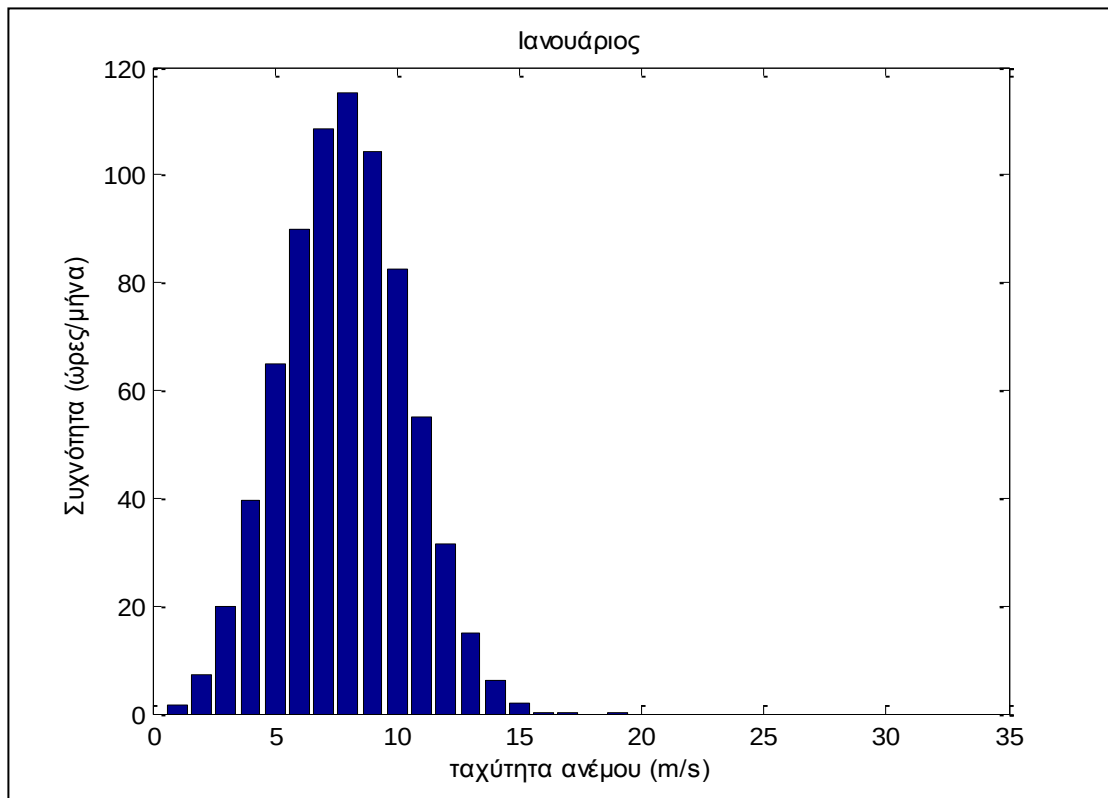


Σχήμα 10.1 Γεωγραφική θέση ανεμομέτρου

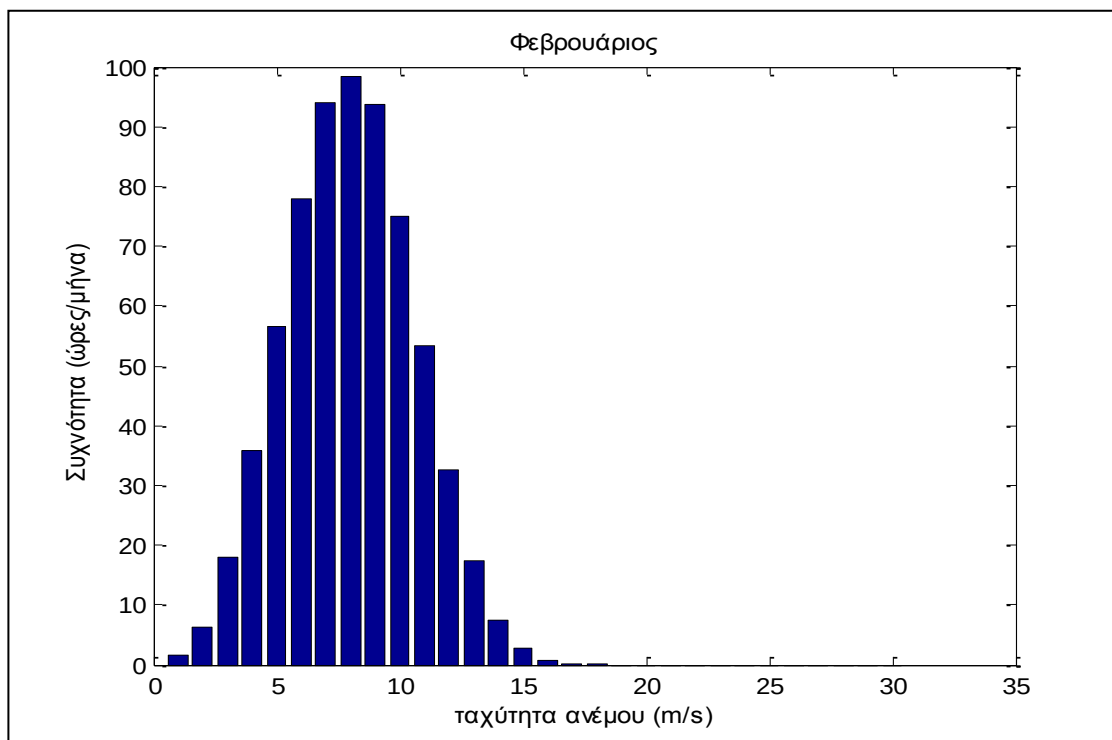


Σχήμα 10.2 Δορυφορική λήψη περιοχής μελέτης

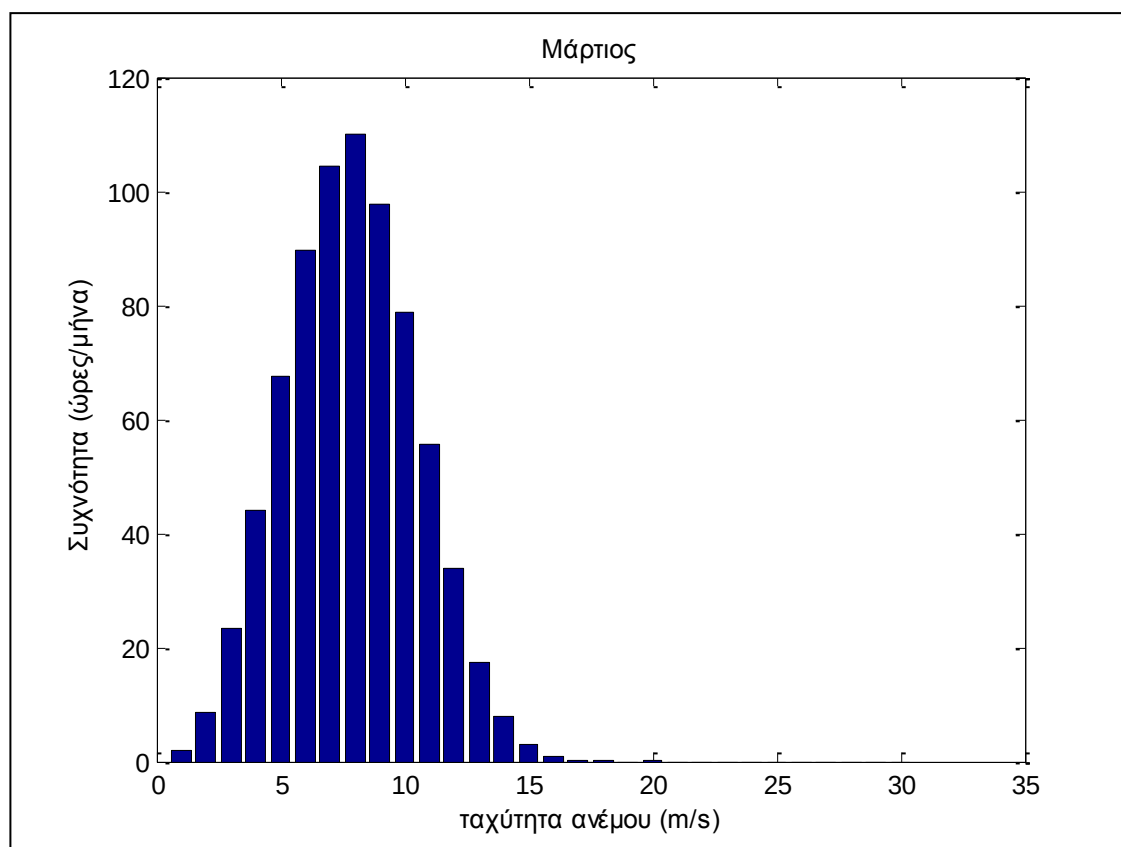
Παράρτημα Δ



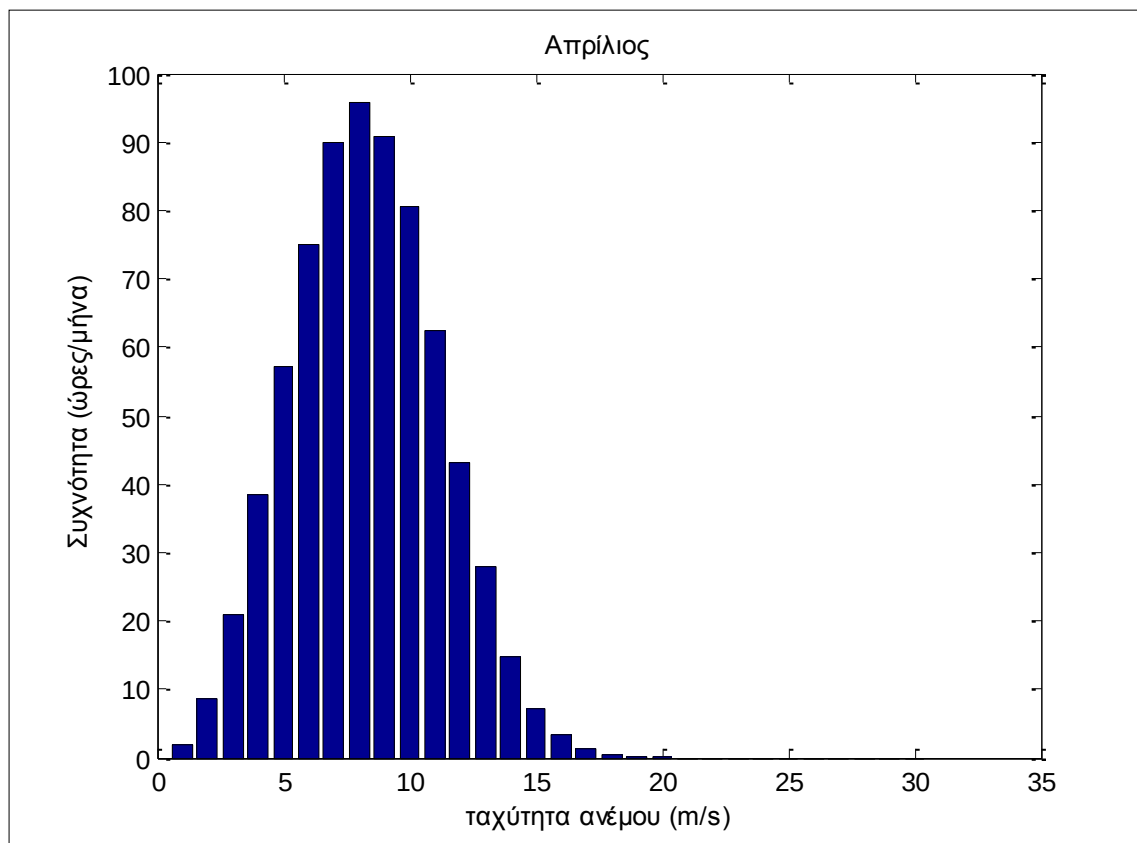
Σχήμα 11.1 Καμπύλη διάρκειας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Ιανουάριο



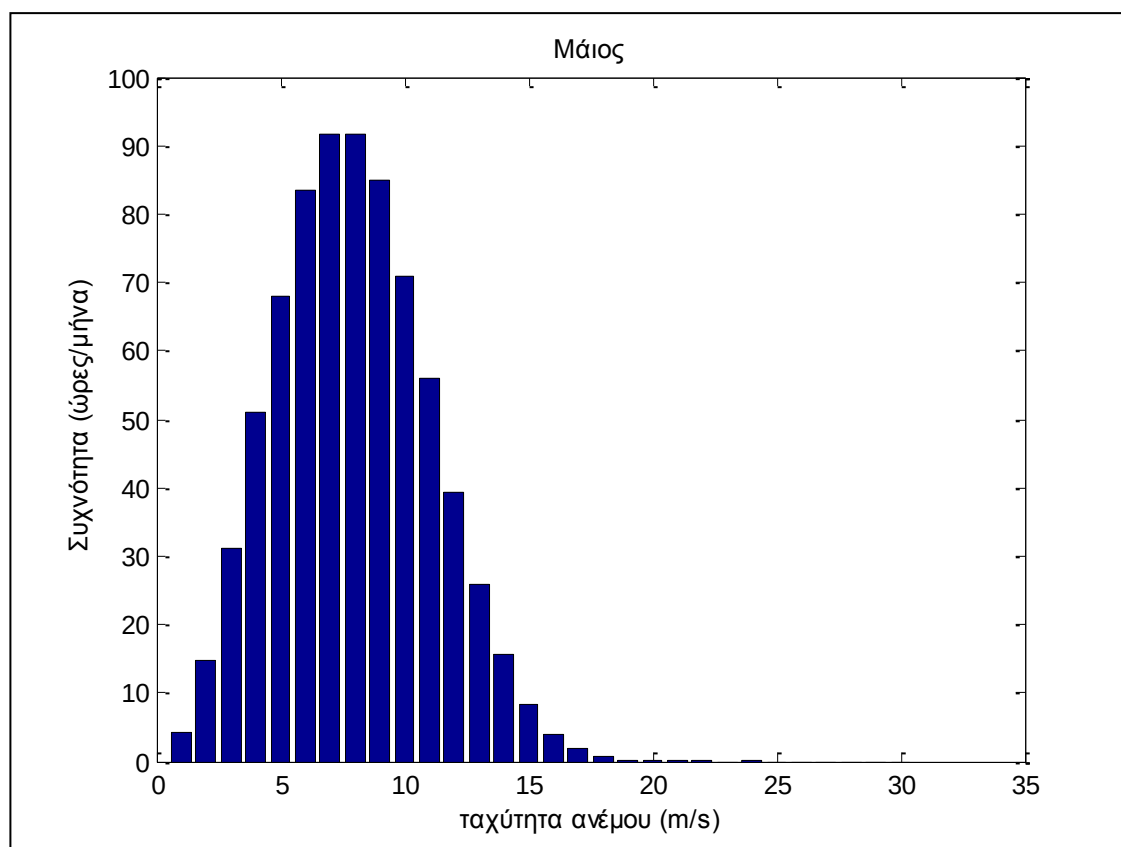
Σχήμα 11.2 Καμπύλη διάρκειας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Φεβρουάριο



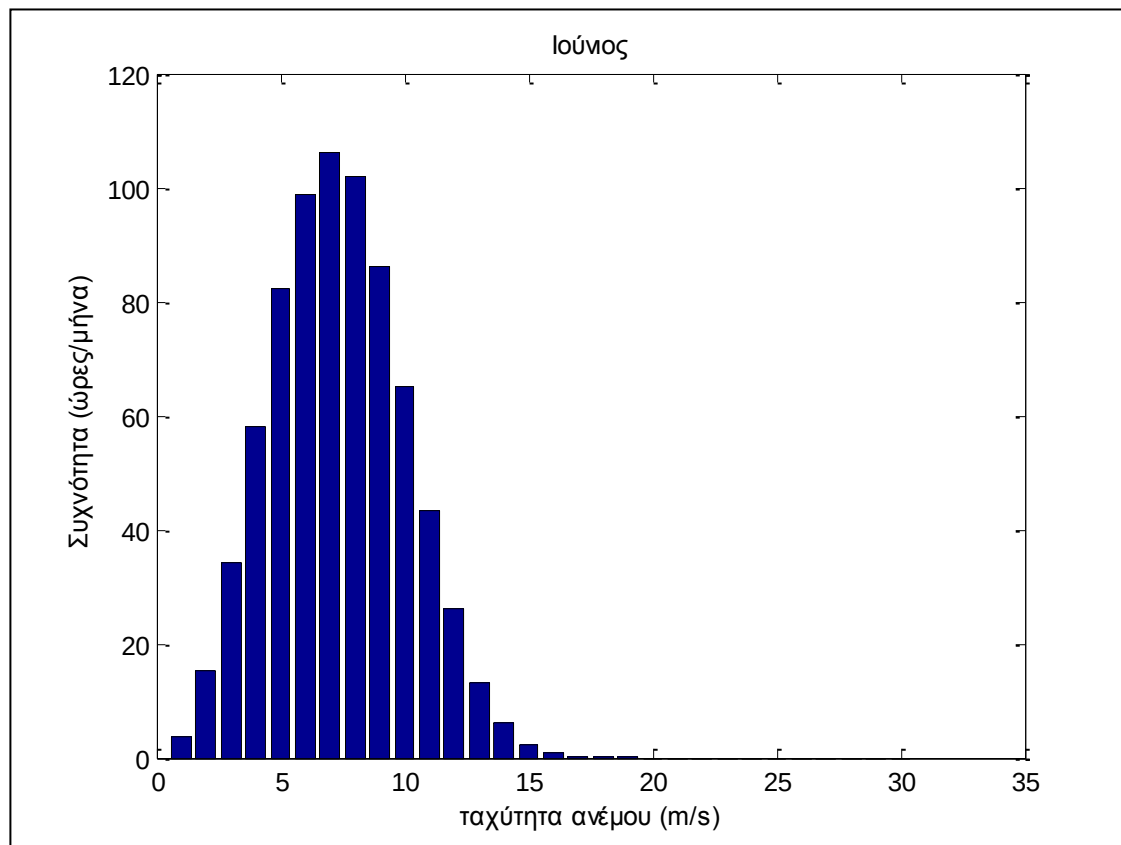
Σχήμα 11.3 Καμπύλη διαρκείας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Μάρτιο



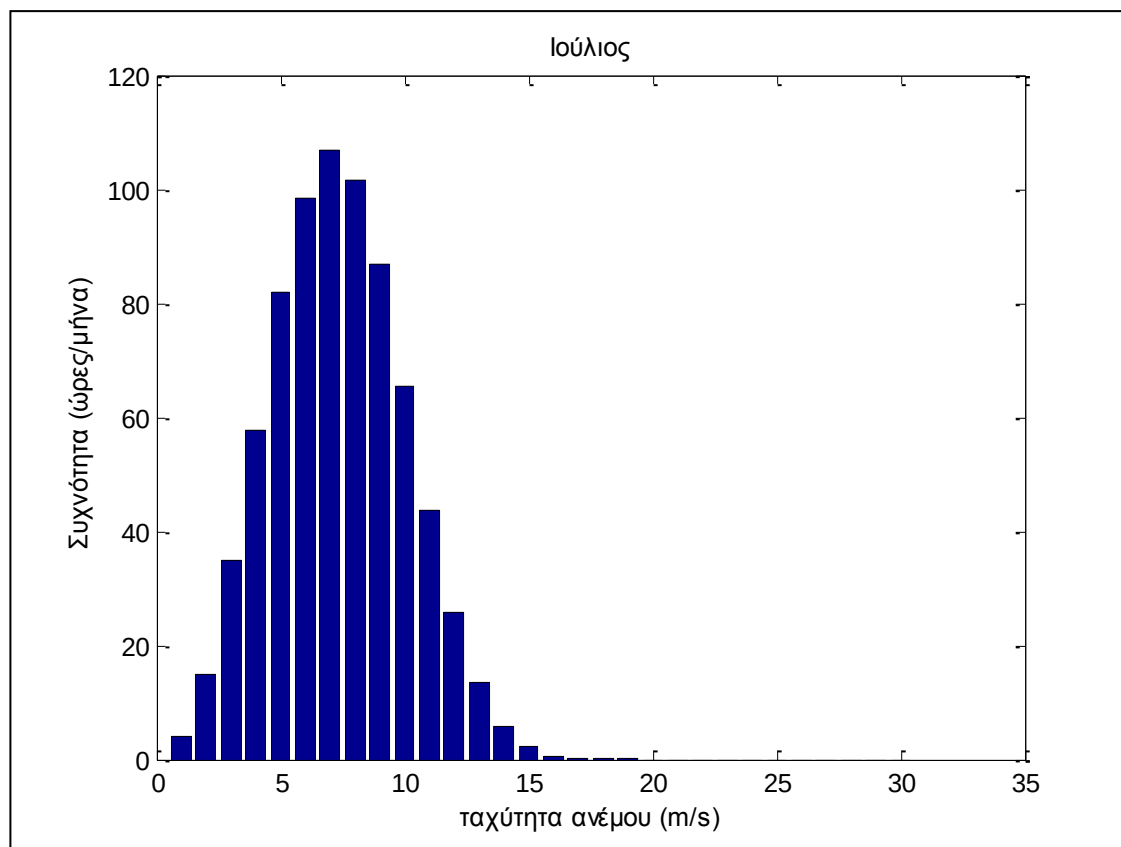
Σχήμα 11.4 Καμπύλη διαρκείας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Απρίλιο



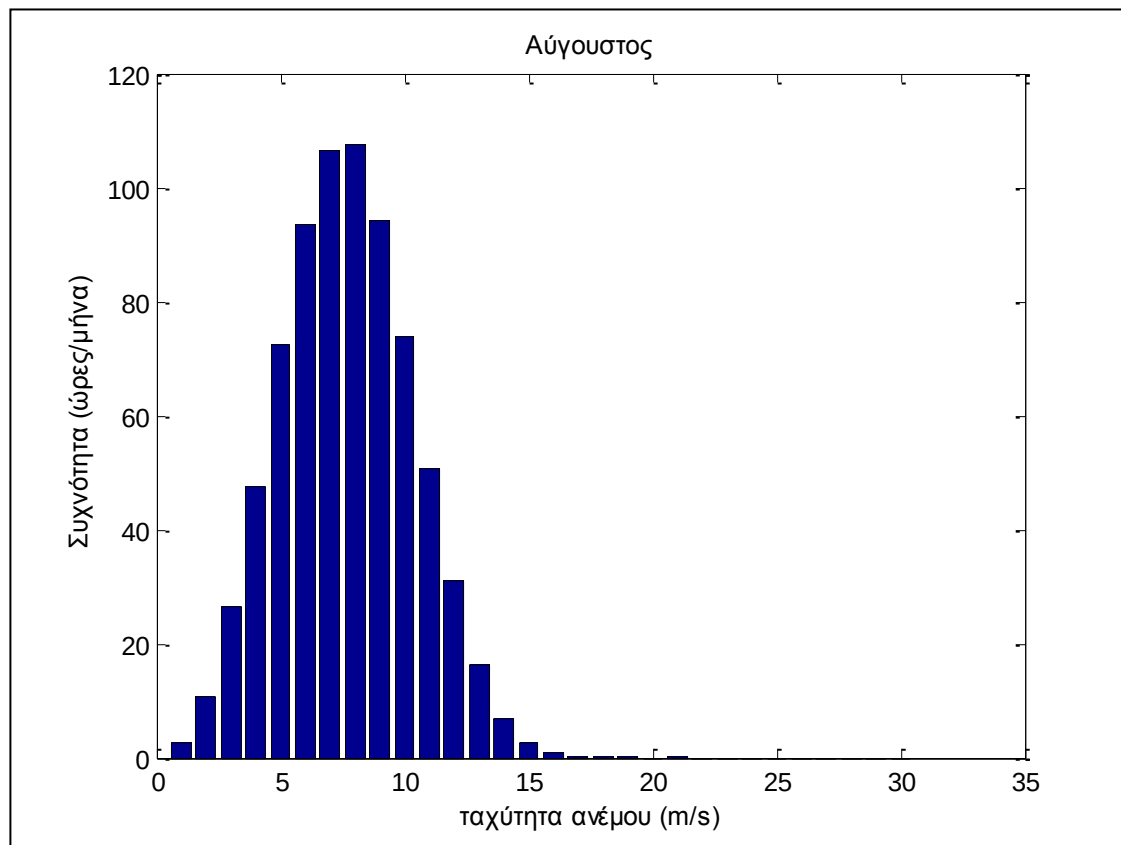
Σχήμα 11.5 Καμπύλη διάρκειας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Μάιο



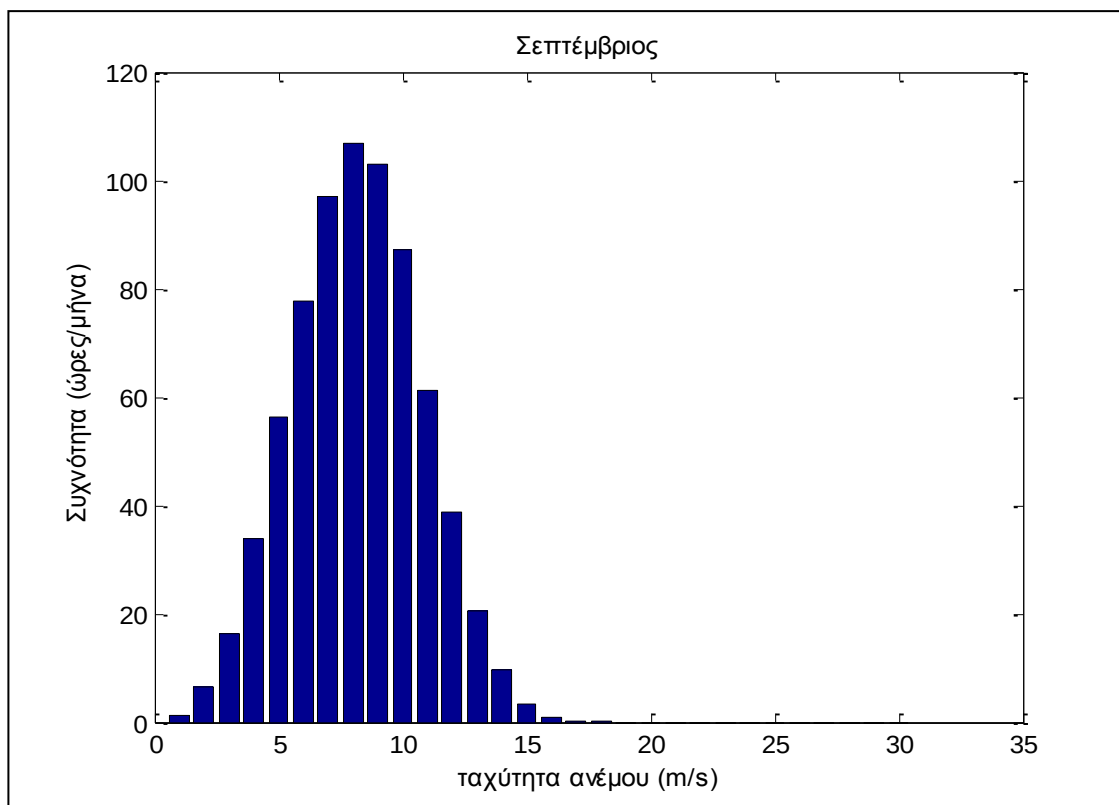
Σχήμα 11.6 Καμπύλη διάρκειας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Ιούνιο



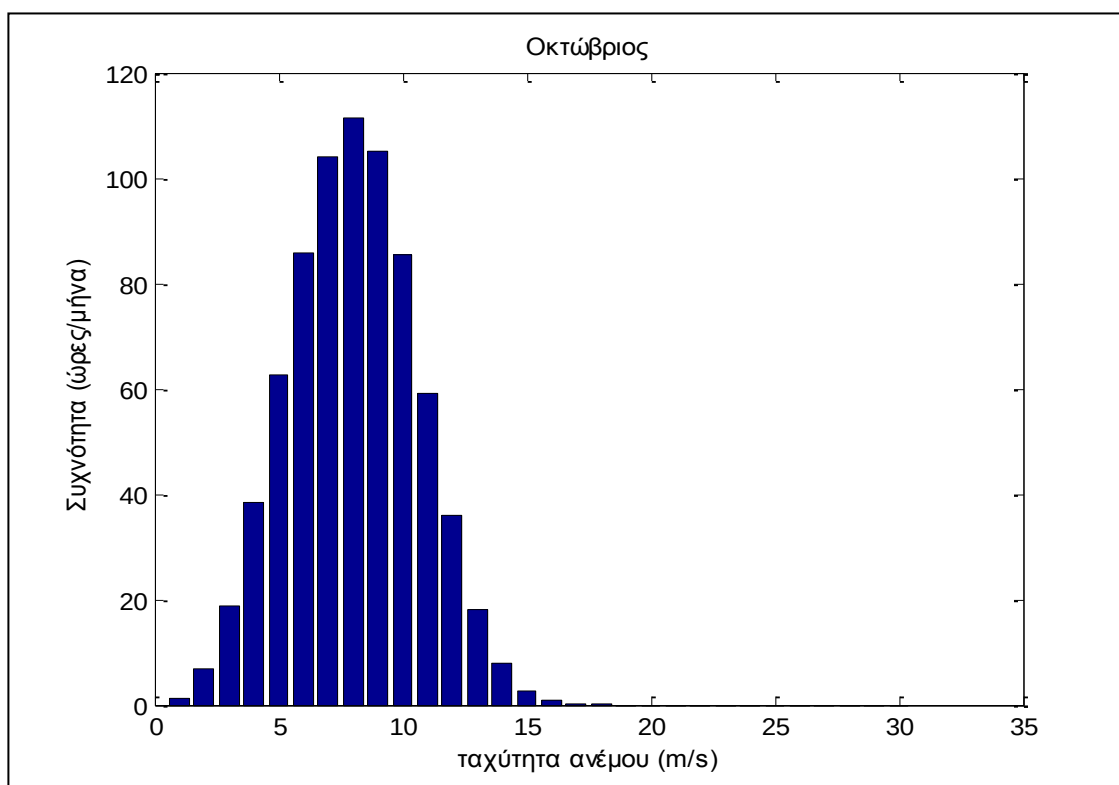
Σχήμα 11.7 Καμπύλη διαρκείας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Ιούλιο



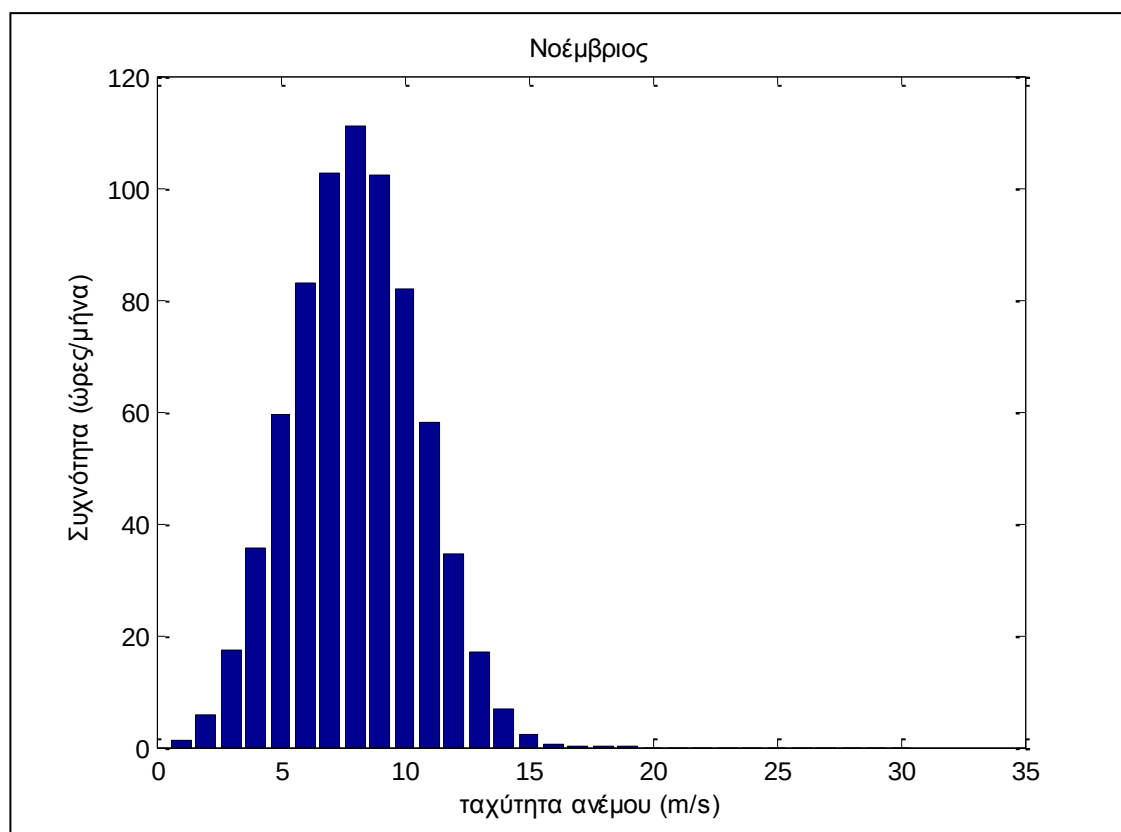
Σχήμα 11.8 Καμπύλη διαρκείας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Αύγουστο



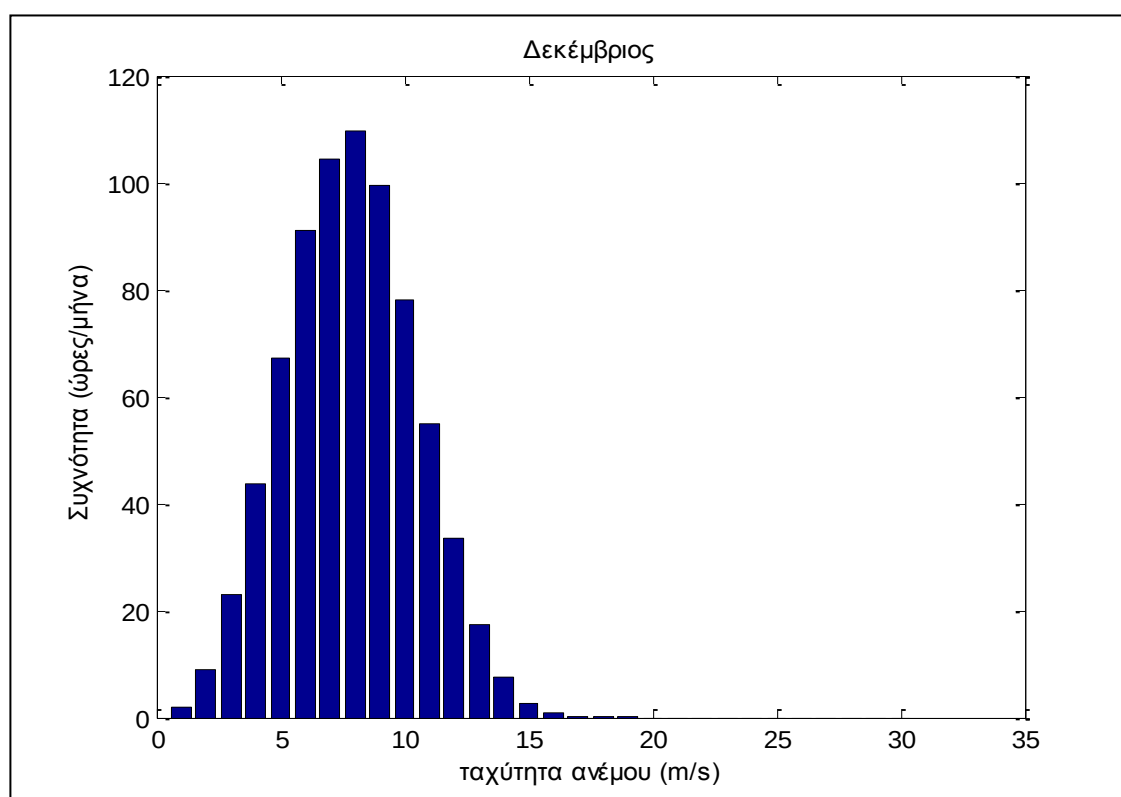
Σχήμα 11.9 Καμπύλη διάρκειας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Σεπτέμβριο



Σχήμα 11.10 Καμπύλη διάρκειας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Οκτώβριο



Σχήμα 11.11 Καμπύλη διάρκειας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Νοέμβριο



Σχήμα 11.12 Καμπύλη διάρκειας ταχυτήτων ανέμου για το μήνα Δεκέμβριο

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Μπεργελές **Ανεμογεννήτριες**
- [2] Ι. Καλδέλης **Διαχείριση Της Αιολικής Ενέργειας**, 2005
- [3] Ι. Καλδελλής, Κ.Καβαβιδιάς **Υπολογιστικές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας**, 2005
- [4] Δ. Κανελλόπουλλος **Αιολική Ενέργεια Σχεδιάζοντας στις Αυλές των Ανέμων** 2008
- [5] J. Walker, N. Jenkins **Αιολική Ενέργεια & Ανεμογεννήτριες** 2007
- [6] G. Niemann **Στοιχεία Μηχανών Τόμος 1 &2**
- [7] Ρ. Γραικούση **Στοιχεία Μηχανών, Τομος 1 &2**, 1984
- [8] Π. Γεωργιλάκης Πανεπιστημιακές Σημειώσεις **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας** 2006
- [9] Ι. Νικολός Πανεπιστημιακές Σημειώσεις **Μηχανικής των Ρευστών** 2004
- [10] Α. Αντωνιάδης **Μηχανολογικό Σχέδιο** 2007
- [11] ΕΤΕ Βιβλιοθήκη του Μηχανολόγου **Μηχανολογικό Σχέδιο** 1996
- [12] Ε.Τσαλίκη Μεταπτυχιακή Διατριβή **Ανάπτυξη συστήματος παρακολούθησης βλαβών και συντήρηση ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα** 2006
- [13] Σ. Πασιαρδής **Στατιστική Ανάλυση της ταχύτητας του ανέμου στην Κύπρο** 1995
- [14] Β. Μουστάκης, Γ. Δούνιας **Μεθοδολογίες Λήψης Οικονομοτεχνικών Αποφάσεων** 2002
- [15] Β. Κουϊκόγλου Πανεπιστημιακές Σημειώσεις **Προσομοίωσης** 2002
- [16] Γ. Φίλης Πανεπιστημιακές Σημειώσεις **Στοχαστικώς Διαδικασιών** 2003
- [17] Martin Flower, Kendall Scott **Εισαγωγή στη UML** 2000

Αγγλική Βιβλιογραφία

- [18] Erich Hau **Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics**, 2005
- [19] Sathyajith Mathew **Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics**, 2006
- [20] J.F.Manwell, J.G.MacGowan, A.L.Rogers **Wind Energy Explained Theory, Design and Application**, 2002

- [21] Riso **Guidelines for Design of wind Turbine 2002**
- [22] Catalogue WL 41 520/3 EA **FAG Rolling Bearing 1999**
- [23] David S. Kelley **Pro/Engineer wildfire instructor 2005**
- [24] Rodolfo Pallabazzer **Previsional estimation of the energy output of windgenerators 2003**
- [25] Johan Ribrant Master Thesis **Reliability performance and maintenance –A survey of failures in wind power systems 2006**

Περιοδικά

- [26] Energy point Απρίλιος 2008
- [27] Ανεμολόγια Μάρτιος-Απρίλιος 2008
- [28] Energy point Ιανουάριος 2009
- [29] Ημερησία Νοέμβριος 2009
- [30] Τεχνική Εκλογή Νοέμβριος 2009

Ιστοσελίδες

- [31] <http://www.ewea.org/> European Wind Energy Association
- [32] <http://www.fag.com> Εταιρεία FAG Rolling Bearings
- [33] <http://jiangyinzkforging.en.made-in-china.com/> Ατρακτος
- [34] http://www.moa.gov.cy/moa/ms/ms.nsf/DMLindex_gr/DMLindex_gr?OpenDocument
Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου
- [35] <http://www.cie.org.cy/> Ίδρυμα Ενέργειας Κύπρου
- [36] <http://www.anipsotiki.gr/> Ανυψωτική Α.Ε. γερανοφόρα οχήματα
- [37] <http://www.nordex-online.com/en> Εταιρεία NORDEX
- [38] http://en.wikipedia.org/wiki/Bahrain_World_Trade_Center Bahrain World Trade Center
- [39] <http://www.cyprus.gov.cy/moa/agriculture.nsf/> Υπουργείο Γεωργίας Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος
- [40] <http://www.eac.com.cy/> Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου

