

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ : ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
 ΜΠΑΚΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΑΠΛΑΝΗΣ ΣΩΚΡΑΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στις Αιολικές Μηχανές καθώς και στη διαδικασία που ακολουθείται για τη μελέτη και κατασκευή Ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να βοηθήσει τους αναγνώστες να κατανοήσουν τη λειτουργία των αιολικών μηχανών καθώς και τις εφαρμογές τους στη σύγχρονη κοινωνία.

Στο συγκεκριμένο τεύχος παρέχεται η βασική τεχνογνωσία για την κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα και δίνεται έμφαση στα πτερύγια και στην αεροδυναμική συμπεριφορά τους.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Καπλάνη Σωκράτη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφερε για την εκπόνηση της εργασίας.

Θερμά ευχαριστήρια θα θέλαμε να δώσουμε και στους :κ. Hugh Piggott ο οποίος είναι κατασκευαστής ανεμογεννητριών οικιακής χρήσης και ειδικός στην αιολική ενέργεια και μας παρείχε σημαντική υποστήριξη μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας και στον κ. Μπάκα Παναγιώτη για τη πολύτιμη βοήθεια του κατά την πορεία κατασκευής της ανεμογεννήτριας.

Αντωνίου Νικόλαος
Μπάκας Νικόλαος
Ιούλιος 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή αναφέρεται στη μελέτη των σύγχρονων Ανεμοκινητήρων οι οποίες έχουν ευρεία χρήση στη σύγχρονη κοινωνία. Η σημαντικότερη εφαρμογή τους είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες μιας κατοικίας είτε να διοχετευτεί στο δίκτυο. Το θέμα αναπτύσσεται σε δεκατρία κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή εξηγώντας τους λόγους οι οποίοι οδήγησαν την ανθρωπότητα να στραφεί στις Ανανεώσιμες μορφές Ενέργειας

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξηγείται τι είναι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και γιατί είναι ωφέλιμες προς το περιβάλλον. Δίνεται μια σύντομη περιγραφή για την κάθε μορφή και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που διακρίνουν τις Α.Π.Ε.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η κατάσταση της αιολικής ενέργειας στον κόσμο και στην Ελλάδα καθώς και η ανάπτυξη αυτής κατά το πέρασμα των χρόνων

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται η Αιολική Ενέργεια και το Αιολικό Δυναμικό. Εξηγείται τι είναι, πως δημιουργείται και πια είναι τα χαρακτηριστικά του ανέμου. Στη συνέχεια δίνεται σαφής ορισμός της αιολικής ενέργειας και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα αυτής. Τέλος, περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος υπολογισμού του αιολικού δυναμικού και παρουσιάζεται το αιολικό δυναμικό στην περιοχή Ρίου- Πατρών

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξηγείται το πώς ο άνεμος επηρεάζει τις Ανεμογεννήτριες. Μελετάται η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το υψόμετρο και τέλος η επίδραση των εμποδίων στη ροή του ανέμου.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στις Αιολικές Μηχανές. Περιγράφεται η αρχή λειτουργία τους και στη συνέχεια αναλύονται και περιγράφονται οι Ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κάθετου άξονα. Τέλος, αναγράφονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για αυτούς τους δύο τύπους αιολικών μηχανών.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία μελέτης Ανεμογεννήτριας από αεροδυναμική άποψη. Δίνεται βάση στην αεροδυναμική συμπεριφορά του δρομέα, δηλαδή στις δυνάμεις που ασκούνται στα πτερύγια και στην ισχύ που μπορεί να παραχθεί.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης του δρομέα.

Στο ένατο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις αεροτομές. Αναλύεται η γεωμετρία των αεροτομών, περιγράφονται και αναλύονται οι δυνάμεις και οι γωνίες που αναπτύσσονται-δημιουργούνται πάνω σε μια αεροτομή. Στη συνέχεια περιγράφονται

οι αεροτομές NACA και ο τρόπος κατασκευής της 4-ψήφιας και 5-ψήφιας αεροτομής. Τέλος αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τις αεροτομές NACA

Στο δέκατο κεφάλαιο γίνεται η μελέτη της πτέρυγας NACA 4412. Αρχικά σχεδιάζεται η συγκεκριμένη αεροτομή με τη χρήση κατάλληλων εξισώσεων και στη συνέχεια γίνεται το ανάπτυγμα της αεροτομής αυτής για τη κατασκευή του πτερυγίου. Υπολογίζονται βασικά μεγέθη όπως η γωνία προσβολή, ο συντελεστής άνωσης, οι γωνίες που σχηματίζονται με βασικότερη τη κωνικότητα και η χορδή κατά μήκος του πτερυγίου. Έχουν σχεδιαστεί οι αεροτομές υπό κλίμακα και χωρίς τη γωνία κωνικότητας και στη συνέχεια σχεδιάστηκαν σε ρεαλιστικό μέγεθος συμπεριλαμβανομένου τη γωνία κωνικότητας.

Στο ενδέκατο κεφάλαιο πραγματοποιείται η κατασκευή των πτερυγίων και της ουράς και των λοιπών βοηθητικών εξαρτημάτων της Ανεμογεννήτριας και περιγράφεται με αναλυτικά βήματα η πορεία κατασκευής που ακολουθήθηκε.

Στο δωδέκατο κεφάλαιο πραγματοποιείται η κατασκευή του μόνιμου μαγνητικού πεδίου (γεννήτρια) της Ανεμογεννήτριας και περιγράφεται με λεπτομέρεια κάθε διαδικασία που ακολουθήθηκε.

Στο δέκατο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι ηλεκτρικές συνδεσμολογίες αλλά και οι έλεγχοι λειτουργίας που έγιναν.

Στο δέκατο τέταρτο κεφάλαιο διεξάγονται τα πείραμα που έγιναν πάνω στην Ανεμογεννήτρια με σκοπό τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου και έγιναν τα ανάλογα γραφήματα.

ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΟ

A.Π.Ε.: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
A.M.E : Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας
H.M.E.: Ήπιες Μορφές Ενέργειας
E.E.: Ευρωπαϊκή Ένωση
H.Π.A.: Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
G.W.E.C.: Global Wind Energy Council
P.A.E. : Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
Δ.Ε.Η.: Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
Γ.Ε.Δ.Τ.: Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

A/Γ : Ανεμογεννήτρια/ες
Φ/Β : Φωτοβολταϊκό/α
Εικ. : Εικόνα
Σχ. : Σχήμα-Σχέση
Πίν. : Πίνακας
Γρ. : Γράφημα
Εξ. : Εξίσωση
κ.τ.λ. : και τα λοιπά
κ.α. : και άλλα
κ.τ. : κιβώτιο ταχυτήτων
δηλ. : δηλαδή
Εν. : Ενότητα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΟ

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η πορεία προς τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.....	1
---	---

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας.....	2
---	---

2.2 Κατηγορίες Ήπιων Μορφών Ενέργειας.....	2
--	---

2.2.1 Αιολική ενέργεια.....	2
-----------------------------	---

2.2.2 Ηλιακή ενέργεια.....	4
----------------------------	---

2.2.3 Υδατοπτώσεις.....	6
-------------------------	---

2.2.4 Βιομάζα.....	6
--------------------	---

2.2.5 Γεωθερμική ενέργεια.....	6
--------------------------------	---

2.2.6 Ενέργεια από παλίρροιες.....	6
------------------------------------	---

2.3 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Α.Π.Ε.....	6
--	---

3. Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Η αιολική ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο.....	8
--	---

3.2 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.....	9
---	---

4. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

4.1 Άνεμος.....	12
-----------------	----

4.1.2 Ένταση ανέμου.....	12
--------------------------	----

4.2 Η αιολική ενέργεια γενικά.....	13
------------------------------------	----

4.3 Αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό.....	14
--	----

4.3.1 Κατάσταση νηνεμίας.....	19
-------------------------------	----

5. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

5.1 Εισαγωγή.....	21
-------------------	----

5.2 Ταχύτητα ανέμου.....	22
--------------------------	----

5.3 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος.....	22
---	----

5.4 Επίδραση εμποδίων στη ροή του ανέμου.....	23
---	----

6. ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

6.1 Αρχή λειτουργίας αιολικών μηχανών.....	25
--	----

6.2 Μέγεθος αιολικών μηχανών.....	25
-----------------------------------	----

6.3 Τύποι ανεμογεννητριών.....	26
--------------------------------	----

6.3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (Α.Ο.Α).....	27
---	----

6.3.1.1	Πολύπτερες Α/Γ οριζόντιου άξονα.....	27
6.3.1.2	Ολιγόπτερες Α/Γ οριζόντιου άξονα.....	28
6.4	Κατασκευαστικά μέρη ανεμογεννήτριας.....	29
6.4.1	Στροφέας ή δρομέας.....	29
6.4.2	Ατρακτος.....	30
6.4.3	Κύριος άξονας.....	32
6.4.4	Γεννήτρια.....	32
6.4.4.1	Ασύγχρονες γεννήτριας.....	32
6.4.4.2	Σύγχρονες γεννήτριες.....	34
6.4.5	Σύστημα πέδης.....	35
6.4.5.1	Μηχανική πέδη.....	35
6.4.5.2	Αεροδυναμική πέδη.....	35
6.4.6	Κατευθυντήριο σύστημα ή σύστημα προσανατολισμού.....	36
6.4.7	Σύστημα προστασίας.....	36
6.4.8	Πύργος.....	36
6.4.8.1	Δικτυωτοί πύργοι.....	36
6.4.8.2	Σωληνωτοί πύργοι.....	37
6.4.9	Πτερύγια.....	37
6.5	Ανεμογεννήτριες τύπου ανάντι (up wind).....	40
6.6	Ανεμογεννήτριες τύπου κατάντι (down wind).....	40
6.7	Περαιτέρω τύποι ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα.....	41
6.7.1	Ανεμογεννήτρια τύπου “Andreau – Enfield”.....	41
6.7.2	Ανεμογεννήτριες με περίβλημα τύπου Venturi.....	41
6.7.3	Πτέρυγες τύπου Δέλτα.....	42
6.7.4	Ανεμογεννήτριες με χρήση “tip - vanes”.....	42
6.8	Πλεονεκτήματα μειονεκτήματα Α.Ο.Α.....	42
6.9	Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα.....	42
6.9.1	Χρησιμότητα.....	44
6.9.2	Χαρακτηριστικά Α/Γ κάθετου άξονα τύπου Darrieus.....	44
6.9.3	Περαιτέρω τύποι Α/Γ κάθετου άξονα.....	47
6.9.3.1	Ανεμογεννήτριες τύπου Tornado.....	47
6.9.4	Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Α/Γ κάθετου άξονα.....	48
6.10	Τρόποι λειτουργίας αιολικών μηχανών.....	49
6.10.1	Α/Γ σταθερών στροφών ή σταθερής ταχύτητας.....	49
6.10.2	Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας.....	50
6.10.3	Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με χρήση ΓΕ.Δ.Τ.....	51
6.11	Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη αιολικών μηχανών.....	52
7. ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ Α/Γ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ		
7.1	Θεωρία του δίσκου ενέργειας.....	58
7.2	Εφαρμογή των νόμων διατήρησης.....	60
7.2.1	Αρχή διατήρησης μάζας.....	60
7.2.2	Αρχή διατήρησης της ορμής.....	60
7.2.3	Αρχή διατήρησης της ενέργειας.....	61
7.3	Όριο του Betz.....	62
7.4	Θεωρία στοιχείων πτερύγωσης.....	63
8. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ		
8.1	Παραγόμενη ενέργεια από Α/Γ για χρονικό διάστημα Δt.....	6

8.2 Μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια.....	67
8.3 Μέσος συντελεστής ισχύος.....	68
9. ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ	
9.1 Γεωμετρία αεροτομής.....	71
9.2 Αναπτυσσόμενες δυνάμεις σε αεροτομή.....	71
9.2.1 Δύναμη άνωσης.....	72
9.2.2 Οπισθέλκουσα δύναμη.....	72
9.3 Συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας.....	73
9.4 Γωνίες στις αεροτομές.....	75
9.4.1 Γωνία πρόσπτωσης.....	75
9.4.2 Γωνία βήματος.....	75
9.4.3 Κωνικότητα.....	75
9.5 Κατανομή πίεσης σε αεροτομή.....	76
9.6 Συντελεστής ισχύος.....	78
9.7 Αεροτομές NACA.....	78
9.7.1 4-ψήφια αεροτομή NACA.....	79
9.7.2 5-ψήφια αεροτομή NACA.....	81
9.8 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα αεροτομών NACA.....	82
9.8.1 4-ψήφια αεροτομές NACA.....	82
9.8.2 5-ψήφια αεροτομές NACA.....	82
9.8.3 6-ψήφια αεροτομές NACA.....	83
9.8.4 7-ψήφια αεροτομές NACA.....	83
9.8.5 16- ψήφια αεροτομές NACA.....	84
9.9 Πλάτος ή χορδή πτερυγίου.....	84
10. ΜΕΛΕΤΗ ΠΤΕΡΥΓΑΣ	
10.1 Εισαγωγή.....	86
10.2 Σχεδιασμός αεροτομής NACA 4412.....	87
10.3 Μελέτη πτερυγίου.....	90
10.3.1 Αριθμός Reynolds.....	90
10.3.2 Υπολογισμός βασικών μεγεθών.....	91
10.4 Υπολογισμός γωνίας βήματος ϕ	98
10.5 Υπολογισμός χορδής c	100
10.6 Υπολογισμός γωνίας κωνικότητας β	101
10.7 Σχεδιασμός αεροτομών κατά μήκος του πτερυγίου.....	102
11. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	
11.1 Εισαγωγή.....	128
11.2 Υλικά και όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή της Α/Γ.....	128
11.2.1 Πολυεστέρας.....	130
11.2.2 Σκληρυντής.....	130
11.2.3 Αντικολλητικά καλουπιών.....	130
11.2.4 Ασετόν.....	130
11.2.5 Υαλόπανο.....	130
11.2.6 Λινέλαιο.....	131
11.2.7 Πούδρα Τάλκη.....	131
11.3 Κατασκευή πρωτότυπου πτερυγίου.....	131

11.4	Κατασκευή καλουπιών.....	146
11.4.1	Λίπανση του πρότυπου πτερυγίου.....	146
11.4.2	Κατασκευή καλουπιών.....	146
11.4.3	Τελική επεξεργασία καλουπιών.....	151
11.5	Κατασκευή πτερυγίων.....	154
11.6	Κατασκευή βάσεων στήριξης πτερυγίων.....	159
11.7	Κατασκευή πτυσσόμενης βάσης στήριξης για τη παρουσίαση τη Α/Γ.....	162
11.8	Άνοιγμα οπών στις βάσεις των πτερυγίων και στο δίσκο στερέωσης.....	165
12. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ)		
12.1	Σύντομη θεωρία.....	169
12.2	Κατασκευή καλουπιών και περιελίξεων.....	170
12.2.1	Μηχανισμός κατασκευής τυλιγμάτων.....	171
12.2.2	Εξάρτημα για τη τοποθέτηση των μαγνητών.....	173
12.2.3	Κατασκευή εξωτερικού καλουπιού σάτη.....	175
12.2.3.1	Κλίση στο εσωτερικό του καλουπιού.....	177
12.2.3.2	Δέσιμο κομματιών στο τόρνο.....	177
12.2.4	Κατασκευή εσωτερικού καλουπιού σάτη.....	178
12.2.5	Εξωτερικό καλούπι δρομέα.....	180
12.2.6	Εσωτερικό καλούπι δρομέα.....	181
12.2.7	Βοηθητικό εξάρτημα για το καλούπωμα του σάτη.....	182
12.2.8	Έλεγχος καλουπιού και ενίσχυση σάτη.....	183
12.2.9	Κατασκευή σάτη.....	184
12.2.10	Κατασκευή δρομέα.....	194
12.2.11	Κατασκευή κορμού.....	200
12.2.12	Συναρμολόγηση γεννήτριας.....	201
13. ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΙ		
13.1	Έλεγχος ηλεκτρικών συνδέσεων.....	203
13.2	Συνδεσμολογίες αστέρα και τριγώνου.....	203
13.3	Ηλεκτρολογικές συνδέσεις.....	204
13.4	Τελικός έλεγχος και συνδέσεις.....	206
	Μηχανικός έλεγχος.....	206
13.4.1	Τελικός έλεγχος ζυγοστάθμισης.....	206
13.5	Κατασκευή κουτιού ψήκτρας.....	207
13.6	Στερέωση γεννήτριας στη βάση στήριξης και κατασκευή επιπρόσθετων μηχανισμών-κομματιών.....	208
13.6.1	Στερέωση γεννήτριας στη βάση στήριξης.....	208
13.6.2	Κατασκευή αεροδυναμικού καλύμματος και τοποθέτηση πτερυγίων.....	210
13.6.3	Κατασκευή κατευθυντήριου συστήματος.....	212
14. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ		
14.1	Περιγραφή τρόπου μετρήσεων.....	214
14.2	Μετρήσεις.....	217
14.2.1	Συνδεσμολογία ΑΣΤΕΡΑ.....	220
14.2.2	Συνδεσμολογία ΤΡΙΓΩΝΟΥ.....	222
14.3	Ασφάλεια από τον ηλεκτρισμό και τρόπος σύνδεσης με μπαταρία.....	223
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΧΟΛΙΑ.....		224

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 226

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ΠΟΡΕΙΑ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο Αριστοτέλης ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε τον όρο ενέργεια σε αποσπάσματα του αλλά με πολύ ασάφεια. Ο ακριβής και ταυτόχρονα συνοπτικός ορισμός για την ενέργεια δόθηκε περίπου 2500 χρόνια αργότερα όπου ο μεγάλος φυσικός Max Planck διατύπωσε «Ενέργεια είναι αυτό που βρίσκεται μέσα στο σύστημα και το κάνει ικανό».

Για πολλά χρόνια ο άνθρωπος εκμεταλλεύονταν τους ενεργειακούς πόρους χωρίς καταστροφικές συνέπειες μέχρι που η βιομηχανική επανάσταση αλλά και η επανάσταση του ατμού άλλαξαν τα δεδομένα. Καθώς το πολιτισμικό αλλά και τεχνολογικό επίπεδο των ανθρώπων ανέβαινε, έτσι και η ανάγκη για περισσότερη ενέργεια ήταν απαραίτητη. Η ακόρεστη δίψα των ανθρώπων για ενέργεια καθώς και το σκεπτικό ότι οι φυσικοί ενεργειακοί πόροι είναι ανεξάντλητοι οδήγησε σε καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον τις οποίες καλείται η σημερινή κοινωνία αλλά και οι επόμενες γενιές να αντιμετωπίσουν.

Σύμφωνα με το άρθρο του Χαράλαμπου Κουτρούλη με τίτλο “Ενέργεια και περιβάλλον” που δημοσιεύτηκε τον Αύγουστο του 2008 μια εικόνα αυτής της ακόρεστης διψάς των ανθρώπων για ενέργεια μπορεί να περιγραφεί αν σκεφτούμε ότι:

Το 1929 ο πληθυσμός ανέρχονταν στα 2 δισεκατομμύρια και κάθε ένας, κατά μέσο όρο δαπανούσε ενέργεια 12 προβιομηχανικών ανθρώπων. Το 1979 ο πληθυσμός της γης ήταν 4 δισεκατομμύρια και κατά μέσο όρο κάθε άνθρωπος δαπανούσε ενέργεια 27 προβιομηχανικών ανθρώπων. Το 2020 ο πληθυσμός της γης προβλέπεται να είναι 9 δισεκατομμύρια περίπου και κάθε άνθρωπος θα καταναλώνει ενέργεια 43 προβιομηχανικών ανθρώπων.

Πώς όμως μπορεί να απεικονιστεί το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα σήμερα; Το πετρέλαιο αλλά και το φυσικό αέριο είναι καθαρά βραχυπρόθεσμες λύσεις, καθώς τα αποθέματα στις πιο ευνοϊκές συνθήκες θα καλύπτουν τον πλανήτη για περίπου 130 χρόνια. Ακόμα και η πυρηνική ενέργεια η οποία είχε χαρακτηριστεί σαν λύση φτηνής και καθαρής ενέργειας αποδείχθηκε καταστροφική για το περιβάλλον καθώς το ατύχημα του Τσερνομπίλ δημιούργησε τεράστιες οικολογικές αλλά και πολιτισμικές καταστροφές.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων ο άνθρωπος ξαναγυρνά στη διαχείριση, ανάπτυξη και εφαρμογή μιας πολύ παλαιάς αλλά και ταυτόχρονα νέας ενεργειακής τεχνικής. Τη χρήση των Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο εύρος φυσικών διαδικασιών μέσω των οποίων είναι δυνατή η παραγωγή ενέργειας. Ο όρος ήπιες αναφέρεται σε δύο παράγοντες:

1. Δεν «δημιουργεί» ο ανθρώπινος παράγοντας την ενέργεια (π.χ. καύση) αλλά αποδεσμεύει την ήδη υπάρχουσα φυσική ενέργεια που παράγεται από ήλιο, νερό και γη.
2. Είναι μορφές ενέργειας, μη ρυπογόνες για το περιβάλλον καθώς δεν απελευθερώνονται τοξικά απόβλητα, διοξείδιο του άνθρακα και άλλες ουσίες καταστροφικές για την ατμόσφαιρα, τους υδάτινους πόρους αλλά και το έδαφος.

Οι περισσότερες από τις μορφές των Α.Π.Ε. στηρίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία, καθώς μέσω αυτής δημιουργούνται οι άνεμοι λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας του αέρα (αιολική), η βιομάζα η οποία είναι ηλιακή ενέργεια την οποία έχουν δεσμεύσει τα φυτά από τη φωτοσύνθεση ενώ η εξάτμιση και συμπύκνωση του νερού προκαλεί κυκλοφορία των ύδατος (υδροηλεκτρική). Στον χώρο των Α.Π.Ε. εξαιρείται η γεωθερμία όπου εκμεταλλευόμαστε τη θερμοκρασία στο εσωτερικό της γης και οι παλίρροιες όπου εκμεταλλευόμαστε τη βαρύτητα. Κατά πολλές απόψεις η γεωθερμία δεν θα έπρεπε να συγκαταλέγεται στις ανανεώσιμες καθώς τα γεωθερμικά πεδία δεν είναι ανεξάντλητα.

Το 1970 ξεκίνησαν τα πρώτα βήματα προς τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας καθώς η παραγωγή ενέργειας από συμβατικές μεθόδους αλλοίωσε ολοένα τη ποιότητα ζωής και οι περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις άρχισαν να εμφανίζονται. Το υψηλό κόστος τους ήταν ένας βασικό παράγοντας το οποίο κράτησε μακριά τους ανθρώπους με αποτέλεσμα οι Α.Π.Ε. να ξεκινήσουν μόνο σαν πειραματικές εφαρμογές. Με το πέρασμα των χρόνων όμως το κόστος τους έπεφτε και συνεχίζει να πέφτει μέχρι και σήμερα με αποτέλεσμα ορισμένες από αυτές όπως η αιολική, η βιομάζα και τα υδροηλεκτρικά να μπορούν να ανταγωνίζονται τον άνθρακα και τη πυρηνική

2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΗΠΙΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.2.1 Αιολική Ενέργεια

Αρχικά βρήκε εφαρμογή στα πηγάδια για την άντληση νερού αλλά και στους παραδοσιακούς ανεμόμυλους για το άλεσμα του σιταριού. Πλέον χρησιμοποιείται

ευρέως για τη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, είτε για κάλυψη ενεργειακών αναγκών είτε ως επένδυση.

Το 1990 η εγκατεστημένη αιολική ισχύς σχεδόν διπλασιάστηκε και το αιολικό δυναμικό επαρκεί για περαιτέρω σημαντική αύξηση. Υπολογίζεται ότι μέχρι το 2020 η εγκατεστημένη αιολική ισχύς θα έχει τετραπλασιαστεί αν και το αιολικό δυναμικό μπορεί να προσφέρει ακόμα παραπάνω. Μακροπρόθεσμα, με τη βελτίωση και εξέλιξη των αιολικών μηχανών η παραγόμενη ενέργεια από τον άνεμο θα μπορούσε να καλύψει πάνω από το 30% των ενεργειακών αναγκών.



Εικόνα 2.2.1.1: Τρίπτερη Α/Γ οριζόντιου άξονα

Πηγή: Εργαστήριο Η.Μ.Ε Πάτρα

Στο εργαστήριο των Ήπιων Μορφών Ενέργειας στην Πάτρα εκτός από τη τρίπτερη Α/Γ υπάρχει και πολύπτερη η οποία απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.2.1.2: Πολύπτερη Α/Γ οριζόντιου άξονα με δυνατότητα μετακίνησης
Πηγή: Εργαστήριο Η.Μ.Ε Πάτρα



Εικόνα 2.2.1.3: Αιολικό πάρκο εγκατεστημένο στη θάλασσα
Πηγή: www.emprosnet.gr

2.2.2 Ηλιακή Ενέργεια

Χρησιμοποιείται περισσότερο σε οικιακές εφαρμογές για παραγωγή ζεστού νερού (θερμοσίφωνες) ενώ η Ε.Ε. και το ελληνικό κράτος προωθούν και στη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κάλυψη ψύξης και φωτισμού εξοικονομώντας ενέργεια στο κτήριο. Αν και το κόστος αγοράς είναι σχετικά υψηλό σε σχέση με την αποδοτικότητα τους αναμένεται πτώση τα επόμενα χρόνια



Εικόνες 2.2.2.1 & 2.2.2.2: Σταθερά Φ/Β συστήματα τοποθετημένα σε στέγη
Πηγή: Εργαστήριο Η.Μ.Ε Πάτρα



Εικόνα 2.2.2.3: Κινούμενο (tracker) Φ/Β σύστημα τοποθετημένο στη στέγη
Πηγή: Εργαστήριο Η.Μ.Ε Πάτρα

Σημείωση: Όλες οι φωτογραφίες από τις Α/Γ και τα Φ/Β με εξαίρεση το θαλάσσιο αιολικό πάρκο είναι τραβηγμένες από το εργαστήριο των Ήπιων Μορφών Ενέργειας της Πάτρας.

2.2.3 Υδατοπτώσεις

Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα που στο πεδίο των Α.Π.Ε. εξειδικεύονται περισσότερο σε μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας

2.2.4 Βιομάζα

Το φυτό για να τραφεί παράγει γλυκόζη η οποία παράγεται από τη φωτοσύνθεσή του. Κατά τη φωτοσύνθεση δεσμεύεται ηλιακή ενέργεια στο φυτό την οποία ο άνθρωπος αποδεσμεύει χρησιμοποιώντας τους υδατάνθρακες του. Κυρίως χρησιμοποιούνται απόβλητα των βιομηχανιών αλλά και αστικά απόβλητα και μπορεί να παράγει βιοαιθανόλη και βιοαέριο που είναι μη ρυπογόνα. Το κόστος παραγωγής είναι συγκρίσιμο με αυτό της αιολικής ενέργειας και θεωρείται μια μορφή ενέργειας με μεγάλη προοπτική και αναμένεται να έχει ευρεία εφαρμογή στο μέλλον

2.2.5 Γεωθερμική ενέργεια

Είναι ενέργεια που προέρχεται υπό μορφή θερμότητας με φυσικό τρόπο από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων στο φλοιό της γης και παρατηρείται για παράδειγμα στους θερμοπίδακες και στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για κάλυψη θέρμανσης είτε για παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών αναγκών, όσον αφορά στη θέρμανση και το 20%, όσον αφορά στον ηλεκτρισμό με γεωθερμία

2.2.6 Ενέργεια από παλίρροιες

Η ανύψωση της στάθμης του νερού που προκαλείται από τα βαρυτικά πεδία της σελήνης και του ήλιου είναι το φαινόμενο που εκμεταλλευόμαστε για παραγωγή ενέργειας. Η στάθμη του νερού καθώς κατεβαίνει, εφόσον σταματήσει το φαινόμενο αυτό, το νερό περνάει μέσα από τουρμπίνες παράγοντας ενέργεια.

2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ Α.Π.Ε.

Πλεονεκτήματα

Είναι μορφές ενέργειας που μπορούν να δεχτούν εκμετάλλευση χωρίς κίνδυνο εξάντλησής τους και συγχρόνως μειώνεται και η χρήση εξαντλήσιμων ενεργειακών πόρων όπως είναι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, και ο άνθρακας.

Μειώνονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα περιορίζοντας έτσι το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Επίσης, αντικαθιστώντας τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κοινά καύσιμα, συμβάλουν στη μείωση επιπρόσθετων ρυπαντών, όπως είναι τα οξείδια του θείου και τα οξείδια του αζώτου που προκαλούν την όξινη βροχή και το φωτοχημικό νέφος αντίστοιχα.

Παράγεται εγχώρια ενέργεια, με αποτέλεσμα να ενισχύεται η κρατική οικονομία αλλά και η ενεργειακή ανεξαρτησία.

Προσφέρεται η δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή, κ.ά.)

Το κόστος λειτουργίας τους είναι σχετικά χαμηλό και σε ορισμένες περιπτώσεις αμελητέο και δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της οικονομίας.

Η κάθε εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει τις ανάγκες των καταναλωτών, τόσο τις μικρές όσο και τις μεγάλες. Η διάρκεια ολοκλήρωσης του κάθε έργου δεν είναι χρονοβόρα και επιπροσθέτως δημιουργούνται συνεχείς θέσεις εργασίας.

Σε πολλές περιπτώσεις αποτελούν το κέντρο άνθισης της οικονομίας σε υποβαθμισμένες περιοχές με την ανάπτυξη των επενδύσεων σε διάφορους τομείς όπως θερμοκήπια, τηλεθέρμανση και δασική βιομάζα.

Μειονεκτήματα

Ο συντελεστής απόδοσης είναι σχετικά μικρός και φτάνει μέχρι το 30% με αποτέλεσμα το κόστος επένδυσης να είναι υψηλό για μεγάλες εκμεταλλεύσιμες εκτάσεις. Για το λόγο αυτό δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα σαν κύρια πηγή ενέργειας αλλά και για την ενεργειακή κάλυψη μεγάλων πόλεων.

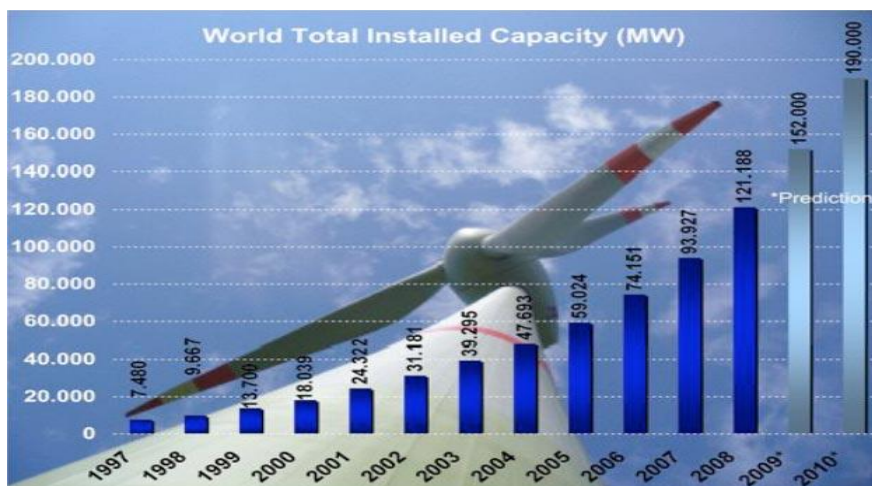
Η αποδοτικότητα ορισμένων από τις Α.Π.Ε. (ηλιακή, αιολική και υδροηλεκτρική) εξαρτάται από την εποχή του χρόνου, από τη γεωγραφική περιοχή και από το κλίμα.

Οι Α/Γ θεωρούνται αντιαισθητικές και αποδοκιμάζονται λόγω τους θορύβου αλλά και για τους θανάτους πουλιών που προκαλούν. Η εξέλιξη της τεχνολογίας αλλά και η καλύτερη γεωγραφική μελέτη έχουν ελαχιστοποιήσει τα προβλήματα αυτά.

3. Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Ο άνθρωπος ξεκίνησε να εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια του ανέμου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Μετά το 1980 η αιολική τεχνολογία αναπτύχθηκε σε τέτοιο βαθμό ώστε να είναι δυνατόν να υποστηρίξεται μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρισμού.



Γράφημα 3.1.1. Παγκόσμια εγκαταστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας 1996-2008 και προβλέψεις για 2009-2010.

Πηγή: IEC (*International Electrotechnical Commission*)

Στις αρχές του '80, το η παγκόσμια εγκαταστημένη αιολική ισχύς έφτανε τα 15MW. 12 χρόνια αργότερα η ανάπτυξη και βελτίωση των ανεμογεννητριών αλλά και επενδυτικά προγράμματα ανέβασαν την παραγόμενη ισχύ στα 2652 MW (πάνω από 25000 Α/Γ), εκ' των οποίων τα 1753 παράγονταν από τις Η.Π.Α και συγκεκριμένα από τη Καλιφόρνια, φέρνοντας την στη νούμερο ένα θέση των υπόλοιπων χωρών όσον αφορά την εγκατεστημένη αιολική ισχύ. Στη περιοχή Άλταμοντ εδρεύει το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο φιλοξενώντας πάνω από 16000 Α/Γ.

Μετά το 1992 ξεκίνησε η εγκατάσταση και σε άλλες πολιτείες, όπως Ουάσιγκτον και Αϊόβα. Δεύτερη στη σειρά είναι η Δανία όπου ήταν η πρώτη Ευρωπαϊκή χώρα η οποία ανέπτυξε σε σημαντικό βαθμό την τεχνολογία εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας και παρέμεινε για αρκετά χρόνια στη κορυφή όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρισμού από τον άνεμο. Στις αρχές τις δεκαετίας του 1990 άρχισαν να εισάγονται στην Ευρώπη ανεμοκινητήρες από 300 KW μέχρι και 0,5 MW αφυπνώντας το Γερμανικό κράτος και οδηγώντας το στη ραγδαία ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας. Η Γερμανία έφτασε το τεχνολογικό επίπεδο της Δανίας και πλέον έχει και πρωταγωνιστικό ρόλο και στη παγκόσμια αγορά. Ακολουθούν η Ολλανδία και η Ισπανία και συνολικά το 1992 η αιολική ισχύς που είχε εγκατασταθεί στην Ευρώπη ήταν 862MW. Η Δανία και Ολλανδία ήταν οι πρώτες χώρες όπου το 1990 εγκατέστησαν αιολικά πάρκα μέσα στη θάλασσα (σε αβαθείς περιοχές).

Στα μέσα του 1990 οι πρώτες ανεμογεννήτριες ισχύος 1-1,5 MW κατασκευάστηκαν και βγήκαν στην αγορά σηματοδοτώντας μια νέα αρχή για την ηλεκτροπαραγωγή από τον άνεμο. Η ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας τα τελευταία χρόνια ήταν ραγδαία και μέχρι το 2000 περίπου 18500 MW είχαν εγκατασταθεί σε 50 χώρες.

Στις μέρες μας πλέον η εγκατεστημένη ισχύς της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως ανέρχεται στα 157,9 GW και είναι αξιοσημείωτο να τονίσουμε ότι μέσα σε ένα μόλις χρόνο 2009-2010 υπήρξε παγκόσμια αύξηση κατά 31% σύμφωνα με το Συμβούλιο Αιολικής Ενέργειας (GWEC). Η Κίνα πραγματοποίησε το 1/3 της ανόδου αυτής πραγματοποιώντας παράλληλα 100 άνοδο στη δική της αγορά

Οι Η.Π.Α. μέσα στο 2009 αύξησαν την εγκατεστημένη ισχύ κατά 10MW δηλαδή άνοδο της τάξης του 39% και η συνολική ισχύς της είναι 35GW σύμφωνα με το GWEC. Ο Ντένις Μποντ αναφέρει ότι η Αμερικάνικη βιομηχανία, το 2009, ξεπέρασε κάθε ρεκόρ και το χρεώνει ως ιστορική επιτυχία στη μείωση των εκπομπών ρύπων αλλά και στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.

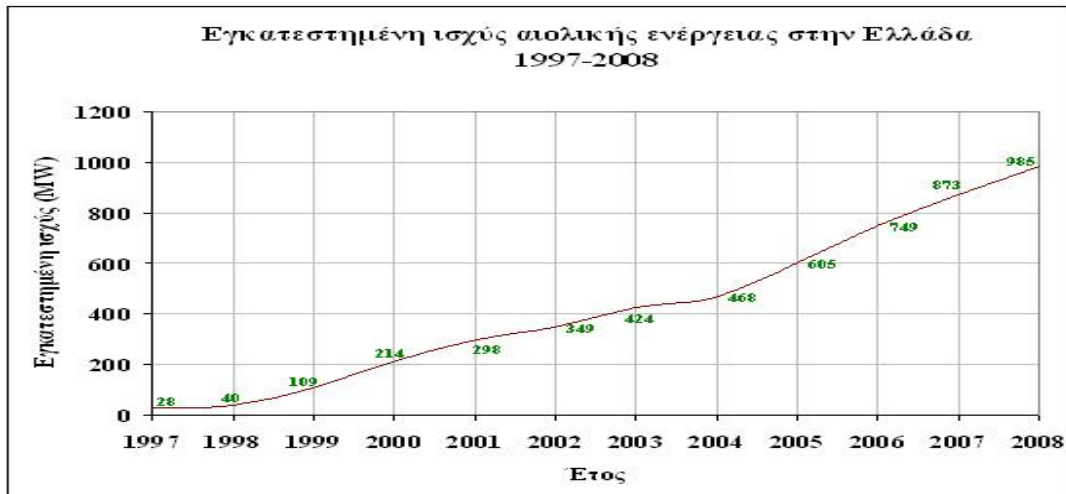
Στην Ευρώπη την ίδια χρονιά οι επενδύσεις έφτασαν τα 13 δις. ευρώ και η εγκατεστημένη ισχύς αυξήθηκε κατά 23% σε σχέση με το 2008. Πλέον, στην Ευρώπη, η εγκαταστημένη ισχύς έχει φτάσει 74,767MW και οι χώρες που προπορεύονται φαίνονται στο Πιν. 3.1.1

Πίνακας 3.1.1: Οι Ευρωπαϊκές χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη αιολική ισχύ
Πηγή: Global Wind Energy Council – GWEC

ΧΩΡΕΣ	ΓΕΡΜΑΝΙΑ	ΙΣΠΑΝΙΑ	ΙΤΑΛΙΑ	ΓΑΛΛΙΑ	ΗΝΩΜΕΝΟ ΒΑΣΙΛΕΙΟ
ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (Watt)	2459	2459	2459	2459	2459

3.2 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

Η αιολική βιομηχανία στην Ελλάδα για αρκετά χρόνια ήταν αρκετά πίσω λόγω αρκετών προβλημάτων. Η εγκατεστημένη αιολική ισχύς στη Ελλάδα είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με το αιολικό δυναμικό της. Στο γράφημα 3.2.1 απεικονίζεται η ανάπτυξη της χώρας μας στον τομέα της αιολικής ενέργειας τα έτη 1997-2008 καθώς και η μηνιαία παραγωγή.



Γράφημα 3.2.1: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα 1997-2008

Μετά από ορισμένες μετατροπές του νόμου, όσον αφορά στην εγκατάσταση των Α/Γ και στην απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρισμού, η κατάσταση άλλαξε σημαντικά. Οι νέοι επενδυτές έχουν πλέον σημαντικά κίνητρα για να επενδύσουν στην αιολική ενέργεια και το ενδιαφέρον ολοένα και αυξάνεται. Παρόλα αυτά οι χρονοβόρες γραφειοκρατικές διαδικασίες καθώς και οι αντιδράσεις του απλού λαού για θέματα θορύβου αλλά και έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού είναι μερικά από τα προβλήματα εξαιτίας των οποίων η Ελλάδα κρατάει μια από τις τελευταίες θέσεις στην Ευρώπη στην εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.

Πίνακας 3.2.1: Μέσες στάθμες θορύβου σε Ντεσιμπέλ.

Πηγή: Greenpeace

ΜΕΣΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΝΤΕΣΙΜΠΕΛ	
Αεροσκάφος	140
Κομπρεσέρ	120
Βιομηχανικός θόρυβος	100
Στερεοφωνικό	90
Εσωτερικό αυτοκινήτου	80
Γραφείο	60
Ανεμογεννήτρια	45-60
Σπίτι	50
Υπνοδωμάτιο	30
Ψίθυρος	20
Πτώση φύλων	10

Η Ελλάδα είναι μια χώρα με αμέτρητα νησιά και αυτό συνεπάγεται ισχυρούς ανέμους οι οποίοι συνήθως πνέουν στα νησιά. Το ηλεκτρικό όμως δίκτυο σε πολλές περιπτώσεις δεν υποστηρίζει μια αιολική επένδυση και η Ρ.Α.Ε. έχει χαρακτηρίσει πολλά νησιά, όπως η Σάμος, ως κορεσμένα. Στη Δυτική Ελλάδα, αν και το αιολικό δυναμικό δεν είναι στον ίδιο σε σχέση με άλλες περιοχές, το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ισχυρό και ο συνδυασμός με το ευνοϊκό γεωγραφικό ανάγλυφο της την καθιστούν ενδιαφέρουσα για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων. Στην Ελλάδα υπάρχουν επίσης πολλές περιοχές οι οποίες είναι κατάλληλες για την εγκατάσταση παράκτιων

αιολικών πάρκων. Τέτοιες περιοχές είναι οι Κυκλάδες, το Βόρειο Αιγαίο, η Κρήτη καθώς και το βόρειο Ιόνιο.

Μέχρι το 2020 η Ελλάδα έχει βάλει ως στόχο, εκτός από την ενεργειακή ανεξαρτησία, να πετύχει:

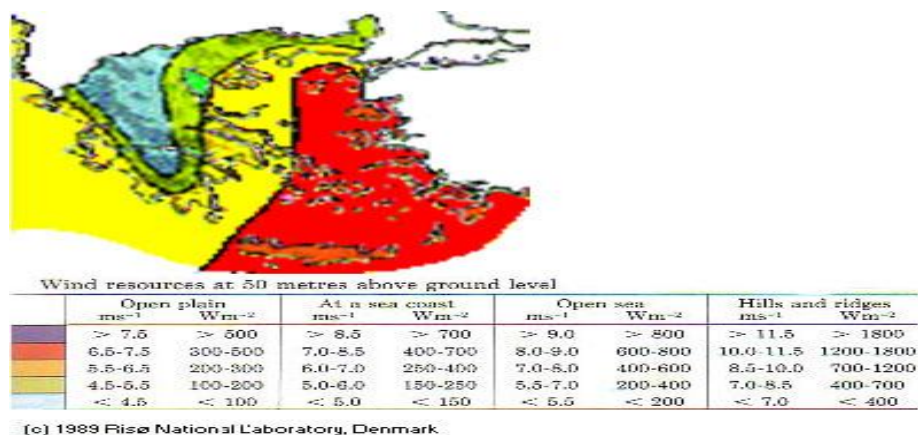
- Εξοικονόμηση ενέργειας κατά 20%
- 10000MW εγκατεστημένη αιολική ισχύ
- Το 18% της παραγόμενης ενέργειας να είναι από Α.Π.Ε.

Για να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι θα πρέπει:

- Να μειωθούν οι γραφειοκρατικές διαδικασίες
- Να υποστηρίζεται το αιολικό δυναμικό από τις ανάλογες υποδομές
- Να υπάρξουν κινήσεις της χώρας για όφελος και ανάπτυξη όχι μόνο της αιολικής ενέργειας αλλά και γενικώς των Α.Π.Ε
- Να δοθούν κίνητρα και ευκαιρίες στους μικροεπενδυτές

Ενδιαφέρον, για την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού, έχουν οι περιοχές με ικανοποιητικές μέσες ταχύτητες ανέμου. Στα νησιά του Αιγαίου, στην Κρήτη και στην Αν. Στερεά Ελλάδα οι μέσες ταχύτητες ανέμου είναι 6 – 7 m/sec, με αποτέλεσμα η παραγόμενη ενέργεια να είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, γι' αυτό παρατηρείται πληθώρα έργων εκμετάλλευσης στις περιοχές αυτές.

Για την καλύτερη κατανόηση της δυνατότητας ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη, το Ινστιτούτο Riso της Δανίας δημιούργησε ένα χάρτη, τον Ευρωπαϊκό Άτλαντα Αιολικού Δυναμικού, που αναδεικνύει τις δυνατότητες ανάπτυξης για κάθε περιοχή. Την Ελλάδα αντιπροσωπεύει η Εικ. 3.2.1 που δημιουργήθηκε με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Άτλαντα.



Σχήμα 3.2.1: Άτλαντας αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα
 Πηγή: National Labotary, Denmark

4. Αιολική Ενέργεια και Αιολικό Δυναμικό

4.1 ΑΝΕΜΟΣ

Η οριζόντια κίνηση μαζών του ατμοσφαιρικού αέρα ονομάζεται άνεμος. Τα κύρια χαρακτηριστικά του ανέμου είναι η ταχύτητα του (m/s), η διεύθυνσή του (π.χ. Βόρειος, Νότιος κ.τ.λ.) και η ένταση του η οποία μετρείται σε κλίμακα Μποφόρ.

Η κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα διαμορφώνεται από 3 παράγοντες:

1. Από την περιστροφή της γης γύρω από τον κάθετο άξονα της
2. Από την ηλιακή ενέργεια που μεταφέρεται από τον ήλιο και απορροφάται από την επιφάνεια της γης αλλά και από την ατμόσφαιρά της
3. Από τις ανωμαλίες - ανομοιομορφίες της επιφάνειας της γης

Η ατμοσφαιρική πίεση εξαιτίας των ανωτέρω τριών παραγόντων δεν είναι σταθερή στη γήινη επιφάνεια, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια συνεχή κίνηση του αέρα με σκοπό να αντισταθμίσει αυτή τη διαφορά πιέσεων.

Τα οφέλη των ανέμων είναι πολλά. Εκτός από το γεγονός ότι είναι πολύτιμοι για το περιβάλλον, αφού δημιουργούν σύννεφα και συνεπώς βροχές και ανακυκλώνουν τον ατμοσφαιρικό αέρα, είναι χρήσιμοι και στην οικονομία καθώς διαθέτουν σημαντικά ποσά ενέργειας τα οποία μπορούμε να εκμεταλλευτούμε με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, η κίνηση των ανεμόμυλων αλλά και των ιστιοφόρων οφείλεται στον αέρα.

4.1.2 Ένταση ανέμου

Η ένταση του ανέμου μπορεί να εκφραστεί με δύο τρόπους, είτε με την πίεση που ασκεί πάνω στα σώματα είτε με την ταχύτητα του. Στον κλάδο της Μετεωρολογίας η έντασή του ανέμου χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα και μετρείται συνήθως σε m/s ή σε κόμβους. Ένας άλλος τρόπος λίγο πιο εμπειρικός βέβαια είναι η κλίμακα Μποφόρ και βάση αυτής της κλίμακας έχει χαρακτηριστεί και η ένταση του ανέμου σύμφωνα με το Πιν. 4.1.2.1.

Στο Πιν. 4.1.2.1 φαίνονται διάφορες καταστάσεις του ανέμου.

Πίνακας 4.1.2.1: Κατάσταση ανέμου σε διάφορες τιμές της κλίμακας Μποφόρ
Πηγή: Wikipedia

Κατάσταση ανέμου	Μποφόρ
Νηνεμία	0
Υποπνέων	1
Ασθενής	2 έως 3

Μέτριος	4 έως 5
Ισχυρός	6
Σφοδρός	7
Θυελλώδης	8 έως 9
Καταιγίζων	10 έως 11
Έντασης τυφώνα	12

4.2 Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΕΝΙΚΑ

Ο άνεμος κατά την κίνηση του μεταφέρει σημαντικά ποσά ενέργειας. Η ενέργεια αυτή του ανέμου ονομάζεται αιολική ενέργεια και χαρακτηρίζεται με τον όρο «καθαρή» διότι δεν εκπέμπει ρύπους και δε μολύνει την ατμόσφαιρα. Η αιολική ενέργεια συγκαταλέγεται στις Α.Π.Ε. καθώς είναι αστείρευτη πηγή. Ο άνθρωπος πρωτοεκίνησε να εκμεταλλεύεται την ενέργεια των ανέμων με τα ιστιοφόρα πλοία κάνοντας μεγάλα ταξίδια, για την εποχή εκείνη, εκμεταλλευόμενος την ενέργεια που του παρείχε η φύση και αργότερα εμφανίστηκαν οι ανεμόμυλοι οι οποίοι βρήκαν εφαρμογή στην άλεση σιταριού και στην άντληση νερού.

Όπως προαναφέρθηκε η ηλιακή ακτινοβολία είναι ο βασικός παράγοντας δημιουργίας των ανέμων καθώς το 2% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Η ενέργεια την οποία μπορούμε να εκμεταλλευτούμε από τον άνεμο μπορεί να λύσει το πρόβλημα της ηλεκτροδότησης, ειδικά σε απομονωμένες περιοχές καθώς είναι αποκεντρωμένο «καύσιμο» και πρακτικά ανεξάντλητο. Το πιο σημαντικό είναι ότι παρέχεται δωρεάν και συγχρόνως προστατεύει την περιβαλλοντολογική μόλυνση μειώνοντας την παραγωγή ενέργειας από συμβατικά μέσα.

Ενημερωτικά αναφέρουμε ότι:

Κατά μέσο όρο, εκλύεται στην ατμόσφαιρα 1Kg διοξειδίου του άνθρακα, 10-20γρ. διοξείδιο του θείου, 1,5-15γρ. οξειδίων του αζώτου καθώς και άλλα μικρά ποσοστά επικίνδυνων ρύπων για κάθε Kw/h που παράγεται από άνθρακα ή πετρέλαιο. Αντίθετα αποσποούνται 3000-3,500 τόνοι διοξείδιο του άνθρακα για κάθε εγκατεστημένο Mw αιολικής ενέργειας ετησίως και εκτός αυτού με κάθε αιολικό πάρκο ισχύος 10MW τροφοδοτεί με ηλεκτρικό ρεύμα 11000 νοικοκυριά και εξοικονομεί 3000 τόνους πετρέλαιο.

Εκτιμάται ότι το παγκόσμιο αιολικό δυναμικό εάν εκμεταλλευτεί σωστά μπορεί να καλύψει τη διπλάσια ποσότητα ενέργειας από αυτή που καταναλώνεται παγκοσμίως σήμερα. Ενδεικτικά το αιολικό δυναμικό στις Η.Π.Α. μπορεί να αποφέρει ενέργεια κατά 90% μεγαλύτερη από την καταναλισκόμενη γεγονός που αποδεικνύει πόσο πλούσια πηγή ενέργειας είναι ο άνεμος.

Σημαντικό μειονέκτημα όμως είναι ότι η παραγωγή αιολικής ενέργειας εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τον άνεμο. Επειδή όμως υπάρχουν και οι περιπτώσεις όπου η ενέργεια του αέρα δεν είναι εκμεταλλεύσιμη από τις ανεμογεννήτριες (είτε πολύ μεγάλη είτε πολύ μικρή), υπάρχει εφεδρεία συμβατικών σταθμών. Για

παράδειγμα, στην Κρήτη οι αιχμές φορτίου καλύπτονται από αεροστρόβιλους και θα μπορούσε να γίνει ένας συνδυασμός με υδροηλεκτρικά έργα.

4.3 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΙΜΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Η ενέργεια που διαθέτει ο άνεμος μπορεί να ληφθεί εάν ο άνεμος περάσει μέσα από μια πτερωτή κατάλληλα σχεδιασμένη ώστε να της εξασκήσει ροπή. Η πτερωτή θα περιστραφεί και ως εκ τούτου θα περιστρέψει το ρότορα με τον οποίο είναι συνδεδεμένη. Άρα η κινητική ενέργεια θα μετατραπεί σε περιστροφική κίνηση.

Καθώς η Α/Γ αποδесμεύει την ενέργεια του ανέμου, αυτός επιβραδύνεται, γεγονός που τον κάνει να φεύγει με μικρότερη ταχύτητα όταν περάσει το δρομέα και να διαχέεται σε κάποιο βαθμό. Δυστυχώς ακόμα και οι σύγχρονες Α/Γ δεν είναι δυνατόν να εκμεταλλευτούν όλη την ενέργεια του ανέμου παρά μόνο ένα ποσοστό της.

Μια από τις πιο σημαντικές μελέτες είναι ο υπολογισμός του εκμεταλλεύσιμου αιολικού δυναμικού. Για να γίνει μια σωστή μελέτη πρέπει να γνωρίζουμε τις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου κατά τη διάρκεια του χρόνου και σε δεύτερη μοίρα έρχεται η ετήσια ταχύτητα του ανέμου καθώς και ο βαθμός απόδοσης του ανεμοκινητήρα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τον υπολογισμό της μεταβολής του ανέμου. Ένας από αυτούς είναι μέσω της κατανομής Weibull.

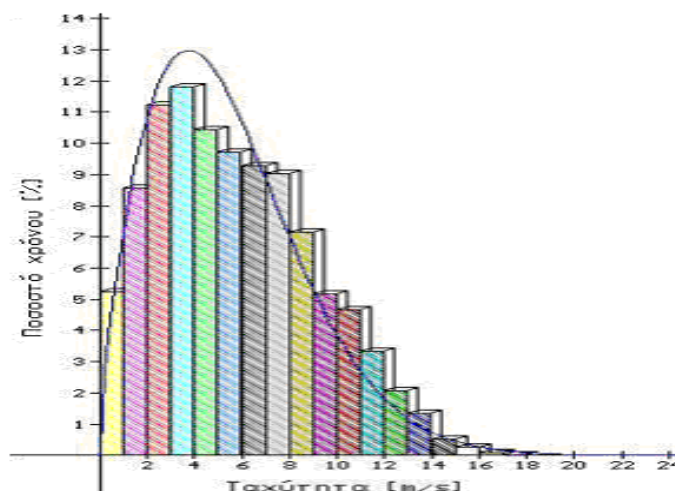
Η κατανομή Weibull μαθηματικά εκφράζεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$p(V) = \frac{k}{V} \left(\frac{V}{C} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{C} \right)^k} \quad (4.3.1)$$

όπου : $p(V)$: η συχνότητα εμφάνισης της ταχύτητας του ανέμου V

C : η χαρακτηριστική ταχύτητα του ανέμου

k : η παράμετρος μορφής



Γράφημα 4.3.1: Θεωρητική κατανομή Weibull πάνω στο ιστόγραμμα της συχνότητας ταχυτήτων

Για την Βορειοδυτική Ευρώπη χρησιμοποιείται παράμετρος μορφής 2, ενώ για την Ελλάδα είναι από 1,4-2 και σε Νότιες περιοχές μπορεί να φτάσει και το 1,22 (Κρήτη). Η παράμετρος παίζει σημαντικό ρόλο καθώς από αυτή εξαρτάται η ομοιομορφία της κατανομής. Συγκεκριμένα, για χαμηλές τιμές της παραμέτρου η κατανομή είναι πιο ομοιόμορφη και οι ταχύτητες είναι πιο συχνές στη μέση τιμή. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι τιμές του k και C για διάφορες περιοχές της Ελλάδας.

Πίνακας 4.3.1: Παράμετροι k και C για διάφορες περιοχές

Πηγή: Πτυχιακή εργασία Τακιδέλλη

Περιοχή	k	C (m/s)
Σητεία	1,32	5,53
Ηράκλειο	1,63	4,72
Χανιά	1,52	4,6
Κύθηρα	1,27	5,78
Μήλος	1,41	5,86
Ρόδος	2,15	7,24
Θήρα	1,2	5,2

Για τη δημιουργία της κατανομής Weibull είναι απαραίτητος ο πειραματικός προσδιορισμός, όσον αφορά στη συχνότητα των ταχυτήτων, αλλά και η γνώση της μορφολογίας του εδάφους, καθώς οι ταχύτητες πρέπει να αναχθούν από το ύψος των μετρήσεων στο ύψος του ρότορα της Α/Γ. Η αναγωγή γίνεται με τη βοήθεια εξίσωσης 4.3.2:

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^a \quad (4.3.2)$$

όπου: a η παράμετρος η οποία εξαρτάται από την τραχύτητα αλλά και τη μορφολογία του εδάφους, και παίρνει τιμές σύμφωνα με το Πίν. 4.3.2:

Πίνακας 4.3.2: Τιμές της παραμέτρου a

Άμμος	0,1
Θερισμένο γρασίδι	0,13
Ψηλό γρασίδι	0,19
Προάστιο	0,32

Για ορισμένη ταχύτητα η ισχύς του ανέμου εκφράζεται ως :

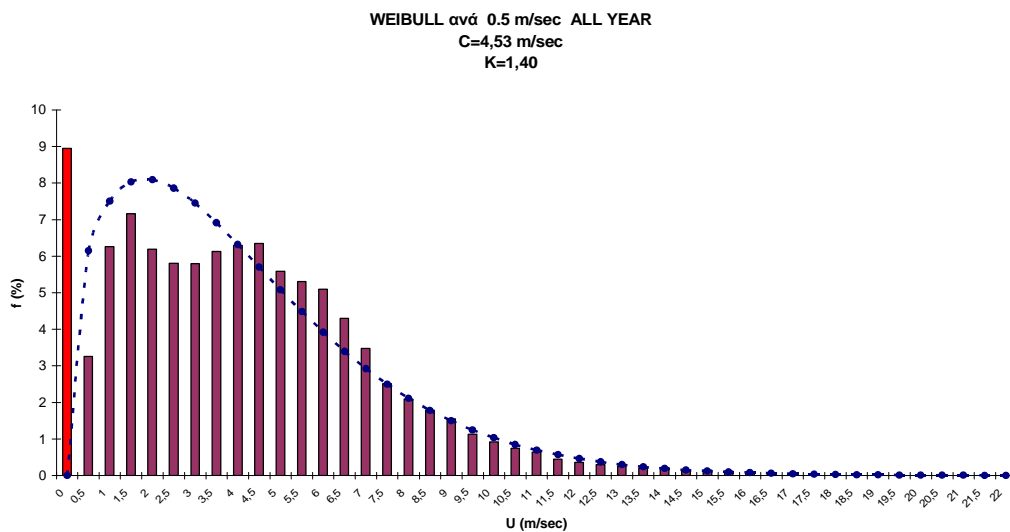
$$P = 0,5 * \rho * A * u^3 \quad (4.3.3)$$

όπου:

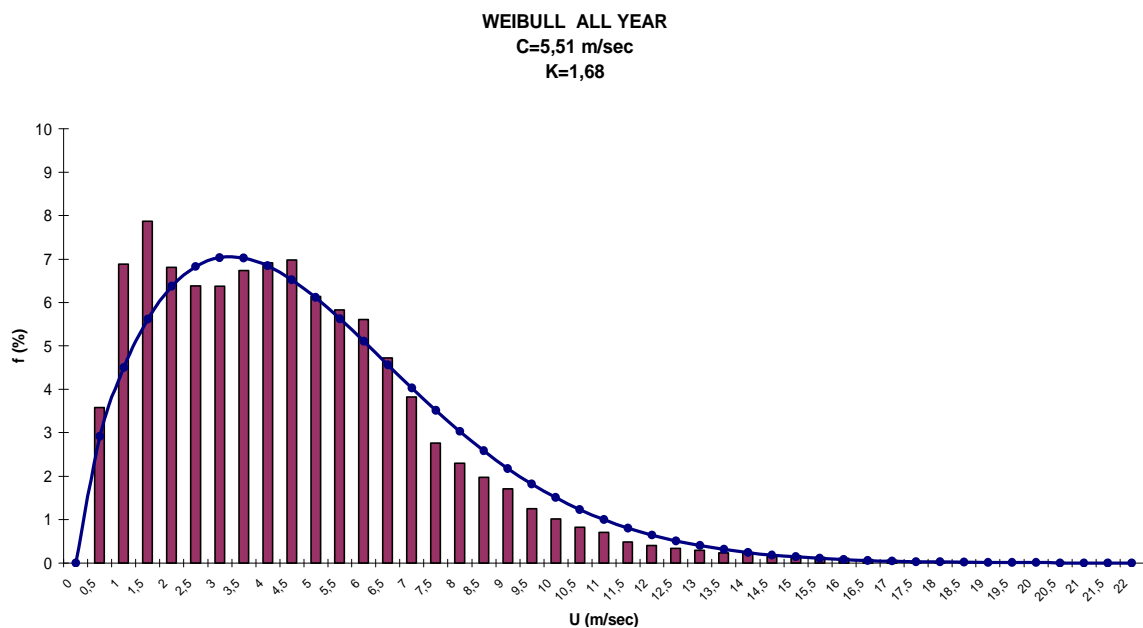
ρ	\hat{a}	είναι η πυκνότητα του αέρα
A	\hat{a}	είναι η επιφάνεια από όπου διέρχεται ο άνεμος
U	\hat{a}	είναι η ταχύτητα του ανέμου

Στα παρακάτω γραφήματα φαίνεται η κατανομή Weibull η οποία αντιστοιχεί σε μετεωρολογικά δεδομένα της Πάτρας για τα έτη 1994 έως 2000. Ο υπολογισμός της κατανομής Weibull καθώς και η κατασκευή των γραφημάτων έχει γίνει από τον σπουδαστή Τακιδέλλη Χριστοφά κατά την εκπόνηση της διπλωματικής του εργασίας και τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν δόθηκαν από το Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του Πανεπιστημίου Πατρών.

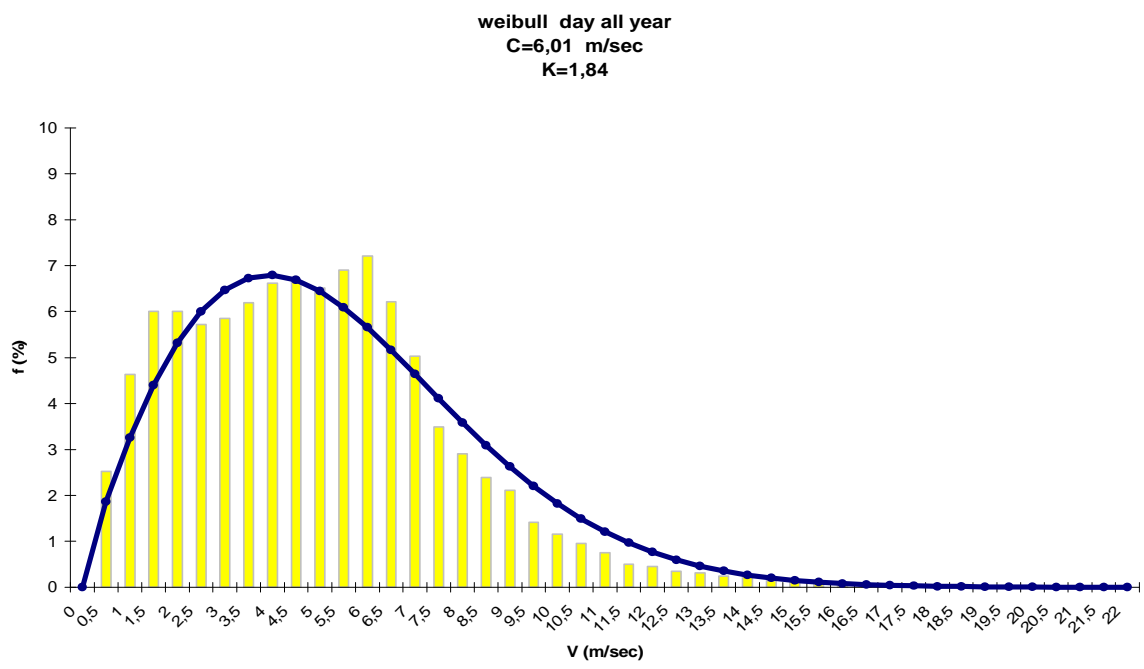
Ο υπολογισμός της κατανομής Weibull δεν είναι στα όρια της συγκεκριμένης πτυχιακής και γι' αυτό χρησιμοποιούνται οι δύο ανωτέρω πηγές ως επιπρόσθετο υλικό.



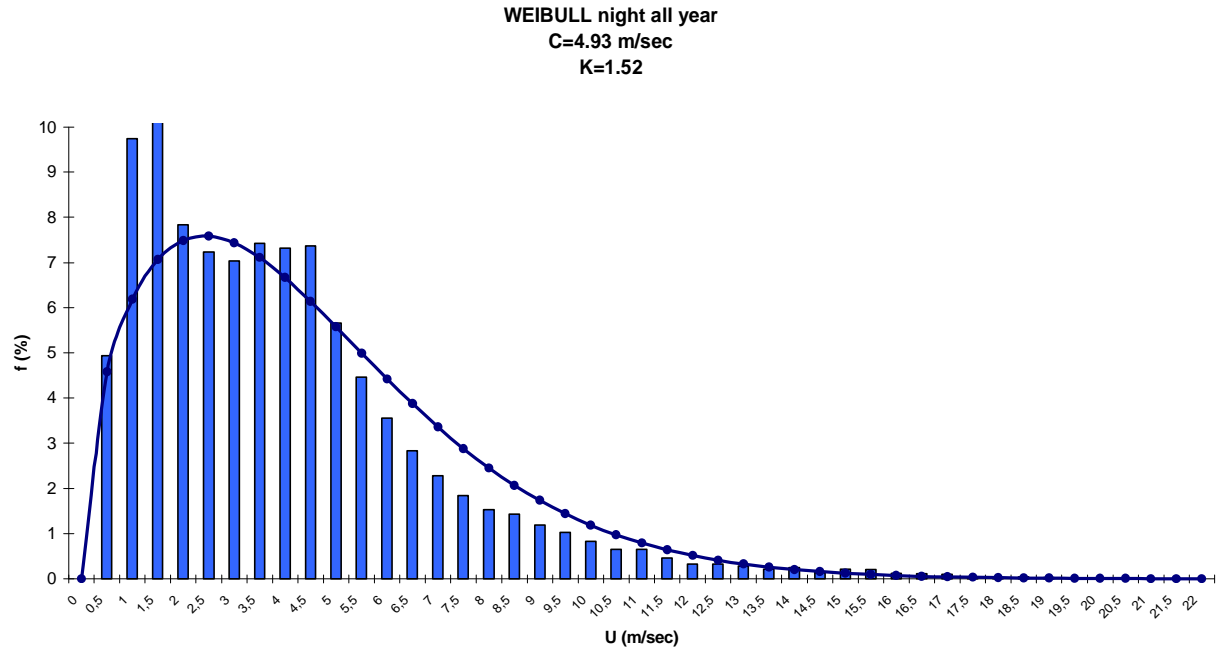
Γράφημα 4.3.2: Διάγραμμα της πειραματικής πιθανότητας $f(\%)$ (ράβδοι) και της διανομής $f(\%)$ Weibull συναρτήσεως της ταχύτητας u (m/s) για όλα τα χρόνια, με βήμα ταχύτητας ανέμου 0,5 m/s. **(Εμπεριέχονται τιμές νηνεμίας)**



Γράφημα 4.3.3: Διάγραμμα της πειραματικής πιθανότητας $f(\%)$ και της διανομής $f(\%)$ Weibull συναρτήσεως της ταχύτητας u (m/s) για όλα τα χρόνια, με βήμα ταχύτητας ανέμου 0,5 m/s. **(Δεν εμπεριέχονται τιμές νηνεμίας)**

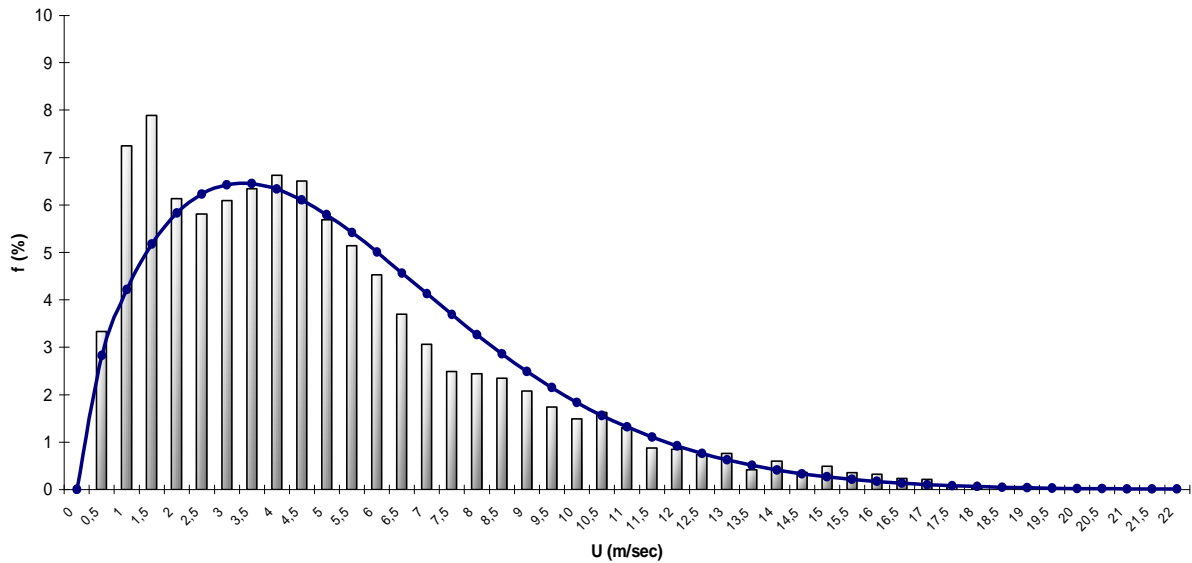


Γράφημα 4.3.4: Διάγραμμα της πειραματικής πιθανότητας $f(\%)$ και της διανομής $f(\%)$ Weibull συναρτήσεϊ της ταχύτητας u (m/s) για **ημέρα**



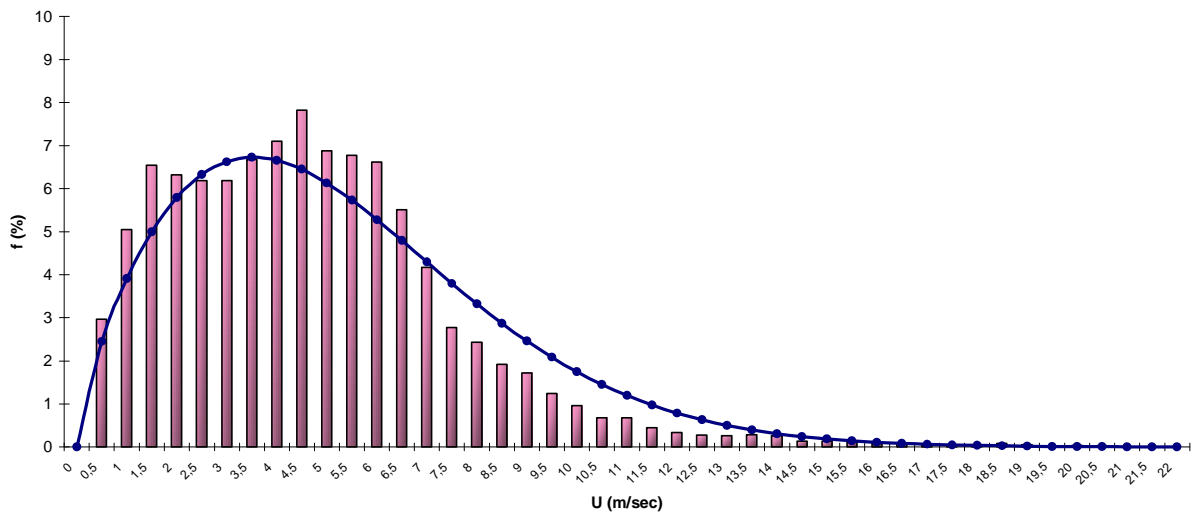
Γράφημα 4.3.5: Διάγραμμα της πειραματικής πιθανότητας $f(\%)$ και της διανομής $f(\%)$ Weibull συναρτήσεϊ της ταχύτητας u (m/s) για **νύχτα**

WEIBULL ΧΕΙΜΩΝΑΣ
 $C=5,94$ m/sec
 $K=1.63$



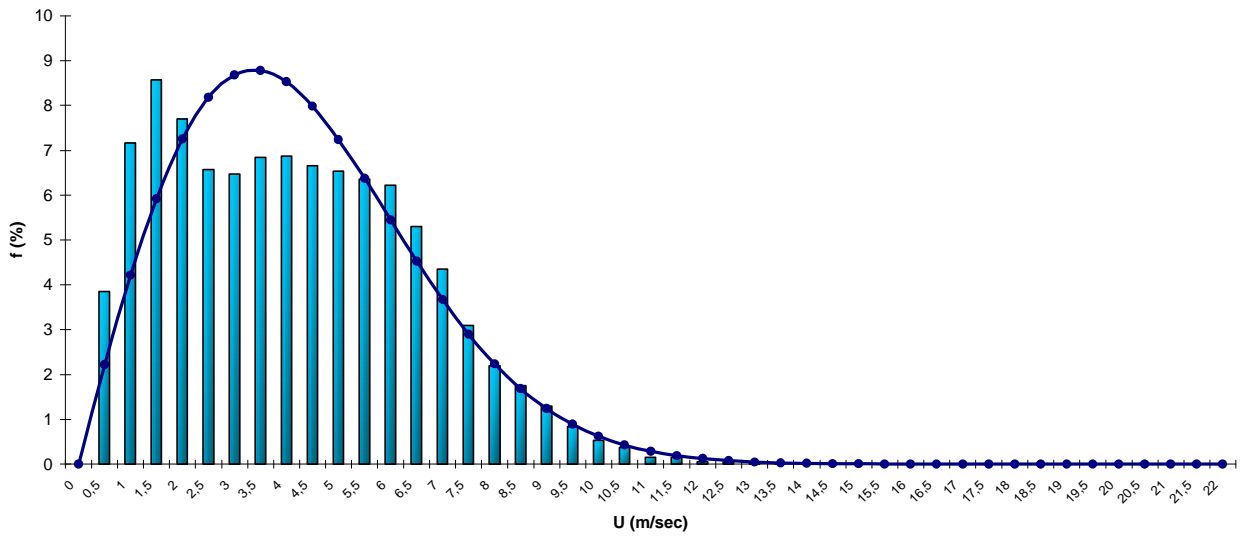
Γράφημα 4.3.6: Διάγραμμα της πειραματικής πιθανότητας $f(\%)$ και της διανομής $f(\%)$ Weibull συναρτήσεϊ της ταχύτητας u (m/s) για **χειμώνα**

WEIBULL ΑΝΟΙΞΗ
 $C=4.89$ m/sec
 $K=1.62$

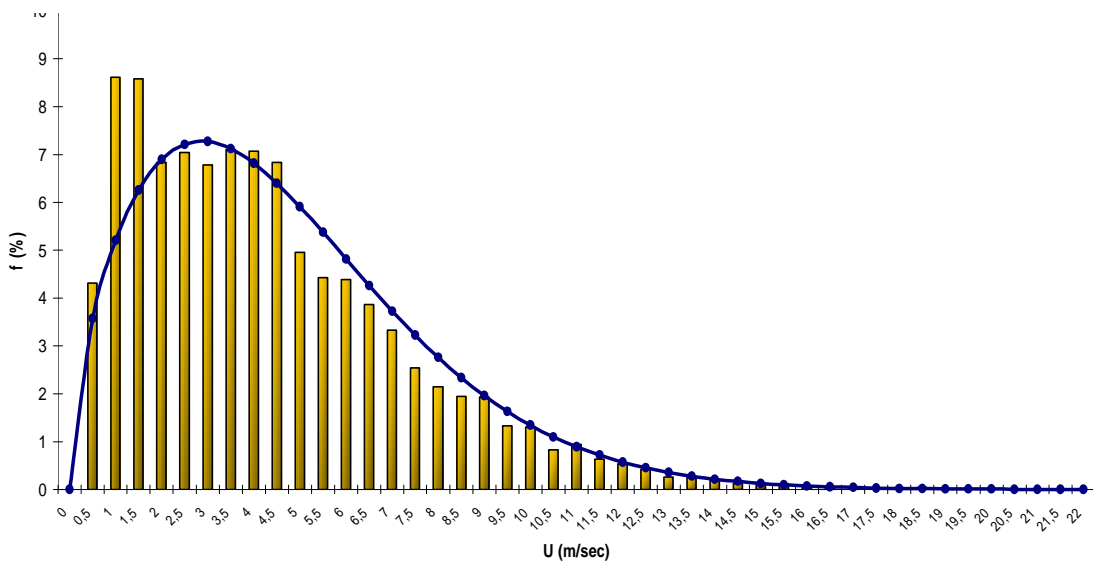


Γράφημα 4.3.7: Διάγραμμα της πειραματικής πιθανότητας $f(\%)$ και της διανομής $f(\%)$ Weibull συναρτήσεϊ της ταχύτητας u (m/s) για **άνοιξη**

WEIBULL ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ
 $C=4.83$ m/sec
 $K=1.97$



Γράφημα 4.3.8: Διάγραμμα της πειραματικής πιθανότητας $f(\%)$ και της διανομής $f(\%)$ Weibull συναρτήσεως της ταχύτητας u (m/s) για **καλοκαίρι**

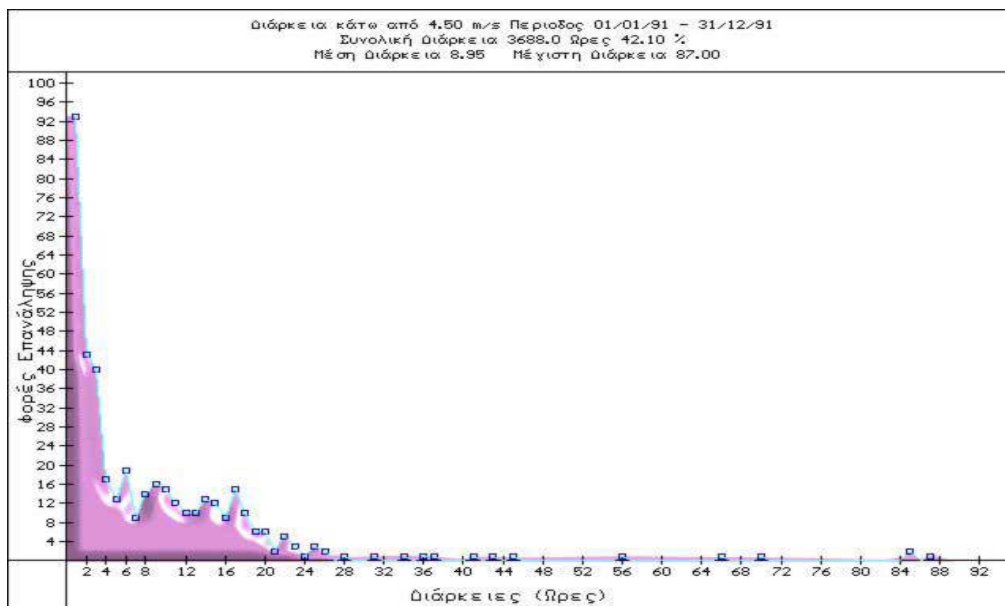


Γράφημα 4.3.9: Διάγραμμα της πειραματικής πιθανότητας $f(\%)$ και της διανομής $f(\%)$ Weibull συναρτήσεως της ταχύτητας u (m/s) για **φθινόπωρο**

4.3.1 Κατάσταση νηνεμίας

Κατάσταση νηνεμίας ονομάζεται η κατάσταση για την οποία η ταχύτητα του ανέμου δεν ξεπερνάει μια συγκεκριμένη τιμή. Υπάρχουν διαγράμματα όπου φαίνεται το ποσοστό του χρόνου όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από ένα επίπεδο για N ώρες. Με αυτό εκτιμάται η δυνατότητα του ανέμου να καλύπτει τις ενεργειακές

ανάγκες και υπολογίζονται τα απαραίτητα αποθηκευτικά μέσα. Ένα τέτοιο παράδειγμα καμπύλης νημεμίας φαίνεται παρακάτω:



Γράφημα 4.3.10... Καμπύλη νημεμίας ανέμου

5 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου δεν είναι μια τόσο απλή διαδικασία, καθώς είναι ένα μέγεθος χρονικά μεταβαλλόμενο και γι' αυτό το λόγο η σχεδίαση των ανεμογεννητριών πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να συνδυάζει την οικονομία ως προς τη κατασκευή αλλά και την απόδοση ως προς τη λειτουργία. Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογική εξέλιξη αλλά και οι συνεχείς έρευνες έχουν αποδώσει καρπούς, καθώς πλέον κατασκευάζονται ανεμογεννήτριες με αρκετά μεγάλη απόδοση και χαμηλότερο κόστος. Η τεχνολογία υλικών και η πρόοδος στην αεροδυναμική έχουν συμβάλει σημαντικά στη πρόοδο αυτή.

Όπως προαναφέρθηκε, προτού κατασκευαστεί μια ανεμογεννήτρια γίνεται πολύ προσεκτική μελέτη η οποία χωρίζεται σε δύο στάδια: στον αεροδυναμικό σχεδιασμό και στην ηλεκτρομηχανολογική μελέτη. Κατά τον αεροδυναμικό σχεδιασμό σχεδιάζεται η κατά το δυνατότερο αποδοτική μηχανή αποδέσμευσης της αιολικής ενέργειας και μετατροπής της σε ηλεκτρική και στον ηλεκτρομηχανολογικό η υλοποίηση της κατά τον αποδοτικότερο και οικονομικότερο τρόπο.

Ο άνεμος είναι ο βασικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει το βαθμό απόδοσης των ανεμογεννητριών. Συνεπώς, κατά το σχεδιασμό, η επιλογή του δρομέα και της γεννήτριας είναι πολύ βασικό κομμάτι. Οι ανεμογεννήτριες πρέπει να είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να ανταποκρίνονται πάντα καλά σε οποιαδήποτε συνθήκη ανέμου αντιμετωπίσουν. Δεν πρέπει να είναι πολύ μικρές γιατί δε θα μπορούν να εκμεταλλευτούν την ταχύτητα του ανέμου σε μεγάλες ταχύτητες αλλά ούτε και πολύ μεγάλες ώστε να μην πέφτει η απόδοσή τους. Σε γενικές γραμμές, αποδοτική λειτουργία υπάρχει για ταχύτητα ανέμου 6-8 m/s. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι αποδόσεις των ανεμογεννητριών για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Πίνακας 5.1.1: Κατάσταση λειτουργία ανεμοκινητήρων για διάφορες ταχύτητες ανέμου

Μέση Ετήσια Ταχύτητα Ανέμου	
Ως 4 m/s	Μη αποδοτικό
Ως 5 m/s	Ανεπαρκές
Ως 6 m/s	Μέτριο
Ως 7 m/s	Καλό
Ως 8 m/s	Άριστο

Για ταχύτητες μικρότερες των 4 m/s η ενέργεια του ανέμου είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα (καθώς εξαρτάται από τη ταχύτητα στο κύβο) με αποτέλεσμα η λειτουργία σε τόσο χαμηλές ταχύτητες να αποφέρει πολύ χαμηλή ηλεκτρική ενέργεια.

Ο καλύτερος τρόπος μέτρησης του αιολικού δυναμικού είναι με συνεχή παρακολούθηση για ένα χρόνο της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή που πρόκειται να εγκατασταθεί η Α/Γ.

5.2 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ

Όπως προαναφέρθηκε η ταχύτητα του ανέμου είναι μεταβλητό μέγεθος και οι τιμές του μπορεί να μεταβάλλονται σε μικρά χρονικά διαστήματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός του ότι η κίνηση του ανέμου στηρίζεται σε νόμους της ρευστομηχανικής, βάσει της τυρβώδης ροής των ρευστών. Η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να υπολογιστεί για οποιαδήποτε χρονική στιγμή t βάση της θεωρητικής ανάλυσης που ισχύει για τυρβώδη πεδία και μαθηματικά εκφράζεται ως:

$$V(t) = \bar{V} + V'(t) \quad (5.2.1)$$

δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου τη χρονική στιγμή t ισούται με το άθροισμα της μέσης ταχύτητας και της διακύμανσης του ανέμου, ενώ η μέση ταχύτητα ανέμου για χρονική περίοδο T υπολογίζεται ως:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V'(t) dt \quad (5.2.2)$$

Είναι πολύ σημαντικό όταν γίνεται μέτρηση των ταχυτήτων σε κάθε περιοχή να γίνεται και καταγραφή των μέγιστων ταχυτήτων. Αυτό γίνεται με στατιστικούς προσδιορισμούς χρησιμοποιώντας τις μέσες ωριαίες ταχύτητες σε εκείνη την περιοχή για μια χρονική περίοδο T . Ο υπολογισμός των μέγιστων ταχυτήτων γίνεται γιατί η καταπόνηση των τμημάτων των ανεμογεννητριών σχετίζεται άμεσα με αυτό και συνεπώς και η διάρκεια ζωής τους.

5.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΥΨΟΣ

Ένα άλλο μέγεθος το οποίο επηρεάζει την ταχύτητα του ανέμου είναι το υψόμετρο και απαιτείται διαφορετική διαδικασία υπολογισμού της μέσης ταχύτητας του ανέμου σε περιοχές όπου το ύψος μεταβάλλεται. Για τον υπολογισμό γίνεται αναγωγή της ταχύτητας του ανέμου σε ένα συγκεκριμένο ύψος το οποίο θεωρείται και ως σημείο αναφοράς σε οποιοδήποτε ύψος. Παρακάτω αναφέρονται οι κυριότερες σχέσεις που εφαρμόζονται σε τέτοιες περιπτώσεις.

Οι κυριότερες σχέσεις της μεταβολής του ανέμου με το ύψος είναι οι παρακάτω :

1. Η λογαριθμική σχέση (log-law) η οποία ορίζεται ως :

$$\frac{V(z)}{V(z_1)} = \frac{\ln \left[\frac{z}{z_0} \right]}{\ln \left[\frac{z_1}{z_0} \right]} \quad (5.3.2)$$

και δίνει την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 'z' από το έδαφος σε σχέση με τη ταχύτητα του ανέμου σε ύψος αναφοράς 'z₁'.

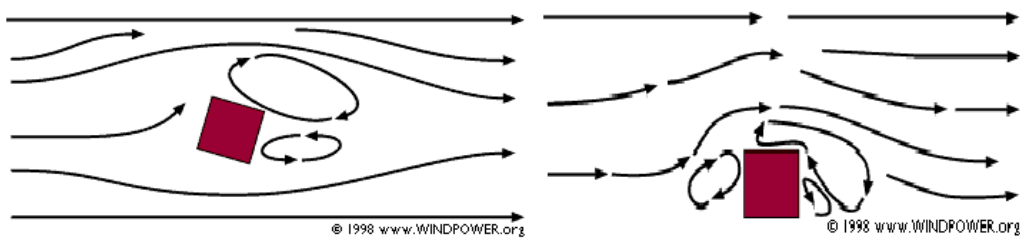
2. Η εκθετική σχέση (power law) η οποία ορίζεται ως :

$$\frac{V(z)}{V(z_1)} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^a \quad (5.3.3)$$

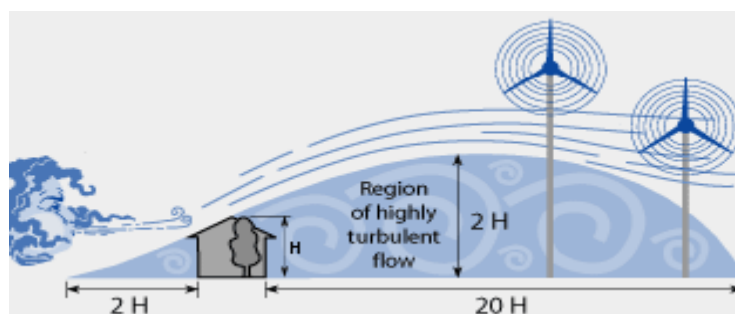
και υπολογίζει την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 'z' από το έδαφος συναρτήσει της παραμέτρου 'α'. Η παράμετρος α εξαρτάται από δύο παράγοντες: την τραχύτητα του εδάφους και τη διεύθυνση του ανέμου. Οι τιμές αυτής της παραμέτρου κυμαίνονται μεταξύ του 0,07 για παγωμένες επιφάνειες και του 0,47 για αστικές περιοχές.

5.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΜΠΟΔΙΩΝ ΣΤΗ ΡΟΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Ένας ακόμα παράγοντας ο οποίος επηρεάζει τη ταχύτητα του ανέμου είναι τυχόν εμπόδια τα οποία μπορεί να βρεθούν στη πορεία του, π.χ. δέντρα κατοικίες κ.ά. Όταν ο αέρας προσκρούει πάνω σε εμπόδιο, τότε γύρω και πολύ πίσω από αυτό δημιουργούνται έντονες αναταράξεις. Το μήκος των αναταράξεων αυτών μπορεί να φτάσει και 15 φορές από όσο είναι το ύψος του εμποδίου. Για το λόγο αυτό εξετάζεται πάντα και το πεδίο ροής του ανέμου πριν την εγκατάσταση οποιαδήποτε αιολικού πάρκου.



Σχήμα 5.4.1: Χώρος κατά τη πρόσκρουση του ανέμου πάνω σε εμπόδιο



Σχήμα 5.4.2: Οδηγίες τοποθέτησης των ανεμογεννητριών όταν η ροή του ανέμου δεν είναι ελεύθερη

Πηγή: Μικρές ανεμογεννήτριες-εφαρμογές στο οικιακό τομέα

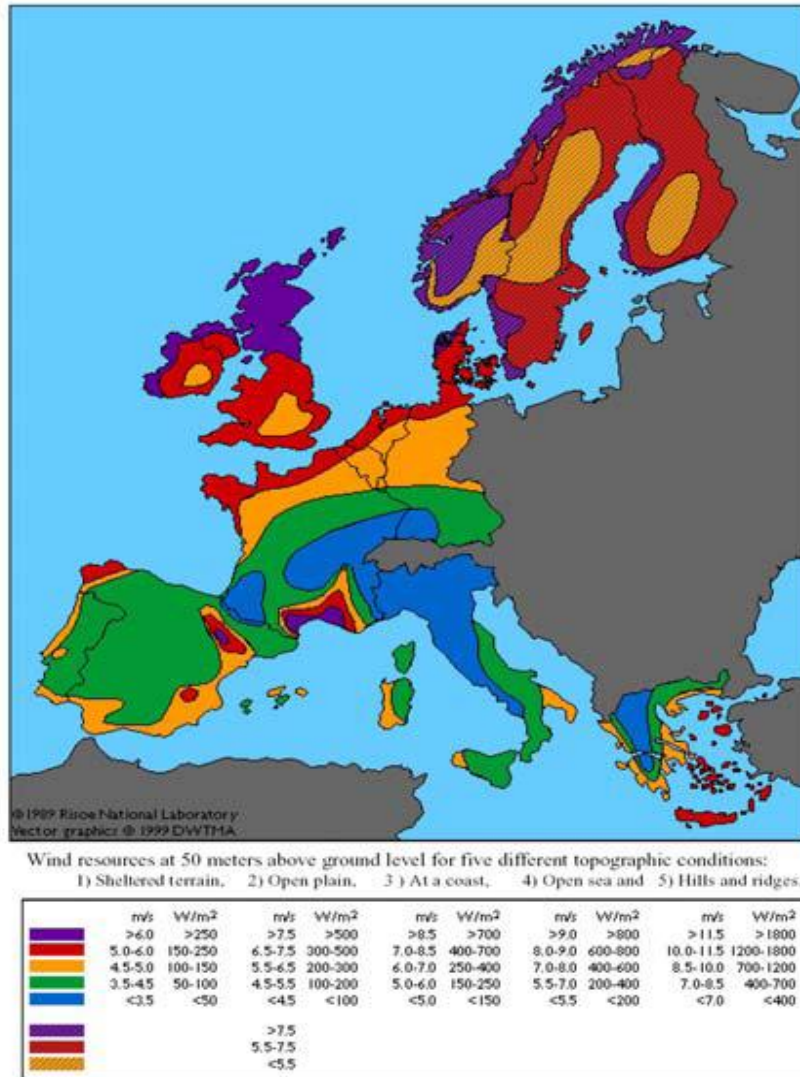


Fig. 5.1: European Wind resource map © Risø National Laboratory (Vector graphics map by courtesy of the Danish Wind Turbine Manufacturers Association)

Σχήμα 5.4.3: Χάρτης αιολικού δυναμικού της Ευρώπης
 Πηγή: Danish Wind Turbine Manufacturers Association

6 ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

6.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Είναι δύσκολο πολλές φορές να φανταστούμε τον αέρα σαν ρευστό και ο λόγος είναι του ότι είναι αόρατος. Αλλά ο αέρας είναι ένα ρευστό όπως όλα τα άλλα εκτός από το ότι τα σωματίδια του είναι σε μορφή αερίου αντί για υγρό. Όταν ο αέρας κινείται με τη μορφή ανέμου αυτά τα σωματίδια κινούνται γρήγορα. Κίνηση σημαίνει κινητική ενέργεια, η οποία μπορεί να συλληφθεί όπως και η ενέργεια από την κίνηση του νερού η οποία συλλέγεται από την τουρμπίνα σε ένα υδροηλεκτρικό φράγμα. Στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να συλλέγεται η κινητική ενέργεια του ανέμου. Τα υπόλοιπα είναι σχεδόν ίδια με αυτά μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Όταν ο άνεμος αρχίσει να περιστρέφει τα πτερύγια τότε η περιστροφική αυτή κίνηση μεταφέρεται σε έναν άξονα ο οποίος οδηγείται από το κέντρο του στροφείου σε μια γεννήτρια. Η γεννήτρια μετατρέπει την εναλλασσόμενη ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Ουσιαστικά, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο δεν είναι τίποτα άλλο από μεταφορά ενέργειας από το ένα μέσο στο άλλο.

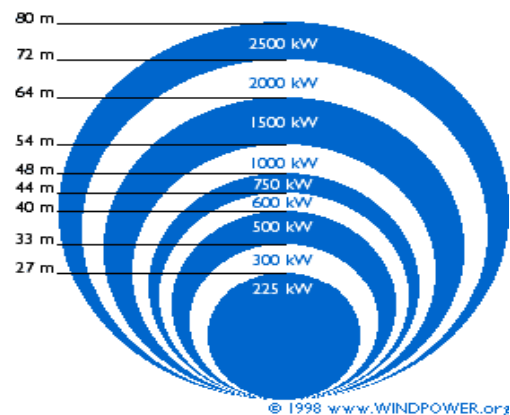
Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε ένα πύργο στήριξης, ο οποίος μπορεί να υπερβαίνει τα 30 μέτρα. Αυτό γίνεται διότι ο αέρας κινείται πιο ομαλά και με μεγαλύτερη ταχύτητα με αποτέλεσμα να έχουμε αυξημένη παραγόμενη ισχύ. Σε μερικές περιοχές η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται κατά 10% για κάθε 10 μέτρα ύψος και η παραγόμενη ισχύ κατά 34%.

6.2 ΜΕΓΕΘΟΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Το μέγεθος των ανεμογεννητριών εξαρτάται από το μέγεθος του δρομέα. Η ισχύς εξόδου εξαρτάται από την επιφάνεια που καλύπτει ο δρομέας της ανεμογεννήτριας. Η ενέργεια που παράγει μια ανεμογεννήτρια καθορίζεται από δύο βασικούς παράγοντες: τη διάμετρο του ρότορα και την ταχύτητα του ανέμου. Το σχήμα 6.2.1 απεικονίζει τα συνήθη μεγέθη των ανεμογεννητριών. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, μια ανεμογεννήτρια των 500 kW έχει διάμετρο ρότορα 40m. Εάν όμως διπλασιαστεί η διάμετρος τότε πενταπλασιάζεται η επιφάνεια που καλύπτει και συνεπώς η παραγόμενη ισχύς.

Επειδή οι κατασκευαστές προσαρμόζουν τις ανεμογεννήτριες ανάλογα με τις αιολικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή, στην πράξη οι τιμές που υποδεικνύονται στο παρακάτω σχήμα μπορεί να διαφέρουν λίγο. Για παράδειγμα, μια μεγάλη ανεμογεννήτρια χρειάζεται και το ανάλογο υψηλό αιολικό δυναμικό για τη σωστή λειτουργία της. Άρα, εάν σε μια περιοχή της οποίας το αιολικό δυναμικό είναι χαμηλό εγκαταστήσουμε μικρή Α/Γ, τότε η μέγιστη ετήσια απόδοση θα είναι η μέγιστη σε αντίθεση με μια μεγάλη αιολική μηχανή για την ίδια περιοχή. Η μικρή Α/Γ θα αποδίδει

καλύτερα για το λόγω του ότι οι ώρες λειτουργίας θα είναι περισσότερες σε αντίθεση με τη μεγάλη.



Σχήμα 6.2.1: Ισχύς ανεμογεννητριών για διάφορες διαμέτρους δρομέων
Πηγή: www.talentfactory.dk

6.3 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε πολλές κατηγορίες ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν και τις απαιτούμενες ενεργειακές ανάγκες που πρέπει να καλύψουν. Ανάλογα με τον τρόπο περιστροφής του δρομέα οι αιολικές μηχανές χωρίζονται σε **οριζόντιου** και **κατακόρυφου** και αυτές είναι οι δύο μεγάλες κατηγορίες που χαρακτηρίζουν τις Α/Γ. Οι δύο αυτές κατηγορίες χωρίζονται σε υποκατηγορίες οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

Ανεμογεννήτριες **οριζόντιου άξονα**:

1. Μονόπτερες
2. Δίπτερες
3. Τρίπτερες
4. Πολύπτερες Αμερικάνικου τύπου

Οι κατηγορίες 1 και 2 συγκαταλέγονται στις **ολιγόπτερες** ενώ οι 3 και 4 στις **πολύπτερες**. Βέβαια αυτό είναι κάπως υποκειμενικό καθώς υπάρχει περίπτωση να συναντήσουμε τρίπτερες ανεμογεννήτριες οι οποίες να συγκαταλέγονται στις ολιγόπτερες αλλά κατά γενικό κανόνα ισχύει η πρώτη περίπτωση.

Ανεμογεννήτριες **κατακόρυφου άξονα**

1. Darrieus
2. H-Darrieus
3. Savonius

Επίσης, οι Α/Γ χωρίζονται σε αυτές που είναι τοποθετημένες στη **ξηρά** και σε αυτές που είναι στη **θάλασσα** (χερσαία και παράκτια αιολικά πάρκα αντίστοιχα). Ο τρόπος λειτουργίας τους είναι ίδιος, διαφέρουν όμως στην απόδοση καθώς οι συνθήκες που επικρατούν στη θάλασσα είναι διαφορετικές. Επίσης το κόστος εγκατάστασης των

παράκτιων αιολικών πάρων είναι μεγαλύτερο. Τέλος, οι Α/Γ οριζόντιου άξονα χωρίζονται στις ανάντι (upwind) και στις κατάντι (down wind) όπου ο δρομέας είναι πριν το πύργο για τις ανάντι και μετά το πύργο για τις κατάντι, σύμφωνα με τη φορά του ανέμου.

6.3.1 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα (Α.Ο.Α.)

Των 90% των ανεμογεννητριών παγκοσμίως είναι δίπτερες και τρίπτερες Α/Γ οριζόντιου άξονα. Ο δρομέας αυτού του τύπου είναι ελικοειδής και είναι συνεχώς παράλληλος στην κατεύθυνση του ανέμου και έχει τη δυνατότητα συνεχής παρακολούθησης της διεύθυνσης του ανέμου. Στις ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου συγκαταλέγονται και οι κλασσικοί ανεμόμυλοι της Μυκόνου καθώς και οι αργές μηχανές πολλών πτερυγίων «αμερικάνικου τύπου» οι οποίες λόγω μειονεκτημάτων όπως χαμηλής περιφερειακής ταχύτητας έχουν εγκαταλειφθεί.

Χαρακτηριστικό των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι οι υψηλές περιφερειακές ταχύτητες, ενώ τα πτερύγια τους που συνήθως δεν ξεπερνούν τα τρία μέτρα βασίζονται στην τεχνολογία των αεροπορικών ελικών αλλά και στις έλικες των ελικοπτέρων. Σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι ο μεγάλος αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης, αλλά και η υψηλή απόδοση λειτουργίας σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου “λ” με αποτέλεσμα η ταχύτητα προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο να είναι μεγάλη.

Για λόγους προστασίας της ανεμογεννήτριας σε περίπτωση ισχυρών ανέμων, η φτερωτή είναι εφοδιασμένη με αερόφρενα για ρύθμιση των στροφών. Επίσης η επίτευξη του ελέγχου στροφών μπορεί να γίνει τοποθετώντας τα πτερύγια υπό κλίση σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου.

Η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για αυτές τις ανεμογεννήτριες διότι η ισχύς της γεννήτριας είναι ανάλογη με την τρίτη δύναμη της ταχύτητας του ανέμου. Πιο συγκεκριμένα για μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα έχουμε :

$$P = 1/2 \rho v^3 \pi r^2 \quad (6.3.1.1)$$

όπου P είναι η ισχύς του ανέμου (Watt) που περνά από την επιφάνεια που καλύπτει η γεννήτρια, ρ η πυκνότητα του αέρα (Kg/m³), v η ταχύτητα του ανέμου (m/s) και r η ακτίνα του ρότορα (m). Δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε όλη την ισχύ του ανέμου παρά μόνο για μια ιδανική μηχανή το 59% αυτής (όριο Betz).

6.3.1.1 Πολύπτερες Α/Γ οριζόντιου άξονα

Τα χαρακτηριστικά που αντιπροσωπεύουν το δρομέα αυτού του τύπου αιολικών μηχανών είναι η:

1. Μικρή διάμετρος
2. Μικρή περιφερειακή ταχύτητα

3. Μεγάλη ροπή

Εξαιτίας των πολλών πτερυγίων εμφανίζουν μεγάλη στιβαρότητα για μικρή ταχύτητα ακροπτερυγίου λ. Ο συντελεστής ισχύος ή συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης είναι μικρότερος σε σύγκριση με τις ολιγόπτερες καθώς επίσης και χαμηλότερη ταχύτητα ακροπτερυγίου λ. Στην Αμερική ανεμόμυλοι με πολύπτερο δρομέα χρησιμοποιήθηκαν ευρέως για άντληση νερού.

6.3.1.2 Ολιγόπτερες Α/Γ οριζόντιου άξονα

Στους δρομείς των ολιγόπτερων Α/Γ μπορεί να συναντήσουμε μέχρι και τρία πτερύγια, αλλά συνήθως είναι ένα με δύο. Χαρακτηρίζονται από το μεγάλο συντελεστή ισχύος και την καλή λειτουργία για σχετικά μεγάλες ταχύτητες ακροπτερυγίων. Τα πτερύγια των σύγχρονων δρομέων είναι λεπτά σε σχέση με των παλαιότερων τύπων που ήταν πλατιά. Οι αεροτομές τους είναι σχεδιασμένες ώστε να παρέχουν μεγάλο συντελεστή άνωσης για μικρές γωνίες προσβολής καθώς επίσης και χαμηλή αντίσταση για ένα εύρος γωνιών προσβολής. Οι δρομείς αυτοί είναι ταχύστροφοι και η εγκατάστασή τους είναι απλή σε αντίθεση με τους πολύπτερους.

Σημείωση: Ο τρίπτερος δρομέας πλεονεκτεί έναντι του δίπτερου στο γεγονός της απόδοσης και των φορτίων που ασκούνται στα πτερύγια. Ο βαθμός απόδοσης είναι αυξημένος κατά 5% και τα φορτία στα πτερύγια είναι μικρότερα. Το ότι έχει τρία πτερύγια το καθιστά ακριβότερο (από άποψης ποσότητας υλικού). Τέλος, ο μονόπτερος έχει μειωμένο, κατά 10%, βαθμό απόδοσης από το δίπτερο και συνεπώς 15% από το τρίπτερο, παρουσιάζει έντονο θόρυβο καθώς επίσης και πρόβλημα στη ζυγοστάθμιση.

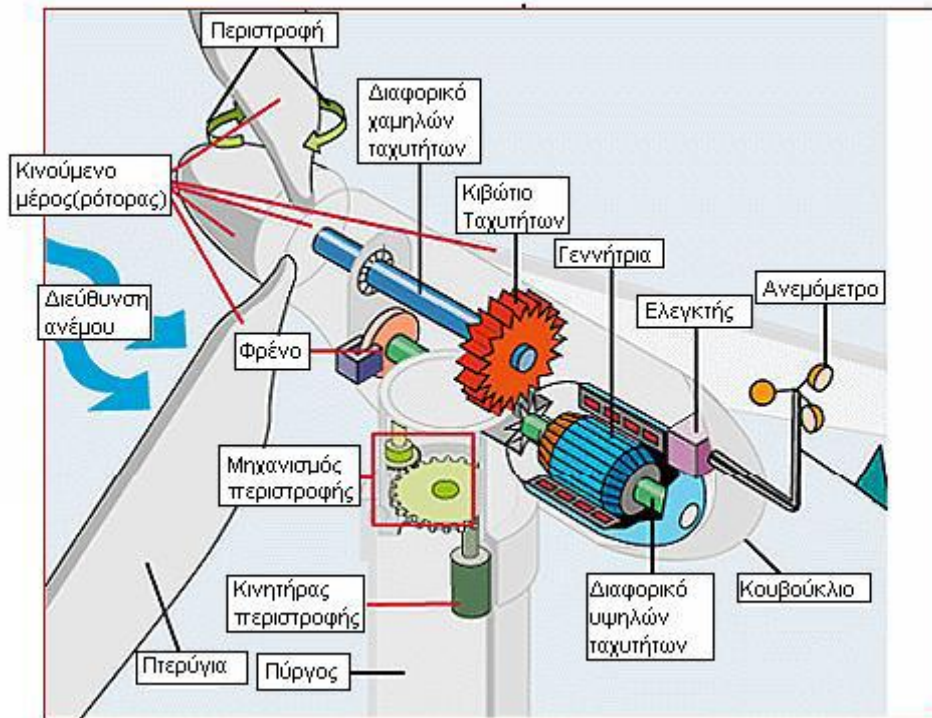
Παρόλο που η τεχνολογία στον τομέα της ανεμογεννήτριας έχει κάνει ραγδαία βήματα, και ιδιαίτερα στους οριζόντιου άξονα, υπάρχουν ορισμένα προβλήματα που απασχολούν τους κατασκευαστές και ερευνώνται σήμερα. Ανάμεσα στα προβλήματα που αντιμετωπίζει η βιομηχανία είναι :

1. Ο τεχνικός σχεδιασμός του δρομέα. Δηλαδή στόχος είναι να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός χαρακτηριστικών και παραμέτρων που απαρτίζουν τα πτερύγια, όπως είναι ο αριθμός πτερυγίων, το πλάτος, η αεροτομή, η διανομή βήματος κ.τ.λ. με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας της μηχανής.
2. Βελτίωση σε καταστάσεις όπως η εκκίνηση, η επιβράδυνση, η επιτάχυνση καθώς και σε άλλα δυναμικά φαινόμενα.
3. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης της πτερωτής για μεταβαλλόμενες τιμές του ανέμου μπορεί να επιτευχθεί μόνο με μεταβολή του βήματος. Η ρύθμιση λοιπόν του βήματος στα πτερύγια αλλά και τα συστήματα αυτοματισμών που σχετίζονται με την έναρξη αλλά και παύση της ανεμογεννήτριας παίζει σημαντικό παράγοντα στη καλύτερη απόδοση. Στις μέρες μας τα πιο γνωστά συστήματα μεταβολής του βήματος αποτελούνται από υδραυλικούς και ηλεκτρομηχανικούς σερβομηχανισμούς αλλά και από ηλεκτρονικά συστήματα.

4. Σημαντικό για μια ανεμομηχανή είναι ο συνεχής προσανατολισμός στην κατεύθυνση του ανέμου. Στις μέρες αυτό επιτυγχάνεται είτε ηλεκτρονικά με τη χρήση αισθητηρίων είτε μηχανικά με τη χρήση καθοδηγητικού πτερυγίου.

6.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΜΕΡΗ Α/Γ

Η τυπική μορφή των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.4.1: Κατασκευαστικά μέρη Α/Γ οριζόντιου άξονα
Πηγή: Περιοδικό Energy point

Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή των πιο βασικών λειτουργικών εξαρτημάτων που απαρτίζουν αυτού του τύπου αιολικές μηχανές.

6.4.1 Στροφέας ή Δρομέας

Ένα από τα πιο βασικά και ίσως το πιο σημαντικό κομμάτι κατά τον σχεδιασμό μιας Α/Γ είναι ο σωστό σχεδιασμός του δρομέα. Σκοπός είναι να συνδυαστούν κατά το καλύτερο-βέλτιστο τρόπο οι παράμετροι του δρομέα, όπως είναι το πλήθος των πτερυγίων, η διάμετρος του, η κατανομή του πλάτους κατά μήκος του πτερυγίου καθώς επίσης και η κατάλληλη αεροτομή. Στόχος είναι η μέγιστη ετήσια παραγόμενη ενέργεια με το λιγότερο κόστος παραγωγής. Βάση της απαιτούμενης ονομαστικής ισχύος αλλά και του αιολικού δυναμικού της περιοχής προς εγκατάσταση υπολογίζεται η διάμετρος του δρομέα ενώ από την αεροδυναμική σχεδίαση προκύπτει η κατανομή του πλάτους του πτερυγίου.

6.4.2 Άτρακτος

Η άτρακτος της ανεμογεννήτριας βρίσκεται στην κορυφή και συμπεριλαμβάνει όλα τα 'ζωτικά' μέρη της ανεμογεννήτριας ώστε η μηχανική ενέργεια του ρότορα να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης το οποίο βρίσκεται εσωτερικά της άτρακτου αποτελείται από:

i) Διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων

Σκοπός του διαφορικού χαμηλών στροφών είναι να συνδέσει την κεφαλή του ρότορα με το κιβώτιο ταχυτήτων. Στις ανεμογεννήτριες των 1000 KW ο ρότορας περιστρέφεται με ταχύτητα 19-20 rpm (σχετικά αργά). Για τη λειτουργία του υδραυλικού φρένου το διαφορικό είναι εφοδιασμένο με σωλήνες για το υδραυλικό σύστημα.

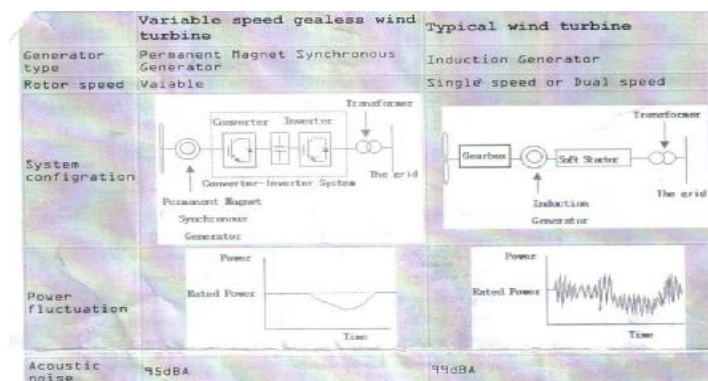
ii) Κιβώτιο ταχυτήτων

Μέχρι τα τελευταία χρόνια το κιβώτιο ταχυτήτων (κ.τ.) ήταν ένα από τα βασικότερα μέρη μιας ανεμογεννήτριας. Είναι τοποθετημένο μεταξύ του κύριου άξονα και της γεννήτριας και ο σκοπός του είναι να αυξάνει τη χαμηλή περιστροφική ταχύτητα των πτερυγίων σε υψηλότερη.

Στην περίπτωση που γίνει σύνδεση του κύριου άξονα με την γεννήτρια με 2, 4 ή 6 πόλους η ταχύτητα περιστροφής θα εκτιναχτεί στις 1000-3000 rpm, που είναι διπλάσια της ταχύτητας του ήχου.

Η έλλειψη του κιβωτίου ταχυτήτων (ή αλλιώς πολλαπλασιαστής στροφών), απαιτεί χρήση γεννήτριας με πολλούς πόλους και χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (περίπου 200 πόλους για ταχύτητα 30 rpm). Η αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας γίνεται μέχρι το επίπεδο που απαιτείται ώστε να παραχθεί ρεύμα, που συνήθως είναι 1000-1500 rpm.

Η συνεχείς μελέτες και έρευνες τα τελευταία χρόνια οδήγησαν σε κατασκευή Α/Γ μεταβλητών στροφών που η σύνδεση με το στροφέα γίνεται απευθείας χωρίς να χρειάζεται κιβώτιο ταχυτήτων. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης και χαμηλότερος θόρυβος κατά τη λειτουργία καθώς επίσης χαμηλότερο βάρος και κόστος. Οι κεντρικές διαφορές φαίνονται στο Σχ. 6.4.2.1:



Σχήμα 6.4.2.1: Σύγκριση μεταξύ τυπικής Α/Γ και αυτής χωρίς Κ.Τ.

Για τη σωστή λειτουργία και την αποφυγή ζημιών υπάρχουν ορισμένα κριτήρια όσον αφορά στην επιλογή του σωστού πολλαπλασιαστή στροφών :

Επειδή το κόστος τέτοιων εξαρτημάτων δεν είναι φτηνό και ο θόρυβος κατά τη λειτουργία είναι σημαντικός, ειδικά εάν είναι κοντά σε κατοικημένη περιοχή, πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στη διάρκεια ζωής, στο βαθμό απόδοσης και στο θόρυβο κατά τη λειτουργία.

Επίσης, συνεχή μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί συνεχή κρουστικά φορτία στο κ.τ. συνεπάγοντας σε περιορισμένη διάρκεια ζωής καθώς υπάρχει μεγάλη φθορά. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, η ονομαστική ισχύς επιλέγεται κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή της Α/Γ καθώς επίσης και η ονομαστική ροπή κατά 20% μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή της αιολικής μηχανής.

Ανάλογα με είδος των γραναζιών τα κ.τ. κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες:

1. Κιβώτιο με παράλληλες οδοντώσεις γραναζιών. Πλεονεκτεί ως προς την απλότητα στην κατασκευή και το χαμηλό κόστος
2. Κιβώτιο με ελικοειδείς οδοντώσεις γραναζιών. Πλεονεκτούν ως προς τον υψηλό βαθμό απόδοσης που διαθέτουν και στα χαμηλά επίπεδα θορύβου κατά τη λειτουργία, αλλά η κατασκευή τους είναι αρκετά δύσκολη και αυτό τους καθιστά ακριβούς.



Σχήμα 6.4.2.2: Κιβώτιο ταχυτήτων ανεμογεννήτριας 1,5 MW κατά τη κατασκευή του.
Πηγή: www.hapeman.com

iii Διαφορικό υψηλών ταχυτήτων

Το διαφορικό υψηλών ταχυτήτων περιστρέφεται περίπου με 1500 rpm και οδηγεί την ηλεκτρική γεννήτρια. Το διαφορικό έχει ένα δισκόφρενο σε κατάσταση κινδύνου της Α/Γ. Σε περίπτωση που το αερόφρενο χαλάσει τότε παίρνει τη θέση του το μηχανικό φρένο μέχρι να γίνει η επισκευή.

6.4.3 Κύριος άξονας

Ο κύριος άξονας της ανεμογεννήτριας κατασκευάζεται από χάλυβα υψηλής αντοχής ώστε να μπορεί να μεταφέρει τις μη μόνιμες στρεπτικές και καμπτικές ροπές και η στήριξή του γίνεται πάνω σε σφαιρικά έδρανα τα οποία παραλαμβάνουν το βάρος του άξονα καθώς και τα εξασκούμενα φορτία. Ο άξονας συνδέεται με το κέντρο του δρομέα. Έτσι όταν ο δρομέας περιστρέφεται παρασέρνει μαζί του τον άξονα με αποτέλεσμα να μεταδίδεται μηχανική, περιστροφική ενέργεια σε αυτόν. Η μηχανική ενέργεια καταλήγει σε μία γεννήτρια όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρική

6.4.4 Γεννήτρια

Γεννήτρια ονομάζεται ο μηχανισμός ο οποίος παραλαμβάνει την περιστροφική κίνηση του δρομέα και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Η γεννήτρες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στις ασύγχρονες και στις σύγχρονες γεννήτρες, και η επιλογή τους εξαρτάται από διάφορους παράγοντες οι οποίοι θα αναλυθούν στη συνέχεια.

6.4.4.1 Ασύγχρονες Γεννήτρες

Οι περισσότερες ανεμογεννήτρες σε ολόκληρο το κόσμο χρησιμοποιούν τριφασικές ασύγχρονες γεννήτρες με κλωβό. Το αξιοσημείωτο είναι ότι γεννήτρια αυτού του τύπου αρχικά είχε σχεδιαστεί ως ηλεκτροκινητήρας. Δεν κάνει λοιπόν εντύπωση ότι το 1/3 της παγκόσμιας καταναλισκόμενης ενέργειας οφείλεται στη λειτουργία των ασύγχρονων κινητήρων σε εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικό έργο. Τα δύο πιο βασικά κριτήρια με βάση των οποίων γίνεται συχνά η επιλογή του κινητήρα αυτού είναι το χαμηλό κόστος αγοράς αλλά και η αξιοπιστία που προσφέρει. Επίσης, μερικά ακόμα χαρακτηριστικά, τα οποία είναι ωφέλιμα για την ανεμογεννήτρια, είναι η αυξημένη δυνατότητα ολίσθησης και η ικανότητα υπερφόρτωσης. Ο κλωβός στις ασύγχρονες γεννήτρες προσφέρει ένα σημαντικό προβάδισμα έναντι αυτών χωρίς κλωβό. Ο δρομέας αποτελείται από μεταλλικές ράβδους οι οποίες ηλεκτρικά ενώνονται με αλουμινένιους δακτυλίους και έχει ως σημαντικό πλεονέκτημα το ότι ο δρομέας προσαρμόζεται αυτόματα στα ζεύγη πόλων του στάτη.

Αν ο δρομέας περιστρέφεται ακριβώς στη σύγχρονη ταχύτητα τότε και το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με ακριβώς την ίδια ταχύτητα καθώς επίσης δεν υπάρχουν φαινόμενα επαγωγής αλλά και αλληλεπίδραση με το στάτη. Στην περίπτωση που η ταχύτητα ξεπεράσει τη σύγχρονη ταχύτητα τότε ο δρομέας περιστρέφεται γρηγορότερα από το μαγνητικό πεδίο με συνέπεια ηλεκτρικό ρεύμα να διοχετεύεται στο δίκτυο της ΔΕΗ.

Η δύναμη περιστροφής που εφαρμόζεται είναι το μέγεθος που καθορίζει την ταχύτητα της σύγχρονης ταχύτητας. Πρακτικά, η διαφορά μεταξύ της περιστροφικής ταχύτητας στη μέγιστη ισχύ και στη χαμηλή είναι αμελητέα, της τάξεως του 1% και η ποσοστιαία αυτή διαφορά ονομάζεται ολίσθηση. Αυτός είναι ο λόγος όπου Α/Γ δύο πόλων για 1500 rpm και δίκτυο 50 Hz περιστρέφονται αργά. Η ολίσθηση μιας σύγχρονης μηχανής ορίζεται με τη παρακάτω σχέση:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (6.4.4.1.1)$$

όπου το μέγεθος s εκφράζει την ολίσθηση του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Στην περίπτωση όπου οι στροφές είναι μηδέν (δηλ. δεν υπάρχει περιστροφική κίνηση $n=0$) τότε και η ολίσθηση είναι 1, ενώ είναι 0 όταν η ταχύτητα του δρομέα έχει την ίδια τιμή με τη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου ($n=n_s$). Μια τελευταία περίπτωση είναι να ισχύει $n>n_s$, όπου τότε η ολίσθηση παίρνει αρνητικές τιμές και η μηχανή δουλεύει ως γεννήτρια. Οι γεννήτριες αυτές πλεονεκτούν στο γεγονός οι στροφές αυξομειώνονται ανάλογα με τις μεταβολές της περιστροφικής δύναμης και αυτό συνεπάγεται με λιγότερες καταπονήσεις στο κ.τ.

Στις ασύγχρονες γεννήτριες ο στάτης μαγνητίζεται από το δίκτυο πριν λειτουργήσει ενώ για τα αυτόνομα συστήματα πρέπει να υπάρχουν ανάλογοι πυκνωτές που θα δώσουν το απαραίτητο ρεύμα μαγνήτισης. Ο στάτης στις ασύγχρονες γεννήτριες πρέπει να μαγνητιστεί από το δίκτυο πριν τη λειτουργία του. Ο εναπομείναντας μαγνητισμός είναι πολύ σημαντικό για μια γεννήτρια, αλλιώς κάθε φορά που θα πρέπει να λειτουργήσει θα χρειάζεται μια βοηθητική μηχανή κατά την εκκίνηση του συστήματος.

Οι ασύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα και αυτές με κλωβό έχουν ομοιότητα ως προς τον στάτη αλλά διαφέρουν ως προς το δρομέα. Ο δρομέας στις μηχανές της πρώτης περίπτωσης έχει αυλακώσεις μέσα όπου εφαρμόζεται τύλιγμα που μοιάζει με αυτό του στάτη. Το τύλιγμα του δρομέα συνδέεται ηλεκτρικά με το περιβάλλον με δακτύλιους και ψήκτρες. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ο έλεγχος των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του δρομέα από εξωτερικά και επηρεάζεται η τάση του.

Στο δρομέα αυτού του τύπου γεννήτριας η συνδεσμολογία (τριφασική) γίνεται κατά αστέρα και τα τρία άκρα τους συνδέονται με δακτύλιους. Οι δακτύλιοι διαμέσου των ψηκτρών μπορούν να συνδεθούν είτε με εξωτερικό κύκλωμα είτε είναι βραχυκυκλωμένοι.

Ο βασικός σκοπός των δακτυλίων είναι να εξυπηρετήσουν τη σε σειρά τοποθέτηση της αντίστασης με τα τυλίγματα του δρομέα κατά την εκκίνηση. Η τοποθέτηση της αντίστασης σε σειρά παρουσιάζει διπλό όφελος. Αφενός το ρεύμα εκκίνησης μειώνεται και κατά δεύτερον η ροπή εκκίνησης αυξάνεται. Η ολίσθηση του δρομέα μεταβάλλεται αλλάζοντας την ολική αντίσταση του ρότορα μέσω ενός μετατροπέα που συνδέεται στον άξονα του ρότορα.

Το κύριο πλεονέκτημα είναι η μείωση των καταπονήσεων κατά τις διακυμάνσεις του ανέμου. Καθώς η ολίσθηση της γεννήτριας μεταβάλλεται, εξασφαλίζοντας την καλύτερη ολίσθηση, ταυτόχρονα επιτυγχάνονται μικρές ταλαντώσεις στη ροπή εισόδου και ισχύ εξόδου.

Τα βασικά μειονεκτήματα της γεννήτριας με δακτυλιοφόρο δρομέα είναι το υψηλό κόστος αλλά και η έλλειψη στιβαρότητας σε σχέση με τη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Επίσης, το εύρος στο οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα περιορίζεται στο 0-10% καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του στάτη, έχει χαμηλή πραγματική και άεργο ισχύ και τέλος ένα ποσοστό ισχύος καταναλώνεται από το ίδιο το σύστημα και συγκεκριμένα στη μεταβλητή αντίσταση του δρομέα.

6.4.4.2 Σύγχρονες Γεννήτριες

Η σύγχρονες γεννήτριες έχουν υψηλότερο κόστος καθώς η κατασκευή τους είναι δυσκολότερη σε σχέση με τις επαγωγικές γεννήτριες. Υπερτερεί όμως σημαντικά ως προς το γεγονός ότι χρειάζεται άεργο ρεύμα μαγνήτισης.

Συνοπτικά, ο τρόπος λειτουργίας περιγράφεται ως εξής:

Στις τριφασικού ρεύματος γεννήτριες τρεις ηλεκτρομαγνήτες είναι αιτία δημιουργίας τους μαγνητικού πεδίου καθώς κάθε ηλεκτρομαγνήτης είναι συνδεδεμένος και σε μια φάση.

Οι ηλεκτρομαγνήτες τοποθετούνται εναλλάξ (Βόρειος και Νότιος πόλος) και η μεταβολή τάσης σε κάθε φάση οφείλεται σε αυτή τη μεταβολή μαγνητισμού. Οι μαγνήτες τοποθετούνται ανά 1200 και αυτό γίνεται έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο να κάνει ένα πλήρη κύκλο 3600. Αυτή η πλήρη περιστροφή σημαίνει ότι όταν η μία φάση είναι στο μέγιστο οι άλλες δυο διαρρέονται από ρεύμα στη μισή τάση και έχουν διεύθυνση αντίθετη.

Αν επιβληθεί στο δρομέα ρεύμα ώστε να τον αναγκάσει σε περιστροφική κίνηση, αντί να τον περιστρέψει το ρεύμα του δικτύου, τότε η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Άρα είναι απαραίτητη η παρουσία ενός δυνατού μαγνήτη ώστε να παράγεται αρκετό ρεύμα. Όσο περισσότερη δύναμη ασκείται στο δρομέα τόσο περισσότερο ρεύμα παράγεται, η γεννήτρια όμως συνεχίζει να λειτουργεί στην ίδια ταχύτητα η οποία υπολογίζεται από τη συχνότητα του δικτύου και τους πόλους της μηχανής.

Επίσης είναι δυνατόν να δημιουργηθεί τριφασικό δίκτυο το οποίο θα είναι ανεξάρτητο και αυτό μπορεί να γίνει απλά εάν αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση είναι αναγκαία η διατήρηση σταθερής περιστροφικής ταχύτητας ώστε να παράγεται εναλλασσόμενο ρεύμα με σταθερή συχνότητα. Άρα, η σύνδεση του δικτύου με αυτή τη γεννήτρια πρέπει να γίνει έμμεσα.

Πρακτικά, σπάνια χρησιμοποιούνται γεννήτριες μόνιμων μαγνητών και αυτό γιατί οι μόνιμοι μαγνήτες απομαγνητίζονται όταν δουλεύουν κάτω από ισχυρά μαγνητικά καθώς και τα υλικά κατασκευής του είναι σπάνια και ακριβά.

Οι Α/Γ που χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες, κατά κόρον χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνήτες που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα το οποίο παρέχεται από το δίκτυο. Το δίκτυο όμως παρέχει εναλλασσόμενο και συνεπώς χρειάζεται αντιστροφές για τη μετατροπή σε συνεχές.

Οι περισσότερες Α/Γ είναι εφοδιασμένες με γεννήτριες δύο ή τριών ζευγών πόλων (υψηλής ταχύτητας) και ο λόγος χρήσης είναι κυρίως το οικονομικό μέρος.

Από το μέγεθος του δρομέα εξαρτάται και το φορτίο που αντέχει μια Α/Γ. Η μέγιστη δύναμη στην οποία μπορεί να 'αντέξει' μια γεννήτρια εξαρτάται από το μέγεθος του δρομέα. Οι επιλογές είναι μεταξύ αργόστροφης και συνεπώς δυνατότερης και ακριβότερης Α/Γ και ταχύστροφης και άρα φτηνότερης και μικρότερης Α/Γ.

6.4.5 Σύστημα πέδης

Ένα από τα σημαντικότερα συστήματα που πρέπει να είναι εγκατεστημένα πάνω σε μία ανεμογεννήτρια και πρέπει να λειτουργούν σωστά είναι το σύστημα πέδησης. Το σύστημα πέδης μπορεί να λειτουργεί είτε με αεροδυναμικά φρένα είτε με μηχανικά.

6.4.5.1 Μηχανική Πέδη

Στην περίπτωση του μηχανικού φρένου η τοποθέτηση γίνεται στον άξονα υψηλής αλλά και χαμηλής ταχύτητας περιστροφής και συνεπώς η δύναμη πέδησης είναι σχετικά μικρή. Το σύστημα αυτό αποτελείται από δισκόφρενο. Το δισκόφρενο απαρτίζεται από ένα δίσκο ενσωματωμένο στον άξονα υψηλών ή χαμηλών στροφών και από ένα αριθμό σιαγόνων τοποθετημένων στην περιφέρεια του, μέσω των οποίων ασκείται πίεση στο δίσκο. Οι επιφάνειες των σιαγόνων που έρχονται σε επαφή με το δίσκο κατά την πέδηση αντικαθίστανται κατά διαστήματα, αναλόγως της φθοράς που έχουν υποστεί. Για μεγαλύτερη ασφάλεια, όταν η φθορά φτάσει σε επικίνδυνα σημεία, ειδικοί αισθητήρες ενημερώνουν το σύστημα ελέγχου της Α/Γ και βγαίνει εκτός λειτουργίας έως ότου γίνει η αντικατάστασή τους. Στη μηχανική πέδη η ροπή πέδησης είναι πολύ μεγάλη με αποτέλεσμα το σύστημα να είναι βαρύ, ακριβό αλλά και μεγάλων διαστάσεων. Πλεονεκτεί όμως στο γεγονός ότι εάν η τοποθέτηση του φρένου γίνει στις χαμηλές στροφές του άξονα το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών από τα μεταβατικά φορτία της πέδησης και επιπλέον ο δρομέας προστατεύεται από υπερτάχυνση σε περίπτωση βλάβης του κιβωτίου πολλαπλασιασμού στροφών.

6.4.5.2 Αεροδυναμική πέδη

Οι ανεμογεννήτριες είναι εφοδιασμένες με διατάξεις ενσωματωμένες στα πτερύγια ως πρόσθετο μέτρο ασφάλειας σε περίπτωση που η μηχανική πέδη δε λειτουργήσει. Αυτές οι διατάξεις ονομάζονται αεροδυναμικά φρένα τα οποία κατά την ενεργοποίησή τους μεταβάλλουν το γεωμετρικό σχήμα το πτερυγίου αυξάνοντας την αντίσταση του ανέμου και μειώνοντας τη ταχύτητα περιστροφής.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αεροδυναμικών φρένων και οι συνηθέστεροι είναι:

1. Αλεξίπτωτα τα οποία εκτινάσσονται από εσοχές που βρίσκονται στη άκρη της πτέρυγας.
2. Το χείλος πρόσπτωσης είναι κατασκευασμένο στην άκρη της πτέρυγας ώστε η περιστροφή να γίνεται παράλληλα στον άξονα του.
3. Στην επιφάνεια χαμηλής πίεσης της πτέρυγας προεξέχουν επιφάνειες που επιβραδύνουν τη περιστροφή.

6.4.6 Κατευθυντήριο σύστημα ή Σύστημα Προσανατολισμού

Στις Α/Γ στις οποίες ο δρομέας τοποθετείται ανάντι του πύργου το σύστημα προσανατολισμού είναι αναγκαίο. Στις μικρές όμως αιολικές μηχανές προσαρμόζεται ουρά (κατευθυντήριο σύστημα) της οποίας το μέγεθος και η θέση επιλέγονται έτσι ώστε κατά την αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου να ασκείται ικανή ροπή προσανατολισμού του δρομέα. Σε μεγάλες Α/Γ για το προσανατολισμό χρησιμοποιείται σερβοκινητήρας που ελέγχεται από ανεμογράφο. Οι ανεμογεννήτριες με τοποθέτηση το δρομέα κατάντι είναι πιο απλές στη κατασκευή διότι δεν απαιτείται σύστημα προσανατολισμού αλλά σε αυτήν την περίπτωση η Α/Γ είναι πολύ θορυβώδης και οι καταπονήσεις στα πτερύγια είναι μεγάλες λόγω της περιοδικότητας φορτίσεων.

6.4.7 Σύστημα προστασίας

Οι Α/Γ είναι συνήθως εφοδιασμένες με συστήματα για την αποφυγή ζημιάς σε πολύ μεγάλες ταχύτητες ανέμων. Στις μεγάλες μηχανές διακόπτεται εντελώς η παραγωγή σε τέτοιου είδους καταστάσεις ενώ στις μικρές γίνεται αλλαγή προσανατολισμού ώστε να μειωθεί η περιστροφική ταχύτητα των πτερυγίων. Υπάρχουν και περιπτώσεις μικρών ανεμογεννητριών οι οποίες είναι εφοδιασμένες με μηχανικά φρένα.

6.4.8 Πύργος

Η επιλογή του πύργου στήριξης της Α/Γ καθορίζεται με βάση το κόστος κατασκευής του και τοποθέτησης του. Μεγάλο ρόλο παίζει και ο τόπος εγκατάστασης καθώς οι πύργοι είναι πολύ ογκώδεις και η ανέγερση αλλά και μεταφορά τους δεν είναι μια απλή διαδικασία. Τα είδη πύργων που χρησιμοποιούνται είναι οι σωληνωτοί και δικτυωτοί.

6.4.8.1 Δικτυωτοί πύργοι

Οι πύργοι αυτού του τύπου, πλεονεκτούν ως προς την εύκολη εγκατάσταση και μεταφορά. Επίσης είναι οικονομικότεροι από τους σωληνωτούς. Το βασικότερο μειονέκτημα τους είναι η εμφάνισή τους, και αυτό είναι και ο λόγος που δεν χρησιμοποιούνται στις σημερινές εγκαταστάσεις.



Σχήμα 6.4.8.1.1: Ανεμογεννήτριες με δικτυωτό πύργο
Πηγή: www.strandedwind.org

6.4.8.2 Σωληνωτοί πύργοι

Ο χαλύβδινος σωληνωτός πύργος πλεονεκτεί ως προς την αισθητική του και επίσης παρέχει κάλυψη για όλα τα όργανα της Α/Γ. Εσωτερικά του πύργου υπάρχουν σκάλες ή ασανσέρ για τη μεταφορά στην κορυφή (κουβούκλιο). Η μεταφορά όμως είναι ένα από τα προβλήματα καθώς επίσης η εγκατάσταση του λόγω του ύψους του. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η απευθείας ανέγερση είναι αδύνατη με αποτέλεσμα να γαλβανίζεται σε κομμάτια και να συγκολλείται. Κατά τη συγκόλληση όμως το γαλβάνισμα τοπικά καταστρέφεται.

Μια ακόμα διαφορά μεταξύ του σωληνωτού από τον δικτυωτό είναι ότι στην πρώτη περίπτωση ο πύργος έχει χαμηλή ιδιοσυχνότητα σε σχέση με αυτή του δρομέα και υπάρχει κίνδυνος συντονισμού. Τέτοιοι κίνδυνοι στους δικτυωτούς πύργους δεν υπάρχουν.



Σχήμα... Ανεμογεννήτρια με σωληνοειδείς πύργους
Πηγή: www.tpblog.tspadventures.com

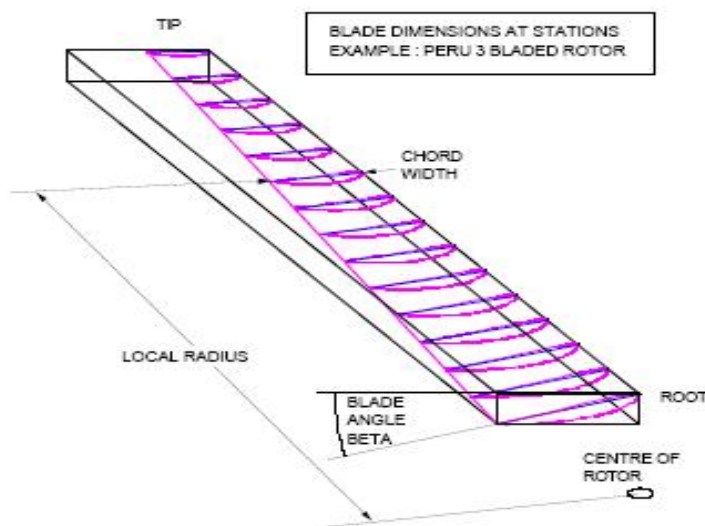
6.4.9 Πτερύγια

Από την αεροδυναμική φόρτιση, το βαθμό απόδοσης και το κόστος κατασκευής γίνεται και η επιλογή για το πλήθος των πτερυγίων. Επιπλέον, θέματα που λαμβάνονται υπόψιν είναι η κυκλική ροπή μεταβολής της μηχανής λόγω της καθ' ύψους μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και η ζυγοστάθμιση των

πτερυγίων. Όπως προαναφέρθηκε, τα πτερύγια είναι εφοδιασμένα με συστήματα αεροδυναμικής πέδησης και σε ορισμένες περιπτώσεις διαθέτουν και μικρά αλεξίπτωτα που απελευθερώνονται φυγοκεντρικά μετά από ένα ορισμένο όριο στροφών.

Τα πτερύγια, κατά κόρον, είναι μεταβλητού βήματος αλλά στις απλές περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν και σταθερού βήματος. Τα πτερύγια της πρώτης περίπτωσης πλεονεκτούν στο γεγονός ότι υπάρχει μεταβολή της γωνίας προσβολής τους στον άνεμο με αποτέλεσμα να διατηρείται σταθερή η ταχύτητα περιστροφής τους, να αυξάνεται η αεροδυναμική τους απόδοση και να έχουμε ελεγχόμενη παραγόμενη ισχύ.

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών έχουν μια καμπυλόγραμμη αεροδυναμική διατομή που είναι στρογγυλεμένη κατά το ένα άκρο (είσοδος ανέμου) και αιχμηρή κατά το άλλο άκρο (έξοδος ανέμου). Το σχήμα τους είναι και το κλειδί τους για το πώς μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε περιστροφική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Τα σχήματα αυτά είναι γνωστά ως αεροδυναμικά, όπως και αυτά των αεροπλάνων. Επίσης το σχήμα τους εφόσον μελετηθεί αεροδυναμικά, είναι αυτό που προκαλεί πέδηση (παθητική) σε μεγάλες ταχύτητες, ώστε να αποφεύγεται η (άνω) περιστροφή της Α/Γ.



Σχήμα 6.4.9.1: Διατομή κατά μήκος του πτερυγίου της Α/Γ
Πηγή: *Wind rotor blade construction by Theodoro Sanchez Cambos*

Τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων δεν είναι ίδια για κάθε Α/Γ. Στις μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιείται κυρίως πολυουρεθάνη, υαλόνημα και ξύλο, δηλαδή υλικά που δεν επηρεάζονται από διάβρωση. Το μόνο πρόβλημα είναι ότι η μικρή διάρκεια ζωής τους καθώς δε γνωρίζουμε την συμπεριφορά του σε εναλλασσόμενη φόρτιση. Στις μεσαίου μεγέθους Α/Γ χρησιμοποιούνται πολλαπλές στρώσεις υαλονυμάτων και στις μεγάλες ανεμοκινητήρες χρησιμοποιούνται πτερύγια κατασκευασμένα με τεχνολογία ίδιας με αυτής των πτερυγίων των αεροσκαφών.

Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται μερικά χαρακτηριστικά μεγέθη των υλικών κατασκευής των πτερυγίων καθώς και η τιμή τους ανά κιλό.

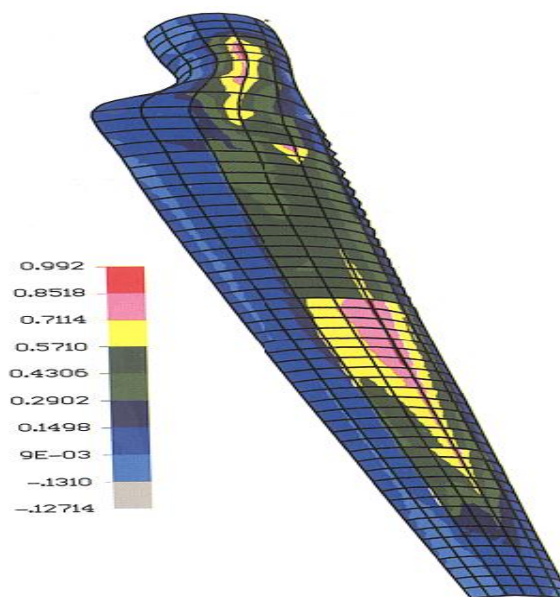
Πίνακας 6.4.9.1: Υλικά κατασκευής πτερυγίων και ορισμένα από τα χαρακτηριστικά τους.

Πηγή: Περιοδικό *Energy point*

	Επιτρεπόμενη Τάση (Mpa)	ρ	€/Kg
Χάλυβας	110	7,8	5,8-8
Άνθρακας (ίνες)	100	1,4	200
Fiberglass	45	2	13
Ξύλο	12	0,55	13



Σχήμα 6.4.9.2: Πτερύγια Α/Γ μήκους 24m από Fiberglass.
Πηγή: Vestas



Σχήμα 6.4.9.3: Μοντέλο πτερυγίου για τον υπολογισμό τάσεων και παραμορφώσεων

6.5 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΤΥΠΟΥ ΑΝΑΝΤΙ (UP-WIND)

Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου έχουν τον δρομέα ανάντι, δηλαδή πριν τον πύργο. Το βασικό πλεονέκτημα του ανάντι σχεδιασμού είναι ότι αποφεύγεται η σκιά του ανέμου πίσω από το πύργο. Στον σχεδιασμό των ανεμογεννητριών αυτός είναι ο επικρατέστερος σχεδιασμός. Από τη άλλη μεριά, υπάρχει λίγη σκιά από τον άνεμο από την μπροστινή πλευρά του πύργου, δηλαδή ο άνεμος αρχίζει να κάμπτεται πριν φτάσει το πύργο. Ως εκ τούτου κάθε φορά που ο ρότορας περνάει τον πύργο η ισχύς της ανεμογεννήτριας πέφτει. Το βασικό μειονέκτημα του ανάντι σχεδιασμού είναι ότι ο ρότορας πρέπει να είναι κάπως άκαμπτος και τοποθετημένος σε κάποια απόσταση από τον πύργο. Επιπλέον, αυτού του τύπου ανεμογεννήτριες χρειάζονται ένα σύστημα ώστε ο ρότορας να είναι κάθετα στον άνεμο.



Σχήμα 6.5.1: Ανεμογεννήτρια τύπου up-wind
Πηγή: www.futureenergy.co

6.6 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΤΥΠΟΥ ΚΑΤΑΝΤΙ (DOWN-WIND)

Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου έχουν τον δρομέα κατάντι, δηλαδή μετά το πύργο. Έχουν το θεωρητικό πλεονέκτημα του ότι μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς σύστημα σταθερής πορείας, αν ο δρομέας και η άτρακτος έχουν τον κατάλληλο σχεδιασμό έτσι ώστε η άτρακτος να ακολουθεί τη πορεία του ανέμου από φυσικού της. Για τις μεγάλες όμως ανεμογεννήτριες το πλεονέκτημα αυτό είναι κάπως αμφίβολο, διότι χρειάζονται καλώδια προκειμένου το παραγόμενο ρεύμα να φύγει από τη γεννήτρια. Ένα σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι ότι ο δρομέας είναι περισσότερο εύκαμπτος. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα και όσον αφορά το βάρος αλλά και τα δομικά δυναμικά της μηχανής, δηλαδή τα πτερύγια θα λυγίζουν σε υψηλές ταχύτητες ανέμου με αποτέλεσμα να παίρνουν μέρος του φορτίου από τον πύργο. Έτσι μπορεί να κατασκευαστεί μια ανεμογεννήτρια η οποία θα είναι ελαφρύτερη από του τύπου ανάντι. Το βασικό μειονέκτημα είναι στη διακύμανση της ενέργειας του ανέμου εξαιτίας του ότι ο δρομέας περνάει από τη σκιά του ανέμου του πύργου. Αυτό ίσως επιβαρύνει την ανεμογεννήτρια με περισσότερα δυναμικά φορτία σε σχέση με τις ανάντι.



Σχήμα 6.6.1: Ανεμογεννήτρια τύπου down wind
Πηγή: www.reuk.co

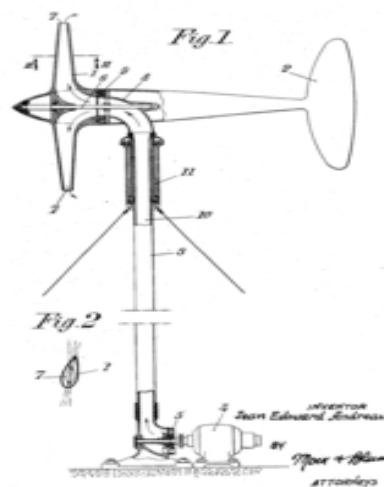
6.7 ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

Εκτός από τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα τύπου έλικας με ένα ή δύο πτερύγια, με τοποθέτηση της πτερωτής ανάντη ή κατάντη του πύργου στηρίξεως και του πολυπτέρυγους αργόστροφους ανεμόμύλους, υπάρχουν ακόμα ορισμένοι τύποι οι οποίοι δεν κυκλοφορούν στην αγορά είτε επειδή παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα κατά τη λειτουργία τους είτε επειδή λόγω καινοτομίας δεν υπάρχει βεβαιότητα ως προς την αξιοπιστία τους.

Στη συνέχεια θα γίνει μια μικρή περιγραφή σε αυτούς τους τύπους αιολικών μηχανών οι οποίοι δεν έχουν κατορθώσει να ενταχθούν στη παγκόσμια αγορά.

6.7.1 Ανεμογεννήτρια τύπου “Andreau-Enfield”

Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου αποτελούνται από μια έλικα αεροπλάνου με κοίλα πτερύγια, που κάτω από την επίδραση του ανέμου περιστρέφεται και ενεργεί σαν φυγοκεντρική αντλία αέρα. Το ρεύμα αέρα που εισροφάται από τη βάση του πύργου αποβάλλεται από τα ακροπτερύγια, κινώντας ενδιάμεσα ένα δρομέα στο εσωτερικό του πύργου. Μια μεγάλη αντίστοιχη εγκατάσταση ισχύος 100kW κατασκευάστηκε και λειτούργησε στην Αλγερία στην περίοδο 1950-60. Όμως η λειτουργία διακόπηκε λόγω προβλημάτων. Οι μηχανές του τύπου αυτού, αν και είναι σχετικά ελαφρές, δε χρησιμοποιούνται σήμερα επειδή παρουσιάζουν πολύ χαμηλό βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 6.7.1.1: Ανεμογεννήτρια τύπου Andreau-Enfield

Πηγές: www.buch-der-synergie.de
www.homestead.com

6.7.2 Ανεμογεννήτριες με περίβλημα τύπου Venturi

Μια αεροπορική έλικα τοποθετημένη μέσα σε ένα περίβλημα τύπου Venturi απαρτίζει αυτού του τύπου αιολική μηχανή. Η πτερωτή είναι τοποθετημένη στη περιοχή του λαιμού του ακροφυσίου όπου εκεί αναπτύσσονται ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες αέρα

λόγω της συγκεκριμένης διάταξης. Η μείωση των αεροδυναμικών απωλειών είναι ένα ακόμα πλεονέκτημα που χαρακτηρίζει αυτές της μηχανές. Παρόλο των πλεονεκτημάτων αυτού του τύπου μηχανής, στις μέρες η χρήση της δεν είναι διαδεδομένη καθώς το αυξημένο βάρος και το κόστος κατασκευής αλλά και ο διαρκώς αποπροσανατολισμός της κατά τη διεύθυνση του ανέμου την καθιστούν ασύμφορη για εμπορική χρήση. Παρόλα αυτά εξακολουθεί να προκαλεί το ενδιαφέρον των ερευνητών με στόχο τη βελτιστοποίησή της.

6.7.3 Πτέρυγες τύπου Δέλτα

Η αιολική μηχανή αυτού του τύπου βασίζεται στη τεχνική δημιουργία αεροδυναμικής δίνης. Είναι αποδεδειγμένο ότι σε πολύ κεκλιμένες τριγωνικές πτέρυγες (τύπου Δέλτα) δημιουργείται τοπική αύξηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου, λόγω της δημιουργίας στροβίλων κυκλοφορίας γύρω από την πτέρυγα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε αυξημένη δυσχέρεια περιστροφής του συστήματος.

6.7.4 Ανεμογεννήτριες με χρήση ‘tip-vanes’

Πρόσφατα ανακαλύφτηκε ότι η χρήση μικρών εγκάρσιων επιφανειών στα ακροπερύγια του δρομέα (tip-vanes), βοηθάει στη σύγκλιση των γραμμών ροής διαμέσου της πτερωτής, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η παροχή αέρα που διασχίζει τη πτερωτή, ενώ δε παρουσιάζονται προβλήματα στο γρήγορο προσανεμισμό του συστήματος. Σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι η χρήση των ‘tip-vanes’ επιβαρύνει με δυσανάλογα φορτία το σύνολο της πτερωτής.

6.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ Α.Ο.Α.

Πλεονεκτήματα Α/Γ οριζόντιου άξονα

1. Έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται και για μικρές αλλά και για μεγάλες ταχύτητες ανέμου καθώς υπάρχει η δυνατότητα επιλογή μεταξύ των πολύστροφων και των αργόστροφων Α/Γ.
2. Έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης που φτάνει το 30% ακόμα και το 40%

Μειονεκτήματα Α/Γ οριζόντιου άξονα

1. Απαιτείται σύστημα προσανατολισμού καθώς η διεύθυνση του ανέμου μπορεί να αλλάζει συνεχώς.
2. Δυσκολία στην εγκατάσταση καθώς η απευθείας ανέγερση είναι αδύνατη και συνεπώς ο πύργος συναρμολογείται σε κομμάτια.

6.9 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ

Στα μέσα του 1970, κάνει την εμφάνιση του ένας νέος τύπος Α/Γ με δρομέα κατακόρυφου άξονα. Οι αιολικές μηχανές αυτές ονομάζονται κάθετου άξονα και ο αρχικός σχεδιασμός είχε ξεκινήσει από τον Darrieus το 1931.

Στις Α/Γ κατακόρυφου άξονα, ο δρομέας είναι κάθετος προς την επιφάνεια του έδαφους και τα πτερύγια του είναι καμπύλα. Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης είναι παρόμοιο με τις Α/Γ οριζόντιου άξονα, και η μόνη διαφορά είναι ότι τα εξαρτήματα είναι τοποθετημένα σε κατακόρυφη θέση. Ο δρομέας στηρίζεται σε κατάλληλο έδρανο στη βάση του, το οποίο ακόμα και σε σταθερή ταχύτητα ανέμου καταπονείται από εναλλασσόμενα φορτία. Επίσης, με τη βοήθεια ενταντήρων η μηχανή διατηρείται κατακόρυφα. Οι ενταντήρες ενώνουν τη μηχανή με το έδαφος και συγκεκριμένα συνδέονται στη κορυφή του κάθετου άξονα της Α/Γ

Οι Α/Γ αυτού του τύπου έχουν μεγάλη στιβαρότητα S λόγω των χαμηλών στροφών περιστροφής τους (αργόστροφες), άρα και ο συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης C_p καθώς και η ταχύτητα ακροπτερυγίου λ έχουν μικρές τιμές. Παρουσιάζουν απλότητα ως προς τη κατασκευή τους και αυτό τους καθιστά οικονομικούς. Η συντήρηση τους είναι απλή και εύκολη καθώς όλα τα μηχανήματα είναι τοποθετημένα στο έδαφος και συνεπώς η περίπτωση βλάβης γίνεται άμεσα αντιληπτή. Οι υψηλή στιβαρότητα τους καθιστά ανθεκτικούς σε δυναμικές καταπονήσεις (σεισμοί, ταχύτητες ανέμου κ.ά.), ενώ το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους είναι η κατακόρυφη θέση διότι λειτουργούν ικανοποιητικά σε οποιαδήποτε διεύθυνση ανέμου χωρίς να χρειάζονται σύστημα προσανατολισμού. Συναντώνται κυρίως σε αγροτικές εφαρμογές, όπως η άντληση. Παρακάτω περιγράφονται ορισμένα από τα χαρακτηριστικά των Α/Γ Savonius.

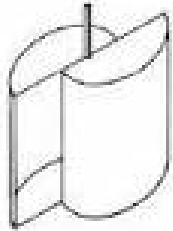
Οι Α/Γ τύπου Savonius είναι κάθετου άξονα και χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ροπή στρέψης πάνω σε ένα περιστρεφόμενο άξονα. Εφευρέθηκαν από τον μηχανικό Sigurd J. Savonius το 1924. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου είναι μια από τους απλούστερους ανεμοκινητήρες. Κοιτάζοντας το δρομέα από κάτω προς τα πάνω τα πτερύγια φαίνεται να σχηματίζουν ένα 'S'. Εξαιτίας της καμπυλότητας, η οπισθέλκουσα δύναμη είναι μικρότερη όταν περιστρέφεται κόντρα στον άνεμο σε αντίθεση με όταν κινείται παράλληλα σε αυτόν. Η διαφορετική διεύθυνση των οπισθέλκουσών δυνάμεων είναι η αιτία που ο ανεμοκινητήρας περιστρέφεται. Το γεγονός του ότι λειτουργεί λόγω της οπισθέλκουσας δύναμης έχει σαν συνέπεια να εξάγει λιγότερη ενέργεια σε σχέση με άλλου τύπου ανεμογεννήτριες του ίδιου μεγέθους.

Οι μηχανές Savonius, όπως όλες οι μηχανές κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν συμμετρία και αυτόματο προσανεμισμό με αποτέλεσμα να καταργούν τις διατάξεις προσανατολισμού οι οποίες κοστίζουν πολύ. Επίσης σε σχέση με τις μηχανές οριζόντιου άξονα τα όργανα μετατροπής βρίσκονται στο έδαφος και ο πύργος στήριξης είναι απλούστερος με αποτέλεσμα το κόστος παραγωγής τους να πέφτει κατακόρυφα.

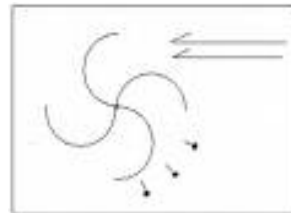
Συνοπτικά, οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου λόγω των πλεονεκτημάτων είναι ιδανικές για μικρές ισχύς, για οικιακή χρήση αλλά και για παραγωγή ενέργειας σε φτωχές χώρες ή σε απομακρυσμένες περιοχές. Γι' αυτό το λόγο τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί αξιόλογη ώθηση στη μελέτη και βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των εν λόγω μηχανών.

Ο Savonius χαρακτηρίζεται από το χαμηλό συντελεστή ισχύος και το μικρό λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ . Είναι απλός στην κατασκευή του και συνεπώς

οικονομικός. Το γεγονός ότι δεν απαιτεί σύστημα προσανατολισμού αποτελεί ένα από τα πλεονέκτημα του. Γίνονται όμως συνεχές μελέτες και έρευνες προκειμένου να τελειοποιηθεί αυτό το πλεονέκτημα. Οι κυριότερες έρευνες και μελέτες γίνονται στον λόγο ύψους προς τη διάμετρο, στον αριθμό των πτερυγίων, στο σχήμα τους, το πλάτος τους κ.τ.λ.



Σχήμα 6.9.1: Savonius



Σχήμα 6.9.2: Πολύπτερος Savonius

6.9.1 Χρησιμότητα

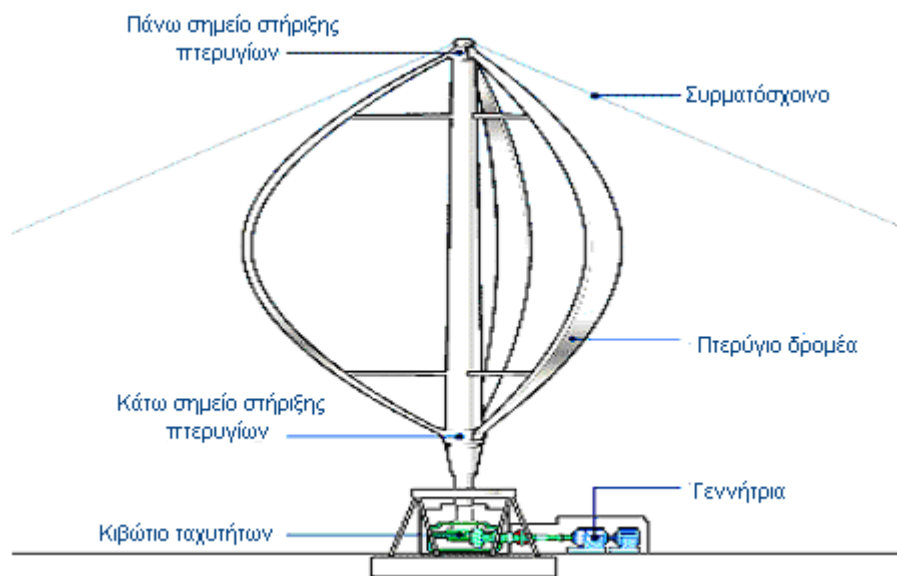
Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται εκεί όπου το κόστος και η αξιοπιστία είναι σημαντικότερα από την απόδοση. Για παράδειγμα, τα περισσότερα από τα ανεμόμετρα είναι τύπου Savonius επειδή αποδοτικά είναι εντελώς άχρηστα. Μεγαλύτερη ανεμοκινητήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια σημαδούρες που είναι τοποθετημένες στους ωκεανούς και οι οποίες χρειάζονται μικρά ποσά ενέργειας για τη λειτουργία τους. Ο Savonius και οι άλλοι κάθετου άξονα τύποι δεν είναι συνδεδεμένοι με το δίκτυο. Μερικές φορές έχουν μακριά ελικοειδή πτερύγια για να δίνουν ομαλότερη στρεπτική ροπή. Τέλος χρησιμοποιούνται ευρέως στις οροφές λεωφορείων και μικρών φορητών για εξαερισμό.

6.9.2 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα τύπου Darrieus

Ο ανεμοκινητήρας τύπου Darrieus χρησιμοποιείται για τη παραγωγή ηλεκτρισμού από την ενέργεια την οποία μεταφέρει ο αέρας. Αποτελείται από ένα πλήθος αεροτομών οι οποίες συχνά, αλλά όχι πάντα, είναι κάθετα στον περιστρεφόμενο άξονα. Ο σχεδιασμός της έγινε από ένα Γάλλο αεροναυπηγό τον George Jean Marie Darrieus το 1931, ενώ είχε εκτεταμένη εφαρμογή στον Καναδά μέχρι τη δεκαετία του 1970. Η έρευνα πάνω στην εξέλιξη του αρχικού αυτού ανεμοκινητήρα επαναλήφθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '70, με πρωτοβουλία του Εθνικού Συμβουλίου Ερευνών του Καναδά, ενώ ένα σημαντικό μέρος των ερευνών καλύπτεται από τα εργαστήρια 'Sandia' των Η.Π.Α., στα πλαίσια του εθνικού προγράμματος αιολικής ενέργειας της χώρας αυτής. Σήμερα έχουν σχεδιαστεί διάφορες μορφές αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας όπως η 'Φ-Darrieus', η 'Δ-Darrieus', η 'Υ-Darrieus' και η 'Ο-Darrieus'.

Οι ανεμοκινητήρες αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται από καμπύμενα πτερύγια και λειτουργούν με τη χρήση των δυνάμεων άνωσης που εξασκούνται πάνω στα πτερύγια. Το πλήθος των πτερυγίων ποικίλει από ένα, δύο, τρία ή και περισσότερα. Τα πτερύγια μπορεί να έχουν διάφορες μορφές ανάλογα με τις παραλλαγές του δρομέα. Υπάρχουν ευθύγραμμα κατακόρυφα πτερύγια, στα οποία όμως

δημιουργούνται μεγάλες καμπτικές τάσεις λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων από τη περιστροφή. Αυτές οι καμπτικές τάσεις στα πτερύγια μειώνονται σημαντικά εάν τα πτερύγια έχουν τη μορφή του σχήματος που αποκαλείται 'σχοινοειδής'. Αυτή είναι η μορφή που θα έπαιρνε ένα χαλαρό σχοινί κατά τη περιστροφή του ή ένα τελείως εύκαμπτο καλώδιο σταθερού μήκους με τα άκρα του προσαρμοσμένα όπως και στην εν λόγω του σχήματος ανεμογεννήτριας στον άξονα περιστροφής. Λόγω του σχήματος αυτού τα πτερύγια καταπονούνται σε σταθερές εφελκυστικές μόνο δυνάμεις, με αποτέλεσμα τα πτερύγια του δρομέα να έχουν λιγότερες κατασκευαστικές απαιτήσεις και το υλικό τους να υφίσταται μικρότερη κόπωση σε δυναμικές τάσεις.



Σχήμα 6.9.2.1: Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα
Πηγή: www.howstuffworks.com

Τα άκρα των πτερυγίων του δρομέα είναι πακτωμένα στον άξονα περιστροφής, και ο λόγος του ύψους προς τη διάμετρο του δρομέα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1 και 1,5. Η ακτίνα του δρομέα καθορίζεται σαν μέγιστη απόσταση των πτερυγίων από τον άξονα της μηχανής. Με δεδομένο το σχήμα των πτερυγίων, αυτό που επιδιώκεται είναι ο δρομέας να σαρώνει ένα ρεύμα αέρα μέγιστης επιφάνειας, οπότε και επιδιώκεται το ύψος του δρομέα να ισούται με τη διάμετρό του. Από την άλλη όμως πλευρά τεχνικο-οικονομικοί λόγοι επιβάλλουν μεγαλύτερες τιμές του λόγου ύψους-διαμέτρου.

Τα πτερύγια του δρομέα 'Darrieus' δεν παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας προσβολής και κατά συνέπεια βελτίωσης της αεροδυναμικής τους συμπεριφοράς. Τα πτερύγια συνήθως τοποθετούνται σε διάταξη 180° ή 120° αντίστοιχα. Η επιλογή του πλήθους των πτερυγίων πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς πρέπει να γνωρίζουμε ότι ο διπτέρυγος δρομέας παρουσιάζει έντονη κυκλική μεταβολή της αεροδυναμικής του ροπής με έντονες αποκλίσεις από τη μέση τιμή (που φτάνουν μέχρι και το 100%) και οι οποίες μπορούν να περιοριστούν στο 20 έως 25% με κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος κίνησης. Αντίθετα η αεροδυναμική ροπή του τριπτέρυγου δρομέα είναι σχετικά σταθερή σε ολόκληρη σχεδόν την περιοχή

λειτουργίας του. Επίσης η αεροδυναμική απόδοση του τριπτέρυγου δρομέα είναι κατά κανόνα καλύτερη αυτής του διπτέρυγου, ο τελευταίος όμως είναι απλούστερος στην κατασκευή, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στη μείωση του κόστους.

Αυτός ο τύπος θεωρητικά είναι τόσο αποδοτικός όσο και οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα με την προϋπόθεση ότι η ταχύτητα του αέρα είναι συνεχής, αλλά πρακτικά αυτή η απόδοση σπάνια επιτυγχάνεται εξαιτίας φυσικών τάσεων και περιορισμών που επιβάλλονται από τον σχεδιασμό.

Στις αρχικές εκδόσεις του Darrieus, τα πτερύγια κανονίζονταν έτσι ώστε να είναι συμμετρικά και να έχουν μηδενική γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή η γωνία καθορίζεται σε σχέση με τη δομή για την οποία τα πτερύγια είναι τοποθετημένα. Αυτή η ρύθμιση είναι εξίσου αποτελεσματική ανεξαρτήτως ποιας κατεύθυνσης ο άνεμος φυσάει, σε αντίθεση με το συμβατικό τύπο ο οποίος πρέπει να περιστρέφεται κάθετα στον άνεμο. Τα πτερύγια που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας είναι συμμετρικής διατομής, σταθερής χορδής και χωρίς συστροφή. Τα πτερύγια αυτά λειτουργούν σε μεγάλες τιμές (4 έως 10) της παραμέτρου περιστροφής 'λ', με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν υψηλή αεροδυναμική απόδοση. Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος κατασκευής των πτερυγίων είναι η εξέλαση ειδικών κραμάτων αλουμινίου, ενώ η σχοινοειδής μορφή προσδίδεται στη συνέχεια με κάμψη των ευθύγραμμων τμημάτων.

Οι αιολικές μηχανές τύπου 'Darrieus' κατά την εκκίνηση τους δεν αναπτύσσουν ικανοποιητική ροπή εκκίνησης. Γι' αυτό το λόγω συνήθως απαιτείται μια βοηθητική πηγή ενέργειας για την εκκίνηση. Για το λόγω αυτό χρησιμοποιείται είτε η ηλεκτρική γεννήτρια σαν κινητήρας, είτε τοποθετούνται ένας ή δύο ομοαξονικοί δρομείς τύπου 'Savonius', οι οποίοι αναπτύσσουν υψηλή αεροδυναμική ροπή κατά την εκκίνηση. Έχει αποδειχθεί ότι η συνδυασμένη λειτουργία δεν επηρεάζει την απόδοση του 'Darrieus' και το μοναδικό πρόβλημα που υπάρχει είναι το αυξημένο βάρος κατασκευής.



Σχήμα 6.9.2.3: Συνδυασμένη λειτουργία Savonius-Darrieus
Πηγή : Google-Images

Στις μηχανές αυτές η πέδηση γίνεται με αεροδυναμική πέδη όπως και στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, δηλαδή μετά από ένα ορισμένο όριο στροφών, λόγω της φυγόκεντρης δύναμης, απελευθερώνεται μια επίπεδη πλάκα ή ένα τμήμα του δρομέα σε κάθετη θέση, αυξάνοντας σημαντικά την αεροδυναμική αντίσταση της πτερωτής έχοντας σαν αποτέλεσμα την επιβράδυνσή της.

Το μηχανικό σύστημα κίνησης περιλαμβάνει τον άξονα του δρομέα και την έδρασή του, το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, ελαστικούς συνδέσμους για την απόσβεση των στρεπτικών ταλαντώσεων, το σύστημα πέδησης, την ηλεκτρική γεννήτρια με τη βάση και το κέλυφος προστασίας των μηχανισμών αυτών. Οι επιμέρους περιγραφές των τμημάτων δεν διαφέρουν με αυτές του οριζόντιου άξονα.

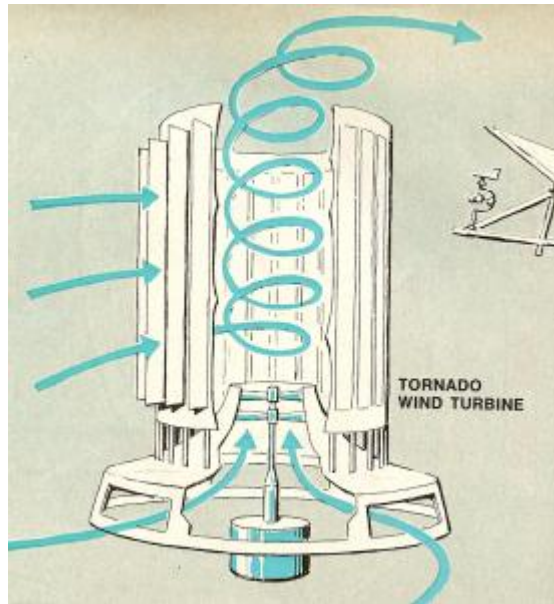
Η κύρια διαφορά είναι στα έδρανα στηρίξεως των ανεμοκινητήρων κάθετου άξονα σε σχέση με αυτά του οριζόντιου άξονα. Πράγματι και εδώ ο άξονας της μηχανής στηρίζεται σε δύο έδρανα. Το άνω έδρανο παραλαμβάνει κυρίως τις ακτινικές δυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω στα πτερύγια, ενώ το κάτω παραλαμβάνει μεγάλες ωστικές δυνάμεις συμπεριλαμβανομένου και του βάρους του δρομέα. Για τους λόγους αυτούς απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη σχεδίαση τους, ενώ ορισμένοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν ειδικά κατασκευασμένα ωστικά υδροδυναμικά έδρανα, τα οποία λειτουργούν με υδραυλική σχέση και παρουσιάζουν ελάχιστη αντίσταση τριβής, στη θέση των συνηθισμένων ένσφαιρων ωστικών εδράνων.

6.9.3 Περαιτέρω τύποι ανεμογεννητριών κάθετου άξονα

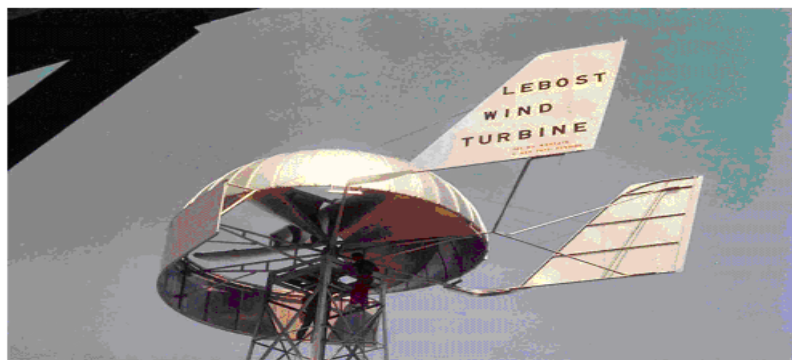
Εκτός από τους ανεμοκινητήρες κάθετου άξονα τύπου 'Savonius' και 'Darrieus' που πλέον είναι οι πρωτοπόρες μηχανές κάθετου άξονα υπάρχει μεγάλο πλήθος παραλλαγών των εν λόγω αιολικών μηχανών. Μερικές από αυτές αναφέρονται παρακάτω.

6.9.3.1 Ανεμογεννήτριες τύπου Tornado

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αιολικές μηχανές 'τεχνητού ανεμοστρόβιλου' ή 'tornado', όπου ο αέρας εισρέει σε ένα κατακόρυφο κυλινδρικό κτήριο διαμέσου ενός συστήματος από κατακόρυφες σχισμές, με τη χρήση κινητών βανών που προσδίδουν περιστροφική κίνηση στον αέρα. Ο δημιουργούμενος ανεμοστρόβιλος έχει στον πυρήνα του χαμηλή πίεση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ισχυρού ρεύματος αέρα μεταξύ του περιβάλλοντος και του πυρήνα του στρόβιλου, το οποίο εισερχόμενο από τη βάση του κυλίνδρου, θέτει σε κίνηση ένα δρομέα κατακόρυφου άξονα. Η διάταξη αυτή αποτελεί πρόσφατη επινόηση και προβάλλεται σαν ένας αξιόλογος τρόπος για να κατασκευαστούν μονάδες της τάξεως των 10 έως 1000MW. Για το λόγο αυτό και δεδομένου ότι οι υπόλοιπες αιολικές μηχανές εμφανίζουν κατασκευαστικά προβλήματα για ισχύς άνω των 4MW, έχει υπάρξει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον.



Σχήμα 6.9.3.1.1: Ανεμογεννήτρια τύπου Tornado
 Πηγή: www.ecocadet.com



Σχήμα 6.9.3.1.2: Ανεμογεννήτρια τύπου Lebost
 Πηγή: www.barrylebost.com

Άλλες διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν, είναι η μηχανή προπετάσματος καθώς και το 'πανεμόνιο', οι οποίες ίσως αποτελούν τους αρχαιότερους τύπους ανεμόμυλου. Οι μηχανές του τύπου αυτού είναι σχετικά απλές, έχουν όμως κακή αεροδυναμική απόδοση και είναι αργόστροφες.

6.9.4 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα Α/Γ κάθετου άξονα

Πλεονεκτήματα ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα

Οι Α/Γ κάθετου άξονα πλεονεκτούν σε πολλούς τομείς σε σχέση με του οριζόντιου. Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα είναι η ευκολία της κατασκευής και ειδικά των πτερυγίων σε σχέση με του οριζόντιου. Επίσης δεν απαιτούνται συστήματα φρεναρίσματος για υψηλές ταχύτητες ανέμου και προσανατολισμού πράγμα που τις κάνει ιδανικές για περιοχές όπου η μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου είναι σύνηθες φαινόμενο.

Επιπροσθέτως, λόγω του απλού σχεδιασμού καθίστανται φτηνότερες κατά τη κατασκευή και τέλος θεωρούνται ασφαλέστερες καθώς δεν υπάρχει κίνδυνος θραύσης πτερυγίου που θα μπορούσε να προκαλέσει ζημιά ή ατύχημα.

Μειονεκτήματα ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα

Βασικό μειονέκτημα των Α/Γ κάθετου άξονα είναι ο χαμηλός βαθμός απόδοσης που τις διακρίνει. Ο Savonius για παράδειγμα φτάνει μόλις 15% βαθμό απόδοσης ενώ μια καλή Α/Γ οριζόντιου άξονα φτάνει 30% ακόμα και 40%. Με βάση αυτό καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για να αποδώσει μια Α/Γ κάθετου άξονα το ίδιο με αυτή του οριζόντιου θα πρέπει να έχει τη τριπλάσια επιφάνεια εκμετάλλευσης του ανέμου το οποίο όμως συνεπάγεται με πολύ μεγάλη και βαριά εγκατάσταση.

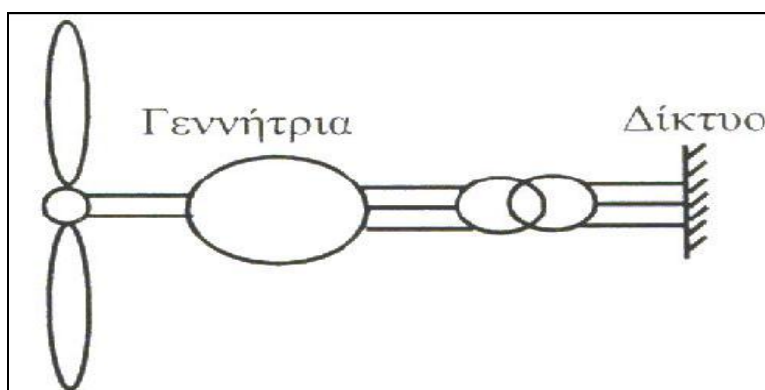
Τέλος επειδή είναι αργόστροφες χρειάζονται μεγαλύτερη ένταση ανέμου κατά την εκκίνηση τους.

6.10 ΤΡΟΠΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους οι αιολικές μηχανές μπορούν να μετατρέψουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική και εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας τους. Υπάρχουν λοιπόν οι Α/Γ σταθερών στροφών και οι μεταβλητών στροφών.

6.10.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών ή σταθερής ταχύτητας

Στις Α/Γ αυτού του τύπου ο δρομέας στρέφεται με σταθερή ταχύτητα και εξαρτάται από τη σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων, το σχεδιασμό της γεννήτριας αλλά και από τη συχνότητα του συνδεδεμένου δικτύου και δεν επηρεάζεται καθόλου από τη ταχύτητα του ανέμου. Η γεννήτρια συνδέεται με το δίκτυο κατά τον ίδιο τρόπο με τις γεννήτριες που τροφοδοτούνται από συμβατικές μηχανές δηλαδή απευθείας, με τη χρήση ενός μετασχηματιστή ανάλογα με το μέγεθος τάσης της γεννήτριας. Αυτός ο τρόπος σύνδεσης της γεννήτριας είναι αιτία της γωνιακής ταχύτητας τη γεννήτριας.



Σχήμα 6.10.1.1: Α/Γ σταθερών στροφών σε απευθείας σύνδεση με το δίκτυο

Οι Α/Γ σταθερών στροφών διαθέτουν κατά βάση ασύγχρονη γεννήτρια. Οι λόγοι που προτιμάται η ασύγχρονη γεννήτρια είναι γιατί παρέχει μεγάλη στιβαρότητα,

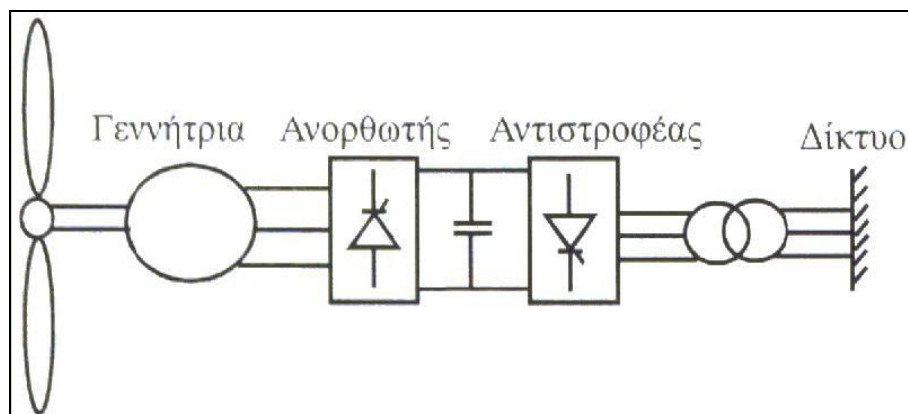
παρουσιάζει ευκολία ως προς τη κατασκευή της και είναι φτηνή όσον αφορά στα ηλεκτρικά της μέρη. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας για ένα εύρος ταχυτήτων λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα εξομάλυνσης των διακυμάνσεων της ισχύος στην έξοδο της γεννήτριας καθώς και της καταπόνησης του μηχανικών μερών.

Το μεγάλο μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι γεννήτριες αυτές είναι ότι απορροφούν άεργο ισχύ. Για την τροφοδοσία με άεργο ισχύ είναι απαραίτητη η σύνδεση κατάλληλων πυκνωτών στους ακροδέκτες των τυλιγμάτων.

Η διάταξη σταθερών στροφών πλεονεκτεί ως προς την απλότητα και αξιοπιστία λειτουργίας καθώς και προς το αμελητέο κόστος συντήρησης. Η ανωτέρω λόγοι ήταν αυτοί που το καθιέρωσαν στην εποχή του, καθώς η αξιοπιστία ήταν ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα. Υπάρχουν όμως και πολλά μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τις γεννήτριες σταθερών στροφών. Υπάρχει περίπτωση να εμφανιστούν ταλαντώσεις στο σύστημα μετάδοσης και στην ισχύ στην έξοδο της γεννήτριας. Οι ταλαντώσεις μπορεί να εμφανιστούν εάν κοντά στις συχνότητες συντονισμού του συστήματος μετάδοσης εμφανιστούν και αρμονικές συνιστώσες από την αεροδυναμική ροπή. Άρα έχουμε μεγάλες διακυμάνσεις ροπής και ισχύ στην έξοδο καθώς και ταλαντώσεις στο μηχανικό σύστημα μετάδοσης.

6.10.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας

Οι Α/Γ αυτού του τύπου σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτυγχάνουν βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου. Επειδή το δίκτυο έχει σταθερή συχνότητα χρησιμοποιείται μετατροπέας συχνότητας ώστε να γίνει αποδέσμευση της περιστροφικής ταχύτητας από τη συχνότητα αυτή και να είναι δυνατή η μετατροπή της. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα σύστημα μεταβλητής ταχύτητας.



Σχήμα 6.10.2.1: Σύνδεση Συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με το δίκτυο σταθερής συχνότητας

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.10.2.1 για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές χρησιμοποιείται ένας ανορθωτής (τριφασικός). Μετά τον ανορθωτή συνδέεται ένας αντιστροφέας (inverter) ο οποίος συνδέει τη γεννήτρια με το δίκτυο

και ταυτόχρονα μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο και σε συχνότητα ίδιας με του δικτύου.

Στις μηχανές μεταβλητών στροφών όσο αυξάνεται το ποσό εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας τόσο αυξάνεται και η απόδοση της μηχανής. Αυτό είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της λειτουργίας μεταβλητών στροφών. Ένα ακόμα είναι ο έλεγχος της άεργου ισχύς καθώς επίσης και η αυξημένη διάρκεια ζωής λόγω περιορισμένων μηχανικών καταπονήσεων

Όπως όλα τα συστήματα έχουν μειονεκτήματα, το συγκεκριμένο χαρακτηρίζεται από την ιδιαίτερη πολυπλοκότητα και συνεπώς από το αυξημένο κόστος.

6.10.3 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕ.Δ.Τ

Στις μέρες μας η ΓΕννήτρια Διπλής Τροφοδότησης γίνεται όλο και πιο περιζήτητη στην αγορά. Οι Α/Γ αυτού του τύπου αποτελούνται από μια γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα όπου τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται απευθείας στο δίκτυο ΕΡ και τα τυλίγματα του ρότορα συνδέονται σε μια διάταξη διασύνδεσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος / Συνεχούς Ρεύματος / Εναλλασσόμενου Ρεύματος (ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ) με μετατροπείς πηγής τάσης. Η τάση του στάτη και η τάση του ρότορα εφαρμόζονται από διαφορετικές πηγές και ως εκ τούτου και ο όρος “Διπλής Τροφοδότησης”. Στην πρώτη περίπτωση, η τάση διοχετεύεται από το δίκτυο, ενώ στη δεύτερη από τον μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας αντισταθμίζει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική συχνότητα εκχύνοντας στο ρότορα ένα ρεύμα με μεταβλητή συχνότητα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η γεννήτρια να ελέγχεται από το μετατροπέα ισχύος και του ελεγκτές του τόσο για τη κανονική λειτουργία αλλά και για τη λειτουργία σφαλμάτων.

Οι μετατροπείς απαρτίζονται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης, εκ των οποίων ο ένας είναι στη μεριά του ρότορα και ο δεύτερος στο δίκτυο και ο έλεγχος τους είναι ανεξάρτητος. Η πραγματική και η άεργος ισχύ ελέγχεται από το μετατροπέα στη μεριά του ρότορα ενώ ο δεύτερος ελέγχει τη τάση συνεχούς ρεύματος ώστε η απορροφώμενη άεργος ισχύς από το δίκτυο να είναι μηδέν.

Το αν η ισχύς θα τροφοδοτεί το ρότορα ή θα απορροφάται από αυτόν εξαρτάται από τη κατάσταση λειτουργίας. Σε ιδανικές καταστάσεις λειτουργίας η ισχύς από το ρότορα πηγαίνει στο δρομέα και από εκεί απορροφάται από το δίκτυο ενώ σε μη ιδανικές καταστάσεις ισχύς κατευθύνεται από το δίκτυο στο ρότορα. Και στις δύο περιπτώσεις το δίκτυο τροφοδοτείται με ενέργεια από στάτη.

Η ΓΕ.Δ.Τ. εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα. Καταρχάς ο έλεγχος της πραγματικής από την άεργο ισχύ γίνεται ανεξάρτητα. Επίσης μπορεί να παράγει άεργο ισχύ και ο μετατροπέας που είναι στη μεριά του δικτύου να την τροφοδοτεί στο δίκτυο. Παρόλα αυτά, υπό κανονικές συνθήκες, αυτός ο μετατροπέας δουλεύει κάτω από μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν παίρνει μέρος σε ανταλλαγή άεργου ισχύος μεταξύ της Α/Γ και του δικτύου. Σε περίπτωση δικτύου που είναι ασθενές και έχει διακυμάνσεις στην τάση, η ΓΕ.Δ.Τ. μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε να παράγει ή να καταναλώνει ένα μέρος άεργου ισχύος με στόχο τον έλεγχο τάσης.

6.11 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Για τον σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας υπάρχουν αρκετοί παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψιν ώστε να υπάρξει μια αποδοτική εκμετάλλευση της ενέργειας του αέρα της προς εγκατάσταση περιοχής. Οι παράγοντες που πρέπει να μελετηθούν με ιδιαίτερη προσοχή είναι:

1) Η διάμετρος του δρομέα “D”, με βάση την οποία υπολογίζεται η επιφάνεια που σαρώνει ο δρομέας, δηλαδή η επιφάνεια για την οποία θα αποσπάσει η Α/Γ ένα μέρος της ενέργειας του ανέμου. Η επιλογή της διαμέτρου μπορεί να γίνει εξ’ αρχής από τη στιγμή που γνωρίζουμε το μέσο αιολικό δυναμικό καθώς και την απαιτούμενη ισχύ της Α/Γ.

2) Το ύψος τοποθέτησης “H” για ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ή του δρομέα για ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα. Το ύψος τοποθέτησης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, διότι όσο ψηλότερα τοποθετείται μια ανεμογεννήτρια τόσο μεγαλύτερο είναι το αιολικό δυναμικό. Αυτό όμως έχει και το τίμημα του γιατί καθώς αυξάνεται το ύψος αυξάνεται το βάρος αλλά και το κόστος της αιολικής μηχανής. Υπάρχουν επίσης ορισμένοι περιορισμοί όσον αφορά το ύψος, που βασίζονται στο γεγονός ότι τα πτερύγια δε πρέπει να είναι πολύ κοντά στο έδαφος ώστε να μην υπάρχει αλληλεπίδραση με το έδαφος. Το ύψος ενός ανεμοκινητήρα καθορίζεται από τη διάμετρο της πτερωτής και πρέπει να ισχύει $1 < H/D < 1,5$.

3) Το πλήθος πτερυγίων “z” της πτερωτής το οποίο συνδέεται με τη στιβαρότητα ‘σ’ της μηχανής. Το πλήθος των πτερυγίων εξαρτάται από τις παρατηρήσεις του υποκεφαλαίου 6.4.9 «πτερύγια» αλλά και από τη **στιβαρότητα “σ”** (solidity), η οποία ως αδιάστατη παράμετρος καθορίζει και ταξινομεί τις Α/Γ.

Για τις μηχανές οριζόντιου άξονα η παράμετρος αυτή ορίζεται ως :

$$s = \frac{z * c * R}{p * R^2} \quad (6.11.1)$$

ενώ για της μηχανές κάθετου άξονα ορίζεται σαν:

$$s = \frac{z * c}{R} \quad (6.11.2)$$

όπου:

z	à	ο αριθμός των πτερυγίων του δρομέα
R	à	η ακτίνα του δρομέα σε (m)
c	à	η χορδή (πλάτος) των πτερυγίων του δρομέα (m).

Η παράμετρος στιβαρότητας “σ” εκφράζει το λόγο του εμβαδού όλων των πτερυγίων προς το συνολικό εμβαδόν που καλύπτουν μια πλήρη περιστροφή. Οι Α/Γ με μεγάλη στιβαρότητα είναι αργόστροφες, παρουσιάζουν μικρό βαθμό απόδοσης, απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και τέλος χαρακτηρίζονται από μεγάλη ροπή στον άξονα περιστροφής. Αντίθετα οι αιολικές μηχανές μικρής στιβαρότητας είναι πολύστροφες, έχουν μεγάλο βαθμό απόδοσης, απαιτούν σημαντική συντήρηση και χαρακτηρίζονται από μικτή ροπή στον άξονα περιστροφής.

Ο αριθμός των πτερυγίων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Συνήθων μιλάμε για στροφές ανά λεπτό (rpm) ή για την εφαπτομενική ταχύτητα, $U_{εφ}$ του άκρου της πτέρυγας. Η εφαπτομενική ταχύτητα εκφράζεται ως:

$$U_{εφ} = \omega * R = 2 * \pi * n * R \quad (6.11.3)$$

Ιδιαίτερα χρήσιμος είναι ο **παράγοντας λάμδα** (λ). Είναι μια αδιάστατη παράμετρος που ορίζεται ως το πηλίκο της ταχύτητας περιστροφής του άκρου του πτερυγίου, προς τη ταχύτητα του ανέμου στο σημείο εκείνο εάν δεν υπήρχε η διατάραξη της ροής από την πτερωτή. Η μαθηματική σχέση που εκφράζει το παράγοντα λάμδα είναι :

$$\lambda = \frac{\omega_a * R}{u} \quad (6.11.4)$$

όπου :

ω_a	\hat{a}	είναι η γωνιακή ταχύτητα πτερωτής σε (rad/sec)
R	\hat{a}	είναι η ακτίνα πτερωτής σε (m)
U	\hat{a}	είναι η ταχύτητα του ανέμου σε (m/s)

Μια Α/Γ λειτουργεί σε ένα εύρος τιμών του λ . Ωστόσο, θα λειτουργεί με βέλτιστη απόδοση όταν η $U_{εφ}$ είναι ένα συγκεκριμένο πολλαπλάσιο της ταχύτητας του ανέμου (u). Η τιμή του λ εξαρτάται από τη σχεδίαση, τη μορφή αλλά και την τομή των πτερυγίων και τον αριθμό τους.

Για να εξάγουμε όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια από τον άνεμο, οι πτέρυγες θα πρέπει να είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε, να αλληλεπιδρούν με τον άνεμο που διέρχεται από την επιφάνεια A, που περιγράφουν. Μια πολύπτερη Α/Γ αλληλεπιδρά με τον άνεμο που προσπίπτει σε αυτήν, έστω και με μικρή $U_{εφ}$, ή ορθότερα με μικρή τιμή του λ . Επομένως εδώ πρόκειται για μικρής ακτίνας πτέρυγες.

Αντίθετα, μια ανεμογεννήτρια με 2 ή 3 πτερύγια, πρέπει να περιστρέφεται ταχύτερα. Επομένως η $U_{εφ}$ θα είναι μεγαλύτερη για να γεμίσουν οι πτέρυγες την επιφάνεια A, ώστε να αλληλεπιδράσουν με το διερχόμενο ρεύμα αέρα. Εάν το λ σε αυτή τη περίπτωση είναι μικρό τότε μέρος του ανέμου περνάει από την επιφάνεια χωρία αλληλεπίδραση, ενώ αν ο λ έχει μεγάλη τιμή τότε η Α/Γ παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση στον άνεμο και έτσι δημιουργείται τυρβώδης ροή, ώστε ο άνεμος περνά γύρω από το στρόβιλο.

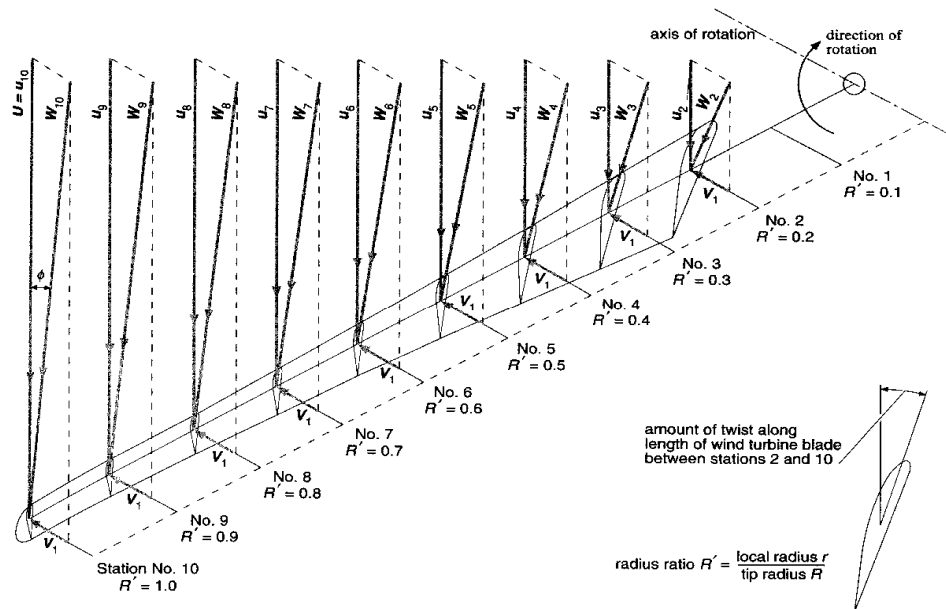
Μια δίπτερη Α/Γ με το ίδιο πλάτος πτερυγίων με μια 3πτερη, θα έχει βέλτιστη τιμή λ , κατά 1/3 υψηλότερη και μια μονόπτερη θα έχει λ δύο φορές μεγαλύτερο από τη δίπτερη, με πτέρυγα ίδιου πλάτους.

Η τυπική τιμή του παράγοντα λ στις σύγχρονες Α/Γ κυμαίνεται μεταξύ 6 και 20. Θεωρητικά όσο πιο πολλές πτέρυγες έχει η Α/Γ τόσο η απόδοση είναι υψηλότερη. Ωστόσο, μεγάλος αριθμός πτερυγίων συνεπάγεται ότι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ρευστομηχανικά. Έτσι η τρίπτερη είναι κατά 5% υψηλότερης απόδοσης της δίπτερης και ακόμα υψηλότερης της μονόπτερης.

Η μηχανική ισχύς που η Α/Γ απάγει από τον άνεμο είναι ίση με τη γωνιακή ταχύτητα επί τη ροπή, ήτοι:

$$P_{mhc.} = M \omega \text{ (Watt)} \quad (6.11.5)$$

Η ροπή Μ σε Nm, περί το κέντρο περιστροφής, οφείλεται στη περιστροφική δύναμη που εμφανίζεται στις πτέρυγες, κατά την επίδραση επ' αυτών του ανέμου



Σχήμα 6.11.1: Τρισδιάστατη εικόνα από πτερύγιο Α/Γ οριζόντιου άξονα

Είναι προφανές ότι για δεδομένη ισχύ, μικρότερη τιμή της γωνιακής ταχύτητας (ω), συνεπάγεται μεγαλύτερη ροπή και αντιστρόφως, μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα συνεπάγεται μικρότερη ροπή.

4) Το είδος πτερυγίων της πτερωτής. Που περιλαμβάνει το τύπο των πτερυγίων, το πάχος τους, τη συστολή τους αλλά και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή τους.

5) Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας V_{cut-in} : Ονομάζεται η ταχύτητα για την οποία αρχίζει η μηχανή να λειτουργεί και είναι από 3 έως 6 m/s. Επειδή όμως η ανεμογεννήτρια παρουσιάζει πολλές μηχανικές απώλειες λόγω τριβών στα μηχανικά της μέρη όπως ο άξονας περιστροφής, το σύστημα πέδησης, ο πολλαπλασιαστής στροφών και άλλα μηχανικά μέρη, ξεκινάει να αποδίδει ισχύ μόνο όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει κατά κάποιο όριο την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας. Η σχέση η οποία μας δίνει τη ταχύτητα του ανέμου για την οποία η ανεμογεννήτρια αποδίδει ισχύ είναι:

$$V_{in} = \left[\frac{8 \frac{P_0}{P_R}}{r^* p^* c_p^* D^3} \right] \quad (6.11.6)$$

όπου :	P_o	\hat{a}	η ισχύς που χάνεται για ταχύτητες ανέμου $< V_{in}$,
	P_R	\hat{a}	η ονομαστική ισχύ της μηχανής,
	C_p	\hat{a}	ο συντελεστής ισχύος,
	ρ	\hat{a}	η πυκνότητα του αέρα,
	D	\hat{a}	η διάμετρος της πτερωτής.

6) Η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής V_R . Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται, παράλληλα αυξάνεται και η παραγόμενη ισχύς μέχρι να φτάσει την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Μόλις γίνει αυτό, επιδιώκουμε η ισχύς που αποδεδεσμεύεται από τον άνεμο και η ισχύς που διοχετεύεται στο δίκτυο να είναι σταθερές. Αυτό μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι με μεταπτερύγια και ένας άλλος η αλλαγή τη γωνιακής θέσης. Η ταχύτητα του ανέμου για την οποία η Α/Γ αναπτύσσει την ονομαστική ισχύ της καλείται ονομαστική ταχύτητα ανέμου V_r και για ταχύτητες μεγαλύτερης της V_r ο δρομέας δεν αποδεδεσμεύει την μέγιστη ισχύ του αέρα. Συνεπώς σε κάθε σημείο εγκατάστασης θα πρέπει να υπάρχει ικανοποιητική σχέση μεταξύ των παρατηρούμενων ταχυτήτων του αέρα και της ονομαστικής ταχύτητας της Α/Γ. Θα πρέπει να βρεθεί για κάθε θέση εγκατάστασης της αιολικής μηχανής η καλύτερη σχέση μεταξύ των παρατηρούμενων ταχυτήτων του ανέμου και της ονομαστικής ταχύτητας της μηχανής. Με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσης μπορούμε ,με αρκετά καλή προσέγγιση να υπολογίσουμε την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας:

$$V_R = 1,9 * \bar{V} \quad (6.11.7)$$

όπου \bar{V} η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου στη θέση εγκατάστασης.

7) Ταχύτητα απόξευξης ή διακοπής λειτουργίας. Για υψηλές ταχύτητες ανέμου η Α/Γ σταματάει τη λειτουργία της για να αποφευχθούν τυχόν ζημιές που μπορεί να προκύψουν λόγω του υψηλού ανέμου. Η ταχύτητα για την οποία σταματάει να λειτουργεί η Α/Γ καλείται ταχύτητα απόξευξης V_f .

8) Ο συντελεστής ισχύος “ C_p ” ή ο αεροδυναμικός συντελεστής του δρομέα εκφράζει την ενέργεια που αποδεδεσμεύει ο δρομέας από τον άνεμο και, όπως έχει προαναφερθεί, ισούται για μια ιδανική μηχανή με το 59% της αιολικής ενέργειας που περνάει από το δρομέα.

9) Η ονομαστική ισχύς “ P_R ”. Από την ονομαστική ισχύ καθορίζεται το μέγεθος των Α/Γ της μηχανής και εκφράζει το μέτρο της στιγμιαίας ισχύς που αποδεδεσμεύεται από τον άνεμο για επιφάνεια σάρωσης “Α” και ταχύτητας αέρα “V” και υπολογίζεται από τη Σχ. 6.11.8 . Η ονομαστική ισχύ μαθηματικά εκφράζεται και υπολογίζεται από τη σχέση 6.11.8:

$$P_R = 0,5 * C_p * h * r * A * V^3 \quad (6.11.8)$$

όπου: ο βαθμός απόδοσης “η” περιλαμβάνει τις απώλειες της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής “ η_E ” καθώς και τις απώλειες τριβής, εδράνων, πολλαπλασιαστή στροφών κ.τ.λ. (απώλειες μηχανικού συστήματος) “ η_M ”

Εν γένει:

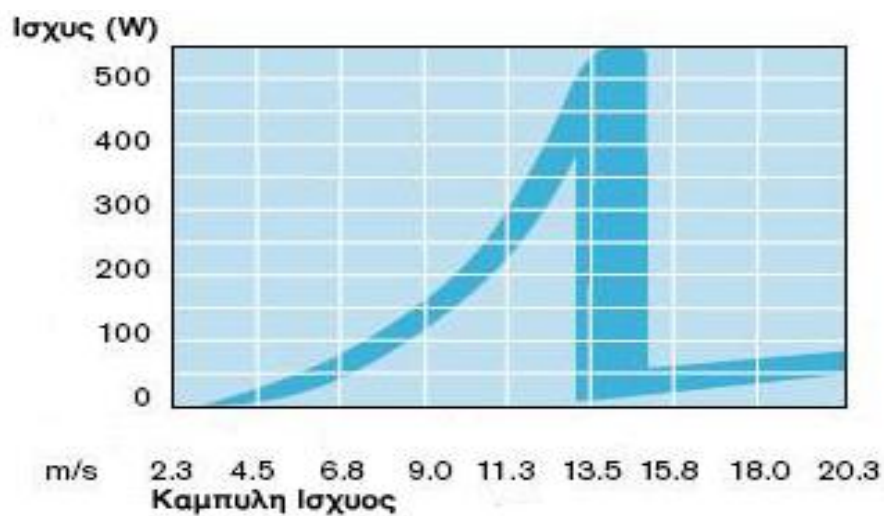
$$h = h_M * h_E$$

(6.11.9)

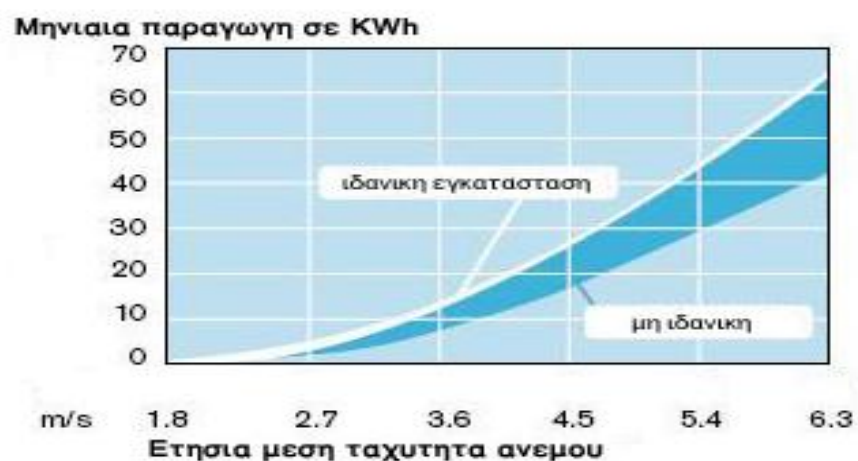
Ανάλογα με την ονομαστική τους ισχύ η ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες :

Μικρές:	$P_N = 10/25 \text{ Kw με } D = 6,4/10 \text{ m}$
Μεσαίες:	$P_N = 50/100/150 \text{ Kw με } D = 14/20/25 \text{ m}$
Μεγάλες	$P_N = 250/500/1000 \text{ Kw με } D = 32/49/64 \text{ m}$
Πολύ μεγάλες	$P_N = 2/3/4 \text{ MW με } D = 90/110/130$

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται το διάγραμμα ισχύος για ένα εύρος ταχυτήτων και η μηνιαία παραγωγή για μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου ανεμογεννήτριας 400Watt. Τα δεδομένα πάρθηκαν από την ιστοσελίδα anemogennitria.gr.



Γράφημα 6.11.1: Παραγόμενη ισχύς συναρτήσει ταχύτητας ανέμου



Γράφημα 6.11.2: Μηνιαία παραγόμενη ισχύς συναρτήσει της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου

Κάθε Α/Γ έχει τις δικές της καμπύλες ισχύος. Τα παραπάνω διαγράμματα αφορούν Α/Γ 400Watt. Όπως φαίνεται και από το γράφημα, η ονομαστική ισχύς επιτυγχάνεται

για 12,5 m/s ταχύτητα ανέμου. Κατά τη διάρκεια του χρόνου οι άνεμοι πνέουν συνήθως από 3-8 m/s και 12,5 m/s σπανιότερα. Άρα η τόπος εγκατάστασης των ανεμογεννητριών πρέπει να επιλέγεται με ιδιαίτερη προσοχή. Για τις συχνότερες τιμές ανέμου η Α/Γ παράγει μόλις το πολύ 100 Watt.

Στο δεύτερο γράφημα φαίνεται η μηνιαία παραγωγή σε Kwh αλλά για να υπολογιστεί θα πρέπει να γνωρίζουμε τη μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου. Για παράδειγμα για μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 4,5 m/s η Α/Γ θα παράγει από 18-25 περίπου Kwh μηνιαίως και αυτό σαφώς εξαρτάται από το πόσο καλά έχει μελετηθεί η θέση εγκατάστασή της.

7 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

Η μεθοδολογία σχεδίασης των πτερυγίων έχει περάσει διάφορα στάδια εξέλιξης. Η σχεδίαση των πτερυγίων μέχρι το 1870 περίπου ήταν ημιεμπειρική, οπότε και εμφανίστηκε η πρώτη συστηματική θεωρία αεροδυναμικής σχεδίασης από τους Rankine, Froude και Betz.

Η θεωρία αυτή, γνωστή και ως θεωρία του δίσκου ενέργειας, χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα, είτε στη σχεδίαση, είτε στην πρόβλεψη της αεροδυναμικής απόδοσης των ελίκων. Σήμερα με την χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, είναι δυνατόν να εφαρμοστούν πιο ακριβείς θεωρίες για την σχεδίαση των πτερυγίων, όπως η θεωρία των δινοπλεγμάτων, της επιφάνειας άνωσης, προβλέπεται δε στο σύντομο μέλλον ότι θα είναι δυνατή η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier – Stokes πάνω στις καμπύλες επιφάνειες των πτερυγίων, οπότε οι επιδράσεις συμπιεστότητας και συνεκτικότητας θα λαμβάνονται υπόψη αυστηρά και όχι μέσω ημιεμπειρικών διορθώσεων όπως γίνεται σήμερα.

7.1 ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

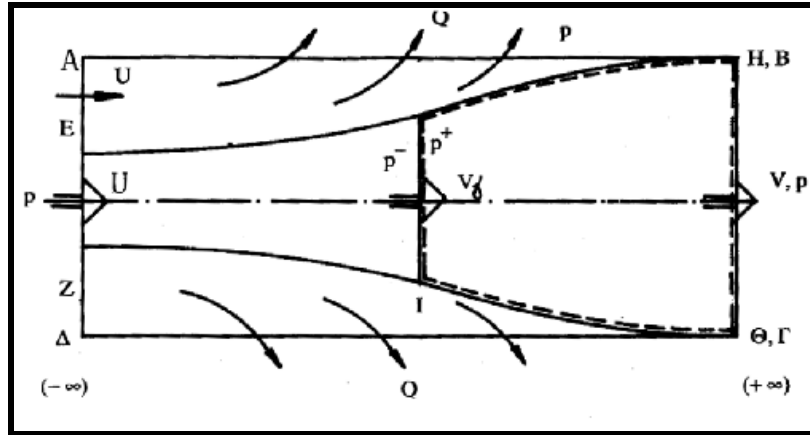
Βάση της θεωρίας του δίσκου ενέργειας ο δρομέας της Α/Γ θεωρείται ιδανικός, δηλαδή χωρίς απώλειες σύμφωνα με ορισμένες παραδοχές οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω. Ο δρομέας θεωρείται ως ένας δίσκος διαμέσου του οποίου εισέρχεται ο αέρας και υφίσταται πώση της ενέργειας του. Γι' αυτό το λόγω ονομάζεται και δίσκος ενέργειας. Η πώση της ενέργειας του ανέμου οφείλεται στη μεταβολή της στατικής του πίεσης.

Αν υπήρχε η δυνατότητα μια αιολική μηχανή να αποσπάσει το 100% της ενέργειας του αέρα τότε ο αέρας θα εξέρχονταν από το δρομέα με μηδενική ενέργεια, πράγμα που δεν είναι δυνατόν. Ο Betz υπολόγισε το μέγιστο ποσοστό της ενέργειας την οποία μπορεί μια Α/Γ να αποδεσμεύσει από τον άνεμο. Για τους υπολογισμούς θεώρησε ότι ο δρομέας είναι ιδανικός, δηλαδή μπορεί να φέρει απεριόριστα πτερύγια χωρίς να υπάρχουν μηχανικές απώλειες και αντιστάσεις του αέρα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις προϋποθέσεις αυτές είναι:

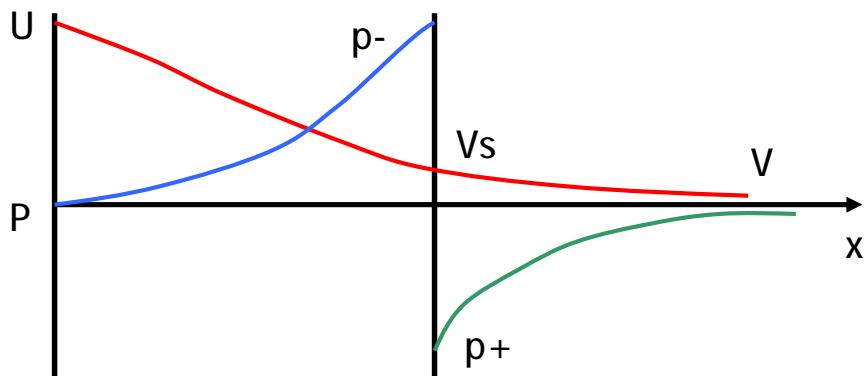
1. Οι συνθήκες για όλη την περιοχή σάρωσης είναι ομοιόμορφες
2. Η ταχύτητα του ανέμου είναι αξονική όχι μόνο πριν αλλά και μετά το δρομέα, δηλαδή χωρίς στροβιλότητα.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ο ροϊκός σωλήνας Α/Γ που ορίζεται από τη διάμετρο του δρομέα και οι καταστάσεις του αέρα πριν και μετά από αυτό. Ο αέρας πολύ μακριά ανάντι από το δίσκο έχει στατική πίεση p και πλησιάζει το δίσκο με τη ταχύτητα U . Ο δίσκος (δρομέας) αποδεσμεύει ενέργεια από τον αέρα και συνεπώς

πολύ μακριά κατάντι από τον δίσκο όπου η πίεση του αέρα θα έχει αποκατασταθεί στην ατμοσφαιρική πίεση p , η ταχύτητα του ανέμου V θα είναι μικρότερη από την ταχύτητα πολύ πριν το δίσκο U , δηλαδή ισχύει $V < U$. Για να ισχύει η αρχή διατήρησης της μάζας πρέπει η διατομή και διάμετρος του ροϊκού σωλήνα να μεγαλώνει μετά του δρομέα όπως διαγραμματικά παριστάνεται στο σχήμα.



Σχήμα 7.1.1: Κατάσταση του αέρα στο ροϊκό σωλήνα δρομέα A/Γ πριν και μετά από αυτόν



Γράφημα 7.1.1: Διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας και της στατικής πίεσης του αέρα πριν και μετά το δρομέα.

Η ενέργεια του ρευστού μετά το δρομέα είναι μικρότερη από αυτή πριν το δρομέα αλλά η αξονική ταχύτητα του παραμένει σταθερή για τις περιοχές λίγο πριν και μετά αλλά και πάνω στο δρομέα λόγω διατήρησης της μάζας. Συνεπώς η στατική πίεση είναι μικρότερη μετά το δίσκο. Άρα ο δίσκος αποτελεί μία επιφάνεια ασυνέχειας πίεσης, αλλά συνέχειας της αξονικής ταχύτητας.

7.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΝΟΜΩΝ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ

7.2.1 Αρχή διατήρησης μάζας

Η μάζα που ρέει μέσα στο ροϊκό σωλήνα διατηρείται σταθερή ίση με

$$\dot{m} = \rho \cdot A_d \cdot V_d = \rho \cdot p \cdot R^2 \cdot V_s \quad \text{όπου } A_d = p \cdot R^2 \quad (7.2.1.1)$$

όπου: ρ $\hat{=}$ η πυκνότητα του ρευστού
 A_d $\hat{=}$ η διατομή του ροϊκού σωλήνα πάνω στο δίσκο ακτίνας
 R $\hat{=}$ η ακτίνα του δίσκου
 V_s $\hat{=}$ η ταχύτητα του ρευστού διαμέσου του δίσκου.

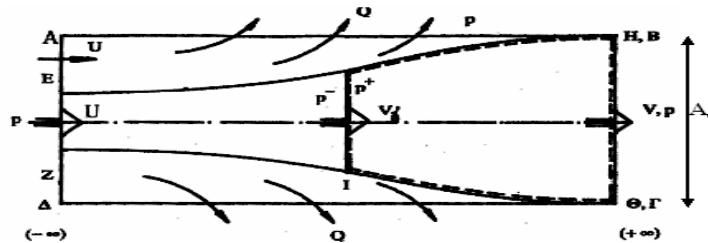
Ισχύει για **ασυμπίεστο ρευστό** δηλ. $\rho_1 = \rho_2$ και συνεπώς:

$$A_1 \cdot u_1 = A_2 \cdot u_2 \quad (7.2.1.2)$$

δηλαδή η παροχή του ρευστού μεταξύ δύο σημείων παραμένει σταθερή.

7.2.2 Αρχή διατήρησης της ορμής

Το θεώρημα διατήρησης της ορμής θα εφαρμοστεί στο κυλινδρικό όγκο ισολογισμού ΑΒΓΔ, ο οποίος περιβάλλει το ροϊκό σωλήνα ΕΖΗΘ. Η παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου (ΑΒ-ΓΔ) τοποθετείται πολύ μακριά από το δίσκο έτσι ώστε εκεί η στατική πίεση του ρευστού να είναι ίση με τη πίεση περιβάλλοντος.



Σχήμα 7.2.2.1: Επιφάνεια ελέγχου.

Η παροχή Q δια μέσω της παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού όγκου ισολογισμού ισούται με:

$$Q = r \cdot A_\infty \cdot U - r \cdot A_d \cdot V_s \quad (7.2.2.1)$$

Το ρευστό εισέρχεται στον όγκο ισολογισμού με αξονική ταχύτητα U και εφαρμόζοντας το θεώρημα διατήρησης της ορμής προκύπτει ότι η ώση ισούται με την εν θέση μεταβολή της ροής της ορμής, ήτοι:

$$T = r \cdot U^2 \cdot A_\infty - r \cdot A_d \cdot V_s \cdot V - Q \cdot V \quad (7.2.2.2)$$

7.2.3 Αρχή διατήρησης της ενέργειας

Το ρεύμα αέρα στερείται συστροφής ανάντι από το δρομέα και συνεπώς υπάρχει διατήρηση ενέργειας του ρευστού στους δύο ανεξάρτητους υποχώρους πριν και μετά το δίσκο αλλά όχι μεταξύ των δύο υποχώρων, γιατί ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από το ρευστό. Άρα ισχύει ότι:

$$V_s = \frac{1}{2} * (V + U) \quad (7.2.3.1)$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι η ταχύτητα του ανέμου πάνω στο δίσκο είναι το ημίθροισμα των ταχυτήτων του ανέμου πολύ πριν και πολύ μετά το δίσκο. Έχει επικρατήσει η εισαγωγή του **συντελεστή αξονικής επαγωγής** ο οποίος εκφράζει την ποσοστιαία επιβράδυνση του αέρα πάνω στο δίσκο και ορίζεται ως:

$$a = \frac{U - V_s}{U} \quad (7.2.3.2)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι:

$$V_s = U * (1 - a) \quad (7.2.3.3)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 7.2.3.1 & 7.2.3.3 προκύπτει ότι:

$$V = U * (1 - 2a) \quad (7.2.3.4)$$

Η τελευταία σχέση δηλώνει ότι η ποσοστιαία επιβράδυνση του ρευστού μακριά κατάντι του δίσκου είναι διπλάσια της ποσοστιαίας επιβράδυνσης του ρευστού στο επίπεδο του δίσκου.

Ο άνεμος του ροϊκού σωλήνα που πλησιάζει το δίσκο έχει ισχύ:

$$N_- = \left[\frac{p}{r} + \frac{U^2}{2} \right] * \dot{m} \quad (7.2.3.5)$$

Ενώ κατάντι του δίσκου έχει μικρότερη ισχύ:

$$N_+ = \left[\frac{p}{r} + \frac{V^2}{2} \right] * \dot{m} \quad (7.2.3.6)$$

Η απώλεια ισχύος από το ρεύμα του ροϊκού σωλήνα είναι:

$$P = \dot{m} \left[\frac{U^2 + V^2}{2} \right] \quad (7.2.3.7)$$

και ισούται με την ισχύ που δέσμευσε ο δίσκος. Εκτέλεση πράξεων στη τελευταία σχέση δίνει:

$$P = T * V_s \quad (7.2.3.8)$$

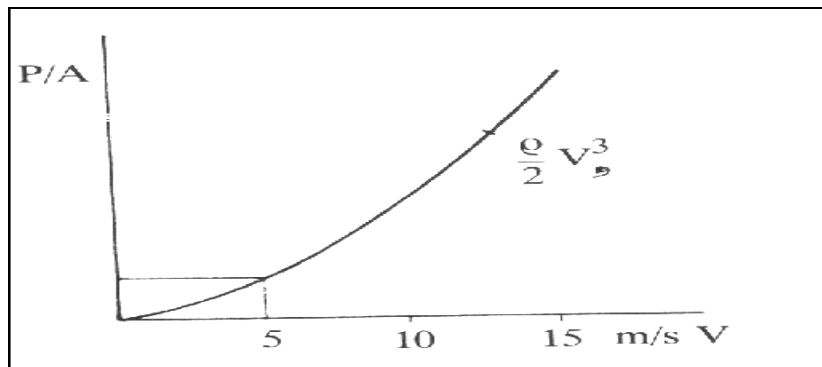
σχέση που δηλώνει ότι η ισχύς που δεσμεύεται από τον ανεμοκινητήρα ισούται με την ώση που το ρευστό εξασκεί πάνω στο δίσκο επί τη ταχύτητα ολίσθησης του ανέμου πάνω στο δίσκο.

7.3 ΟΡΙΟ ΤΟΥ BETZ

Η σχέση που δηλώνει το ποσοστό της ενέργειας που έχει ο άνεμος που πλησιάζει το δίσκο (λίγο πριν το δίσκο) και που μετατρέπεται σε ισχύ πάνω στο δρομέα εκφράζεται ως:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} * \rho * U^3 * A_d} \quad (7.3.1)$$

και ονομάζεται **συντελεστής ισχύος**. Ο παρανομαστής του κλάσματος είναι η ισχύς που έχει ο άνεμος ταχύτητας V_δ που περνάει από επιφάνεια A_δ . Η ισχύς του ανέμου ανά τετραγωνικό μέτρο μετωπικής επιφάνειας είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου. Το Σχ. 7.3.1 παρουσιάζει αυτή τη τυπική μεταβολή:



Σχήμα 7.3.1: Μεταβολή της ισχύς του ανέμου ανά τετραγωνικό μέτρο για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Ο **συντελεστής αντίστασης** που παρουσιάζει ο δρομέας στη ροή εκφράζεται ως:

$$C_T = \frac{P}{\frac{1}{2} * \rho * U^2 * A_d} \quad (7.3.2)$$

Η σχέση για το συντελεστή ισχύος δηλώνει ότι αυτή έχει ακρότατο για τιμή συντελεστή αξονικής επαγωγής:

$$a = \frac{1}{3} \left(\frac{dC_p}{da} = 0 \right) \quad (7.3.3)$$

Η παραγωγή του συντελεστή ισχύος C_p ως προς το συντελεστή αξονικής επαγωγής a μας δίνει τη μέγιστη τιμή που καλείται **όριο του Betz** και ισούται με:

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 59\% \quad (7.3.4)$$

Προκύπτει λοιπόν ότι ο βέλτιστος δρομέας, και κάτω από ιδανικές συνθήκες λειτουργίας, μπορεί να δεσμεύσει μόλις το 59% της ισχύος του ανέμου. Κατά κάποιον τρόπο το όριο αυτό είναι και ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του συστήματος για ιδανική έλικα, αναλόγως με το βαθμό απόδοσης Carnot των θερμοδυναμικών κύκλων. Στην περίπτωση αυτή η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται κατά 2/3 πάνω στο δίσκο και κατά 1/3 της αρχικής της τιμής πολύ μακριά κατάντι από το δίσκο.

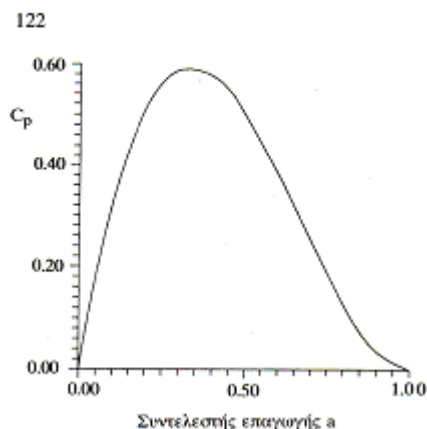
Ο συντελεστής αντίστασης C_T του δρομέα στη βέλτιστη λειτουργία παίρνει τη τιμή 8/9, τιμή μικρότερη της μέγιστης που είναι:

$$C_{T_{\max}} = 1$$

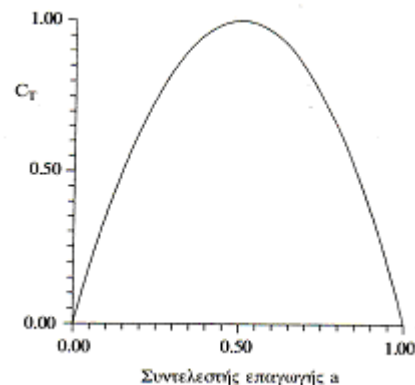
και που επιτυγχάνεται για συντελεστή αξονικής επαγωγής $a=0,5$

Στην περίπτωση αυτή ο άνεμος στο επίπεδο του δρομέα έχει ταχύτητα $0,5U$ και μηδενική ταχύτητα πολύ μακριά κατάντι από το δίσκο.

Τα σχήματα 7.3.2 & 7.3.3 παρουσιάζουν τη μεταβολή των συντελεστών ισχύος και αντίστασης του δρομέα για διάφορες τιμές του συντελεστή αξονικής επαγωγής.



Σχήμα 7.3.2: Καμπύλη C_p απόδοσης Δρομέα $C_p = 4a(1-a)^2$

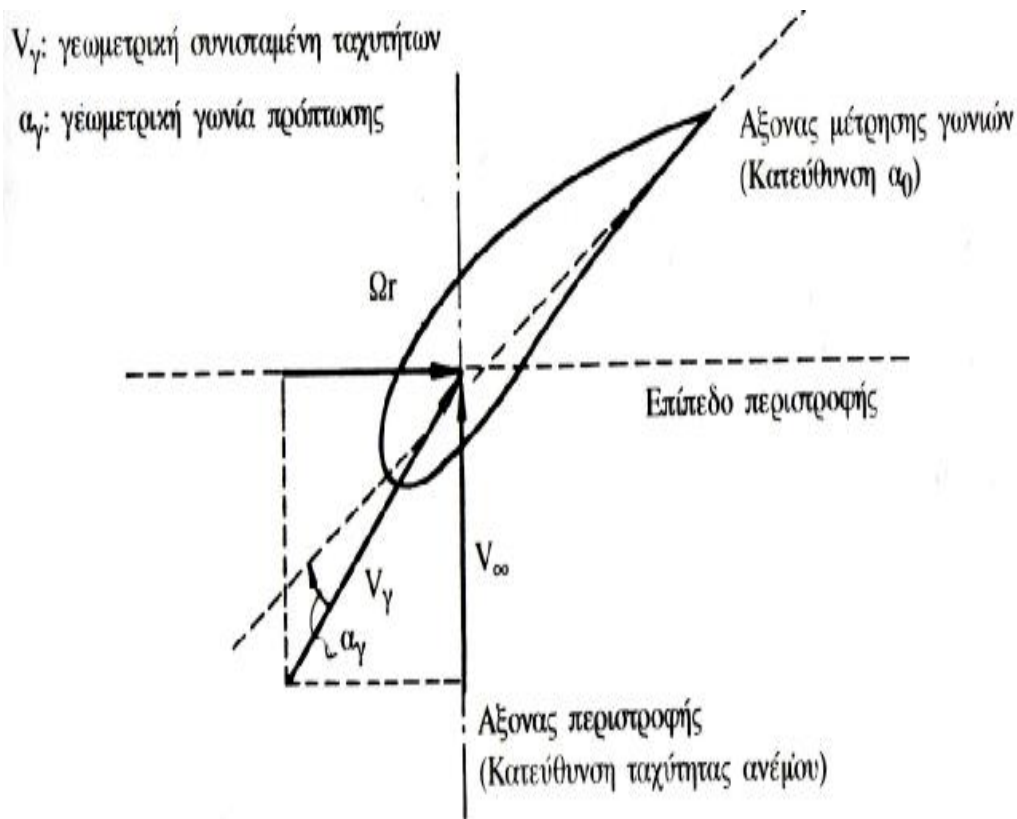


Σχήμα 7.3.3: Συντελεστής ώσης A/K

7.4 ΘΕΩΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ

Η θεωρία των στοιχείων πτερύγωσης χωρίζει το πτερύγιο σε στοιχειώδεις λωρίδες πλάτους Δr και συνδέει τις δυνάμεις και ροπές που το ρευστό εξασκεί κατά τη διέλευσή του δια μέσω του δακτυλιοειδούς τμήματος του δίσκου πάχους Δr πάνω στο

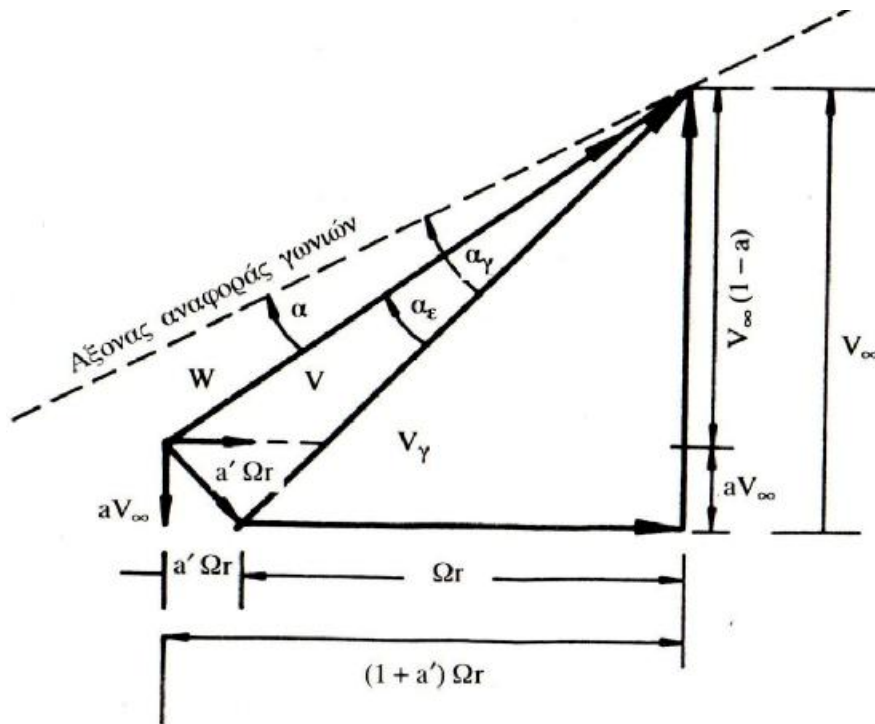
δίσκο με τις αεροδυναμικές που αναπτύσσονται πάνω στις λωρίδες πτερυγίου του δρομέα. Κάθε ροϊκός σωλήνας τέμνει τις πτέρυγες του δρομέα που είναι Β το πλήθος και τα οποία πάνω στη κυλινδρική επιφάνεια του ροϊκού σωλήνα αφήνουν ίχνος που έχει τη μορφή της αεροτομής. Το Σχ. 7.4.1 αποτελεί το ανάπτυγμα της κυλινδρικής επιφάνειας του ροϊκού σωλήνα με το ίχνος της τομής της με ένα πτερύγιο του δρομέα.



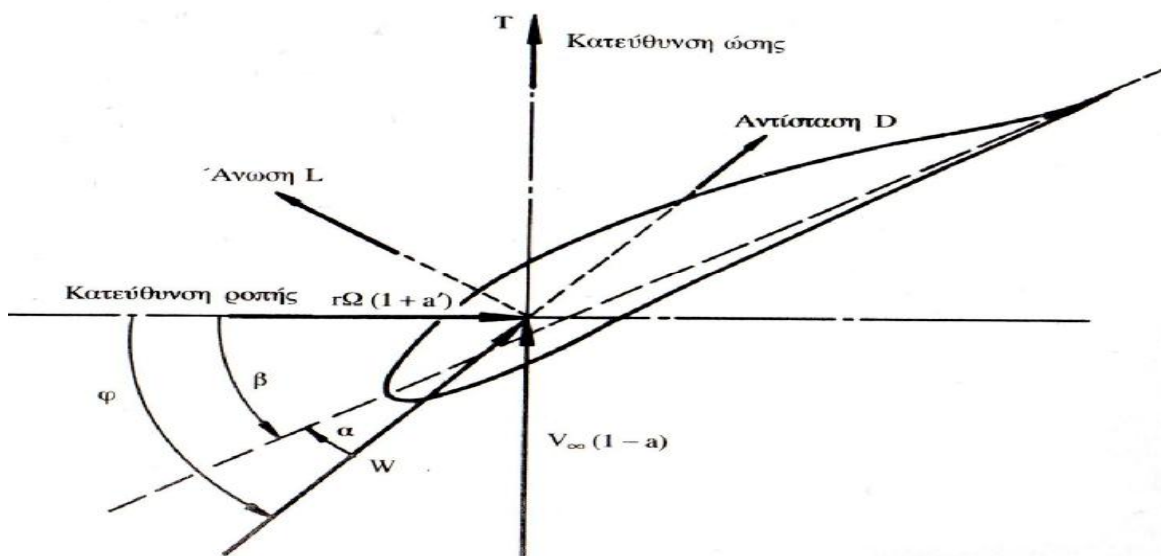
Σχήμα 7.4.1: Τρίγωνο ταχυτήτων

Για παρατηρητή που κινείται με το πτερύγιο, η αεροτομή βρίσκεται σε ένα πεδίο ταχυτήτων που έχει αξονική συνιστώσα $U(1-a)$ και περιφερειακή συνιστώσα $\Omega*r(1+a')$ (το θετικό πρόσημο δηλώνει τι η συνιστώσα έχει φορά αντίθετη προς τη κατεύθυνση περιστροφής του δρομέα). Οπότε η συνισταμένη ταχύτητα W είναι:

$$W = \sqrt{U^2 * (1-a)^2 + \Omega^2 * r^2 * (1+a')^2} \quad (7.4.1)$$



Σχήμα. 7.4.2: Επαγόμενη ταχύτητα - Πραγματικό τρίγωνο ταχυτήτων



Σχήμα 7.4.3: Δυνάμεις που αναπτύσσονται στην αεροτομή του Α/Κ.

8 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

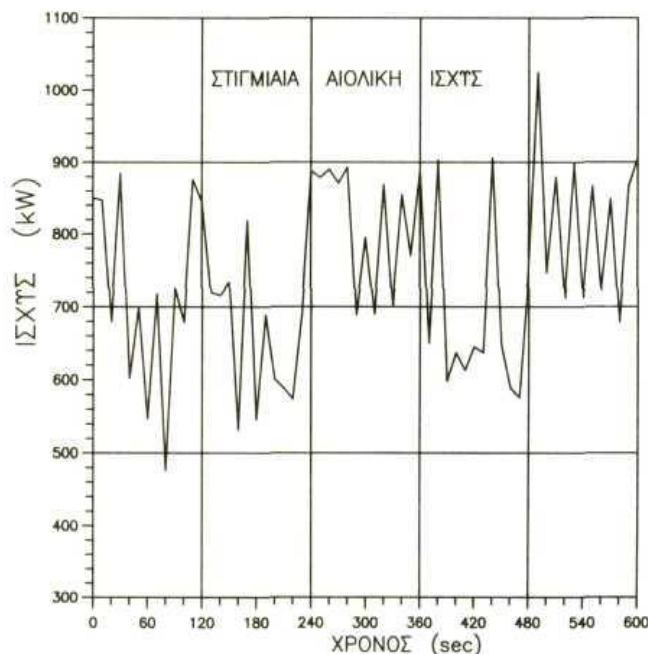
8.1 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ Α/Γ ΓΙΑ ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ Δt

Σκοπός των ανεμογεννητριών είναι να εκμεταλλευτούν την κινητική ενέργεια του ανέμου μέσω του δρομέα και στη συνέχεια να τη μετατρέψουν σε ηλεκτρική, μέσω τη γεννήτριας. Για να γίνει ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας για μια ορισμένη χρονική στιγμή t είναι απαραίτητη η γνώση ορισμένων στοιχείων όπως η ένταση του ανέμου και η καμπύλη ισχύος της προς μελέτη αιολικής μηχανής.

Η ενέργεια που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια για χρονικό διάστημα Δt εκφράζεται ως:

$$E(\Delta t) = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} N(t) \cdot dt \quad (8.1.1)$$

Στο γράφημα 8.1 φαίνεται η παραγόμενη ισχύς σε χρονικό διάστημα 10min μιας Α/Γ με ισχύ 1MW.



Γράφημα 8.1: Στιγμαία παραγόμενη ισχύς Α/Γ ισχύς 1MW

Για οικονομοτεχνικούς υπολογισμούς συνήθως γίνεται αντιστοίχιση της προς μελέτη Α/Γ με μια αντίστοιχη μηχανή συνεχούς ισχύος η οποία για ένα χρονικό διάστημα Δt θα παρήγαγε την ίδια ενέργεια. Έτσι ορίζουμε μια παράμετρο που αντιπροσωπεύει

τη λειτουργία της αιολικής μηχανής, η οποία καλείται μέσος συντελεστής ισχύος $w(\Delta t)$ και υπολογίζεται από:

$$w(\Delta t) = \frac{E(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t} \quad (8.1.2)$$

8.2 ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η μέση ετήσια παραγόμενη ισχύς (Μ.Ε.Π.Ι.) από μια Α/Γ με ονομαστική ισχύ N_0 υπολογίζεται με τη χρήση της εξίσωσης 8.2.1

$$E = 8760 \cdot \Omega \cdot N_0 \quad (8.2.1)$$

Όπου: Ω : μέσος συντελεστής ισχύος Α/Γ

$$\Omega = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{N(V)}{N_0} \cdot d(t) \cdot dt \quad (8.2.2)$$

όπου: T : Η χρονική περίοδος ενός έτους σε ώρες (8760h) ή δευτερόλεπτα (31,536,000 sec) αντίστοιχα.

Ένας πρακτικό τρόπος για να υπολογιστεί ο μέσος συντελεστής ισχύος γίνεται με την εισαγωγή της μέσης ετήσιας διαθεσιμότητας Δ και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας που εμφανίζονται οι άνεμοι $f(V)$ για την προς μελέτη περιοχή. Με την εισαγωγή των στοιχείων αυτών η Σχ. 8.2.1 γράφεται ως:

$$E = 8760 \cdot \Delta \cdot w \cdot N_0 \quad (8.2.3)$$

Όπου:

$$w = \int_0^{\infty} \frac{N(V)}{N_0} \cdot f(V) \cdot dV \quad (8.2.4)$$

Η Α/Γ όμως για ταχύτητες μικρότερες της ταχύτητας εκκίνησης και μεγαλύτερες της ταχύτητας διακοπής δεν παράγει ενέργεια και η Σχ. 8.2.4 γράφεται ως:

$$w = \int_{V_C}^{V_F} \frac{N(V)}{N_0} \cdot f(V) \cdot dV \quad (8.2.5)$$

$$\int_0^{\infty} f(V) \cdot dV = 1.0 \quad (8.2.6)$$

Με βάση τις Σχ. 8.2.3 & 8.2.5 εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο μέσος συντελεστής ισχύος είναι συνάρτηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της εκάστοτε Α.Γ. αλλά

και του αιολικού δυναμικού της εκάστοτε περιοχής. Επίσης από τη Σχ. 8.2.5 μπορεί να εκτιμηθεί η συνεισφορά του αιολικού δυναμικού της εκάστοτε περιοχής στη Μ.Ε.Π.Ι. μιας Α/Γ. Μπορεί δηλαδή να γραφτεί ότι:

$$w(V_0) = \int_{V_C}^{V_F} \frac{N(V')}{N_0} \cdot f(V') \cdot dV' \quad (8.2.7)$$

8.3 ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ο υπολογισμός τους μέσου συντελεστή ισχύος όπως προαναφέρθηκε υπολογίζεται από τη Σχ. 8.2.5. Στη περίπτωση που θέλουμε να εκτιμήσουμε την ενεργειακή συνεισφορά του μέσου συντελεστή ισχύος μπορεί να γίνει χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$w_1 = \int_{V_C}^{V_R} \frac{N(V)}{N_0} \cdot f(V) \cdot dV \quad (8.3.1)$$

και για λειτουργία στα ονομαστικά χαρακτηριστικά της Α/Γ ισχύει:

$$w_2 = \int_{V_R}^{V_F} \frac{N(V)}{N_0} \cdot f(V) \cdot dV \quad (8.3.2)$$

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 \quad (8.3.3)$$

Για τη περίπτωση όπου έχουμε τυπικό διάγραμμα N-V τότε η Σχ. 8.2.2 γράφεται ως:

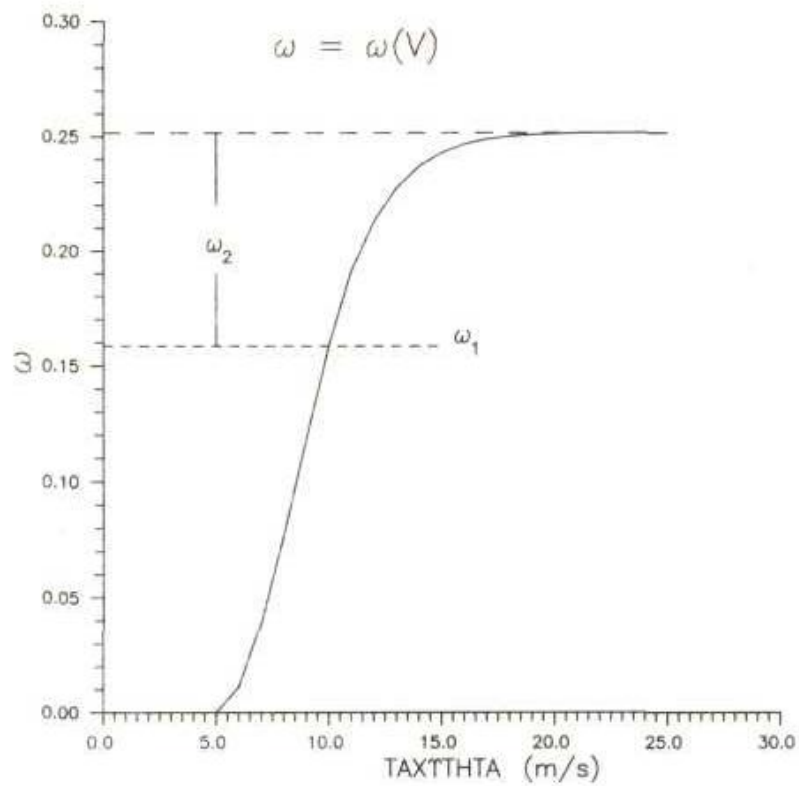
$$w_2 = \int_{V_R}^{V_F} f(V) \cdot dV \quad (8.3.4)$$

και όταν το αιολικό δυναμικό της περιοχής περιγράφεται από τη κατανομή Weibull τότε η Σχ. 8.2.4 μαζί με τη συνάρτηση ολικής πιθανότητας δίνει τη Σχ. 8.3.5:

$$w_2 = \exp \left[- \left(\frac{V_R}{C} \right)^k \right] - \exp \left[- \left(\frac{V_F}{C} \right)^k \right] \quad (8.3.5)$$

Από τη Σχ. 8.3.5 μπορεί να εκτιμηθεί το ω_2 με τη γνώση των V_R , V_F , k και C . Η ταχύτητα διακοπής παίζει πολύ μικρό ρόλο στον υπολογισμό του ω_2 καθώς η πιθανότητα εμφάνισης τέτοιων ταχυτήτων είναι μικρή.

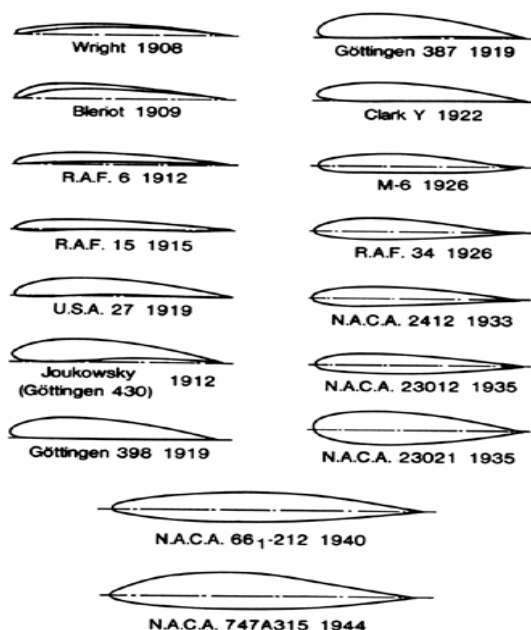
Στο Γρ. 8.3.1 φαίνεται η διανομή του $\omega = \omega(V)$ για Α/Γ με τυπική χαρακτηριστική λειτουργίας και χαρακτηριστική ταχύτητα του ανέμου και παράμετρος μορφής $C=6,0$ και $k=1,7$ αντίστοιχα.



Γράφημα 8.3.1: Μεταβολή $\omega = \omega(V)$ για μια Α/Γ

9 ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ

Η ανάπτυξη και έρευνα στα τμήματα αεροτομών ξεκίνησε στα μέσα του 1800. Αεροτομή είναι το σχήμα ενός πτερυγίου σε κάθετη τομή και η εφαρμογή τους είναι ευρέως διαδεδομένη σε πολλούς κλάδους όπως αεροπλάνα, ανεμογεννήτριες, αντλίες κ.ά. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ιστορική εξέλιξη των αεροτομών από το 1908-1944.



Σχήμα.. 9.1: Ιστορική εξέλιξη αεροτομών. Πηγή : Centennial Flight Commission

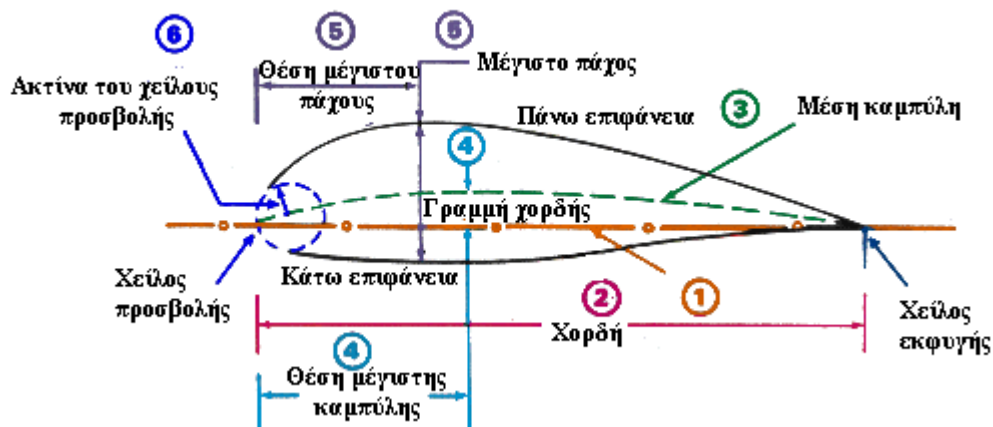
Οι αεροτομές χωρίζονται σε μεγάλες κατηγορίες, στις συμμετρικές και στις ασύμμετρες. Στις συμμετρικές, η πάνω και κάτω επιφάνεια είναι ακριβώς οι ίδιες. Η εφαρμογή τους είναι ευρέως διαδεδομένη καθώς το κέντρο πίεσης παραμένει σταθερό για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης εξασφαλίζοντας τη μέγιστη αναλογία άνωσης – οπισθέλκουσας (δύναμης) για όλες της ταχύτητες ανέμου από τη βάση του πτερυγίου έως την άκρη. Τα πτερύγια των ελικοπτέρων πρέπει να προσαρμόζονται σε διάφορες ταχύτητες ανέμου και γωνία πρόσπτωσης κατά τη διάρκεια κάθε περιστροφής του δρομέα και οι συμμετρικές αεροτομές λειτουργούν πολύ καλά κάτω από αυτές τις συνθήκες. Τέλος το χαμηλό κόστος δίνει ένα προβάδισμα σε σχέση με τις ασύμμετρες αεροτομές.

Οι ασύμμετρες αεροτομές έχουν μεγάλη ποικιλία όσον αφορά στο σχεδιασμό της κάτω και πάνω επιφάνειας. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε στρατιωτικά ελικόπτερα και σε σύγχρονα αεροσκάφη. Έχουν υψηλό λόγο άνωσης–οπισθέλκουσας. Οι ασύμμετρες αεροτομές δε χρησιμοποιούνταν στο παλαιού τύπου ελικόπτερα διότι

το κέντρο πίεσης μεταβάλλονταν πολύ καθώς η γωνία πρόσπτωσης άλλαζε. Όταν μεταβάλλεται το κέντρο πίεσης τότε μια δύναμη περιστροφής αναπτύσσεται πάνω στην πτέρυγα και για το λόγο αυτό τα στοιχεία του δρομέα πρέπει να αντέχουν σε αυτή τη δύναμη. Πρόσφατοι σχεδιασμοί και νέα υλικά ξεπέρασαν το πρόβλημα που υπήρχε με τις ασύμμετρες αεροτομές.

9.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ

Η γεωμετρία μιας αεροτομής μπορεί να χαρακτηριστεί από την κάτω και πάνω επιφάνεια. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό της είναι το μέγιστο πάχος, η θέση του μέγιστου πάχους, η μέγιστη καμπύλη (περνάει από τη μέση της αεροτομής) και η θέση της μέγιστης καμπύλης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι ονομασίες της κάθε περιοχής μιας αεροτομής.



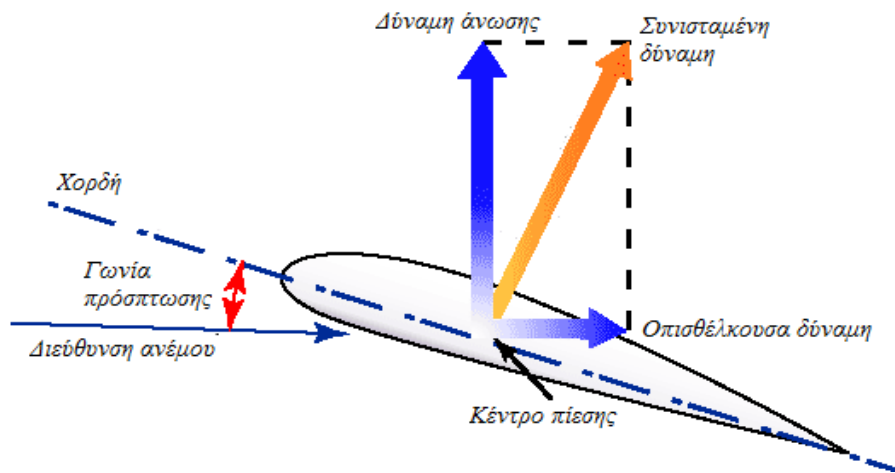
Σχήμα 9.1.1: Γεωμετρία αεροτομής.
Πηγή : Tha helicopter aviation

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα υπάρχουν και κάποιοι άλλοι παράμετροι εκτός από αυτούς που είδη αναφέρθηκαν, οι οποίοι ολοκληρώνουν τη δομή της αεροτομής. Το **χείλος προσβολής** (leading edge) είναι η επιφάνεια η οποία πρώτη έρχεται σε επαφή με τον αέρα (είναι δηλαδή η αρχή της αεροτομής) και το **χείλος εκφυγής** (trailing edge) είναι το πίσω μέρος τη αεροτομής και είναι το σημείο όπου αέρας ξανασυναντιέται με το διαχωρισμό του από τη κάτω και πάνω επιφάνεια.. Η **ακτίνα του χείλους προσβολής** (nose radius) συνδέει τη κάτω και πάνω καμπύλη του χείλους και δίνεται σε εκατοστιαία ποσότητα της χορδής. Η γραμμή χορδής συνδέει τα δύο χείλη και η χορδή είναι το μήκος της.

9.2 ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΕ ΑΕΡΟΤΟΜΗ

Ο σχεδιασμός της αεροτομής γίνεται έτσι ώστε η ροή του αέρα διαμέσου της επιφάνειας της να δημιουργεί άνωση για τα πιο αποδοτικά χαρακτηριστικά της. Εκτός από τη δύναμη άνωσης, η οποία προκαλεί και την άνωση, αναπτύσσεται μια ακόμα δύναμη παράλληλη στην κατεύθυνση του ανέμου που ονομάζεται οπισθέλκουσα δύναμη. Η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του ανέμου και της χορδής της αεροτομής

ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης και είναι υπεύθυνη για τις τιμές των δυνάμεων ανύψωσης και οπισθέλκουσας.



Σχήμα 9.2.1: Δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αεροτομή.
Πηγή: Free online private pilot ground school

9.2.1 Δύναμη άνωσης

Δύναμη άνωσης ονομάζεται η δύναμη που αναπτύσσεται από ένα αντικείμενο ευρισκόμενο σε ροϊκό πεδίο και είναι κάθετη στη διεύθυνση του ρευστού. Οι δυνάμεις άνωσης είναι αυτές οι οποίες κάνουν ένα αεροπλάνο να πετάξει και εξ' αυτού η ονομασία τους. Η δύναμη άνωσης εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης, όσο μικρότερη η γωνία τόσο μικρότερη είναι και η άνωση. Επίσης για μικρές γωνίες πρόσπτωσης δημιουργείται μια περιοχή χαμηλής πίεσης στην κάτω επιφάνεια της αεροτομής και έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του αέρα σε εκείνη την περιοχή. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει απευθείας σχέση μεταξύ της ταχύτητας και της πίεσης του αέρα, όσο αυξάνεται η ταχύτητα τόσο μειώνεται η πίεση. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως το φαινόμενο Bernoulli και συνεπώς η δύναμη άνωσης δρα ως ελκτική δύναμη (αρνητική πίεση) στο αντικείμενο όταν αυτό βρίσκεται κάθετα στη διεύθυνση του ρευστού.

9.2.2 Οπισθέλκουσα δύναμη

Οπισθέλκουσα δύναμη ονομάζεται η δύναμη που αναπτύσσεται από ένα αντικείμενο ευρισκόμενο σε ροϊκό πεδίο και είναι παράλληλη στη διεύθυνση του ρευστού. Όταν η διεύθυνση του ρευστού είναι κάθετη στην αεροτομή τότε η δύναμη αυτή είναι μέγιστη ενώ όταν είναι παράλληλη προς αυτή είναι ελάχιστη. Σε ορισμένες περιπτώσεις μας ενδιαφέρει η οπισθέλκουσα δύναμη και βρίσκει εφαρμογές σε διάφορους σχεδιασμούς, ενώ σε άλλες περιπτώσεις προσπαθούμε να τη μειώσουμε, όπως για παράδειγμα στις πτέρυγες των αεροπλάνων.

9.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ

Τα χαρακτηριστικά της άνωσης και της οπισθέλκουσας, για διάφορες αεροτομές και γωνίες πρόσπτωσης, έχουν προσδιοριστεί και ταξινομηθεί από μετρήσεις (παρακάτω φαίνεται και ένα τυπικό διάγραμμα των συντελεστών αυτών) σε αεροσήραγγες. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους αδιάστατους συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας (C_l και C_d). Η γνώση για τους συντελεστές αυτού είναι ουσιώδης όταν επιλέγεται αεροτομή για το σχεδιασμό της πτέρυγας ανεμογεννήτριας. Μαθηματικά οι συντελεστές αυτοί εκφράζονται ως:

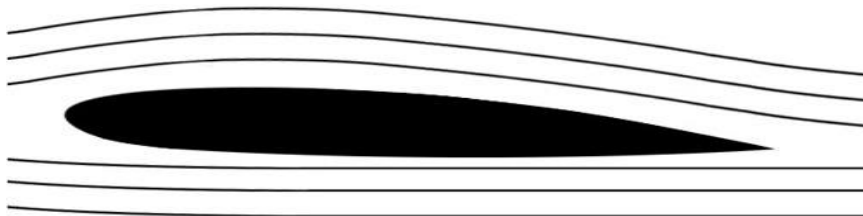
$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} \quad (9.3.1)$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} \quad (9.3.2)$$

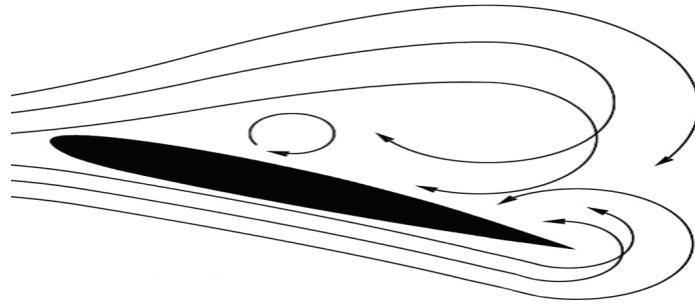
όπου:	L	à	δύναμη άνωσης (N)
	V	à	ταχύτητα ρευστού (m/s)
	S	à	επιφάνεια δρομέα (m ²)
	ρ	à	πυκνότητα ρευστού (kg/m ³)

Σημείωση: Επιφάνεια δρομέα καλείται η επιφάνεια την οποία σαρώνουν τα πτερύγια και ισούται με $S = \rho R^2$ όπου R η ακτίνα της πτέρυγας.

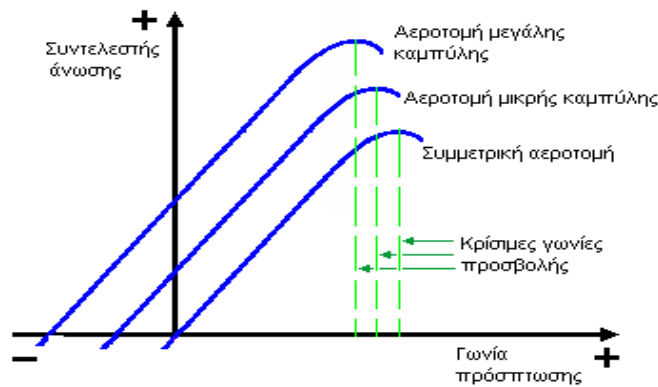
Ένα τελευταίο χαρακτηριστικό που συνδέει την άνωση και την οπισθέλκουσα είναι η κρίσιμη γωνία προσβολής ή πρόσπτωσης. Για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης δημιουργείται ένα φαινόμενο κατά το οποίο το ρευστό αφήνει την περιοχή «αναρρόφησης», με αποτέλεσμα την τραγική μείωση την άνωσης και τη μεγάλη αύξηση της οπισθέλκουσας. Η περίπτωση αυτή λέγεται απώλεια στήριξης (stall) και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη για τα αεροσκάφη.



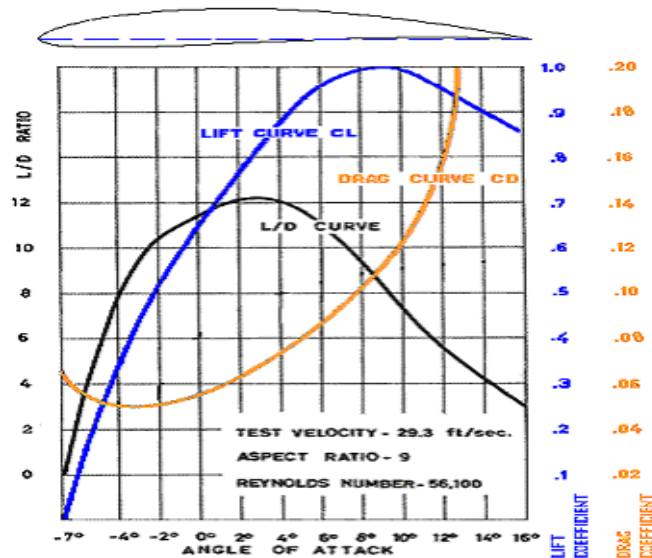
Σχήμα 9.3.1: Κανονική ροή κατά πλάτους της αεροτομής. Πηγή: *The Aviation History Online Museum*



Σχήμα 9.3.2: Φαινόμενο απώλειας στήριξης. Πηγή: *The Aviation History Online Museum*



Γράφημα 9.3.1: Κρίσιμη γωνία πρόσβολή για διαφόρων τύπων αεροτομές. . Πηγή: www.adamone.rchomepage.com



Γράφημα 9.3.2: Συντελεστές άνωσης-οπισθέλκουσας (C_L και C_D) και λόγος άνωσης-οπισθέλκουσας δύναμης (L/D) συναρτήσει γωνίας πρόσπτωσης. Πηγή: www.adamone.rchomepage.com

Στο Γρ. 9.3.2 φαίνεται ότι για ορισμένη τιμή γωνίας πρόσπτωσης ο συντελεστής άνωσης πέφτει απότομα. Από το σημείο αυτό και μετά δημιουργείται το φαινόμενο της απώλειας στήριξης.

9.4 ΓΩΝΙΕΣ ΣΤΙΣ ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ

9.4.1 Γωνία πρόσπτωσης

Για να επιτύχουμε αρκετή άνωση σε μια αεροτομή πρέπει ο αέρας να χτυπάει την αεροτομή σε μια εξασφαλισμένη γωνία. Η γωνία αυτή ονομάζεται **γωνία πρόσπτωσης** και ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται από τη διεύθυνση του ανέμου και της χορδής της αεροτομής. Παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην άνωση και όπως φαίνεται και από το Γρ. 9.3.2 η άνωση αυξάνεται καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης. Ωστόσο όταν η γωνία πρόσπτωσης γίνει εξαιρετικά μεγάλη τότε στην πάνω επιφάνεια της αεροτομής δημιουργούνται στροβιλισμοί και η άνωση μειώνεται απότομα.

9.4.2 Γωνία βήματος

Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης του ανέμου και του άξονα περιστροφής ονομάζεται γωνία βήματος ϕ και υπολογίζεται από τη σχέση 9.4.2.1 Με βάση τη γωνία πρόσπτωσης και τη γωνία βήματος υπολογίζεται η κωνικότητα του πτερυγίου β .

$$\cot j = \frac{3}{2} \frac{r}{R} I_N \quad (9.4.2.1)$$

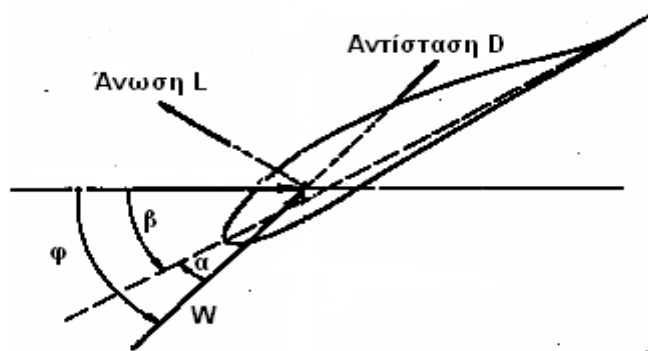
όπου, r	\hat{a}	ακτινική απόσταση
R	\hat{a}	ακτίνα δρομέα
λ_N	\hat{a}	λόγος ταχυτήτων πτερυγίου

Σημείωση: Ο λόγος ταχυτήτων εκφράζεται ως η περιστροφική ταχύτητα του πτερυγίου προς ταχύτητα του αέρα.

9.4.3 Κωνικότητα

Η γωνία μεταξύ της χορδής και του άξονα περιστροφής ονομάζεται «κωνικότητα πτερυγίου» β , και χρησιμοποιείται ως αρχικό σημείο κατά το σχεδιασμό και τη κατασκευή του πτερυγίου. Η κωνικότητα υπολογίζεται ως:

$$b = j - a \quad (9.4.3.1)$$



Σχήμα 9.4.3.1 Γωνίες πρόσπτωσης, κωνικότητας και βήματος σε αεροτομή

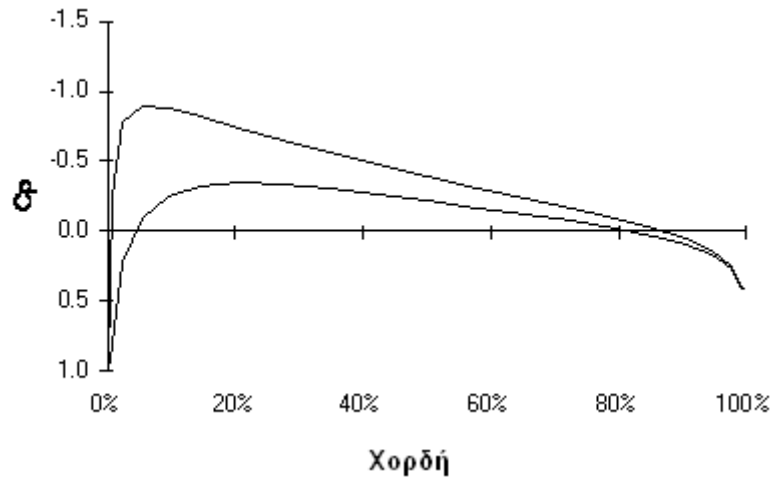
9.5 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΑΕΡΟΤΟΜΗ

Η αεροδυναμική συμπεριφορά μιας αεροτομής μπορεί να μελετηθεί ευκολότερα εάν δούμε πώς κατανέμεται η πίεση στην πάνω και κάτω επιφάνεια της αεροτομής. Η επιφανειακή πίεση εξαρτάται από την ταχύτητα και την πυκνότητα του ρευστού αλλά και από τις αλλαγές ταχύτητας και ενεργειακές απώλειες καθώς το ρευστό περνάει πάνω από την επιφάνεια. Επίσης τοπικές ανομοιομορφίες της επιφάνειας μπορούν να επηρεάσουν τις πιέσεις. Οι πιέσεις μπορεί να είναι σταθερές ή να μεταβάλλονται χρονικά. Η κατανομή της πίεσης εκφράζεται από τον συντελεστή πίεσης c_p . Ο παρανομαστής του κλάσματος εκφράζει τη δυναμική πίεση του ρευστού.

$$c_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2} \quad (9.5.1)$$

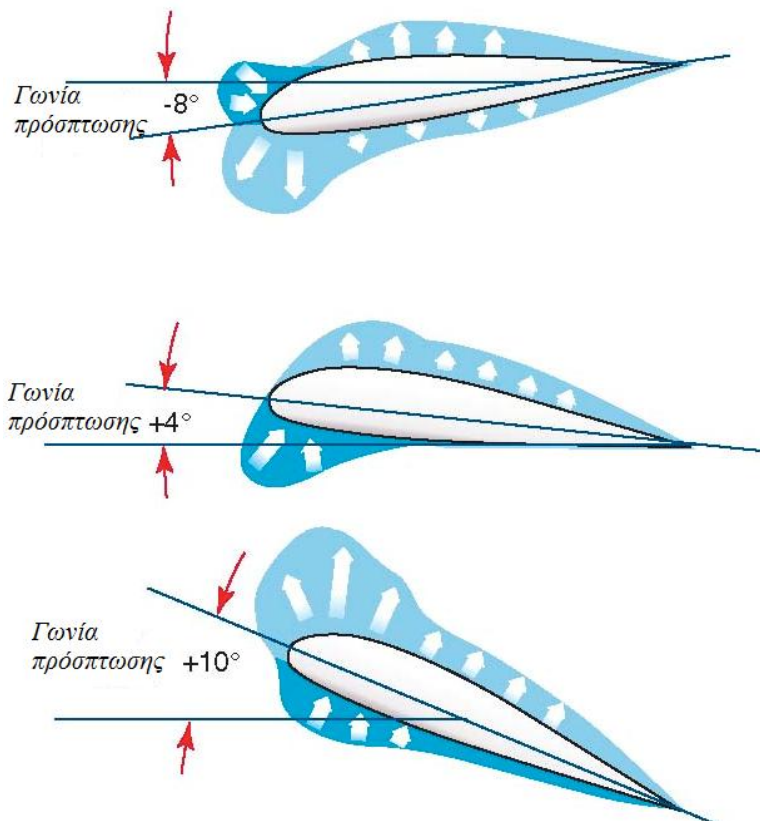
όπου: P	$\hat{=}$	τοπική στατική πίεση
P_∞	$\hat{=}$	στατική πίεση πνέοντος ανέμου
u	$\hat{=}$	ταχύτητα πνέοντος ανέμου
ρ	$\hat{=}$	πυκνότητα πνέοντος ανέμου

Ο συντελεστής πίεσης είναι μια πολύ χρήσιμη παράμετρος με βάση την οποία μπορεί να μελετηθεί η ροή ασυμπίεστων ρευστών, όπως το νερό αλλά και συμπιεστών, όπως ο αέρας. Ο συντελεστής πίεσης συναντιέται σε διαγράμματα συναρτήσεως του λόγου x/c όπου x είναι τεταγμένη της αεροτομής και c είναι η χορδή της. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή πίεσης στη πάνω και κάτω επιφάνεια της συμμετρικής αεροτομής NACA 0015.

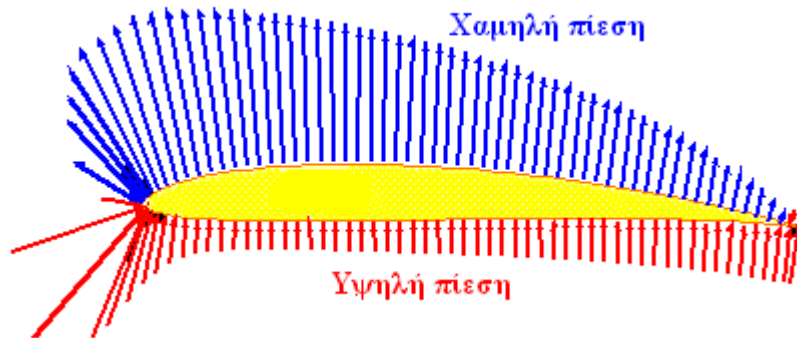


Γράφημα 9.5.1: Κατανομή συντελεστή πίεσης στη NACA 0016 για γωνία πρόσπτωσης 2°
 Πηγή: *One Design Airfoil Analysis*

Επίσης στη κατανομή πίεσης πολύ βασικός παράγοντας είναι η γωνία πρόσπτωσης. Για διάφορες τιμές της γωνίας η κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια της πτέρυγας μεταβάλλεται, βλέπε Σχ. 9.5.1.



Σχήμα 9.5.1: Κατανομή πίεσης για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης.
 Πηγή: *Free online private pilot ground school*



Σχήμα 9.5.2: Κατανομή πίεσης στη πάνω και κάτω επιφάνεια της αεροτομής E64 για γωνία προσβολή 2°. Αποτέλεσμα από Drela's XFOIL code

9.6 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Η ενέργεια που παράγεται από τη κινητική ενέργεια του ανέμου είναι:

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (9.6.1)$$

όπου: V $\hat{=}$ ταχύτητα ρευστού (m/s)
 S $\hat{=}$ επιφάνεια δρομέα (m²)
 ρ $\hat{=}$ πυκνότητα ρευστού (kg/m³)

Ο συντελεστής ισχύος ορίζεται ως η ενέργεια που αποδεδμεύεται από την ανεμογεννήτρια σε σχέση με τη διαθέσιμη ενέργεια του ανέμου:

$$C_p = \frac{P_t}{P} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho R^2 V^3} \quad (9.6.2)$$

Ο θεωρητικώς μέγιστος συντελεστής ισχύος για μια ιδανική μηχανή φτάνει το 0,59 που καλείται όριο του Betz αλλά στη πράξη κυμαίνεται περίπου στο 0,45 λόγω απωλειών.

9.7 ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ NACA

Οι αεροτομές NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) περιγράφονται χρησιμοποιώντας ένα πλήθος από ψηφία τα οποία ακολουθούν μετά το NACA. Τα ψηφία είναι παράμετροι οι οποίοι εισάγονται σε εξισώσεις και βάση των εξισώσεων μπορεί να δημιουργηθεί μια κάθετη τομή του πτερυγίου (αεροτομή) και να υπολογιστούν οι ιδιότητες της.

Τα κριτήρια με τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν οι αεροτομές είναι το γεωμετρικό τους σχήμα ή οι αεροδυναμικές τους ιδιότητες. Οι πιο γνωστές είναι οι αεροτομές NACA με 4 ή 5 ψηφία, των οποίων τα ψηφία αντιπροσωπεύουν τη κεντρική καμπύλη και τη κατανομή του πάχους

9.7.1 4-ψήφια αεροτομή NACA

Η 4-ψήφια αεροτομή μπορεί να ερμηνευτεί ως:

$$\text{NACA} - X X XX$$

Κάθε X αποτελεί και ένα ψηφίο. Το πρώτο ψηφίο συμβολίζεται με m και είναι η μέγιστη τιμή της καμπύλης σε % της χορδής, το δεύτερο με p και αντιπροσωπεύει τη θέση της μέγιστης καμπύλης σε δέκατα της χορδής από το χείλος προσβολής. Τα δύο τελευταία ψηφία είναι το πάχος της αεροτομής t σε % της χορδής.

Σαν παράδειγμα θα θεωρήσουμε την αεροτομή NACA 4412. Έχει μέγιστο πάχος 12% και η μέγιστη τιμή της καμπύλης είναι 4% η οποία βρίσκεται 40% από το χείλος εκφυγής. Τα παραπάνω μεγέθη είναι % της χορδής.

Για τη κατασκευή της αεροτομής ακολουθούνται 4 βήματα.

- 1) Αρχικά δίνουμε συντεταγμένες για το χείλος προσβολής ($x=0$) και για το χείλος εκφυγής ($x=c$) αντίστοιχα. Ο συμβολισμός c προέρχεται από την Αγγλική λέξη chord (χορδή).
- 2) Υπολογίζουμε τη κατανομή του πάχους y_t χρησιμοποιώντας τη παρακάτω εξίσωση:

$$y_t = \frac{t}{0.2} (0.2969\sqrt{x} - 0.126x - 0.35160x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4) \quad (9.7.1.1)$$

- 3) Υπολογίζουμε τη κεντρική καμπύλη y_c της αεροτομής. Για NACA τεσσάρων ψηφίων, η κεντρική καμπύλη ορίζεται από τις εξισώσεις:

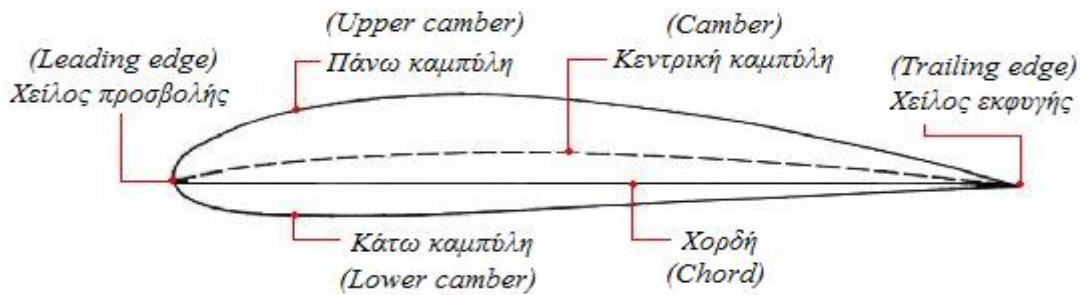
$$y_c = \frac{m}{p^2} (2px - x^2) \quad \text{για } 0 < x \leq p \quad (9.7.1.2)$$

$$y_c = \frac{m}{(1-p)^2} ((1-2p) + 2px - x^2) \quad \text{για } p \leq x < c \quad (9.7.1.3)$$

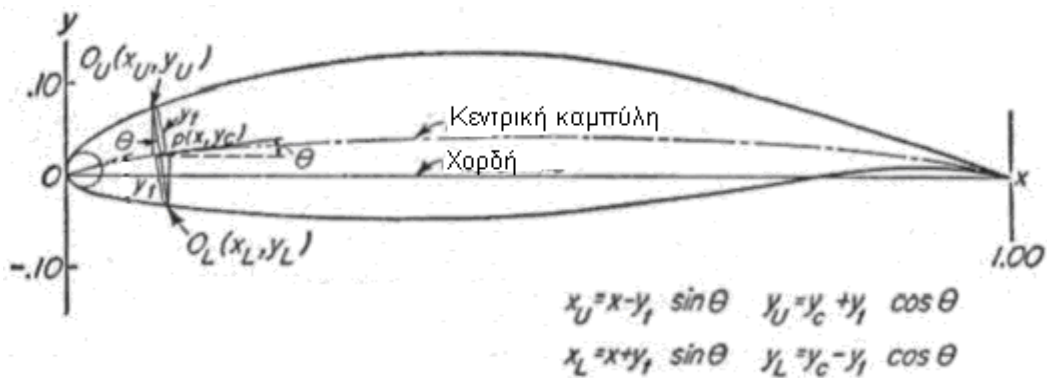
- 4) Τέλος υπολογίζουμε τις συντεταγμένες του πτερυγίου για τη κάτω αλλά και πάνω επιφάνεια. Οι συντεταγμένες υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
 X_u &= x - y_i \sin(q) \\
 Y_u &= y_c + y_i \cos(q) \\
 X_l &= x + y_i \sin(q) \\
 Y_l &= y_c - y_i \cos(q)
 \end{aligned}
 \tag{9.7.1.4 - 9.7.1.7}$$

όπου θ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κλίσης της καμπύλης και της συντεταγμένης (y, x). Οι δείκτες u και l δηλώνουν τη πάνω (upper) και κάτω (lower) επιφάνεια.

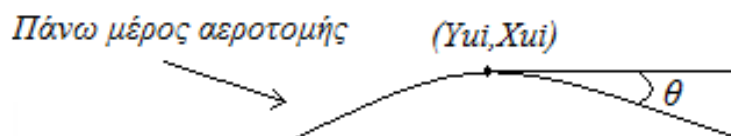


Σχήμα 9.7.1.1: Γεωμετρία αεροτομής



Σχήμα 9.7.1.2: Γεωμετρική κατασκευή αεροτομής.

Πηγή: *German Modifications to NACA Airfoils*



Σχήμα 9.7.1.3: Γωνία θ μεταξύ κλίσης και συντεταγμένης (Y_{ui}, X_{ui})

Μαθηματικά η γωνία θ υπολογίζεται από τη σχέση 9.7.1.8

$$q = \arctan\left(\frac{dy_c}{dx}\right)
 \tag{9.7.1.8}$$

9.7.2 5-ΨΗΦΙΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗ NACA

Η πενταψήφια αεροτομή NACA εκφράζει πιο σύνθετα σχήματα αεροτομών. Το πρώτο ψηφίο όταν πολλαπλασιαστεί με 0,15 δίνει το συντελεστή άνωσης (C_l), ενώ το δεύτερο και τρίτο ψηφίο όταν διαιρεθούν με το 2 δίνουν την απόσταση του σημείου της μέγιστης καμπύλης από το χείλος προσβολής. Το τέταρτο και πέμπτο ψηφίο εκφράζουν το μέγιστο πάχος της χορδής

Σημείωση: Το σημείο τη μέγιστης καμπύλης και το μέγιστο πάχος είναι σε % της χορδής

Για παράδειγμα η NACA12045 θα μπορούσε να δώσει μια αεροτομή με μέγιστο πάχος 45% της χορδής ευρισκόμενη 10% της χορδής από το χείλος προσβολής και με συντελεστή άνωσης 0,15.

Για τον υπολογισμό μιας 5-ψήφιας αεροτομής ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

1. Επιλογή τιμών του x από 0 έως τη μέγιστη τιμή της χορδής c
2. Υπολογισμός της μέσης καμπύλης χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις

Η κεντρική καμπύλη ορίζεται από δύο εξισώσεις:

$$y = \frac{k_1}{6}[x^3 - 3mx^2 + m^2(3-m)x] \quad \text{για } 0 < x < p \quad (9.7.1)$$

$$y = \frac{k_1 m^3}{6}(1-x) \quad \text{για } p < x < 1 \quad (9.7.2)$$

Οι τιμές του m προσδιορίστηκαν έτσι ώστε να δίνουν πέντε θέσεις p της μέγιστης καμπύλης, συγκεκριμένα 0,05 c , 0,10 c , 0,15 c , 0,20 c και 0,25 c . Οι τιμές του k_1 είναι υπολογισμένες έτσι ώστε να δίνουν ένα συντελεστή άνωσης 0,3. Τα αποτελέσματα των τιμών για p , m , k_1 δίνονται στο Πίν. 9.7.1.

Πίνακας 9.7.1: Τιμές m και k_1 για διάφορες τιμές της κεντρικής καμπύλης
Πηγή: *Theory of wing section by Ira H. Abbott and Albert E. Von Doenhoff*

Κεντρική καμπύλη	Θέση μέγιστης καμπύλης (p)	m	k_1
210	0,05	0,0580	361,400
220	0,1	0,1260	51,640
230	0,15	0,2025	15,957
240	0,2	0,2900	6,643
250	0,25	0,3910	3,230

3. Υπολογισμός της διανομής πάχους χρησιμοποιώντας την ίδια εξίσωση με την 4-ψήφια αεροτομή

4. Υπολογισμός των συντεταγμένων της πάνω και κάτω επιφάνειας χρησιμοποιώντας τις ίδιες εξισώσεις με την 4-ψήφια αεροτομή

Εκτός από τις 4-ψήφια και τις 5-ψήφια αεροτομές υπάρχουν και άλλες όπως οι 6-ψήφια, 7-ψήφια και 16-ψήφια. Τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και οι εφαρμογές περιγράφονται παρακάτω:

9.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ NACA

9.8.1 Τετραψήφια αεροτομές NACA

- Πλεονεκτήματα
 1. Έχουν καλά χαρακτηριστικά σταθερότητας
 2. Η τραχύτητα έχει μικρή επίδραση
 3. Για μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας ανέμου έχουμε μικρή μετατόπιση του κέντρου πίεσης.
- Μειονεκτήματα
 1. Ο μέγιστος συντελεστής άνωσης είναι μικρός
 2. Η δύναμη αντίστασης είναι σχετικά μεγάλη
- Εφαρμογές ασύμμετρης αεροτομής
 1. Γενικά στα αεροσκάφη
 2. Σε A/G οριζόντιου άξονα
- Εφαρμογές συμμετρικής αεροτομής
 1. Υπερηχητικά αεροσκάφη
 2. Πτερύγια ελικοπτέρων
 3. Πτερύγια πυραύλων

9.8.2 Πενταψήφια αεροτομές NACA

- Πλεονεκτήματα
 1. Ο μέγιστος συντελεστής ανύψωσης είναι υψηλός
 2. Η τραχύτητα έχει μικρή επίδραση
- Μειονεκτήματα
 1. Δεν έχει καλά χαρακτηριστικά ευστάθειας
 2. Έχει σχετικά υψηλή δύναμη αντίστασης
- Χρησιμότητα

1. Γενικά στα αεροσκάφη
2. Ιδιωτικά αεροσκάφη
3. Βομβαρδιστικά αεροσκάφη

9.8.3 Εξαψήφιες αεροτομές NACA

- Πλεονεκτήματα

1. Ο μέγιστος συντελεστής άνωσης είναι υψηλός
2. Χαμηλές δυνάμεις αντίστασης για χαμηλές διακυμάνσεις των συνθηκών λειτουργίας
3. Αποδίδουν πού για μεγάλες ταχύτητες ανέμου

- Μειονεκτήματα

1. Όταν δε λειτουργεί κάτω από τις βέλτιστες συνθήκες τότε παρουσιάζονται μεγάλες δυνάμεις αντίστασης
2. Δεν έχει καλή συμπεριφορά στο φαινόμενο της αστάθειας
3. Επηρεάζονται πολύ από τη τραχύτητα

- Χρησιμότητα

1. Ιδιωτικά αεροσκάφη
2. Εκπαιδευτικά αεροσκάφη
3. Υπερηχητικά αεροσκάφη

9.8.4 Επταψήφιες αεροτομές NACA

- Πλεονεκτήματα

1. Οι δυνάμεις αντίστασης είναι μικρές για μικρές διακυμάνσεις των συνθηκών λειτουργίας

- Μειονεκτήματα

1. Ο μέγιστος συντελεστής ανύψωσης είναι χαμηλός
2. Υψηλές δυνάμεις αντίστασης για τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας
3. Δεν έχει καλή συμπεριφορά στο φαινόμενο της αστάθειας
4. Επηρεάζεται πολύ από τη τραχύτητα

- Χρησιμότητα

1. Λόγω των πολλών μειονεκτημάτων η χρήση του είναι σπάνια

9.8.5 16-ψήφιος αεροτομές NACA

- Πλεονεκτήματα

1. Οι δυνάμεις αντίστασης που αναπτύσσονται σε υψηλές ταχύτητες ανέμου είναι μικρές.

- Μειονεκτήματα

1. Σχετικά χαμηλή άνωση

- Χρησιμότητα

1. Στα ελικοφόρα αεροσκάφη
2. Στις προπέλες πλοίων

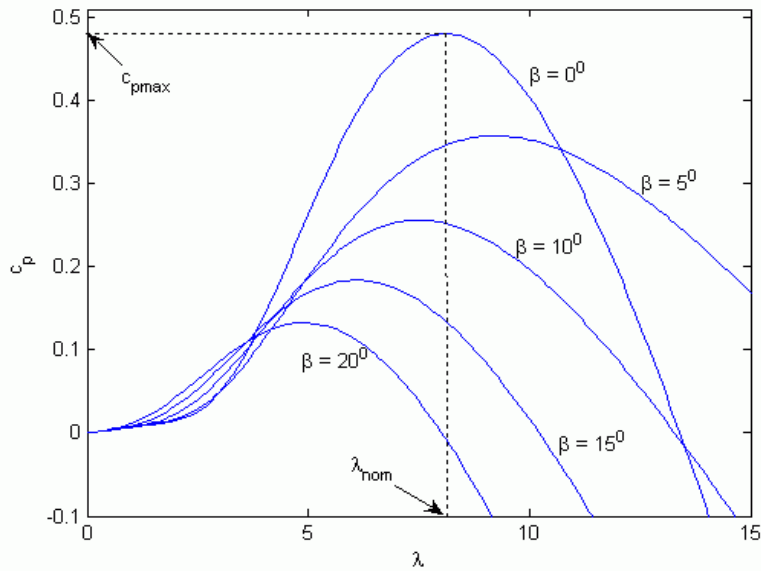
9.9 ΠΛΑΤΟΣ Ή ΧΟΡΔΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

Για την κατασκευή ενός πτερυγίου είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της χορδής κατά μήκος τους πτερυγίου. Στις συμμετρικές αεροτομές η χορδή είναι σταθερή κατά μήκος της πτέρυγας αλλά στις ασύμμετρες μεταβάλλεται. Ξέροντας τον αριθμό των πτερυγίων και την ακτίνα του δρομέα μπορούμε με τη παρακάτω σχέση να υπολογίσουμε το πλάτος που πρέπει να έχει η πτέρυγα σε κάθε ακτινική θέση $\chi=r/R$

$$z \frac{b}{R} = \frac{16p}{9C_l} \frac{1}{\left(\frac{r}{R}\right) I_N^2} \quad (9.9.1)$$

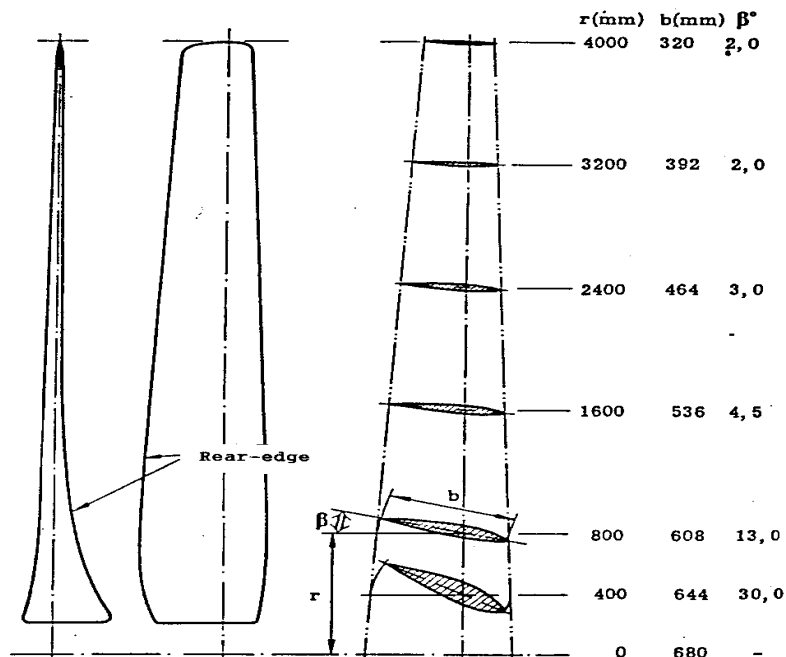
b είναι το ζητούμενο μέγεθος (πλάτος πτερυγίου) και z είναι ο αριθμός των πτερυγίων.

λ_N (nominal tip speed ratio) είναι ο λόγος ταχυτήτων όπου έχουμε το μέγιστο συντελεστή ισχύος C_p . Ένα παράδειγμα φαίνεται στο γράφημα 9.9.1.



Γράφημα 9.9.1: Συντελεστής ισχύος συναρτήσει λόγων ταχυτήτων ακροπτερυγίου για διάφορες τιμές της β (κωνικότητα)
 Πηγή: *The mathworks.com*

Ο συντελεστής άνωσης C_l ποικίλει κατά μήκος του πτερυγίου και εξαρτάται από τη γωνία προσβολής α με βάση την οποία το πτερόγιο κατασκευάζεται.. Ο Sodergard προτείνει συντελεστής άνωσης από $C_l = 0,6$ στην άκρη του πτερυγίου και σταδιακά στο $C_l = 1,3$ στη βάση της πτέρυγας ενώ οι Hemmingen και Tvergard από 0,8 στην άκρη έως 1,1 στη μέση του πτερυγίου.



Σχήμα 9.9.1: Πλάτος και γωνία β πτερυγίου για διάφορες ακτινικές θέσεις και λόγο ταχυτήτων $\lambda=7$.
 Πηγή: *Theory of wing section by Ira Abbot and Albert von-Doenhoff*

10 ΜΕΛΕΤΗ ΠΤΕΡΥΓΑΣ

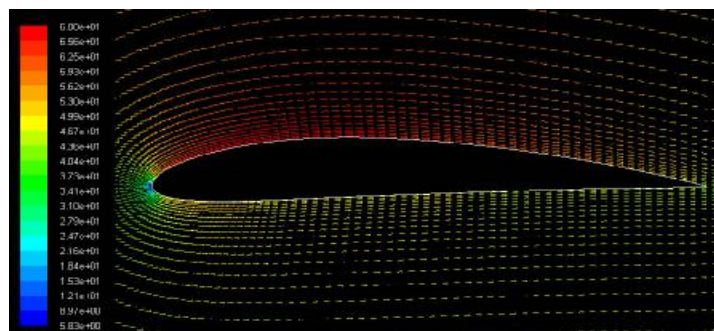
10.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη για τον υπολογισμό της γεωμετρίας ενός πτερυγίου πρέπει να γίνει με πολύ προσοχή ώστε ο δρομέας να λειτουργεί ικανοποιητικά με όσον το δυνατόν λιγότερες απώλειες. Κατά τη μελετητική διαδικασία παίζουν πολύ παράγοντες ρόλο οι οποίοι πρέπει να επιλεγούν με προσοχή.

Τα πτερύγια θα σχεδιαστούν με βάση το προφίλ της NACA 4412. Τα αρχικά NACA σημαίνουν National Advisory Committee for Aeronautics (Εθνική Συμβουλευτική Επιτροπή για Αεροναυπηγούς). Η NACA ιδρύθηκε στις 3 Μαρτίου του 1915 με σκοπό να αναλάβει και να αναπτύξει τις αεροναυπηγικές έρευνες. Ακόμα και στις μέρες μας η NACA παραμένει οικεία στην αυτοκινητοβιομηχανία για το αεροδυναμικό σχεδιασμό των αυτοκινήτων αλλά και στη βιομηχανία αεροσκαφών καθώς έχει μελετήσει πολλές αεροτομές (airfoils) γνωστές ως NACA airfoils

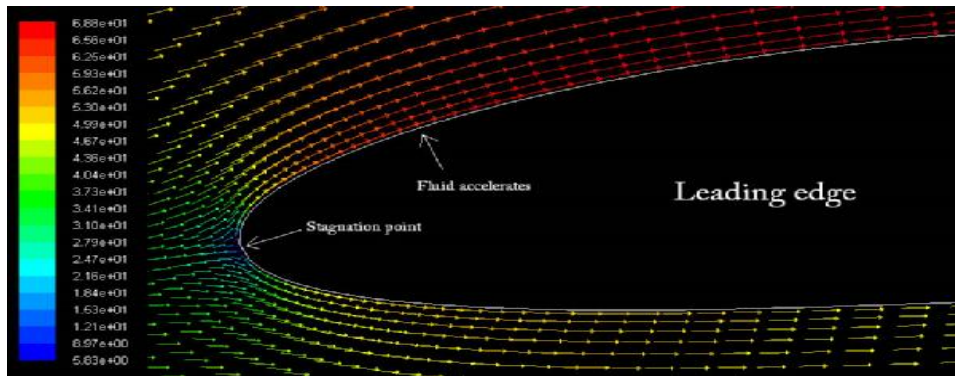
Αρχικά θα γίνει ο σχεδιασμός του προφίλ της αεροτομής NACA 4412. Στη συνέχεια της εργασίας αφού υπολογίσουμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου όπως το μήκος της χορδής καθώς και τη γωνία κωνικότητας β σε διάφορα σημεία κατά μήκος του πτερυγίου θα σχεδιάσουμε και τις υπόλοιπες αεροτομές για κάθε υπολογισμένο μήκος χορδής. Με βάση τις αεροτομές είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ένα πτερύγιο.

Στη συγκεκριμένη εργασία δε θα γίνει προσομοίωση της αεροτομής με κάποιο υπολογιστικό πρόγραμμα. Οι προσομοιώσεις γίνονται σε λογισμικά υπολογιστικής ρευστομηχανικής όπως είναι το FLUENT και ως σκοπός είναι η μελέτη της ροής και η κατανομή πίεσης του ρευστού γύρω από την αεροτομή καθώς και ο θεωρητικός υπολογισμός των συντελεστών άνωσης και αντίστασης (lift-drag coefficients). Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται ένα παράδειγμα από προσομοίωση της αεροτομής NACA 4412 για γωνία προσβολής $\alpha=50^\circ$ και ταχύτητα ανέμου $u=50$ m/s



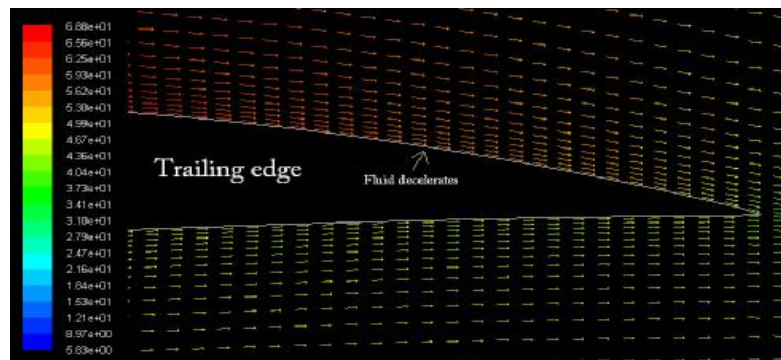
Σχήμα 10.1.1: Ταχύτητα ανέμου γύρω από της αεροτομή NACA 4412

Όπως φαίνεται και από το Σχ. 10.1.1 η ταχύτητα του ανέμου στην πάνω επιφάνεια είναι μεγαλύτερη από την κάτω επιφάνεια.



Σχήμα 10.1.2: Προσομοίωση στο χείλος προσβολής της NACA 4412

Στο χείλος προσβολής όπως φαίνεται υπάρχει ένα σημείο όπου η ταχύτητα του ανέμου πλησιάζει το μηδέν. Το ρευστό επιταχύνει στη πάνω επιφάνεια όπως φαίνεται και από την αλλαγή χρώματος.



Σχήμα 10.1.3: Προσομοίωση στο χείλος εκφυγής της NACA 4412

Στο χείλος εκφυγής το ρευστό επιβραδύνει και φαίνεται ότι συγκλίνει με το ρευστό της πάνω επιφάνειας.

Φυσικά γίνονται πολλές περαιτέρω προσομοιώσεις πάνω σε μια αεροτομή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δόθηκε απλά ένα παράδειγμα για να δείξουμε τι είναι η προσομοίωση. Η παρούσα προσομοίωση έχει γίνει από το Sibley School του τμήματος μηχανολόγων και αεροναυπηγών μηχανικών.

ΠΡΟΣΟΧΗ: Τα πτερύγια που κατασκευάστηκαν στη συγκεκριμένη διπλωματική είναι NACA 4415 και κατασκευάστηκαν με βάση τους υπολογισμούς που έγιναν από τους Teodoro Sanchez, Sunith Fernando και Hugh Piggott και σύμφωνα με τη κατασκευαστική διαδικασία που περιγράφεται στο δημοσιευμένο τεύχος τους “Wind rotor blade construction”. Το πτερύγιο που θα μελετήσουμε και θα σχεδιάσουμε αφορά το προφίλ NACA 4412 και ο σκοπός είναι να δείξουμε το σκεπτικό και τη διαδικασία για τη κατασκευή ενός πτερυγίου.

10.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ NACA 4412

Η NACA 4412 είναι τετραψήφια αεροτομή και συνεπώς θα χρησιμοποιηθούν οι ανάλογες εξισώσεις που έχουν περιγραφεί στο υποκεφάλαιο «4-ψήφια αεροτομή

NACA». Επίσης στο ίδιο υποκεφάλαιο αναλύεται και η λειτουργία των τεσσάρων ψηφίων της NACA 4412.

Οι υπολογισμοί έγιναν στο Excel για 35 σημεία στη πάνω και 35 σημεία στη κάτω επιφάνεια της αεροτομής. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τα χαρακτηριστικά της αεροτομής όπως αυτή σχεδιάστηκε.

Πίνακας 10.2.1: Συντεταγμένες αεροτομής NACA 4412

A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,00107	0,00574	0,00021	-0,00006	0,00584	0,00219	-0,00541
3	0,00427	0,01131	0,00085	0,00206	0,01194	0,00647	-0,01024
4	0,00959	0,0167	0,00189	0,00637	0,01828	0,01281	-0,01449
5	0,01703	0,0219	0,00333	0,01287	0,02483	0,02118	-0,01817
6	0,02656	0,02688	0,00514	0,02157	0,03155	0,03156	-0,02128
7	0,03817	0,03162	0,00727	0,03246	0,03837	0,04389	-0,02383
8	0,05184	0,0361	0,0097	0,04553	0,04524	0,05815	-0,02585
9	0,06753	0,04028	0,01237	0,06077	0,05207	0,07428	-0,02734
10	0,08521	0,04413	0,01523	0,07816	0,05879	0,09226	-0,02834
11	0,10484	0,04762	0,01822	0,09766	0,0653	0,11202	-0,02886
12	0,12638	0,05073	0,02128	0,11924	0,07151	0,13352	-0,02895
13	0,14978	0,05343	0,02435	0,14284	0,07732	0,15672	-0,02863
14	0,175	0,05569	0,02734	0,16843	0,08264	0,18157	-0,02796
15	0,20198	0,05749	0,0302	0,19594	0,08737	0,20803	-0,02697
16	0,23067	0,05881	0,03283	0,22529	0,0914	0,23604	-0,02574
17	0,26099	0,05966	0,03517	0,25641	0,09465	0,26558	-0,02431
18	0,29289	0,06001	0,03713	0,28921	0,09703	0,29658	-0,02276
19	0,3263	0,05986	0,03864	0,3236	0,09845	0,32901	-0,02116
20	0,36115	0,05924	0,03962	0,35949	0,09883	0,36282	-0,01959
21	0,39737	0,05813	0,04	0,39676	0,09812	0,39797	-0,01813
22	0,43486	0,05655	0,03986	0,43506	0,09642	0,43466	-0,01669
23	0,47357	0,05453	0,0394	0,47422	0,09392	0,47291	-0,01513
24	0,5134	0,05208	0,03857	0,51448	0,09064	0,51231	-0,01349
25	0,55426	0,04921	0,03736	0,55572	0,08654	0,5528	-0,01183
26	0,59608	0,04595	0,03573	0,59787	0,08165	0,59429	-0,01019
27	0,63876	0,04233	0,03367	0,6408	0,07594	0,63672	-0,00861
28	0,68221	0,03835	0,03115	0,68442	0,06943	0,67999	-0,00713
29	0,72634	0,03403	0,02817	0,72863	0,06212	0,72404	-0,00578
30	0,77105	0,02938	0,0247	0,77332	0,054	0,76878	-0,00459
31	0,81625	0,02441	0,02075	0,81838	0,04507	0,81412	-0,00357
32	0,86184	0,01912	0,0163	0,8637	0,03533	0,85999	-0,00273
33	0,90773	0,01351	0,01136	0,90918	0,02479	0,90628	-0,00208
34	0,95382	0,00756	0,00592	0,9547	0,01343	0,95293	-0,00159
35	1	0,00126	0	1,00016	0,00125	0,99984	-0,00125

1^η Στήλη: Είναι καταγραμμένα τα 35 σημεία για τα οποία έγιναν οι υπολογισμοί των συντεταγμένων της κάτω και πάνω επιφάνειας της αεροτομής.

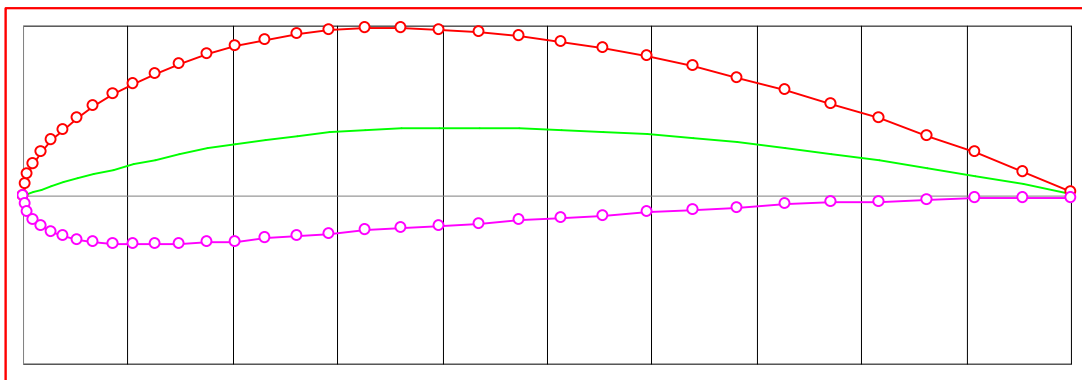
2^η Στήλη: Είναι τα σημεία του άξονα x για τα οποία υπολογίσθηκαν η πάνω και κάτω επιφάνεια της αεροτομής. Όπως παρατηρείται από τον πίνακα τα πρώτα σημεία είναι πολύ κοντά μεταξύ τους σε σχέση με τα υπόλοιπα. Αυτό έγινε ώστε να δημιουργηθεί η καμπυλότητα στο χείλος προσβολής.

3^η Στήλη: Υπολογίστηκε η κατανομή του πάχους στην πάνω και κάτω επιφάνεια με βάση τα δύο τελευταία ψηφία.

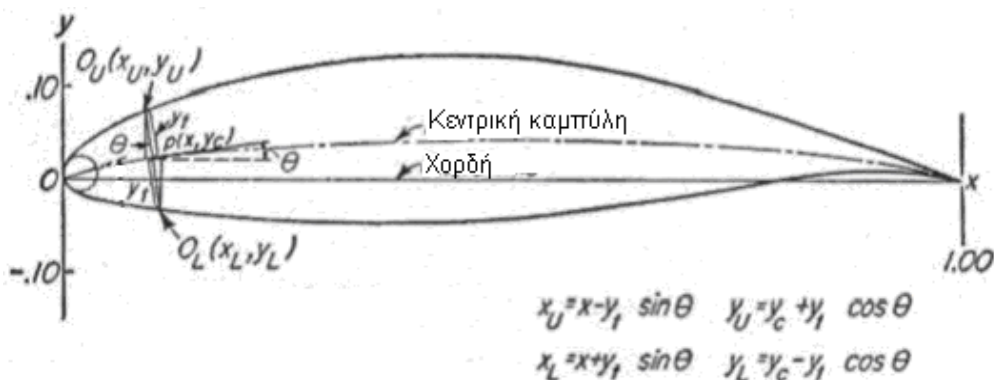
4^η Στήλη: Υπολογίστηκε η κεντρική καμπύλη με βάση τα δύο πρώτα ψηφία, δηλαδή η καμπύλη που χωρίζει ακριβώς στη μέση την αεροτομή.

Στις επόμενες τέσσερις στήλες υπολογίσθηκαν οι συντεταγμένες (x,y) για τη πάνω και κάτω επιφάνεια.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η αεροτομή με βάση τις υπολογισμένες συντεταγμένες.



Γράφημα 10.2.1: Σχεδιασμός αεροτομής NACA4412



Σχήμα 10.2.1: Γεωμετρία αεροτομής

10.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

Για να κατασκευαστεί ένα πτερύγιο χρειάζεται να γνωρίζουμε τη χορδή του πτερυγίου σε κάθε σταθμό καθώς και τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της χορδής και του άξονα περιστροφής (angle beta). Ο αριθμός των σταθμών για τον οποίο θα χωριστεί ένα πτερύγιο εξαρτάται από τον σχεδιαστή και σαφώς όσο περισσότεροι είναι σταθμοί τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια υπάρχει κατά την κατασκευή.

Το πρώτο βήμα που ακολουθείται είναι η επιλογή της αεροτομής. Υπάρχει μεγάλη γκάμα όσον αφορά τις αεροτομές και οι πιο διαδεδομένες είναι οι αεροτομές NACA. Για τη συγκεκριμένη μελέτη θα επιλέξουμε την τετραψήφια αεροτομή NACA 4412. Κάθε αεροτομή χαρακτηρίζεται από ορισμένα μεγέθη τα οποία έχουν προκύψει από πειραματικές διαδικασίες σε αεροσήραγγες. Αυτά τα μεγέθη είναι η γωνία προσβολής (angle of attack), ο συντελεστής άνωσης (lift coefficient) και ο συντελεστής αντίστασης (drag coefficient) για ένα εύρος αριθμών Reynold. Από τη NASA μπορούμε να βρούμε για διάφορες αεροτομές NACA αυτά τα μεγέθη.

Ένα μέγεθος το οποίο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στους συντελεστές είναι ο αριθμός Reynold. Ανάλογα με τη τιμή του Re για την οποία γίνονται τα πείραμα οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης είναι διαφορετικοί για κάθε γωνία πρόσπτωσης.

10.3.1 Αριθμός Reynold

Μέσω του αριθμού Re προσδιορίζεται το είδος της ροής, δηλαδή αν είναι τυρβώδης ή στρωτή. Ο Re είναι αδιάστατο μέγεθος και εκφράζεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (10.3.1.1)$$

όπου: ρ: πυκνότητα ρευστού
 u: ταχύτητα ρευστού
 D: εκφράζει το γεωμετρικό μέγεθος του πεδίου ροής που μελετάμε
 μ: δυναμικό ιξώδες

το δυναμικό ιξώδες ενός ρευστού ισούται με:

$$\mu = \nu \rho \quad (10.3.1.2)$$

και συνεπώς η σχέση που αντιπροσωπεύει τον αριθμό Re μετατρέπεται σε:

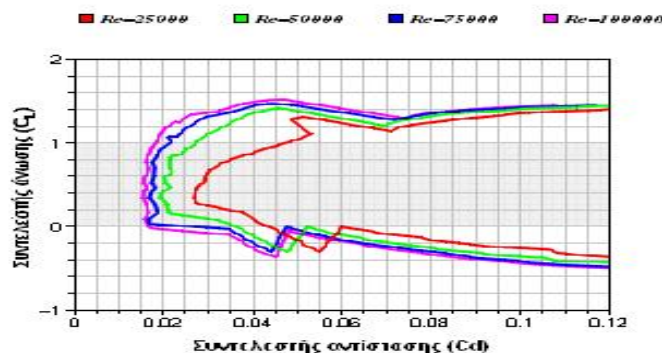
$$Re = \frac{u D}{\nu} = \frac{F_{\text{αδράνεια}}}{F_{\text{ιξώδους}}} \quad (10.3.1.3)$$

όπου ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού.

Re < 2000	→	Στρωτή ροή
2000 < Re < 4000	→	Μεταβατική ροή
Re > 4000	→	Τυρβώδης ροή

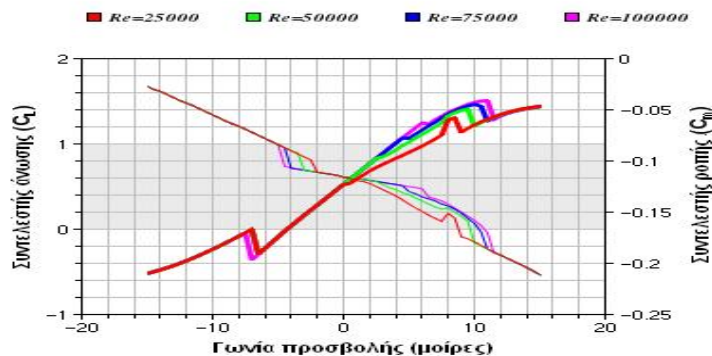
10.3.2 Υπολογισμός βασικών μεγεθών

Για τους υπολογισμούς πρέπει να βρεθεί η βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης (optimum angle o attack). Η βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία για την οποία ο λόγος c_l/c_d είναι ελάχιστος (μεγαλύτερος όμως του μηδενός), δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από τον αριθμό Reynold που γίνονται τα πειράματα. Η γωνία αυτή κυμαίνεται από 4° - 6° και η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει είναι περίπου 18° , για μεγαλύτερες τιμές θα δημιουργηθεί το φαινόμενο του στροβιλισμού (stall) που έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στα Γρ.10.3.2.1 και 10.3.2.2 φαίνονται τα διαγράμματα για ένα πλήθος αριθμών Re, του συντελεστή άνωσης και αντίστασης συναρτήσει της γωνίας προσβολής αλλά και του συντελεστή άνωσης συναρτήσει του συντελεστή αντίστασης για την αεροτομή NACA 4412



Γράφημα 10.3.2.1: Συντελεστής άνωσης (C_l) συναρτήσει συντελεστή αντίστασης (C_d)

Πηγή: www.worldofkrauss.com



Γράφημα 10.3.2.2: Συντελεστής άνωσης (C_l) και συντελεστής ροπής (C_m) συναρτήσει γωνίας προσβολής (α)

Πηγή: www.worldofkrauss.com

Στους παρακάτω πίνακες 10.3.2.1 έως 10.3.2.4 φαίνονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά της αεροτομής NACA 4412 για ένα εύρος αριθμών Reynolds και γωνιών προσβολής α με βάση των οποίων έχουν κατασκευαστεί και τα γραφήματα 10.3.2.1 και 10.3.2.2 Τα δεδομένα αυτά καθώς και τα ανωτέρω γραφήματα πάρθηκαν από την AID (Airfoil Investigation Database)

Πίνακας 10.3.2.1: Χαρακτηριστικά NACA 4412 για Re=25000

NACA 4412				
Re=25000				
A/A	α°	Cl	Cd	L/D
1	-15.0	-0.520	0.20272	-2.563
2	-14.5	-0.500	0.18750	-2.666
3	-14.0	-0.478	0.16279	-2.933
4	-13.5	-0.454	0.15704	-2.892
5	-13.0	-0.428	0.14246	-3.006
6	-12.5	-0.400	0.14049	-2.850
7	-12.0	-0.371	0.12430	-2.983
8	-11.5	-0.339	0.11408	-2.974
9	-11.0	-0.306	0.10844	-2.821
10	-10.5	-0.271	0.10656	-2.547
11	-10.0	-0.236	0.09361	-2.524
12	-9.5	-0.199	0.08737	-2.279
13	-9.0	-0.162	0.08033	-2.011
14	-8.5	-0.123	0.07791	-1.572
15	-8.0	-0.083	0.06965	-1.196
16	-7.5	-0.043	0.06596	-0.656
17	-7.0	-0.003	0.05993	-0.044
18	-6.5	-0.293	0.05500	-5.328
19	-6.0	-0.225	0.05186	-4.344
20	-5.5	-0.158	0.05043	-3.132
21	-5.0	-0.091	0.04697	-1.944
22	-4.5	-0.025	0.04509	-0.562
23	-4.0	0.040	0.04165	0.955
24	-3.5	0.104	0.04005	2.594
25	-3.0	0.167	0.03810	4.380
26	-2.5	0.227	0.03258	6.973
27	-2.0	0.282	0.02768	10.185
28	-1.5	0.343	0.02693	12.736
29	-1.0	0.404	0.02730	14.800
30	-0.5	0.465	0.02783	16.702
31	0.0	0.526	0.02902	18.114
32	0.5	0.536	0.02923	18.341
33	1.0	0.587	0.02947	19.927
34	1.5	0.636	0.03027	21.021
35	2.0	0.682	0.03090	22.054
36	2.5	0.723	0.03205	22.562
37	3.0	0.760	0.03350	22.695
38	3.5	0.795	0.03515	22.616
39	4.0	0.831	0.03713	22.372
40	4.5	0.864	0.03969	21.776

A/A	α°	Cl	Cd	L/D
41	5.0	0.901	0.04154	21.700
42	5.5	0.937	0.04367	21.456
43	6.0	0.974	0.04621	21.083
44	6.5	1.015	0.04881	20.796
45	7.0	1.057	0.05137	20.571
46	7.5	1.102	0.05331	20.677
47	8.0	1.282	0.04884	26.240
48	8.5	1.306	0.05134	25.437
49	9.0	1.135	0.07101	15.977
50	9.5	1.184	0.07279	16.268
51	10.0	1.223	0.07741	15.805
52	10.5	1.258	0.08370	15.028
53	11.0	1.288	0.08806	14.630
54	11.5	1.318	0.09504	13.868
55	12.0	1.345	0.09923	13.550
56	12.5	1.368	0.10703	12.777
57	13.0	1.387	0.11790	11.764
58	13.5	1.405	0.12181	11.533
59	14.0	1.419	0.13665	10.386
60	14.5	1.430	0.15064	9.492
61	15.0	1.440	0.15874	9.071

Πίνακας 10.3.2.2: Χαρακτηριστικά NACA 4412 για Re=50000

NACA 4412				
Re=50000				
A/A	α°	Cl	Cd	L/D
1	-15.0	-0.519	0.15952	-3.254
2	-14.5	-0.499	0.14658	-3.406
3	-14.0	-0.477	0.13387	-3.563
4	-13.5	-0.453	0.13539	-3.348
5	-13.0	-0.428	0.12118	-3.528
6	-12.5	-0.400	0.10777	-3.712
7	-12.0	-0.370	0.10566	-3.504
8	-11.5	-0.339	0.09463	-3.578
9	-11.0	-0.305	0.09058	-3.372
10	-10.5	-0.271	0.08195	-3.312
11	-10.0	-0.236	0.07807	-3.020
12	-9.5	-0.199	0.07190	-2.762
13	-9.0	-0.161	0.06668	-2.414
14	-8.5	-0.122	0.06371	-1.914
15	-8.0	-0.083	0.05850	-1.410
16	-7.5	-0.042	0.05544	-0.765
17	-7.0	-0.001	0.05215	-0.026

A/A	α°	Cl	Cd	L/D
18	-6.5	-0.293	0.04773	-6.138
19	-6.0	-0.225	0.04450	-5.061
20	-5.5	-0.158	0.04222	-3.740
21	-5.0	-0.091	0.03962	-2.303
22	-4.5	-0.025	0.03746	-0.676
23	-4.0	0.040	0.03460	1.148
24	-3.5	0.103	0.03028	3.404
25	-3.0	0.160	0.02127	7.503
26	-2.5	0.221	0.02101	10.508
27	-2.0	0.282	0.02083	13.534
28	-1.5	0.343	0.01957	17.525
29	-1.0	0.404	0.01991	20.289
30	-0.5	0.465	0.02150	21.621
31	0.0	0.526	0.02060	25.508
32	0.5	0.586	0.02041	28.735
33	1.0	0.647	0.02200	29.413
34	1.5	0.708	0.02142	33.048
35	2.0	0.769	0.02139	35.921
36	2.5	0.829	0.02147	38.622
37	3.0	0.849	0.02368	35.851
38	3.5	0.882	0.02466	35.793
39	4.0	0.931	0.02551	36.484
40	4.5	0.977	0.02702	36.170
41	5.0	1.023	0.02793	36.631
42	5.5	1.067	0.02899	36.811
43	6.0	1.110	0.03039	36.515
44	6.5	1.154	0.03211	35.948
45	7.0	1.198	0.03392	35.327
46	7.5	1.243	0.03540	35.121
47	8.0	1.331	0.03883	34.281
48	8.5	1.364	0.04126	33.073
49	9.0	1.391	0.04358	31.918
50	9.5	1.409	0.04611	30.567
51	10.0	1.202	0.06951	17.297
52	10.5	1.250	0.07224	17.304
53	11.0	1.282	0.07642	16.773
54	11.5	1.314	0.08002	16.417
55	12.0	1.341	0.08443	15.884
56	12.5	1.365	0.09102	14.993
57	13.0	1.385	0.09723	14.245
58	13.5	1.403	0.10152	13.820
59	14.0	1.417	0.11201	12.654
60	14.5	1.429	0.11561	12.360
61	15.0	1.439	0.12519	11.493

Πίνακας 10.3.2.3: Χαρακτηριστικά NACA 4412 για Re=75000

NACA 4412				
Re=75000				
A/A	α°	Cl	Cd	L/D
1	-15.0	-0.519	0.14735	-3.519
2	-14.5	-0.499	0.13383	-3.727
3	-14.0	-0.476	0.12187	-3.910
4	-13.5	-0.453	0.11003	-4.119
5	-13.0	-0.428	0.10182	-4.199
6	-12.5	-0.399	0.09963	-4.009
7	-12.0	-0.370	0.09010	-4.109
8	-11.5	-0.338	0.08649	-3.910
9	-11.0	-0.305	0.08264	-3.690
10	-10.5	-0.271	0.07546	-3.591
11	-10.0	-0.235	0.07100	-3.314
12	-9.5	-0.198	0.06506	-3.045
13	-9.0	-0.160	0.06062	-2.647
14	-8.5	-0.122	0.05721	-2.125
15	-8.0	-0.082	0.05360	-1.524
16	-7.5	-0.042	0.05063	-0.821
17	-7.0	-0.001	0.04741	-0.013
18	-6.5	-0.293	0.04412	-6.639
19	-6.0	-0.225	0.04125	-5.458
20	-5.5	-0.158	0.03896	-4.051
21	-5.0	-0.091	0.03673	-2.482
22	-4.5	-0.025	0.03496	-0.723
23	-4.0	0.037	0.01707	2.189
24	-3.5	0.098	0.01712	5.750
25	-3.0	0.160	0.01878	8.499
26	-2.5	0.221	0.01847	11.955
27	-2.0	0.282	0.01805	15.621
28	-1.5	0.343	0.01712	20.030
29	-1.0	0.404	0.01749	23.100
30	-0.5	0.465	0.01823	25.502
31	0.0	0.526	0.01758	29.899
32	0.5	0.586	0.01796	32.657
33	1.0	0.647	0.01802	35.925
34	1.5	0.708	0.01818	38.935
35	2.0	0.769	0.01763	43.588
36	2.5	0.829	0.01849	44.830
37	3.0	0.889	0.01925	46.203
38	3.5	0.950	0.02020	47.026
39	4.0	1.010	0.02184	46.244
40	4.5	1.070	0.02113	50.614

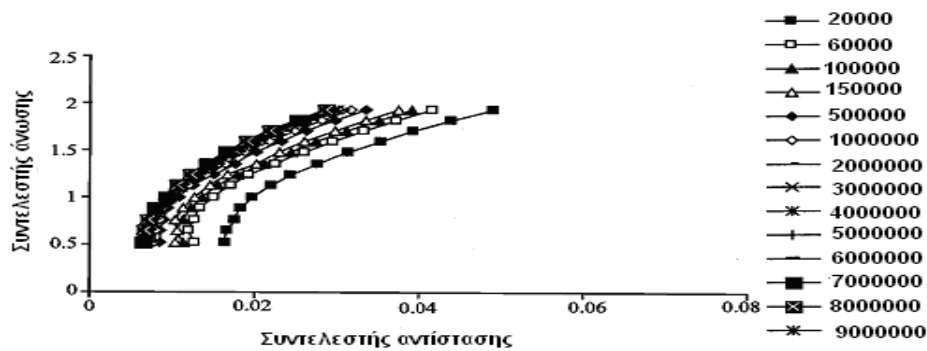
A/A	α°	Cl	Cd	L/D
41	5.0	1.065	0.02310	46.101
42	5.5	1.114	0.02396	46.477
43	6.0	1.162	0.02500	46.464
44	6.5	1.210	0.02633	45.942
45	7.0	1.256	0.02774	45.261
46	7.5	1.301	0.02921	44.531
47	8.0	1.352	0.03457	39.116
48	8.5	1.387	0.03684	37.640
49	9.0	1.417	0.03893	36.407
50	9.5	1.444	0.04097	35.246
51	10.0	1.463	0.04422	33.084
52	10.5	1.446	0.04870	29.691
53	11.0	1.268	0.07186	17.648
54	11.5	1.306	0.07523	17.362
55	12.0	1.336	0.07909	16.894
56	12.5	1.361	0.08293	16.414
57	13.0	1.383	0.08735	15.835
58	13.5	1.400	0.09569	14.632
59	14.0	1.415	0.09937	14.244
60	14.5	1.426	0.10879	13.111
61	15.0	1.437	0.11696	12.286

Πίνακας 10.3.2.4: Χαρακτηριστικά NACA 4412 για Re=100000

NACA 4412				
Re=100000				
A/A	α°	Cl	Cd	L/D
1	-15.0	-0.519	0.12294	-4.218
2	-14.5	-0.498	0.12699	-3.924
3	-14.0	-0.476	0.11522	-4.131
4	-13.5	-0.453	0.10490	-4.315
5	-13.0	-0.427	0.09812	-4.351
6	-12.5	-0.399	0.09527	-4.186
7	-12.0	-0.370	0.08651	-4.272
8	-11.5	-0.338	0.08141	-4.149
9	-11.0	-0.305	0.07755	-3.927
10	-10.5	-0.270	0.07142	-3.787
11	-10.0	-0.235	0.06648	-3.532
12	-9.5	-0.197	0.06341	-3.108
13	-9.0	-0.160	0.05863	-2.721
14	-8.5	-0.121	0.05425	-2.227
15	-8.0	-0.081	0.05091	-1.589
16	-7.5	-0.041	0.04788	-0.851
17	-7.0	-0.361	0.04513	-7.994

A/A	α°	Cl	Cd	L/D
18	-6.5	-0.293	0.04149	-7.057
19	-6.0	-0.225	0.03893	-5.780
20	-5.5	-0.158	0.03726	-4.232
21	-5.0	-0.091	0.03473	-2.620
22	-4.5	-0.016	0.01725	-0.941
23	-4.0	0.037	0.01634	2.286
24	-3.5	0.098	0.01590	6.192
25	-3.0	0.160	0.01691	9.438
26	-2.5	0.221	0.01655	13.340
27	-2.0	0.282	0.01611	17.503
28	-1.5	0.343	0.01557	22.028
29	-1.0	0.404	0.01566	25.800
30	-0.5	0.465	0.01629	28.537
31	0.0	0.526	0.01559	33.715
32	0.5	0.586	0.01580	37.118
33	1.0	0.647	0.01672	38.698
34	1.5	0.708	0.01699	41.656
35	2.0	0.769	0.01605	47.882
36	2.5	0.829	0.01658	50.009
37	3.0	0.889	0.01725	51.560
38	3.5	0.950	0.01762	53.889
39	4.0	1.010	0.01859	54.338
40	4.5	1.070	0.01927	55.503
41	5.0	1.129	0.01989	56.772
42	5.5	1.188	0.02076	57.209
43	6.0	1.246	0.02271	54.872
44	6.5	1.235	0.02340	52.746
45	7.0	1.281	0.02459	52.117
46	7.5	1.327	0.02587	51.318
47	8.0	1.368	0.03188	42.910
48	8.5	1.401	0.03396	41.244
49	9.0	1.432	0.03604	39.745
50	9.5	1.462	0.03800	38.464
51	10.0	1.485	0.04077	36.432
52	10.5	1.502	0.04382	34.277
53	11.0	1.507	0.04708	32.023
54	11.5	1.286	0.07442	17.278
55	12.0	1.327	0.07651	17.347
56	12.5	1.356	0.08062	16.817
57	13.0	1.379	0.08518	16.191
58	13.5	1.398	0.09004	15.523
59	14.0	1.413	0.09483	14.898
60	14.5	1.424	0.09939	14.332
61	15.0	1.435	0.10849	13.230

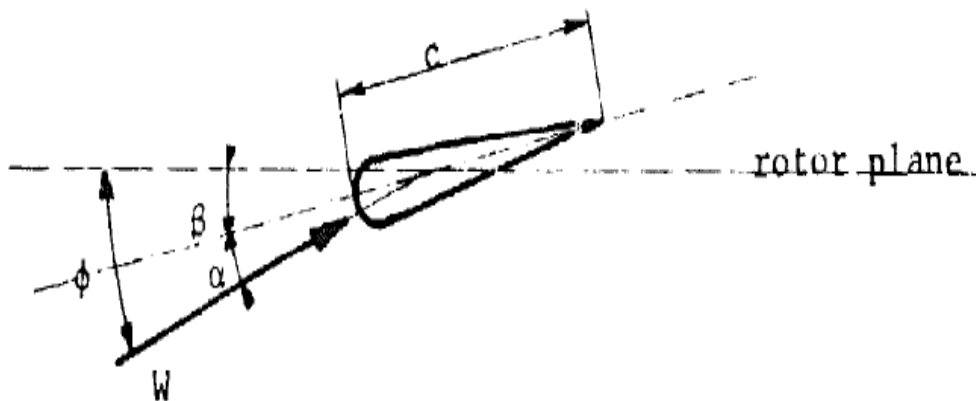
Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ο συντελεστής άνωσης συναρτήσει του συντελεστή αντίστασης για ένα μεγαλύτερο εύρος του αριθμού Reighnold



Γράφημα 10.3.2.3 Συντελεστής άνωσης συναρτήσει συντελεστή αντίστασης για $Re=2 \cdot 10^5 - 9 \cdot 10^6$

Πηγή: *Aerodynamic Analyses of Different Wind Turbines Blade Profiles by Ferhat Kurtulmus*

Η γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος του πτερυγίου παραμένει σταθερή και συνεπώς και ο συντελεστή άνωσης. Σκοπός είναι να υπολογιστεί το μήκος της χορδής c του πτερυγίου σε ένα πλήθος σταθμών καθώς και η γωνία β (κωνικότητα). Με αυτά τα δύο μεγέθη γνωστά είναι δυνατή η κατασκευή ενός πτερυγίου. Στο Σχ. 10.3.2.1 φαίνονται τα δύο μεγέθη που καλούμαστε να υπολογίσουμε.



Σχήμα 10.3.2.1: Γωνία β και χορδή αεροτομής.

10.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΒΗΜΑΤΟΣ ϕ

Η χορδή κατά μήκος ενός πτερυγίου εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες: τη γωνία ϕ και το συντελεστή ανύψωσης c_l . Αφού ο συντελεστής ανύψωσης είναι σταθερός κατά μήκος του πτερυγίου θα ασχοληθούμε μόνο με τον υπολογισμό της γωνίας ϕ (γωνία βήματος).

Η γωνία βήματος κατά κύριο λόγο εξαρτάται από τον λόγο ταχυτήτων του κάθε σημείου που θέλουμε να υπολογίσουμε τη γωνία αυτή, δηλαδή από τη περιστροφική ταχύτητα του πτερυγίου προς τη ταχύτητα του ανέμου σε εκείνο το σημείο. Αρχικά γίνεται υπολογισμός του λόγου ταχυτήτων λ στην άκρη του πτερυγίου και ο λόγος αυτός ονομάζεται λόγος ακροπτερυγίου και συμβολίζεται με TSR (Tip Speed Ratio). Ο υπολογισμός του λ έχει αναφερθεί κεφάλαιο 6.11. Ισχύει ότι για δίπτερες A/G $\lambda=6$, για τρίπτερες $\lambda=5$, και για τετράπτερες $\lambda=3$. Στη συγκεκριμένη μελέτη θα επιλέξουμε $\lambda=5$

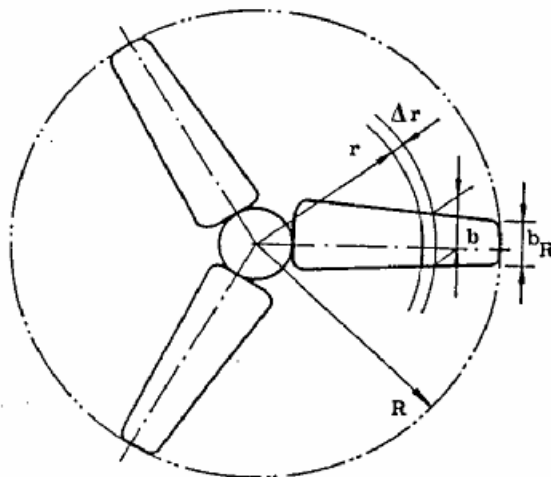
Επίσης είναι γνωστό ο άνεμος που προσπίπτει στο χείλος προσβολή έχει ταχύτητα μειωμένη κατά $2/3$ της αρχικής του ταχύτητας, δηλαδή $V_d = (2/3)U$.

Έχοντας λοιπόν γνωστά το TSR και τη ταχύτητα του ανέμου στο χείλος προσβολής μπορούμε να υπολογίσουμε τη γωνία βήματος για οποιαδήποτε θέση r/R . Η σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό είναι:

$$\text{atan}(2 / (3I_r)) \quad (10.4.1)$$

Επίσης υπολογίστηκε και το συνημίτονο (cosine) της γωνίας ϕ διότι θα χρειαστεί στη συνέχεια για τον υπολογισμό της χορδής.

Όπως φαίνεται και από τη σχέση 10.4.1 είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των λόγων ταχυτήτων για κάθε επιθυμητή θέση που θέλουμε να υπολογίσουμε τη γωνία βήματος. Ο λόγος ταχυτήτων για κάθε τέτοια θέση συμβολίζεται ως λ_r όπου ο δείκτης r δηλώνει την ακτινική θέση που θα γίνει ο υπολογισμός. Στο Σχ. 10.4.1 φαίνεται ποια είναι η ακτινική θέση σε σχέση με την ακτίνα του πτερυγίου.



Σχήμα 10.4.1: Διακρίνονται η ακτινική θέση r , η ακτίνα R και η χορδή b .

Ο λόγος ταχυτήτων για κάθε ακτινική θέση υπολογίζεται από τη σχέση 10.4.2, ήτοι:

$$I_r = I * r / R \quad (10.4.2)$$

Εφαρμόζοντας τις ανωτέρω σχέσεις στο πρόγραμμα Excel υπολογίστηκε η γωνία βήματος κατά μήκος του πτερυγίου διαιρώντας το σε 15 σταθμούς.

Πίνακας 10.4.1: Υπολογισμός γωνίας βήματος φ

Γωνία βήματος φ σε κάθε σταθμό						
A/A	R (mm)	r (mm)	λ	λr	φ	$\cos\varphi$
1	850	150	5	0,88	37,07	0,8
2	850	200	5	1,18	29,54	0,87
3	850	250	5	1,47	24,39	0,91
4	850	300	5	1,76	20,7	0,94
5	850	350	5	2,06	17,94	0,95
6	850	400	5	2,35	15,82	0,96
7	850	450	5	2,65	14,14	0,97
8	850	500	5	2,94	12,77	0,98
9	850	550	5	3,24	11,64	0,98
10	850	600	5	3,53	10,7	0,98
11	850	650	5	3,82	9,89	0,99
12	850	700	5	4,12	9,2	0,99
13	850	750	5	4,41	8,59	0,99
14	850	800	5	4,71	8,06	0,99
15	850	850	5	5	7,59	0,99

10.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΟΡΔΗΣ c

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της χορδής c . Ο υπολογισμός της χορδής κατά βάση εξαρτάται από τον συντελεστή άνωσης ο οποίος όπως αναφέρθηκε είναι σταθερός κατά μήκος της πτέρυγας. Επίσης θα ληφθεί υπόψιν και ο αριθμός των πτερυγίων που φέρει ο δρομέας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι υπολογισμοί θα γίνουν για αριθμό πτερυγίων $B=3$.

Ο συντελεστής άνωσης c_l θα επιλεγεί με βάση τη βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης. Για την αεροτομή NACA4412 βρέθηκαν τα χαρακτηριστικά που χρειαζόμαστε από την AID (Airfoil Investigation Database) για αριθμό $Re=100000$. Τα χαρακτηριστικά αυτά παρατίθενται στο Πιν. 10.5.1 και αυτά που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης $\alpha=5.5^\circ$ και ο συντελεστής άνωσης για αυτή τη γωνία $c_l=1.188$.

Πίνακας 10.5.1: Χαρακτηριστικά αεροτομής NACA 4412

Πηγή: www.worldofkrauss.com

Χαρακτηριστικά αεροτομής NACA 4412	
Max C_L	1,507
Γωνία για μέγιστο C_L (μοίρες)	11,000
Max L/D	57,209
Γωνία για μέγιστο L/D (μοίρες)	5,500 ⁰
C_L για μέγιστο L/D (μοίρες)	1,188

Η εξίσωση που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της χορδής φαίνεται παρακάτω:

$$c = \frac{8pr}{Bc_l}(1 - \cos j) \quad 10.5.1$$

όπου r είναι η ακτινική θέση που θα γίνουν οι υπολογισμοί. Βλέπε Σχ. 10.4.1

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Excel υπολογίστηκε το μήκος της χορδής σε κάθε σταθμό της πτέρυγας.

Πίνακας 10.5.2: Υπολογισμός χορδής

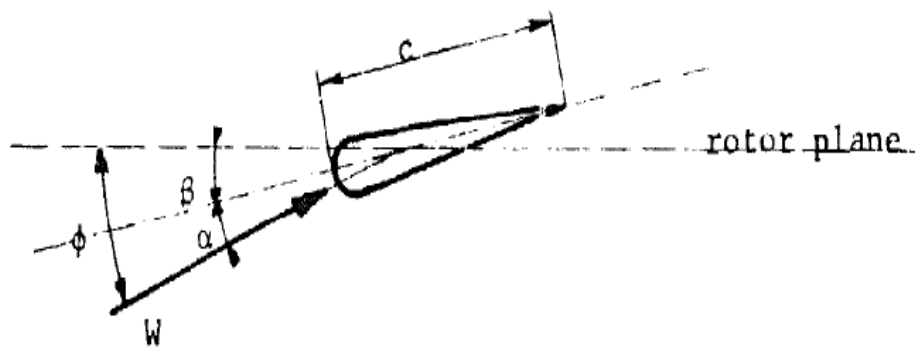
Μήκος χορδής c σε κάθε σταθμό					
A/A	r (mm)	cl	cosφ	B	c (mm)
1	150	1,188	0,8	3	213,7
2	200	1,188	0,87	3	183,22
3	250	1,188	0,91	3	157,21
4	300	1,188	0,94	3	136,44
5	350	1,188	0,95	3	119,97
6	400	1,188	0,96	3	106,78
7	450	1,188	0,97	3	96,044
8	500	1,188	0,98	3	87,185
9	550	1,188	0,98	3	79,769
10	600	1,188	0,98	3	73,482
11	650	1,188	0,99	3	68,091
12	700	1,188	0,99	3	63,421
13	750	1,188	0,99	3	59,34
14	800	1,188	0,99	3	55,744
15	850	1,188	0,99	3	52,554

Σημείωση: Η χορδή μπορεί να συναντηθεί και ως c αλλά και ως b

10.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΩΝΙΚΟΤΗΤΑΣ β

Τελευταίο βήμα στους υπολογισμούς ενός πτερυγίου είναι ο υπολογισμός της κωνικότητας, δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ της χορδής και του άξονα περιστροφής. Η γωνία αυτή συμβολίζεται ως β. Όπως φαίνεται και από το Σχ. 10.6.1 η γωνία β είναι η διαφορά της γωνίας προσβολής α από τη γωνία βήματος φ, ήτοι:

$$\beta = \varphi - \alpha \quad (10.6.1)$$



Σχήμα 10.6.1 Διακρίνονται οι αναπτυσσόμενες γωνίες σε αεροτομή κατά τη περιστροφή της καθώς και η χορδή της.

Πίνακας 10.6.1 Υπολογισμός γωνίας β

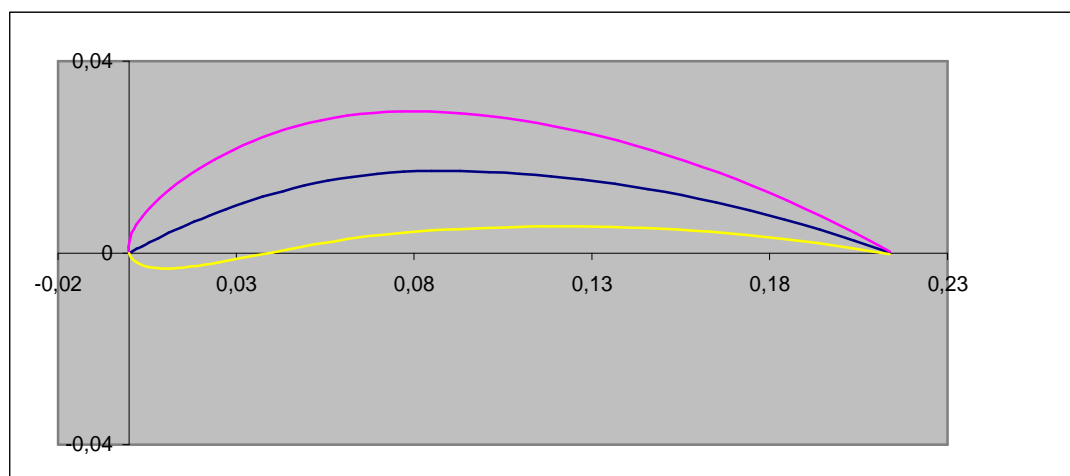
Υπολογισμός γωνίας β σε κάθε σταθμό		
A/A	Γωνία προσβολή α (μοίρες)	Γωνία κωνικότητας β (μοίρες)
1	5,5	31,57
2	5,5	24,04
3	5,5	18,89
4	5,5	15,2
5	5,5	12,44
6	5,5	10,32
7	5,5	8,64
8	5,5	7,27
9	5,5	6,14
10	5,5	5,2
11	5,5	4,39
12	5,5	3,7
13	5,5	3,09
14	5,5	2,56
15	5,5	2,09

10.7 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

Εφόσον υπολογίστηκε η χορδή που έχει το πτερύγιο κατά μήκος για διάφορα σημεία καθώς και η κωνικότητα που σχηματίζει (γωνία β) είναι δυνατόν να σχεδιάσουμε και τις αεροτομές για αυτά τα σημεία. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι υπολογισμοί για κάθε ένα από τα 35 σημεία. Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τον αρχικό σχεδιασμό της NACA 4412 με τη διαφορά ότι κάθε συντεταγμένη πολλαπλασιάστηκε με την επιθυμητή χορδή c .

Πίνακας 10.7.1: Σταθμός 1

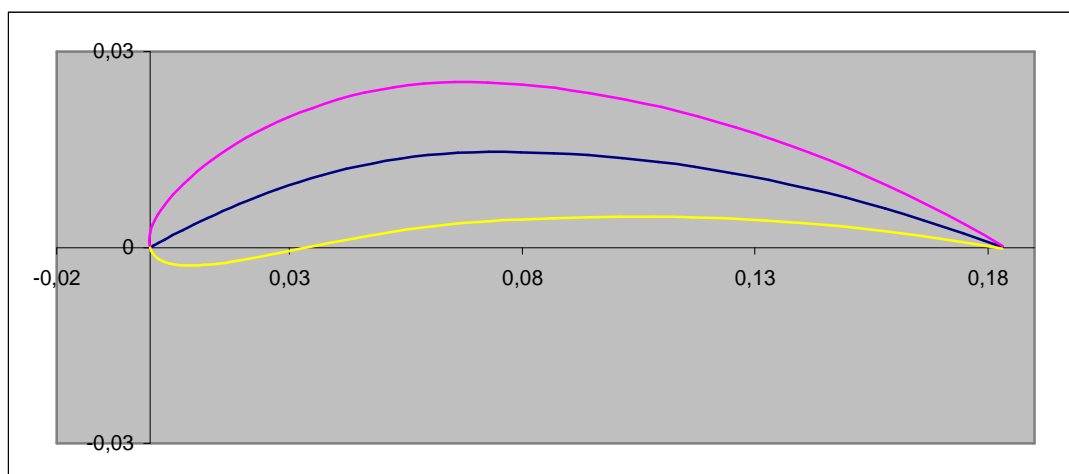
A/A	c=0,2137 (m)						
	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,000228	0,001226	9,11E-05	-0,00023	0,00123	0,000683	-0,00105
3	0,000912	0,002417	0,000363	1,93E-05	0,002609	0,001804	-0,00188
4	0,002049	0,003569	0,00081	0,000744	0,004131	0,003355	-0,00251
5	0,003639	0,004679	0,001424	0,001951	0,005789	0,005326	-0,00294
6	0,005676	0,005744	0,002195	0,003644	0,007568	0,007708	-0,00318
7	0,008158	0,006757	0,003107	0,005826	0,00945	0,01049	-0,00324
8	0,011078	0,007714	0,004144	0,008497	0,011413	0,013659	-0,00313
9	0,014431	0,008607	0,005285	0,011658	0,013433	0,017204	-0,00286
10	0,018209	0,00943	0,006508	0,015305	0,01548	0,021112	-0,00246
11	0,022404	0,010177	0,007787	0,019435	0,017522	0,025372	-0,00195
12	0,027007	0,010842	0,009096	0,024041	0,019524	0,029973	-0,00133
13	0,032009	0,011418	0,010406	0,029116	0,021452	0,034902	-0,00064
14	0,037398	0,011901	0,011687	0,034647	0,023265	0,040149	0,000109
15	0,043164	0,012285	0,012906	0,040622	0,024926	0,045706	0,000887
16	0,049293	0,012569	0,014032	0,047023	0,026394	0,051564	0,00167
17	0,055774	0,012749	0,015031	0,053831	0,027631	0,057716	0,002432
18	0,062591	0,012823	0,01587	0,061025	0,028598	0,064157	0,003143
19	0,069731	0,012793	0,016516	0,068579	0,029257	0,070883	0,003775
20	0,077178	0,012659	0,016935	0,076467	0,029573	0,07789	0,004296
21	0,084917	0,012422	0,017095	0,084659	0,029514	0,085175	0,004676
22	0,09293	0,012085	0,017038	0,093016	0,029123	0,092844	0,004953
23	0,101201	0,011653	0,016839	0,101482	0,028489	0,100921	0,005189
24	0,109713	0,011129	0,016485	0,110175	0,027604	0,109251	0,005366
25	0,118446	0,010516	0,015966	0,11907	0,026464	0,117821	0,005468
26	0,127382	0,00982	0,01527	0,128144	0,025061	0,12662	0,005479
27	0,136503	0,009045	0,014389	0,137373	0,023392	0,135633	0,005385
28	0,145788	0,008195	0,013314	0,14673	0,021454	0,144846	0,005173
29	0,155218	0,007272	0,012039	0,156193	0,019245	0,154244	0,004832
30	0,164773	0,006279	0,010558	0,165735	0,016763	0,163812	0,004353
31	0,174433	0,005217	0,008868	0,175332	0,014007	0,173534	0,003729
32	0,184176	0,004087	0,006967	0,184959	0,010978	0,183393	0,002955
33	0,193982	0,002887	0,004854	0,19459	0,007676	0,193374	0,002031
34	0,203831	0,001616	0,002531	0,204202	0,004103	0,20346	0,000958
35	0,2137	0,000269	5,27E-18	0,213767	0,000261	0,213633	-0,00026



Γράφημα 10.7.1: Αεροτομή 1

Πίνακας 10.7.2: Σταθμός 2

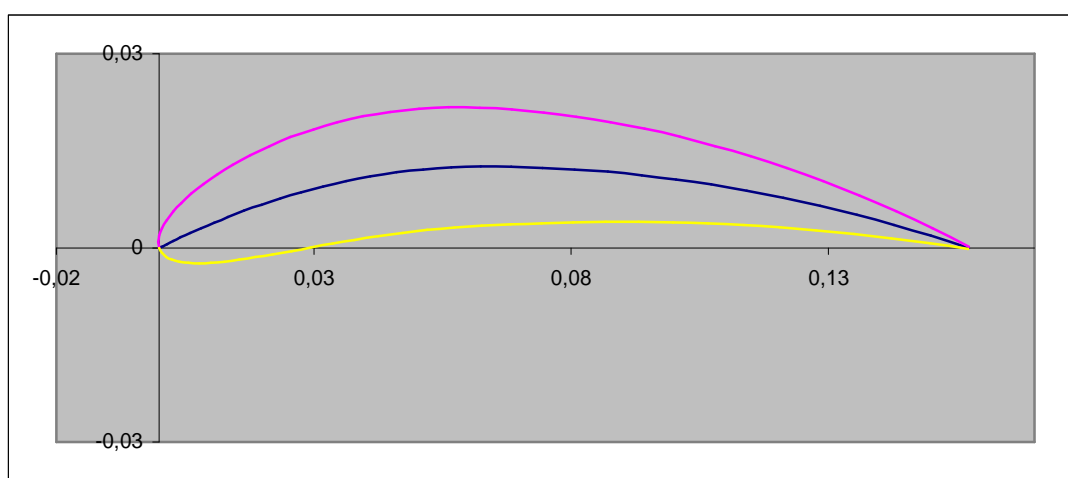
c=0,18322 (m)							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,000196	0,001051	7,81E-05	-0,00019	0,001054	0,000586	-0,0009
3	0,000782	0,002072	0,000311	1,65E-05	0,002236	0,001547	-0,00162
4	0,001757	0,00306	0,000694	0,000638	0,003542	0,002876	-0,00215
5	0,00312	0,004012	0,001221	0,001673	0,004963	0,004567	-0,00252
6	0,004867	0,004925	0,001882	0,003125	0,006488	0,006609	-0,00273
7	0,006994	0,005794	0,002664	0,004995	0,008102	0,008993	-0,00278
8	0,009498	0,006614	0,003553	0,007285	0,009786	0,011711	-0,00268
9	0,012372	0,007379	0,004531	0,009995	0,011517	0,01475	-0,00246
10	0,015611	0,008085	0,005579	0,013122	0,013272	0,018101	-0,00211
11	0,019208	0,008726	0,006676	0,016663	0,015023	0,021754	-0,00167
12	0,023155	0,009295	0,007799	0,020612	0,01674	0,025698	-0,00114
13	0,027443	0,009789	0,008922	0,024963	0,018392	0,029924	-0,00055
14	0,032064	0,010203	0,01002	0,029705	0,019947	0,034423	9,32E-05
15	0,037007	0,010533	0,011065	0,034828	0,021371	0,039187	0,000761
16	0,042263	0,010776	0,012031	0,040316	0,02263	0,044209	0,001433
17	0,047819	0,01093	0,012887	0,046153	0,02369	0,049484	0,002086
18	0,053664	0,010994	0,013607	0,052321	0,024519	0,055007	0,002696
19	0,059785	0,010968	0,01416	0,058798	0,025084	0,060773	0,003238
20	0,06617	0,010853	0,014519	0,065561	0,025355	0,06678	0,003685
21	0,072805	0,01065	0,014657	0,072584	0,025305	0,073026	0,004011
22	0,079676	0,010362	0,014608	0,079749	0,02497	0,079602	0,004249
23	0,086767	0,009991	0,014437	0,087008	0,024425	0,086526	0,004452
24	0,094064	0,009541	0,014134	0,09446	0,023667	0,093668	0,004604
25	0,101552	0,009016	0,013689	0,102087	0,022689	0,101016	0,004691
26	0,109214	0,00842	0,013092	0,109867	0,021487	0,10856	0,0047
27	0,117033	0,007755	0,012337	0,117779	0,020056	0,116287	0,00462
28	0,124994	0,007026	0,011415	0,125802	0,018394	0,124186	0,004438
29	0,133079	0,006235	0,010322	0,133915	0,0165	0,132244	0,004145
30	0,141272	0,005383	0,009052	0,142096	0,014372	0,140447	0,003734
31	0,149553	0,004473	0,007603	0,150324	0,012009	0,148783	0,003199
32	0,157907	0,003504	0,005973	0,158578	0,009412	0,157236	0,002535
33	0,166315	0,002475	0,004161	0,166836	0,006581	0,165793	0,001743
34	0,174758	0,001385	0,00217	0,175076	0,003518	0,17444	0,000822
35	0,18322	0,000231	4,52E-18	0,183277	0,000224	0,183163	-0,00022



Γράφημα 10.7.2: Αεροτομή 2

Πίνακας 10.7.3: Σταθμός 3

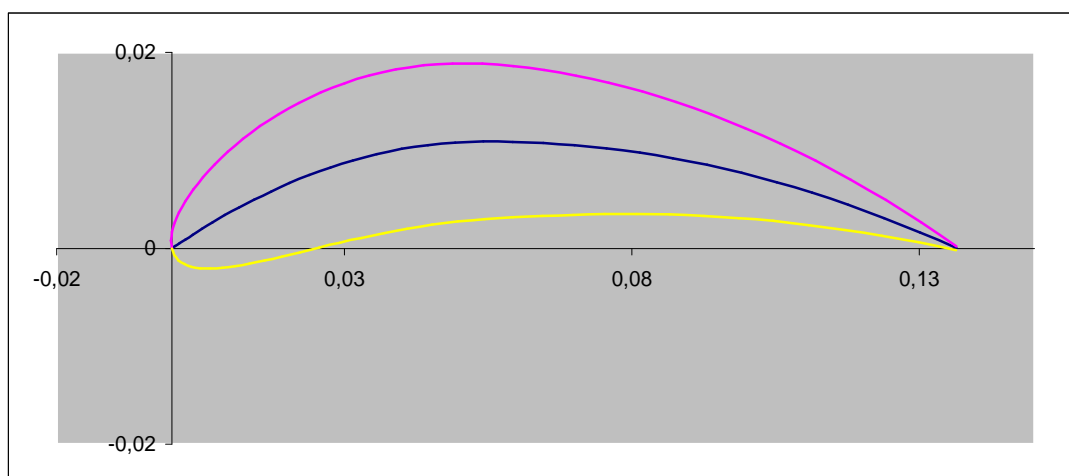
0,15721							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,000168	0,000902	6,7E-05	-0,00017	0,000905	0,000502	-0,00077
3	0,000671	0,001778	0,000267	1,42E-05	0,001919	0,001327	-0,00139
4	0,001508	0,002625	0,000596	0,000547	0,003039	0,002468	-0,00185
5	0,002677	0,003442	0,001048	0,001435	0,004259	0,003918	-0,00216
6	0,004176	0,004226	0,001615	0,002681	0,005567	0,005671	-0,00234
7	0,006001	0,004971	0,002286	0,004286	0,006952	0,007717	-0,00238
8	0,00815	0,005675	0,003049	0,006251	0,008396	0,010048	-0,0023
9	0,010616	0,006332	0,003888	0,008576	0,009882	0,012656	-0,00211
10	0,013395	0,006937	0,004787	0,011259	0,011388	0,015531	-0,00181
11	0,016481	0,007487	0,005729	0,014297	0,01289	0,018665	-0,00143
12	0,019868	0,007976	0,006692	0,017686	0,014363	0,022049	-0,00098
13	0,023547	0,0084	0,007655	0,021419	0,015781	0,025675	-0,00047
14	0,027512	0,008755	0,008597	0,025488	0,017115	0,029536	7,99E-05
15	0,031753	0,009038	0,009495	0,029883	0,018337	0,033623	0,000652
16	0,036263	0,009246	0,010323	0,034592	0,019417	0,037933	0,001229
17	0,04103	0,009378	0,011058	0,039601	0,020327	0,042459	0,001789
18	0,046045	0,009433	0,011675	0,044893	0,021038	0,047197	0,002312
19	0,051298	0,009411	0,01215	0,05045	0,021523	0,052145	0,002777
20	0,056776	0,009312	0,012458	0,056253	0,021756	0,057299	0,00316
21	0,062469	0,009138	0,012576	0,06228	0,021712	0,062659	0,00344
22	0,068364	0,008891	0,012534	0,068427	0,021425	0,068301	0,003644
23	0,074449	0,008573	0,012388	0,074655	0,020958	0,074242	0,003818
24	0,08071	0,008187	0,012127	0,08105	0,020307	0,08037	0,003948
25	0,087134	0,007736	0,011745	0,087594	0,019468	0,086675	0,004023
26	0,093708	0,007224	0,011233	0,094269	0,018436	0,093148	0,004031
27	0,100418	0,006654	0,010585	0,101058	0,017209	0,099778	0,003962
28	0,107249	0,006029	0,009794	0,107942	0,015783	0,106555	0,003806
29	0,114186	0,00535	0,008856	0,114903	0,014158	0,113469	0,003555
30	0,121215	0,004619	0,007767	0,121923	0,012331	0,120508	0,003202
31	0,128321	0,003838	0,006524	0,128983	0,010304	0,12766	0,002743
32	0,135489	0,003007	0,005125	0,136065	0,008076	0,134913	0,002174
33	0,142703	0,002124	0,003571	0,14315	0,005647	0,142255	0,001494
34	0,149948	0,001189	0,001862	0,150221	0,003018	0,149675	0,000705
35	0,157208	0,000198	3,88E-18	0,157257	0,000192	0,157159	-0,00019



Γράφημα 10.7.3: Αεροτομή 3

Πίνακας 10.7.4: Σταθμός 4

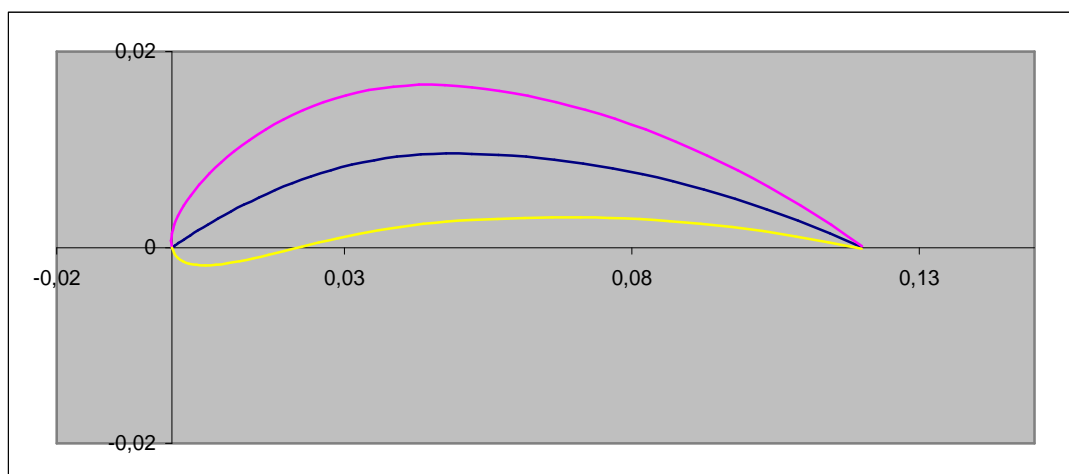
0,13644							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,000146	0,000783	5,82 ^E -05	-0,00014	0,000785	0,000436	-0,00067
3	0,000582	0,001543	0,000232	1,23E-05	0,001666	0,001152	-0,0012
4	0,001308	0,002279	0,000517	0,000475	0,002638	0,002142	-0,0016
5	0,002323	0,002988	0,00091	0,001246	0,003696	0,003401	-0,00188
6	0,003624	0,003667	0,001402	0,002327	0,004832	0,004922	-0,00203
7	0,005209	0,004315	0,001984	0,00372	0,006034	0,006697	-0,00207
8	0,007073	0,004925	0,002646	0,005425	0,007287	0,008721	-0,002
9	0,009214	0,005495	0,003374	0,007443	0,008577	0,010984	-0,00183
10	0,011626	0,006021	0,004155	0,009772	0,009883	0,01348	-0,00157
11	0,014304	0,006498	0,004972	0,012409	0,011187	0,0162	-0,00124
12	0,017243	0,006922	0,005808	0,01535	0,012466	0,019137	-0,00085
13	0,020437	0,00729	0,006644	0,01859	0,013696	0,022284	-0,00041
14	0,023878	0,007598	0,007462	0,022121	0,014854	0,025634	6,94E-05
15	0,027559	0,007844	0,00824	0,025936	0,015915	0,029182	0,000566
16	0,031473	0,008025	0,008959	0,030023	0,016852	0,032922	0,001066
17	0,03561	0,00814	0,009597	0,03437	0,017642	0,036851	0,001553
18	0,039963	0,008187	0,010133	0,038963	0,018259	0,040963	0,002007
19	0,044522	0,008168	0,010545	0,043786	0,01868	0,045257	0,00241
20	0,049277	0,008082	0,010812	0,048823	0,018882	0,049731	0,002743
21	0,054218	0,007931	0,010915	0,054053	0,018844	0,054382	0,002986
22	0,059334	0,007716	0,010879	0,059389	0,018595	0,059279	0,003162
23	0,064615	0,00744	0,010751	0,064794	0,018189	0,064436	0,003313
24	0,070049	0,007105	0,010526	0,070344	0,017625	0,069754	0,003426
25	0,075625	0,006714	0,010194	0,076024	0,016896	0,075226	0,003491
26	0,081331	0,00627	0,00975	0,081817	0,016001	0,080844	0,003498
27	0,087154	0,005775	0,009187	0,087709	0,014936	0,086599	0,003438
28	0,093082	0,005232	0,008501	0,093684	0,013698	0,092481	0,003303
29	0,099103	0,004643	0,007686	0,099726	0,012288	0,098481	0,003085
30	0,105204	0,004009	0,006741	0,105818	0,010703	0,10459	0,002779
31	0,111372	0,003331	0,005662	0,111946	0,008943	0,110797	0,002381
32	0,117592	0,002609	0,004448	0,118092	0,007009	0,117093	0,001887
33	0,123853	0,001843	0,003099	0,124242	0,004901	0,123465	0,001297
34	0,130141	0,001032	0,001616	0,130378	0,00262	0,129905	0,000612
35	0,136443	0,000172	3,37E-18	0,136486	0,000167	0,1364	-0,00017



Γράφημα 10.7.4: Αεροτομή 4

Πίνακας 10.7.5: Σταθμός 5

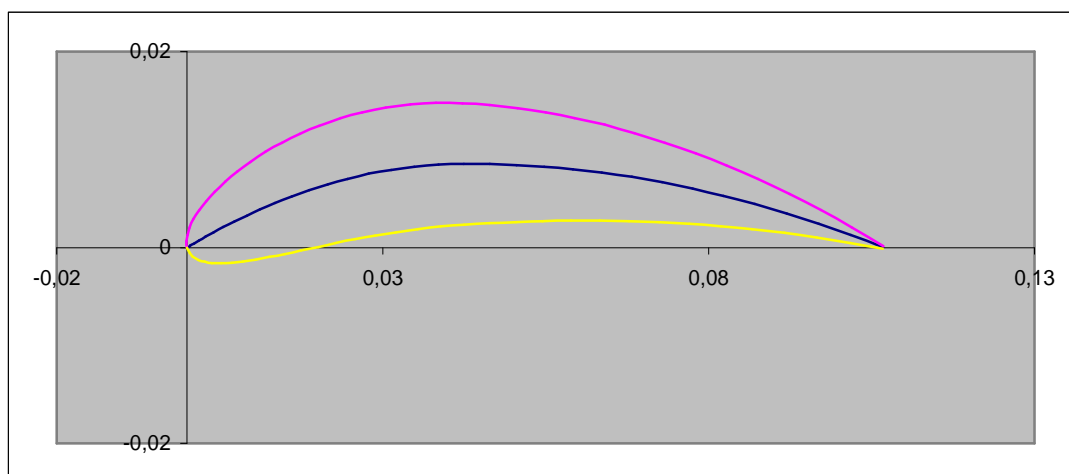
0,11997							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,000128	0,000688	5,11E-05	-0,00013	0,00069	0,000383	-0,00059
3	0,000512	0,001357	0,000204	1,08E-05	0,001464	0,001013	-0,00106
4	0,00115	0,002004	0,000455	0,000418	0,002319	0,001883	-0,00141
5	0,002043	0,002627	0,0008	0,001095	0,00325	0,00299	-0,00165
6	0,003187	0,003225	0,001232	0,002046	0,004249	0,004328	-0,00178
7	0,00458	0,003794	0,001745	0,003271	0,005305	0,005889	-0,00182
8	0,006219	0,004331	0,002327	0,004771	0,006408	0,007668	-0,00175
9	0,008102	0,004832	0,002967	0,006545	0,007541	0,009658	-0,00161
10	0,010222	0,005294	0,003653	0,008592	0,008691	0,011853	-0,00138
11	0,012578	0,005714	0,004372	0,010911	0,009837	0,014244	-0,00109
12	0,015162	0,006087	0,005107	0,013497	0,010961	0,016827	-0,00075
13	0,01797	0,00641	0,005842	0,016346	0,012043	0,019594	-0,00036
14	0,020996	0,006681	0,006561	0,019451	0,013061	0,02254	6,1E-05
15	0,024233	0,006897	0,007246	0,022805	0,013994	0,02566	0,000498
16	0,027674	0,007056	0,007878	0,026399	0,014818	0,028949	0,000938
17	0,031312	0,007157	0,008439	0,030222	0,015512	0,032403	0,001365
18	0,035139	0,007199	0,00891	0,03426	0,016055	0,036019	0,001764
19	0,039148	0,007182	0,009272	0,038501	0,016425	0,039795	0,002119
20	0,043329	0,007107	0,009507	0,04293	0,016603	0,043728	0,002412
21	0,047673	0,006974	0,009597	0,047529	0,01657	0,047818	0,002625
22	0,052172	0,006785	0,009565	0,05222	0,01635	0,052124	0,002781
23	0,056816	0,006542	0,009454	0,056973	0,015994	0,056658	0,002913
24	0,061594	0,006248	0,009255	0,061853	0,015497	0,061335	0,003013
25	0,066497	0,005904	0,008963	0,066847	0,014857	0,066146	0,00307
26	0,071514	0,005513	0,008573	0,071942	0,01407	0,071086	0,003076
27	0,076634	0,005078	0,008078	0,077123	0,013133	0,076146	0,003023
28	0,081847	0,004601	0,007475	0,082376	0,012045	0,081318	0,002904
29	0,087141	0,004083	0,006759	0,087688	0,010804	0,086594	0,002713
30	0,092506	0,003525	0,005927	0,093046	0,009411	0,091966	0,002444
31	0,097929	0,002929	0,004979	0,098433	0,007864	0,097424	0,002093
32	0,103399	0,002294	0,003911	0,103838	0,006163	0,102959	0,001659
33	0,108904	0,001621	0,002725	0,109245	0,004309	0,108563	0,00114
34	0,114433	0,000907	0,001421	0,114641	0,002304	0,114225	0,000538
35	0,119974	0,000151	2,96E-18	0,120011	0,000146	0,119936	-0,00015



Γράφημα 10.7.5: Αεροτομή 5

Πίνακας 10.7.6: Σταθμός 6

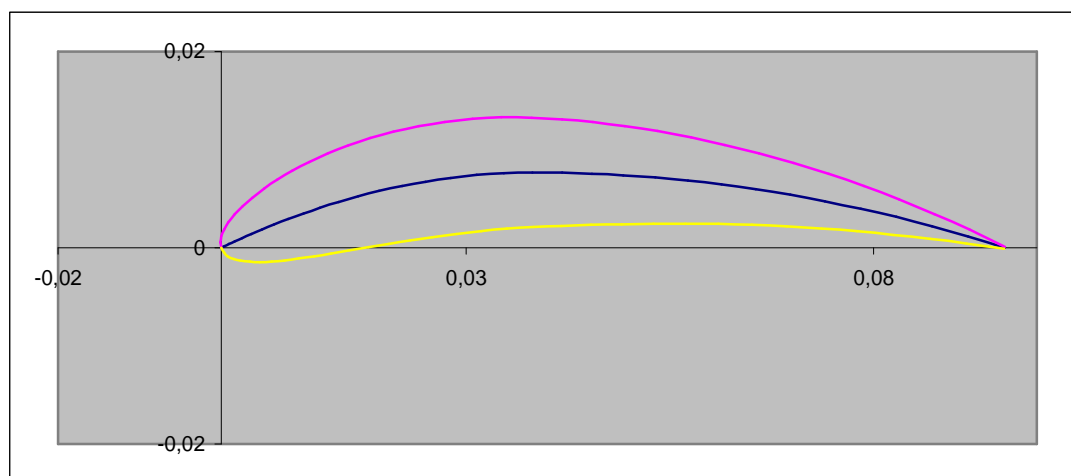
A/A	0,10678						
	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,000114	0,000613	4,55E-05	-0,00011	0,000614	0,000341	-0,00052
3	0,000455	0,001207	0,000181	9,62E-06	0,001303	0,000901	-0,00094
4	0,001024	0,001783	0,000405	0,000372	0,002064	0,001676	-0,00125
5	0,001818	0,002338	0,000712	0,000975	0,002893	0,002661	-0,00147
6	0,002836	0,00287	0,001097	0,001821	0,003781	0,003851	-0,00159
7	0,004076	0,003376	0,001553	0,002911	0,004722	0,005241	-0,00162
8	0,005535	0,003854	0,002071	0,004246	0,005703	0,006825	-0,00156
9	0,00721	0,004301	0,002641	0,005825	0,006712	0,008596	-0,00143
10	0,009098	0,004712	0,003252	0,007647	0,007735	0,010549	-0,00123
11	0,011194	0,005085	0,003891	0,009711	0,008755	0,012677	-0,00097
12	0,013494	0,005417	0,004545	0,012012	0,009755	0,014976	-0,00067
13	0,015993	0,005705	0,0052	0,014548	0,010718	0,017439	-0,00032
14	0,018686	0,005946	0,005839	0,017312	0,011624	0,020061	5,43E-05
15	0,021567	0,006138	0,006449	0,020297	0,012454	0,022837	0,000443
16	0,02463	0,00628	0,007011	0,023495	0,013188	0,025764	0,000835
17	0,027868	0,00637	0,00751	0,026897	0,013806	0,028838	0,001215
18	0,031274	0,006407	0,00793	0,030491	0,014289	0,032057	0,00157
19	0,034842	0,006392	0,008252	0,034266	0,014618	0,035417	0,001886
20	0,038563	0,006325	0,008462	0,038207	0,014776	0,038918	0,002147
21	0,042429	0,006207	0,008542	0,0423	0,014747	0,042558	0,002336
22	0,046433	0,006039	0,008513	0,046476	0,014552	0,04639	0,002475
23	0,050566	0,005822	0,008414	0,050706	0,014234	0,050426	0,002593
24	0,054818	0,00556	0,008237	0,055049	0,013793	0,054588	0,002681
25	0,059182	0,005254	0,007977	0,059494	0,013223	0,05887	0,002732
26	0,063647	0,004907	0,00763	0,064028	0,012522	0,063266	0,002738
27	0,068204	0,00452	0,007189	0,068639	0,011688	0,06777	0,002691
28	0,072844	0,004095	0,006652	0,073315	0,01072	0,072373	0,002585
29	0,077556	0,003633	0,006015	0,078042	0,009616	0,077069	0,002414
30	0,08233	0,003137	0,005275	0,08281	0,008376	0,081849	0,002175
31	0,087156	0,002607	0,004431	0,087605	0,006999	0,086707	0,001863
32	0,092024	0,002042	0,003481	0,092416	0,005485	0,091633	0,001477
33	0,096924	0,001443	0,002425	0,097228	0,003835	0,09662	0,001015
34	0,101845	0,000807	0,001264	0,10203	0,00205	0,10166	0,000479
35	0,106776	0,000135	2,63E-18	0,10681	0,00013	0,106743	-0,00013



Γράφημα 10.7.6: Αεροτομή 6

Πίνακας 10.7.7: Σταθμός 7

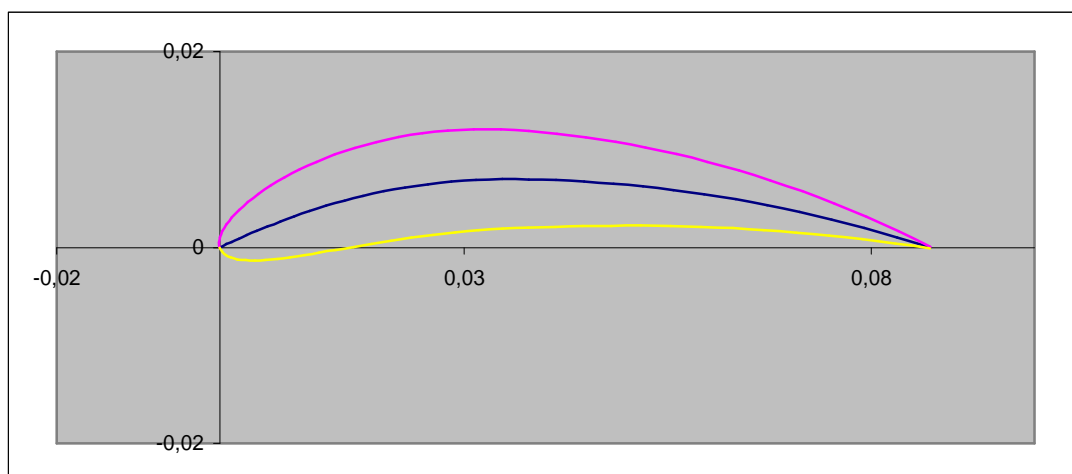
0,09604							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0,000102	0,000551	4,09E-05	-0,0001	0,000553	0,000307	-0,00047
3	0,00041	0,001086	0,000163	8,65E-06	0,001172	0,000811	-0,00085
4	0,000921	0,001604	0,000364	0,000334	0,001857	0,001508	-0,00113
5	0,001635	0,002103	0,00064	0,000877	0,002602	0,002394	-0,00132
6	0,002551	0,002582	0,000987	0,001638	0,003401	0,003464	-0,00143
7	0,003666	0,003037	0,001397	0,002618	0,004247	0,004714	-0,00145
8	0,004979	0,003467	0,001863	0,003819	0,00513	0,006139	-0,0014
9	0,006486	0,003868	0,002375	0,005239	0,006037	0,007732	-0,00129
10	0,008184	0,004238	0,002925	0,006879	0,006957	0,009489	-0,00111
11	0,010069	0,004574	0,0035	0,008735	0,007875	0,011403	-0,00088
12	0,012138	0,004873	0,004088	0,010805	0,008775	0,013471	-0,0006
13	0,014386	0,005132	0,004677	0,013086	0,009641	0,015686	-0,00029
14	0,016808	0,005349	0,005252	0,015572	0,010456	0,018044	4,88E-05
15	0,019399	0,005521	0,005801	0,018257	0,011202	0,020542	0,000399
16	0,022154	0,005649	0,006307	0,021134	0,011862	0,023175	0,000751
17	0,025067	0,00573	0,006756	0,024194	0,012418	0,02594	0,001093
18	0,028131	0,005763	0,007133	0,027427	0,012853	0,028835	0,001413
19	0,03134	0,00575	0,007423	0,030822	0,013149	0,031857	0,001696
20	0,034687	0,005689	0,007611	0,034367	0,013291	0,035006	0,001931
21	0,038165	0,005583	0,007683	0,038049	0,013265	0,03828	0,002102
22	0,041766	0,005432	0,007658	0,041805	0,013089	0,041728	0,002226
23	0,045484	0,005237	0,007568	0,04561	0,012804	0,045357	0,002332
24	0,049309	0,005002	0,007409	0,049516	0,012406	0,049101	0,002412
25	0,053234	0,004726	0,007176	0,053514	0,011894	0,052953	0,002458
26	0,05725	0,004414	0,006863	0,057593	0,011263	0,056907	0,002463
27	0,061349	0,004065	0,006467	0,06174	0,010513	0,060958	0,00242
28	0,065522	0,003683	0,005984	0,065946	0,009642	0,065099	0,002325
29	0,069761	0,003268	0,005411	0,070199	0,008649	0,069323	0,002172
30	0,074055	0,002822	0,004745	0,074487	0,007534	0,073623	0,001956
31	0,078396	0,002345	0,003986	0,0788	0,006295	0,077992	0,001676
32	0,082775	0,001837	0,003131	0,083127	0,004934	0,082423	0,001328
33	0,087183	0,001298	0,002181	0,087456	0,00345	0,086909	0,000913
34	0,091609	0,000726	0,001137	0,091775	0,001844	0,091442	0,000431
35	0,096044	0,000121	2,37E-18	0,096074	0,000117	0,096014	-0,00012



Γράφημα 10.7.7 Αεροτομή 7

Πίνακας 10.7.8 Σταθμός 8

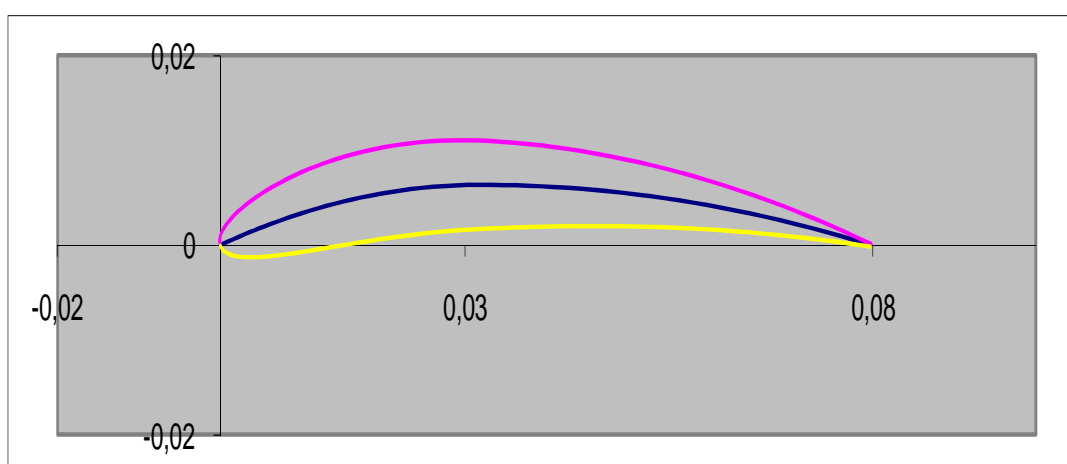
0,087185468							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	9,3 ^E -05	0,0005	3,72 ^E -05	-9,3 ^E -05	0,000502	0,000279	-0,00043
3	0,000372	0,000986	0,000148	7,85E-06	0,001064	0,000736	-0,00077
4	0,000836	0,001456	0,00033	0,000303	0,001686	0,001369	-0,00102
5	0,001484	0,001909	0,000581	0,000796	0,002362	0,002173	-0,0012
6	0,002316	0,002343	0,000896	0,001487	0,003088	0,003145	-0,0013
7	0,003328	0,002757	0,001268	0,002377	0,003855	0,00428	-0,00132
8	0,00452	0,003147	0,001691	0,003467	0,004656	0,005572	-0,00128
9	0,005887	0,003511	0,002156	0,004756	0,00548	0,007019	-0,00117
10	0,007429	0,003847	0,002655	0,006244	0,006315	0,008613	-0,00101
11	0,00914	0,004152	0,003177	0,007929	0,007149	0,010351	-0,00079
12	0,011018	0,004423	0,003711	0,009808	0,007966	0,012228	-0,00054
13	0,013059	0,004658	0,004246	0,011879	0,008752	0,014239	-0,00026
14	0,015258	0,004855	0,004768	0,014135	0,009492	0,01638	4,43E-05
15	0,01761	0,005012	0,005266	0,016573	0,010169	0,018647	0,000362
16	0,020111	0,005128	0,005725	0,019184	0,010768	0,021037	0,000681
17	0,022755	0,005201	0,006132	0,021962	0,011273	0,023547	0,000992
18	0,025536	0,005232	0,006475	0,024897	0,011667	0,026175	0,001282
19	0,028449	0,005219	0,006738	0,027979	0,011936	0,028919	0,00154
20	0,031487	0,005164	0,006909	0,031197	0,012065	0,031777	0,001753
21	0,034644	0,005068	0,006975	0,034539	0,012041	0,03475	0,001908
22	0,037914	0,004931	0,006951	0,037949	0,011882	0,037879	0,002021
23	0,041288	0,004754	0,00687	0,041403	0,011623	0,041174	0,002117
24	0,044761	0,00454	0,006726	0,044949	0,011262	0,044572	0,002189
25	0,048324	0,00429	0,006514	0,048578	0,010797	0,048069	0,002231
26	0,051969	0,004007	0,00623	0,05228	0,010224	0,051658	0,002235
27	0,05569	0,00369	0,00587	0,056045	0,009544	0,055335	0,002197
28	0,059479	0,003343	0,005432	0,059863	0,008753	0,059094	0,002111
29	0,063326	0,002967	0,004912	0,063724	0,007852	0,062928	0,001971
30	0,067224	0,002562	0,004307	0,067617	0,006839	0,066832	0,001776
31	0,071165	0,002129	0,003618	0,071532	0,005715	0,070798	0,001521
32	0,07514	0,001667	0,002842	0,07546	0,004479	0,074821	0,001206
33	0,079141	0,001178	0,00198	0,079389	0,003132	0,078893	0,000829
34	0,083159	0,000659	0,001032	0,08331	0,001674	0,083008	0,000391
35	0,087185	0,00011	2,15E-18	0,087213	0,000106	0,087158	-0,00011



Γράφημα 10.7.8: Αεροτομή 8

Πίνακας 10.7.9: Σταθμός 9

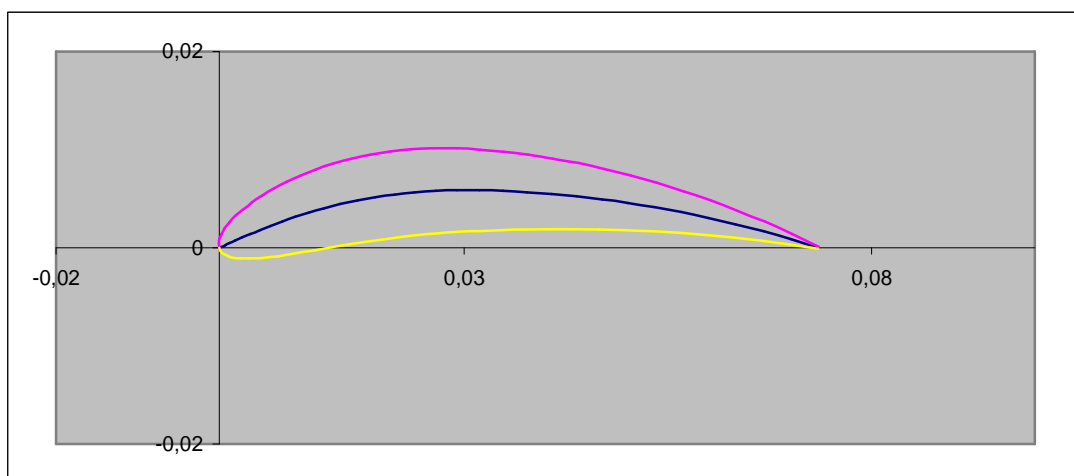
0,079769387							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	8,51 ^E -05	0,000458	3,4 ^E -05	-8,5 ^E -05	0,000459	0,000255	-0,00039
3	0,00034	0,000902	0,000135	7,19E-06	0,000974	0,000673	-0,0007
4	0,000765	0,001332	0,000302	0,000278	0,001542	0,001252	-0,00094
5	0,001358	0,001747	0,000532	0,000728	0,002161	0,001988	-0,0011
6	0,002119	0,002144	0,000819	0,00136	0,002825	0,002877	-0,00119
7	0,003045	0,002522	0,00116	0,002175	0,003527	0,003916	-0,00121
8	0,004135	0,002879	0,001547	0,003172	0,00426	0,005098	-0,00117
9	0,005387	0,003213	0,001973	0,004352	0,005014	0,006422	-0,00107
10	0,006797	0,00352	0,002429	0,005713	0,005778	0,007881	-0,00092
11	0,008363	0,003799	0,002907	0,007255	0,00654	0,009471	-0,00073
12	0,010081	0,004047	0,003395	0,008974	0,007288	0,011188	-0,0005
13	0,011948	0,004262	0,003884	0,010868	0,008007	0,013028	-0,00024
14	0,01396	0,004442	0,004362	0,012933	0,008684	0,014987	4,06E-05
15	0,016112	0,004586	0,004818	0,015163	0,009304	0,017061	0,000331
16	0,0184	0,004692	0,005238	0,017553	0,009852	0,019248	0,000623
17	0,020819	0,004759	0,005611	0,020094	0,010314	0,021544	0,000908
18	0,023364	0,004787	0,005924	0,022779	0,010675	0,023949	0,001173
19	0,026029	0,004775	0,006165	0,025599	0,010921	0,026459	0,001409
20	0,028809	0,004725	0,006321	0,028543	0,011039	0,029074	0,001604
21	0,031698	0,004637	0,006381	0,031601	0,011017	0,031794	0,001746
22	0,034689	0,004511	0,00636	0,034721	0,010871	0,034657	0,001849
23	0,037776	0,00435	0,006286	0,037881	0,010634	0,037671	0,001937
24	0,040953	0,004154	0,006154	0,041126	0,010304	0,040781	0,002003
25	0,044213	0,003925	0,00596	0,044446	0,009878	0,04398	0,002041
26	0,047549	0,003666	0,0057	0,047833	0,009355	0,047264	0,002045
27	0,050953	0,003376	0,005371	0,051278	0,008732	0,050629	0,00201
28	0,054419	0,003059	0,00497	0,054771	0,008008	0,054068	0,001931
29	0,057939	0,002714	0,004494	0,058303	0,007184	0,057576	0,001804
30	0,061506	0,002344	0,003941	0,061865	0,006257	0,061147	0,001625
31	0,065112	0,001947	0,00331	0,065447	0,005228	0,064776	0,001392
32	0,068749	0,001526	0,0026	0,069041	0,004098	0,068457	0,001103
33	0,072409	0,001078	0,001812	0,072636	0,002865	0,072182	0,000758
34	0,076085	0,000603	0,000945	0,076224	0,001532	0,075947	0,000358
35	0,079769	0,000101	1,97E-18	0,079794	9,74E-05	0,079744	-9,7E-05



Γράφημα 10.7.9: Αεροτομή 9

Πίνακας 10.7.10: Σταθμός 10

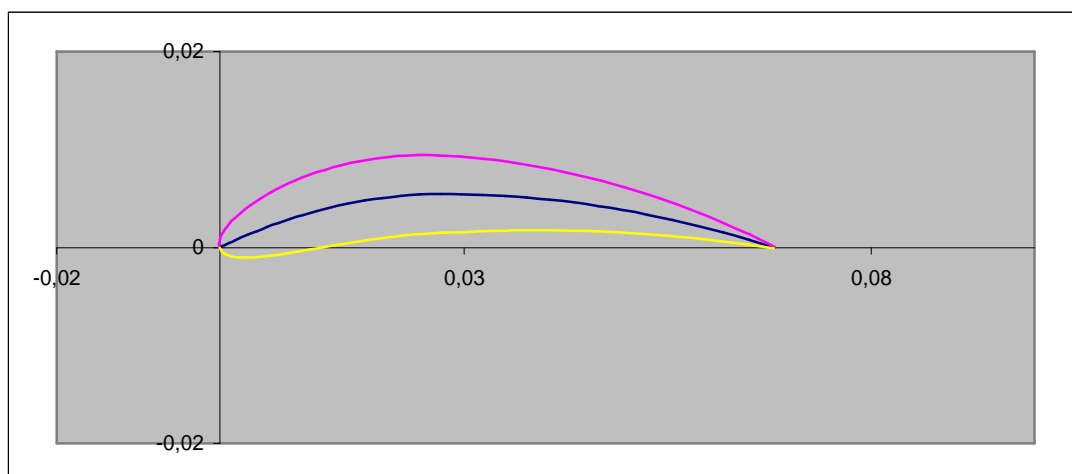
0,073481914							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	7,84 ^E -05	0,000422	3,13 ^E -05	-7,8 ^E -05	0,000423	0,000235	-0,00036
3	0,000313	0,000831	0,000125	6,62E-06	0,000897	0,00062	-0,00065
4	0,000705	0,001227	0,000278	0,000256	0,001421	0,001154	-0,00086
5	0,001251	0,001609	0,00049	0,000671	0,001991	0,001832	-0,00101
6	0,001952	0,001975	0,000755	0,001253	0,002602	0,002651	-0,00109
7	0,002805	0,002324	0,001069	0,002003	0,003249	0,003607	-0,00111
8	0,003809	0,002652	0,001425	0,002922	0,003925	0,004697	-0,00107
9	0,004962	0,00296	0,001817	0,004009	0,004619	0,005916	-0,00098
10	0,006261	0,003243	0,002238	0,005263	0,005323	0,00726	-0,00085
11	0,007704	0,0035	0,002678	0,006683	0,006025	0,008724	-0,00067
12	0,009286	0,003728	0,003128	0,008267	0,006714	0,010306	-0,00046
13	0,011006	0,003926	0,003578	0,010012	0,007376	0,012001	-0,00022
14	0,01286	0,004092	0,004019	0,011914	0,008	0,013805	3,74E-05
15	0,014842	0,004224	0,004438	0,013968	0,008571	0,015716	0,000305
16	0,01695	0,004322	0,004825	0,016169	0,009076	0,017731	0,000574
17	0,019178	0,004384	0,005169	0,01851	0,009501	0,019846	0,000836
18	0,021522	0,004409	0,005457	0,020984	0,009833	0,022061	0,001081
19	0,023977	0,004399	0,005679	0,023581	0,01006	0,024374	0,001298
20	0,026538	0,004353	0,005823	0,026294	0,010169	0,026783	0,001477
21	0,029199	0,004271	0,005878	0,029111	0,010149	0,029288	0,001608
22	0,031955	0,004156	0,005859	0,031984	0,010014	0,031925	0,001703
23	0,034799	0,004007	0,00579	0,034895	0,009796	0,034702	0,001784
24	0,037725	0,003827	0,005669	0,037884	0,009492	0,037566	0,001845
25	0,040728	0,003616	0,00549	0,040943	0,0091	0,040514	0,00188
26	0,043801	0,003377	0,005251	0,044063	0,008617	0,043539	0,001884
27	0,046937	0,00311	0,004948	0,047236	0,008044	0,046638	0,001852
28	0,05013	0,002818	0,004578	0,050454	0,007377	0,049806	0,001779
29	0,053373	0,002501	0,00414	0,053708	0,006617	0,053038	0,001662
30	0,056658	0,002159	0,00363	0,056989	0,005764	0,056328	0,001497
31	0,05998	0,001794	0,003049	0,060289	0,004816	0,05967	0,001282
32	0,06333	0,001405	0,002396	0,063599	0,003775	0,063061	0,001016
33	0,066702	0,000993	0,001669	0,066911	0,002639	0,066493	0,000699
34	0,070088	0,000556	0,00087	0,070216	0,001411	0,069961	0,000329
35	0,073482	9,26E-05	1,81E-18	0,073505	8,97E-05	0,073459	-9E-05



Γράφημα 10.7.10: Αεροτομή 10

Πίνακας 10.7.11: Σταθμός 11

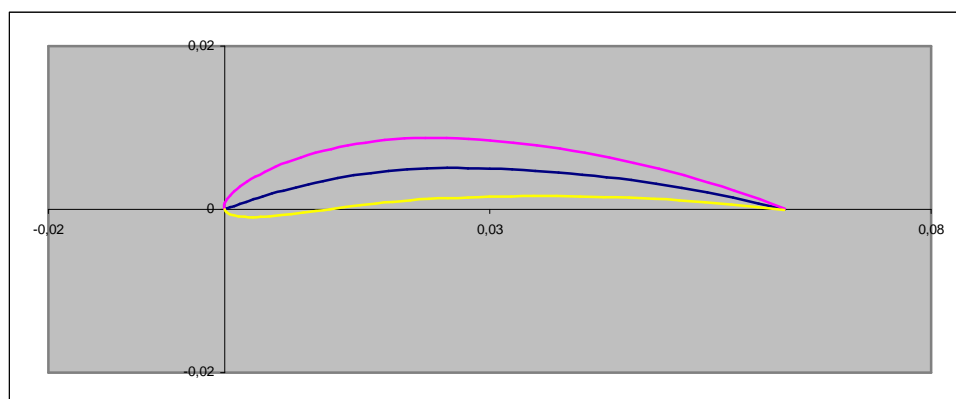
0,068090578							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	7,27E-05	0,000391	2,9E-05	-7,2E-05	0,000392	0,000218	-0,00033
3	0,00029	0,00077	0,000116	6,13E-06	0,000831	0,000575	-0,0006
4	0,000653	0,001137	0,000258	0,000237	0,001316	0,001069	-0,0008
5	0,001159	0,001491	0,000454	0,000622	0,001845	0,001697	-0,00094
6	0,001809	0,00183	0,000699	0,001161	0,002411	0,002456	-0,00101
7	0,002599	0,002153	0,00099	0,001856	0,003011	0,003342	-0,00103
8	0,00353	0,002458	0,00132	0,002708	0,003637	0,004352	-0,001
9	0,004598	0,002742	0,001684	0,003714	0,00428	0,005482	-0,00091
10	0,005802	0,003005	0,002074	0,004877	0,004932	0,006727	-0,00079
11	0,007138	0,003243	0,002481	0,006192	0,005583	0,008084	-0,00062
12	0,008605	0,003454	0,002898	0,00766	0,006221	0,00955	-0,00042
13	0,010199	0,003638	0,003316	0,009277	0,006835	0,011121	-0,0002
14	0,011916	0,003792	0,003724	0,011039	0,007413	0,012793	3,46E-05
15	0,013753	0,003914	0,004112	0,012943	0,007942	0,014563	0,000283
16	0,015706	0,004005	0,004471	0,014983	0,00841	0,01643	0,000532
17	0,017771	0,004062	0,004789	0,017152	0,008804	0,01839	0,000775
18	0,019943	0,004086	0,005057	0,019444	0,009112	0,020442	0,001001
19	0,022218	0,004076	0,005262	0,021851	0,009322	0,022585	0,001203
20	0,024591	0,004033	0,005396	0,024365	0,009423	0,024818	0,001369
21	0,027057	0,003958	0,005447	0,026975	0,009404	0,027139	0,00149
22	0,02961	0,003851	0,005429	0,029637	0,00928	0,029583	0,001578
23	0,032246	0,003713	0,005365	0,032335	0,009077	0,032156	0,001653
24	0,034957	0,003546	0,005253	0,035105	0,008795	0,03481	0,00171
25	0,03774	0,003351	0,005087	0,037939	0,008432	0,037541	0,001742
26	0,040587	0,003129	0,004865	0,04083	0,007985	0,040344	0,001746
27	0,043493	0,002882	0,004585	0,043771	0,007453	0,043216	0,001716
28	0,046452	0,002611	0,004242	0,046752	0,006836	0,046152	0,001648
29	0,049457	0,002317	0,003836	0,049767	0,006132	0,049146	0,00154
30	0,052501	0,002001	0,003364	0,052808	0,005341	0,052195	0,001387
31	0,055579	0,001662	0,002826	0,055865	0,004463	0,055292	0,001188
32	0,058683	0,001302	0,00222	0,058933	0,003498	0,058434	0,000942
33	0,061808	0,00092	0,001547	0,062002	0,002446	0,061614	0,000647
34	0,064946	0,000515	0,000806	0,065064	0,001307	0,064828	0,000305
35	0,068091	8,58E-05	1,68E-18	0,068112	8,31E-05	0,068069	-8,3E-05



Σχήμα 10.7.11: Αεροτομή. 11

Πίνακας 10.7.12: Σταθμός 12

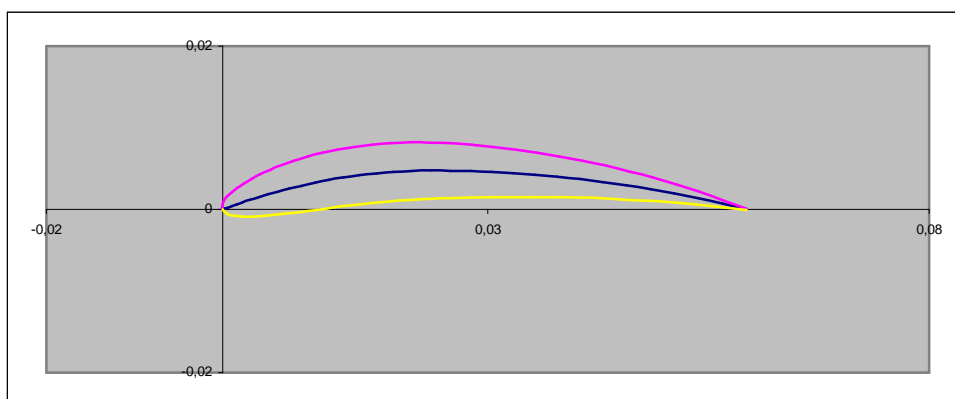
0,063420836							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	6,77E-05	0,000364	2,7E-05	-6,7E-05	0,000365	0,000203	-0,00031
3	0,000271	0,000717	0,000108	5,71E-06	0,000774	0,000535	-0,00056
4	0,000608	0,001059	0,00024	0,000221	0,001226	0,000996	-0,00075
5	0,00108	0,001389	0,000423	0,000579	0,001718	0,001581	-0,00087
6	0,001685	0,001705	0,000651	0,001082	0,002246	0,002288	-0,00094
7	0,002421	0,002005	0,000922	0,001729	0,002804	0,003113	-0,00096
8	0,003288	0,002289	0,00123	0,002522	0,003387	0,004054	-0,00093
9	0,004283	0,002554	0,001568	0,00346	0,003987	0,005106	-0,00085
10	0,005404	0,002799	0,001931	0,004542	0,004594	0,006266	-0,00073
11	0,006649	0,00302	0,002311	0,005768	0,0052	0,00753	-0,00058
12	0,008015	0,003218	0,0027	0,007135	0,005794	0,008895	-0,0004
13	0,009499	0,003389	0,003088	0,008641	0,006366	0,010358	-0,00019
14	0,011099	0,003532	0,003468	0,010282	0,006904	0,011915	3,23E-05
15	0,01281	0,003646	0,00383	0,012055	0,007397	0,013564	0,000263
16	0,014629	0,00373	0,004164	0,013955	0,007833	0,015303	0,000496
17	0,016552	0,003783	0,004461	0,015976	0,0082	0,017129	0,000722
18	0,018576	0,003806	0,00471	0,018111	0,008487	0,01904	0,000933
19	0,020694	0,003797	0,004901	0,020353	0,008683	0,021036	0,00112
20	0,022905	0,003757	0,005026	0,022694	0,008777	0,023116	0,001275
21	0,025201	0,003686	0,005073	0,025125	0,008759	0,025278	0,001388
22	0,027579	0,003587	0,005057	0,027605	0,008643	0,027554	0,00147
23	0,030034	0,003458	0,004997	0,030117	0,008455	0,029951	0,00154
24	0,03256	0,003303	0,004892	0,032697	0,008192	0,032423	0,001593
25	0,035152	0,003121	0,004738	0,035337	0,007854	0,034966	0,001623
26	0,037804	0,002914	0,004532	0,03803	0,007437	0,037578	0,001626
27	0,040511	0,002684	0,00427	0,040769	0,006942	0,040252	0,001598
28	0,043266	0,002432	0,003951	0,043546	0,006367	0,042987	0,001535
29	0,046065	0,002158	0,003573	0,046354	0,005711	0,045776	0,001434
30	0,048901	0,001863	0,003133	0,049186	0,004975	0,048615	0,001292
31	0,051767	0,001548	0,002632	0,052034	0,004157	0,0515	0,001107
32	0,054659	0,001213	0,002068	0,054891	0,003258	0,054427	0,000877
33	0,057569	0,000857	0,00144	0,05775	0,002278	0,057389	0,000603
34	0,060492	0,000479	0,000751	0,060602	0,001218	0,060382	0,000284
35	0,063421	7,99E-05	1,56E-18	0,063441	7,74E-05	0,063401	-7,7E-05



Γράφημα 10.7.12: Αεροτομή 12

Πίνακας 10.7.13: Σταθμός 13

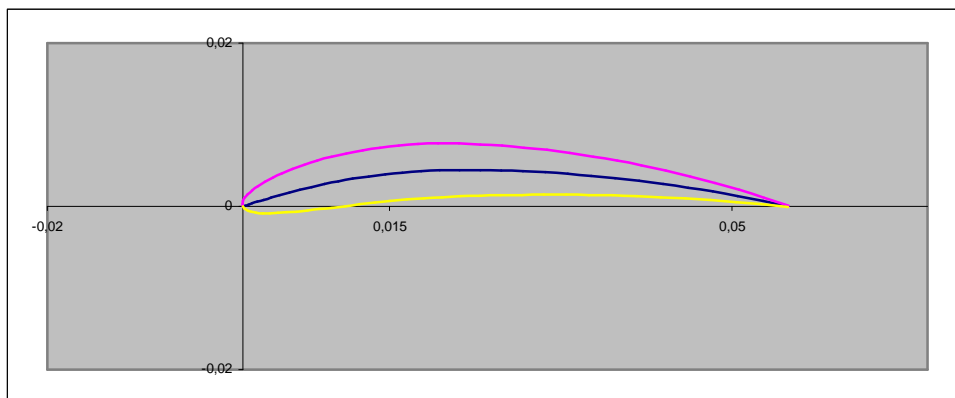
0,059339658							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	6,33 ^E -05	0,00034	2,53 ^E -05	-6,3 ^E -05	0,000341	0,00019	-0,00029
3	0,000253	0,000671	0,000101	5,35E-06	0,000724	0,000501	-0,00052
4	0,000569	0,000991	0,000225	0,000207	0,001147	0,000932	-0,0007
5	0,00101	0,001299	0,000396	0,000542	0,001607	0,001479	-0,00082
6	0,001576	0,001595	0,00061	0,001012	0,002101	0,00214	-0,00088
7	0,002265	0,001876	0,000863	0,001618	0,002624	0,002913	-0,0009
8	0,003076	0,002142	0,001151	0,00236	0,003169	0,003793	-0,00087
9	0,004007	0,00239	0,001468	0,003237	0,00373	0,004777	-0,00079
10	0,005056	0,002619	0,001807	0,00425	0,004298	0,005862	-0,00068
11	0,006221	0,002826	0,002162	0,005397	0,004865	0,007045	-0,00054
12	0,007499	0,003011	0,002526	0,006676	0,005421	0,008323	-0,00037
13	0,008888	0,00317	0,00289	0,008085	0,005957	0,009691	-0,00018
14	0,010385	0,003305	0,003245	0,009621	0,00646	0,011148	3,02E-05
15	0,011986	0,003411	0,003584	0,01128	0,006921	0,012691	0,000246
16	0,013688	0,00349	0,003896	0,013057	0,007329	0,014318	0,000464
17	0,015487	0,00354	0,004174	0,014948	0,007672	0,016027	0,000675
18	0,01738	0,003561	0,004407	0,016945	0,007941	0,017815	0,000873
19	0,019363	0,003552	0,004586	0,019043	0,008124	0,019683	0,001048
20	0,021431	0,003515	0,004702	0,021233	0,008212	0,021628	0,001193
21	0,02358	0,003449	0,004747	0,023508	0,008195	0,023651	0,001298
22	0,025805	0,003356	0,004731	0,025829	0,008087	0,025781	0,001375
23	0,028101	0,003236	0,004676	0,028179	0,007911	0,028023	0,001441
24	0,030465	0,00309	0,004578	0,030593	0,007665	0,030336	0,00149
25	0,03289	0,00292	0,004433	0,033063	0,007348	0,032716	0,001518
26	0,035371	0,002727	0,00424	0,035583	0,006959	0,035159	0,001521
27	0,037904	0,002512	0,003995	0,038145	0,006496	0,037662	0,001495
28	0,040482	0,002276	0,003697	0,040744	0,005957	0,04022	0,001437
29	0,043101	0,002019	0,003343	0,043371	0,005344	0,04283	0,001342
30	0,045754	0,001744	0,002932	0,046021	0,004655	0,045487	0,001209
31	0,048436	0,001449	0,002462	0,048686	0,003889	0,048186	0,001035
32	0,051142	0,001135	0,001934	0,051359	0,003048	0,050924	0,000821
33	0,053864	0,000802	0,001348	0,054033	0,002131	0,053696	0,000564
34	0,056599	0,000449	0,000703	0,056702	0,001139	0,056496	0,000266
35	0,05934	7,48E-05	1,46E-18	0,059358	7,24E-05	0,059321	-7,2E-05



Γράφημα 10.7.13: Αεροτομή 13

Πίνακας 10.7.14: Σταθμός 14

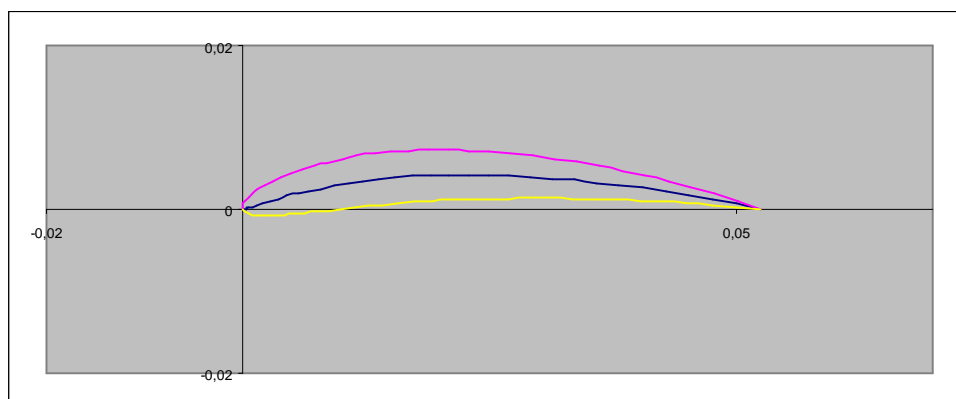
0,055744191							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	5,95E-05	0,00032	2,38E-05	-5,9E-05	0,000321	0,000178	-0,00027
3	0,000238	0,00063	9,46E-05	5,02E-06	0,00068	0,000471	-0,00049
4	0,000535	0,000931	0,000211	0,000194	0,001078	0,000875	-0,00066
5	0,000949	0,001221	0,000372	0,000509	0,00151	0,001389	-0,00077
6	0,001481	0,001498	0,000573	0,000951	0,001974	0,002011	-0,00083
7	0,002128	0,001763	0,000811	0,00152	0,002465	0,002736	-0,00084
8	0,00289	0,002012	0,001081	0,002217	0,002977	0,003563	-0,00082
9	0,003764	0,002245	0,001379	0,003041	0,003504	0,004488	-0,00075
10	0,00475	0,00246	0,001698	0,003992	0,004038	0,005507	-0,00064
11	0,005844	0,002655	0,002031	0,00507	0,004571	0,006618	-0,00051
12	0,007045	0,002828	0,002373	0,006271	0,005093	0,007818	-0,00035
13	0,00835	0,002978	0,002715	0,007595	0,005596	0,009104	-0,00017
14	0,009755	0,003104	0,003049	0,009038	0,006069	0,010473	2,83E-05
15	0,011259	0,003205	0,003367	0,010596	0,006502	0,011923	0,000231
16	0,012858	0,003279	0,00366	0,012266	0,006885	0,013451	0,000436
17	0,014549	0,003325	0,003921	0,014042	0,007208	0,015055	0,000634
18	0,016327	0,003345	0,00414	0,015919	0,00746	0,016736	0,00082
19	0,01819	0,003337	0,004308	0,017889	0,007632	0,01849	0,000985
20	0,020132	0,003302	0,004417	0,019947	0,007714	0,020318	0,001121
21	0,022151	0,00324	0,004459	0,022084	0,007699	0,022218	0,00122
22	0,024241	0,003153	0,004444	0,024264	0,007597	0,024219	0,001292
23	0,026399	0,00304	0,004392	0,026472	0,007431	0,026325	0,001354
24	0,028619	0,002903	0,0043	0,028739	0,007201	0,028498	0,0014
25	0,030897	0,002743	0,004165	0,03106	0,006903	0,030734	0,001426
26	0,033228	0,002562	0,003983	0,033427	0,006537	0,033029	0,001429
27	0,035607	0,00236	0,003753	0,035834	0,006102	0,03538	0,001405
28	0,038029	0,002138	0,003473	0,038275	0,005596	0,037783	0,001349
29	0,040489	0,001897	0,00314	0,040743	0,00502	0,040235	0,001261
30	0,042982	0,001638	0,002754	0,043232	0,004373	0,042731	0,001135
31	0,045501	0,001361	0,002313	0,045736	0,003654	0,045267	0,000973
32	0,048043	0,001066	0,001817	0,048247	0,002864	0,047839	0,000771
33	0,050601	0,000753	0,001266	0,050759	0,002002	0,050442	0,00053
34	0,05317	0,000421	0,00066	0,053266	0,00107	0,053073	0,00025
35	0,055744	7,02E-05	1,38E-18	0,055762	6,8E-05	0,055727	-6,8E-05



Γράφημα 10.7.14: Αεροτομή 14

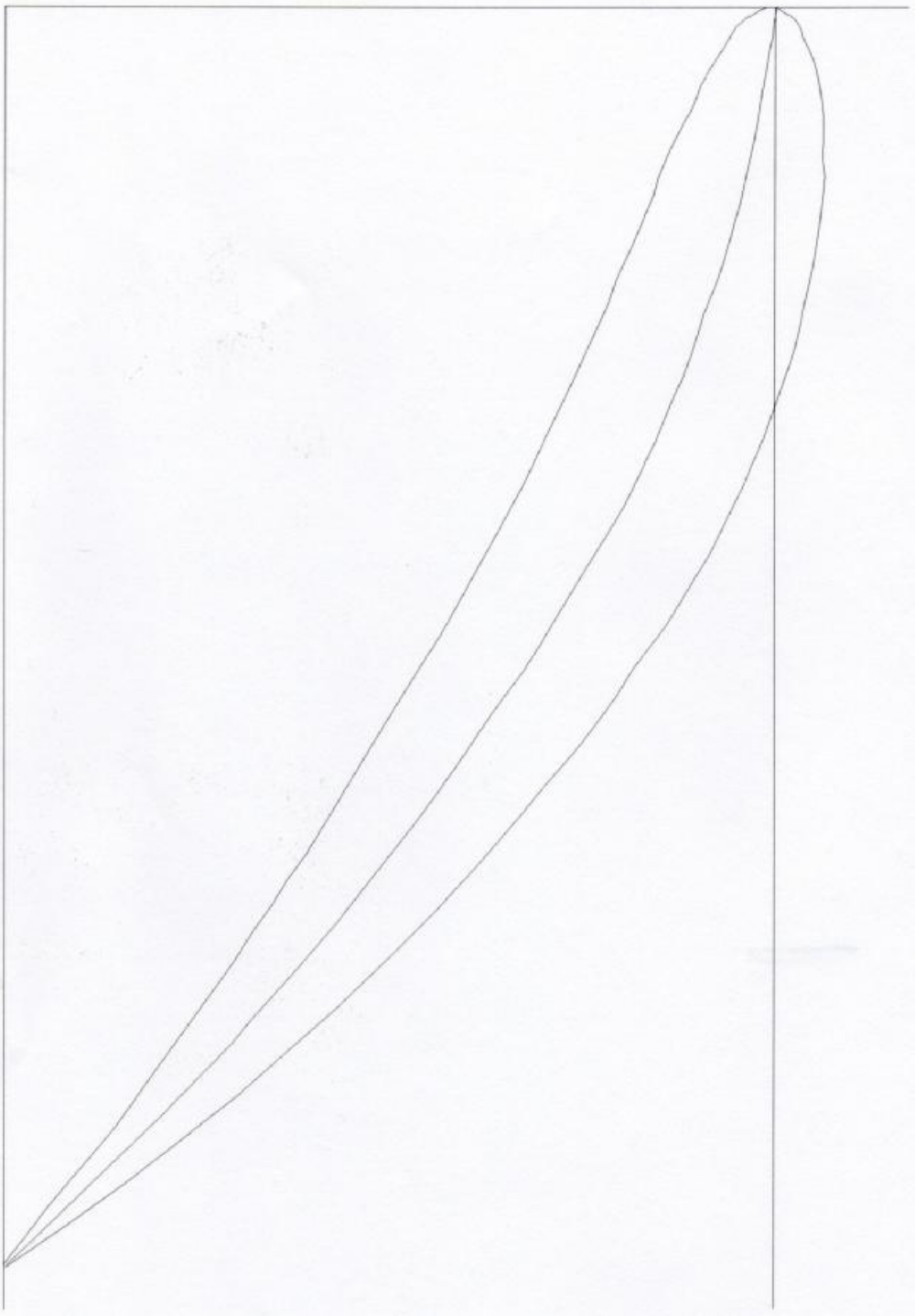
Πίνακας 10.7.15: Σταθμός 15

0,052553834							
A/A	x	y(t)	y(c)	x(U)	y(U)	x(L)	y(L)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	5,61E-05	0,000302	2,24E-05	-5,6E-05	0,000302	0,000168	-0,00026
3	0,000224	0,000594	8,92E-05	4,73E-06	0,000642	0,000444	-0,00046
4	0,000504	0,000878	0,000199	0,000183	0,001016	0,000825	-0,00062
5	0,000895	0,001151	0,00035	0,00048	0,001424	0,00131	-0,00072
6	0,001396	0,001413	0,00054	0,000896	0,001861	0,001896	-0,00078
7	0,002006	0,001662	0,000764	0,001433	0,002324	0,00258	-0,0008
8	0,002724	0,001897	0,001019	0,00209	0,002807	0,003359	-0,00077
9	0,003549	0,002117	0,0013	0,002867	0,003304	0,004231	-0,0007
10	0,004478	0,002319	0,0016	0,003764	0,003807	0,005192	-0,00061
11	0,00551	0,002503	0,001915	0,004779	0,004309	0,00624	-0,00048
12	0,006642	0,002666	0,002237	0,005912	0,004802	0,007371	-0,00033
13	0,007872	0,002808	0,002559	0,00716	0,005275	0,008583	-0,00016
14	0,009197	0,002927	0,002874	0,008521	0,005721	0,009874	2,67E-05
15	0,010615	0,003021	0,003174	0,00999	0,00613	0,01124	0,000218
16	0,012122	0,003091	0,003451	0,011564	0,006491	0,012681	0,000411
17	0,013716	0,003135	0,003697	0,013238	0,006795	0,014194	0,000598
18	0,015393	0,003154	0,003903	0,015007	0,007033	0,015778	0,000773
19	0,017149	0,003146	0,004062	0,016865	0,007195	0,017432	0,000928
20	0,01898	0,003113	0,004165	0,018805	0,007273	0,019155	0,001057
21	0,020883	0,003055	0,004204	0,02082	0,007258	0,020946	0,00115
22	0,022854	0,002972	0,00419	0,022875	0,007162	0,022833	0,001218
23	0,024888	0,002866	0,004141	0,024957	0,007006	0,024819	0,001276
24	0,026981	0,002737	0,004054	0,027095	0,006789	0,026867	0,00132
25	0,029129	0,002586	0,003926	0,029282	0,006508	0,028975	0,001345
26	0,031326	0,002415	0,003755	0,031514	0,006163	0,031139	0,001347
27	0,033569	0,002224	0,003539	0,033783	0,005753	0,033355	0,001324
28	0,035853	0,002015	0,003274	0,036084	0,005276	0,035621	0,001272
29	0,038172	0,001788	0,002961	0,038411	0,004733	0,037932	0,001188
30	0,040522	0,001544	0,002596	0,040758	0,004122	0,040285	0,00107
31	0,042897	0,001283	0,002181	0,043118	0,003445	0,042676	0,000917
32	0,045293	0,001005	0,001713	0,045486	0,0027	0,045101	0,000727
33	0,047705	0,00071	0,001194	0,047854	0,001888	0,047555	0,0005
34	0,050127	0,000397	0,000622	0,050218	0,001009	0,050035	0,000236
35	0,052554	6,62E-05	1,3E-18	0,05257	6,41E-05	0,052537	-6,4E-05

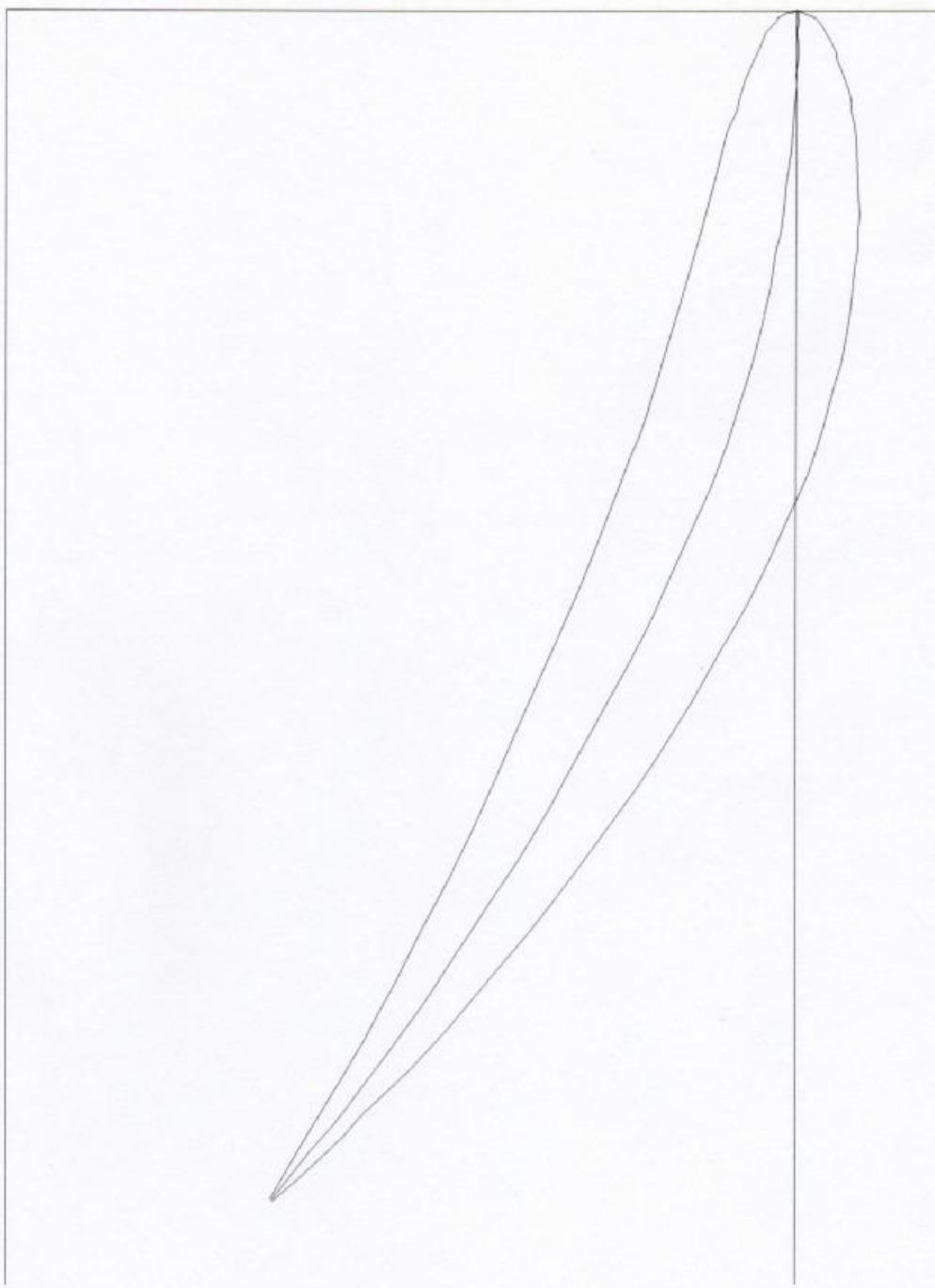


Γράφημα 10.7.15: Αεροτομή 15

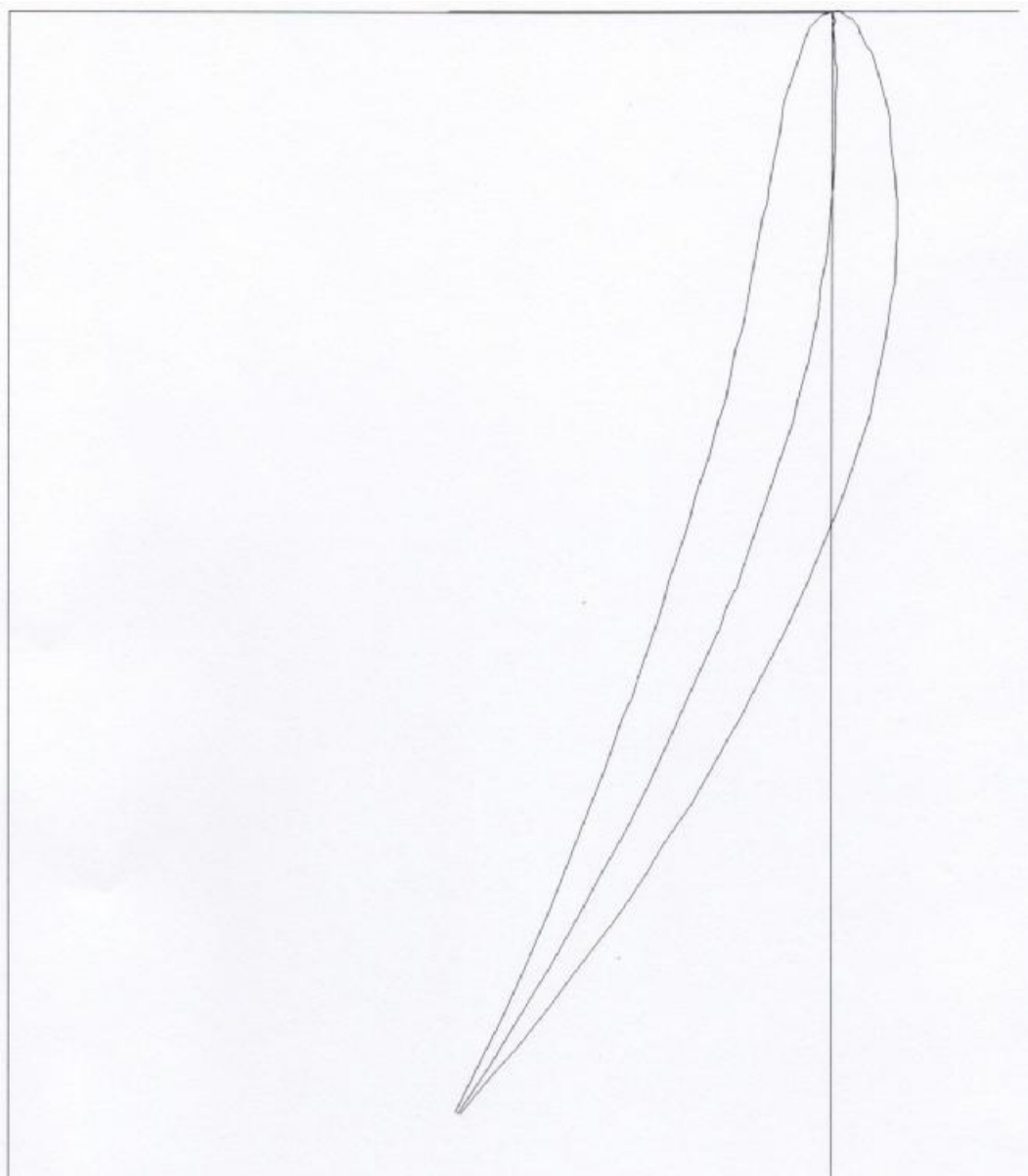
Όπως φαίνεται και από τα γραφήματα έχει γίνει αλλαγή της κλίμακας ώστε να είναι ευδιάκριτες οι αεροτομές. Στη συνέχεια εισήχθηκαν στο πρόγραμμα AutoCAD οι αεροτομές και περιστράφηκαν ανάλογα με τη γωνία β κάθε φορά. Παρακάτω φαίνονται οι αεροτομές περιστρεμμένες σε ρεαλιστικό μέγεθος και οποίες μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν για τη κατασκευή του πτερυγίου.



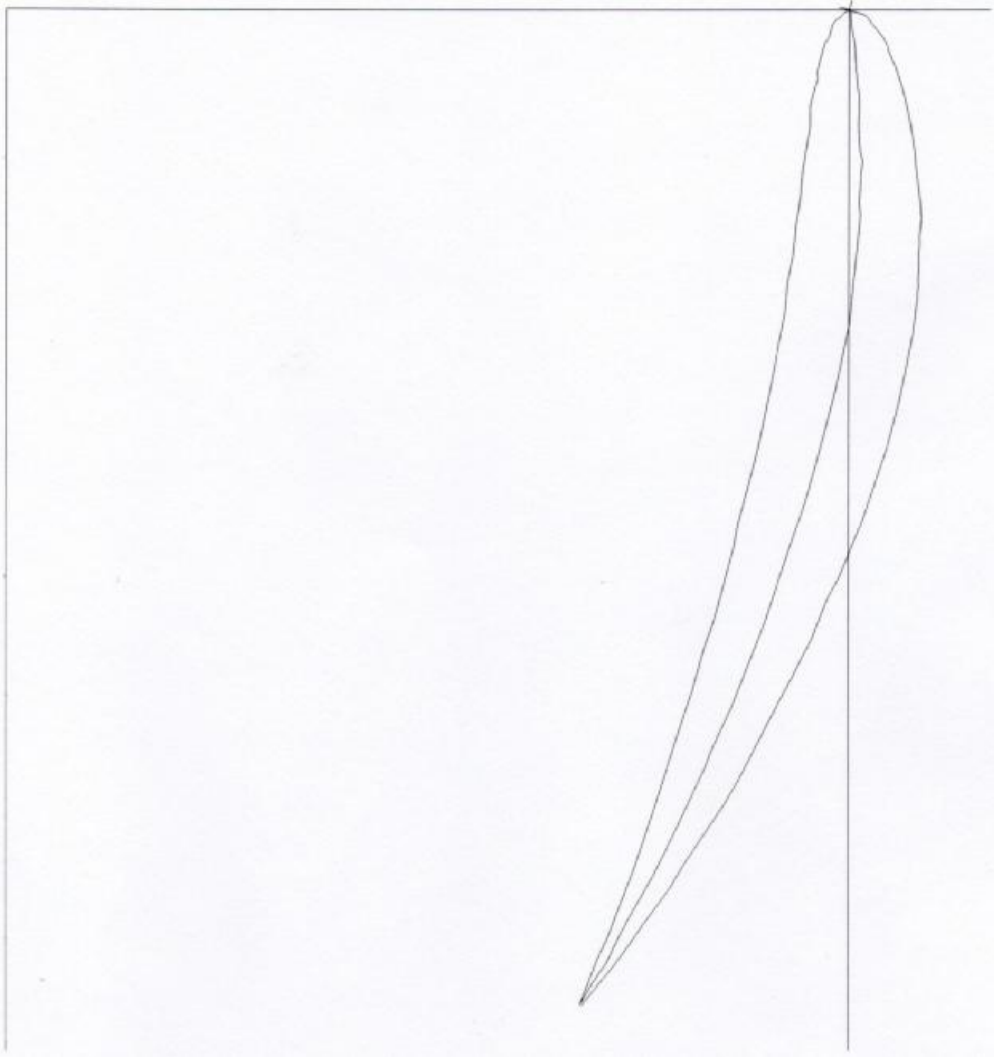
Σχήμα 10.7.1: Σταθμός 1



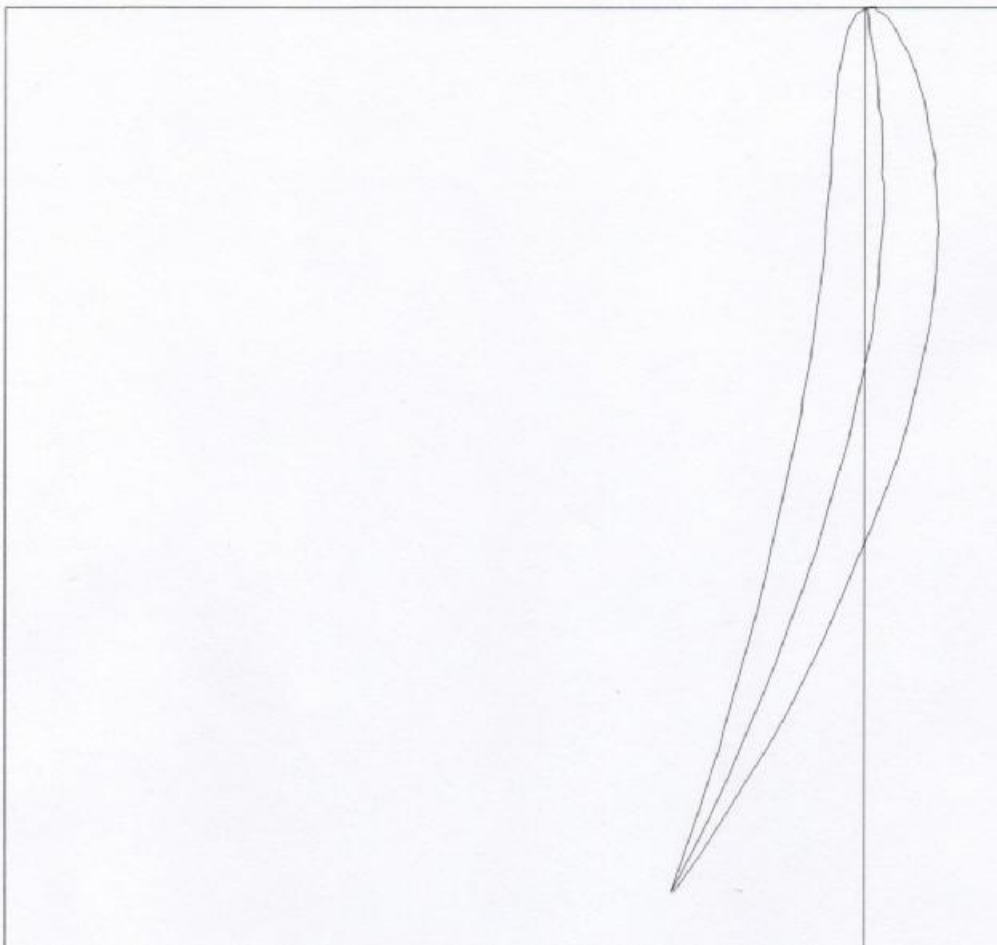
Σχήμα 10.7.2: Σταθμός 2



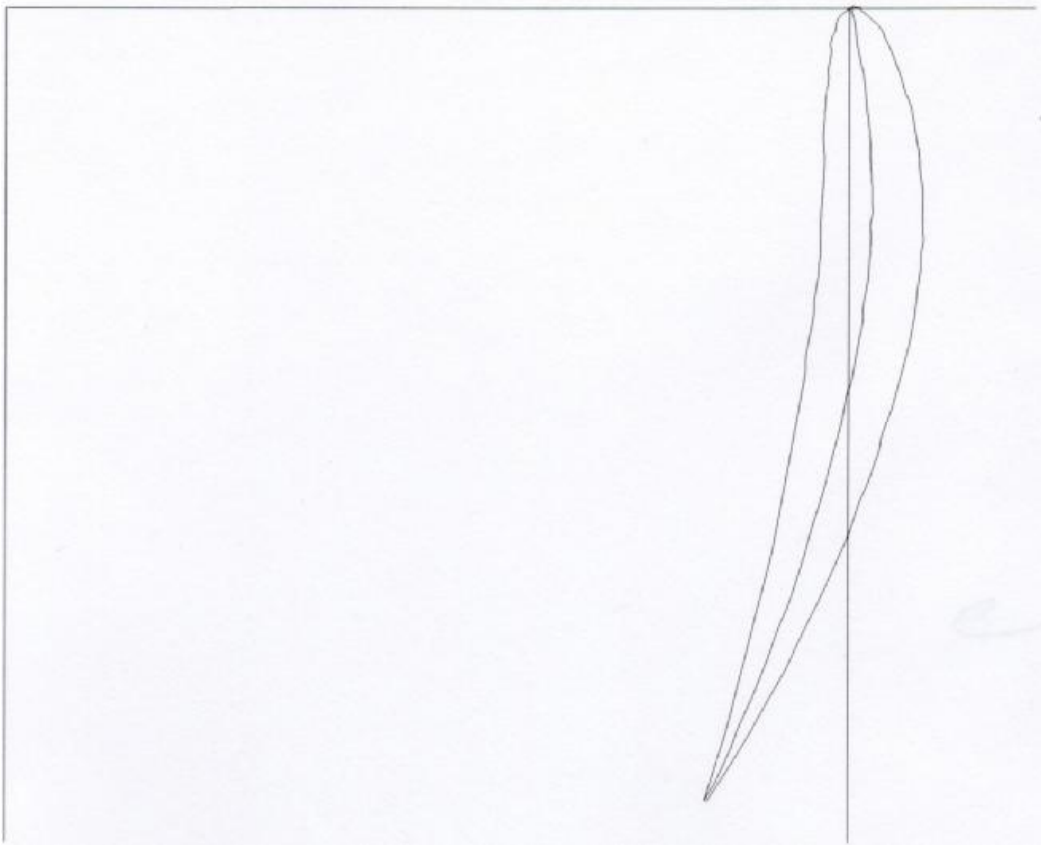
Σχήμα 10.7.3: Σταθμός 3



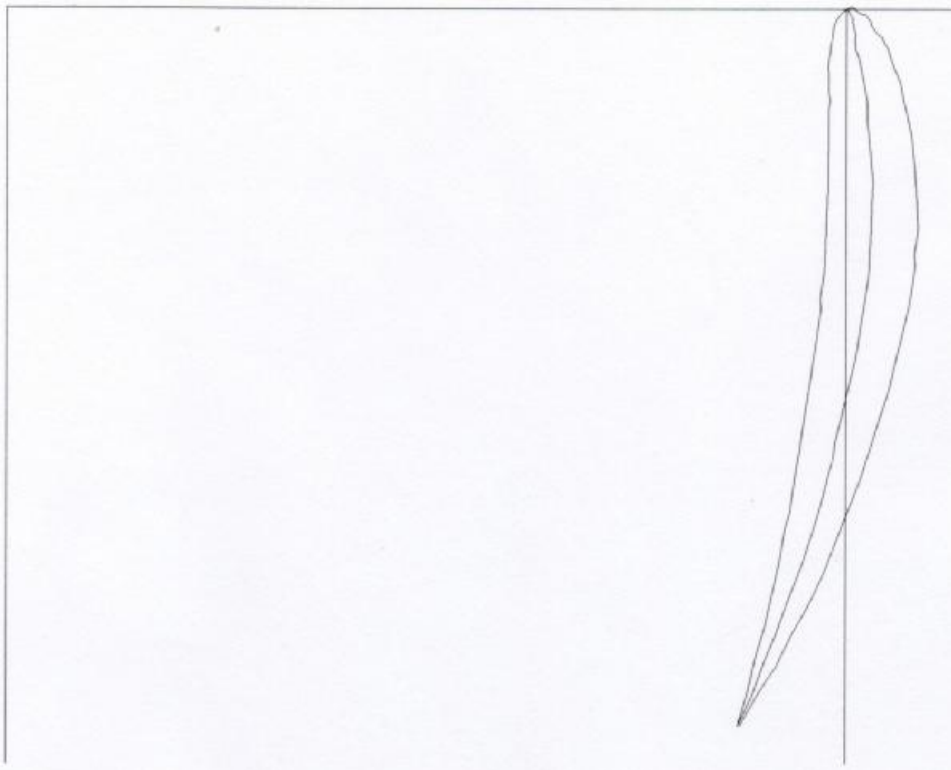
Σχήμα 10.7.4: Σταθμός 4



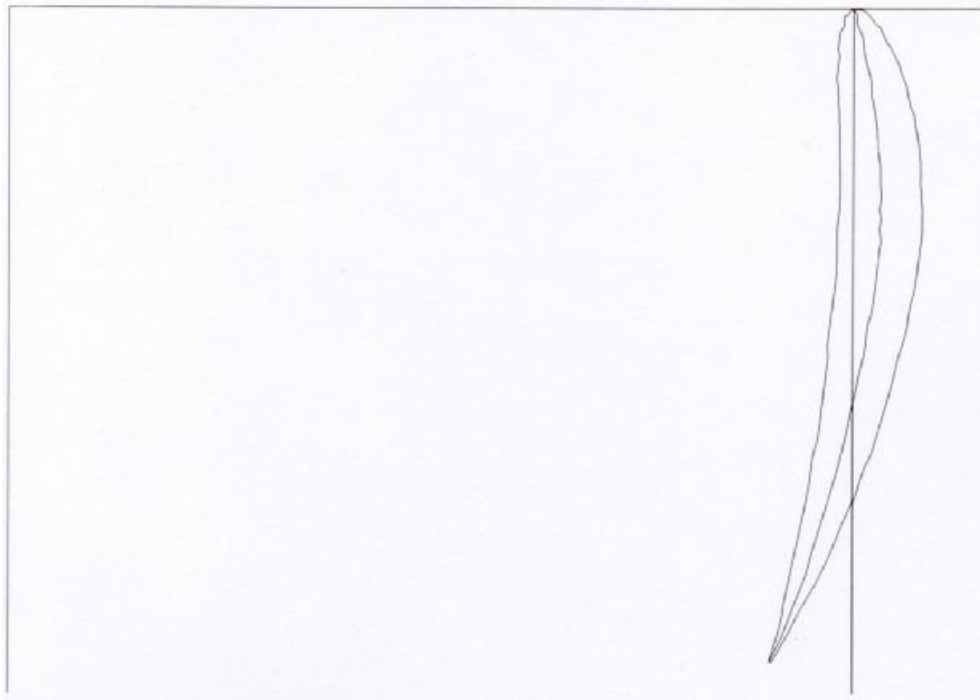
Σχήμα 10.7.5: Σταθμός 5



Σχήμα 10.7.6: Σταθμός 6



Σχήμα 10.7.7: Σταθμός 7



Σχήμα 10.7.8: Σταθμός 8



Σχήμα 10.7.9: Σταθμός 9



Σχήμα 10.7.10: Σταθμός 10



Σχήμα 10.7.11: Σταθμός 11



Σχήμα 10.7.12: Σταθμός 12



Σχήμα 10.7.13: Σταθμός 13



Σχήμα 10.7.14: Σταθμός 14



Σχήμα 10.7.15: Σταθμός 15

11. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

11.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κομμάτι της πτυχιακής εργασίας θα παρουσιαστεί αναλυτικά η πορεία κατασκευής πτερυγίων και των επιμέρους εξαρτημάτων στήριξης τρίπτερης ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα. Μεγάλη βάση θα δοθεί στην κατασκευή των πτερυγίων, καθώς μαζί με τη γεννήτρια αποτελούν τα βασικότερα τμήματα της αιολικής μηχανής, διότι τα πτερύγια είναι αυτά που εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του ανέμου και η γεννήτρια αυτή που κάνει την μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Η κατασκευή των πτερυγίων έχει ως βασικό πρότυπο την κατασκευή που έγινε από το ITDG (Intermediate Technology Development Group), σε συνεργασία του Ηνωμένου Βασιλείου, του Περού και της Βόρειας Ασίας.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η κατασκευή των πτερυγίων και της γεννήτριας, όπου θα περιγραφεί παρακάτω, καθώς και η κατασκευή των λοιπών τμημάτων, αφορά εξ' ολοκλήρου ιδιοκατασκευή. Τα μόνα μέρη στα οποία συνέβαλε επαγγελματίας είναι η κοπή των ξύλινων καλουπιών για την χύτευση της γεννήτριας και η κοπή του ταμπούρου του αυτοκινήτου για την απόσπαση του 'συνδέσμου'.

Η κατασκευή των πτερυγίων θα γίνει με βάση το σχεδιασμό της αεροτομής NACA 4415. Τα πτερύγια αποτελούνται από έναν αριθμό 'σταθμών'(15). Κάθε σταθμός έχει ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία είναι: η τοπική ακτίνα (local radius) που είναι η απόσταση του σταθμού από το κέντρο του δρομέα, το πλάτος χορδής (chord width) που είναι το πλάτος από τη μια άκρη του σταθμού έως την άλλη αλλά και η πραγματική χορδή ή αλλιώς κεντρική καμπύλη (chord line) η οποία ορίζεται ως η μακρύτερη γραμμή και διασχίζει το τμήμα του πτερυγίου ακριβώς στη μέση. Ένα τελευταίο μέγεθος είναι η γωνία β του πτερυγίου (blade angle) η οποία καλείται και κωνικότητα και είναι η γωνία μεταξύ της πραγματικής χορδής και του επιπέδου όπου γυρίζει ο δρομέας.

11.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Πτερύγια

- Πολυεστέρας
- Υαλόπανο
- Καταλύτης πολυεστέρα
- Πούδρα ταλκ
- Ασετόν
- Λινέλαιο
- Ξύλο
- Χαρτί
- Συρματόσκοινο

- Μαγνήτες φερίτιου τεμ.16 Διαστάσεων 25mm x 50mm x50mm
- Σύρμα περιέλιξης 14AWG πάχους 1,7mm
- Εύκαμπτο καλώδιο εμπορίου του ίδιου πάχους
- 1 σύνδεσμος (μουαγιέ) αυτοκινήτου τύπου Peugeot 205
- Σιδηρικά διάφορα όπου θα αναφερθούν παρακάτω
- Κοχλίες και περικόχλια διαφόρων τύπων.
- 2 δίσκους σιδήρου πάχους 2mm
- 2 δίσκους σιδήρου πάχους 6mm

Γεννήτρια

- Τρυπάνι χειρός
- Τρυπάνι κάθετου άξονα σταθερό
- Τροχός μικρός
- Τροχός μεγάλος
- Τόρνος
- Σμυριδόπανα
- Ψαλίδι
- Μέγγενη
- Σέγα
- Πλάνη
- Πριόνια διάφορα
- Σμυριδόπανα
- Μέγγενη
- Τροχός μικρός
- Λίμες κατεργασίας ξύλου
- Πινέλα
- Εργαλεία χειρός διάφορα

Όργανα

- Παχύμετρο
- Χάρακας, γωνία
- Διαβήτη
- Ζυγός ακριβείας
- Ανεμόμετρο ψηφιακό
- Στροφόμετρο ψηφιακό
- Πολύμετρα

Προστατευτικά μέσα

- Γυαλιά
- Γάντια
- Μάσκες

11.2.1 Πολυεστέρας

Ο πολυεστέρας είναι μια ρητίνη ίδιας περιήπου ρευστότητας με το μέλι. Υπάγεται στη κατηγορία των πολυμερών που περιέχουν τον εστέρα στην αλυσίδα τους. Το χρώμα του είναι ανοιχτόχρωμο κεχριμπαρί. Είναι ένα συνθετικό πολυμερές του καθαρού τερεφθαλικού οξέος (PTA) ή διμεθυλίου του εστέρα τερεφθαλικό διμεθύλιο (DMT) και της γλυκόλης μονοethylene (MEG). Με μερίδιο αγοράς 18% όλων των υλικών που παράγονται από πλαστική ύλη, έρχεται τρίτο μετά από το πολυαιθυλένιο (33,5%) και το πολυπροπυλένιο (19,5%)

11.2.2 Σκληρυντής

Είναι μία ουσία που όταν προστίθεται στον πολυεστέρα, αντιδρά με σκοπό να επιταχύνει τον πολυμερισμό του πολυεστέρα και να επισπεύσει την πήξη. Κάποιες φορές οι πολυεστέρες περιέχουν ήδη τον επιταχυντή, σε αυτήν την περίπτωση ονομάζονται «προεπιταχυμένοι». Συνήθως πρόκειται για οργανικά άλατα του κοβαλτίου ή αμίνες. Για την ανάμιξη 1 κιλού πολυεστέρα απαιτούνται περίπου 20gr καταλύτη ώστε να επιταχυνθεί ο πολυμερισμός του.

11.2.3 Αντικολλητικά καλούπιών

Είναι τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την εύκολη και χωρίς πρόκληση ελαττωμάτων αποκόλληση των αντικειμένων από τα καλούπια μετά την πήξη του πολυεστέρα. Συνηθισμένα αποκολλητικά μέσα είναι τα στερεά ή υγρά κεριά και η πολυβινυλική αλκοόλη αλλά και οι αντικολλητικές μεμβράνες.

11.2.4 Ασετόν

Ασετόν ή αλλιώς ακετόνη. Διαλύτης που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των εργαλείων μετά την επαφή τους με τον πολυεστέρα. Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του ιξώδους του πολυεστέρα.

11.2.5 Υαλόπανο

Το υαλόπανο είναι ένα υλικό υφασμένο από πολύ λεπτές ίνες γυαλιού καλής ποιότητας. Υπάρχουν διάφορες ποικιλίες ύφανσης για διάφορες χρήσεις. Πιο συγκεκριμένα οι ίνες του γυαλιού χρησιμοποιούνται για να ενισχύουν τις κατασκευές με πολυεστέρα. Δηλαδή αναλαμβάνουν τον οπλισμό του πολυεστέρα με σκοπό την αύξηση της αντοχής του. Οι ίνες του γυαλιού έχουν την ιδιότητα να συγκεντρώνουν μεγάλη επιφάνεια σε σχέση με το βάρος τους.

Πρώτη εμφάνιση ιστορικά των ινών του γυαλιού έγινε από τον Edward Drummond Libbey το 1883. Ενώ το υαλόπανο με την σημερινή του μορφή εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1938 από τον Russell Games Slayter.

11.2.6 Λινέλαιο

Το λινέλαιο έχει την ιδιότητα να απορροφάται από τα ξύλα και να τους παρέχει σημαντική αντιπαρασιτική και αντιυγραντική προστασία. Επιπλέον είναι ένα υλικό ιδιαίτερα φιλικό προς το ξύλο.

11.2.7 Πούδρα Τάλκη

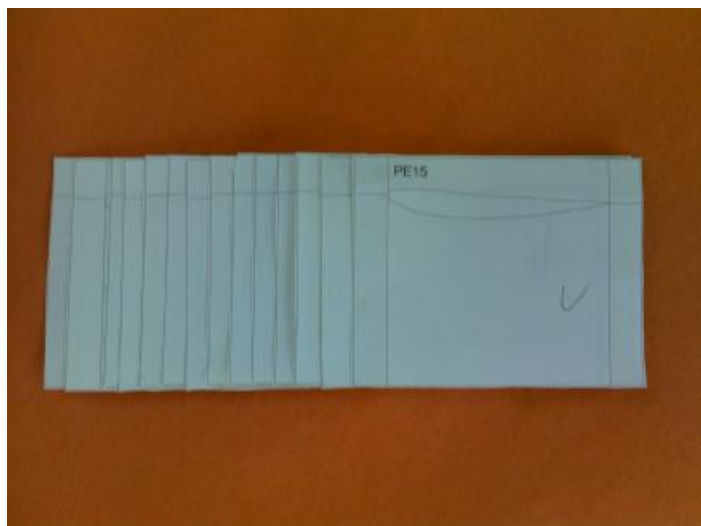
Η τάλκη είναι ένα ορυκτό που αποτελείται από το ένυδρο μαγνήσιο πυριτικό άλας με χημικό τύπο $H_2Mg_3(SiO_3)_4$ ή $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$. Σε μορφή σκόνης, είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη ουσία και είναι γνωστή ως σκόνη ταλκ. Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τον πολυεστέρα για αύξηση της αντοχής και μείωση του βάρους.

11.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

Έχοντας λοιπόν μελετήσει και αποτυπώσει διαγραμματικά την αεροτομή του πτερυγίου κατά το μήκος, επόμενο βήμα είναι η κατασκευή. Εκτυπώθηκαν λοιπόν σε χαρτί τα πρότυπα διαγράμματα, όπου και κόπηκαν. Βάσει αυτών των διαγραμμάτων θα κατασκευαστεί το πρότυπο πτερύγιο.



Εικόνα 11.3.1: Τα διαγράμματα εκτυπωμένα σε χαρτί



Εικόνα 11.3.2: Τα διαγράμματα εκτυπωμένα σε χαρτί

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε το **πρότυπο πτερύγιο**. Το πρότυπο πτερύγιο είναι το πρώτο πτερύγιο που πρέπει να κατασκευαστεί και αυτό θα είναι η βάση για να κατασκευαστούν τα καλούπια και στη συνέχεια τα τελικά πτερύγια. Για το λόγο αυτό δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση σε αυτό το κομμάτι, καθώς από αυτό εξαρτάται η επιτυχής απόδοση των πτερυγίων. Συγκεκριμένα, η κατασκευή του πρότυπου πτερυγίου ήταν και η πιο χρονοβόρα διαδικασία. Αυτή διήρκεσε περίπου 30 ημέρες καθημερινής εργασίας, αφού απαιτούσε ιδιαίτερη επιμονή και υπομονή μιας και αυτό έπρεπε να κατασκευαστεί από ένα κομμάτι ατόφιου ξύλου με απλά εργαλεία χήρος και με ιδιαίτερη ακρίβεια.

Για την κατασκευή του πρότυπου πτερυγίου αγοράστηκε ξύλο το οποίο είχε διαστάσεις 45mm x 165mm x 700mm. Αυτό ήταν από ξύλο πεύκου χαμηλής υγρασίας ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος στρέβλωσης.



Εικόνα 11.3.3: Ξύλο διαστάσεων 45mm x 165mm x 700mm

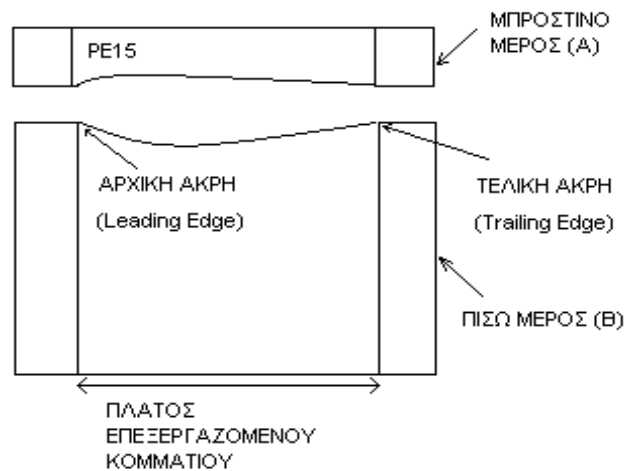
Πάνω στο ξύλο σημειώθηκαν οι θέσεις του κάθε σταθμού και στη συνέχεια με βάση το μήκος χορδής της κάθε αεροτομής χαράχθηκε η διαγώνιος που φαίνεται στην Εικ. 11.3.4. Η διαγώνιος είναι και το σημείο όπου θα κοπεί το ξύλο.

Στη συνέχεια έπρεπε να υπολογιστεί το βάθος που θα κοπεί το ξύλο. Δηλαδή έπρεπε να σχεδιαστεί στις δύο πλευρές του ξύλου το χείλος προσβολής (leading edge) και το χείλος εκφυγής (trailing edge) αντίστοιχα, σύμφωνα με το εκάστοτε διάγραμμα του εκάστοτε σταθμού. Αυτές οι δύο γραμμές είναι και οι γραμμές όπου θα συναντηθούν το πάνω και το κάτω καλούπι.



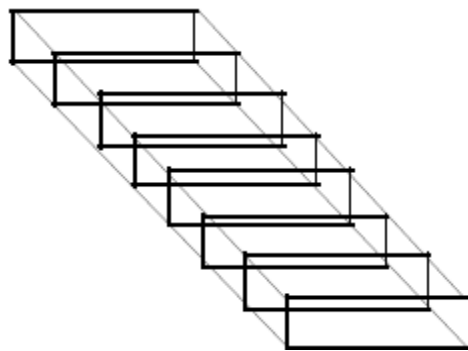
Εικόνα 11.3.4: Σχεδίαση σταθμών και χάραξη κάθε χορδής των αεροτομών.

Στο Σχ. 11.3.1 φαίνεται το πώς πρέπει να είναι κομμένα τα διαγράμματα όπου με την βοήθεια τους θα κατασκευαστούν οι διάφορες γωνίες και καμπυλότητες καθώς και τα χαρακτηριστικά της κάθε αεροτομής.

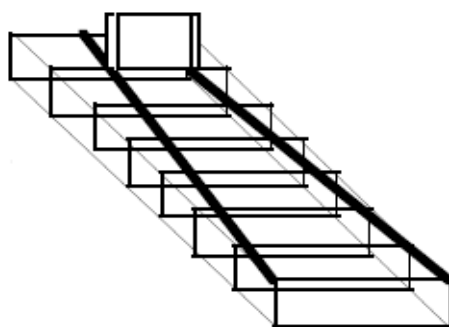


Σχήμα 11.3.1: Χαρακτηριστικά της κάθε αεροτομής.

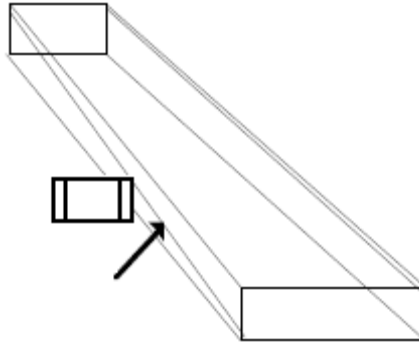
Οι κάθετες γραμμές δείχνουν το μήκος της χορδής. Στα Σχ.11.3.3 – 11.3.5 φαίνεται ο τρόπος σχεδιασμού των γραμμών πάνω στο ξύλο.



Σχήμα 11.3.3: Σχεδιασμός σταθμών



Σχήμα 11.3.4: Σχεδιασμός των δύο ακρών της πτέρυγας.



Σχήμα 11.3.5: Σχεδιασμός του χείλους εκφυγής και προσβολής.

Με βάση το εκάστοτε διάγραμμα αρχικά σημειώθηκε, με κουκίδες, το ύψος του χείλους εκφυγής σε κάθε σταθμό ξεχωριστά και στη συνέχεια ενώθηκαν με μία γραμμή. Το ίδιο έγινε και από την άλλη πλευρά για το χείλος προσβολής όπου αυτό έχει σταθερό ύψος καθ' όλο το μήκος της πτέρυγας.

Στη συνέχεια έγινε κοπή του ξύλου με βάση τις γραμμές του Σχ. 11.3.4 και Σχ. 11.3.5 αλλά κόβοντάς τις λίγο μακρύτερα από αυτές για το ενδεχόμενο κάποιου λάθους στην κοπή. Η κοπή του ξύλου στο χείλος εκφυγής έγινε με κορδέλα σε ξυλουργείο για εξοικονόμηση χρόνου. Για την περαιτέρω διαμόρφωση του ξύλου χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία χειρός για ακρίβεια. Στο σημείο αυτό ξεκίνησε και η πιο χρονοβόρα και επίπονη εργασία, δηλαδή το σμίλευμα του ξύλου.

Το ξύλο στερεώθηκε σε μέγγενη και αρχικά αφαιρέθηκαν τα μεγάλα κομμάτια ξύλου όπου έπρεπε να αφαιρεθούν, με την χρήση ξυλοπρίονου. Με το μικρό ξυλοπρίονο αφαιρέθηκαν κάποια μικρότερα για μεγαλύτερη ακρίβεια. Με τη λίμα δόθηκε στο ξύλο η καμπυλότητα. Με τον τροχό, αφού πρώτα προσαρμόστηκε ειδικό εξάρτημα στερέωσης σμυριδόπτανου, αφαιρέθηκε κάποιο επιπλέον υλικό και με τα γυαλόχαρτα χεριού έγινε το τελικό φινίρισμα.

Παρακάτω φαίνονται εικόνες από την κατεργασία του ξύλου μέχρι να φτάσει στο επιθυμητό σχήμα με βάση τις γραμμές που είχαν σημειωθεί.



Εικόνα 11.3.5: Αφαίρεση κομματιών με το ξυλοπρίονο.



Εικόνα 11.3.6: Με την λίμα δόθηκε στο ξύλο η καμπυλότητα.

Μετά από ημέρες κατεργασίας αρχίζει να παίρνει μορφή πτέρυγας όπως διακρίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 11.3.7: Άποψη πρότυπης πτέρυγας κατά την κατασκευή



Εικόνα 11.3.8: Άποψη πρότυπης πτέρυγας κατά την κατασκευή



Εικόνα 11.3.9: Άποψη πρότυπης πτέρυγας κατά την κατασκευή



Εικόνα 11.3.10: Άποψη πρότυπης πτέρυγας κατά την κατασκευή



Εικόνα 11.3.11: Άποψη πρότυπης πτέρυγας κατά την κατασκευή



Εικόνα 11.3.12: Άποψη πρότυπης πτέρυγας κατά την κατασκευή



Εικόνα 11.3.13: Άποψη πρότυπης πτέρυγας κατά την κατασκευή



Εικόνα 11.3.14: Έλεγχος της καμπυλότητας στον εκάστοτε σταθμό με τα διαγράμματα.



Εικόνα 11.3.15 Έλεγχος της καμπυλότητας στον εκάστοτε σταθμό με τα διαγράμματα.



Εικόνα 11.3.16: Έλεγχος της καμπυλότητας στον εκάστοτε σταθμό με τα διαγράμματα.



Εικόνα 11.3.17: Στάδιο φινιρίσματος με σμυριδόπανο.



Εικόνα 11.3.18: Στάδιο φινιρίσματος με σμυριδόπανο.



Εικόνα 11.3.19: Άποψη σχεδόν τελειωμένου πρότυπου πτερυγίου.



Εικόνα 11.3.20: Άποψη σχεδόν τελειωμένου πρότυπου πτερυγίου.



Εικόνα 11.3.21: Άποψη σχεδόν τελειωμένου πρότυπου πτερυγίου.



Εικόνα 11.3.22: Άποψη σχεδόν τελειωμένου πρότυπου πτερυγίου.

Αφού τελείωσε η κατεργασία του ξύλου, κρίθηκε σωστό, για την προστασία του ξύλου κατά την κατασκευή του καλουπιού, να βαφτεί με λινέλαιο και στη συνέχεια να βαφτεί με χρώμα ξύλου.



Εικόνα 11.3.23: Πέρασμα με λινέλαιο.



Εικόνα 11.3.24: Βαφή με χρώμα ξύλου.



Εικόνα 11.3.25: Μετά το βάψιμο.

11.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

Τα καλούπια μπορούν κατασκευαστούν από διάφορα υλικά. Τα πιο συνηθισμένα είναι από ρητίνη ή φίμπεργκλας. Ωστόσο η διάρκεια ζωής τους είναι περιορισμένη καθώς κάθε καλούπι παράγει περίπου 50 έως 60 πτερύγια. Για το λόγο αυτό σε μερικές περιπτώσεις, σαν μια καλή εναλλακτική λύση είναι η κατασκευή τους να γίνει από αλουμίνιο το οποίο είναι ευρέως διαδεδομένο για παραγωγή κομματιών από φίμπεργκλας. Στη συγκεκριμένη εργασία το καλούπι θα κατασκευαστεί σε δύο μέρη, ένα για την πάνω επιφάνεια της πτέρυγας και ένα για την κάτω και θα κατασκευαστεί από ρητίνη-πολυεστέρα και υαλόπανο. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο πτερύγιο και η πορεία κατασκευής του καλουπιού περιγράφεται κάτωθι :

Ξεκινώντας, τοποθετήθηκε το πρότυπο πτερύγιο πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια ξύλου (κόντρα πλακέ). Σχεδιάστηκε με ένα μολύβι περιμετρικά από το πτερύγιο και στη συνέχεια κόπηκε το κόντρα πλακέ. Αυτό έγινε ώστε κατά την κατασκευή του καλουπιού να δημιουργηθεί μία επίπεδη επιφάνεια περιμετρικά από τις άκρες του, ώστε αυτή η επίπεδη επιφάνεια μαζί με την άλλη του άλλου καλουπιού να εφάπτονται και να μπορούν να συναρμολογηθούν και τα δύο μαζί με τη βοήθεια κοχλιών, όπως θα δειχθεί παρακάτω, για τη δημιουργία της πτέρυγας.

11.4.1 Λίπανση του πρότυπου πτερυγίου

Το πρότυπο πτερύγιο για να αποκολληθεί με μεγαλύτερη ευκολία από το καλούπι μετά από την ολοκλήρωση του, έπρεπε να καλυφτεί με κάποιο αντικολλητικό υλικό. Μετά από δοκιμές αποφασίστηκε ότι το καλύτερο από τα διαθέσιμα υλικά για αυτήν τη δουλειά ήταν ένα αεροπορικό γράσο γενικής χρήσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο εμπόριο κυκλοφορούν διάφορα αντικολλητικά υλικά για αυτήν τη χρήση, τα οποία έχουν αρκετά υψηλό κόστος. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το παραπάνω υλικό το οποίο βρισκόταν στη διάθεση μας και δεν απαιτούνταν η αγορά του. Με αυτό το γράσο επικαλύφτηκε ολόκληρο το πρότυπο πτερύγιο.

Επίσης, για ακόμη μεγαλύτερη ευκολία, σε συνδυασμό πάντοτε με το γράσο, μετά από δοκιμές αποφασίστηκε ότι ήτανε χρήσιμη και η χρήση αντικολλητικής μεμβράνης. Στην προκειμένη περίπτωση, στο εμπόριο υπάρχουνε διαθέσιμες μεμβράνες για τη συγκεκριμένη δουλειά αλλά είναι δυσεύρετες στα Ιωάννινα όπου και κατασκευάστηκε η ανεμογεννήτρια. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε κοινή διαφανή μεμβράνη η οποία όπως αποδείχτηκε έκανε πολύ καλά τη δουλειά της.

11.4.2 Κατασκευή καλουπιών

Το πρότυπο πτερύγιο, το οποίο ήταν προστατευμένο με το αντικολλητικό υλικό και τη μεμβράνη, τοποθετήθηκε πάνω σε έναν πάγκο, ο οποίος καλύφθηκε ώστε να μην κολλήσει το καλούπι μετά από την πήξη του πολυεστέρα. Στη συνέχεια βάρθηκε με ένα στρώμα πολυεστέρα και τοποθετήθηκε ένα κομμάτι υαλόπανο πάνω στο πρότυπο πτερύγιο. Έπειτα, τοποθετήθηκε ακόμη ένα κομμάτι υαλόπανου και βάρθηκε με ένα ακόμη στρώμα πολυεστέρα.

Ύστερα τοποθετήθηκε από πάνω κόντρα πλακέ, κομμένο στο σχήμα του περυγίου, και περάστηκε ακόμη ένα παχύ στρώμα πολυεστέρα. Τέλος, αφέθηκε να στεγνώσει ο πολυεστέρας αρκετές ώρες.

Στην Εικ. 11.4.2.1 φαίνεται το κόντρα πλακέ κομμένο και τοποθετημένο γύρω από το πρότυπο περυγίου.



Εικόνα 11.4.2.1: Κατασκευή καλουπιού. Βάψιμο με πολυεστέρα.



Εικόνα 11.4.2.2: Κατασκευή καλουπιού.



Εικόνα 11.4.2.3: Κατασκευή καλουπιού. Τελικό πέρασμα με πολυεστέρα.



Εικόνα 11.4.2.4 Κατασκευή καλουπιού. Τελικό πέρασμα με πολυεστέρα.



Εικόνα 11.4.2.5: Βεβιασμένο στέγνωμα πολυεστέρα.

Για να συντομεύει ο χρόνος πήξης του πολυεστέρα, μιας και η θερμοκρασία κατά την περίοδο της κατασκευής ήταν χαμηλή, χρησιμοποιήθηκε πηγή θερμότητας όπως φαίνεται και στην Εικ 11.4.2.5. Την επόμενη μέρα το πρότυπο πτερύγιο αφαιρέθηκε από το καλούπι με σχετική ευκολία.

Το άλλο μισό του καλουπιού κατασκευάστηκε με τον ίδιο περίπου τρόπο, με τη διαφορά ότι αυτή τη φορά η εργασία έγινε πάνω στο υπάρχον καλούπι ενώ το πρότυπο πτερύγιο βρισκόταν μέσα. Έχοντας λοιπόν το πρώτο καλούπι με το πρότυπο πτερύγιο μέσα, τοποθετήθηκε κατάλληλη στήριξη ώστε να μένει σταθερό κατά τη διάρκεια της εργασίας.



Εικόνα 11.4.2.6: Πέρασμα με αντικολλητικό για την κατασκευή του β' μισού.



Εικόνα 11.4.2.7 Νωπό τελειωμένο καλούπι.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε ένα αναλόγου σχήματος κόντρα πλακέ και περάστηκαν οι στρώσεις πολυεστέρα και υαλόπανου. Τέλος αφέθηκαν να στεγνώσουν.

Την επομένη έγινε ο διαχωρισμός των καλουπιών (το ένα από το άλλο) καθώς και η αφαίρεση του προτύπου πτερυγίου όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 11.4.2.8 Αποκόλληση του προτύπου πτερυγίου από το καλούπια.

11.4.3 Τελική επεξεργασία καλουπιών

Τα καλούπια, όπως διακρίνεται στο παρακάτω σχήμα, είχανε κάποιες ανομοιομορφίες. Οι ανομοιομορφίες αυτές οφείλονται κυρίως στο υαλόνημα αλλά και στην επάλειψη του πολυεστέρα με το πινέλο.



Εικόνα 11.4.3.1: Τρίψιμο με σμυριδόπανο για εξάλειψη των ατελειών.

Αφού αφαιρέθηκε το πρότυπο πτερύγιο από το εκάστοτε καλούπι και φινιρίστηκε, όπως αναφέρθηκε, με σμυριδόπανο, κρίθηκε σκόπιμο να στοκαρισθεί με ειδικό στόκο πολυεστέρα λόγω του ότι υπήρχανε ακόμη ορισμένες ατέλειες, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ομαλότερη δυνατή επιφάνεια.



Εικόνα 11.4.3.2: Στόκος πολυεστέρα και σκληρυντής.



Εικόνα 11.4.3.3: Στοκάρισμα για τελειοποίηση του καλουπιού



Εικόνα 11.4.3.4: Τελική μορφή, μετά το στοκάρισμα



Εικόνα 11.4.3.5: Τα δύο καλούπια ολοκληρωμένα.



Εικόνα 11.4.3.6: Τα δύο καλούπια ολοκληρωμένα.

Όπως φαίνεται και από την Εικ. 11.4.3.7, περιμετρικά από το καλούπι έχουνε ξανοιχθεί οπές (6 στο σύνολο). Αυτό έγινε ώστε να ενωθούν (με κοχλίες) τα δύο καλούπια και να ταιριάξουν απόλυτα το ένα με το άλλο.



Εικόνα 11.4.3.7: Περιμετρικά από το καλούπι διακρίνονται οι οπές.



Εικόνα 11.4.3.8: Εξωτερική όψη καλουπιού

Σημείωση: Η ανωτέρω διαδικασία έγινε και για τα δύο τμήματα του καλουπιού.

11.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Επόμενο βήμα είναι η κατασκευή των πτερυγίων με βάση τα καλούπια που κατασκευάστηκαν. Τα πτερύγια θα κατασκευαστούν με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή με πολυεστέρα και υαλόνημα.

Αρχικά ξεκίνησε η κατασκευή της μίας πλευράς του πτερυγίου. Αφού τοποθετήθηκε αντικολλητικό και μεμβράνη, ώστε να μην κολλήσει το κατασκευαζόμενο πτερύγιο με το καλούπι, πέραστηκαν οι στρώσεις πολυεστέρα-υαλόπανου.



Εικόνα 11.5.1: Επάλειψη με αντικολλητικό.



Σχήμα 11.5.2: Διακρίνεται η μεμβράνη και η πρώτη στρώση υαλόπανου



Εικόνα 11.5.3: Τοποθέτηση του υαλόπανου μέσα στο καλούπι

Η διαδικασία κατασκευής του πτερυγίου έχει ως εξής:

- 1) Επάλειψη των καλουπιών με αντικολλητικό και τοποθέτηση μεμβράνης.
- 2) Κοπή 6 τεμαχίων υαλόπανου στο σχήμα της πτέρυγας.
- 3) Τοποθέτηση του καλουπιού επάνω στον πάγκο και πέρασμα με πολυεστέρα.
- 4) Διαδοχική τοποθέτηση πολυεστέρα – υαλόπανου. 3 στρώσεις θεωρήθηκαν ιδανικός αριθμός ώστε η σχέση βάρους αντοχής να είναι ικανοποιητική.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για το άλλο μισό.



Εικόνα 11.5.4: Βεβιασμένο στέγνωμα του πολυεστέρα

Σημείωση: Όλη η διαδικασία κατασκευής και των δύο μισών τμημάτων πρέπει να γίνει σε σύντομο χρονικό διάστημα ώστε να μην πήξει ο πολυεστέρας και να είναι δυνατή η ένωση των δύο τμημάτων μεταξύ τους.

Στη συνέχεια, στα σημεία όπου τα δύο μισά του πτερυγίου σμίγουν επαλείφθηκε πλεόνασμα πολυεστέρα ώστε να γίνει η ένωση μεταξύ τους.



Εικόνα 11.5.5: Τα δύο μισά ενώθηκαν με κοχλίες και αφέθηκαν κοντά σε πηγή θερμότητας ώστε να στεγνώσει το πτερύγιο μέσα τους.



Εικόνα 11.5.6: Κοχλίες για ένωση των καλουπιών

Η διαδικασία αυτή έγινε 3 φορές μιας και η κατασκευή αφορά 3πτέρυγη ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 11.5.7: Τελειωμένο πτερύγιο.



Εικόνα 11.5.8: Φινίρισμα πτερυγίου.



Εικόνα 11.5.9: Φινίρισμα πτερυγίου.

11.6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΒΑΣΕΩΝ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ.

Για να μπορέσουν τα πτερύγια να στερεωθούν πάνω στη γεννήτρια έπρεπε να έχουνε στη βάση τους κατάλληλη διαμόρφωση. Αυτό ήτανε ένα ακόμη δύσκολο κομμάτι της κατασκευής. Μετά από δοκιμές αποφασίστηκε ότι πιο κατάλληλο, από θέμα αντοχής αλλά και χρηστικότητας, ήταν η κατασκευή βάσης στήριξης από ξύλο επενδυμένο με πολυεστέρα και υαλόνημα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ξύλο σε ίδιες διαστάσεις με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του πρότυπου πτερυγίου ώστε η κάθε πτέρυγα να παραμένει στη σωστή κλίση, δηλαδή αυτή που έχει μελετηθεί να λειτουργεί.

Έτσι κόπηκαν 3 κομμάτια ξύλου σε μήκος αρκετό ώστε να μπαίνει και να δένει με την πτέρυγα αλλά να μένει και κάμποιο ώστε να δένει επάνω στη γεννήτρια. Αφού κόπηκαν, δέθηκαν πάνω σε μέγγενη και πολύ προσεκτικά διαμορφώθηκαν μέχρι το μισό του μήκους τους ώστε να ταιριάζουν ακριβώς στο εσωτερικό της πτέρυγας. Αυτή ήτανε μία εργασία όπου απαιτούσε ιδιαίτερη επιμονή.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα ίδια με αυτά της κατασκευής του πρότυπου πτερυγίου. Όταν αυτά ήταν έτοιμα, ευθυγραμμίστηκαν επάνω σε πάγκο με την εκάστοτε πτέρυγα και συγκολλήθηκαν πολύ προσεκτικά με πολυεστέρα και υαλόνημα (δύο στρώσεις) ώστε να μην αλλάξει η γωνία αυτών με τη πτέρυγα.



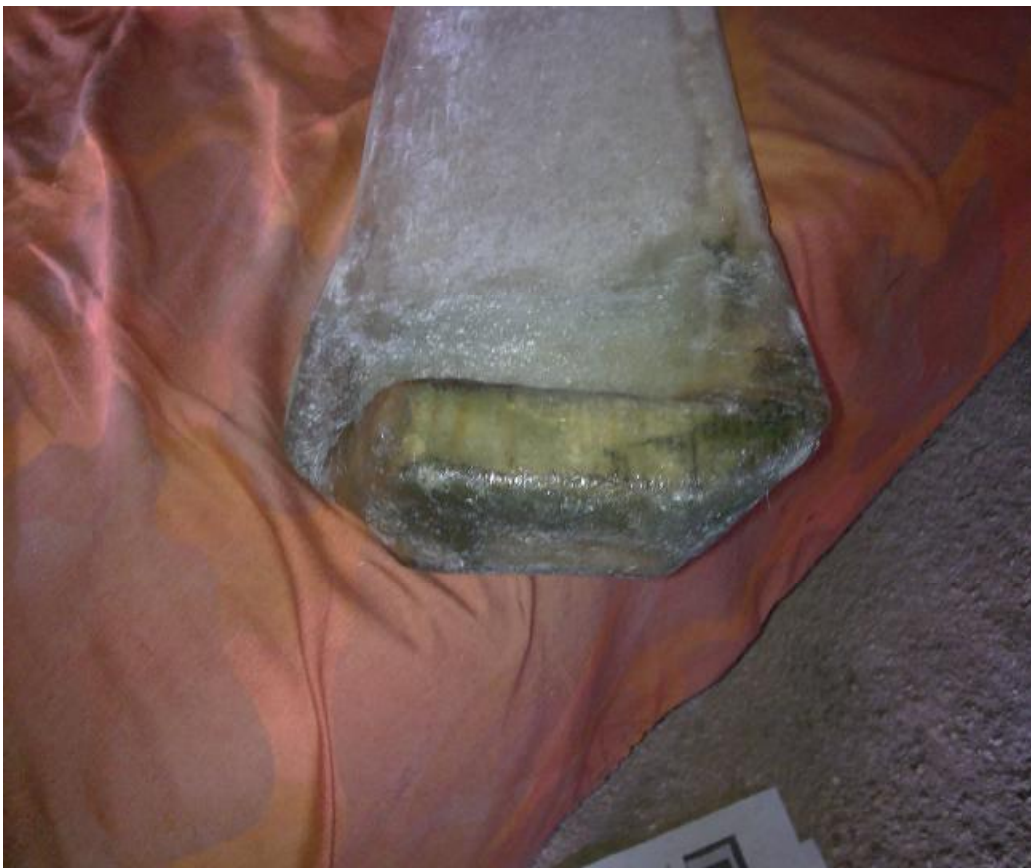
Εικόνα 11.6.1: Βάσεις στήριξης πτερυγίων.



Εικόνα 11.6.2: Βάσεις στήριξης πτερυγίων.



Εικόνα 11.6.3: Βάσεις στήριξης πτερυγίων.



Εικόνα 11.6.4: Βάση στήριξης πτέρυγας τοποθετημένη και συγκολλημένη.



Εικόνα 11.6.5: Βάσεις τοποθετημένες και στα 3 πτερύγια.

11.7 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΤΥΣΣΟΜΕΝΗΣ ΒΑΣΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Η ανεμογεννήτρια αφού ολοκληρώθηκε έπρεπε κάπου να στηριχτεί ώστε να μπορεί να δοκιμαστεί, να μετρηθεί και στη συνέχεια να παρουσιαστεί. Για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκε μια πτυσσόμενη βάση στήριξης ώστε να καθίσταται εύκολη και η μεταφορά της.

Σημείωση: Αυτή η βάση είναι μια βάση για προσωρινή στήριξη και παρουσίαση και δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση η ανεμογεννήτρια να τεθεί σε λειτουργία επάνω σε αυτήν χωρίς επίβλεψη. Παρόλα αυτά με κατάλληλη τροποποίηση θα μπορούσε κάλλιστα να λειτουργήσει σε πραγματικές συνθήκες.

Η βάση αυτή είναι κατασκευασμένη από απλά υλικά του εμπορίου. Εκτός από την χρησιμότητα της για τη στήριξη της ανεμογεννήτριας, επιτρέπει την περιστροφή της ανεμογεννήτριας ώστε να μπορεί να ακλουθεί την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτό είναι εφικτό όχι με τη χρήση ρουλεμάν αλλά μέσω της κατάλληλης διαμόρφωσης του άξονα. Αυτός έχει στο τέλος του κωνικό σχήμα και ακουμπά στον πάτο που έχει τοποθετηθεί στο εσωτερικό της σωλήνας. Στον πάτο έχει γίνει ένα μικτό «σκάψιμο» και με τη βοήθεια του κωνικού σχήματος του άξονα επιτρέπεται η περιστροφή του χωρίς να δημιουργούνται πολλές τριβές.

Ακόμη διαθέτει μηχανισμό με πείρο που δεν επιτρέπει την εξαγωγή του άξονα της προς τα επάνω, σε περίπτωση ισχυρών ανέμων.



Εικόνα 11.7.1.: Κατασκευή πτυσσόμενης βάσης στήριξης.



Εικόνα 11.7.2: Μηχανισμός βάσης στήριξης.



Εικόνα 11.7.3: Μηχανισμός βάσης στήριξης.



Εικόνα 11.7.4: Μηχανισμός με πείρο που επιτρέπει την περιστροφή της Α/Γ γύρο από τον άξονα της αλλά αποτρέπει την εξαγωγή της προς τα επάνω σε περίπτωση ισχυρών ανέμων.



Εικόνα 11.7.5: Ολοκληρωμένη βάση στήριξης.

11.8 ΑΝΟΙΓΜΑ ΟΠΩΝ ΣΤΙΣ ΒΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΣΚΟ ΣΤΕΡΕΩΣΗΣ

Η στερέωση των βάσεων των πτερυγίων επάνω στη γεννήτρια έγινε με κοχλίες. Οι οπές όπου θα περνούσαν οι κοχλίες ήτανε μια εργασία μείζονος σημασίας καθώς από αυτήν εξαρτιόταν η αποδοτικότητα των πτερυγίων. Αν δεν γινότανε σωστά τότε δεν θα γινότανε καλή εκμετάλλευση του άνεμου, αφού θα υπήρχε απόκλιση από την προβλεπόμενη σωστή θέση του εκάστοτε πτερυγίου. Επίσης θα υπήρχαν έντονοι κραδασμοί όπου θα μείωναν την αποδοτικότητα και ίσως οδηγούσανε σε αστοχία ολόκληρη την κατασκευή.

Τα πτερύγια θα στερεωθούν ανάμεσα σε δύο δίσκους σιδήρου διαμέτρου 385mm οι οποίοι αφού σχεδιάστηκαν, κόπηκαν με ηλεκτρικό τροχό πολύ προσεκτικά ώστε να μην χαλάσει το κέντρο βάρους και κατασταθεί δύσκολη η ζυγοστάθμιση.

Επάνω στους δίσκους είχανε σχεδιαστεί με την χρήση διαβήτη οι 3 ακριβείς θέσεις όπου θα τοποθετούνταν τα πτερύγια. Έτσι λοιπόν αυτοί οι δίσκοι δέθηκαν μαζί με σφικτήρα και τοποθετήθηκαν σταθερά επάνω σε κάθετο τρυπάνι όπως στην Εικ. 11.8.1. Στο κάθε πτερύγιο σχεδιάστηκε στο $\frac{1}{4}$ του μήκους της χορδής από τη βάση μέχρι το τελείωμα μία ευθεία γραμμή, η οποία προεκτεινόμενη θα περνούσε από το κέντρο των δίσκων και κατά συνέπεια από το κέντρο της γεννήτριας.

Στη συνέχεια και με την βοήθεια νήματος αλφαδιού και γωνίας 90 μοιρών έγινε η οριζοντίωση και η ευθυγράμμιση. Αυτή η διαδικασία αποσκοπεί στο να είναι όλα τα πτερύγια παράλληλα με τους μεταλλικούς δίσκους και συνεπώς κατά την περιστροφή τους να περνάνε όλα από το ίδιο «ίχνος». Έτσι το κάθε ένα ξεχωριστά τοποθετούνταν και οριζοντιωνόταν και στη συνέχεια πολύ προσεκτικά ανοιγόταν στο κάθε ένα από δύο οπές οι οποίες διαπερνούσαν ολόκληρη τη βάση του πτερυγίου αλλά και τους δύο δίσκους.

Όταν η διαδικασία ολοκληρώθηκε, τα τρία πτερύγια και οι δύο δίσκοι ταίριαζαν απόλυτα μεταξύ τους.



Εικόνα 11.8.1: Άνοιγμα οπών στις βάσεις των πτερυγίων.



Εικόνα 11.8.2: Άνοιγμα οπών στις βάσεις των πτερυγίων.



Εικόνα 11.8.3: Οριζοντίωση πτερυγίου με τους μεταλλικούς δίσκους



Εικόνα 11.8.4: Ευθυγράμμιση πτερυγίου με το κέντρο των δίσκων



Εικόνα 11.8.5: Ευθυγράμμιση πτερυγίου με το κέντρο των δίσκων

Αφού ολοκληρώθηκε το άνοιγμα των οπών, τα πτερύγια βάφτηκαν και ήταν πλέον έτοιμα για τοποθέτηση στη γεννήτρια.



Εικόνα 11.8.6: Πτερύγια ολοκληρωμένα

12. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ)

12.1 ΣΥΝΤΟΜΗ ΘΕΩΡΙΑ

Η κατασκευή της γεννήτριας έχει ως βασικό πρότυπο την κατασκευή από το εγχειρίδιο του Dr Smail Khennas του Schumacher Centre for Technology and Development.

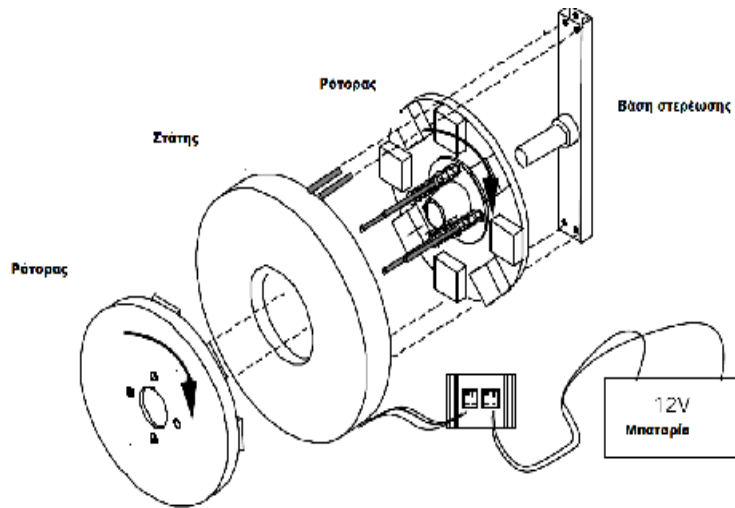
Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Generator). Η γεννήτρια θα παράγει εναλλασσόμενο τριφασικό ρεύμα χαμηλής τάσης και στη συνέχεια μέσω ανορθωτών θα μετατρέπεται σε συνεχές. Το παραγόμενο ρεύμα θα έχει ως σκοπό τη φόρτιση 12V μπαταριών.

Τα βασικά μέρη που απαρτίζουν τη γεννήτρια είναι :

- 1) Ο μεταλλικός κορμός, πάνω στον οποίο είναι στερεωμένος ο άξονας.
- 2) Ο στάτης, πάνω στον οποίο είναι τοποθετημένα τα τυλίγματα από σύρμα.
- 3) 2 δρομείς πάνω στους οποίους είναι τοποθετημένοι οι μαγνήτες
- 4) Ανορθωτές

Ο στάτης αποτελείται από έξι τυλίγματα κατασκευασμένα από χάλκινο σύρμα. Τα τυλίγματα στέλνουν το παραγόμενο ρεύμα στους ανορθωτές όπου μετατρέπεται από AC σε DC για να φορτιστεί η μπαταρία. Οι ανορθωτές είναι τοποθετημένοι πάνω σε μια αλουμινένια ψήκτρα ώστε να μην υπερθερμαίνονται.

Οι δρομείς είναι τοποθετημένοι πάνω σε ρουλεμάν τα οποία περιστρέφονται πάνω στον άξονα. Στη γεννήτρια υπάρχουν δύο δρομείς. Ο ένας βρίσκεται πίσω από το στάτη και εσώκλειστος σε αυτόν και ο άλλος στο μπροστινό μέρος είναι στερεωμένος πάνω στον πρώτο στάτη με μακριά μπουλόνια τα οποία περνάνε μέσα από τον στάτη από μία τρύπα. Πάνω στα ίδια μπουλόνια θα στερεωθούν και δύο άλλες λεπτές πλάκες σιδήρου στις οποίες θα στερεωθούν τα πτερύγια όπου θα περιστρέψουν τους μαγνητικούς στροφείς περιμετρικά από τα τυλίγματα. Η μαγνητική ροή περνάει από τον ένα ρότορα στον άλλο διαμέσου του στάτη. Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα οφείλεται στη μαγνητική ροή.



Σχήμα 12.1.1: Σχηματική διάταξη γεννήτριας

12.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΕΛΙΞΕΩΝ.

Σε αυτήν την ενότητα θα περιγραφεί η διαδικασία κατασκευής των καλούπιών των πρόσθετων μηχανισμών και των περιελίξεων για την κατασκευή της γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη. Τα καλούπια μπορούν να κατασκευαστούν από ξύλο ή αλουμίνιο. Πρέπει κατά την κατασκευή τους να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε οι επιφάνειες τους να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο λείες. Στη συγκεκριμένη εργασία τα καλούπια θα κατασκευαστούν από ξύλο (νοβοπάν) μιας και η κατασκευή τους από αλουμίνιο είναι μία ιδιαίτερα δαπανηρή εργασία. Επειδή τα κομμάτια που απαρτίζουν τα καλούπια ήταν κυκλικά δεν μπορούσαν να κατασκευαστούν από εμάς τους ίδιους αφού η κατασκευή τους απαιτούσε ειδικά ξυλουργικά εργαλεία. Έτσι λοιπόν δόθηκαν οι επιθυμητές διαστάσεις σε επαγγελματία όπου και τα έκοψε. Παρακάτω περιγράφεται το σύρμα και οι μαγνήτες που χρησιμοποιήθηκαν.

Σύρμα περιέλιξης

Το σύρμα περιέλιξης που χρησιμοποιήθηκε αγοράστηκε από κατάστημα επισκευών μοτέρ. Αυτό ήταν πάχους 1.7mm τοποθετημένο σε καρούλι.



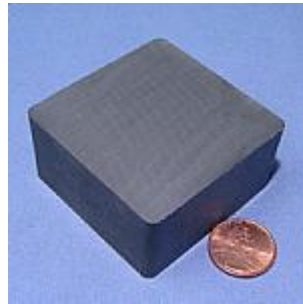
Εικόνα 12.2.1: Σύρμα περιέλιξης 1,7mm στο καρούλι.

Μαγνήτες

Οι μαγνήτες ήρθαν με παραγγελία από Αμερική αφού δεν ήτανε εφικτό να βρεθούν σε εγχώρια καταστήματα και είναι κοινοί μαγνήτες φερίτιου: Ceramic Magnets C8 2"X2"X1" Hard Ferrite Magnets.

Οι μαγνήτες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μεγαλύτεροι από τους προβλεπόμενους σε πάχος (περίπου μισό εκ. παχύτεροι) αλλά και σε ελκτική δύναμη.

Σε αυτό το γεγονός οφείλεται κατά κύριο λόγο η αυξημένη απόδοση σε σχέση με την προβλεπόμενη όπως θα διαπιστωθεί στο πειραματικό μέρος της εργασίας.



Εικόνα12.2.2: Μαγνήτης φερίτιου

Υλικό: σκληρός φερίτης τάξης 8

Βάρος: 17 λίμπρες

Σύσταση: Ni+Cu+Ni

Ελκτική δύναμη: 17 λίμπρες ή 7,7 κιλά



Εικόνα 12.2.3: Μαγνήτες στη συσκευασία.

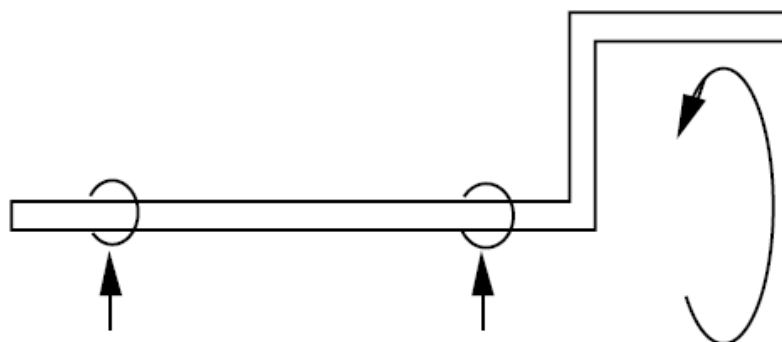
12.2.1 Μηχανισμός κατασκευής τυλιγμάτων

Ο στάτης περιέχει έξι τυλίγματα από σύρμα χαλκού. Για τη κατασκευή του κάθε τυλιγματος χρειάστηκαν 100 περιστροφές. Κάθε τύλιγμα έχει 110mm πλάτος και 110mm μήκος.



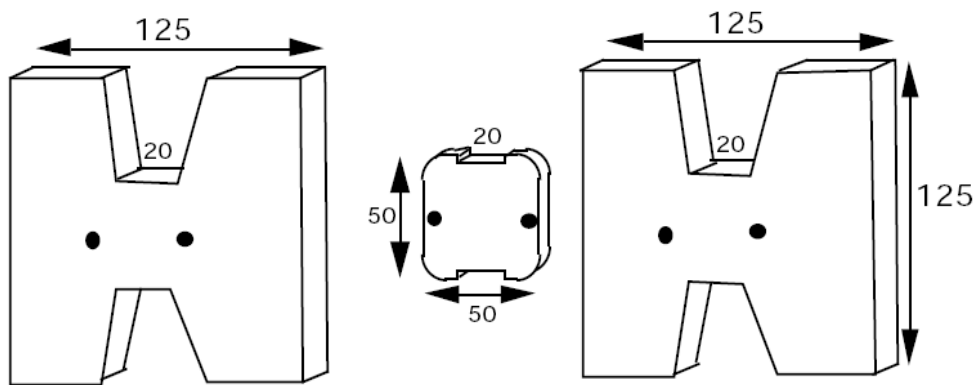
Εικόνα 12.2.1.1: Τύλιγμα στάτη

Το τύλιγμα θα διαμορφωθεί πάνω σε ένα μηχανισμό από κόντρα πλακέ το οποίο είναι τοποθετημένο στο τέλος ενός χειροκίνητου άξονα μεταξύ δύο μεταλλικών επιφανειών που έχουν σχήμα “H”. Στο τέλος του άξονα είναι προσαρμοσμένη μια μεταλλική επιφάνεια 60*30*6 mm στην οποία ανοίχθηκαν δύο οπές 6 mm και 40 mm από το κέντρο του άξονα. Πάνω εκεί είναι που θα τοποθετηθεί το καλούπι και οι μεταλλικές επιφάνειες “H”.



Σχήμα 12.2.1.1: Χειροκίνητος άξονας

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε το ξύλινο μέρος το οποίο έχει διαστάσεις 50*50*13 mm και έχει στρογγυλεμένες γωνίες αλλά και τις μεταλλικές επιφάνειες οι οποίες είναι 125*125 mm και έχουν 20 mm πλατιές εγκοπές πάνω και κάτω. Οι εγκοπές είναι για να τοποθετηθεί κάποιο συγκρατητικό μέσο κάτω από το τύλιγμα ώστε να το δεθεί προτού το βγει από το καλούπι. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε δεματικό (zip tie).



Σχήμα 12.2.1.2: Μέρη μηχανισμού τυλιγμάτων .

Έπειτα ενώθηκαν όλα τα κομμάτια και ανοίχθηκαν οπές σε ίδια απόσταση και διάμετρο, με αυτές της μεταλλικής επιφάνειας που είχε προσαρμοστεί στο τέλος του άξονα και με βίδες συγκρατήθηκαν όλα τα κομμάτια μαζί.

Στην Εικ. 12.2.1.2 φαίνεται ολοκληρωμένη η κατασκευή για τη δημιουργία των τυλιγμάτων.

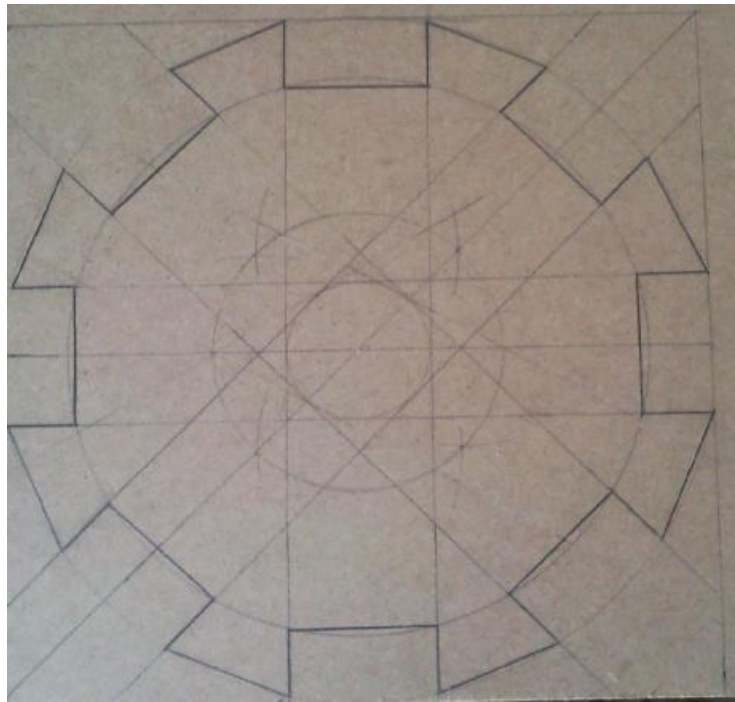


Εικόνα 12.2.1.2: Περιστροφικός μηχανισμός για δημιουργία τυλιγμάτων

12.2.2 Εξάρτημα για την τοποθέτηση των μαγνητών

Το εξάρτημα αυτό είναι ουσιαστικά μια βάση που θα χρησιμοποιηθεί ώστε οι μαγνήτες να τοποθετηθούν σωστά πάνω στο μεταλλικό δίσκο. Θα κατασκευαστεί από κόντρα πλακέ 250 x 250 mm. Η διαδικασία κατασκευής περιγράφεται παρακάτω.

Από το κέντρο της ξύλινης επιφάνειας σχεδιάστηκαν τρεις κύκλοι με διάμετρο 50 mm, 102 mm και 200 mm. Στη συνέχεια χαράχτηκε ένα ζευγάρι παράλληλων γραμμών εφαπτόμενα στον κύκλο, διαμέτρου 50 mm και έπειτα άλλα τρία ζευγάρια στις 45° και 90° αντίστοιχα. Με βάση αυτές τις γραμμές σχεδιάστηκαν και κόπηκαν οι θέσεις των μαγνητών. Τέλος, σχεδιάστηκε μια γραμμή η οποία περνάει από τα κέντρα 2 απέναντι μαγνητών, τοποθετήθηκε ο “σύνδεσμος” πάνω στον κύκλο διαμέτρου 102 mm και ανοίχτηκαν τέσσερις οπές οι οποίες θα ταιριάζουν με τις αντίστοιχες στο μεταλλικό δίσκο που θα τοποθετηθούν οι μαγνήτες.

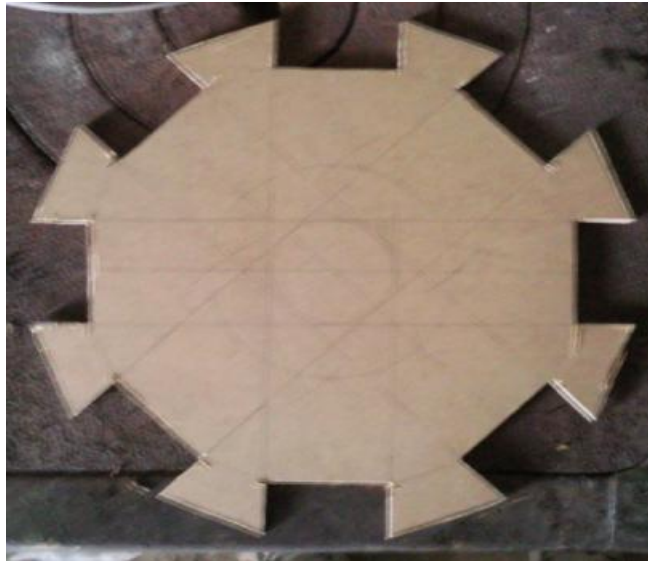


Εικόνα 12.2.2.1: Δημιουργία επιφάνειας για αρχική τοποθέτηση μαγνητών



Εικόνα 12.2.2.2: Φαίνεται ο “σύνδεσμος” βάσει του οποίου θα ανοιχτούν οι οπές στο ξύλο

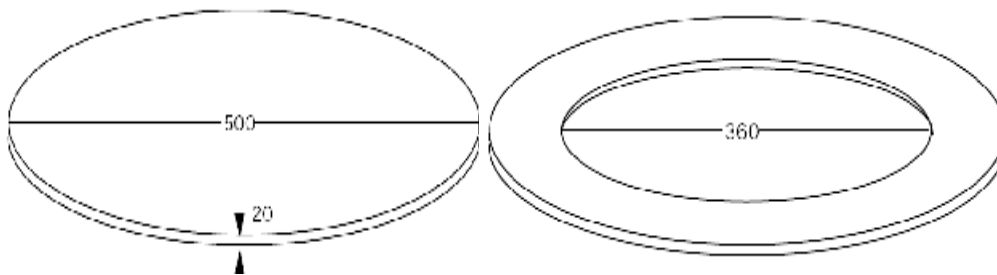
Ο εδρανοφόρος σύνδεσμος θα τοποθετηθεί πάνω στον άξονα. Είναι το λεγόμενο μουαγιέ και συγκεκριμένα ενός αυτοκινήτου τύπου Peugeot 205 και αποτελεί μέρος από το πίσω ταμπούρο το οποίο έχει κοπεί σε τόρνο και έχει μείνει μόνο το κομμάτι όπου μας ενδιαφέρει, δηλαδή μέχρι τις οπές όπου θα στερεωθούν και οι δρομείς.



Εικόνα 12.2.2.3: Κοπή των θέσεων των μαγνητών.

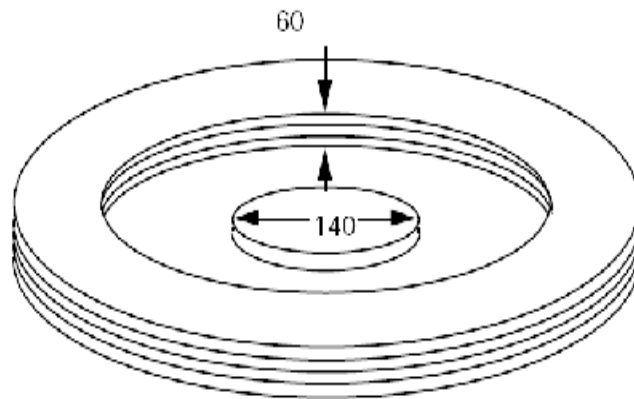
12.2.3 Κατασκευή εξωτερικού καλουπιού στάτη

Αρχικά κόπηκαν κυλινδρικοί δίσκοι διαμέτρου 500 mm και στη συνέχεια σε όλους, εκτός από ένα δίσκο, αφαιρέθηκε ένας εσωτερικός κύκλος διαμέτρου 360 mm.



Σχήμα 12.2.3.1: Δίσκος διαμέτρου 500 mm και δακτύλιος εσωτερικής διαμέτρου 360 mm

Έπειτα κόπηκε ένας δίσκος διαμέτρου 140 mm και πάχους 15 mm. Όλα τα τεμάχια κολλήθηκαν μεταξύ τους με κόλλα ξύλου και στη συνέχεια ανοίχθηκε μια οπή 20 mm στο κέντρο για τη στερέωση στον τόρνο. Το βάθος του καλουπιού αυτού ήταν 60 mm.



Σχήμα 12.2.3.2: Φαίνεται σχηματικά η ανωτέρω διαδικασία



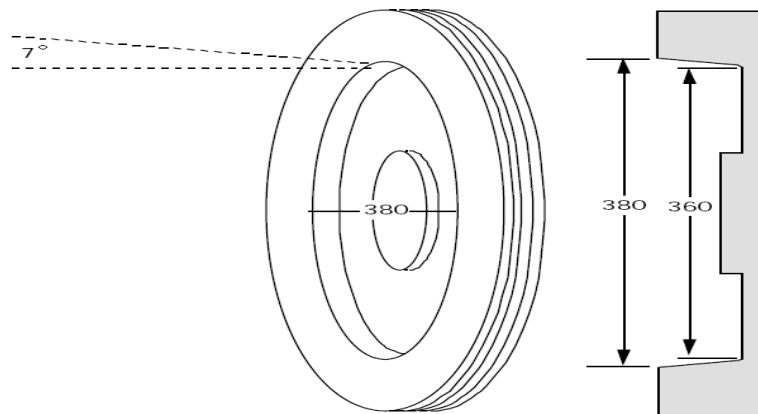
Εικόνα 12.2.3.1: Τα κομμάτια μετά την κοπή τους στο ξυλουργείο.



Εικόνα 12.2.3.2: Τοποθέτηση και κεντράρισμα των κομματιών πριν κολληθούν και τρυπηθούν.

12.2.3.1 Κλίση στο εσωτερικό του καλουπιού.

Για να είναι εύκολη η αποκόλληση του στάτη από το καλούπι μετά την πήξη του πολυεστέρα έπρεπε να δοθεί μία κλίση στο εσωτερικό του καλουπιού. Έτσι στη συνέχεια αφού κολλήθηκαν όλα τα κομμάτια μεταξύ τους έγινε επεξεργασία σε τόρνο για να δοθεί η κατάλληλη κλίση στο εσωτερικό του καλουπιού. Η κλίση αυτή ήταν 7° στο εσωτερικό τοίχωμα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η διάμετρος του ανοίγματος της κορυφής του εσωτερικού τοιχώματος να είναι 380 mm και η διάμετρος στον το πυθμένα του τοιχώματος έως απέναντι 360 mm. Βλέπε Σχ. 12.2.3.1.1



Σχήμα 12.2.3.1.1: Δημιουργία γωνίας 7° στο εσωτερικό τοίχωμα του καλουπιού και μεταβολή της διαμέτρου μετά την επεξεργασία.

Σημείωση: Η ίδια διαδικασία έγινε και στο τοίχωμα του μικρού δίσκου, δηλαδή δημιουργία κλίσης 7° και η διάμετρος του στη κορυφή έγινε από 140 mm σε 130 mm

12.2.3.2 Δέσιμο κομματιών στον τόρνο.

Για να δοθεί η κατάλληλη κλίση στα καλούπια έγινε επεξεργασία με τη βοήθεια τόρνου. Επειδή ο τόρνος που υπήρχε στη διάθεση μας ήταν μικρού μεγέθους, το καλούπια δεν ήτανε εφικτό να δεθούν κανονικά επειδή δεν χωρούσαν. Γι' αυτόν το λόγο, επιλέχτηκε να δεθούν από την πίσω πλευρά όπως φαίνεται και από την Εικ. 12.2.3.2.1. Περάστηκε λοιπόν μια ντίζα διαμέτρου περίπου 20mm και δέθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να προεξέχει από την πίσω πλευρά. Επάνω στην ντίζα αυτή στερεωνότανε το κάθε κομμάτι προς επεξεργασία. Η αφαίρεση του υλικού για τη δημιουργία της κλίσης έγινε με την βοήθεια ξυλόλιμας και γυαλόχαρτων.



Εικόνα 12.2.3.2.1: Τόρνος που χρησιμοποιήθηκε

12.2.4 Κατασκευή εσωτερικού καλουπιού στάτη.

Το εσωτερικό καλούπι του στάτη κατασκευάστηκε για να πιέζει τα πηνία όταν το τοποθετούμε κατά την κατασκευή του στάτη με σκοπό να τα φέρνει όλα στο ίδιο επίπεδο αλλά και να φέρνει σε μια επίπεδη επιφάνεια τον πολυεστέρα. Ακόμη βοηθάει στη δημιουργία ενός τοιχώματος κάλυψης του δρομέα.

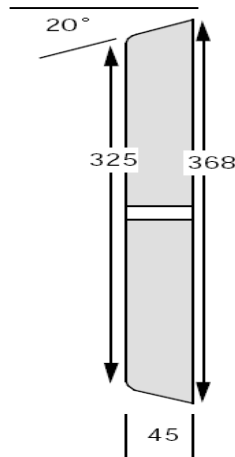
Για την κατασκευή του εσωτερικού καλουπιού του στάτη κόπηκαν τρεις δίσκοι ξύλου με διάμετρο 370 mm και κολλήθηκαν δημιουργώντας μια στοίβα ύψους 45 mm. Ανοίχθηκε μια οπή διαμέτρου 20 mm στο κέντρο ώστε να προσαρμόζεται στον τόρνο για την περεταίρω επεξεργασία. Έτσι δέθηκε στον τόρνο για να δημιουργηθεί η κατάλληλη κλίση στο τοίχωμα του καλουπιού δηλαδή 20°.



Εικόνα 12.2.4.1: Φαίνονται οι τρεις δίσκοι όπου απαρτίζουν το εσωτερικό καλούπι. Τοποθετήθηκε κόλλα ξύλου και δέθηκαν με σφικτήρες.

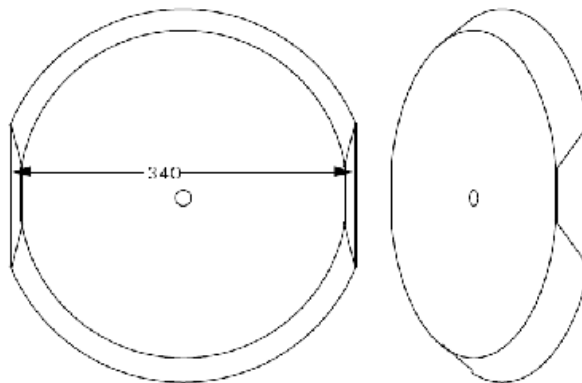


Εικόνα 12.2.4.2: Εσωτερικό καλούπι πάνω στο τόρνο και κλίση 20° που έχει δημιουργηθεί.



Σχήμα 12.2.4.1: Το καλούπι σε πλάγια τομή. Διακρίνονται οι διαστάσεις μετά την κατεργασία

Τέλος σχεδιάστηκε μια ευθεία 340 mm στη μεγάλη επιφάνεια του καλουπιού και κόπηκαν δύο επίπεδες επιφάνειες όπως φαίνεται στο Σχ 12.4.4.2



Σχήμα 12.2.4.2: Κοπή των δύο επίπεδων επιφανειών.



Εικόνα 12.2.4.3: Όψη τελειωμένου εσωτερικού καλουπιού. Έπειτα ελέγχθηκε αν το εσωτερικό καλούπι εφαρμόζει στο εξωτερικό και αν υπάρχει ένα διάκενο τουλάχιστον 5 mm μεταξύ τους.



Εικόνα 12.2.4.4: Τοποθέτηση του εσωτερικού καλουπιού μέσα στο εξωτερικό

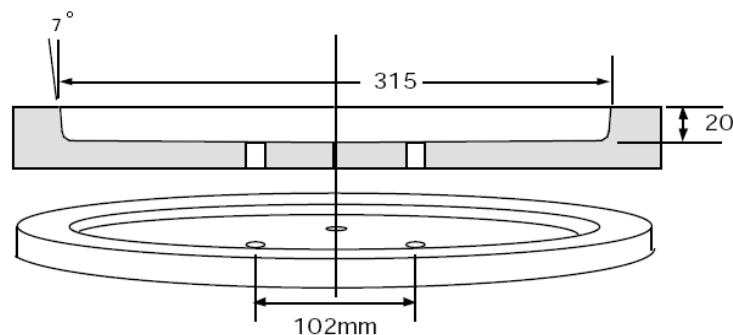
Σημείωση : Η κοπή των επίπεδων επιφανειών έγινε ώστε να υπάρχει χώρος για να περάσουν οι βίδες οι οποίες θα συγκρατήσουν την όλη διάταξη. Επίσης η κλίση των 20° έγινε έτσι ώστε να γίνεται εύκολα η αποκόλληση του στάτη από το καλούπι μετά την πήξη του πολυεστέρα αλλά και για να υπάρχει ένα μικρό διάκενο μεταξύ των τοιχωμάτων του πάνω και κάτω καλουπιού, ώστε ο δρομέας να μπαίνει στο εσωτερικό του. Στις παρακάτω ενότητες θα γίνει αναλυτικότερη περιγραφή.

12.2.5 Εξωτερικό καλούπι δρομέα

Το εξωτερικό καλούπι είναι παρόμοιο με το εξωτερικό του στάτη, αλλά η κατασκευή του είναι απλούστερη. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι διαστάσεις του και η κλίση του εσωτερικού τοιχώματος.



Εικόνα 12.2.5.1: Καλούπια δρομέα

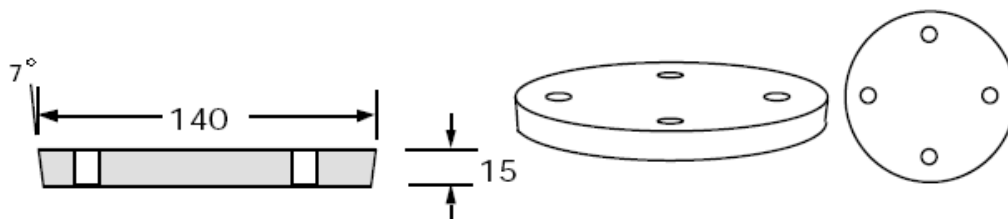


Σχήμα 12.2.5.1: Εξωτερικό καλούπι δρομέα

Η κατασκευή του έγινε με τον ίδιο τρόπο που έγινε και του στάτη αλλά με τις διαστάσεις που φαίνονται στο Σχ. 12.2.5.1. Για το άνοιγμα των οπών χρησιμοποιήθηκε ο σύνδεσμος ο σύνδεσμος (μουαγιέ) όπου θα χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια.

12.2.6 Εσωτερικό καλούπι δρομέα

Αυτό το καλούπι χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να δημιουργεί χώρο για να μπει ο σύνδεσμος. Η κλίση σε αυτό δόθηκε ομοίως για την εύκολη απομάκρυνση του δρομέα από το καλούπι μετά την πήξη του πολυεστέρα. Ο τρόπος κατασκευής και για αυτό το καλούπι παραμένει ο ίδιος. Επίσης, οι οπές περιμετρικά ανοίχτηκαν με τη βοήθεια του “συνδέσμου”.



Σχήμα 12.2.6.1: Στη πλάγια τομή διακρίνονται οι διαστάσεις που έχει το καλούπι καθώς και η κλίση των 7° .

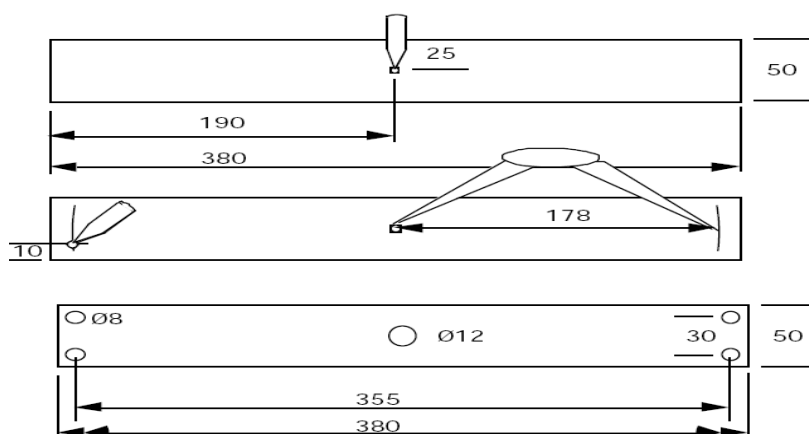


Εικόνα 12.2.6.1: Άνοιγμα οπών στα καλούπια.

12.2.7 Βοηθητικό εξάρτημα για το καλούπωμα του στάτη

Στο στάτη θα προσαρμοστούν τέσσερις βίδες των 8mm οι οποίες αργότερα θα βιδωθούν με τον κορμό. Οι βίδες θα καλουπωθούν μαζί με τον στάτη, άρα χρειαζόμαστε ένα εξάρτημα το οποίο θα κρατήσει σταθερές τις βίδες μέχρι να στεγνώσει η ρητίνη. Η κατασκευή του έγινε με μεγάλη ακρίβεια γιατί αλλιώς υπήρχε περίπτωση αργότερα να μην ταιριάζουν στον κορμό. Το εξάρτημα, είναι ένα ξύλο ορθογωνικής διατομής 380 x 50 x 25 mm.

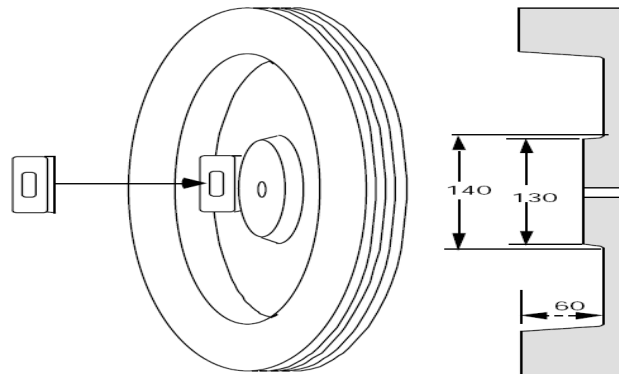
Η κατασκευή του ήταν απλή και έγινε ως εξής: Στην πλατιά επιφάνεια του ξύλου σημειώθηκε το κέντρο και με διαβήτη, ανοιγμένο σε ακτίνα 178 mm από το κέντρο, χαράχθηκαν τα τόξα όπως φαίνεται στο Σχ. 12.2.7.1. Από τα τόξα σημειώθηκαν τέσσερα σημεία, από δύο σε κάθε πλευρά, τα οποία μεταξύ τους απέχουν 30 mm και από την άκρη του ξύλου 10 mm. Τέλος ανοίχθηκαν στα σημεία οπές διαμέτρου 8 mm



Σχήμα 12.2.7.1: Κατασκευή εξαρτήματος για στήριξη τεσσάρων βιδών στον στάτη

12.2.8 Έλεγχος καλουπιού και ενίσχυση στάτη

Πριν την έναρξη της κατασκευής του στάτη έγινε ένας τυπικός έλεγχος για το αν τα τυλίγματα εφαρμόζουν σωστά στο καλούπι.



Σχήμα 12.2.8.1: Έλεγχος εφαρμογής των τυλιγμάτων στο καλούπι



Εικόνα 12.2.8.1: Όπως φαίνεται και από το ανωτέρω σχήμα τα τυλίγματα εφαρμόζουν ακριβώς στο καλούπι. Έτσι αρχίζει η διαδικασία της συνδεσμολογίας.

Για την ενίσχυση του στάτη περιμετρικά, πάνω αλλά και κάτω από αυτόν χρησιμοποιήθηκαν κομμάτια υαλονήματος. Αρχικά φτιάχτηκαν κάποια ομοιώματα του καλουπιού από χαρτί και στη συνέχεια αντιγράφηκαν πάνω σε υαλόνημα όπου και κόπηκαν.



Εικόνα 12.2.8.2: Στην αριστερή εικόνα το υαλόνημα θα χρησιμοποιηθεί για το τοίχωμα του στάτη ενώ στην δεξιά για την πάνω και κάτω επιφάνεια αυτού.

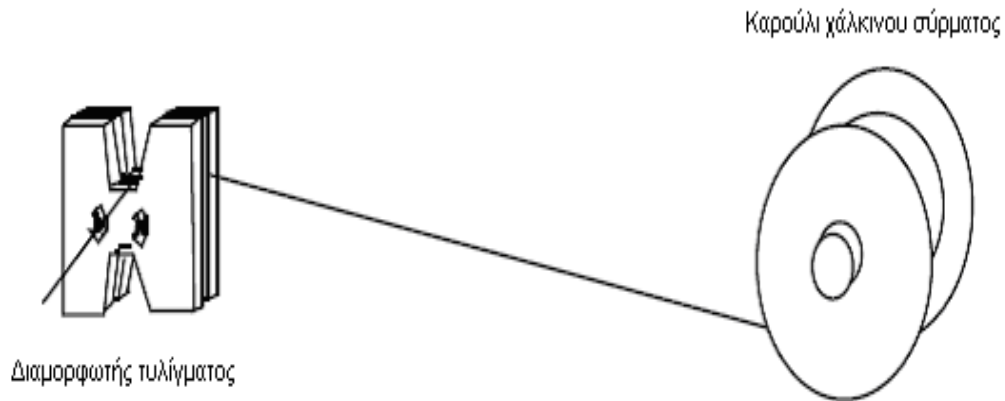
Το πλάτος του υαλονήματος για τα τοιχώματα είναι 75 mm. Για την πάνω και κάτω επιφάνεια ο εσωτερικός κύκλος έχει διάμετρο 140 mm και ο εξωτερικός 380 mm.

12.2.9 Κατασκευή του στάτη

Στην ενότητα αυτή θα γίνει περιγραφή του πώς έγινε η κατασκευή του στάτη χρησιμοποιώντας τα καλούπια και τα βοηθητικά εξαρτήματα που είχανε κατασκευαστεί στις προηγούμενες ενότητες.

Σε πρώτο βήμα θα κατασκευαστούν τα τυλίγματα του στάτη. Για την κατασκευή των τυλιγμάτων χρησιμοποιήθηκε το εξάρτημα τυλίγματος που κατασκευάστηκε στην Εν. 12.2.1 καθώς και ένα καρούλι χάλκινου σύρματος. Το καρούλι προσαρμόστηκε σε έναν άξονα ώστε να είναι δυνατή η περιστροφή του. Στερεώθηκε το εξάρτημα τυλίγματος σταθερά επάνω σε μία μέγγενη. Έπειτα, 100 mm από την άκρη του σύρματος, δημιουργήθηκε μία γωνία 90° περίπου η οποία έγινε για να μη λασκάρει το σύρμα κατά τις πρώτες περιστροφές και να είναι αρκετά σφιχτό το τύλιγμα, όπως φαίνεται στο Σχ. 12.2.9.1. Έτσι ξεκίνησε το τύλιγμα των εκατό σπειρών. Ήταν μια κουραστική εργασία και απαιτούσε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην καβαλικεύουν οι σπείρες η μία την άλλη γιατί έτσι θα υπήρχε χαμηλή απόδοση λόγω της δημιουργίας μικρορευμάτων.

Χρειάστηκαν 100 περιστροφές μέχρι να ολοκληρωθεί το τύλιγμα. Τέλος περάστηκε ένα δεματικό από το τύλιγμα όπως φαίνεται και στην Εικ. 12.2.9.3, δέθηκε σφιχτά και αφαιρέθηκε το τύλιγμα από το καλούπι. Συνολικά κατασκευάστηκαν έξι ίδια τυλίγματα τα οποία και αριθμήθηκαν από το 1-6.



Σχήμα 12.2.9.1 : Τρόπος με τον οποίο τοποθετήθηκε το καρούλι έναντι του διαμορφωτή τυλίγματος.

Σημείωση: Όλα τα τυλίγματα κατασκευάστηκαν με την ίδια φορά περιστροφής (δεξιόστροφα), ώστε να είναι όλα όμοια μεταξύ τους.

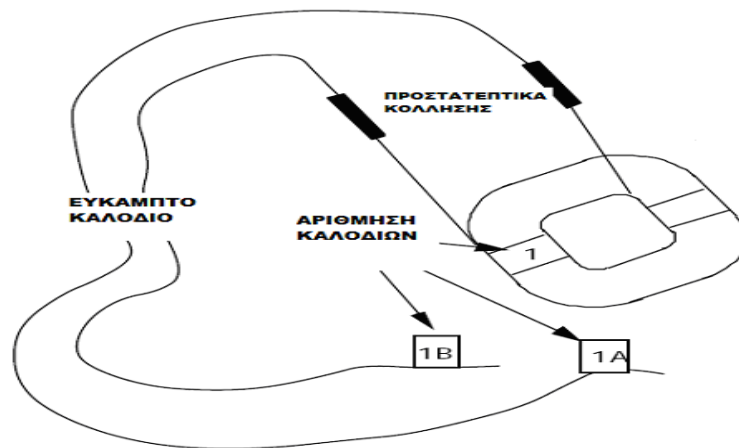


Εικόνα 12.2.9.1: Σύρμα περιέλιξης 1,7mm στο καρούλι.

Για την ολοκλήρωση των τυλιγμάτων έπρεπε να ενωθούν οι άκρες τους με καλώδιο με το οποίο θα γίνει στο τέλος η συνδεσμολογία. Η ένωση των καλωδίων με το χαλκό έγινε με κόλληση καλά και πάνω από την ένωση εφαρμόστηκε μόνωση για προστασία από το αναπτυσσόμενο ρεύμα. Τέλος, αριθμήθηκε η κάθε άκρη των καλωδίων ώστε να γίνει σωστά η τελική ένωση. Η αριθμηση έγινε με τη χρήση ταινίας όπου αναφερόταν ο αριθμός του κάθε πηνίου-καλωδίου.



Εικόνα 12.2.9.2: Αρίθμηση καλωδίων



Σχήμα 12.2.9.2: Ένωση καλωδίου με τύλιγμα και αρίθμηση των άκρων του



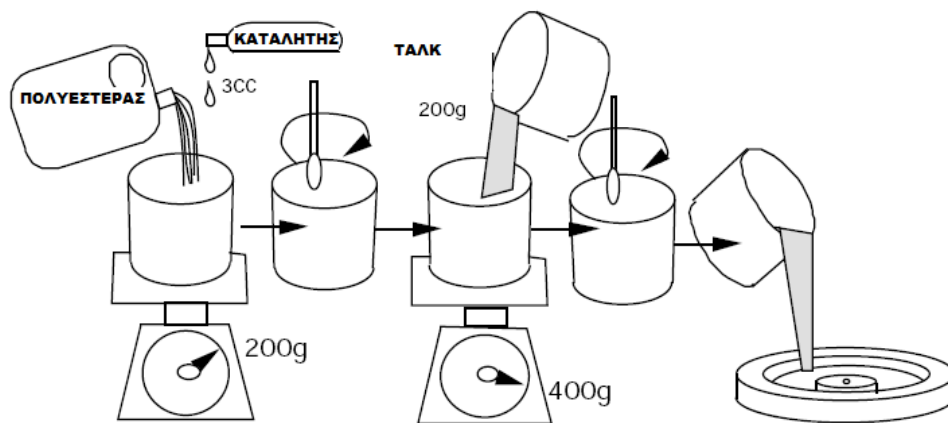
Εικόνα 12.2.9.3: Διακρίνεται το δεματικό το οποίο συγκρατεί σφιχτά το τύλιγμα

Έχοντας ολοκληρώσει τη κατασκευή των τυλιγμάτων συνεχίστηκε η διαδικασία κατασκευής του στάτη ετοιμάζοντας το μείγμα με το οποίο θα γεμίσει το καλούπι.

Το καλούπι του στάτη αποτελείται από :

- Έξι τυλίγματα
- Ρητίνη πολυεστέρα και πούδρα
- Φάιμπεργκλας
- Τέσσερις κοχλίες 8 mm x 100 mm

Το μείγμα αποτελείται από ρητίνη πολυεστέρα, σκληρυντή και πούδρα. Η πούδρα κάνει το μείγμα πιο παχύρρευστο, ελαφρύτερο, ισχυρότερο καθώς επίσης γίνεται και οικονομία στον πολυεστέρα. Στο Σχ. 12.2.9.3 φαίνεται διαγραμματικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε.



Σχήμα 12.2.9.3: Σχηματική αναπαράσταση για τη δημιουργία του μείγματος.

Αρχικά, περάστηκε αντικολλητικό και τοποθετήθηκε μεμβράνη στο εξωτερικό του καλουπιού ώστε να μπορέσει να αφαιρεθεί στο τέλος από το στάτη, Εικ. 12.2.9.4. Στη συνέχεια περάστηκε μία στρώση πολυεστέρα χωρίς πούδρα και τοποθετήθηκαν στον πάτο και στα τοιχώματα του, τα κομμάτια υαλονήματος που είχαν κοπεί, τα οποία όπως προαναφέρθηκε είναι για τη ενίσχυση του στάτη. Για τη διαδικασία αυτή χρειαστήκαν 200 γρ. ρητίνη και 3 cc σκληρυντή (δεν χρησιμοποιήθηκε πούδρα στο πρώτο μείγμα). Βλέπε Εικ. 12.2.9.5.



Εικόνα 12.2.9.4: Τοποθέτηση αντικολλητικού και μεμβράνης στο εξωτερικό καλούπι



Εικόνα 12.2.9.5: Τοποθέτηση υαλονήματος στο πάτο και στα τοιχώματα

Έπειτα τοποθετήθηκαν τα τυλίγματα μέσα στο καλούπι πολύ προσεκτικά και βγήκαν όλα τα καλώδια έξω από αυτό. Βλέπε Εικ. 12.2.9.6. Τέλος δέθηκαν όλα μαζί με δεματικά και σχηματίστηκαν δύο πλεξούδες. Βλέπε Εικ. 12.2.9.7.

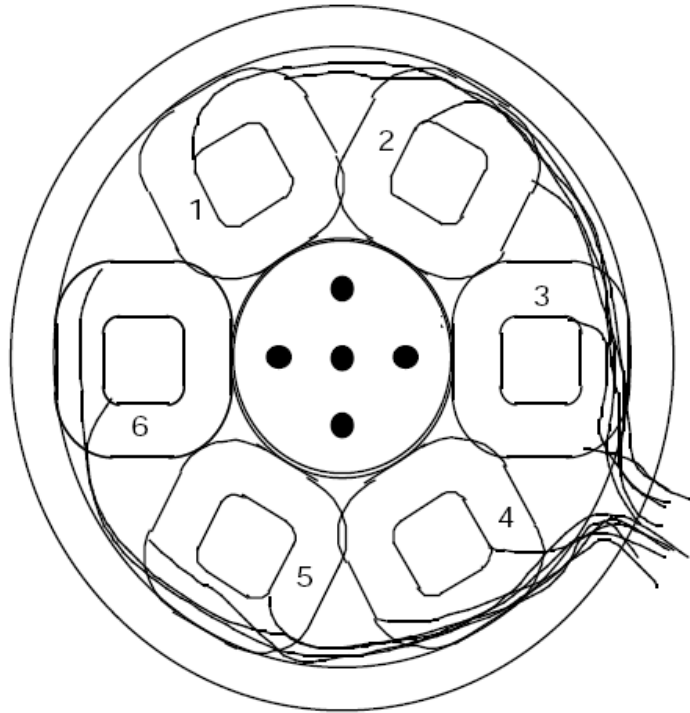


Εικόνα 12.2.9.6: Τοποθέτηση τυλιγμάτων



Εικόνα 12.2.9.7: Δέσιμο καλωδίων

Σημείωση: Τα πηνία τοποθετήθηκαν σύμφωνα με την αρίθμηση και με τέτοιο τρόπο ώστε όλα τα καλώδια να βγαίνουν από το ίδιο σημείο. Βλέπε Σχ. 12.2.9.5.



Σχήμα 12.2.9.5: Τοποθέτηση πηνίων με τη σωστή σειρά.



Σχήμα 12.2.9.8: Τοποθέτηση μίγματος πολυεστέρα-πούδρας.



Σχήμα 12.2.9.9: Τοποθέτηση μίγματος πολυεστέρα-πούδρας.

Ανακατεύθηκαν άλλα 100 γρ. ρητίνης και 2cc σκληρυντή και χύθηκε επάνω στα πηνία με σκοπό να εμποτιστούν. Στη συνέχεια ανακατεύθηκαν 600 γρ. ρητίνης, 9cc σκληρυντή και 600 γρ. πούδρα και γεμίστηκαν τα κενά μεταξύ των τυλιγμάτων. Το μείγμα γέμισε το εξωτερικό καλούπι μέχρι τη κορυφή του εσωτερικού κυλίνδρου. Τέλος, αναμίχθηκε μια ποσότητα μίγματος από 200 γρ. ρητίνη, 3cc σκληρυντή και 100 γρ. πούδρα και εφαρμόστηκε το τελευταίο κυκλικό κομμάτι υαλονήματος πάνω από τα πηνία. Στο σημείο αυτό περάστηκε η ντίζα των 20mm με ένα περικόχλιο από την κάτω μεριά ώστε να την εμποδίζει να βγει προς τα επάνω κατά τη σύσφιξη. Τοποθετήθηκε το εσωτερικό καλούπι μέσα στο εξωτερικό με προσοχή ώστε τα καλώδια να περνάνε από την μία εγκοπή.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε το εξάρτημα συγκράτησης των τεσσάρων ντιζών και μετά οι τέσσερις ντίζες. Αυτές τοποθετήθηκαν με προσοχή ώστε τα καλώδια να περνάνε ανάμεσα από τις δύο. Έπειτα φτιάχτηκε ακόμη ένα μείγμα πολυεστέρα αρκετό ώστε να μπορέσει να γεμίσει όλο το κενό ανάμεσα από τα δύο καλούπια και να δημιουργήσει το τοίχωμα. Για αυτό, λόγω του ότι δεν υπήρχε αρκετός χώρος για να περάσει, χρησιμοποιήθηκε σύριγγα ώστε να χωράει από το μικρό κενό μεταξύ των δύο καλουπιών. Αφού τοποθετήθηκε αρκετό μίγμα, τότε περάστηκε μία ροδέλα και το περικόχλιο από την πάνω πλευρά και συσφίχτηκαν όλα μαζί.

Λίγη ποσότητα πολυεστέρα ξεχείλισε από την σχισμή ως δείγμα πλήρωσης. Τότε ολόκληρο το καλούπι ανακινήθηκε προσεκτικά για να αφαιρεθούν τυχόν φυσαλίδες που θα δημιουργούσαν πρόβλημα αντοχής. Τέλος αφέθηκε να στεγνώσει.

Σημείωση: Το μείγμα δε φτιάχτηκε όλο μαζί ώστε να υπάρχει χρόνος να συνεχιστεί η εργασία χωρίς τον κίνδυνο πήξης του μίγματος.



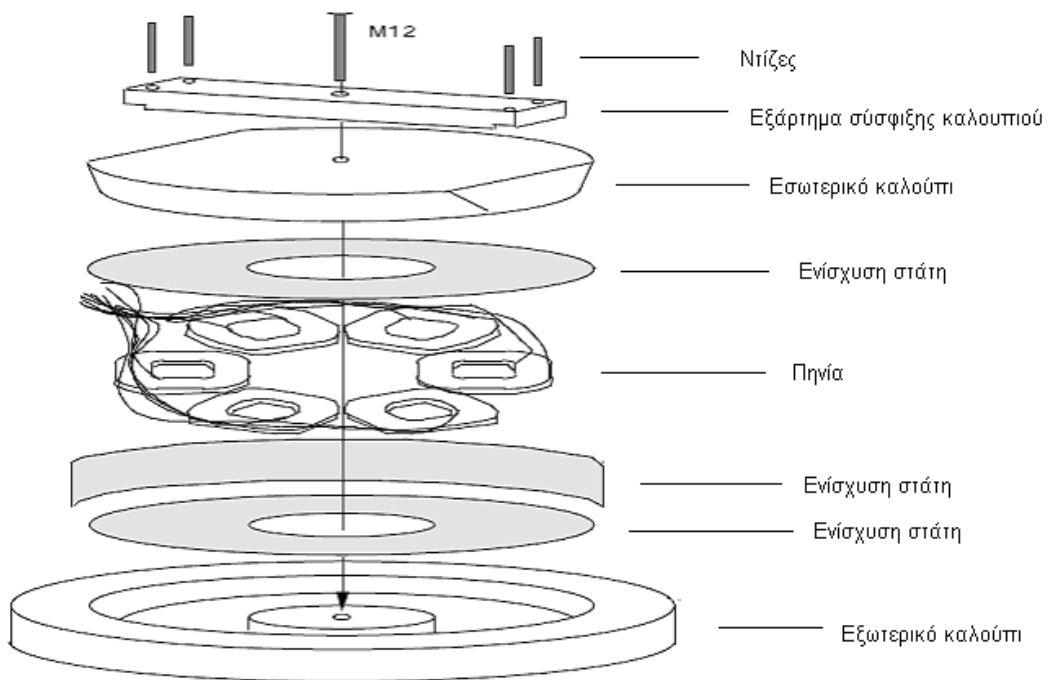
Εικόνα 12.2.9.10: Εξάρτημα συγκράτησης ντιζών.



Εικόνα 12.2.9.11: Τοποθέτηση του εσωτερικού καλουπιού μέσα στο εξωτερικό και σύσφιξη όλων μαζί.



Εικόνα 12.2.9.12: Δέσμη καλωδίων στάτη.



Σχήμα 12.2.9.5: Διακρίνονται όλα τα κομμάτια που απαρτίζουν το καλούπι του σιάτη

Αφού αφέθηκε το καλούπι για αρκετές ώρες μέχρι να σταθεροποιηθεί εντελώς, αποχωρίστηκαν τα δύο καλούπια με προσοχή.



Εικόνα 12.2.9.13: Τελική μορφή του σιάτη μετά τον αποχωρισμό του.

12.2.10 Κατασκευή Δρομέα

Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή των δύο δρομέων. Σαν πρώτο βήμα θα κατασκευαστεί η μαγνητική πλάκα (δίσκος), η οποία είναι η βάση που θα τοποθετηθούν οι μαγνήτες.

Αφού δόθηκαν οι διαστάσεις σε μηχανουργείο, κόπηκαν δύο δίσκοι σιδήρου διαμέτρου 305mm και 6mm πάχους. Κάθε δρομέας περιλαμβάνει ένα μεταλλικό δίσκο πάχους 6 mm. Αυτός έχει ως σκοπό τη βοήθεια στη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου, στην αποταμίευση ενέργειας λόγω του βάρους του και στη βοήθεια της γεννήτριας να περιστρέφεται κατά τις μικρές παύσεις του ανέμου. Επάνω υπάρχουν 4 οπές διαμέτρου 10 mm οι οποίες έχουν γίνει με βάση το σύνδεσμο, και μία οπή στο κέντρο του δίσκου, βλέπε Εικ. 12.2.10.1.

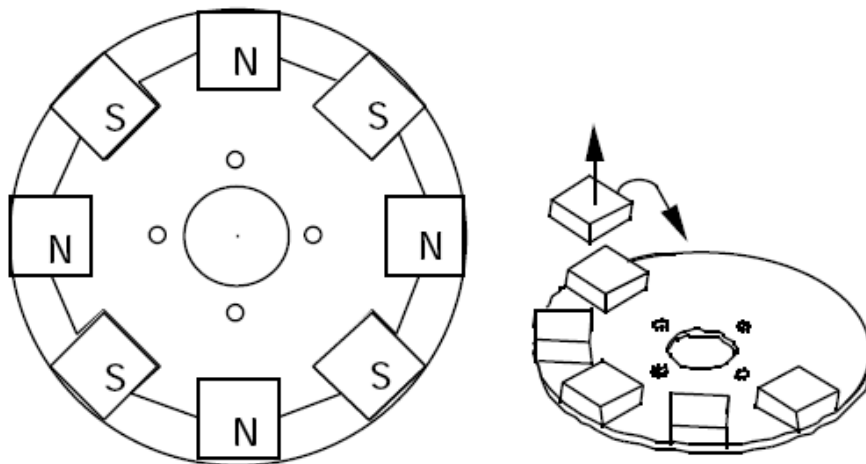


Εικόνα 12.2.10.1: Κατασκευή μαγνητικού δίσκου

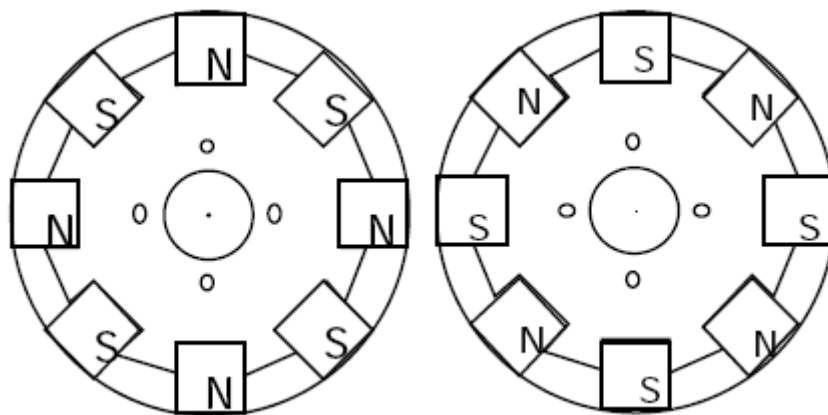
Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν οι μαγνήτες στο δίσκο. Κάθε δρομέας έχει 8 μαγνήτες και κάθε μαγνήτης έχει δύο πόλους (βόρειο και νότιο). Οι όμοιοι πόλοι απωθούνται ενώ οι αντίθετοι έλκονται. Πάνω στη μαγνητική πλάκα οι μαγνήτες θα τοποθετηθούν εναλλάξ. Δηλ. νότιος-βόρειος-νότιος-βόρειος κ.τ.λ.

Για τη σωστή τοποθέτηση, τοποθετήθηκε αρχικά ένας μαγνήτης τυχαία (χωρίς να είναι απαραίτητη η γνώση της πολικότητας). Ο επόμενος μαγνήτης κατά συνέπεια θα πρέπει να απωθείται από τον πρώτο που μπήκε ώστε να είναι σίγουρο ότι οι δύο μαγνήτες έχουν τοποθετηθεί αντίθετα. Η ίδια διαδικασία έγινε για όλους του μαγνήτες. Στο Σχ. 12.2.10.1 φαίνεται η διάταξη τους και η λογική που τοποθετήθηκαν πάνω στο δίσκο.

Σημείωση: Οι μαγνήτες στο δεύτερο δρομέα τοποθετήθηκαν αντίθετα από τον πρώτο, δηλαδή ο κάθε μαγνήτης του δρομέα να έλκεται από τον απέναντι του στον άλλο δρομέα.



Σχήμα 12.2.10.1: Διακρίνεται η εναλλάξ τοποθέτηση και ο τρόπος τοποθέτησης με την βοήθεια του εξαρτήματος τοποθέτησης των μαγνητών.



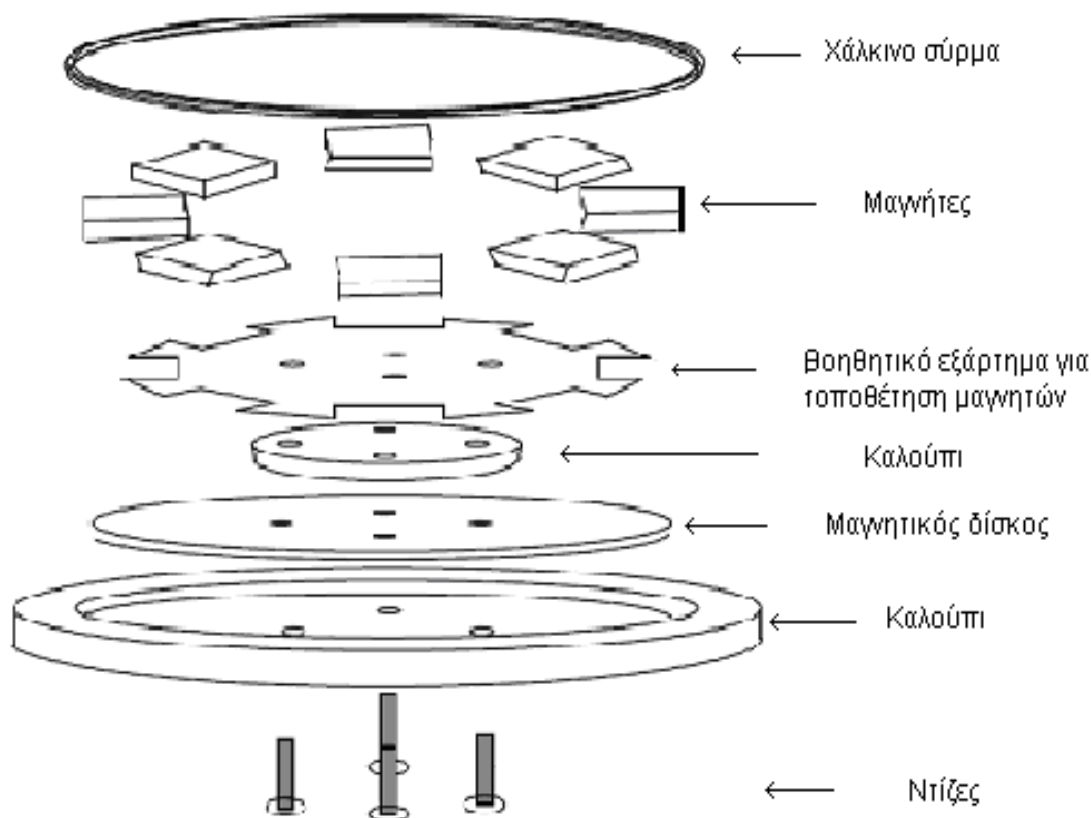
Σχήμα 12.2.10.2: Οι μαγνήτες τοποθετημένοι και στους δύο δρομείς με τη βοήθεια του εξαρτήματος τοποθέτησης των μαγνητών.

Όταν η γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη περιστρέφεται τότε δημιουργούνται φυγόκεντρες δυνάμεις οι οποίες τείνουν τους μαγνήτες να αποκολληθούν από τους δρομείς. Για το λόγο αυτό θα τοποθετηθούν οι μαγνήτες μέσα σε ρητίνη ώστε να αυξηθεί η σταθερότητα. Παρόλα αυτά η ρητίνη από μόνη της δεν είναι ικανή να κρατήσει τους μαγνήτες πάνω στους δρομείς. Έτσι περιμετρικά από το εξωτερικό του δρομέα τυλίχθηκε (5 φορές) χάλκινο σύρμα ώστε να συγκρατούνται οι μαγνήτες πάνω στους δρομείς όταν η γεννήτρια περιστρέφεται γρήγορα. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε χάλκινο σύρμα είναι ότι δεν έχει μαγνητικές ιδιότητες και έτσι δεν επηρεάζει την λειτουργία των μαγνητών.

Το σύρμα τυλίχθηκε πριν αρχίσει η κατασκευή του δρομέα γιατί η κατασκευή του απαιτεί χρόνο ο οποίος δεν διατίθεται ανάμεσα στις εργασίες τοποθέτησης της ρητίνης. Έτσι με την βοήθεια του εξαρτήματος τοποθέτησης των μαγνητών, οι

μαγνήτες τοποθετήθηκαν επάνω στο δίσκο. Τότε το σύρμα τυλίχθηκε προσεκτικά γύρω από αυτούς πέντε φορές και δέθηκε. Έπειτα οι μαγνήτες αφαιρέθηκαν και συνεχίστηκε η τελική διαδικασία για τη συναρμολόγηση του δρομέα.

Τα κομμάτια που θα χρησιμοποιηθούν για τη συναρμολόγηση του δρομέα μέσα στο καλούπι φαίνονται στο Σχ. 12.2.10.3



Σχήμα 12.2.10.3: Μέρη του δρομέα και σειρά τοποθέτησης.

Αφού περάστηκαν με αντικολλητικό και μεμβράνη τα καλούπια, περάστηκαν οι τέσσερις ντίξες. Έπειτα έγινε επάλειψη με πολυεστέρα και περάστηκε για μεγαλύτερη αντοχή ένας κύκλος υαλονήματος αρκετός για να καλύψει τον πάτο του καλουπιού αλλά και τα τοιχώματα. Αυτό έγινε προσεκτικά αφού πρώτα ανοίχθηκαν μικρές οπές στα σημεία που υπήρχαν οι ντίξες.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε ο μαγνητικός δίσκος μέσα στο καλούπι. Αναμίχθηκαν 100 γρ. ρητίνης με 1,5 cc σκληρυντή και επαλείφθηκε ο δίσκος. Στο περίσσειμα του μείγματος προστέθηκαν και 50 γρ. πούδρας και γεμίστηκαν τα κενά που υπήρχαν μεταξύ του μεταλλικού δίσκου και του τοιχώματος του καλουπιού.

Έπειτα τοποθετήθηκε το μικρό στρογγυλό καλούπι και από πάνω το εξάρτημα που ορίζει τις θέσεις των μαγνητών όπως φαίνεται και στην Εικ. 12.2.10.2. Με τη βοήθεια του εξαρτήματος τοποθετήθηκαν οι μαγνήτες πάνω στο μεταλλικό δίσκο προσέχοντας την πολικότητα γιατί σε περίπτωση λάθους ο δρομέας θα ήταν άχρηστος.



Εικόνα 12.2.10.2: Τοποθέτηση μαγνητών

Στη συνέχεια αφαιρέθηκε το εξάρτημα των μαγνητών και σφίχτηκε με τα περικόχλια το μικρό καλούπι επάνω στο δίσκο. Φτιάχτηκε μίγμα από 250 γρ. ρητίνη, 150 γρ. πούδρα και 3,5 cc σκληρυντή και περάστηκε το μισό. Τοποθετήθηκαν μικρά κομμάτια υαλονήματος μεταξύ των μαγνητών και εμποτίστηκαν με το υπόλοιπο μείγμα. Με προσοχή τοποθετήθηκε το χάλκινο σύρμα περιμετρικά από τους μαγνήτες χωρίς αυτοί να κουνηθούν, το οποίο πάτησε πάνω στο υαλόνημα. Ανακατεύθηκαν ακόμη 300 γρ. ρητίνη, 200 γρ. πούδρα και 4 cc σκληρυντή και γεμίστηκε το καλούπι μέχρι την κορυφή του μικρού καλουπιού.



Εικόνα 12.2.10.3: Τοποθέτηση σύρματος



Εικόνα 12.2.10.4: Πορεία κατασκευής δρομέα



Εικόνα 12.2.10.5: Ολοκλήρωση δρομέα στο καλούπι.

Τέλος ανακινήθηκε προσεκτικά για την αφαίρεση τυχών φυσαλίδων όπου θα προκαλούσαν πρόβλημα αντοχής και αφέθηκε να στεγνώσει.



Εικόνα 12.2.10.6: Όψη δρομέα στο καλούπι.

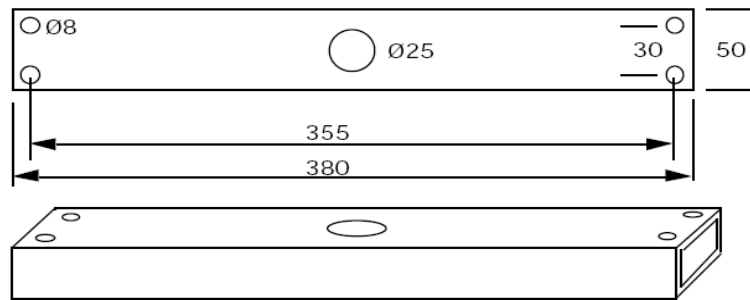
Σημείωση: Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθήθηκε και για την κατασκευή του δεύτερου δρομέα με την διαφορά ότι οι μαγνήτες έπρεπε να έχουν αντίθετη πολικότητα ώστε να έλκουν τον απέναντι τους από τον άλλο δρομέα



Σχήμα 12.2.10.7: Ολοκληρωμένος δρομέας και στάτης και δρομέας στο καλούπι.

12.2.11 Κατασκευή κορμού

Ο κορμός κατασκευάστηκε από ορθογωνικής διατομής μεταλλική κοιλοδοκό με διαστάσεις 50 x 25 x 4 mm. Στο κέντρο ανοίχτηκε οπή διαμέτρου 25 mm και στις άκρες τέσσερις οπές Φ8. Οι οπές ανοίχτηκαν στις ίδιες αποστάσεις με τις οπές τους εξαρτήματος που κατασκευάστηκε για το σάτι στην Εν. 12.2.7. Η κεντρική οπή λόγω του μεγάλου πάχους του υλικού ανοίχθηκε με κόφτη οξυγόνου. Ο άξονας συγκολλήθηκε με ηλεκτροκόλληση.



Σχήμα 12.2.11.1: Κορμός γεννήτριας



Εικόνα 12.2.11.1: Κορμός γεννήτριας

12.2.12 Συναρμολόγηση γεννήτριας

Αρχικά περάστηκε ο άξονας από την οπή που είχε ανοιχτεί στον κορμό της γεννήτριας όπου κεντραρίστηκε και συγκολλήθηκε. Κόπηκαν τέσσερα κομμάτια ντίζας M10 και μήκους 300 mm. Εκεί θα στερεωθούν οι δρομείς με τον εδρανοφορή σύνδεσμο. Επίσης στις ίδιες ντίζες θα στερεωθούν και οι δύο δίσκοι που στη μέση τους θα στερεωθούν τα πτερύγια.



Εικόνα 12.2.12.1: Προσαρμογή του πίσω δρομέα στο σύνδεσμο

Τοποθετήθηκε ο κορμός με τον άξονα προς τα πάνω σε μέγγενη, περάστηκε ο πρώτος δρομέας και τοποθετήθηκε ο σύνδεσμος στον άξονα με το περικόχλιο. Ύστερα στερεώθηκε ο δρομέας και οι τέσσερις ντίζες με την χρήση περικοχλίων επάνω στον σύνδεσμο. Έπειτα ελέγχθηκε το ύψος των μαγνητών όπως φαίνεται και στην Εικ. 12.2.12.2 περιστρέφοντας το δρομέα πάνω από ένα κομμάτι σύρματος χωρίς μαγνητικές ιδιότητες. Οι μαγνήτες πρέπει να έχουν όλοι το ίδιο ύψος. Ο έλεγχος ήταν θετικός.



Εικόνα 12.2.12.2: Έλεγχος ύψους μαγνητών

Έπειτα τοποθετήθηκε από ένα περικόχλιο σε κάθε μία από τις ντίζες του στάτη και βιδώθηκαν μέχρι το τέλος ώστε να σταθεροποιηθεί ο δρομέας. Τοποθετήθηκε ο στάτης πάνω από τον πίσω δρομέα και στερεώθηκε με τις ντίζες του κορμού και τα απαραίτητα περικόχλια. Με τη βοήθεια των περικοχλίων ρυθμίστηκε ο στάτης σε κάθε ντίζα ώστε να αποφευχθεί τυχόν επαφή με τους μαγνήτες. Στις ντίζες των 10 mm με τη χρήση αρκετών περικοχλίων που ρυθμίστηκαν στο κατάλληλο ύψος, τοποθετήθηκε και στερεώθηκε ο δεύτερος δρομέας με προσοχή ώστε να μην έρχεται σε επαφή με τον στάτη, βλέπε Εικ. 12.2.12.3.



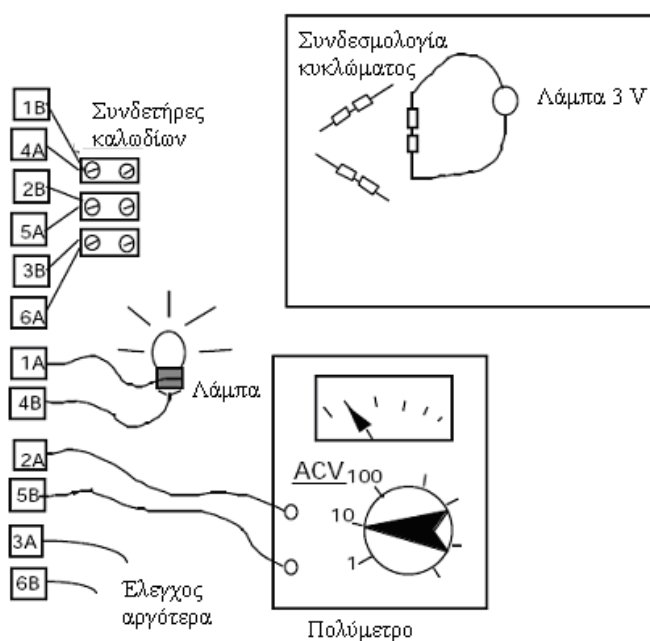
Εικόνα 12.2.12.3 Τοποθέτηση του μπροστά δρομέα στο στάτη

Το επόμενο βήμα ήταν η τοποθέτηση των δύο δίσκων στερέωσης των πτερυγίων. Οι δίσκοι αυτοί είχαν διάμετρο 385mm και στερεώθηκαν επίσης με την χρήση περικοχλίων στις ντίζες. Τέλος κόπηκε όσο κομμάτι περίσσευε από την κάθε ντίζα.

13 ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

13.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

Αρχικά έγινε έλεγχος των τυλιγμάτων μεμονωμένα χρησιμοποιώντας ένα λαμπάκι 3V. Συνδέθηκαν τα 1B με 4A, 2B με 5A και 3B με 6A, ρυθμίστηκε το πολύμετρο στα 6 VAC και συνδέθηκε ένα λαμπάκι στο 1A και 4B



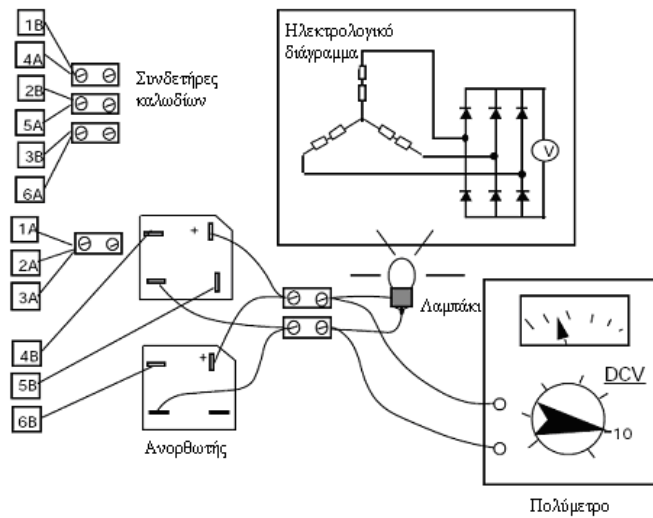
Σχήμα 13.1.1: Έλεγχος τυλιγμάτων

Η γεννήτρια περιστράφηκε περίπου 1 gps και το πολύμετρο έδωσε ένδειξη περίπου 2 V. Ο ίδιος έλεγχος έγινε και για τα υπόλοιπα τυλίγματα από τα οποία πάρθηκε η ίδια ένδειξη. Εάν δεν υπήρχε ένδειξη τότε υπήρχαν δύο πιθανές αιτίες, να μην έχουν γίνει καλές οι συνδέσεις ή να υπάρχει αντίστροφο τύλιγμα, δηλαδή να έχει συνδεθεί ανάποδα.

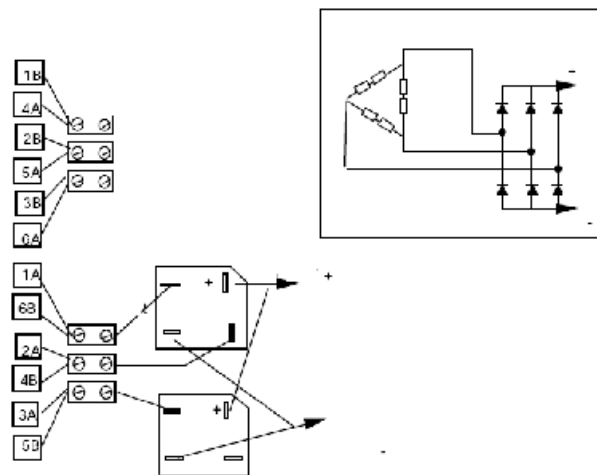
Στη συνέχεια συνδέθηκαν οι ανορθωτές για να διελεγχθεί εάν λειτουργούν σωστά, δηλαδή εάν στην έξοδο παράγεται συνεχές ρεύμα. Η σύνδεση έγινε κατά “αστέρα” και τρίγωνο. Η εναλλαγή μεταξύ των δύο συνδεσμολογιών θα γίνεται με τη χρήση δύο διακοπών.

13.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΕΣ ΑΣΤΕΡΑ ΚΑΙ ΤΡΙΓΩΝΟΥ

Παρακάτω φαίνονται σχηματικά οι συνδεσμολογίες αστέρα-τριγώνου όπου ακολουθήθηκαν.



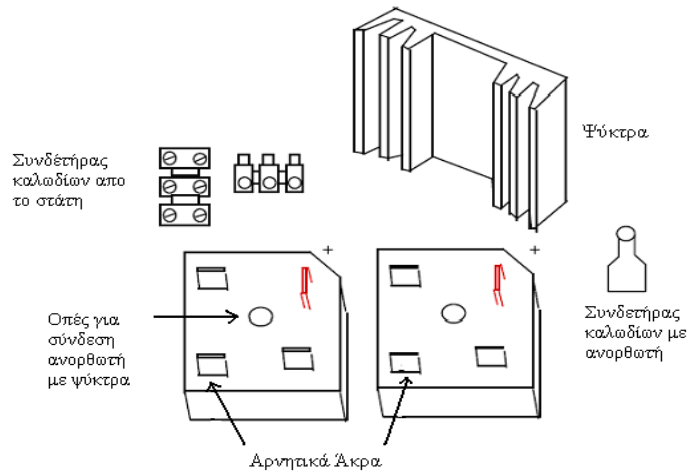
Σχήμα 13.2.1: Σύνδεση τυλιγμάτων κατά αστέρα



Σχήμα 13.2.2: Σύνδεση τυλιγμάτων κατά τρίγωνο

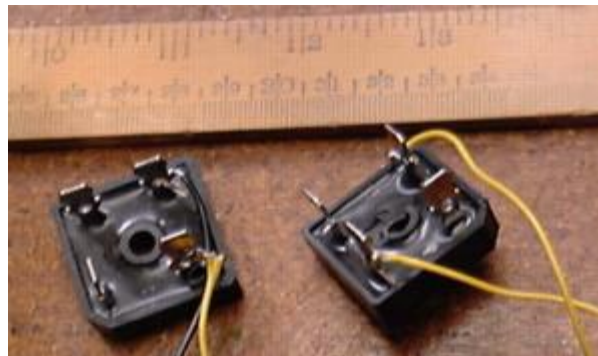
13.3 ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί ο τρόπος που έγιναν οι συνδέσεις των ανορθωτών με το στάτη. Χρησιμοποιήθηκαν δύο μονοφασικές γέφυρες ανορθώσεως όπως φαίνεται και στην Εικ. 13.3.1 Τα θετικά άκρα συνδέθηκαν στα θετικά της μπαταρίας και τα αρνητικά στα αρνητικά. Τα υπόλοιπα άκρα συνδέθηκαν στο στάτη.

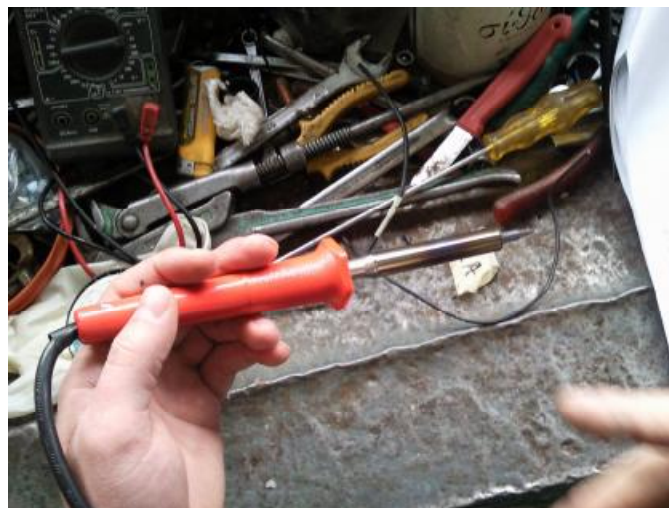


Σχήμα 13.3.1: Εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις συνδέσεις

Οι κάθε οπή στο μέσον του ανορθωτή είναι για να γίνει η σύνδεση του με τη ψήκτρα.



Εικόνα 13.3.1: Γέφυρες ανορθώσεως



Εικόνα 13.3.2: Συγκολλήσεις με κολλητήρι.

13.4 ΤΕΛΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

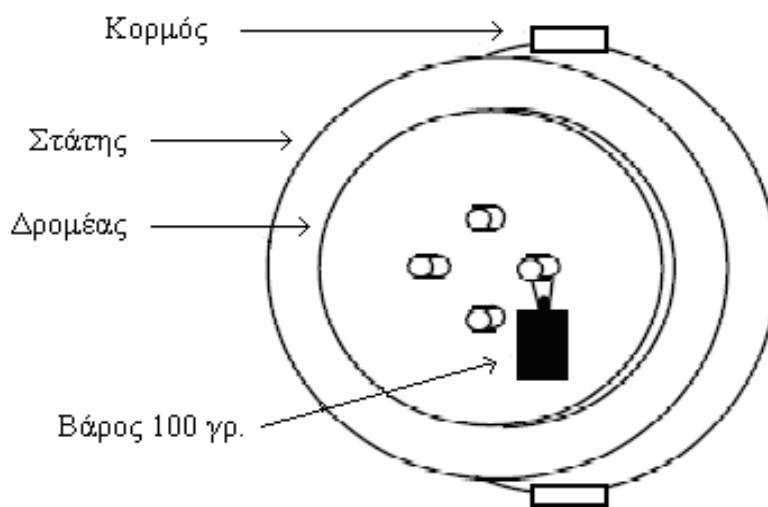
Προτού τεθεί η ανεμογεννήτρια σε λειτουργία ελέγχθηκε για τυχόν σφάλματα τα οποία θα μπορούσαν να επηρεάσουν την απόδοση της ή να προκαλέσουν προβλήματα.

13.4.1 Μηχανικός έλεγχος

Τοποθετήθηκε ο άξονας σε οριζόντια θέση, δηλαδή έτσι όπως είναι σε μια Α/Γ και ελέγχθηκε ότι τα καλώδια δεν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους. Αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει βραχυκύκλωμα και να δυσκολεύει την περιστροφή της γεννήτριας. Στη συνέχεια περιστράφηκε ο δρομέας ώστε να ακουστούν τυχόν θόρυβοι κατά την περιστροφή του. Ο δρομέας πρέπει να περιστρέφεται με ευκολία και να επιβραδύνει σταδιακά, σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει πρόβλημα.

Ελέγχθηκε το ενδεχόμενο να έρχεται σε επαφή ο δρομέας με τον στάτη κατά την περιστροφή. Αν συνέβαινε κάτι τέτοιο θα έπρεπε να γίνει αποσυναρμολόγηση και επανατοποθέτηση του δρομέα πιο μακριά από το στάτη.

Τέλος όπως φαίνεται και στο Σχ. 13.4.1.1 τοποθετήθηκε ένα βάρος 100 γρ. σε μία από τις ντίζες. Έτσι ο δρομέας άρχισε να περιστρέφεται. Αν δε γίνονταν αυτό τότε πιθανότατα ή δεν υπήρχε επαρκής λίπανση στα έδρανα ή αυτά ήταν πολύ σφιχτά.



Σχήμα 13.4.1.1: Έλεγχος περιστροφής δρομέα

13.4.2 Τελικός έλεγχος ζυγοστάθμισης

Αφού η ανεμογεννήτρια στήθηκε στη βάση και τοποθετήθηκαν τα πτερύγια, ήταν απαραίτητο να γίνει ζυγοστάθμιση ώστε ο συνδυασμός γεννήτριας- πτερυγίων να έχει σε όλη την περίμετρο ίδιο βάρος. Σε αντίθετη περίπτωση η εκκίνηση της γεννήτριας θα ήταν δύσκολη σε χαμηλές ταχύτητες αλλά θα υπήρχανε και κραδασμοί. Έτσι, αφού πρώτα όπως αναφέρθηκε παραπάνω έγινε έλεγχος περιστροφής των δρομέων, έγινε η ζυγοστάθμιση του συνόλου.

Ο τρόπος με τον οποίο έγινε αυτή η διαδικασία ήταν προσθέτοντας βάρος στα πτερύγια. Αυτό έγινε έπειτα από δόκιμη μέσα σε κλειστό χώρο χωρίς ρεύματα αέρα. Οι δρομείς με τα πτερύγια έπρεπε να παραμένουν ακίνητα σε οποιαδήποτε θέση και να μην έχει κάποιο από αυτά την τάση να περιστρέψει την γεννήτρια λόγω της προσπάθειας του να κατέβει στο κατώτερο σημείο από την επίδραση της βαρύτητας.

Προσθέτοντας μικρά βάρη σε ένα πτερύγιο επετεύχθητε η ανεμογεννήτρια να παραμένει σταθερή σε οποιαδήποτε γωνία. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα απαραίτητα για την ζυγοστάθμιση βάρη σε ζυγό ακριβείας και αφού ζυγίστηκαν συνολικά παρασκευάστηκε αναλόγου βάρους μίγμα πολυεστέρα. Έπειτα ανοίχθηκε μικρή οπή στο πτερύγιο όπου χρειαζότανε το επιπλέον βάρος και με τη βοήθεια σύριγγας εγχύθηκε το υλικό στο άκρο του πτερυγίου. Η οπή σφραγίστηκε και αφέθηκε να στεγνώσει.

13.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΟΥΤΙΟΥ-ΨΗΚΤΡΑΣ

Για την προστασία των κυκλωμάτων αλλά και την ψύξη των ανορθωτών σε μεγάλα φορτία κατασκευάστηκε ένα κουτί από αλουμίνιο. Επίσης επάνω σε αυτό στερεώθηκαν τρία αλουμινένια πτερύγια για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας και μία πρίζα για να μην υπάρχει κίνδυνος βραχυκυκλώσεων αλλά και να είναι ευκολότερη η τοποθέτηση κάποιου φορτίου. Τέλος, επάνω στο κουτί-ψήκτρα τοποθετήθηκαν δύο διακόπτες για την εναλλαγή μεταξύ των δύο κυκλωμάτων.



Εικόνα 3.5.1: Τοποθέτηση κυκλωμάτων στο κουτί-ψήκτρα



Εικόνα 3.5.2: Τοποθέτηση κυκλωμάτων στο κουτί-ψήκτρα



Εικόνα 13.5.3: Διακόπτες εναλλαγής μεταξύ των συνδεσμολογιών.

13.6 ΣΤΕΡΕΩΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΒΑΣΗ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ-ΚΟΜΜΑΤΙΩΝ

13.6.1 Στερέωση γεννήτριας στη βάση στήριξης

Η γεννήτρια, αφού τελείωσε η συναρμολόγηση της, στερεώθηκε επάνω στη βάση στήριξης. Η στερέωση έγινε με ηλεκτροκόλληση και χρήση μερικών κομματιών σιδήρου. Στη συνέχεια η γεννήτρια και η βάση βάφτηκαν με αντισκωρικό χρώμα για προστασία.



Εικόνα 13.6.1.1: Τοποθετημένη γεννήτρια.



Εικόνα 13.6.1.2: Γεννήτρια τοποθετημένη στην βάση.

13.6.2 Κατασκευή αεροδυναμικού καλύμματος και τοποθέτηση πτερυγίων

Για τον λόγο του ότι το μπροστινό μέρος της γεννήτριας αποτελούνταν από δίσκο 385mm ο οποίος θα επέφερε σημαντική αντίσταση στον άνεμο και δεν θα ευνοούσε την ομαλή ροή του αέρα, αποφασίστηκε η κατασκευή ενός σφαιρικού καλύμματος το οποίο θα ομαλοποιούσε τη ροή του αέρα προς τα πτερύγια.

Αυτό το κάλυμμα κατασκευάστηκε επίσης από πολυεστέρα και υαλόνημα. Σαν καλούπι για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε οικιακό σκεύος το οποίο είχε το επιθυμητό σχήμα και διαστάσεις.



Εικόνα 13.6.2.1: Καλούπι περασμένο με πολυεστέρα.



Εικόνα 13.6.2.2: Πολυεστερικό κάλυμμα.

Το κάλυμμα μετά την εξαγωγή του από το καλούπι φινιρίστηκε και βιδώθηκε με τρεις κοχλίες περιμετρικά του μπροστινού δίσκου στερέωσης των πτερυγίων.



Εικόνα 13.6.2.3: Τοποθέτηση του καλύμματος μπροστά από τη γεννήτρια

Τέλος τοποθετήθηκαν τα πτερύγια. Αφού είχαν προετοιμαστεί (βάψιμο, άνοιγμα οπών) τοποθετήθηκαν με δύο κοχλίες το καθένα ανάμεσα από τους δύο δίσκους στερέωσης.



Εικόνα 13.6.2.4: Τοποθέτηση πτερυγίων.



Εικόνα 13.6.2.5: Τοποθέτηση πτερυγίων.

13.6.3 Κατασκευή Κατευθυντήριου Συστήματος

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα χρειάζονται κάποιο κατευθυντήριο σύστημα ώστε κάθε φορά που αλλάζει η διεύθυνση του ανέμου να περιστρέφονται και αυτές, έτσι ώστε να εκμεταλλεύονται διαρκώς τους ανέμους ανεξάρτητα από την διεύθυνση τους.

Στις μικρές ανεμογεννήτριες συνήθως χρησιμοποιείτε για να εξυπηρετεί αυτόν τον σκοπό μία απλή ουρά.

Στην προκειμένη περίπτωση η ουρά στερεώθηκε στον κορμό της γεννήτριας σε κατάλληλη υποδοχή που επιτρέπει την απόσπαση της ώστε να μεταφέρεται ευκολότερα. Το πτερύγιο της ουράς είναι κατασκευασμένο από λεπτό φύλο κόντρα πλακέ εσώκλειστο σε δύο λεπτά φύλα αλουμινίου. Έχουνε κολληθεί όλα μαζί με σιλικόνη και έχει περαστεί περιμετρικά ταινία για να αποτρέψει την είσοδο της υγρασίας.

Τέλος, περιμετρικά τοποθετήθηκαν πρετσίνια και το αποτέλεσμα ήταν ένα πτερύγιο με μεγάλη αντοχή.



Εικόνα 13.6.3.1: Πτερύγιο ουράς



Εικόνα 13.6.3.2: Κατευθυντήριο σύστημα ανεμογεννήτριας

14. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Όταν η ανεμογεννήτρια ολοκληρώθηκε πλήρως και αφού ελέγχτηκε για την ορθή λειτουργία της, είχε έρθει η στιγμή της πραγματικής δοκιμής και της λήψης ορισμένων μετρήσεων.

Στο σημείο αυτό θα περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις της απόδοσης της ανεμογεννήτριας και για τις δύο συνδεσμολογίες καθώς και η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

14.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΡΟΠΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι μετρήσεις έγιναν για διάφορες ταχύτητες ανέμων όπως θα δούμε παρακάτω. Ο τρόπος με τον οποίο μεταβαλλόταν κάθε φορά η ταχύτητα του ανέμου ήταν με την βοήθεια ελικοπτερού τύπου BELL 47 G3 και συγκεκριμένα μεταβάλλοντας το βήμα του πίσω (ουραίου) στροφείου.



Εικόνα 14.1.1: Ουραίο στροφείο ελικοπτερού BELL 47 G3

Σαφώς αν οι μετρήσεις γινότανε σε αεροσήραγγα, θα είχανε μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά μιας και η διάμετρος των πτερυγίων έφτανε τα δύο μέτρα θα απαιτούνταν η χρήση μεγάλης αεροσήραγγας. Αφού λοιπόν υπήρχε το συγκεκριμένο ελικόπτερο στη διάθεση μας, αποφασίστηκε οι μετρήσεις να γίνουνε με αυτόν τον τρόπο. Η διάταξη που έγιναν οι μετρήσεις φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 14.1.2: Διάταξη μετρήσεων



Εικόνα 14.1.3: Διάταξη μετρήσεων.

Για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου έγινε χρήση ανεμομέτρου τύπου WS9500 της La Crosse Technology.



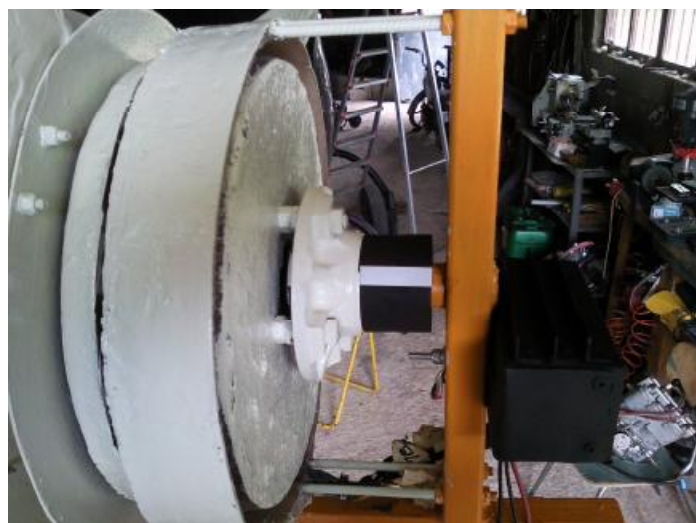
Εικόνα 14.1.4: Ανεμόμετρο

Οι στόφες της ανεμογεννήτρια μετρήθηκαν με την χρήση ψηφιακού στροφόμετρου.

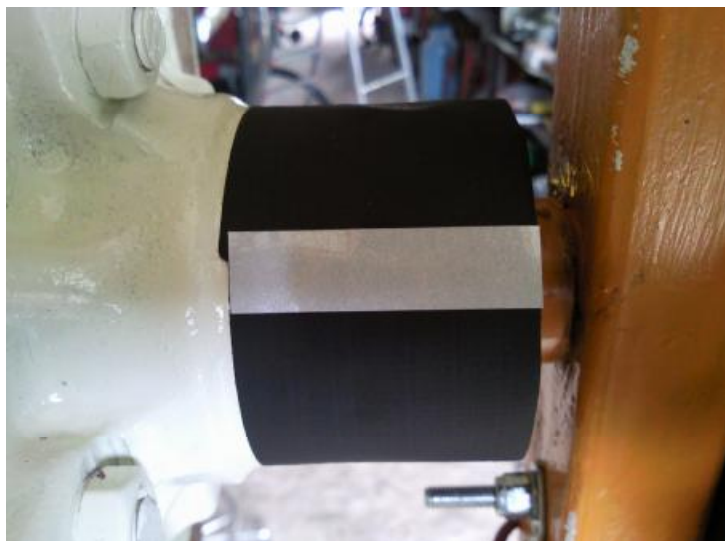


Εικόνα 14.1.5: Ψηφιακό στροφόμετρο

Οι στροφές μετρήθηκαν από την πίσω πλευρά της ανεμογεννήτριας (στο μωαγιέ) αφού πρώτα τοποθετήθηκε μη ανακλαστική μαύρη ταινία περιμετρικά του συνδέσμου και σε ένα σημείο του τοποθετήθηκε ειδική ανακλαστική ταινία.



Εικόνα 14.1.6: Ανακλαστική ταινία



Εικόνα 14.1.7: Ανακλαστική ταινία

14.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις έγιναν με τη χρήση δύο πολύμετρων. Με το ένα πολύμετρο λαμβανόταν μετρήσεις της παραγόμενης τάσης και με το δεύτερο πολύμετρο αφού συνδεόταν το ηλεκτρικό φορτίο που αποτελούνταν από λαμπτήρες αυτοκινήτου στα 12 volts γινότανε μετρήσεις της εντάσεως του παραγόμενου ρεύματος.

Έτσι λοιπόν για μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου λαμβανότανε:

- Στροφές ανά λεπτό
- Παραγόμενη τάση σε Volts
- Παραγόμενη ένταση σε Amperes

Από το γινόμενο της τάσεως επί την ένταση του ρεύματος έγινε ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος.

Π.χ. Η μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύς που μετρήθηκε κατά την δοκιμή ήταν:

$$17,5 \text{ A} * 12,5 \text{ V} = 218,75 \text{ W} \text{ για } 12,5 \text{ m/s.} \quad (14.2.1)$$



Εικόνα 14.2.1: Ηλεκτρικές μετρήσεις



Εικόνα 14.2.2: Πολύμετρα για μέτρηση Amperes- Volts σε λειτουργία



Εικόνα 14.2.3: Ηλεκτρικές μετρήσεις



Εικόνα 14.2.4: Ηλεκτρικές μετρήσεις



Εικόνα 14.2.5: Φορτίο 230 Watts αποτελούμενο από λαμπτήρες αυτοκινήτου.

Οι μετρήσεις έγιναν μέχρι την ταχύτητα ανέμου των 12,5 μέτρων ανά δευτερόλεπτο. Κατά την απόπειρα ανάπτυξης μεγαλύτερης ταχύτητας ανέμου κήκαν οι λαμπτήρες συνολικής ισχύος 230 Watts.

Δεν έγιναν μετρήσεις για μεγαλύτερες ταχύτητες διότι η προβλεπόμενη παραγόμενη ισχύς όπου είχε κατασκευαστεί η γεννήτρια ήταν τα 180 Watts οπότε και ο στόχος είχε επιτευχθεί.

Στους παρακάτω πίνακες θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

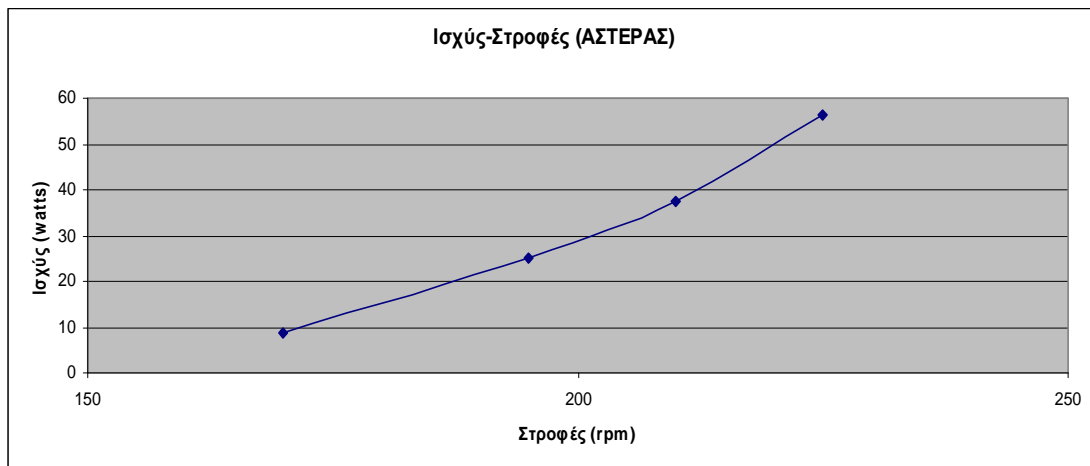
14.2.1 Συνδεσμολογία ΑΣΤΕΡΑ

Στην συνδεσμολογία αστέρα έγιναν μετρήσεις ενδεικτικά για ταχύτητες ανέμου 3,5, 6, 9 και 12,5 m/s. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Πίν. 14.2.1.1 αλλά απεικονίζονται και διαγραμματικά.

Πινάκας 14.2.1.1: Συνδεσμολογία αστέρα

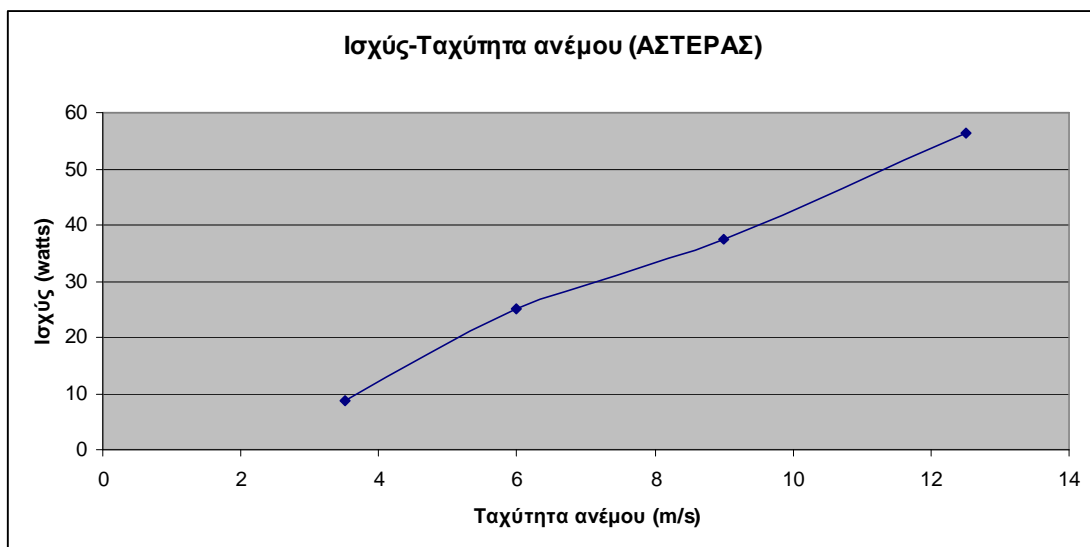
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (watt)	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (amperes)	ΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (volts)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (m/s)
8,75	170	0,7	12,5	3,5
25	195	2	12,5	6
37,5	210	3	12,5	9
56,25	225	4,5	12,5	12,5

Η τάση όταν υπήρχε συνδεδεμένο φορτίο παρέμενε γύρω στα 12,5 volt για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε αυτή τιμή στους υπολογισμούς. Χωρίς φορτίο όμως η τάση έπαιρνε πολύ μεγάλες τιμές που σε πολλές στροφές ξεπερνούσαν τα 30 volts.



Γράφημα 14.2.1.1: Διάγραμμα ισχύος-στροφών σε συνδεσμολογία αστέρα

Στο παραπάνω διάγραμμα της συνδεσμολογίας αστέρα φαίνεται πως η ανεμογεννήτρια αρχίζει να γίνεται αποδοτική από τις 170 rpm, αφού τότε η τάση γίνεται 12 volts.



Γράφημα 14.2.1.2: Διάγραμμα ισχύος-ταχύτητας ανέμου σε συνδεσμολογία αστέρα

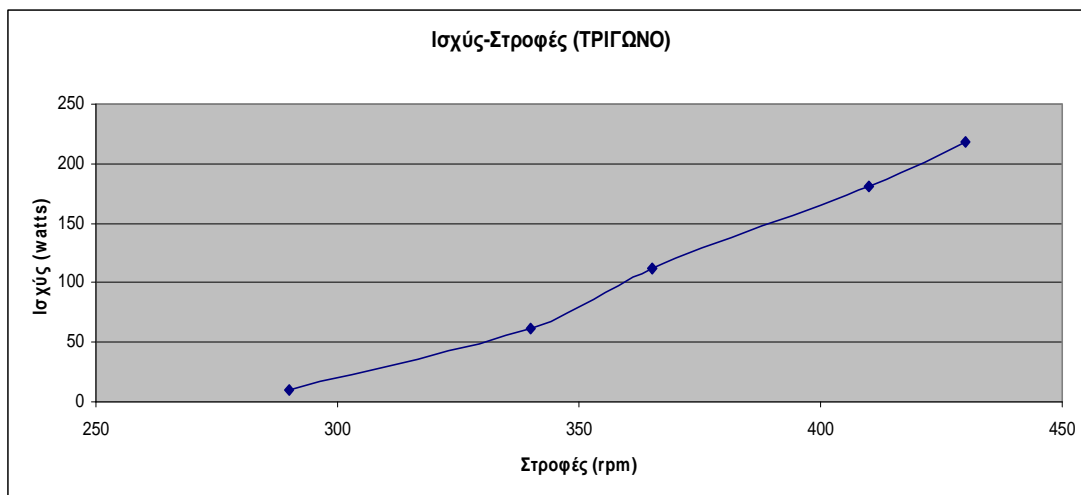
Στο διάγραμμα ισχύος-ταχύτητας ανέμου σε συνδεσμολογία αστέρα φαίνεται πως, ενώ η ανεμογεννήτρια αρχίζει να γίνεται αποδοτική σε μικρές ταχύτητες ανέμου, στη συνέχεια ενώ η ταχύτητα ανέμου αυξάνεται η παραγόμενη ισχύς δεν είναι αξιόλογη σε σχέση με αυτήν της συνδεσμολογίας τριγώνου που φαίνεται παρακάτω.

14.2.2 Συνδεσμολογία ΤΡΙΓΩΝΟΥ

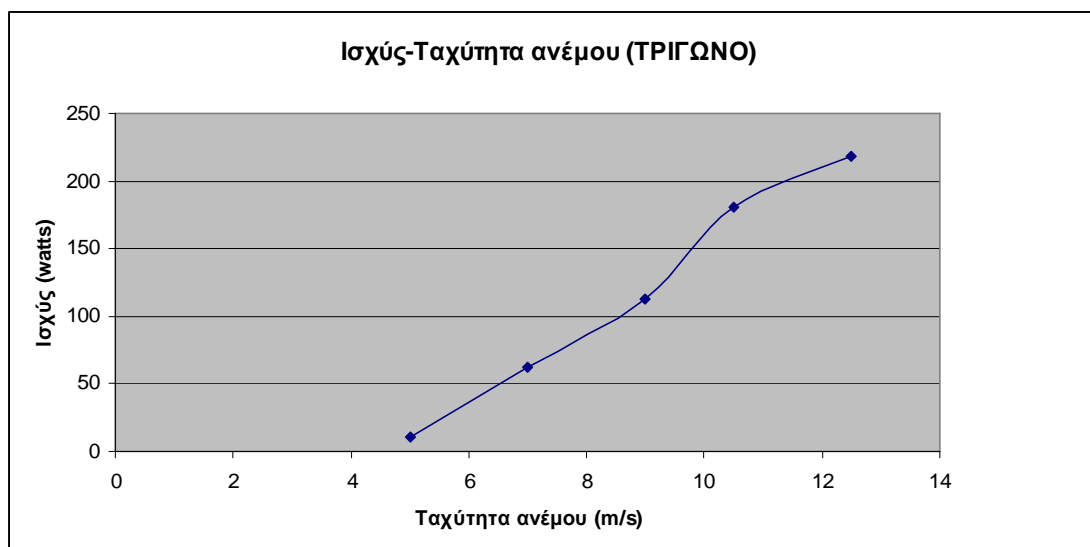
Όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε συνδεσμολογία τριγώνου αν και αρχίζει να γίνεται αποδοτική σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου και υψηλότερες στροφές, η παραγόμενη ισχύς είναι σημαντικά αυξημένη σε σχέση με αυτή της συνδεσμολογίας αστέρα. Συμπερασματικά όπως φαίνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα και τον πίνακα, η ανεμογεννήτρια σε συνδεσμολογία τριγώνου εκμεταλλεύεται πολύ καλύτερα τον άνεμο με εξαίρεση τους πολύ χαμηλής ταχύτητας ανέμους.

Πίνακας 14.2.2.1: Συνδεσμολογία τριγώνου

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥΣ(watt)	ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (amperes)	ΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (volts)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (m/s)
10	290	0,8	12,5	5
62,5	340	5	12,5	7
112,5	365	9	12,5	9
181,25	410	14,5	12,5	10,5
218,75	430	17,5	12,5	12,5



Γράφημα 14.2.2.1: Διάγραμμα ισχύος-στροφών σε συνδεσμολογία τριγώνου



Γράφημα 14.2.1.2: Διάγραμμα ισχύος-ταχύτητας ανέμου σε συνδεσμολογία αστέρα

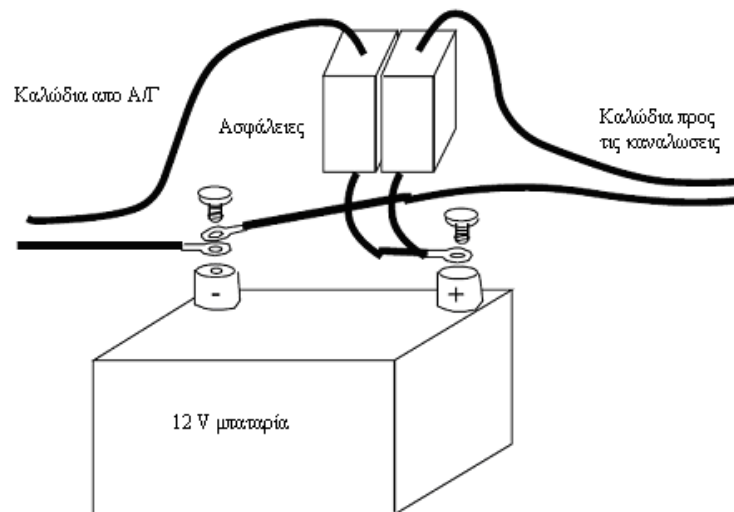
14.3 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΜΠΑΤΑΡΙΑ.

Στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία δε συνδέθηκε μπαταρία αλλά φορτίο (λαμπτήρες). Από την ανεμογεννήτρια είναι δυνατόν να φορτιστούν και μπαταρίες και για το λόγο αυτό θα δειχτεί ο τρόπος συνδεσμολογίας των μπαταριών με την ανεμογεννήτρια καθώς επίσης και σε τι πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή.

Από τα 12 V δεν υπάρχει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας, αλλά όταν η Α/Γ είναι αποσυνδεδεμένη από τη μπαταρία και περιστρέφεται σε υψηλές ταχύτητες τότε μπορεί να παράξει μέχρι και 50 V. Για το λόγο αυτό όταν λειτουργεί σε υψηλές στροφές πρέπει πάντα να είναι συνδεδεμένη με τη μπαταρία.

Η μπαταρία περιέχει αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια. Όταν υπάρξει βραχυκύκλωμα, δηλαδή για παράδειγμα έρθει σε επαφή το αρνητικό με το θετικό καλώδιο τότε δημιουργούνται υψηλά ρεύματα τα οποία μπορεί να υπερθερμάνουν το καλώδιο και να το κάψουν. Για αυτό το λόγο τα καλώδια πρέπει να είναι καλά μονωμένα.

Για την σύνδεση με τη μπαταρία τα “-” των ανορθωτών πρέπει να συνδεθούν στα “-” της μπαταρίας και τα “+” στα “+” της μπαταρίας.



Σχήμα 14.3.1: Σύνδεση καλωδίων με μπαταρία

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΧΟΛΙΑ

Η εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας απέδωσε σημαντικές γνώσεις τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Όσον αφορά το θεωρητικό κομμάτι, η εντριβή με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πιο συγκεκριμένα της αιολικής και την εκμετάλλευση της για την παραγωγή ενέργειας φιλικής προς το περιβάλλον μας πρόσφερε διευρυμένες γνώσεις επάνω στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ανάπτυξη των αιολικών μηχανών βελτιώνεται ραγδαία γεγονός που πιθανότατα μελλοντικά να τις καταστήσει αναπόσπαστο κομμάτι τη κοινωνίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η κατασκευή της παρούσας αιολικής μηχανής, αποτελεί μια άκρως ενδιαφέρουσα πρόταση για οποιονδήποτε έχει τις απαραίτητες θεωρητικές και πρακτικές γνώσεις επάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Απαραίτητη προϋπόθεση όμως, είναι η ύπαρξη ενός κατάλληλα εξοπλισμένου εργαστηρίου, μιας και τα απαραίτητα εργαλεία και όργανα που απαιτούνται για την κατασκευή και τις μετρήσεις είναι αρκετά.

Η Α/Γ αυτή προορίζεται για τη φόρτιση 12 volt μπαταριών και αποτελεί ιδανική λύση για την κάλυψη μικρών ενεργειακών αναγκών σε κτήματα ή και σε μικρές εξοχικές κατοικίες. Επίσης, η γεννήτρια με κατάλληλη τροποποίηση θα μπορούσε κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας από υδατοπτώσεις χωρίς πρόβλημα, διότι είναι υδατοστεγής.

Επίσης, για αύξηση της παραγόμενης ισχύος, είναι δυνατή η τοποθέτηση σε σειρά περισσοτέρων από μία γεννητριών, με απλό τρόπο. Τέτοιοι συνδυασμοί είναι ιδανικοί για ανεμογεννήτριες με μεγαλύτερα πτερύγια αλλά και για παραγωγή ενέργειας από υδατοπτώσεις.

Όσον αφορά στο κόστος, κατά την πρώτη κατασκευή αυτό κυμαίνεται περίπου στα 600 ευρώ και αφορά μόνο τα υλικά, μιας και το εργαστήριο ήταν ιδιωτικό και όλα τα μέρη της ανεμογεννήτριας ιδιοκατασκευές. Όμως, πρέπει να διευκρινιστεί ότι σε αυτό το κόστος περιλαμβάνεται και το κόστος της κατασκευής των καλουπιών, οπότε οι επόμενες κατασκευές θα στοιχίζουν σαφώς λιγότερο και θα απαιτείται λιγότερος χρόνος για την κατασκευή τους.

Η μελέτη για τη σχεδίαση των πτερυγίων μας έδωσε όλες τις απαραίτητες γνώσεις που αφορούν στα αεροδυναμικά μεγέθη και στον τρόπο λειτουργίας των πτερυγίων. Κατανοήσαμε τη σπουδαιότητα των αεροτομών και τον τρόπο λειτουργία τους σε διάφορους τομείς της σύγχρονης τεχνολογίας και είμαστε πλέον σε θέση να σχεδιάσουμε μια αεροτομή και στη συνέχεια να κατασκευάσουμε το πτερύγιο με το συγκεκριμένο profile. Αναμφισβήτητα, κατά την κατασκευή των πτερυγίων, της γεννήτριας μόνιμου μαγνητικού πεδίου καθώς και των λοιπών τμημάτων, αποκομίσαμε σφαιρική τεχνογνωσία όσον αφορά στην κατασκευή μίας ολοκληρωμένης ανεμογεννήτριας. Επίσης, η χρήση διαφόρων υλικών και οργάνων μας δίδαξε τον τρόπο χρήσης τους αλλά και τις εφαρμογές τους.

Η αναζήτηση υλικών και οργάνων, δυσεύρετων πολλές φορές, και η ανάγκη εύρεσης ορισμένων από αυτών σε αγορές του εξωτερικού, μας εξοικείωσε με την εγχώρια αλλά και την παγκόσμια αγορά

Επίσης η επικοινωνία με άτομα του χώρου της μηχανολογίας αλλά και λοιπών σχετικών ειδικοτήτων μας πρόσφερε εξοικείωση με τους μελλοντικούς μας συνεργάτες καθώς και γενικά με την τεχνολογία.

Η αυξημένη ισχύς της ανεμογεννήτριας με την τροποποίηση της γεννήτριας με την χρήση μαγνητών μεγαλύτερης ισχύος, μας έδωσε κουράγιο για περαιτέρω έρευνα και μελέτη με σκοπό την κατασκευή μιας αποδοτικότερης ανεμογεννήτριας με χαμηλό κόστος.

Τέλος, θα θέλαμε να προτρέψουμε ακόμη περισσότερο κόσμο προς την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, αλλά και γενικά όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με σκοπό την περαιτέρω ανάπτυξη και διάδοση τους. Και αυτό διότι αυτήν τη δύσκολη από περιβαλλοντικής σκοπιάς περίοδο, το μέλλον όλων μας στηρίζεται στην προσπάθειά μας για την προστασία του περιβάλλοντος, πράγμα που μπορεί να επιτευχθεί και μέσω της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έναντι των συμβατικών, βλαβερών και πρόσκαιρων, πηγών ενέργειας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μπεργελές Γ., Ανεμοκινητήρες, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα
2. Καλδέλλης Ιωάννης, Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας.
3. John F. Walker and Nick Jenkins, Wind Energy Technology, published by John Wiley & Sons, June 12, 1997
4. Ira Abbot and Albert von-Doenhoff, Theory of wing sections, Dover publications, New York, USA, 1959

5. Mathematical and Computational Applications, Vol. 10, No 1, pp. 147-154, 2005
6. Rotors for Wind Power, P.T. Smulders, University of Technology, Eindhoven revised edition January 2004

7. Ferhat Kurtulmus, Ali Vardar and Nazmi Izli, Aerodynamic Analyses of Different Wind Turbine Blade Profile, Jurnal of Applied Scinces 7(5): 663-670, 2007, Turkey

8. Τακιδέλλης Χριστοφάς, Αξιοποίηση Αιολικού Δυναμικού, Τ.Ε.Ι. Μηχανολογίας, Πάτρα 10/04/2005

9. Hugh Piggott, PMG construction manual, February 2001
10. Teodoro Sanchez Cambos, Sunith Fernando and Hugh Piggott, Wind Rotor Blade Construction, Small Wind Systems for Battery Charging, Contract R 7105, In association with ITDG-UK, ITDG Peru and ITDG South Africa

11. Ragherd M., Optimal Rotor Tip Speed Ratio, 3/10/2009
12. U. Aguirre Llona, J. J. Perez Rambla and G. Aguirre Zamalloa, Spreadsheet assisted overall Design of a Wind Turbine Blade
13. Report No. 563, Calculated and measured pressure distribution over the midspan section of the N.A.C.A. 4412 airfoil, by Robert M. Pinkerton
14. John B. Wheatley and Carlton Bioletti, Report No 552, Wind-tunnel tests of 10-foot-diameter autogiro rotors
15. Eantman N. Jacobs and Robert M. Pinkerton, Langley Memorial Aeronautical Laboratory, NACA, Technical Notes, No 401, Tests of NACA Airfoils in the Variable Density Wind Tunnel, Series 44 nad 66, Washington, Desember 1931
16. Henric Stiesdal, Translation by John Furze and Hugh Piggott, The Wind Turbine Components and Operation, Autumn 1999
17. Charls L. Landson and Cuyler W. Brooks, Development of a computer program to obtain ordinates for NACA 4-digit, 4-digit modified, 5-digit and 16-

- series airfoils, Nasa Technical Memorandum, TM X-3284, Washington, November 1975
18. Jonas Lantz, NACA Airfoils, Linkoping Institute of Technology, February 4, 2009

Ηλεκτρονικό υλικό

19. David Heffley, Aerodynamic Characteristics of a N.A.C.A. 4412 Airfoil, January 26, 2007

Ηλεκτρονικές διευθύνσεις

20. <http://www.aerospaceweb.org/>
21. http://aa.nps.edu/~jones/online_tools/panel2/naca/
22. <http://history.nasa.gov/SP-367/contents.htm>
23. <http://airfoils.worldofkrauss.com/>
24. <http://www.eaa1000.av.org/technicl/onedesaf/1desaf.htm>
25. <http://www.answers.com/topic/airfoil>
26. <http://en.wikipedia.org/wiki/Wind>
27. http://en.wikipedia.org/wiki/NACA_airfoil
28. http://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_attack
29. http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient
30. http://en.wikipedia.org/wiki/Lift_coefficient
31. <http://www.dynamicflight.com/aerodynamics/airfoils/>
32. http://www.daviddarling.info/encyclopedia/T/AE_tip_speed_ratio.html
33. <http://www.mathworks.it/access/helpdesk/help/toolbox/phymod/powersys/ref/windturbine.html>
34. <http://174.120.241.105/appliedaero/airfoils1/airfoilgeometry.html>