

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΜΑΤΛΑΒ**



ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΚΟΥΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΔΡ. ΔΙΟΝΥΣΙΑ ΚΟΛΟΚΟΤΣΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Φυσικοί πόροι και Ενέργεια.....	1
1.2 Πηγές ενέργειας - Εισαγωγικά-Ορισμοί.....	2
1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	3
1.3.1 Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από ΑΠΕ.....	3
1.3.2 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα των ΑΠΕ.....	5
1.4 Αναγκαιότητα χρήσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας.....	6
1.5 Η ενέργεια στην Ελλάδα.....	7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ - ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

2.1 Ο άνεμος.....	9
2.1.1 Χαρακτηριστικές Παράμετροι του Ανέμου.....	9
2.2 Αιολική ενέργεια – Ιστορική Αναδρομή.....	16
2.3 Ανεμογεννήτριες – συνοπτική περιγραφή.....	18
2.4 Τύποι ανεμογεννητριών.....	20
2.5 Ανεμογεννήτριες – περιγραφή υποσυστημάτων.....	23
2.5.1 Τα χαρακτηριστικά και συμπεριφορά του δρομέα.....	24
2.5.2 Η ρύθμιση του βήματος των πτερυγίων.....	25
2.5.3 Τα Υλικά και τα Προβλήματα Αντοχής των Πτερυγίων.....	26
2.5.4 Τα Συστήματα Προσανατολισμού.....	27
2.5.5 Η Κατασκευή του Πύργου και η θεμελίωσή του.....	27
2.5.6 Πλήμνη και Κύριος Άξονας της Α/Γ.....	27
2.5.7 Τα Συστήματα Πέδησης της Πλήμνης.....	28
2.5.8 Το Κιβώτιο Πολλαπλασιασμού Στροφών.....	29
2.5.9 Το Ηλεκτρολογικό Σύστημα Α/Γ.....	30
2.6 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα των Α/Γ.....	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: FUZZY LOGIC – ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ

3.1 Τι είναι ασαφή λογική (FUZZY LOGIC);.....	35
3.2 Στοιχεία της θεωρίας της ασαφούς λογικής.....	37
3.3 Χαρακτηριστικά των Ασαφών Συνόλων.....	38
3.4 Συναρτήσεις συμμετοχής.....	40
3.4.1 Μονοδιάστατες συναρτήσεις συμμετοχής.....	40
3.4.2 Πολυδιάστατες συναρτήσεις συμμετοχής-η έννοια της ασαφούς περιοχής.....	41
3.5 Λεκτικές μεταβλητές και ασαφείς κανόνες.....	42
3.5.1 Λεκτικές μεταβλητές.....	42
3.5.2 Ασαφείς κανόνες.....	42
3.6 Συστήματα ασαφούς λογικής.....	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ Α/Γ

4.1 Προδιαγραφές - παράμετροι του προσομοιωμένου μοντέλου Α/Γ.....	45
4.2 Περιγραφή - συμπεριφορά των κυκλωμάτων.....	49
4.2.1. Άνεμος (Wind field).....	51
4.2.2. Αεροδυναμική του ρότορα (Rotor Aerodynamics).....	53
4.2.3. Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (DC Generator).....	57
4.2.4. Ελεγκτής (Controller).....	59
4.3 Συμπεριφορά του τελικού μοντέλου-Συμπεράσματα.....	64

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

MATLAB - SIMULINK

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ενασχόληση με την ερευνητική δουλειά μιας πτυχιακής εργασίας δίνει σε έναν φοιτητή τη δυνατότητα να εμβαθύνει σε κάποιον τομέα της επιστήμης του, αλλά κυρίως να εργασθεί βασιζόμενος στις δικές του δυνάμεις και να αναλάβει πρωτοβουλίες.

Όλα αυτά βέβαια, κάτω από την επίβλεψη ενός έμπειρου ανθρώπου που έχει τη διάθεση και την ικανότητα να τον διδάξει και να μοιραστεί μαζί του πολύτιμες γνώσεις. Για τους παραπάνω λόγους θα ήθελα να ευχαριστήσω την Επίκουρο Καθηγήτρια κ. Κολοκοτσά, η οποία στη δική μου περίπτωση υπήρξε πολύτιμη καθοδηγήτρια και η οποία μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα θέμα που με ενδιέφερε πολύ και το οποίο στην πορεία πραγματικά αγάπησα.

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο την προσομοίωση μίας ανεμογεννήτριας με το λογισμικό MATLAB 6.5 - SIMULINK. Η ανεμογεννήτρια της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι μικρής απόδοσης και η προσομοίωση που έχει γίνει στο πρόγραμμα είναι μια γενική ηλεκτρονική απεικόνιση της λειτουργίας και της συμπεριφοράς της. Η προσομοίωση αποτέλεσε μια γενική ηλεκτρονική απεικόνιση με σκοπό την κατανόηση του πώς λειτουργεί και συμπεριφέρεται εσωτερικά μία ανεμογεννήτρια με τη γλώσσα των αριθμών, των εξισώσεων και των κυκλωμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η γρήγορη ανάπτυξη της ανθρωπότητας μετά τη βιομηχανική επανάσταση βασίστηκε στην κατασπατάληση των ενεργειακών και φυσικών πόρων του πλανήτη και στην ανελέητη υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Η επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου ανάπτυξης βασίστηκε στην αναζήτηση της αφθονίας και της επάρκειας των διαθέσιμων ενεργειακών και φυσικών πόρων και κυρίως στην έλλειψη του μέτρου. Δυστυχώς, τα αποτελέσματα της αλόγιστης ανάπτυξης καλούνται να τα αντιμετωπίσουν οι σημερινές και οι επόμενες γενιές.

1.1 ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η έννοια του φυσικού πόρου είναι ευρύτερη της ενεργειακής πηγής και περιλαμβάνει καθετί που χρειάζεται ένας οργανισμός για την επιβίωσή του και προέρχεται από τη φύση. Ιδιαίτερα για τις ανθρώπινες κοινωνίες ως φυσικοί πόροι ορίζονται όλα τα υπάρχοντα στη γη υλικά ή προϊόντα που είναι χρήσιμα για τη ζωή και τις δραστηριότητες του ανθρώπου.

Επειδή οι περισσότεροι φυσικοί πόροι είναι και αποθεματικοί, δημιουργούν δηλαδή αρχικά απόθεμα ύλης και ενέργειας, μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, τους ανανεώσιμους και τους μη ανανεώσιμους φυσικούς πόρους. Οι ανανεώσιμοι πόροι διαρκούν για πάντα ή ανανεώνονται συνεχώς, όταν γίνεται σωστά η διαχείρισή τους, ενώ οι μη ανανεώσιμοι εξαντλούνται σε τέτοιο σημείο ώστε η ανανέωσή τους είναι αδύνατη ή πολύ δαπανηρή.

Οι ανανεώσιμοι πόροι δημιουργούνται συνήθως από τα σύγχρονα βιοτικά συστήματα (γεωργικές καλλιέργειες, αλιεύματα, δασική ξυλεία κλπ.) και μαζί με την ηλιακή, την αιολική, τη γεωθερμική και την υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελούν τους ενεργειακούς ανανεώσιμους πόρους. Αντίστοιχα, οι μη ανανεώσιμοι πόροι είναι αποθέματα που προέρχονται από αβιοτικά συστήματα (μέταλλα, νερό, μάρμαρο) ή από πρώην βιοτικά συστήματα (κάρβουνο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο).

Ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης των φυσικών πόρων στηρίζεται στο αν μπορούν ή όχι να ανανεωθούν με τεχνητές διεργασίες ανακύκλωσης ή μέσα από τους φυσικούς βιογεωχημικούς κύκλους. Έτσι, οι φυσικοί πόροι διακρίνονται σε ανακυκλώσιμους και μη ανακυκλώσιμους. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η ταξινόμηση των φυσικών πόρων.

Πίνακας 1. Ταξινόμηση των φυσικών πόρων.

Φυσικοί πόροι	Ανανεώσιμοι	Μη ανανεώσιμοι
Ανακυκλώσιμοι	Νερό, χαρτί, ξυλεία, φυσικά υφαντουργικά προϊόντα	Μέταλλα, γυαλί, μάρμαρο
Μη ανακυκλώσιμοι	Καυσόξυλα, φυτικά καύσιμα, τροφές	Πετρέλαιο, κάρβουνο, ουράνιο, πλαστικά

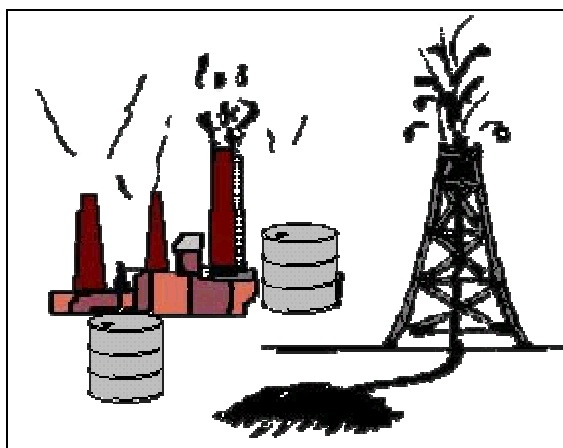
Αν ένας πόρος δεν είναι ανανεώσιμος ούτε ανακυκλώσιμος, τότε η εξαφάνισή του είναι ζήτημα χρόνου.

1.2 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ - ΟΡΙΣΜΟΙ

Οι «αποθήκες» ενέργειας ονομάζονται **Πηγές Ενέργειας** και διακρίνονται σε **αυτογενείς ή πρωταρχικές** (πυρήνες ατόμων, ήλιος, γαιάνθρακες ή πετρέλαιο) και **τεχνητές** (ταμιευτήρες, ηλεκτρικοί συσσωρευτές). Επίσης, διακρίνονται σε **προτογενείς πηγές** που περιλαμβάνουν τη δυναμική ενέργεια των πυρήνων και **δευτερογενείς** που είναι όλες οι άλλες μορφές - πηγές ενέργειας.

Όσον αφορά όμως τα αποθέματα ενέργειας (ενεργειακό δυναμικό), οι πηγές ενέργειας διακρίνονται σε **μη ανανεώσιμες ή συμβατικές πηγές ενέργειας** και σε **ανανεώσιμες πηγές ενέργειας**.

Οι **αυτογενείς ή πρωταρχικές** πηγές ενέργειας είναι αποθηκευμένες ή υπάρχουν στη φύση. Ο ήλιος είναι η πρωταρχική και η βασική πηγή ενέργειας της γης.



Εικόνα 1. Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: Αποκαλούνται έτσι γιατί δεν είναι δυνατόν να ανανεώσουν, σε εύλογο για τον άνθρωπο, χρονικό διάστημα την αποθηκευμένη τους ενέργεια. Η διαδικασία σχηματισμού τους διήρκεσε εκατομμύρια χρόνια. Οι **μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας** περιλαμβάνουν :

- Τα στερεά καύσιμα των γαιανθράκων, όπως λιγνίτη, ανθρακίτη, τύρφη.
- Τα υγρά καύσιμα που παίρνονται με κατεργασία, όπως μαζούτ, πετρέλαιο, βενζίνη, κηροζίνη κλπ.
- Τα αέρια καύσιμα όπως το φυσικό αέριο, υγραέριο κλπ.
- Την πυρηνική ενέργεια που παίρνουμε από τη σχάση ραδιενεργών υλικών.

Οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι αυτές που χρησιμοποιούνται κυρίως τα τελευταία χρόνια και οι οποίες έχουν οδηγήσει σε ενεργειακές κρίσεις, αλλά και στη δημιουργία σειράς προβλημάτων, με αποτέλεσμα την επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ): Ως ανανεώσιμες χαρακτηρίζονται οι πηγές που θα συνεχίζουν να παρέχουν ενέργεια σε βάθος χρόνου, δηλαδή είναι ανεξάντλητες. Σε αυτές θα αναφερθούμε εκτενώς στην επόμενη παράγραφο.

1.3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ως ανανεώσιμες χαρακτηρίζονται οι πηγές που θα συνεχίζουν να παρέχουν ενέργεια σε βάθος χρόνου, δηλαδή είναι ανεξάντλητες. Είναι οι πηγές ενέργειας που τροφοδοτούνται συνεχώς με ενέργεια από τον ήλιο, όπως:

- ο ίδιος ο ήλιος (ηλιακή ενέργεια),
- ο άνεμος (αιολική ενέργεια),
- οι υδατοπτώσεις (υδροηλεκτρική ενέργεια),
- η ενέργεια των κυμάτων, ρευμάτων, ωκεανών καθώς και
- η ενέργεια βιομάζας.

Στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανήκει και η γεωθερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και σχετίζεται με την ηφαιστειακή δραστηριότητα και τις ειδικότερες γεωλογικές και γεωτεκτονικές συνθήκες της κάθε περιοχής.

1.3.1 Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει την μικρότερη επίδραση στο περιβάλλον δίνοντας στον καταναλωτή έναν εναλλακτικό τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από εκείνους που βασίζονται στη χρήση άνθρακα, πυρηνικής ενέργειας, φυσικού αερίου, πετρελαίου και μεγάλων υδροηλεκτρικών μονάδων.



Εικόνα 2. Παραστατική απεικόνιση της λειτουργίας των ΑΠΕ.

Στη συνέχεια επιγραμματικά θα αναφερθούν οι δυνατότητες συνεισφοράς της καθεμιάς από τις ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας.

I. Ηλιακή ενέργεια

Ο ήλιος εκπέμπει τεράστια ποσότητα ενέργειας ημερησίως και δεν αναμένεται να υπάρξει μείωση της ενέργειας που ακτινοβολεί από αυτόν μακροπρόθεσμα. Η ηλιακή ακτινοβολία αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού με δύο τρόπους, τις **θερμικές** και τις **φωτοβολταϊκές** εφαρμογές. Η πρώτη βασίζεται στη συλλογή της ηλιακής ενέργειας για να παραχθεί θερμότητα, κυρίως για τη θέρμανση του νερού (όπως οι ηλιακοί θερμοσίφωνες), και μετέπειτα για τη μετατροπή του σε ατμό για την κίνηση τουρμπίνων. Στη δεύτερη εφαρμογή, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών. Αν και όλη η γη δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, η ποσότητά της εξαρτάται κυρίως από τη γεωγραφική θέση, τη διάρκεια της ημέρα, την εποχή και τη νεφοκάλυψη.

II. Αιολική ενέργεια

Αυτή η μορφή «καθαρής» ενέργειας, η οποία θα μας απασχολήσει εκτενώς στο Κεφάλαιο 2, δε μολύνει το περιβάλλον και αξιοποιείται με τη χρήση τουρμπίνων ή ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

III. Γεωθερμική ενέργεια

Γεωθερμική ενέργεια ονομάζεται η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμφανίζεται με τη μορφή θερμού νερού ή ατμού. Η ενέργεια αυτή σχετίζεται με την ηφαιστειακή δραστηριότητα και τις ειδικότερες γεωλογικές και γεωτεκτονικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Οι γεωθερμικές περιοχές συχνά εντοπίζονται από τον ατμό που βγαίνει από σχισμές του φλοιού της γης ή από την παρουσία θερμών πηγών.

Υπάρχουν δυο κύριες εφαρμογές της γεωθερμική ενέργειας.

- Η πρώτη βασίζεται στη χρήση της θερμότητας της γης για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και άλλες χρήσεις (θέρμανση κτηρίων, θερμοκηπίων).
- Η δεύτερη εφαρμογή της γεωθερμικής ενέργειας εκμεταλλεύεται τις θερμές μάζες εδάφους ή υπογείων υδάτων για να κινήσουν θερμικές αντλίες για εφαρμογές θέρμανση και ψύξης.

IV. Βιομάζα

Η βιομάζα αποτέλεσε για σειρά αιώνων την κυριότερη πηγή ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του ανθρώπου (χρήση ξύλου). Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος που λειτουργούν με βιομάζα καίνε ξύλο και αγροτικά ή κτηνοτροφικά απόβλητα για να παράγουν ενέργεια. Η βιομάζα, η οποία είναι καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού με δύο τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο, η στερεή βιομάζα καίγεται σε έναν καυστήρα για τη θέρμανση νερού και ο ατμός που παράγεται χρησιμοποιείται για να θέσει σε λειτουργία μια γεννήτρια που παράγει ηλεκτρισμό. Σύμφωνα με το δεύτερο, τα αέρια που δημιουργούνται από τη βιομάζα χρησιμοποιούνται για καύση και παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

V. Μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες

Η μετατροπή της ενέργειας των υδατοπτώσεων με τη χρήση υδραυλικών τουρμπίνων παράγει την υδροηλεκτρική ενέργεια. Η υδροηλεκτρική ενέργεια ταξινομείται σε μεγάλης και μικρής κλίμακας. Οι μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικές μονάδες απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και τεράστιων δεξαμενών με σημαντικές επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον. Η κατασκευή φραγμάτων για τη συγκέντρωση νερού επηρεάζει ολόκληρο το οικοσύστημα. Αντίθετα, τα μικρής κλίμακας συστήματα τοποθετούνται δίπλα σε ποτάμια και κανάλια και έχουν λιγότερες επιπτώσεις στο οικοσύστημα. Υδροηλεκτρικές μονάδες μικρότερες των 30 MW σε μέγεθος χαρακτηρίζονται μικρής κλίμακας και θεωρούνται ανανεώσιμες πηγές.

1.3.2 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα των ΑΠΕ

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος.
- Δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη επιτυγχάνοντας ορθολογικότερη χρησιμοποίηση των ενεργειακών πόρων.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος.
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ διατίθενται σε μικρά μεγέθη και έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ δημιουργούν πολλές θέσεις εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη.
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

Εκτός από τα παραπάνω πλεονεκτήματα οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και ορισμένα χαρακτηριστικά που δυσχεραίνουν την αξιοποίηση και ταχεία ανάπτυξή τους:

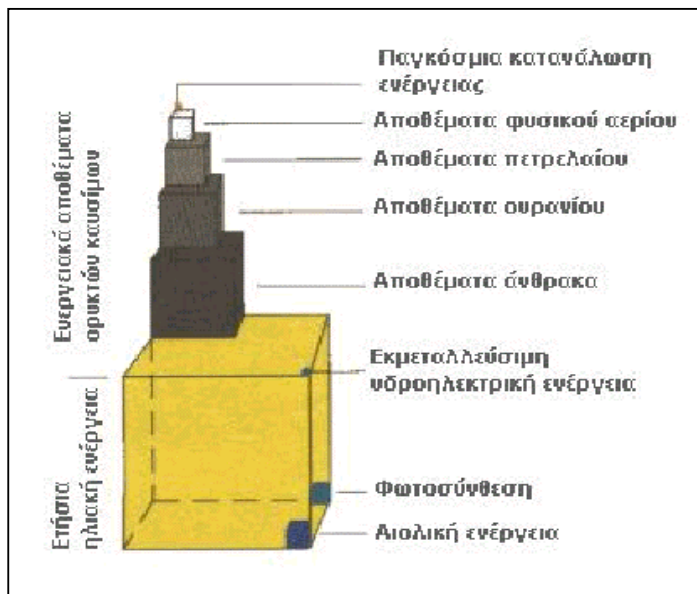
- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος, να μεταφερθεί και να αποθηκευθεί.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλες ισχύεις απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.
- Το κόστος τους είναι υψηλό.

1.4 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Είναι φανερό ότι οι ενεργειακές ανάγκες συνεχώς θα αυξάνονται. Θέρμανση, ηλεκτρισμός, μεταφορές είναι αναγκαία σε κάθε νοικοκυριό, ενώ και η παραγωγή αγαθών βασίζεται σήμερα στην ενέργεια (βιομηχανία, βιοτεχνία, γεωργία, ορυκτός πλούτος). Όλα τα παραπάνω και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι συμβατικές πρώτες ύλες είναι εξαντλήσιμες καλούν την ανθρωπότητα να απαντήσει σε ένα βασικό ερώτημα. Εάν θα συνεχίσει να καλύπτει τις ενεργειακές της ανάγκες κυρίως με τα ορυκτά καύσιμα (μέχρι αυτά να εξαντληθούν) με την επακόλουθη περιβαλλοντική επιβάρυνση ή θα αναζητήσει σύντομα άλλες λύσεις.

Η μόνη απάντηση που προς το παρόν διαφαίνεται ότι θα περιορίσει δραστικά τα περιβαλλοντικά προβλήματα είναι η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αν και η τεχνολογία έχει κάνει σημαντικά βήματα προς τον τομέα αυτό, η εφαρμογή των ΑΠΕ βρίσκεται σε αρχικό ακόμη στάδιο.

Στην παρακάτω εικόνα παριστάνεται μία σχηματική απεικόνιση των ενεργειακών αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων και των χρησιμοποιούμενων ποσών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.



Εικόνα 3. Σχηματική απεικόνιση των ενεργειακών αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων και των χρησιμοποιούμενων ποσών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

(Πηγή: Η Ενέργεια κι εμείς, Εκπαιδευτικό CD, Διεπιστημονικό Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Ερευνών).

1.5 Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

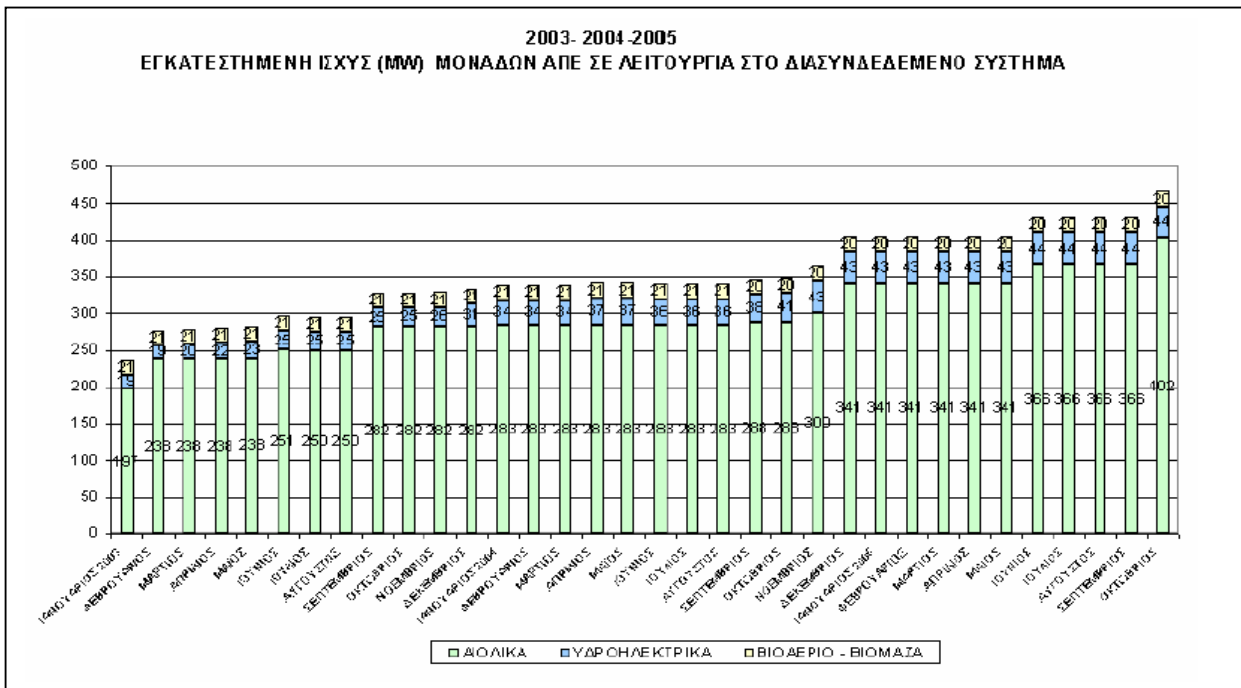
Προς το παρόν, η ενέργεια στη χώρα μας, βασίζεται κατά κύριο λόγο στην καύση των λιγνιτών και κατά μικρό μέρος στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, ο λιγνίτης συμμετέχει στη μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά 59%, ενώ ακολουθεί το φυσικό αέριο με μόλις 16%. Επίσης παρατηρείται ότι οι ΑΠΕ (αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια) συμμετέχουν αθροιστικά με ποσοστό μόλις 10%.



Εικόνα 4. Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. (Πηγή: Διαχειριστής ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας Α.Ε. (Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.) - Στοιχεία Οκτωβρίου 2005).

Η Ελλάδα, στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μπορεί να θεωρηθεί χώρα ευνοημένη από τη φύση. Το κλίμα είναι μεσογειακό, με πολλές ημέρες ηλιοφάνειας και οι άνεμοι που επικρατούν, ιδίως στα νησιά του Αιγαίου, έχουν και διάρκεια και ένταση. Τα τελευταία χρόνια αυξάνονται και πληθύνονται οι επενδυτικές προσπάθειες στο χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με αιχμή τα αιολικά πάρκα και δευτερευόντως τα υδροηλεκτρικά, τη βιομάζα και τα φωτοβολταϊκά.

Στην παρακάτω εικόνα παριστάνεται η υπάρχουσα εγκατεστημένη ισχύς από ΑΠΕ στη χώρα μας, που ανέρχεται συνολικά για τον μήνα Οκτώβριο του 2005, σε 466 MW. Τα 402 MW προέρχονται από την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, ενώ τα 44 MW από υδροηλεκτρικά εργοστάσια και τέλος μόλις 20 MW από βιομάζα (δεν γίνεται αναφορά στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές καθότι δεν υπάρχουν μεγάλες εγκαταστάσεις στη χώρα).



Εικόνα 5. Εγκατεστημένη ισχύς (MW) μονάδων ΑΠΕ σε λειτουργία στο διασυνδεδεμένο σύστημα. (Πηγή: Διαχειριστής ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας Α.Ε (Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.) - Στοιχεία τριών τελευταίων ετών 2003,2004,2005).

Οι ΑΠΕ τα τελευταία χρόνια ακολουθούν ανοδική πορεία στη χώρα μας, γεγονός που φανερώνει την πολιτική και τις «καθαρές» προθέσεις τόσο της ίδιας της χώρας μας, όσο και της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συνολική επενδυτική δραστηριότητα συγκεντρώνεται γεωγραφικά στις νησιωτικές περιοχές του ελλαδικού χώρου, κυρίως του Αιγαίου, με πρωτοπόρα νησιά την Κρήτη, την Εύβοια, τη Ρόδο και τη Σάμο, σε αντίθεση με την Ηπειρωτική Ελλάδα, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με την αξιοποίηση υδροηλεκτρικών και ατμοηλεκτρικών σταθμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο **ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ - ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ**

2.1 Ο ΑΝΕΜΟΣ

Ο άνεμος είναι ατμοσφαιρικός αέρας σε κίνηση. Για κάθε ρευστό που βρίσκεται σε κίνηση καθορίζεται το διάνυσμα της ταχύτητας κατά μέτρο (ένταση ανέμου) και φορά (διεύθυνση ανέμου). Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου εξαρτώνται από ειδικούς παράγοντες (γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία, πεδίο πίεσης, κ.τ.λ.) καθώς και από τοπικούς παράγοντες (ανάγλυφο περιοχής, ύπαρξη θάλασσας, κ.τ.λ.). Η γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία οφείλεται κυρίως στην ηλιακή ακτινοβολία και στην περιστροφή της Γης. Η διαφορετική θερμοκρασία μεταξύ ισημερινού και πόλων (διαφορετική ακτινοβολία) έχει ως συνέπεια τη συνεχή κίνηση αερίων μαζών από τους πόλους προς τον ισημερινό (ψυχρές επιφανειακές μάζες) και αντίστροφα (θερμές μάζες). Η περιστροφή της Γης οδηγεί στην κίνηση ψυχρών επιφανειακών μαζών δυτικά και θερμών μαζών σε μεγαλύτερο ύψος προς τα ανατολικά. Η ανομοιομορφία της θερμικής συμπεριφοράς της ξηράς και της θάλασσας – ανομοιόμορφη ψύξη δημιουργεί ζώνες διαφορετικής θερμοκρασίας και κατά συνέπεια πεδία στατικής πίεσης.

Ο συνδυασμός της προσλαμβανόμενης από την ατμόσφαιρα και την γη ηλιακής ακτινοβολίας με την ανομοιομορφία του γήινου ανάγλυφου και την περιστροφή της γης γύρω από το άξονά της έχει ως συνέπεια την κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα. Οι δυνάμεις που ρυθμίζουν την κίνηση του αέρα είναι :

1. Η δύναμη βαροβαθμίδας.
2. Η δύναμη Coriolis.
3. Η δύναμη τριβής.

2.1.1. Χαρακτηριστικές Παράμετροι του Ανέμου

Η γνώση των χαρακτηριστικών του ανέμου είναι απαραίτητη στις μελέτες εκτίμησης της ενέργειας που περικλείει ο άνεμος. Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης Αιολικών συστημάτων θα πρέπει να γνωρίζουμε:

- Την ταχύτητα του ανέμου.
- Τη διεύθυνση του ανέμου.
- Την επικρατούσα στην περιοχή ανατάραξη.
- Το στροβιλισμό του ανέμου.
- Τη μεταβολή με το ύψος της ταχύτητας του ανέμου (κατανομή του ανέμου).

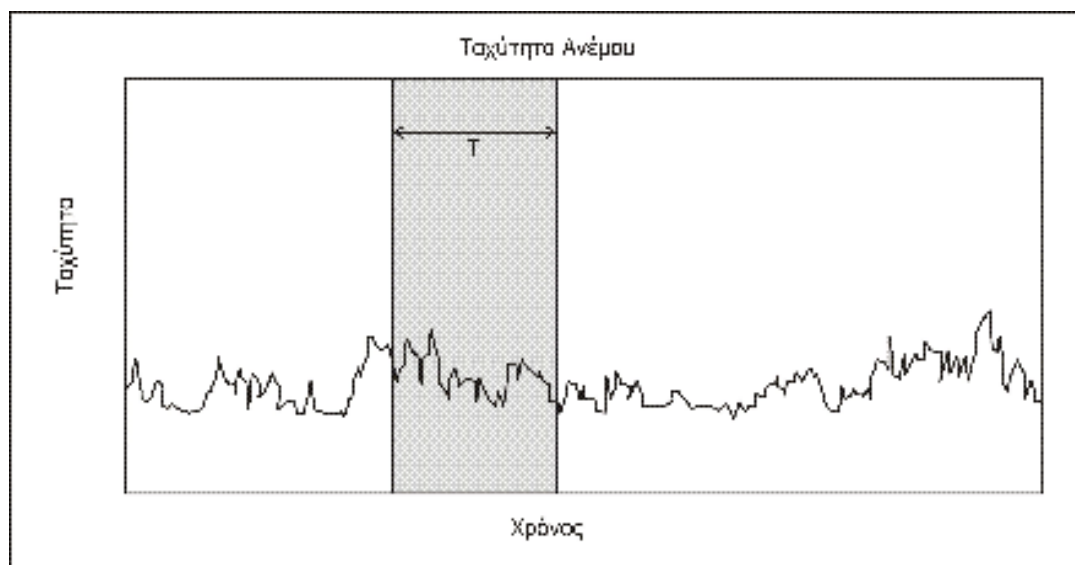
Οι χαρακτηριστικές αυτές παράμετροι του Ανέμου αναλύονται παρακάτω:

Μέση ταχύτητα του Ανέμου

Η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι ένα ιδιαίτερα μεταβλητό μέγεθος (εικόνα 6) γιατί χαρακτηρίζεται από σημαντικές μεταβολές μέσα σε χρονικό διάστημα (sec→h). Οι διακυμάνσεις μπορούν να θεωρηθούν τυχαίες, ενώ υπάρχει σημαντική εξάρτηση από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου είναι το άθροισμα της μέσης ταχύτητας και της διακύμανσης γύρω από την μέση τιμή:

$$V(t) = \bar{V} + V'(t) \quad (2.1)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V(t) dt \quad V'(t) = 0 \quad \text{για } T = 10 \text{ min} \quad (2.2)$$



Εικόνα 6. Μέση ταχύτητα του ανέμου.

Μέγιστη Ταχύτητα του Ανέμου

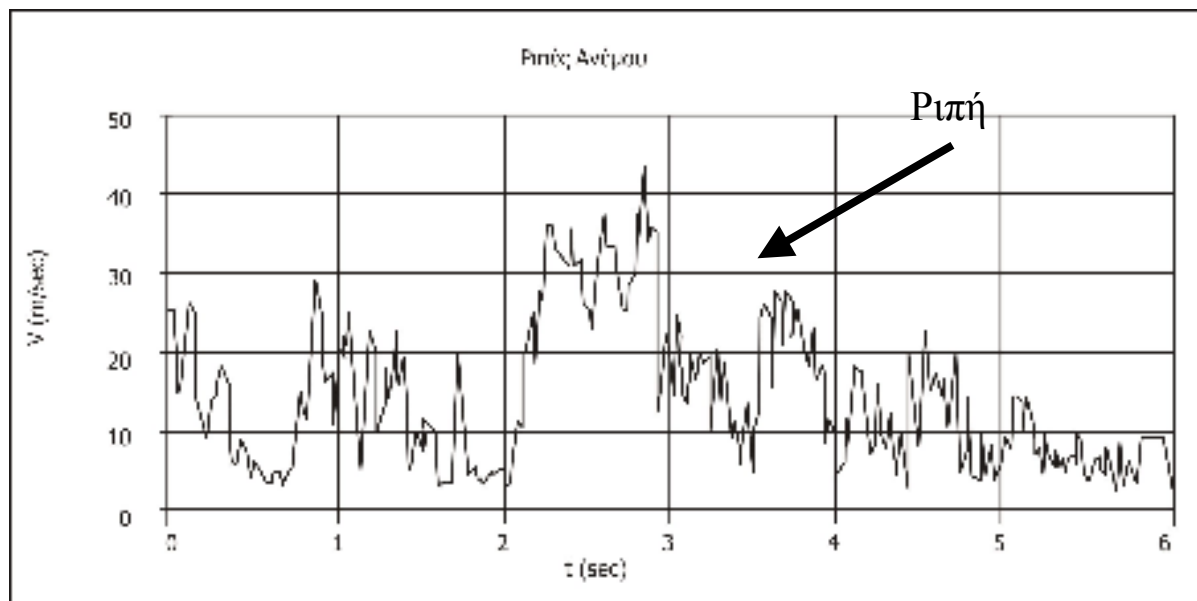
Η μέση ταχύτητα του ανέμου καθορίζει την αντοχή μιας αιολικής μηχανής. Εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση της περιοχής και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Υπολογίζεται:

- Με δεδομένα ωριαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου υπολογίζεται η μέγιστη ωριαία και στην συνέχεια η μέγιστη ημερήσια ταχύτητα του ανέμου.
- Για 20ετή και μεγαλύτερη χρονοσειρά ορίζουμε ως δείγμα μεγίστων ταχυτήτων ανέμου τις μέγιστες ετήσιες τιμές.
- Με τον στατιστικό νόμο των ακραίων τιμών εκτιμάται η μέγιστη ταχύτητα που αναμένεται να ξεπεραστεί κατά μέσο όρο μια φορά τουλάχιστον σ' ένα αριθμό ετών. Ο αριθμός των ετών καθορίζει και τον χρόνο ζωής της αιολικής μηχανής κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Ριπές του Ανέμου

Η ριπή του ανέμου ορίζεται ως η ξαφνική και μικρής διάρκειας (~20 sec) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου (εικόνα 7). Η ταχύτητα του ανέμου μετά το πέρας της ριπής επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα.

Ισχύει ο εμπειρικός κανόνας: Η ριπή συνήθως ξεπερνά τα 9 m/sec και διαφέρει από τα συνήθη επίπεδα περίπου κατά 4-5 m/sec. Καθορίζει την κόπωση της πτερωτής της ανεμογεννήτριας, ενώ αν οι ριπές διαρκέσουν περισσότερο από 30 sec θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη η αιολική μηχανή να τεθεί εκτός λειτουργίας.



Εικόνα 7. Ριπές του Ανέμου.

Διεύθυνση του Ανέμου

Ως διεύθυνση του ανέμου ορίζεται το σημείο του ορίζοντα από το οποίο φυσά ο άνεμος σε σχέση με την θέση στην οποία μετράμε. Η διεύθυνση του ανέμου «ταλαντώνεται» συνεχώς γύρω από μία μέση θέση εμφανίζοντας όμως μικρότερες διακυμάνσεις από την ταχύτητα του ανέμου (εικόνα 8).

1. Κύριες διευθύνσεις του ανέμου:

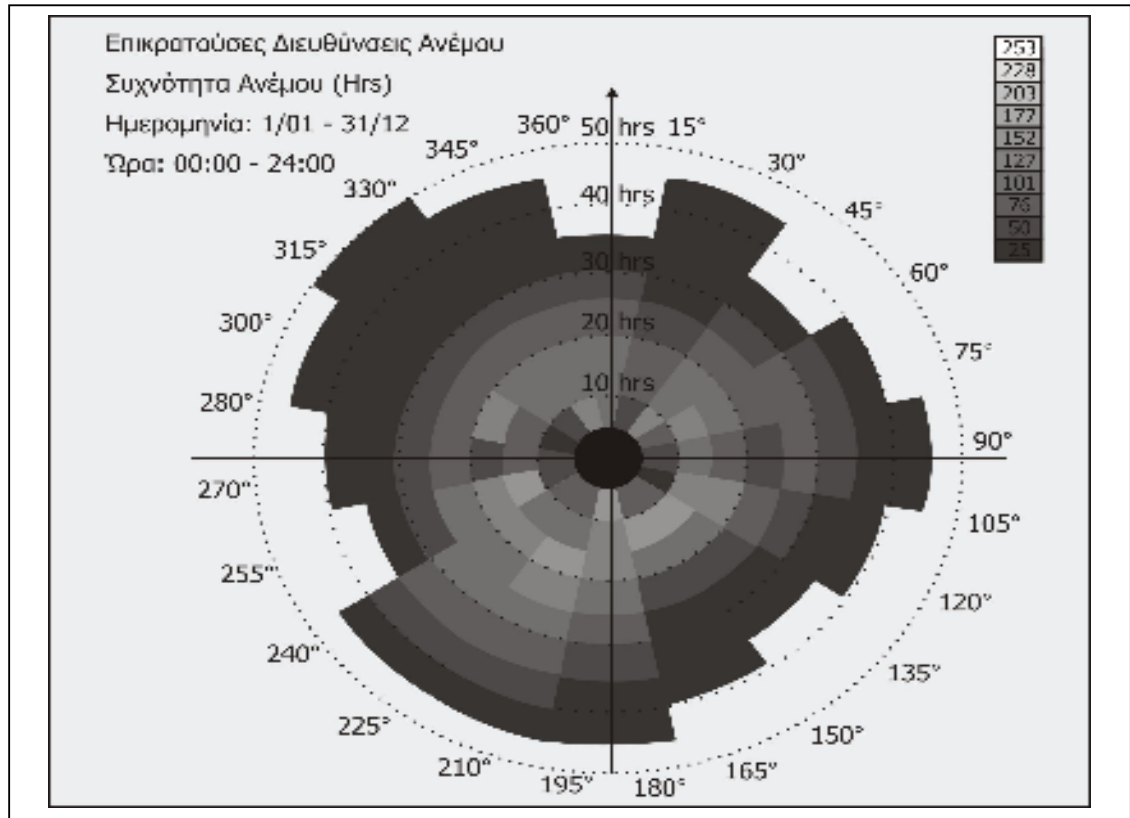
- Οι διευθύνσεις του ανέμου που συνεισφέρουν τουλάχιστον 10% στην συνολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια.
- Εξαρτώνται από τους προσανατολισμούς των τοποθεσιών, από την βλάστηση και από τα χαρακτηριστικά του εδάφους (λόφοι, βουνά, κοιλάδες, κτίρια, κ.τ.λ.).

2. Επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου:

- Οι διευθύνσεις που εμφανίζουν στην περιοχή που μελετάμε την μεγαλύτερη συχνότητα.
- Η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου αλλάζει συχνά με την εποχή.

3. Προσήνεμη – Υπήνεμη Περιοχή:

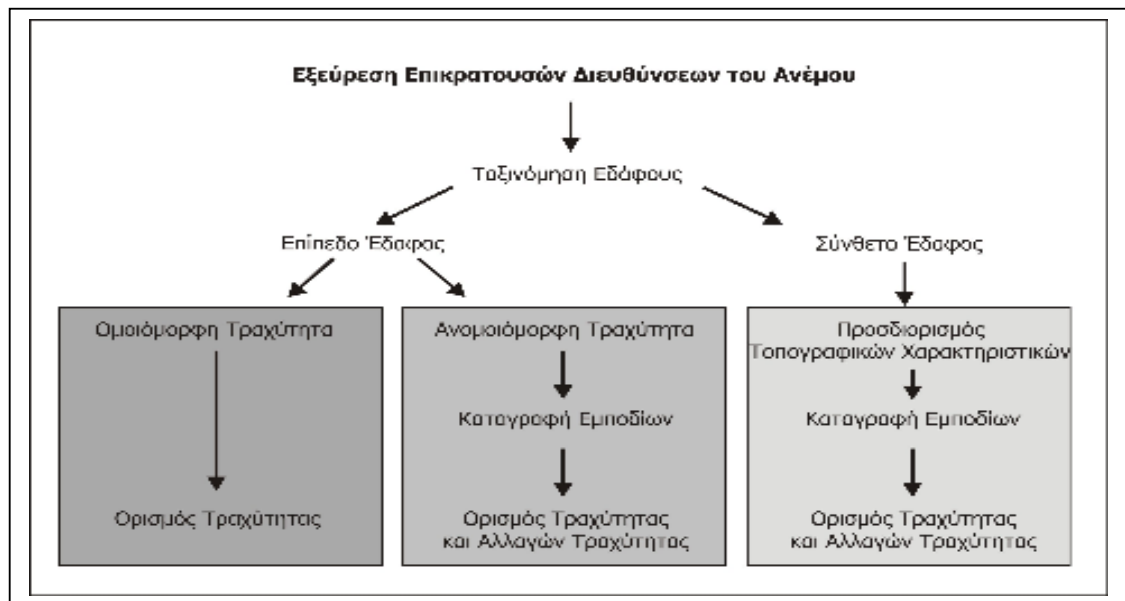
- Προσήνεμη: Ο χώρος μεταξύ του σημείου που θέλουμε να εγκαταστήσουμε την αιολική μηχανή και του σημείου του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος (επικρατούσα διεύθυνση).
- Υπήνεμη: Η περιοχή που είναι προστατευόμενη από τον άνεμο. Συχνά είναι η αντίθετη της προσήνεμης. Περιοχή που εκτίθεται σε ανέμους με ελάχιστη συχνότητα εμφάνισης.



Εικόνα 8. Διεύθυνση του Ανέμου – Ροδόγραμμα.

Τραχύτητα εδάφους

Ο ρόλος της διεύθυνσης του ανέμου στην επιλογή μιας θέσης για εγκατάσταση είναι σημαντικός για το καθορισμό της τραχύτητας του εδάφους. Κατά την διάρκεια της επιλογής θα πρέπει να προσδιοριστεί η τραχύτητα του εδάφους σε σχέση με τις επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου και στην συνέχεια να εκτιμηθεί το αιολικό δυναμικό της θέσης (εικόνα 9).



Εικόνα 9. Τραχύτητα του εδάφους.

Η τραχύτητα του εδάφους εκφράζει το είδος του εδάφους. Τα μεγέθη που εκφράζουν την τραχύτητα του εδάφους είναι το μήκος τραχύτητας z_0 και η κλάση (κατηγορία) τραχύτητας (πίνακας 2). Το μήκος τραχύτητας μπορεί να αλλάζει με τις εποχές (εποχές, συγκομιδή, κ.τ.λ.), ενώ ορίζεται για επιφάνειες με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων τραχύτητας και επηρεάζεται από την πυκνότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών.

- Για επίπεδη περιοχή με τα στοιχεία τραχύτητας να καταλαμβάνουν 10-20% το z_0 συνδέεται με το μέσο ύψος (h) των στοιχείων τραχύτητας με την σχέση:

$$z_0 = 0.15h \quad (2.3)$$

- Αν $z_0 \leq 0.03 \rightarrow$ Κατηγορία τραχύτητας:

$$\alpha = 1.699823015 + \ln(z_0) / \ln(150)$$

- Αν $z_0 > 0.03 \rightarrow$ Κατηγορία τραχύτητας:

$$\alpha = 3.912489289 + \ln(z_0) / \ln(3.3333333)$$

Πίνακας 2. Μήκος τραχύτητας ανάλογα με τον τύπο του εδάφους.

Κατηγορία Τραχύτητας	Τύπος εδάφους	z_0 (m)
0	Πηλώδες έδαφος, πάγος	10^{-5} - 3×10^{-5}
0	Ήρεμη θάλασσα	2×10^{-4} - 3×10^{-4}
0	Αμμώδες έδαφος	10^{-4} - 10^{-3}
0	Χιονοκαλυμμένο επίπεδο έδαφος	4.9×10^{-3}
1	Χέρσο έδαφος	10^{-3} - 10^{-2}
1	Χλοερό έδαφος	0.017
1	Επίπεδο ακαλλιέργητο έδαφος	0.021
2	Χαμηλή βλάστηση, Στέπα	0.032
2	Υψηλά χόρτα	0.039
2	Σιτοβολώνες	0.045
2	Καλλιέργειες	0.064
2	Θαμνώδες έδαφος	0.1-0.3
2	Δάση με χαμηλά δέντρα	0.05-0.1
3	Δάση με υψηλά δέντρα	0.2-0.9
3	Προαστιακές περιοχές	1-2
3	Πόλεις	1-4

1. Κατηγορία τραχύτητας 1: Ανοικτές περιοχές χωρίς εμπόδια. Το έδαφος είναι επίπεδο ή με πολύ ελαφριές κλίσεις. Μπορεί να υπάρχουν μεμονωμένες αγροικίες και χαμηλοί θάμνοι.
2. Κατηγορία τραχύτητας 2: Καλλιεργημένη περιοχή με ορισμένα εμπόδια σε απόσταση μεγαλύτερη των 1000m μεταξύ τους και μερικά σπίτια. Το έδαφος είναι επίπεδο ή κυματώδες με δέντρα και σπίτια.
3. Κατηγορία τραχύτητας 3: Συνδυασμός δάσους και καλλιεργημένης περιοχής με πολλά εμπόδια στα περίχωρα της πόλης. Τα εμπόδια είναι κοντά μεταξύ τους σε αποστάσεις μικρότερες από μερικές εκατοντάδες μέτρα.

Ανατάραξη του αέρα

Η διακύμανση της ταχύτητας του αέρα γύρω από την μέση τιμή:

$$[V'(t)]^2 = \sigma_v^2 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [V(t) - \bar{V}]^2 dt \quad \text{για } T = 10 \text{ min} \quad (2.4)$$

Η ένταση I της ανατάραξης του αέρα ορίζεται ως (σν η τυπική απόκλιση):

$$I = \frac{\sigma_v}{\bar{V}} \quad (2.5)$$

Η ένταση της ανατάραξης εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και μπορεί να υπολογιστεί με βάση το μήκος τραχύτητας z_0 :

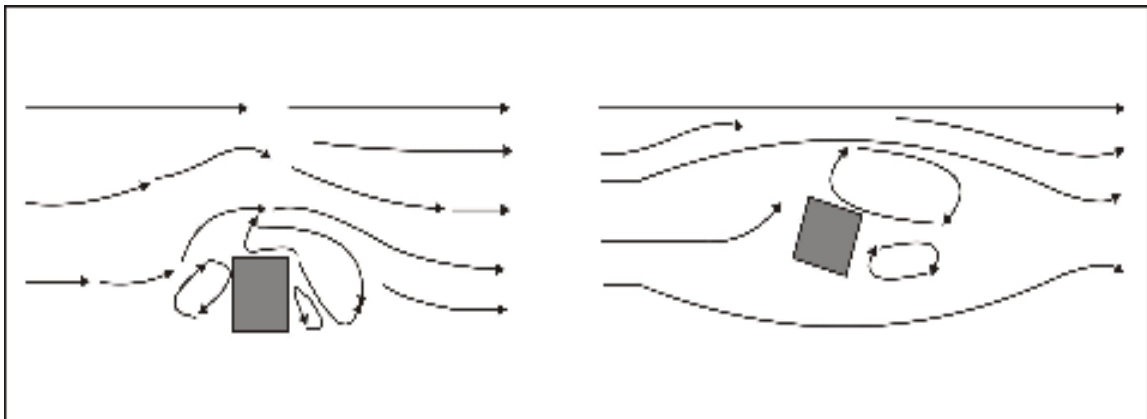
$$I = \frac{1}{\ln \frac{z}{z_0}}, \quad z_0 \leq 0,20m \quad (2.6)$$

$$I = \frac{-0.14 \ln z + 0.78}{\ln \frac{z}{z_0}} \quad z_0 > 0,20m \quad (2.7)$$

Η ένταση της ανατάραξης είναι ένα από τα βασικά μεγέθη τα οποία πρέπει να γνωρίζει κανείς όταν πρόκειται να εγκαταστήσει μια αιολική μηχανή, γιατί δεν επιδρά μόνο στην συλλεγόμενη ισχύ, αλλά και στην όλη εγκατάσταση του συστήματος.

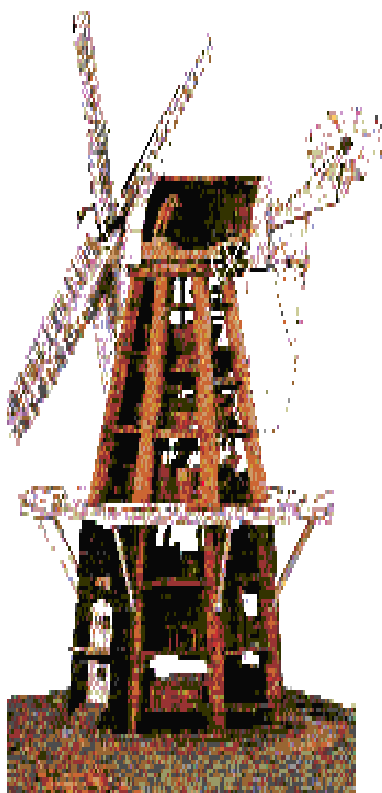
Στροβιλισμός του αέρα

Η ανατάραξη του αέρα δημιουργεί τυχαίους στροβιλισμούς του αέρα λόγω της ύπαρξης διαφόρων χαρακτηριστικών της επιφάνειας του εδάφους (εικόνα 10). Τα εμπόδια στο έδαφος συχνά δημιουργούν οργανωμένους στροβίλους. Οι οργανωμένοι στροβίλοι επηρεάζουν τόσο την παρεχόμενη ισχύ από τον άνεμο όσο και την όλη εγκατάσταση του συστήματος μιας αιολικής μηχανής.



Εικόνα 10. Στροβιλισμός του αέρα.

2.2 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ



Εικόνα 11. Ανεμόμυλος του 19^{ου}.

Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις πιο παλαιές φυσικές πηγές ενέργειας που αξιοποιήθηκε σε μηχανική μορφή. **Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του ανέμου που προέρχεται από τη μετακίνηση αερίων μαζών της ατμόσφαιρας.** Η πρωτογενής αυτή μορφή ενέργειας που παρέχεται άμεσα από τη φύση, έπαιξε αποφασιστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας ιδιαίτερα με τη χρήση της στην ναυτιλία για συγκοινωνίες και εξερευνήσεις. Η σημασία της ενέργειας του ανέμου φαίνεται στην ελληνική μυθολογία όπου ο Αίολος διορίζεται από τους θεούς ταμίας των ανέμων.

Πρώτη χρήση της αιολικής ενέργειας από τον άνθρωπο έγινε για την κίνηση των πλοίων τους. Υπάρχουν επίσης ιστορικές και αρχαιολογικές μαρτυρίες ότι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν από τους Κινέζους, τους Πέρσες και τους Αιγυπτίους πολλούς αιώνες πριν από τη γέννηση του Χριστού.

Στις χώρες της ανατολής, στην Περσία, στη Μικρά Ασία, στο Αιγαίο, οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν από πολύ παλαιά για την άλεση δημητριακών, μέχρι τη Βυζαντινή εποχή και μεταγενέστερα.

Οι ανεμόμυλοι δεν χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την άλεση δημητριακών, αλλά και για άλλους σκοπούς με περισσότερο σπουδαίο την άντληση των υδάτων. Στην Ελλάδα για την άντληση ποτιστικού νερού από πηγάδια χρησιμοποιήθηκαν οι ανεμόμυλοι κυρίως στην ανατολική Κρήτη. Υπολογίζεται ότι ο αριθμός τους είχε φτάσει προπολεμικά τους 6.000 (έναν χαρακτηριστικό ανεμόμυλο βλέπουμε στην εικόνα 11).

Στην συνέχεια αναφέρονται οι κυριότεροι χρονικοί σταθμοί της εξελικτικής πορείας της αιολικής ενέργειας και των ανεμόμυλων σε μορφή πίνακα.

Πίνακας 3. Χρονική ανασκόπηση της εξελικτικής πορείας της αιολικής ενέργειας και των ανεμόμυλων.

ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ	ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ
1200 μ.Χ.	Ανεμόμυλοι οριζόντιου άξονα χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη για το άλεσμα σιταριού.
1500	Στα πεδινά της Ολλανδίας εμφανίζονται οι πρώτοι ανεμόμυλοι.
1600	Άποικοι κατασκευάζουν ανεμόμυλους ευρωπαϊκού τύπου στα ανατολικά παράλια της Αμερικής.
1700	Οι ατμομηχανές αρχίζουν να αντικαθιστούν τους ανεμόμυλους.
1860	Οι Αμερικανοί κατασκευάζουν πολυπτέρυγους ανεμόμυλους για να χρησιμοποιηθούν για κίνηση αντλιών.
1870	Το Σικάγο γίνεται κέντρο βιομηχανικής παραγωγής ανεμόμυλων.
1900	Οι Δανοί παράγουν ηλεκτρισμό από τον άνεμο.

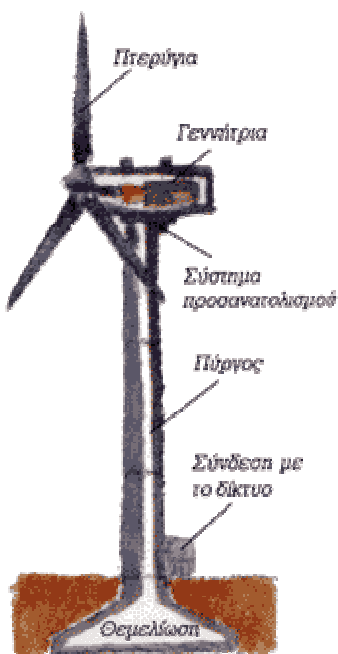
1920	Ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής χρησιμοποιούνται στην Αμερική για την ηλεκτροδότηση στα αγροτικά σπίτια.
1930	Οι ανεμόμυλοι στις αγροτικές περιοχές αντικαθίστανται από την επέκταση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.
1940	Στο Vermont (Η.Π.Α.) κατασκευάζεται για πρώτη φορά πειραματικός ανεμοκινητήρας αρκετά μεγάλης ισχύος με δυο πτερύγια.
1950	Η ατομική ενέργεια μειώνει το ενδιαφέρον για χρησιμοποίηση της αιολικής ενέργειας.
1960	Η μόλυνση του περιβάλλοντος από τις υπάρχουσες πηγές ενέργειας (άνθρακας - πετρέλαιο) αρχίζει να γίνεται έντονη.
1970	Η έλλειψη καυσίμων αναζωογονεί το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου.
1976	Τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες διαθέτουν για πρώτη φορά μεγάλο ύψος χρημάτων για προγράμματα γύρω από την τεχνικοοικονομική διερεύνηση των ανεμοκινητήρων.
1983	Κατασκευή ανεμοκινητήρων ισχύος 3 MW.
1990	Κατασκευή ανεμοκινητήρων ισχύος 7 MW.

Κατά τη διάρκεια της μεταπολεμικής περιόδου, η ζήτηση ενεργειακών αποθεμάτων ολοένα και αυξάνονταν. Αυτό οδήγησε ορισμένες τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες να καταστρώσουν προγράμματα για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Τα προβλήματα όμως που είχαν να αντιμετωπίσουν ήταν πολλά. Πρωταρχική επιδίωξη ήταν να συμπεισθεί το κόστος της αρχικής εγκατάστασης για την κατασκευή μονάδων μεγαλύτερης ισχύος. Αυτό επιτεύχθηκε με την επίλυση δύσκολων τεχνικών προβλημάτων και την αναζήτηση ανθεκτικότερων και φθηνότερων υλικών. Η προσπάθεια αυτή είχε να ανταγωνισθεί και την επέκταση των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα τελικά να χαθεί το ενδιαφέρον ακόμα και για μικρές εφαρμογές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας. Τελικά το ενδιαφέρον περιορίστηκε στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας σε απομονωμένες γεωγραφικά περιοχές.

Όλα τα παραπάνω και σε συνδυασμό με την πρόσφατη ενεργειακή κρίση, με τις αλλεπάλληλες αυξήσεις της τιμής του πετρελαίου και την τεχνολογική πρόοδο που σημειώθηκε, έδρασαν ευνοϊκά και επαναπροσδιόρισαν το ενδιαφέρον, ώστε σήμερα να δικαιολογείται η προσπάθεια κατασκευής μεγαλύτερων μονάδων αιολικών πάρκων, για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας αλλά και της τυποποίησης στην κατασκευή των μικρότερων, για ορισμένες χρήσεις.

2.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ - ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Οι μηχανές με τις οποίες εκμεταλλευόμαστε τον άνεμο (αιολική ενέργεια) καλούνται ανεμοκινητήρες. Όταν αυτές χρησιμεύουν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Οι ανεμογεννήτριες αποτελούν ανθρώπινες επινοήσεις που έχουν ως σκοπό την αξιοποίηση του μεγαλύτερου δυνατού ποσοστού της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Τελικός στόχος είναι η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ωφέλιμη ενέργεια, δηλαδή σε οποιαδήποτε εύχρηστη μορφή ενέργειας, άμεσα απολήψιμης από τον άνθρωπο.



Εικόνα 12. Δομή Α/Γ.

Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από το μέγεθος της και την ταχύτητα του ανέμου. Το μέγεθος είναι συνάρτηση των αναγκών που καλείται να εξυπηρετήσει και ποικίλει από μερικές εκατοντάδες μέχρι μερικά εκατομμύρια Watt.

Το πρώτο πράγμα που προσέχουμε σε μια ανεμογεννήτρια είναι ο **δρομέας**, που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα τα οποία περιστρέφονται όταν φυσάει. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα.

Η κίνηση αυτή των πτερυγίων μεταδίδεται σε ένα **σύστημα μετάδοσης της κίνησης**, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανά του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας.

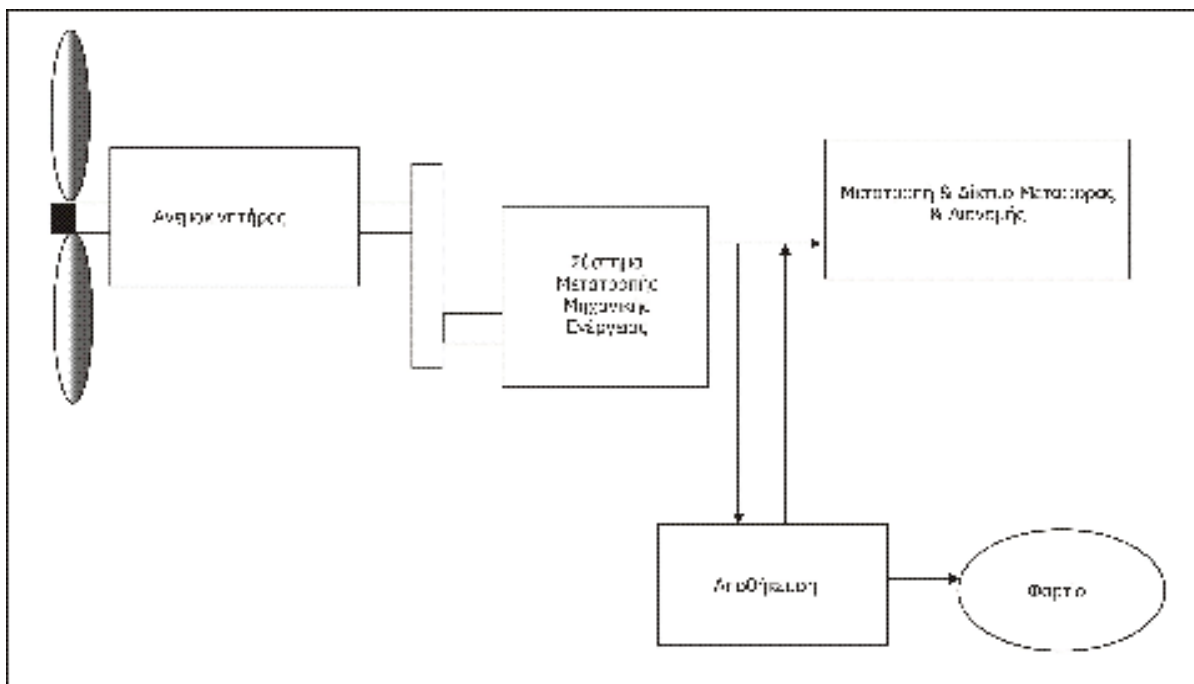
Πιο συγκεκριμένα, η **ηλεκτρική γεννήτρια**, σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 πόλους συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Υπάρχει και το **σύστημα πέδης** το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.

Επίσης, το **σύστημα προσανατολισμού**, αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου. Όλο αυτό το παραπάνω σύστημα είναι τοποθετημένο πάνω σε ένα ψηλό **πύργο** στη βάση του οποίου εδράζεται ο θάλαμος. Ο πύργος της Α/Γ είναι κυλινδρικός με τρεις διαμετρικές διαβαθμίσεις. Στο κυλινδρικό τμήμα της βάσης του πύργου, είναι δυνατόν να μορφώνονται όροφοι με πατάκια χρήσιμοι για αποθήκευση εργαλείων ή ανταλλακτικών ή ακόμη για την τοποθέτηση ηλεκτρικών πινάκων βοηθητικών κυκλωμάτων. Ο πύργος φέρει δύο σιδηρές θύρες, μία παρά το έδαφος και μία στο άνω μέρος, κοντά στο θάλαμο. Η άνω θύρα οδηγεί σε περιφερειακή εξέδρα για την επίσκεψη του κύριου μηχανισμού της Α/Γ. Εσωτερικά ο πύργος φέρει κλίμακα για την άνοδο μέχρι του δαπέδου της άνω θύρας. Ο θάλαμος, ως ενιαίο συγκρότημα με τον κύριο μηχανισμό της Α/Γ, είναι περιστρεπτός κατά κατακόρυφο άξονα ώστε να μπορεί να παρακολουθεί την κατεύθυνση

του εκάστοτε ανέμου, μπορεί δε να ανοίγει για συντήρηση, επιθεώρηση και επισκευή του κύριου μηχανισμού.

Τέλος, μία Α/Γ φέρει και **ηλεκτρονικό πίνακα** και **πίνακα ελέγχου**, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.

Οι τυπικές διαστάσεις μιας ανεμογεννήτριας 500 KW είναι: διάμετρος δρομέα 40 m και ύψος 40-50 m, ενώ οι διαστάσεις εκείνης των 3 MW είναι 80 και 80–100 m αντίστοιχα.

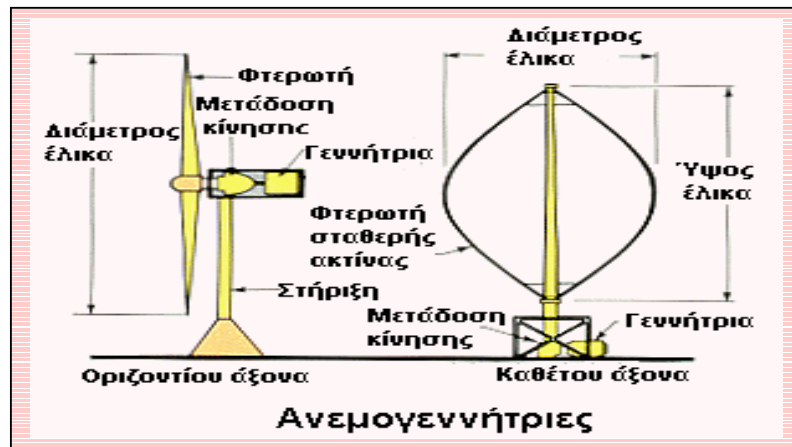


Εικόνα 13. Σχηματική παράσταση εγκατάστασης εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας.

2.4 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Ως εκ τούτου οι πλέον διαδεδομένοι τύποι ανεμοκινητήρων είναι οι ανεμογεννήτριες **οριζοντίου** και οι ανεμογεννήτριες **κατακόρυφου άξονα**.

- Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν συνήθως τον άξονά τους παράλληλο προς την κατεύθυνση του ανέμου (head on), ενώ σε μερικές περιπτώσεις έχουμε ανεμογεννήτριες των οποίων ο άξονας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης και κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου (cross - wind).
- Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα της αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου, δεδομένου ότι ο άξονάς τους είναι κάθετος σε αυτή καθώς και στην επιφάνεια της γης.



Εικόνα 14. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα.

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα με την σειρά τους διακρίνονται ανάλογα με τον αριθμό των περυγίων πάνω στον άξονα περιστροφής τους, σε: μονοπτέρυγες, διπτέρυγες, τριπτέρυγες και πολυπτέρυγες αμερικάνικου τύπου. Οι πιο ευρέως διαδεδομένες είναι οι δίπτερες και οι τρίπτερες. Αντίστοιχα, οι κατακόρυφες ανάλογα με την μορφή των περιστρεφόμενων περυγίων στις: DARRIEUS, H - DARRIEUS και στις SAVONIUS.

Σε μία A/Γ τύπου Savonius η περωτή αποτελείται από δύο ημικυλίνδρους. Σημαντικό ρόλο παίζει η απόσταση μεταξύ των ημικυλίνδρων (e) σε σχέση με την διάμετρό τους (d). Ο αρχικός τύπος είχε κατασκευαστεί έτσι ώστε ο λόγος e/d να ισούται με $1/3$. Ο λόγος ακροπερυγίου ($\lambda = \omega R/u$) για τον οποίο έχουμε την μεγαλύτερη απόδοση πρέπει να έχει τιμές:

$$0.9 < \lambda < 1$$

Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς είναι:

$$P = 0.16 \cdot S \cdot V^3$$

όπου, $S = h(2d - e)$

Μία Α/Γ τύπου Darrieus αποτελείται από άκαμπτα πτερύγια στερεωμένα και στα δύο άκρα τους. Η επιφάνειά τους μπορεί να είναι κυλινδρική, κωνική ή παραβολική. Ο συντελεστής ισχύος είναι:

$$C_p = \lambda \cdot C_m$$

όπου C_m ο συντελεστής ροπής του συστήματος.

Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς (2-3 πτερύγια) είναι:

$$P = 0.25 \cdot S \cdot V^3$$

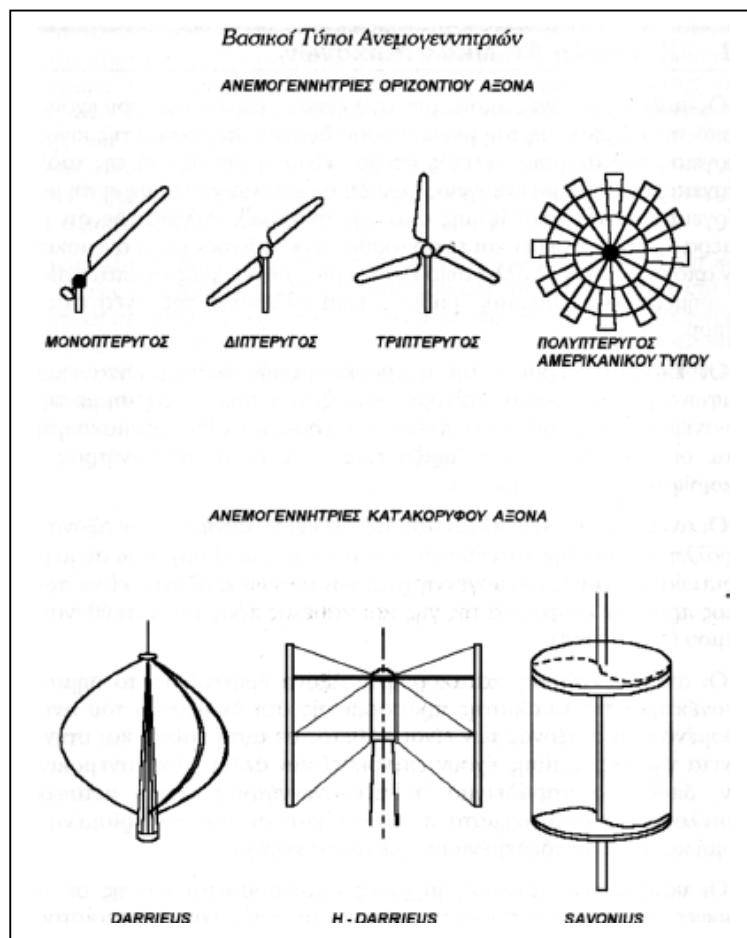
για $\lambda = (5 \cdot R / (b \cdot l))^{1/2}$

όπου, l : μήκος χορδής πτερυγίων,

R : η μέγιστη απόσταση του πτερυγίου από το κέντρο και

b : συνάρτηση της γεωμετρίας του συστήματος.

Οι Α/Γ αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται από απλότητα και οικονομία στην κατασκευή και αποτελούνται από ελαφρύ σύστημα που δεν χρειάζεται μεγάλο πύργο στήριξης. Δεν απαιτείται τοποθέτηση σε μεγάλο ύψος από το έδαφος, ούτε σύστημα προσανατολισμού. Επιπλέον, δε χρειάζεται ρύθμιση για περιορισμό της ισχύος σε υψηλές ταχύτητες λόγω της ευνοϊκής καμπύλης C_p - λ . Τέλος, έχουν χαμηλή απόδοση σε σχέση με μηχανές οριζόντιου άξονα.



Εικόνα 15. Βασικοί τύποι ανεμογεννητριών.

Οι βασικές διαφορές μεταξύ των δυο τύπων Α/Γ, αποτελούν και τα παρακάτω πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα των κατακόρυφων τύπου ανεμογεννητριών.

Τα κύρια πλεονεκτήματα τους είναι τα εξής:

- Απλότητα και οικονομία στην κατασκευή.
- Σύστημα ελαφρό που δεν χρειάζεται μεγάλο πύργο στήριξης.
- Δεν απαιτείται τοποθέτηση σε μεγάλο ύψος από το έδαφος.
- Δεν απαιτείται σύστημα προσανατολισμού.
- Δεν χρειάζεται ρύθμιση για τον περιορισμό της ισχύος σε υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Ενώ τα μειονεκτήματα τους είναι:

- Η χαμηλή απόδοση σε σχέση με ορισμένες μηχανές οριζόντιου άξονα περιστροφής.
- Η έλλειψη ροπής εκκίνησης (χρειάζονται δηλαδή εξωτερική διέγερση για να ξεκινήσουν).

Συμπερασματικά οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα εμφανίζονται κατασκευαστικά απλούστερες και οικονομικότερες, από εκείνες του οριζόντιου άξονα που θα έπρεπε να τις καθιστούσαν πρωταρχικός προτιμώμενες. Παρόλα αυτά όμως, δεν καθίστανται ευρέως διαδεδομένες για την εγκατάστασή τους σε αιολικά πάρκα, γιατί δεν έχουν μεγάλη απόδοση και γιατί χρειάζονται εξωτερική διέγερση για να ξεκινήσουν και μεγάλη ταχύτητα ανέμου.

Έτσι λοιπόν ο τύπος ανεμογεννήτριας που έχει επικρατήσει περισσότερο στην αγορά είναι εκείνου του οριζοντίου άξονα, και συγκεκριμένα οι τρίπτερες και μετά ακολουθούν οι δίπτερες.

Οι τρίπτερες ανεμογεννήτριες με ρότορα μήκους μικρότερου των 10 m έχουν τη δυνατότητα εκμετάλλευσης ασθενούς αιολικού ανέμου και κόστος κατασκευής και συντήρησης μικρό, καθώς τα προβλήματα αντοχής και δυναμικής καταπόνησης μηχανικών μερών είναι περιορισμένα στις μηχανές αυτής της κατηγορίας. Στις μηχανές μεγάλου μεγέθους επικρατούν οι δίπτερες, με κόστος κατασκευής και συντήρησης σαφώς μικρότερο, από αυτό των τριπτερύγων αντιστοίχου μεγέθους.

Μια συστοιχία πολλών εγκατεστημένων ανεμογεννητριών, που ονομάζεται **αιολικό πάρκο**, μπορεί να λειτουργήσει σαν μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

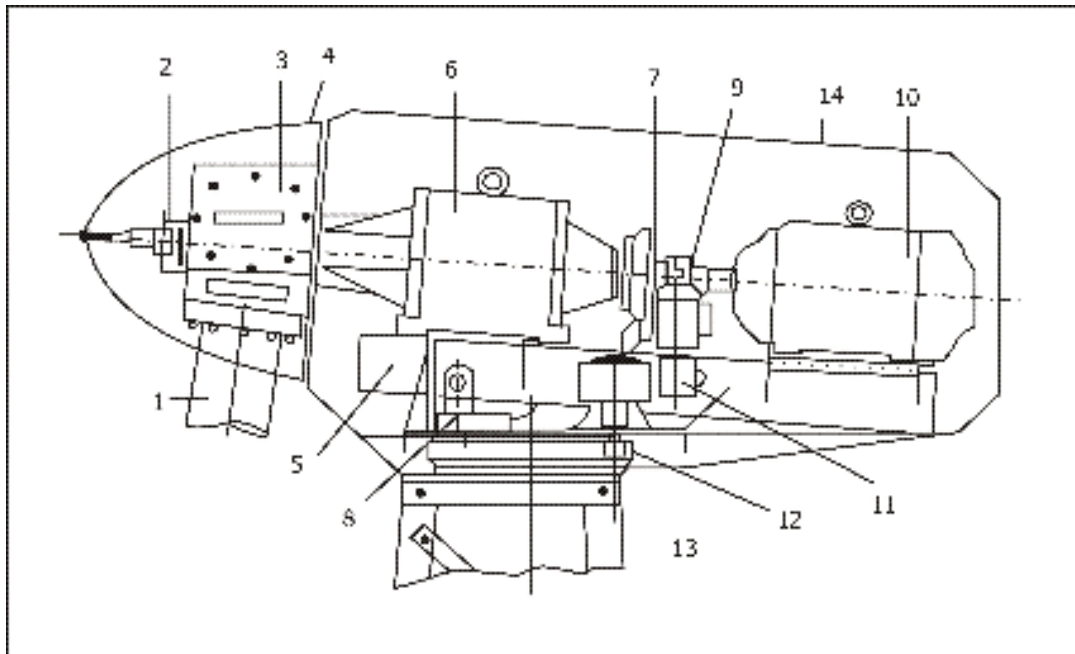


Εικόνα 16. Συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών – Αιολικό πάρκο.

2.5 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η αναλυτική περιγραφή που ακολουθεί αντιστοιχεί σε μια Α/Γ του τύπου «BW 10» η οποία είναι σχεδιασμένη για να παρέχει ρεύμα 220/150 Hz κυρίως για την εξυπηρέτηση εγκαταστάσεων που η σύνδεσή τους με το δίκτυο της ΔΕΗ δεν είναι δυνατόν να γίνει. Στην Εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η γενική μορφή της ατράκτου της Α/Γ, η οποία αποτελείται από τα εξής μέρη:

1. Πτερύγιο
2. Φυγοκεντρικός μηχανισμός αεροδυναμικού φρένου
3. Πλήμνη
4. Κάλυμμα πλήμνης
5. Πλαίσιο ατράκτου
6. Κιβώτιο πολλαπλασιασμού
7. Δισκόφρενο
8. Υδραυλική μονάδα ελέγχου του φρένου
9. Ελαστικός σύνδεσμος
10. Γεννήτρια
11. Μονάδα προσανεμισμού ατράκτου
12. Τράπεζα ολίσθησης
13. Πυλώνας
14. Κάλυμμα ατράκτου



Εικόνα 17. Σχηματική παράσταση ατράκτου ανεμογεννήτριας.

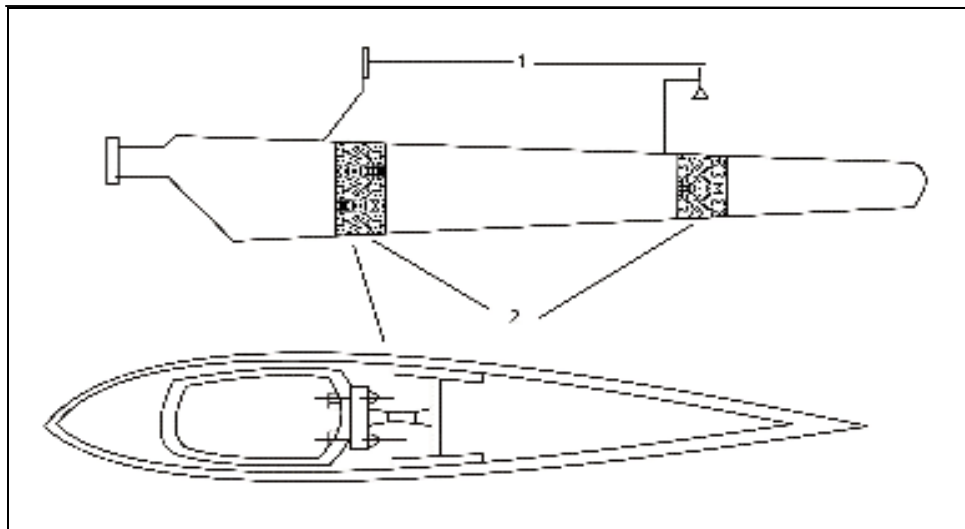
Παρακάτω περιγράφονται μερικά ειδικά θέματα που αφορούν στα υποσυστήματα, τη λειτουργία και την τοποθέτηση μίας Α/Γ.

2.5.1 Τα χαρακτηριστικά και συμπεριφορά του δρομέα

Τα βασικά επιθυμητά χαρακτηριστικά του δρομέα είναι ο μεγάλος συντελεστής ισχύος ($\cos\varphi \rightarrow 1$) και η βέλτιστη λειτουργία του σε μεγάλο σχετικά λόγο ταχυτήτων ακροπερυγίου λ , όπου:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V}$$

Οι αεροτομές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των περυγίων παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή άνωσης σε μικρές σχετικά γωνίες πρόσπτωσης, ενώ συγχρόνως διατηρούν χαμηλό συντελεστή αντίστασης σε ευρεία περιοχή γωνιών πρόσπτωσης με τυπικό εκπρόσωπο τέτοιων αεροτομών να είναι η NACA 4412. Οι δρομείς αυτοί είναι πιο ταχύστροφοι από τους πολυπτερυγους δρομείς και ελαφρώς οικονομικότεροι παρουσιάζοντας επίσης ευκολία στη συναρμολόγηση του ανεμοκινητήρα. Γενικά ο τρίπτερος δρομέας είναι κατά 5% περισσότερο αποδοτικός από τον δίπτερο και τα φορτία που ενεργούν σε κάθε περύγιο είναι μικρότερα με υψηλότερο όμως κόστος κατασκευής.



Εικόνα 18. Τα περύγια.

Το σημαντικότερο ως προς τη συμπεριφορά του δρομέα είναι η εκκίνηση και η ροπή εκκίνησης. Για την καλύτερη πρόβλεψη και κατανόηση αυτών των χαρακτηριστικών των δρομέων χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα του συντελεστή ροπής C_m . Επίσης χρήσιμη προς αυτή την κατεύθυνση είναι και η μελέτη της συμπεριφοράς του δρομέα σε χρονικά μεταβαλλόμενες καταστάσεις, όπως η επιτάχυνση, η επιβράδυνση, οι ριπές ανέμου, το τυρβώδες πεδίο, αλλά και στο πεδίο που η ταχύτητα αλλάζει με το ύψος από το έδαφος.

2.5.2 Η ρύθμιση του βήματος των πτερυγίων

Η ρύθμιση του βήματος των πτερυγίων ή μέρους τους (Flaps), γίνεται ώστε να επιτευχθούν οι παρακάτω λειτουργίες:

- Η εκκίνηση του δρομέα στην κατάλληλη μικρότερη ταχύτητα ανέμου.
- Η εκκίνηση του δρομέα με βήμα που θα μας δώσει τη μέγιστη ροπή.
- Η διατήρηση της σταθερότητας των στροφών.
- Η μέγιστη απόδοση σε διάφορες ταχύτητες ανέμου με μεταβολή του βήματος.
- Ο περιορισμός της ισχύος σε υψηλές ταχύτητες ανέμου.
- Η παύση της λειτουργίας σε περιπτώσεις με θυελλώδεις ανέμους, ή η ζήτηση του φορτίου να είναι μηδενική.

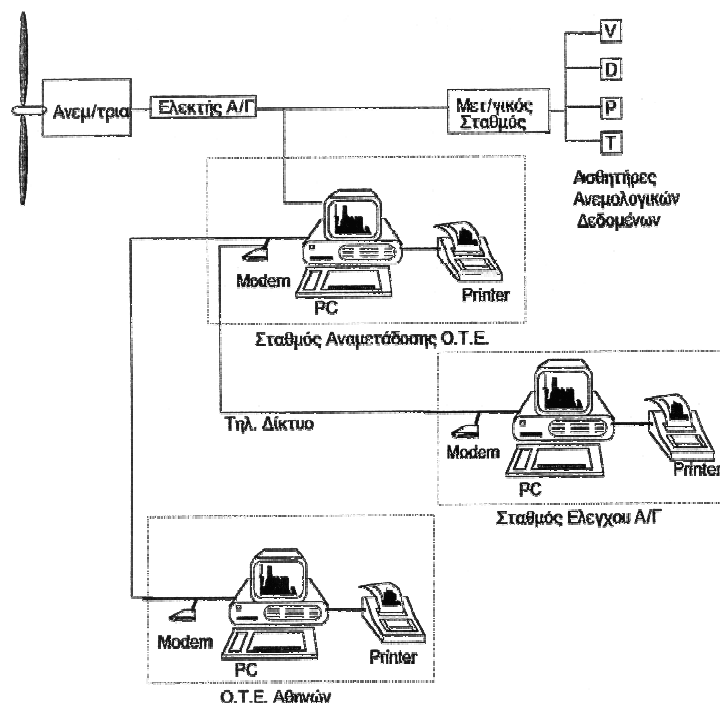
Για να επιτευχθούν αυτές οι ρυθμίσεις χρησιμοποιούνται τα συστήματα μεταβολής του βήματος του δρομέα έτσι ώστε να έχουμε την ασφαλή λειτουργία της Α/Γ, αλλά και τη γρήγορη προσαρμογή της στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας.

Τα συστήματα μεταβολής του βήματος είναι:

1. Υδραυλικά - Μηχανικά συστήματα.

Είναι από τα παλαιότερα ολοκληρωμένα συστήματα αυτοματισμού (δεκαετίας '60-'70), που χρησιμοποιήθηκαν στις περισσότερες κατασκευές της εποχής αρκετά αξιόπιστα, αλλά με αρκετά προβλήματα στις ακραίες καταστάσεις εναλλασσόμενων φορτίων, και χωρίς εξασφάλιση ακρίβειας προσαρμοστικότητας.

2. Ηλεκτρονικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου.



Εικόνα 19. Διάταξη συλλογής επεξεργασίας και έλεγχος ανεμολογικών δεδομένων ανεμογεννήτριας.

Πρόκειται για την πιο εξελιγμένη μορφή ελέγχου και τείνουν να αποτελέσουν τη μόνη λύση στις μεσαίες και μεγάλες Α/Γ. Βέβαια και εδώ υπάρχουν αρκετές μορφές ελέγχου όπως αυτή με ψηφιακά κυκλώματα, προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (P.L.C), και τέλος τον έλεγχο με συστήματα υπολογιστών οπότε και είναι δυνατή η ρύθμιση από ένα λογισμικό, αλλά και η παρακολούθηση από κεντρικό σταθμό μέσω μεταφοράς δεδομένων μέσω των τηλεφωνικών γραμμών.

3. Σύστημα με ελαστική έδραση των πτερυγίων και συστήματα ελέγχου των πτερυγίων.

Σε αυτόν τον τύπο συστήματος μεταβολής του βήματος υπάρχουν δύο υποκατηγορίες οι οποίες και είναι οι εξής: Το σύστημα με ελαστική έδραση των πτερυγίων και το σύστημα ελέγχου πτερυγίων.

Στον πρώτο τύπο με τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου αλλάζει η ροπή γύρω από τις εδράσεις των πτερυγίων. Εκμεταλλευόμενοι αυτό το φαινόμενο βάζοντας στην έδραση των πτερυγίων με την πλήμνη μηχανισμό με ελαστικούς συνδέσμους ή ελατήρια είναι δυνατό μετά από κατάλληλο σχεδιασμό να επιτύχουμε το επιθυμητό βήμα σε κάθε ταχύτητα ανέμου.

Στο δεύτερο τύπο επιτρέπεται η μεταβολή του βήματος του πτερυγίου ή του ακροπτερυγίου. Επιτυγχάνεται στροφή του δρομέα ώστε το επίπεδό του να γυρίσει παράλληλα στην διεύθυνση του ανέμου (yaw control), αύξηση της αεροδυναμικής αντίστασης με την ενεργοποίηση αεροπέδης (spoiler) και μηχανική πέδηση του άξονα. Τα αντίβαρα μεταβάλλοντας την απόσταση από τον άξονα ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής έτσι είναι δυνατό ενός μηχανισμού να μεταβάλουν το βήμα και να ρυθμίζουν τις στροφές και την ισχύ.

2.5.3 Τα Υλικά και τα Προβλήματα Αντοχής των Πτερυγίων

Τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων των δρομέων είναι ποικίλα, σύνθετα αλλά και ιδιαίτερα για το κάθε μέγεθος. Έτσι στους μικρούς ανεμοκινητήρες συναντάμε σαν κύριο υλικό το υαλόνημα και το ξύλο με εσωτερική γέμιση την πολυουρεθάνη που είναι ασταθή στα εναλλασσόμενα φορτία και ανθεκτικά στη διάβρωση. Στους μεγαλύτερους συναντάμε υαλονήματα με ακτινική και παράλληλη διάταξη σε πολλαπλά στρώματα. Στους μεγάλους δε χρησιμοποιείται και πάλι τα ίδια υλικά αλλά και ανθρακονήματα κυρίως για την αυξημένη αντοχή στα μεγάλα εναλλασσόμενα φορτία.

Το σημαντικότερο πρόβλημα που σχετίζεται με τις Α/Γ είναι η εμφάνιση ταλαντώσεων από την επίδραση των εναλλασσόμενων φορτίσεων του ανέμου, με δυσάρεστα και απρόβλεπτα προβλήματα αντοχής των υλικών. Ως προς την αντιμετώπισή τους ακολουθείται η παρακάτω μελέτη:

- Η μελέτη των τάσεων και ταλαντώσεων στα πτερύγια του δρομέα (πειραματικά και θεωρητικά).
- Η εύρεση των κατάλληλων υλικών (συνδυασμός χαμηλού κόστους με αντοχή στις ταλαντώσεις και τάσεις) και ο τρόπος κατασκευής τους.

2.5.4 Τα Συστήματα Προσανατολισμού

Στις μικρές κυρίως Α/Γ για λόγους κόστους χρησιμοποιείται καθοδηγητικό πτερύγιο τοποθετημένο πίσω από τον δρομέα παράλληλα με την πλήμνη έτσι ώστε η επιφάνεια της ουράς, όσο και η θέση της ως προς τον άξονα του πύργου επιλέγονται έτσι ώστε σε απόκλιση του ανέμου κατά 10° να εξασκείται ριπή επαναπροσανατολισμού του δρομέα στον άνεμο ικανή να υπερνικήσει την αντίρροπη λόγω γυροσκοπικού φαινομένου. Στις μεγάλες Α/Γ σήμερα χρησιμοποιείται σύστημα αυτομάτου ελέγχου της διεύθυνσης του ανέμου με τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και ένα σερβομηχανισμό που προσανατολίζει ανάλογα τον δρομέα.

Κατά την τοποθέτηση του δρομέα κατάντι του ανέμου επιτυγχάνεται ευκολότερο σύστημα προσανατολισμού, αλλά ο θόρυβος είναι σε υψηλότερα επίπεδα λόγω της σκίασης του πύργου πάνω στον δρομέα. Επίσης, παρατηρούνται και αυξημένες καταπονήσεις στα πτερύγια λόγω της περιοδικότητας των φορτίσεών τους από την επισκίαση του πύργου καθώς περιστρέφεται ο δρομέας.

2.5.5 Η Κατασκευή του Πύργου και η Θεμελίωσή του

Ο πύργος στήριξης είναι συνήθως από μεταλλικό δικτύωμα ή μία κολόνα από μέταλλο ή μπετόν σε κυκλική ή πολυγωνική μορφή σε κωνικό σχήμα. Πρέπει να έχει το κατάλληλο αεροδυναμικό σχήμα ώστε να παρεμβάλει ελάχιστα στη ροή του ανέμου και να προδίδει την απαραίτητη σταθερότητα και αντοχή στην κατασκευή. Ένα επίσης σημαντικό στοιχείο είναι η ευκολία μεταφοράς και ανέγερσης του στον τόπο εγκατάστασης.

Ο σωληνωτός είναι αισθητικά καλύτερος και προστατεύει όλα τα όργανα της Α/Γ στο εσωτερικό του, αλλά έχει αρκετά μεγαλύτερο κατασκευαστικό κόστος. Στην περίπτωση του μεταλλικού πύργου επιβάλλεται η προστασία του έναντι της διάβρωσης με εν θερμώ επιψευδαργύρωση ή με ειδική βαφή.

Το ύψος του δρομέα πάνω από το έδαφος εξαρτάται από τη μορφή του εδάφους (μορφή οριακού στρώματος), αλλά και τα τυχόν εμπόδια στη ροή του αέρα (κτίρια, δέντρα κ.ά.). Καθοριστικό ρόλο στην εκλογή του ύψους του δρομέα διαδραματίζει φυσικά η αύξηση της ταχύτητας του εκμεταλλεύσιμου ανέμου. Όμως εξίσου καθοριστικό ανασταλτικό ρόλο παίζει η αύξηση τους κόστους της κατασκευής της Α/Γ.

2.5.6 Πλήμνη και Κύριος Άξονας της Α/Γ

Η πλήμνη μεταφέρει την μηχανική ισχύ από τα πτερύγια στον κύριο άξονα της Α/Γ. Κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο ή χάλυβα αποφεύγοντας συγκολλήσεις οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν σημεία αδυναμίας της κατασκευής. Ο κύριος άξονας μεταφέρει τη μηχανική ισχύ του δρομέα στο κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών. Ο άξονας είναι συμπαγής ή κοίλος και κατασκευάζεται από χάλυβα υψηλής αντοχής με κύριες προσμίξεις χρώμιο, νικέλιο, και μολυβδαίνιο. Στο ένα άκρο του καταλήγει σε σχήμα φλάντζας μέσω της οποίας συνδέεται με την πλήμνη, ενώ στο άλλο εδράζεται το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών.

2.5.7 Τα Συστήματα Πέδησης της Πλήμνης

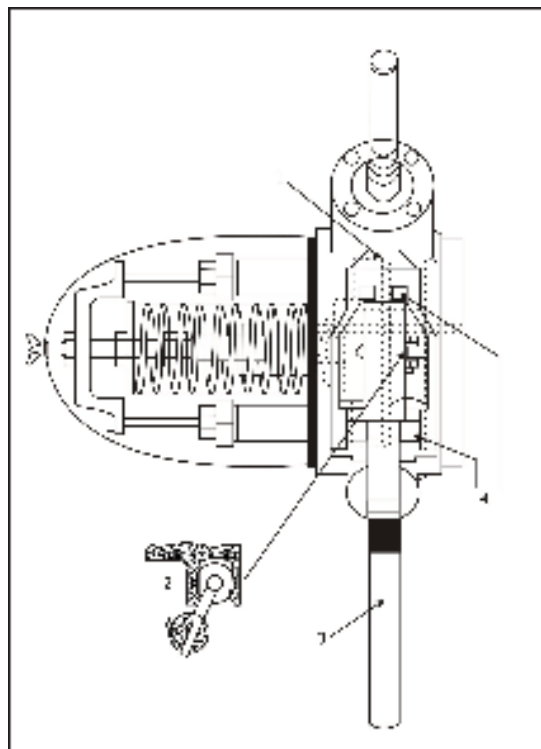
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ακινητοποίησης του δρομέα:

- Μεταβολή βήματος πτερυγίου, ακροπτερυγίου ή αεροπέδη.
- Στροφή του δρομέα παράλληλα στον άνεμο.
- Πέδηση του άξονα.

Σε περίπτωση αστοχίας των μηχανισμών ρύθμισης του βήματος του πτερυγίου απαιτείται ύπαρξη συστήματος πέδησης άμεσα στον άξονα του δρομέα (συνήθως τύπου δισκόφρενο). Συνήθως γίνεται τοποθέτηση του φρένου στον υψηλόστροφο άξονα της μηχανής γιατί η ροπή πέδησης είναι μικρή. Συχνά η πέδη είναι ηλεκτρομαγνητικού τύπου και ενεργοποιείται αυτόματα με την διακοπή του ρεύματος (η πέδη παραμένει ανοικτή με ηλεκτρομαγνήτες).

Είναι φανερό ότι ο προτιμότερος τρόπος ακινητοποίησης της μηχανής είναι η σταδιακή μείωση των αεροδυναμικών φορτίων της με παράλληλη αύξηση της αντίρροπης έτσι ώστε δεν αναπτύσσονται κρουστικά φορτία στη φάση της πέδησης.

Στην περίπτωση αστοχίας των μηχανισμών ρύθμισης του βήματος των πτερυγίων απαιτείται η πέδηση που γίνεται με δισκόφρενο αυτόματα στον υψηλόστροφο άξονα της μηχανής (αυτόν μετά από την έξοδο του κιβωτίου ταχυτήτων) ώστε η απαιτούμενη ροπή πέδησης να είναι αρκετά μικρή.



Εικόνα 20. Φυγοκεντρικό σύστημα μεταβολής του βήματος.

2.5.8 Το Κιβώτιο Πολλαπλασιασμού Στροφών

Ο πολλαπλασιαστής στροφών (gear box) έχει στόχο την προσαρμογή των στροφών του δρομέα στις στροφές της γεννήτριας. Άμεση σύνδεση του κύριου άξονα με την γεννήτρια (50 Hz AC) με 2, 4 ή 6 πόλους θα απαιτούσε μία ταχύτητα περιστροφής 1000-3000 RPM, που αντιστοιχεί 2 φορές περίπου στην ταχύτητα του ήχου. Η έλλειψη του πολλαπλασιαστή στροφών απαιτεί χρήση γεννήτριας με πολλούς πόλους και χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (περίπου 200 πόλους για ταχύτητα 30 RPM) συμβατές με τις συνεχώς μεταβαλλόμενες μηχανικές στροφές των πτερυγίων.

Στις Α/Γ μεγάλης ισχύος (τάξεως του MW) προτιμάται η χρήση πλανητικού κιβωτίου λόγω του μικρότερους βάρους, μικρότερου όγκου και του μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης.

Η σχεδίαση και κατασκευή του κιβωτίου πρέπει να είναι κατάλληλη για την αντιμετώπιση των απότομων μεταβολών της ροπής του δρομέα που προέρχονται από τις ριπές του ανέμου. Για λόγους ασφαλείας η ονομαστική ισχύς του κιβωτίου λαμβάνεται 1.5 έως 2 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας της Α/Γ. Για την εξομάλυνση της μηχανικής ροπής και κατ' επέκταση της παραγόμενης ισχύος συνήθως η έδραση του κιβωτίου επιτρέπει την ταλάντωση του. Το κιβώτιο εδράζεται στον κύριο άξονα της Α/Γ αλλά το κέλυφος του μπορεί να στραφεί γύρω από αυτόν κατά μια μικρή γωνία. Σε άλλες περιπτώσεις η σύνδεση μεταξύ άξονα και κιβωτίου γίνεται με πτυσσόμενο δίσκο (Shrink Disk).

Η αδράνεια του ρότορα που θα πρέπει να χειριστεί η γεννήτρια σε άμεση σύνδεση απαιτεί στιβαρή και άρα ακριβή γεννήτρια.

- Τελική περιστροφή περίπου 1500 RPM.
- Κριτήρια επιλογής του είναι : Η διάρκεια ζωής, βαθμός απόδοσης, θόρυβος κατά τη λειτουργία του.

Λόγω της συνεχούς μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου ο πολλαπλασιαστής στροφών λειτουργεί συνεχώς με κρουστικά φορτία που οδηγούν σε πολύ γρήγορη φθορά του και μείωση της διάρκειας ζωής του. Το κιβώτιο ταχυτήτων επιλέγεται να έχει ονομαστική ισχύ πολύ μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της Α/Γ και ονομαστική ροπή κατά 200% μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή της αιολικής μηχανής.

Υπάρχουν γενικά δύο είδη κιβωτίων:

Κιβώτιο με παράλληλες οδοντώσεις γραναζιών (κιβώτιο παράλληλων αξόνων). Απλούστερο κατασκευαστικά και με μικρό κόστος συντήρησης.

Κιβώτιο όπου οι οδοντωτοί τροχοί έχουν ελικοειδή οδόντωση (κιβώτιο με πλανητικό σύστημα τροχών). Υψηλό κόστος αγοράς και συντήρησης, αλλά με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και χαμηλότερες στάθμες θορύβου.

Για την αύξηση του χρόνου ζωής και τη μείωση των κρουστικών φορτίων λειτουργίας το κιβώτιο του πολλαπλασιαστή στροφών μπορεί να στηριχθεί πάνω σε ελατήρια απόσβεσης κραδασμών. Σε μία σύγχρονη ανεμογεννήτρια 600 kW ο λόγος του πολλαπλασιαστή στροφών είναι 1:50.

2.5.9 Το Ηλεκτρολογικό Σύστημα Α/Γ

Το ηλεκτρολογικό σύστημα της Α/Γ περιλαμβάνει:

1. Ηλεκτρική γεννήτρια
2. Μικρούς κινητήρες (π.χ. τον κινητήρα προσανατολισμού)
3. Αυτόματους διακόπτες και ασφάλειες

1. Η Γεννήτρια συνδέεται μέσω εύκαμπτων καλωδίων με τη βάση του πύργου της Α/Γ όπου βρίσκεται ο πίνακας διακοπών και ασφαλειών. Από τον πίνακα αυτό στη συνέχεια αναχωρούν καλώδια προς την κατανάλωση. Στην περίπτωση σύνδεσης της Α/Γ σε υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο, μεταξύ της Α/Γ και του δικτύου παρεμβάλλεται μετασχηματιστής ανύψωσης της τάσης.

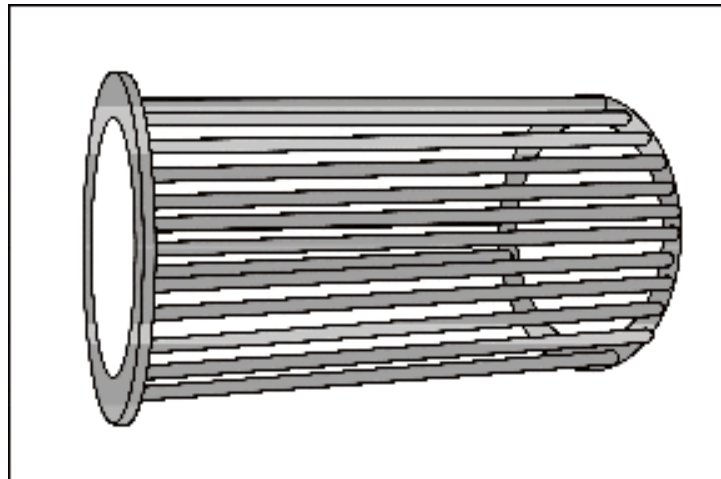
Οι συνηθέστεροι τύποι γεννητριών είναι:

- Ασύγχρονη Γεννήτρια

Αυτή παρέχει την περισσότερο οικονομική λύση, έχει απλή κατασκευή, εύκολη σύνδεση με το δίκτυο και απουσία ταλαντώσεων συχνότητας. Διεγείρεται παίρνοντας ρεύμα μαγνητίσης από το δίκτυο στο οποίο παραλληλίζεται.

Το γεγονός αυτό δεν αποτελεί σοβαρό μειονέκτημα όταν η εγκαταστημένη ισχύς είναι μικρότερη από την ισχύ του δικτύου. Εμφανίζονται όμως προβλήματα όταν η εγκατεστημένη ισχύς είναι συγκρίσιμη με την ισχύ του δικτύου.

Όταν η Α/Γ είναι συνδεδεμένη σε ηλεκτρικό δίκτυο τότε η άεργος ισχύς προσφέρεται από το δίκτυο. Συνήθως εγκαθίστανται επιπλέον στον πίνακα της Α/Γ πυκνωτές για την κάλυψη μέρους της άεργου ισχύος συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση του λεγόμενου συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης.



Εικόνα 21. Ασύγχρονη Γεννήτρια.

Αν η Α/Γ λειτουργεί αυτόνομα (μη συνδεδεμένη σε ηλεκτρικό δίκτυο) αλλά τροφοδοτεί μια χρονικά μεταβαλλόμενη κατανάλωση, η λειτουργία της γεννήτριας είναι προβληματική λόγω της δυσκολίας της ρύθμισης της άεργου ισχύος μέσω συστήματος

πυκνωτών. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται σύγχρονες ή συνεχούς ρεύματος γεννήτριες.

Τα πλεονεκτήματα της ασύγχρονης γεννήτριας είναι η απλότητα της κατασκευής της, το χαμηλό κόστος και η ευκολία σύνδεσης με το δίκτυο. Η ασύγχρονη γεννήτρια με δρομέα τύπου κλωβού χρησιμοποιείται ευρύτατα σε μικρή ισχύος Α/Γ (μέχρι 300kW), συνιστάται σε περιοχές με μικρές διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου.

Ο ρότορας είναι κυρίως εκείνος που κάνει την ασύγχρονη γεννήτρια διαφορετική από την σύγχρονη. Αποτελείται από ένα αριθμό χάλκινων ή αλουμινένιων ράβδων οι οποίες είναι ενωμένες στις άκρες τους και στο κέντρο του υπάρχει μεταλλικός πυρήνας. Ο ρότορας τοποθετείται στο εσωτερικό του στάτορα ο οποίος έχει συνήθως 4 πόλους.

Έχει το πλεονέκτημα της αυτοδιέγερσης γεγονός που επιτρέπει τη χρησιμοποίησή της όταν η εγκατεστημένη ισχύς είναι περίπου ίση με την ισχύ του δικτύου. Εκτός από την μηχανική ρύθμιση ισχύος στην περύγωση η οποία είναι απαραίτητη ανεξάρτητα από το είδος της γεννήτριας, η σύγχρονη γεννήτρια απαιτεί και ηλεκτρική ρύθμιση ισχύος γιατί όταν για μια συγκεκριμένη φόρτιση (χωρική, επαγωγική, ωμική) τα kVA του φορτίου είναι συνάρτηση του ρεύματος διέγερσης όταν η τάση στα άκρα της είναι σταθερή.

Το βασικό όμως πρόβλημα της σύγχρονης γεννήτριας είναι ότι για να διατηρούνται οι στροφές σταθερές απαιτούνται συστήματα αυτομάτου ελέγχου τα οποία είναι πολύπλοκα και δαπανηρά.

- Σύγχρονη Γεννήτρια με Μαγνητικούς Πόλους

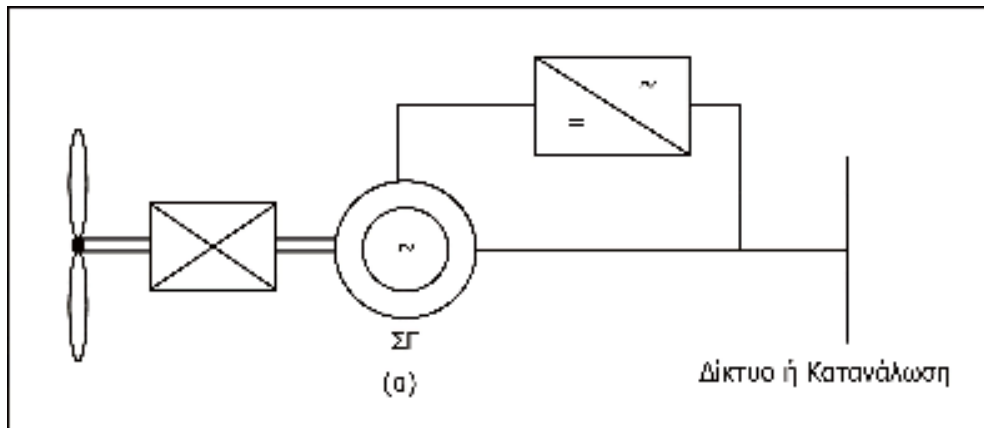
Χρησιμοποιούνται κυρίως για αυτόνομες οικιακές εφαρμογές, απαιτούν συσσωρευτή "εκκίνησης" για την διέγερσή τους και οι απώλειες του τυλίγματος δεν υπερβαίνουν για μικρές γεννήτριες το 5 έως 10% της ονομαστικής λειτουργίας τους. Βέβαια μετά από μεγάλη διακύμανση του ανέμου οι στροφές αυξομειώνονται με συνέπεια οι μέσες απώλειες του τυλίγματος διέγερσης να φθάνουν το 20 έως 30% εκτός και αν παρέχεται ρεύμα στη διέγερση πάνω από μια ταχύτητα ανέμου.

Με την εύρεση νέων μαγνητικών υλικών (Hera, Ferrite Magnadur) δίνουν τη δυνατότητα στις μηχανές αυτές να λειτουργούν σε συνθήκες κόρου του σιδηρομαγνητικού υλικού. Επίσης έχουν τη δυνατότητα να κατασκευαστούν με μεγάλο αριθμό πόλων και έτσι περιορίζεται σημαντικά η απαιτούμενη σχέση μετάδοσης 1:1 (για παράδειγμα, 250 στροφές/min). Αυτό σημαίνει πλήρη απουσία του κιβωτίου πολλαπλασιασμού στροφών με την αντίστοιχη μείωση του κόστους. Στη δισκοειδή της μορφή καταλαμβάνει ένα μικρό εγκάρσιο μήκος και μπορεί να τοποθετηθεί σε έναν οριζόντιο άξονα με τον δρομέα να αποτελούν ένα ενιαίο συμπαγές σύνολο.

Η μηχανική ισχύς μεταφέρεται από τον πολλαπλασιαστή στροφών στην ηλεκτρική γεννήτρια μέσω ενός άξονα μετάδοσης. Όλες οι τριφασικές γεννήτριες χρησιμοποιούν μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Οι σύγχρονες γεννήτριες δεν απαιτούν εξωτερική τάση για την διέγερσή τους. Η διέγερση είναι συνεχούς ρεύματος και παράγεται από την ίδια τη γεννήτρια. Όταν ο αιολικός σταθμός είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο τότε οι συχνότητες του δικτύου και της γεννήτριας ταυτίζονται. Οι διακυμάνσεις των στροφών λόγω απότομων μεταβολών του ανέμου μεταφέρονται κατευθείαν στο δίκτυο.

Σε αυτόνομη λειτουργία της Α/Γ (όχι διασύνδεση με το δίκτυο ρεύματος) είναι απαραίτητη η περιστροφή του ρότορα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα για να παραχθεί εναλλασσόμενο ρεύμα με σταθερή συχνότητα. Στην πράξη οι σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες χρησιμοποιούνται ελάχιστα λόγω του σταδιακού απομαγνητισμού

των μόνιμων μαγνητών, κυρίως εξαιτίας της λειτουργίας τους μέσα στα ισχυρά μαγνητικά πεδία που υπάρχουν στην γεννήτρια, και των ισχυρών μαγνητών που κατασκευάζονται από σπάνια υλικά (π.χ. Νεοδύμιο) τα οποία είναι κατά κανόνα δαπανηρά.



Εικόνα 22. Σύγχρονη Ηλεκτρική Γεννήτρια.

Οι περισσότερες Α/Γ χρησιμοποιούν 4-6 πόλους για λόγους οικονομίας και όγκου αφού αυξάνοντας τον αριθμό των πόλων, μπορούμε να μειώσουμε την απαραίτητη ταχύτητα περιστροφής του πεδίου

- Αργή μεγάλη (ακριβή) γεννήτρια.
- Γρήγορη μικρή (φθηνή) γεννήτρια.

- Γεννήτρια Συνεχούς Ρεύματος

Οι μηχανές Συνεχούς Ρεύματος είναι πολύ εύκολο να ελεγχθούν και συνεπώς από την πλευρά αυτή προσφέρονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο και κυρίως για μικρές αυτόνομες μονάδες. Στην περίπτωση αυτή ή τροφοδοτούν απευθείας συσκευές συνεχούς ρεύματος ή φορτίζουν συσσωρευτές, στους οποίους με τη βοήθεια Inverter μετατρέπεται το ρεύμα σε εναλλασσόμενο για την τροφοδότηση συνηθισμένων οικιακών συσκευών. Βέβαια παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα, κυρίως την ευπάθεια και τη συντήρηση του συστήματος ψηκτρών - συλλέκτη, αλλά το μικρό κόστος και η ευκαμψία τους τις έχει καθιερώσει σε αυτές τις εφαρμογές.

Έχουν αναπτυχθεί Α/Γ χωρίς πολλαπλασιαστή στροφών όπου η γεννήτρια συνδέεται απευθείας στο ρότορα και κινείται από αυτόν. Η γεννήτρια είναι μια πολύ-πολική μηχανή και βασίζεται στην αρχή λειτουργίας των σύγχρονων γεννητριών. Η γεννήτρια που αναπτύχθηκε συνδυάζει χαμηλό βάρος με υψηλή απόδοση. Επίσης επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση του θορύβου από τον πολλαπλασιαστή στροφών και μείωση των βλαβών, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, των μηχανολογικών εξαρτημάτων.

2. Στους Μικρούς Κινητήρες, ο κινητήρας προσανατολισμού είναι ασύγχρονος τριφασικός και ισχύος 1 KW στρεφόμενος και κατά τις δυο φορές περιστροφής διά εναλλαγής των φάσεων. Σε νεότερες μηχανές οι κινητήρες αυτοί είναι υδραυλικοί με καλύτερη απόκριση και ακρίβεια, μα με υψηλότερο κόστος.

3. Αυτόματι Διακόπτες και Ηλεκτρικές Συσκευές. Στον ηλεκτρικό πίνακα της A/Γ είναι τοποθετημένοι αυτόματι διακόπτες για το άνοιγμα ή κλείσιμο των κυκλωμάτων κατόπιν εντολών που προέρχονται από το σύστημα ελέγχου της A/Γ, ασφάλειες για την προστασία του ηλεκτρικού της κυκλώματος έναντι υπερέντασης βραχυκυκλώματος και το σύστημα ελέγχου της. Το σύστημα ελέγχου της A/Γ σε νεότερη μορφή, μπορεί να αποτελείται από PLC ή μικρούς υπολογιστές (eprom). Στις μικρές εφαρμογές για την μετατροπή του DC σε AC από τις μπαταρίες χρησιμοποιούνται συσκευές Inverter ώστε να κάνουν δυνατή τη χρήση οικιακών συσκευών εναλλασσόμενου ρεύματος.

2.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ Α/Γ

Η χρήση των Α/Γ και η εκμετάλλευση του πολύ αξιόλογου αιολικού δυναμικού μιας χώρας, όπως της δικιά μας, συμβάλει:

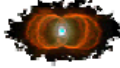
- Στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικών ποσοτήτων συμβατικών καυσίμων, που συνεπάγεται συναλλαγματικά οφέλη.
- Στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονο οικονομικό κέρδος, καθώς έχουν και μηδενικό κόστος συντήρησης.
- Σε σημαντικό περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος, αφού έχει υπολογισθεί ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού μιας μόνο ανεμογεννήτριας ισχύος 550 KW σε ένα χρόνο, υποκαθιστά την ενέργεια που παράγεται από την καύση 2.700 βαρελιών πετρελαίου, δηλαδή αποτροπή της εκπομπής 735-1200 περίπου τόνων CO₂ ετησίως καθώς και 2 τόνων άλλων ρύπων.
- Στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.

Τα ενδεχόμενα προβλήματα από την χρήση των Α/Γ - αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας είναι:

- Ο θόρυβος από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών.
- Οι σπάνιες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο ραδιόφωνο, την τηλεόραση, στις τηλεπικοινωνίες, που επιλύονται όμως με την ανάπτυξη της τεχνολογίας.
- Πιθανά προβλήματα αισθητικής στο χώρο εγκατάστασής τους, και ο χώρος που καταλαμβάνουν μέσα σε αυτό.
- Ο τραυματισμός πτηνών.
- Η ανεπάρκεια στην αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας.
- Το κόστος.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι ότι εξαρτάται άμεσα από την ύπαρξη ικανοποιητικών ταχυτήτων ανέμου. Τι γίνεται όμως όταν δεν φυσάει άνεμος; Επειδή δεν υπάρχουν δυνατότητες για οικονομική αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, επιβάλλεται να υπάρχει εφεδρεία συμβατικών σταθμών για το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των ανεμογεννητριών. Για ηλεκτρικά συστήματα, όπως για παράδειγμα το σύστημα της Κρήτης, όπου οι αιχμές φορτίου καλύπτονται με αεροστρόβιλους ντίτζελ και με υψηλό κόστος παραγωγής, θα μπορούσε να εξεταστεί η περίπτωση συνδυασμού ανεμογεννητριών με αντλητικά υδροηλεκτρικά έργα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ – FUZZY LOGIC



Fuzzy Logic

Ο τρόπος που αντιλαμβανόμαστε τον κόσμο με την ευρύτερη έννοια έχει ουσιαστικά δυαδική μορφή: επεξεργαζόμαστε τον κόσμο (τα αντικείμενα, τις έννοιες) με μια σειρά συγκρίσεων, ναι και όχι, θετικών και αρνητικών ερεθισμάτων. Έτσι σχηματίζουμε την "εικόνα" μας για το αντικείμενο της επεξεργασίας. Στην ουσία όταν βλέπουμε ένα μήλο, στον νου μας εφαρμόζεται μια αφαιρετική μέθοδος σύγκρισης αντικειμένων, που σκοπό έχει τον προσδιορισμό του αντικειμένου που επεξεργαζόμαστε, ώστε τελικά να μας μείνει η εικόνα του (υποκειμενικού) σωστού.

Έτσι λειτουργεί ο εγκέφαλος. Αυτή είναι η λογική πλευρά του. Ο κόσμος μας όμως είναι ευρύτερος από ότι μπορούμε να αντιληφθούμε, γιατί δεν έχουμε κατανοήσει ότι πέρα από το ναι και το όχι, το σωστό και το λάθος, το 0 και 1, κρύβεται και μια άλλη έννοια, αυτή του ίσως, του μπορεί, του ημιολόκληρου (0.5). Και αυτό ακριβώς πρέπει να κατανοήσουμε ώστε να φτάσουμε ένα επίπεδο πιο ψηλά σαν Άνθρωποι και όχι άνθρωποι. Ότι ο κόσμος μας έχει και μια άλλη διάσταση που δεν μπορεί να δει ο 'τρισδιάστατος' κόσμος μας.

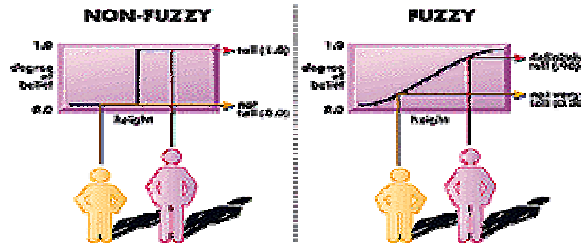
Σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να εισαγάγει τον αναγνώστη στον κλάδο του ευφυούς προγραμματισμού, που στηρίζεται στη θεωρία των ασαφών συνόλων, και να παρουσιάσει τα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων ασαφών συνόλων. Έτσι, γίνεται κατανοητή η λειτουργία των **Fuzzy Logic** συστημάτων και η κατασκευή απλών μοντέλων με χρήση ειδικού λογισμικού που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το πακέτο λογισμικού MATLAB της Mathworks (Έκδοση 6.5 με Release 13).

3.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ (FUZZY LOGIC);

Η σύλληψη της ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic, FL) πραγματοποιήθηκε από τον **Lofti Zadeh**, καθηγητή στο Πανεπιστήμιο του Berkeley τη δεκαετία του '60. Το 1965, ο Zadeh εξέδωσε την εργασία "Fuzzy Sets" η οποία περιέγραφε τις μαθηματικές σχέσεις της θεωρίας των fuzzy συνόλων και κατά επέκταση τη fuzzy λογική. Αυτή η θεωρία πρότεινε τη μετατροπή των συναρτήσεων συμμετοχής (ή τις τιμές αλήθεια και ψέμα) ώστε να λειτουργούν στο εύρος των πραγματικών αριθμών [0.0, 1.0]. Όμως αυτή η προσέγγιση δεν εφαρμόστηκε στην πράξη των συστημάτων ελέγχου μέχρι την δεκαετία του '70 λόγω των ανεπαρκών δυνατοτήτων των τότε υπολογιστών. Η ασαφής λογική είναι μια ισχυρή μεθοδολογία επίλυσης προβλήματος με μια μυριάδα εφαρμογών στους ενσωματωμένους ελεγχούς και την επεξεργασία πληροφοριών. Το **Fuzzy** παρέχει έναν εντυπωσιακά απλό τρόπο να συναχθούν καθορισμένα συμπεράσματα από τις ασαφείς, διαφορετικές ή ανακριβείς πληροφορίες. Από μία άποψη, η ασαφής λογική μοιάζει με την ανθρώπινη λήψη απόφασης, με τη δυνατότητά της να εργαστεί από τα κατά προσέγγιση στοιχεία και να βρει τις ακριβείς λύσεις.

Αντίθετα, από την κλασσική λογική που απαιτεί μια βαθιά κατανόηση ενός συστήματος, τις ακριβείς εξισώσεις και τις ακριβείς αριθμητικές τιμές, η ασαφής λογική ενσωματώνει έναν εναλλακτικό τρόπο, ο οποίος επιτρέπει στα σύνθετα συστήματα να χρησιμοποιούν ένα πιο υψηλό επίπεδο αφάιρεςης που προέρχεται από τη γνώση και την

εμπειρία μας. Η ασαφής λογική επιτρέπει αυτήν τη γνώση με τις υποκειμενικές έννοιες όπως το πολύ καυτό, ανοιχτό κόκκινο, και έναν μακροχρόνιο χρόνο που χαρτογραφείται στις ακριβείς αριθμητικές σειρές.



Το FL αποτελεί μια μεθοδολογία συστημάτων ελέγχου επίλυσης προβλημάτων που συνδράμει στην υλοποίηση συστημάτων που εκτείνονται από απλούς μικρό επεξεργαστές έως μεγάλα δίκτυα υπολογιστών ή μηχανισμούς που βασίζονται στην ανάκτηση δεδομένων και συστήματα ελέγχου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε hardware, software ή συνδυασμό και των δυο. Το FL παρέχει έναν απλό τρόπο κατάληξης σε ένα ορισμένο συμπέρασμα το οποίο όμως βασίζεται σε ασαφή, διφορούμενα, ανακριβή, θορυβώδη, ή ελλιπή δεδομένα εισόδου (input). Η προσέγγιση που βασίζεται στο FL ως προς τον έλεγχο προβλημάτων μιμείται τον τρόπο με τον οποίο ο άνθρωπος λαμβάνει αποφάσεις, μόνο που το κάνει πολύ πιο γρήγορα. Το FL ενσωματώνει μια απλή προσέγγιση που βασίζεται στους άξονες

ΑΝ Χ ΚΑΙ Υ ΤΟΤΕ Ζ

για την επίλυση προβλημάτων ελέγχου παρά να προσπαθήσει να μοντελοποιήσει ένα σύστημα με μαθηματικό τρόπο. Το FL βασίζεται στην εμπειρία και την εξοικείωση του χρήστη παρά στην κατανόηση της τεχνολογίας του συστήματος.

Τα απαραίτητα χαρακτηριστικά της FL όπως διατυπώθηκαν από τον Lofti Zadeh είναι τα εξής:

- Στην FL, η ακριβής λογική αντιμετωπίζεται ως μια περιορισμένη περίπτωση της προσεγγιστικής λογικής.
- Στην FL όλα είναι θέμα μεγέθους.
- Κάθε λογικό σύστημα μπορεί να μετατραπεί σε fuzzy.
- Στην fuzzy logic, η γνώση μεταφράζεται σε μια συλλογή από ελαστικά ή ανάλογα η FL περιορίζεται σε μια συλλογή από μεταβλητές.
- Συμπερασματικά θεωρείται μια διαδικασία διασποράς ελαστικών παρεμποδιστών.

Η ασαφής λογική έχει κερδίσει την αυξανόμενη αποδοχή κατά τη διάρκεια των προηγούμενων λίγων ετών. Υπάρχουν πάνω από δύο χιλιάδες εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα που χρησιμοποιούν την ασαφή λογική, που κυμαίνεται από τα πλυντήρια ρούχων ως τα τραίνα υψηλής ταχύτητας. Για παράδειγμα, διάφοροι κατασκευαστές στην αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιούν την ασαφή τεχνολογία για να βελτιώσουν την ποιότητα και να μειώσουν το χρόνο ανάπτυξης. Σχεδόν κάθε εφαρμογή μπορεί ενδεχομένως να πραγματοποιήσει μερικά από τα οφέλη της ασαφούς λογικής, όπως η απόδοση, η απλότητα, το χαμηλότερο κόστος και η παραγωγικότητα.

3.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΑΣΑΦΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της θεωρίας των ασαφών συστημάτων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια της εργασίας. Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι βασικές έννοιες των ασαφών συνόλων, παρατίθενται τα είδη των ασαφών κανόνων και περιγράφεται το σύστημα εξαγωγής ασαφών συμπερασμάτων.

Ένα κλασσικό σύνολο A (crisp set) αποτελεί μία συλλογή διακριτών αντικειμένων x . Ορίζεται κατά τρόπο ώστε να διχοτομεί τα στοιχεία ενός πεδίου ορισμού U (universe of discourse) σε δύο ομάδες: α) τα μέλη του συνόλου A και β) τα μη-μέλη. Κάθε σαφές σύνολο περιγράφεται από μία συνάρτηση, η οποία καλείται χαρακτηριστική συνάρτηση $\mu_A(x)$ και ορίζεται ως εξής:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{εάν και μόνο εάν } x \in A \\ 0 & \text{εάν και μόνο εάν } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

Από τη σχέση (3.1) συνάγεται ότι το πεδίο τιμών της χαρακτηριστικής συνάρτησης ενός κλασσικού συνόλου είναι το $\{0,1\}$, ακολουθώντας την αριστοτελική αρχή ότι οι δύο παραπάνω ομάδες είναι αμοιβαίως αποκλειόμενες. Ο ορισμός της $\mu_A(x)$ υποδηλώνει ότι το όριο του κλασσικού συνόλου είναι σαφές και «απότομο», διχοτομώντας κατά τρόπο απόλυτα προσδιορισμένο το πεδίο ορισμού στις δύο παραπάνω ομάδες.

Το ασαφές σύνολο (fuzzy set) αίρει τα σαφή όρια του κλασσικού συνόλου, επιτρέποντας τη συνύπαρξη των μέχρι πρότινος αποκλειόμενων ομάδων. Στηρίζεται στη σταδιακή μετάβαση από τη μία ομάδα στην άλλη, αρνούμενο το δίτιμο πεδίο τιμών για τη χαρακτηριστική συνάρτηση και εισάγοντας την έννοια του βαθμού συμμετοχής στο σύνολο (degree of membership). Ένα ασαφές σύνολο A μπορεί να ορισθεί ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών

$$A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in U\} \quad (3.2)$$

όπου η χαρακτηριστική συνάρτηση $\mu_A(\cdot)$ ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής (membership function, MF) του συνόλου A και η ποσότητα $\mu_A(x)$ εκφράζει το βαθμό συμμετοχής του στοιχείου x στο σύνολο A . Το πεδίο τιμών της $\mu_A(\cdot)$ δεν είναι πλέον διακριτό, μπορεί να είναι ολόκληρο το υποσύνολο \mathbb{R}^+ , στην πράξη όμως περιορίζεται στο διάστημα $[0,1]$. Το ζεύγος $(x, \mu_A(x))$ καλείται singleton.

Από τα παραπάνω τεκμηριώνεται ότι το ασαφές σύνολο αποτελεί μία γενίκευση του κλασσικού συνόλου, μεταβαίνοντας από τη δίτιμη λογική της «συμμετοχής» - «μη συμμετοχής» στην πλειότιμη λογική του «βαθμού συμμετοχής». Έτσι δύνανται να περιγραφούν πιο αποτελεσματικά ασαφείς και απροσδιόριστες έννοιες του πραγματικού κόσμου.

3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΣΑΦΩΝ ΣΥΝΟΛΩΝ

Σύνολο υποστήριξης ή ενεργός περιοχή (support): το σύνολο των στοιχείων $\chi \in U$ για τα οποία $\mu_A(\chi) > 0$

$$\text{support}(A) = \{\chi \in U \mid \mu_A(\chi) > 0\} \quad (3.3)$$

Πυρήνας ή κόρος (core): το σύνολο των στοιχείων $\chi \in U$ για τα οποία $\mu_A(\chi) = 1$

$$\text{core}(A) = \{\chi \in U \mid \mu_A(\chi) = 1\} \quad (3.4)$$

Κανονικό σύνολο (normal set): ένα ασαφές σύνολο είναι κανονικό όταν ο πυρήνας του δεν είναι το κενό σύνολο ή, με άλλα λόγια, υπάρχει τουλάχιστον ένα στοιχείο $\chi \in U$ τέτοιο ώστε $\mu_A(\chi) = 1$.

Σύνολο τομής- α (a-cut set), A_α : ένα κλασσικό σύνολο (crisp), το οποίο περιέχει όλα τα στοιχεία $\chi \in U$ που παρουσιάζουν βαθμό συμμετοχής μεγαλύτερο μίας τιμής α

$$A_\alpha = \{\chi \in U \mid \mu_A(\chi) \geq \alpha\}, \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (3.5)$$

Μέγεθος (cardinality) $|A|$: το άθροισμα των βαθμών συμμετοχής όλων των $\chi \in U$.

$$|A| = \sum_{\chi \in U} \mu_A(\chi) \quad (3.6)$$

Τομή ασαφών συνόλων (intersection): η τομή δύο ασαφών συνόλων A και B είναι ένα ασαφές σύνολο C , το οποίο συμβολίζεται με $C = A \cap B$ και έχει την ακόλουθη συνάρτηση συμμετοχής

$$\mu_C(\chi) = \min[\mu_A(\chi), \mu_B(\chi)] = \mu_A(\chi) \wedge \mu_B(\chi), \quad \forall \chi \in U \quad (3.7)$$

Ένωση ασαφών συνόλων (union): Η ένωση δύο ασαφών συνόλων A και B είναι ένα ασαφές σύνολο C , το οποίο συμβολίζεται με $C = A \cup B$ και έχει την ακόλουθη συνάρτηση συμμετοχής

$$\mu_C(\chi) = \max[\mu_A(\chi), \mu_B(\chi)] = \mu_A(\chi) \vee \mu_B(\chi), \quad \forall \chi \in U \quad (3.8)$$

Υποσύνολο A του ασαφούς συνόλου B (subset): το ασαφές σύνολο A είναι υποσύνολο του ασαφούς συνόλου B (το A περιέχεται στο B) εάν και μόνο εάν $\mu_A(\chi) \leq \mu_B(\chi)$ για κάθε $\chi \in U$

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A(\chi) \leq \mu_B(\chi), \quad \forall \chi \in U \quad (3.9)$$

Εάν $A \subseteq B$ και $A \neq B$, τότε το $A \subseteq B$ είναι *γνήσιο υποσύνολο* του (proper subset). Για να ελεγχθεί ο βαθμός κατά τον οποίο το A είναι υποσύνολο του B χρησιμοποιείται το *μέτρο σχέσης υποσυνόλου ή βαθμού περιεκτικότητας* (subsethood measure)

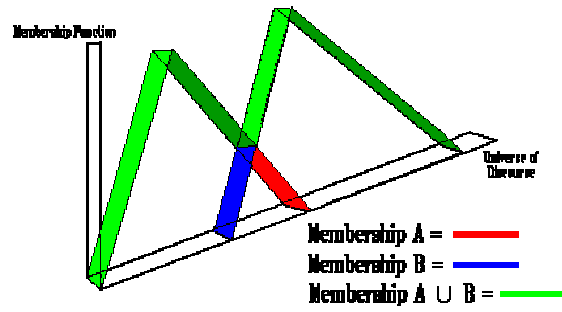
$$S(A, B) = \text{degree}(A \subseteq B) = \frac{|A \cap B|}{|A|} \quad (3.10)$$

Καρτεσιανό γινόμενο δύο ασαφών συνόλων (cartesian product): Το καρτεσιανό γινόμενο δύο ασαφών A_1 συνόλων και A_2 , τα οποία ορίζονται στους χώρους U_1 και U_2 αντίστοιχα, είναι ένα διδιάστατο ασαφές σύνολο $A = A_1 \times A_2$, με πεδίο ορισμού το χώρο $U = U_1 \times U_2$. Η συνάρτηση συμμετοχής A του ορίζεται ως:

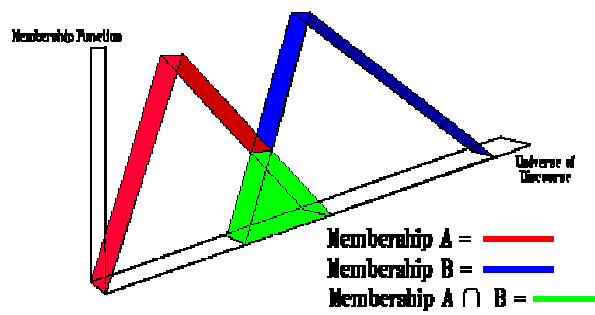
$$\mu_A(\chi_1, \chi_2) = \mu_{A_1}(\chi_1) \wedge \mu_{A_2}(\chi_2) \quad (3.11)$$

όπου ο τελεστής \wedge μπορεί να λάβει διάφορες μορφές (min, γινόμενο κ.λ.π.).

Ο παραπάνω ορισμός μπορεί να γενικευθεί και να επεκταθεί σε χώρους n διαστάσεων.



$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A, \mu_B)$$



$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A, \mu_B)$$

Εικόνα 23. Ένωση και τομή ασαφών συνόλων.

3.4 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ

Υπάρχουν δύο είδη συναρτήσεων συμμετοχής η τριγωνική και η γκαουσιανή. Αρχικά περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των μονοδιάστατων συναρτήσεων συμμετοχής, οι οποίες στη συνέχεια γενικεύονται και παρουσιάζονται σε χώρο περισσότερων διαστάσεων.

3.4.1 Μονοδιάστατες συναρτήσεις συμμετοχής

Η *τριγωνική* συνάρτηση συμμετοχής (triangular MF) καθορίζεται πλήρως από την τριάδα των παραμέτρων $\{a,b,c\}$:

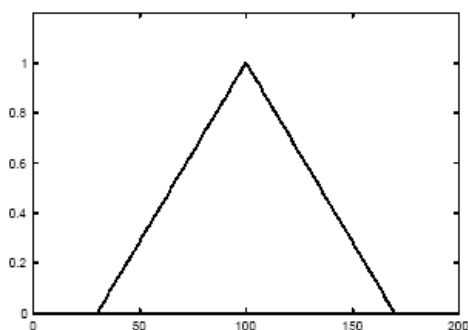
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 1 & c \leq x \end{cases} \quad (3.12)$$

Στην εικόνα 24(α) απεικονίζεται μία τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής με $a=30$, $b=100$ και $c=170$.

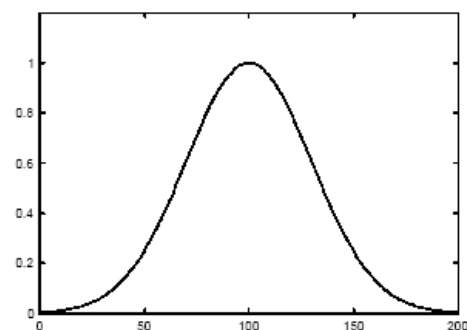
Η *γκαουσιανή* ή *καμπανοειδής* συνάρτηση συμμετοχής (gaussian MF) είναι μία συνάρτηση με ακτινική συμμετρία και περιγράφεται από δύο παραμέτρους $\{m,\sigma\}$:

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.13)$$

Στην εικόνα 24(β) φαίνεται με $m=100$ και $\sigma=30$. Καθώς η γκαουσιανή συνάρτηση είναι παρόμοια με την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, που χρησιμοποιείται στην θεωρία πιθανοτήτων για να προσδιορίσει την *κανονική κατανομή*, οι παράμετροι των συναρτήσεων συμμετοχής m και σ καλούνται *μέση τιμή* και *τυπική απόκλιση*, αντίστοιχα.



(α) Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής



(β) Γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής

Εικόνα 24. Μονοδιάστατες συναρτήσεις συμμετοχής.

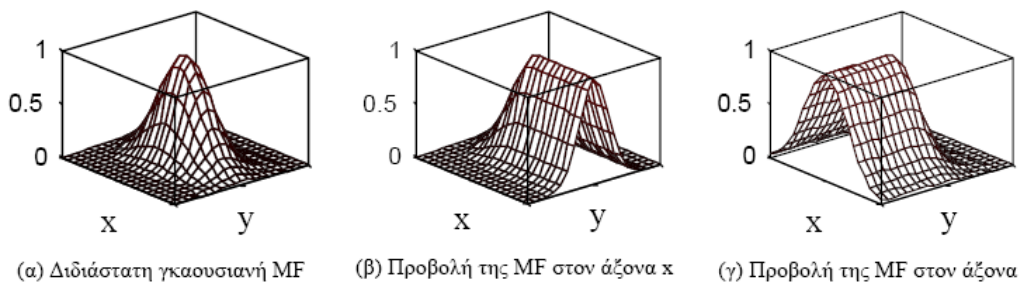
3.4.2 Πολυδιάστατες συναρτήσεις συμμετοχής - η έννοια της ασαφούς περιοχής

Από την έννοια του καρτεσιανού γινομένου των ασαφών συνόλων, έπεται ότι ένα πολυδιάστατο ασαφές σύνολο μπορεί να περιγραφεί από μία συνάρτηση συμμετοχής, η οποία αποτελεί το γινόμενο των συναρτήσεων συμμετοχής, που περιγράφουν τις συνιστώσες του πολυδιάστατου συνόλου. Κατά συνέπεια, το ασαφές σύνολο $A=A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$, του οποίου οι συνιστώσες σε κάθε διάσταση περιγράφονται από MF

συμμετοχής $\mu_{A_j}(X_j) = e^{-\frac{(x_j - m_j)^2}{\sigma_j^2}}$, θα έχει την ακόλουθη συνάρτηση συμμετοχής:

$$\mu_A(x_1, x_2, \dots, x_n) = e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x_1 - m_1)^2}{\sigma_1^2} + \dots + \frac{(x_n - m_n)^2}{\sigma_n^2} \right]} = e^{-\frac{(x_1 - m_1)^2}{2\sigma_1^2}} \times \dots \times e^{-\frac{(x_n - m_n)^2}{2\sigma_n^2}} = \mu_{A_1}(x_1) \times \dots \times \mu_{A_n}(x_n) \quad (3.14)$$

Το πολυδιάστατο ασαφές σύνολο ορίζει μία *ασαφή περιοχή* (fuzzy region) μέσα στο πεδίο ορισμού $U=U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$, με τις συναρτήσεις συμμετοχής των A_j να αποτελούν τις *προβολές* της $\mu_A(x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n)$ στα U_j , όπως φαίνεται στην εικόνα 25 για τη διδιάστατη περίπτωση. Η $\mu_A(x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n)$ παραμετροποιείται με το *κέντρο* της $m = [m_1, \dots, m_n]^T$ και το *διάνυσμα των τυπικών αποκλίσεων* $\sigma = [\sigma_1, \dots, \sigma_n]^T$.



Εικόνα 25. Δισδιάστατη γκαουσιανή MF.

3.5 ΛΕΚΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΣΑΦΕΙΣ ΚΑΝΟΝΕΣ

3.5.1 Λεκτικές μεταβλητές

Όπως σημειώνει ο Zadeh, οι συμβατικές τεχνικές ανάλυσης συστημάτων είναι ακατάλληλες να διαχειρισθούν την πληροφορία που εμπεριέχεται στην ανθρώπινη σκέψη και τη φυσική γλώσσα, καθώς αυτές επηρεάζονται από την κρίση, την αντίληψη και τα συναισθήματα. Για το λόγο αυτό πρότεινε την έννοια των *λεκτικών* ή *γλωσσικών* μεταβλητών (linguistic variables) ως μία εναλλακτική προσέγγιση στη μοντελοποίηση της ανθρώπινης σκέψης.

Μια λεκτική μεταβλητή χαρακτηρίζεται από την πεντάδα: $(\chi, T(\chi), X, G, M)$, όπου

- χ είναι το όνομα της ασαφούς μεταβλητής, π.χ. «θερμοκρασία».
- $T(\chi)$ είναι το *σύνολο των λεκτικών όρων* (term set), π.χ. $T(\text{θερμοκρασία}) = \{\text{«χαμηλή»}, \text{«μέση»}\}$.
- X είναι το *πεδίο ορισμού* της λεκτικής μεταβλητής.
- G είναι ένας *συντακτικός κανόνας* (syntactic rule), ο οποίος παράγει τους όρους του $T(\chi)$.
- M είναι ένας *ερμηνευτικός κανόνας* (semantic rule), ο οποίος προσδίδει σε κάθε λεκτικό όρο $A \in T(\chi)$ μία συνάρτηση συμμετοχής $\mu_A(\chi)$.

3.5.2 Ασαφείς κανόνες

Οι *ασαφείς κανόνες* (fuzzy IF-THEN rules) είναι υποθετικές προτάσεις, οι οποίες έχουν την ακόλουθη γενική μορφή:

$$\text{IF } \chi \text{ IS } A \text{ THEN } y \text{ IS } B \quad (3.15)$$

όπου οι A και B είναι λεκτικοί όροι των χ και y , οριζόμενοι από ασαφή σύνολα στους χώρους X και Y , αντίστοιχα. Οι εκφράσεις $x \text{ is } A$ και $y \text{ is } B$ είναι *ασαφείς προτάσεις* (fuzzy propositions) και αποτελούν τα δύο τμήματα του υποθετικού λόγου (3.15). Το αριστερό τμήμα του ασαφούς κανόνα, *IF* $x \text{ is } A$, καλείται *τμήμα υπόθεσης* ή *προαπαίτησης* (pre-conditional part, premise part) και περιλαμβάνει την υπόθεση. Το δεξί τμήμα του ασαφούς κανόνα, *THEN* $y \text{ is } B$, είναι το *τμήμα απόδοσης* ή *συμπεράσματος* (consequent part) και περιλαμβάνει το συμπέρασμα του κανόνα.

Ο ασαφής κανόνας (3.15) εναλλακτικά περιγράφεται ως $A \rightarrow B$ και ορίζει μια ασαφή σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές x και y , η οποία συσχετίζει τον βαθμό εκπλήρωσης της υπόθεσης με εκείνον του συμπεράσματος. Οι ασαφείς κανόνες αποτελούν τα βασικά δομικά στοιχεία ενός συστήματος εξαγωγής ασαφών συμπερασμάτων.

3.6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ

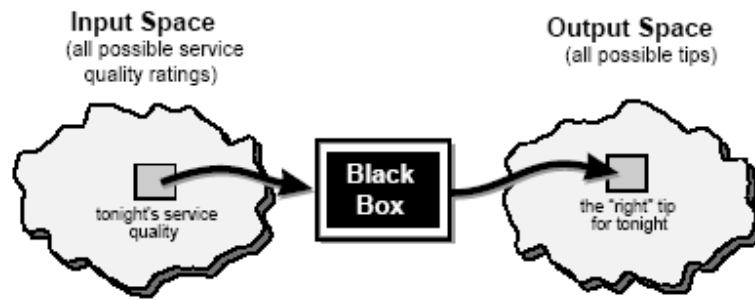
Το σύστημα ασαφούς λογικής παράγει μία απεικόνιση ενός χώρου εισόδου $U \subset \mathfrak{R}^m$ σε ένα χώρο εξόδου $V \subset \mathfrak{R}^r$. Ας θεωρηθεί η πλέον γενική περίπτωση όπου το σύστημα είναι πολλών εισόδων, πολλών εξόδων (**m**ultiple-**i**nput, **m**ultiple-**o**utput, MIMO) θεωρώντας m τον αριθμό των εισόδων και r τον αριθμό των εξόδων, τόσο ο χώρος εισόδου όσο και ο χώρος εξόδου θα είναι πολυδιάστατοι, ο μὲν οριζόμενος ως $U=U_1 \times \dots \times U_m$ και ο δε ως $V=V_1 \times \dots \times V_r$, όπου $U_i, V_j \subset \mathfrak{R}$. Έστω $u=[u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m]^T$ και $y=[y_1 \ y_2 \ \dots \ y_r]^T$ τα διανύσματα εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα. Το σύστημα ασαφούς λογικής αποτελείται από τα ακόλουθα λειτουργικά τμήματα:

- τον *ασαφοποιητή* (fuzzifier), ο οποίος μετασχηματίζει τις σαφείς (crisp) εισόδους σε βαθμούς συμμετοχής των λεκτικών μεταβλητών.
- τη *βάση κανόνων* (rule base), η οποία συνιστά μία συλλογή ασαφών IF-THEN κανόνων.
- τη *μονάδα ασαφούς συμπερασμού* (fuzzy inference unit), η οποία επεξεργάζεται τις εξόδους του ασαφοποιητή και χρησιμοποιεί τη βάση κανόνων για να εξαγάγει τις εξόδους των κανόνων.
- τον *αποασαφοποιητή* (defuzzifier), ο οποίος παράγει τις τελικές εξόδους του συστήματος.

Ανάλογα με τη μορφή των τμημάτων απόδοσης των κανόνων και τον τρόπο συμπερασμού των εξόδων των κανόνων, τα συστήματα ασαφούς λογικής διακρίνονται σε δύο μείζουσες κατηγορίες: *α)* τα μοντέλα Mamdani, σύμφωνα με τα οποία οι έξοδοι των κανόνων είναι ασαφή σύνολα και *β)* τα μοντέλα Takagi-Sugeno-Kang (TSK μοντέλα), σύμφωνα με τα οποία οι έξοδοι των κανόνων είναι συναρτήσεις των εισόδων. Τα μοντέλα Mamdani επιχειρούν να μοντελοποιήσουν μία διαδικασία παρέχοντας μία ποιοτική περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος. Συνιστώνται για τις περιπτώσεις όπου η γνώση του συστήματος προσφέρεται από εμπειρογνώμονες. Τα TSK μοντέλα συνίστανται από μία συλλογή γραμμικών ή μη γραμμικών υπομοντέλων (τμήματα απόδοσης των ασαφών κανόνων), τα οποία συνδέονται μη γραμμικά μέσω των τμημάτων υπόθεσης των κανόνων. Τα μοντέλα Mamdani είναι η πιο κοινή χρησιμοποιούμενη ασαφής μεθοδολογία και ήταν από τα πρώτα συστήματα ελέγχου που δημιουργήθηκαν βασισμένα στην ασαφή λογική.

Με βάση τα παραπάνω, στην εργασία θα χρησιμοποιηθεί το Mamdani ασαφές μοντέλο.

Ανεξάρτητα από τον αριθμό των εισόδων και των εξόδων, όπως αναφέρθηκε, αυτές μπορούν να ενωθούν με διάφορους τρόπους. Μεταξύ τους τοποθετείται ένα «μαύρο κουτί» (black box). Αυτό μπορεί να είναι ένας μεγάλος αριθμός πραγμάτων, όπως για παράδειγμα, FL συστήματα, γραμμικά συστήματα ακόμα και πνευματικοί συμβουλάτορες κ.τ.λ. Είναι σαφές ότι αυτός ο κατάλογος θα μπορούσε να συνεχιστεί και με άλλα παραδείγματα. Η εμπειρία δείχνει ότι συχνά ο καταλληλότερος τρόπος για να λειτουργήσει το μαύρο κουτί είναι η χρήση FL. Γιατί ισχύει αυτό; Όπως τόνισε ο Zadeh «Σχεδόν σε κάθε περίπτωση μπορούμε να δημιουργήσουμε το ίδιο προϊόν και χωρίς τη χρήση του FL, αλλά το FL είναι γρηγορότερο και πιο οικονομικό».



Εικόνα 26. Το «μαύρο κουτί».

Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα του FL είναι:

1. κατανοείται εύκολα
2. είναι ευέλικτο
3. μπορεί να επεξεργαστεί ανακριβή δεδομένα
4. μπορεί να μοντελοποιήσει μη γραμμικές λειτουργίες και αυθαίρετη πολυπλοκότητα
5. διευρύνει τις δυνατότητες των ειδικών
6. βασίζεται σε φυσική γλώσσα
7. μπορεί να συνδυαστεί με συμβατικές τεχνικές ελέγχου.

Με βάση όλα τα παραπάνω στη συγκεκριμένη εργασία το σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε για τον αυτόματο έλεγχο της ανεμογεννήτριάς μας στηρίζεται σε λογική Fuzzy, το οποίο και θα περιγραφεί αναλυτικά στο επόμενο Κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ Α/Γ

4.1 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ-ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ Α/Γ.

Η ανεμογεννήτρια της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι μικρής απόδοσης. Η προσομοίωση που έχει γίνει στο πρόγραμμα είναι μια γενική ηλεκτρονική απεικόνιση της λειτουργίας και της συμπεριφοράς της.

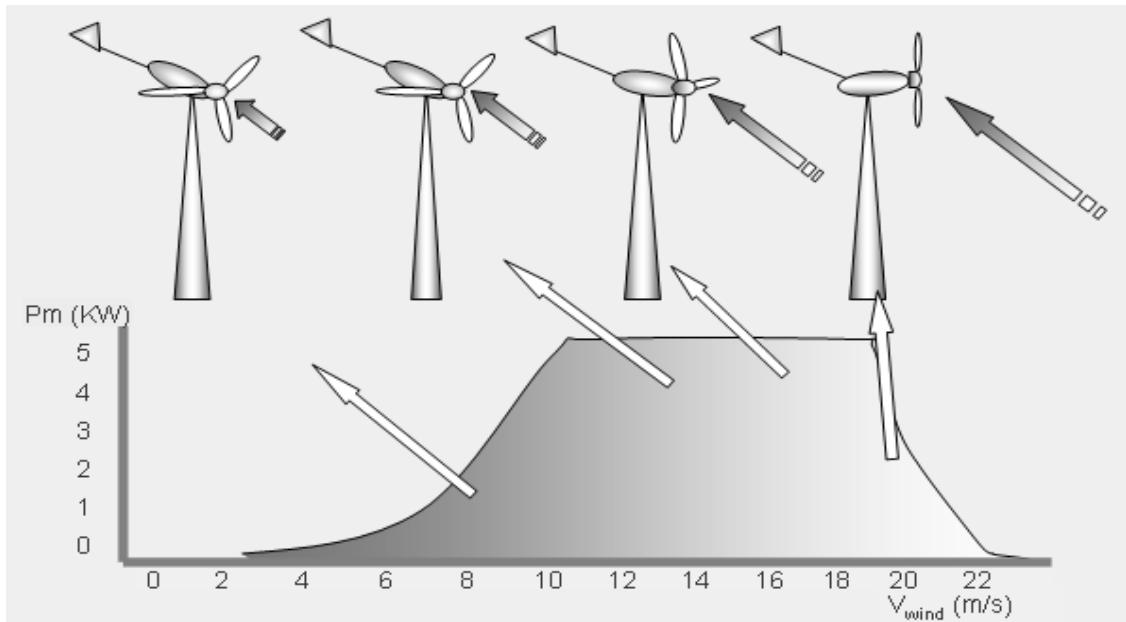
Όπως προαναφέρθηκε η προσομοίωση αποτέλεσε μια γενική ηλεκτρονική απεικόνιση με σκοπό την κατανόηση του πώς λειτουργεί και συμπεριφέρεται εσωτερικά με τη γλώσσα των αριθμών, των εξισώσεων και των κυκλωμάτων. Δεν θα μπορούσε άλλωστε να είναι μια πλήρης απεικόνιση καθότι υπάρχουν και αλλά στοιχεία και παράμετροι που επηρεάζουν την συνολική εικόνα - συμπεριφορά μιας ανεμογεννήτριας. Συνεπώς, η εργασία έγινε πάνω σε συγκεκριμένα έτοιμα δομικά στοιχεία με λίγες εξαιρέσεις, οι οποίες θα αναφερθούν στο κομμάτι του κεφαλαίου όπου θα περιγραφούν τα επιμέρους τμήματά της. Όλα τα παραπάνω αναφέρθηκαν διότι η συγκεκριμένη προσομοίωση δεν αποτελεί πρότυπο προς εφαρμογή της σε άλλες μεγαλύτερες Α/Γ όπως αυτές που εγκαθίστανται στα αιολικά πάρκα.

Οι βασικές τεχνικές προδιαγραφές της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4. Τεχνικές προδιαγραφές της προσομοιωμένης Α/Γ.

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ	ΤΙΜΕΣ
Ονομαστική Ισχύς	5 KW
Διάμετρος	5.5 m
Ταχύτητα ρότορα	80-240 rpm (μεταβλητό)
Ταχύτητα έναυσης	3 m/s
Μέγιστη ταχύτητα	10 m/s
Ταχύτητα σβέσης	20 m/s
Ταχύτητα αέρα	50 m/s
Vout	48/120dc or 230V (50/60Hz)

Όλες οι ανεμογεννήτριες, όπως είναι γνωστό, συνοδεύονται από τον κατασκευαστή από κάποιες χαρακτηριστικές καμπύλες όπου περιγράφεται η συνολική συμπεριφορά της μηχανής. Η συγκεκριμένη Α/Γ συνοδεύεται από τις χαρακτηριστικές: α) της ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου και β) των στροφών του ρότορα συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.



Εικόνα 27. Χαρακτηριστική καμπύλη της ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.

Από την καμπύλη της εικόνας 27 μπορούμε να διακρίνουμε ποιες τιμές παίρνει η ισχύς της Α/Γ για κάθε αντίστοιχη τιμή των ταχυτήτων του ανέμου. Επίσης μπορούμε να δούμε και την ευρύτερη συμπεριφορά της Α/Γ, δηλαδή μετά από ποια τιμή ταχύτητας ανέμου αρχίζει να κινείται, πότε αποδίδει τη μέγιστη ισχύ και τέλος πότε αρχίζει να επιβραδύνει. Παρατηρώντας τα εύρη των τιμών της ταχύτητας του ανέμου καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για το διάστημα από 0-3 m/s η Α/Γ βρίσκεται σε ακινησία. Όταν η τιμή της ταχύτητας του ανέμου πάρει την τιμή 3, τότε η Α/Γ αρχίζει να κινείται και η τιμή αυτή της ταχύτητας του ανέμου καλείται ταχύτητα έναυσης της Α/Γ. Για το διάστημα από 3-10 m/s βλέπουμε ότι σταδιακά η Α/Γ αυξάνει την απόδοσή της μέχρι να αποκτήσει τη μέγιστη και ονομαστική ισχύ της, που είναι ίση με 5 KW. Από 10-20 m/s παρατηρείται ότι η γεννήτρια δουλεύει και αποδίδει τα μέγιστα. Όταν όμως η ταχύτητα του ανέμου γίνει 20 m/s, όσο και να αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου περαιτέρω δεν έχει σημασία γιατί η γεννήτρια δεν μπορεί κατασκευαστικά να λειτουργήσει. Έτσι, προκειμένου να καταστραφεί, έχει προβλεφθεί τη σταδιακή και ομαλή επιβράδυνσή της μέχρι να ακινητοποιηθεί και εξασφαλισθεί η κατασκευαστική της ακεραιότητα.

Από την περιγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης προέκυψαν στην ουσία κάποιες χαρακτηριστικές ταχύτητες.

Υπάρχουν τρεις χαρακτηριστικές ταχύτητες που διαμορφώνουν την καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ :

- Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (V_{in})
- Η ονομαστική ταχύτητα (V_R)
- Η ταχύτητα εξόδου (V_{out})

Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (V_{in}) [0-3 m/sec]

Η Α/Γ παρουσιάζει απώλειες λόγω τριβών στον άξονα περιστροφής, στο σύστημα πέδησης, στον πολλαπλασιαστή στροφών, κλπ. με αποτέλεσμα να αποδίδει ισχύ μόνο όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια ορισμένη ταχύτητα V_{in} . Για ταχύτητες μικρότερες από αυτή η Α/Γ δεν αποδίδει ισχύ.

$$V_{in} = \left[\frac{8 \frac{P_0}{P_R} P_R}{\rho \pi c_p D^2} \right]^{1/3} \quad (4.1)$$

όπου: P_0 η ισχύς που χάνεται για ταχύτητες ανέμου $< V_{in}$, P_R η ονομαστική ισχύ της μηχανής, C_p ο συντελεστής ισχύος, ρ η πυκνότητα του αέρα, D η διάμετρος της πτερωτής.

Η ονομαστική ταχύτητα (V_R)

Για τιμές μεγαλύτερες της V_{in} αυξανόμενης της ταχύτητας του ανέμου έχουμε αύξηση της ωφέλιμης ισχύος μέχρι μια ταχύτητα V_R πέρα από την οποία υπάρχει σύστημα που διατηρεί σχεδόν σταθερή την παραγόμενη ισχύ (ονομαστική ισχύς). Έτσι 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.

$$V_R = 1.9 \bar{V} \quad (4.2)$$

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

Η ταχύτητα εξόδου (V_{out}) [20-22 m/sec]

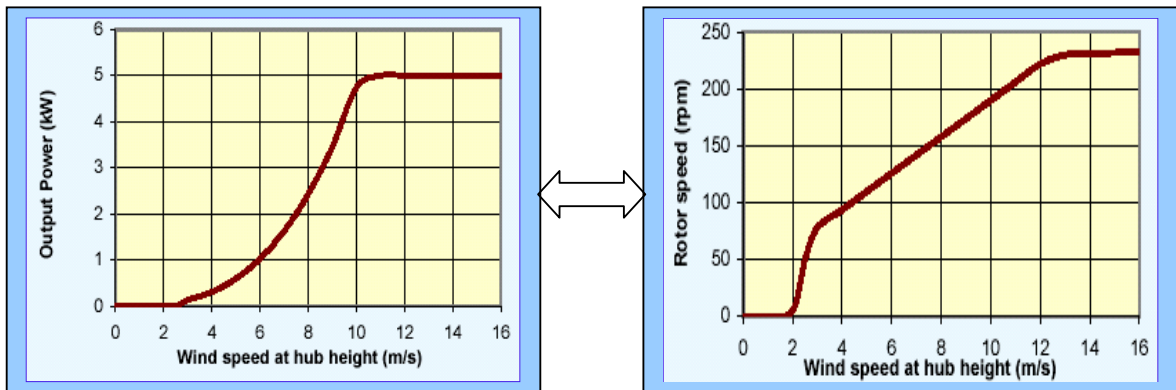
- Για πολύ υψηλές ταχύτητες του ανέμου πρέπει η αιολική μηχανή να τίθεται εκτός λειτουργίας για λόγους ασφάλειας.
- Σήμερα βέβαια στις μεγάλες αιολικές μηχανές γίνεται προσπάθεια να λειτουργούν σε οποιεσδήποτε ταχύτητες ανέμου.
- Η ταχύτητα εξόδου συνδέεται και με το κόστος κατασκευής του συστήματος.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να γίνει μια μικρή αναφορά για το πώς μπορεί να επιτευχθεί αυτή η ομαλή επιβράδυνση της Α/Γ. Η επιβράδυνση επιτυγχάνεται ή με εσωτερικούς ή με εξωτερικούς τρόπους ανάλογα με την εγκατάσταση της Α/Γ. Τέτοιοι είναι με **υδραυλικά φρένα**, με **ηλεκτρικά φρένα** και με **χρήση διακόπτη αστέρα – τριγώνου**. Οι πιο ενδιαφέροντες τρόποι είναι οι δυο τελευταίοι και αυτό γιατί η διαδικασία με την οποία επεμβαίνουν στη γεννήτρια – μηχανή είναι ξεχωριστή.

- **Ηλεκτρικά φρένα:** για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των ηλεκτρικών φρένων αρκεί και μόνο να καταλάβει κανείς ότι μια μηχανή μπορεί να λειτουργήσει και ως γεννήτρια και ως κινητήρας ανάλογα με το τι ενέργεια παίρνει στην είσοδό της. Δηλαδή, αν μια μηχανή πάρει κινητική ενέργεια και τη μετατρέψει σε ηλεκτρική λειτουργεί ως γεννήτρια, ενώ εάν πάρει ηλεκτρική και δώσει κινητική, τότε λειτουργεί ως κινητήρας. Έτσι λοιπόν η Α/Γ μας όταν τα εύρη τιμών των ταχυτήτων του ανέμου της εικόνας 28 είναι από 0-16 m/s λειτουργεί ως γεννήτρια, ενώ από 16 m/s και μετά,

λειτουργεί ως κινητήρας οπότε με τους ανάλογους αυτοματισμούς παίρνει ρεύμα και επιβραδύνει.

- **Διακόπτης αστέρα – τριγώνου:** αυτός ο τρόπος πραγματοποιείται με χρήση διακόπτη αστέρα – τριγώνου στην εγκατάσταση που ως τρίγωνο επιτρέπει τη μέγιστη διέλευση ρεύματος κατά το εύρος τιμών των ταχυτήτων του ανέμου της εικόνας 28 από 0-16 m/s, ενώ από 16 m/s γυρνάει ο διακόπτης σε αστέρα ο οποίος επιτρέπει τη σταδιακή μείωση διέλευσης ρεύματος και επιβραδύνει τον κινητήρα.



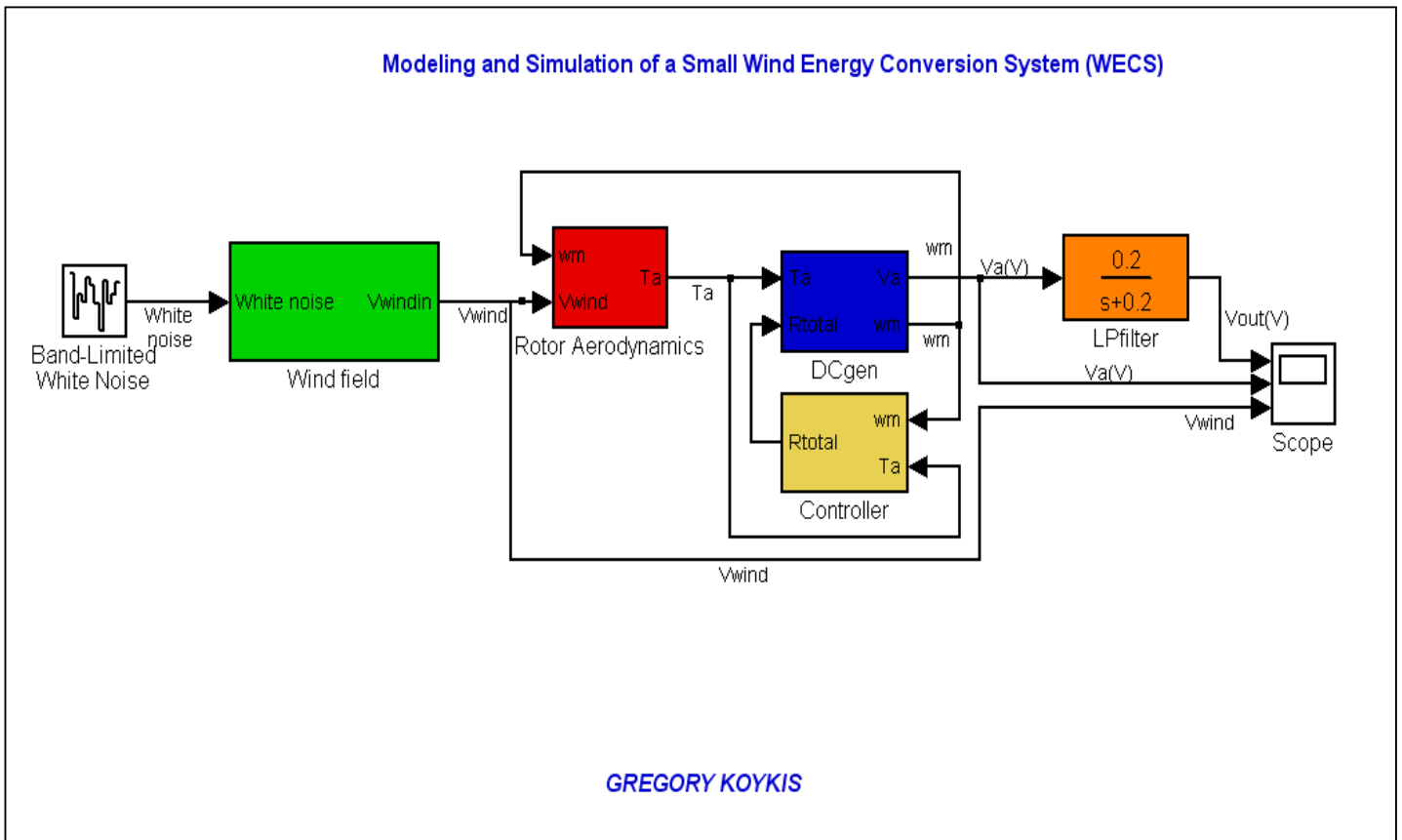
Εικόνα 28. Χαρακτηριστικές καμπύλες της ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου και των στροφών του ρότορα συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ - ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ.

Σε αυτό το σημείο θα περιγραφεί αναλυτικά το μοντέλο προσομοίωσης της ανεμογεννήτριάς μας. Το μοντέλο αναπτύχθηκε – κατασκευάστηκε στο περιβάλλον του πακέτου λογισμικού MATLAB. Το μοντέλο αποτελείται από δύο αρχεία: το dump.fis και το wecs3subd.mdl. Στο πρώτο αρχείο βρίσκεται ο προγραμματισμός του FL, ενώ στο δεύτερο βρίσκεται η προσομοίωση της Α/Γ.

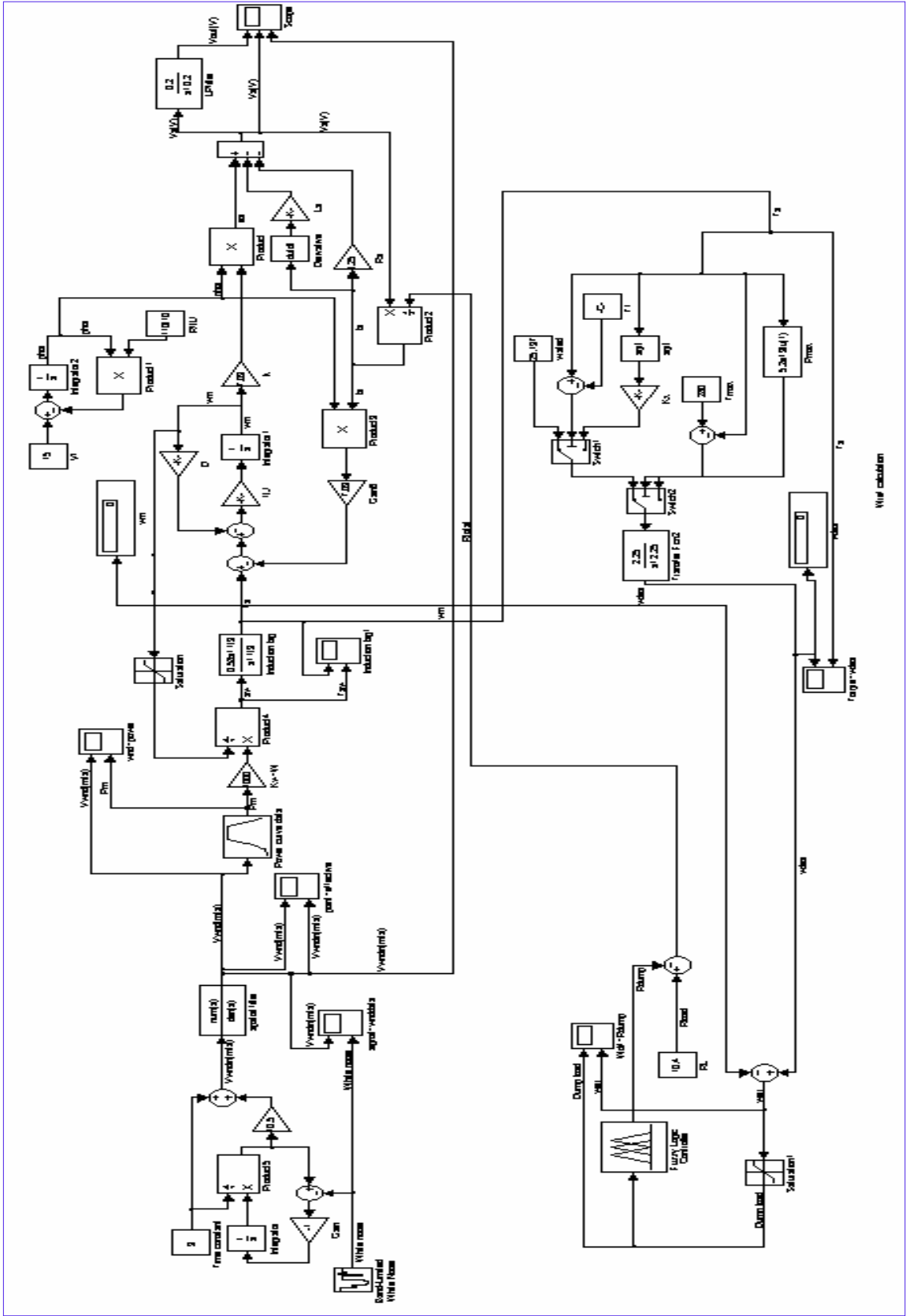
Στο αρχείο wecs3subd.mdl βρίσκει κανείς τα επιμέρους τμήματα (subsystems) τα οποία συγκροτούν το κύκλωμα του μοντέλου της ανεμογεννήτριάς μας και τα οποία είναι τα εξής:

- Wind field
- Rotor aerodynamics
- PM DC generator
- Dump load controller
- Elementary LP filter



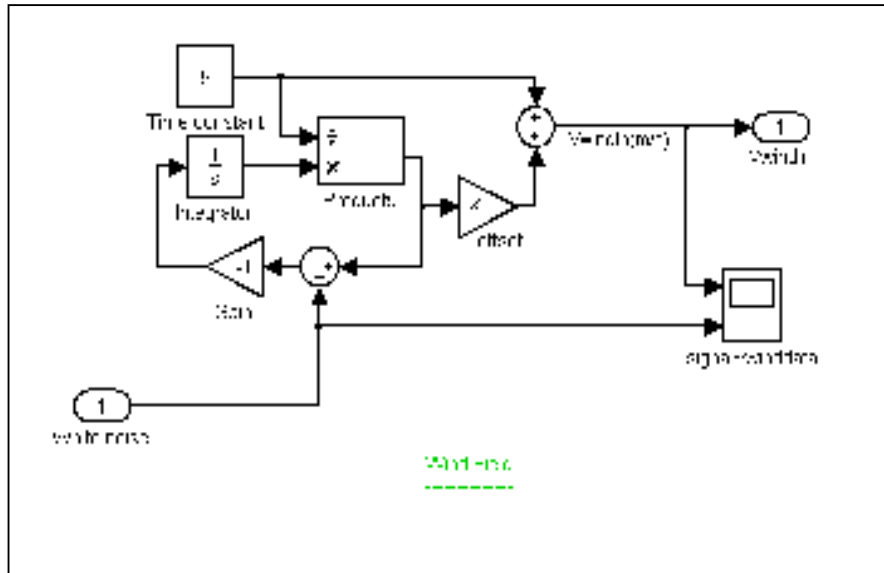
Εικόνα 29. Σχηματική απεικόνιση των subsystems του κυκλώματος της Α/Γ.

Το κύκλωμα της εικόνας 29 δίνεται αναλυτικότερα στην επόμενη σελίδα.



4.2.1. Άνεμος (Wind field)

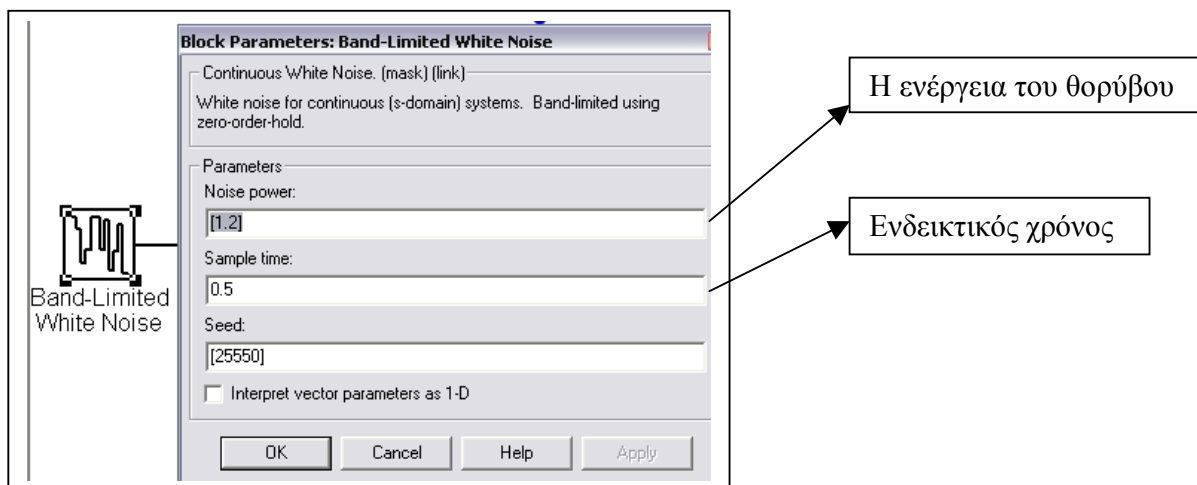
Το παρακάτω κύκλωμα αποτελεί το κομμάτι της εισόδου του ανέμου στην ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 30. Σχηματική απεικόνιση του subsystem Wind field του κυκλώματος της Α/Γ.

Προκειμένου να αναπαρισταθεί αξιόπιστα η δράση του ανέμου ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα για τη δημιουργία του κυκλώματος:

Από την είσοδο 1 (white noise) τοποθετείται ένα σήμα, το Band Limited White noise, που αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του ανέμου μαζί με το θόρυβο που δημιουργείται μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και των πτερύγιων. Στην εικόνα 31 φαίνεται ο πίνακας παραμέτρων του Band Limited White noise ο οποίος έχει δημιουργηθεί με βάση τις ανεμολογικές κατασκευαστικές αντοχές της ανεμογεννήτριας καθώς και από μετρήσεις που έχουν γίνει σχετικά με τον συνδυασμό άνεμος – θόρυβος.



Εικόνα 31. Οι παράμετροι του Band Limited White noise.

Στη συνέχεια τοποθετείται ένα σταθερό βήμα (Time constant $T_v = 9$ s) το οποίο καταλήγει σε ένα product όπου διαιρείται.

Η αρχική ταχύτητα με το θόρυβο ($V'_{windin} + m(t)$) κατά τη πορεία τους μέσα σε αυτό το κύκλωμα ολοκληρώνεται και το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι η αρχική ταχύτητα χωρίς το θόρυβο. Το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού και της διαίρεσης του σταθερού βήματος T_v και της αρχικής ταχύτητας καταλήγει σε έναν αντισταθμιστή (offset $-K$ - όπου είναι ίσο με 10.5 m/s) όπου ανυψώνεται και προστίθεται με την τιμή του βήματος T_v , με τελικό αποτέλεσμα την τελική ταχύτητα V_{windin} που εισέρχεται στον ρότορα.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη συγκεκριμένη διαδικασία στο κύκλωμα δίνονται παρακάτω:

Εξισώσεις :

$$\frac{dV'_{windin}}{dt} = \frac{1}{T_v} V'_{windin} + m(t)$$

$$V_{windin} = V'_{windin} + b$$

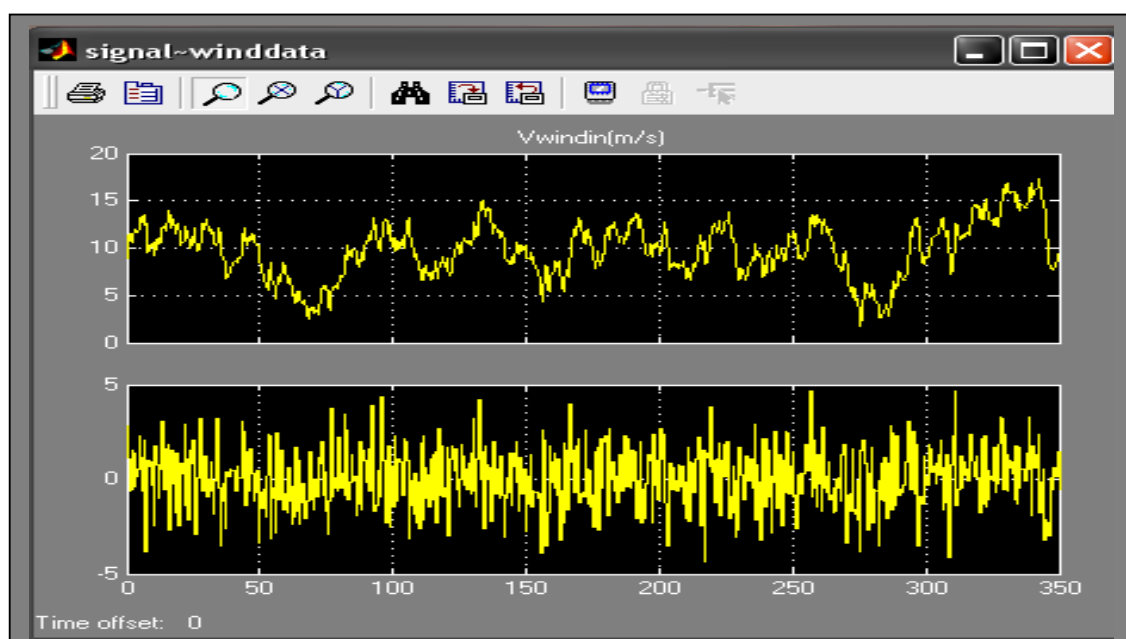
Wind speed data : V_{windin} (m/s)

Whitenoise : $m(t)$

Timeconstnt : $T_v = 9$ sec

Offset : $b = 10.5$ (m / s)

Στο επάνω μέρος της οθόνης του scope (signal – winddata) βλέπουμε τη μεταβολή της τελικής ταχύτητας του V_{windin} συναρτήσει του χρόνου, ενώ στο κάτω το εύρος του θορύβου μαζί με την αρχική ταχύτητα V'_{windin} το οποίο κυμαίνεται από -5 έως +5 προερχόμενο από το Band Limited White noise που είναι συνδεδεμένο στην είσοδο.



Το συγκεκριμένο spatial filter δεν είναι τίποτα άλλο από μια συνάρτηση μεταφοράς όπου οι τιμές της καθορίζονται από τη λύση της παρακάτω συνάρτησης δηλαδή της V_{windin}/V_{wind} .

Transfer function :

$$\frac{V_{windin}}{V_{wind}} = \frac{1.414+s\beta}{(1.414+0.7417\beta s)(1+1.35\beta)}$$

Effective wind speed : V_{wind} (m/s)

Size factor : $\beta = \frac{1.3R}{V_{avg}}$ (simplified)

Rotor Rad $R = 2.25$ m

Avg. speed : $V_{avg} = 7$ m/s

Μετά από αντικατάσταση των σταθερών τιμών η λύση της συνάρτησης είναι:

$$\frac{V_{windin}}{V_{wind}} = \frac{1.414+0.3656s}{0.1337s^2 + 2.648s + 1.414}$$

Στη συνέχεια η ταχύτητα (V_{wind}) εισέρχεται στο Power curve όπου είναι σχεδιασμένο με βάση τις χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος της Α/Γ.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην πρόβλεψη της καμπύλης ισχύος βασίζεται στο συνδυασμό (ταίριασμα) της απόδοσης σε ενέργεια που παράγεται από το ρότορα, ως μία συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και της ταχύτητας περιστροφής, με την ενέργεια που παράγεται από τη γεννήτρια, επίσης ως μία συνάρτηση της περιστροφικής ταχύτητας.

$$P_{\rho\acute{o}\tau\omicron\rho\alpha} = C_p \eta^{1/2} \rho \pi R^2 U^3$$

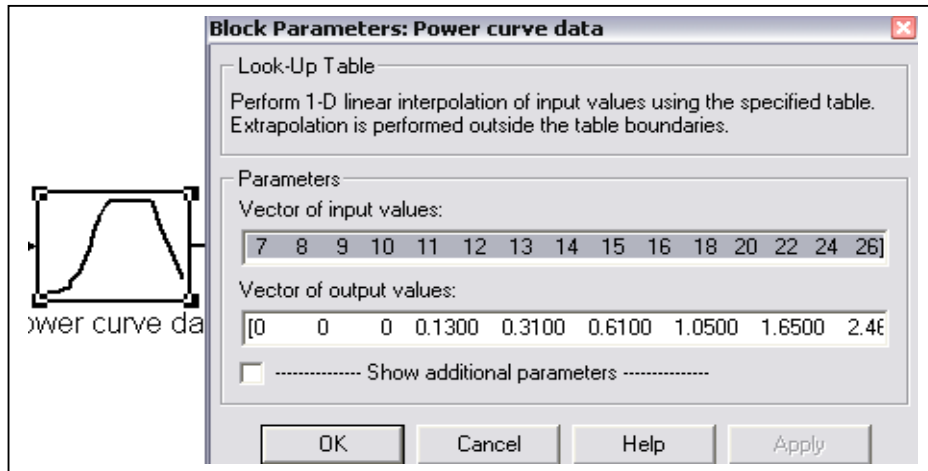
όπου, η = αριθμός περιστροφών

ρ = πυκνότητα ανέμου

R = ακτίνα ρότορα

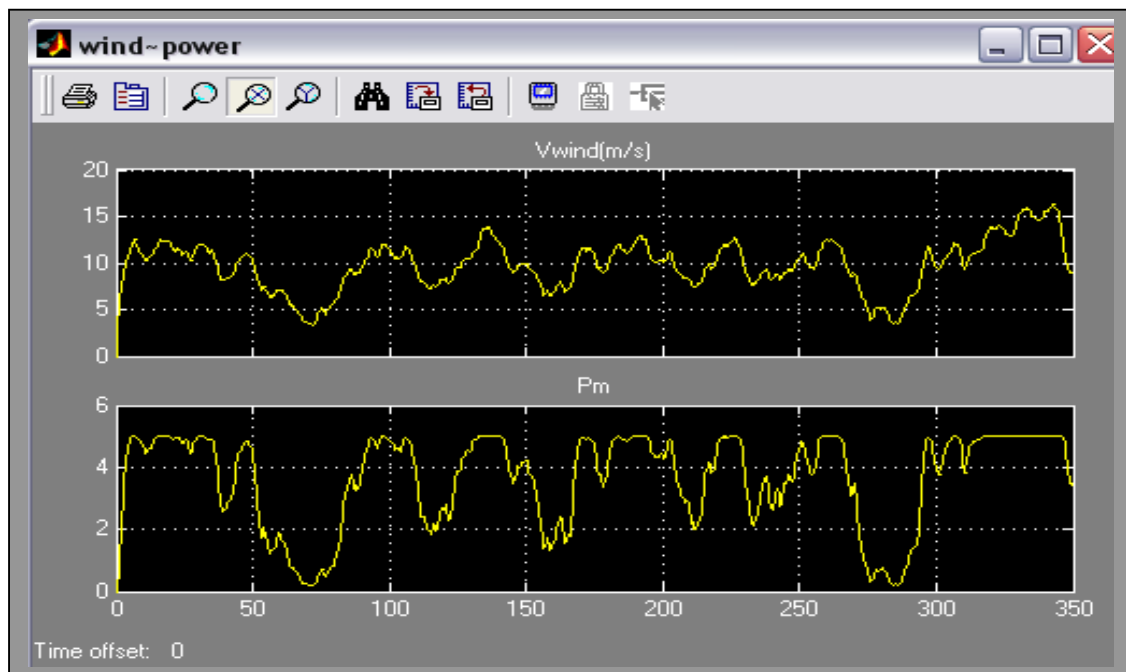
U = ταχύτητα ανέμου

Στην εικόνα 33 φαίνονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό της καμπύλης του Power curve. Στην πρώτη γραμμή (Vector of input values) είναι η τιμές της ταχύτητας, ενώ στη δεύτερη γραμμή (Vector of output values) είναι τιμές της ισχύος στις αντίστοιχες τιμές των ταχυτήτων.



Εικόνα 33. Power Curve Data.

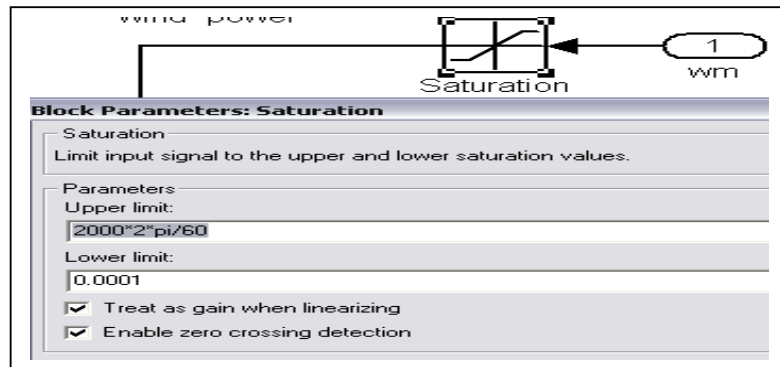
Στο παρακάτω διάγραμμα με τίτλο wind power παρατηρούνται δυο διαγράμματα, το πρώτο είναι της μεταβολής της ταχύτητας σε συνάρτηση με το χρόνο και το δεύτερο της ισχύος στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές των ταχυτήτων. Από το δεύτερο διάγραμμα φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή της ισχύος δεν παίρνει τιμή μεγαλύτερη του 5, που είναι και ο κατασκευαστικός περιορισμός της μηχανής. Επίσης σε σύγκριση μεταξύ των δύο διαγραμμάτων, παρατηρείται ότι όπου υπάρχει πτώση της ταχύτητας υπάρχει και μείωση της ισχύος και αντίστροφα.



Μετάπειτα η προερχόμενη ισχύς από το Power Curve εισέρχεται σε έναν ρυθμιστή (Gain -K-) και το αποτέλεσμα του ρυθμιστή καταλήγει σε έναν product όπου και πολλαπλασιάζεται. Ταυτόχρονα στον product εισάγεται η σταθερή τιμή της ταχύτητα

περιστροφής του ρότορα ω_m (rad/s), προερχόμενη από τη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (DC Generator) η όποια και διαιρείται.

Όπως διακρίνεται η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα ω_m (rad/s) πριν καταλήξει στον product εισέρχεται σε έναν μη γραμμικό ελεγκτή κόρου (Saturation) με τον οποίο επιτυγχάνουμε να οδηγήσουμε το σήμα εξόδου σε μια σταθερή τιμή, όταν το σήμα εισόδου την ξεπερνά (τιμή κόρου).



Εικόνα 34. Μη γραμμικός ελεγκτής κόρου Saturation.

Οι ρυθμίσεις που μπορούν να γίνουν στον ελεγκτή μέσω του παραθύρου των παραμέτρων είναι η δήλωση των ορίων για τον κόρο.

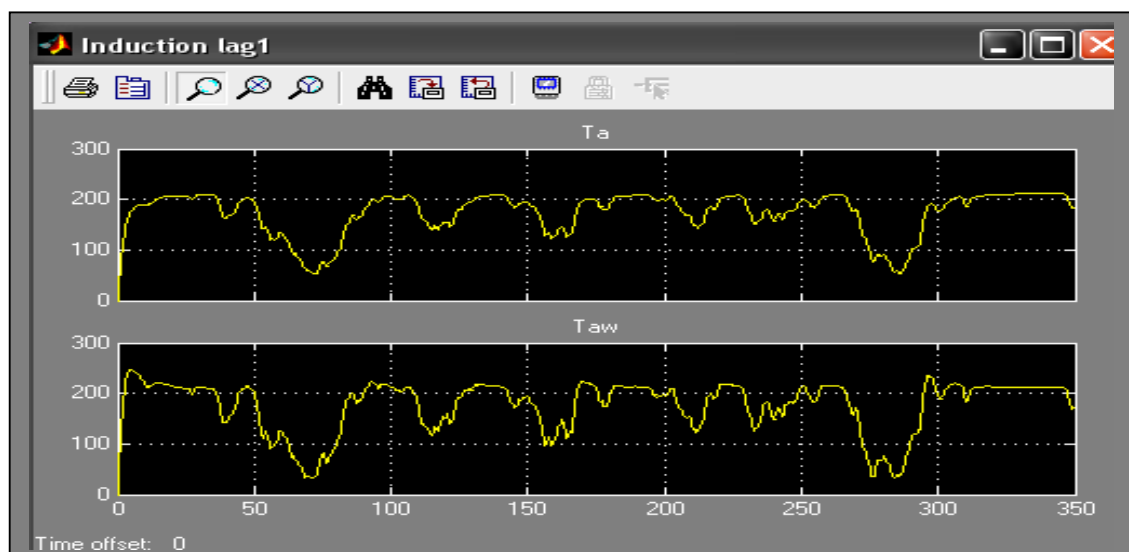
Το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει από την έξοδο του product είναι η ροπή των πτερυγίων T_{aw} όπου όταν αυτή καταλήξει στην συνάρτηση μεταφοράς (Induction lag) T_{aw}/T_a θα προκύψει η τελική ροπή του ρότορα T_a .

$$\frac{T_{aw}}{T_a} = \frac{0.58s + 0.11}{s + 0.11}$$

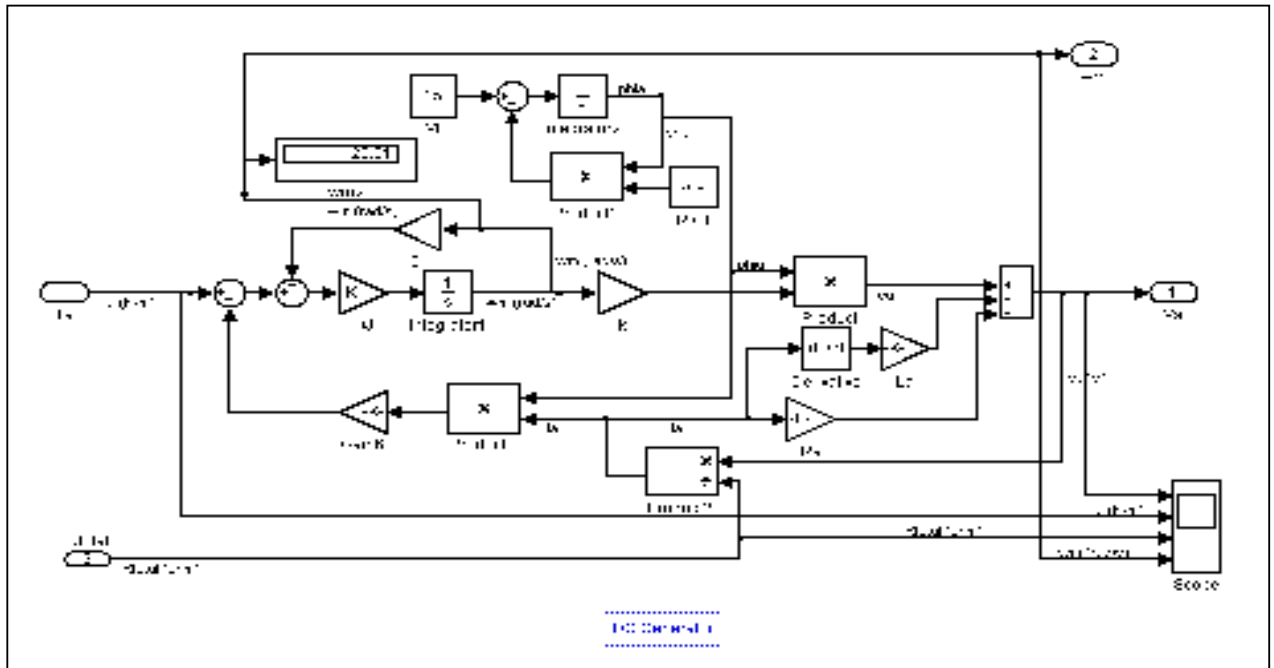
Ροπή του πτερυγίου : T_{aw}

Ροπή του ρότορα : T_a

Στο παρακάτω διάγραμμα με την ονομασία Induction lag 1 φαίνονται οι κυματομορφές των ροπών τόσο του ρότορα όσο και των πτερυγίων.

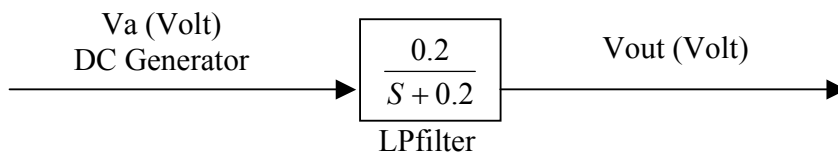


4.2.3. Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (DC Generator)



Εικόνα 35. Σχηματική απεικόνιση του subsystem DC Generator του κυκλώματος της A/Γ.

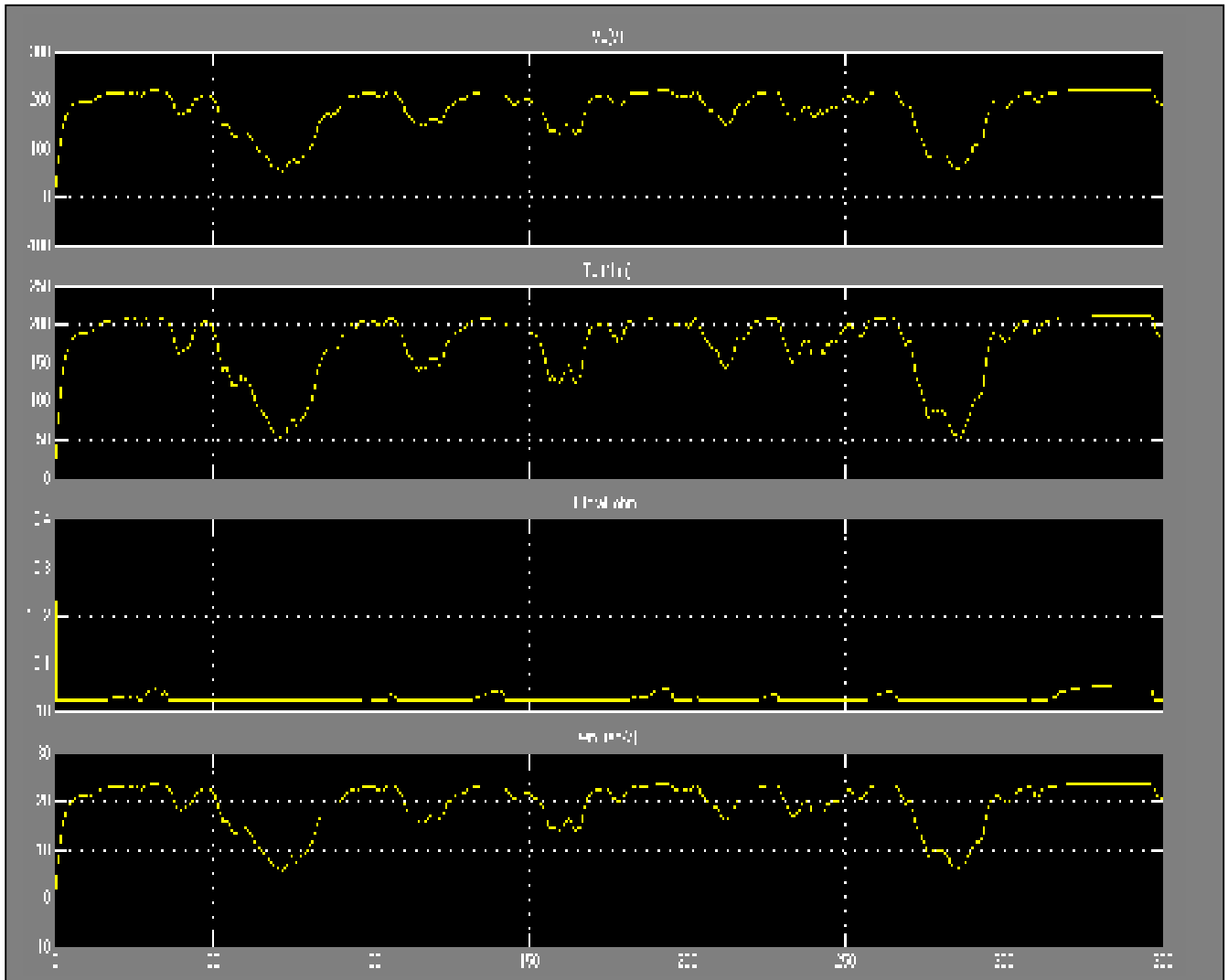
Στο κύκλωμα της εικόνας 35 απεικονίζεται η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος της ανεμογεννήτριας. Σε αυτήν εισέρχεται η ροπή του ρότορα T_a και η ωμική αντίσταση R_{total} (Ohm) προερχόμενη από τον controller της οποίας η τιμή δεν είναι σταθερή. Από αυτήν εξέρχονται η ταχύτητα ω_m του ρότορα και η τάση V_a (Volt). Η τάση V_a (Volt) είναι η τελική τάση του DC Generator αλλά όχι και της ανεμογεννήτριας. Έτσι λοιπόν η τελική V_{out} της A/Γ είναι η V_a όταν αυτή εισέλθει σε ένα LPfilter.



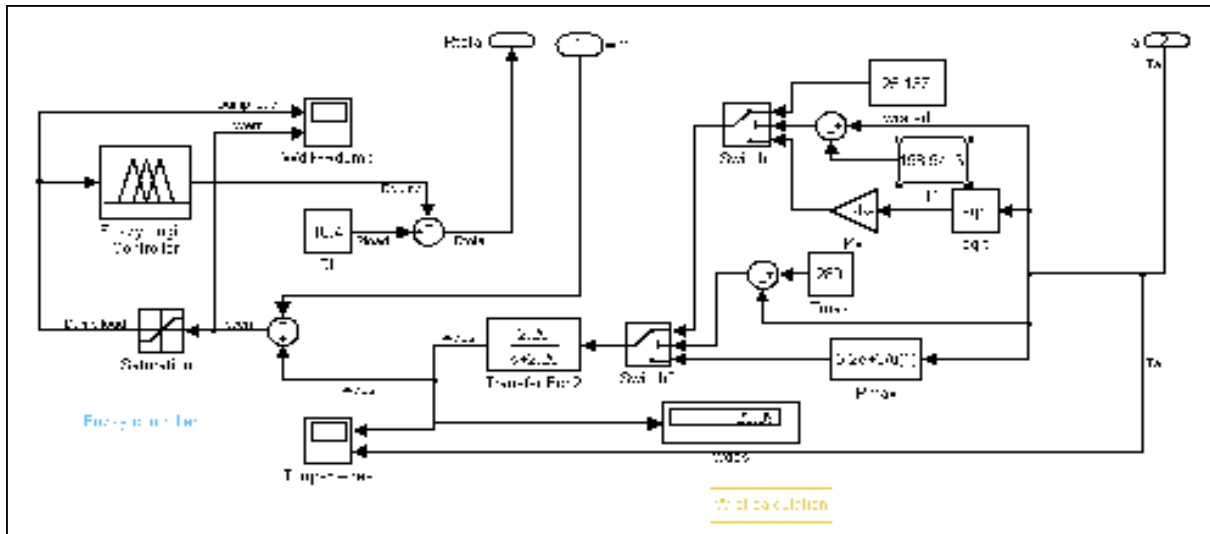
Το αξιοσημείωτο σε αυτό το κομμάτι είναι ότι εδώ δημιουργείται ηλεκτρονικά με βάση τις προδιαγραφές της γεννήτριας η ω_m . Αυτή, όπως είδαμε στο subsystem του Rotor Aerodynamics, αλλά και που θα δούμε στο subsystem του Controller, είναι εκείνη η οποία επηρεάζει αλλά και δημιουργεί τα μεγέθη που εισέρχονται στον DC Generator δηλαδή τη ροπή T_a και την αντίσταση R_{total} .

Όλα τα μεγέθη καθώς και όλα τα subsystems καταλήγουν στον DC Generator όπου δημιουργείται η τάση V_a της γεννήτριας.

Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε τη συνολική συμπεριφορά όλων των μεγεθών που απασχολούν αυτό το κύκλωμα και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αλληλεξάρτηση και τη σχέση τους.



4.2.4. Ελεγκτής (Controller)



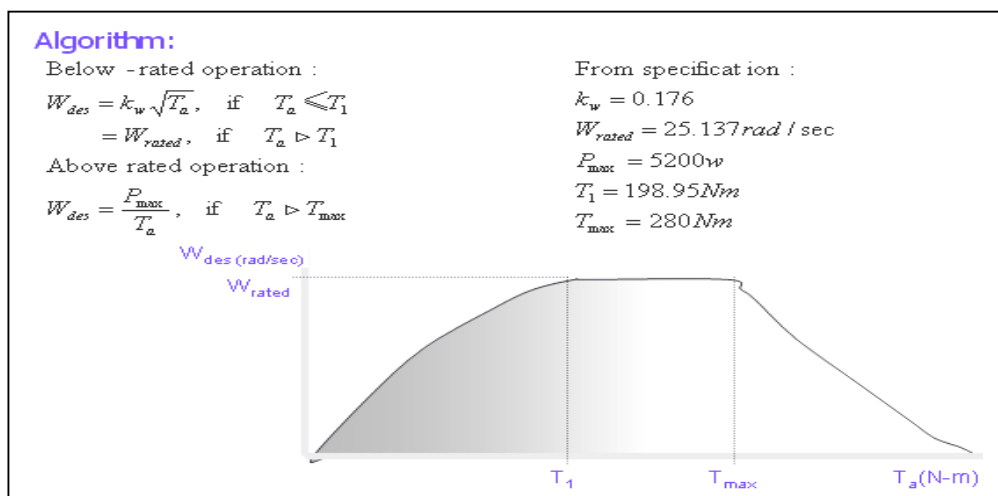
Εικόνα 36. Σχηματική απεικόνιση του subsystem Controller του κυκλώματος της Α/Γ.

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ο κύριος ελεγκτής (Controller) της ανεμογεννήτριας. Στον ελεγκτή παρατηρούμε ότι εισέρχονται η ροπή T_a (N-m) και η ταχύτητα περιστροφής ω_m (rad/s) του ρότορα, ενώ από αυτόν εξέρχεται η αντίσταση R_{total} .

Ο ελεγκτής διακρίνεται σε δυο μέρη:

- α) Στο μέρος «Wref calculation» όπου υπολογίζεται το σφάλμα w_{err} της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα (input Fuzzy logic controller).
- β) Στο μέρος του «Fuzzy logic controller» με τον οποίο επιτυγχάνουμε τον υπολογισμό (output Fuzzy logic controller) της R_{dump} .

Στο πρώτο μέρος του κυκλώματος εισέρχεται η ροπή του ρότορα T_a . Μετά από συνδυασμό δυο διακοπών $switch1$, $switch2$ προκύπτουν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί για τον υπολογισμό της επιθυμητής ταχύτητας περιστροφής του W_{des} . Οι σχέσεις οι οποίες συνδέουν τα δυο παραπάνω μεγέθη αναγράφονται στην εικόνα 37.



Εικόνα 37. Σχέσεις ταχύτητας περιστροφής και ροπών του ρότορα.

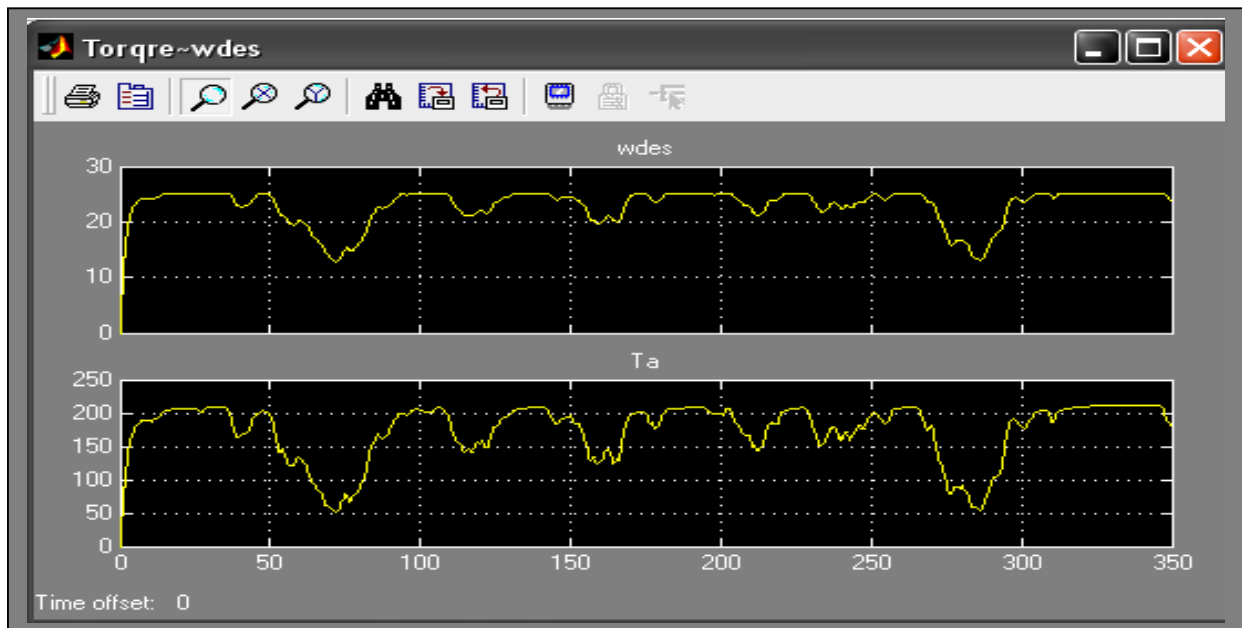
Το παραπάνω διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητα του ρότορα W_{des} σε συνάρτηση με την ροπή χωρίζεται σε τρία τμήματα. Για το διάστημα από 0 έως T_1 τα μεγέθη είναι ανάλογα μεταξύ τους, δηλαδή όσο αυξάνεται η ταχύτητα W_{des} τόσο αυξάνεται και η ροπή T_a . Για το διάστημα από T_1 έως T_{max} όσο και να αυξάνεται η ροπή, η τιμή της ταχύτητας παραμένει σχεδόν σταθερή. Τέλος, από T_{max} και μετά βλέπουμε ότι η σχέση των δυο μεγεθών γίνεται αντιστρόφως ανάλογη. Επίσης στην εικόνα δίνονται οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της W_{des} ανάλογα με τις τιμές που παίρνει η T_a .

Όπως προαναφέρθηκε η παραπάνω διαδικασία έχει ως στόχο να υπολογιστεί το W_{des} . Απώτερος σκοπός είναι να υπολογισθεί το σφάλμα της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα w_{err} δρώντας έτσι ως ένας συνδετικός κρίκος μεταξύ των δυο επιμέρους τμημάτων του Controller.

Το σφάλμα w_{err} της ταχύτητας του ρότορα είναι η διάφορα μεταξύ της επιθυμητής ταχύτητας του ρότορα W_{des} και της πραγματικής w_m .

$$W_{err} = W_{des} - w_m$$

Όλα όσα αναφέραμε υπολογίζονται μέσα στο «Wref calculation» και τα αποτελέσματα που προκύπτουν διαγράφουν την παρακάτω καμπύλη. Έτσι λοιπόν στο παρακάτω διάγραμμα έχουμε όλα τα αποτελέσματα της W_{des} σε σύγκριση με τις τιμές που παίρνει η T_a .



Από το διάγραμμα του Torque – W_{des} και συγκρίνοντας τις δύο αυτές κυματομορφές επαληθεύονται τα όσα είπαμε παραπάνω για τις μεταβολές των δύο αυτών μεγεθών. Δηλαδή αυτά τα δυο μεγέθη μεταβάλλονται αντίστοιχα και στο μόνο που διαφέρουν είναι τα εύρη των τιμών που παίρνουν.

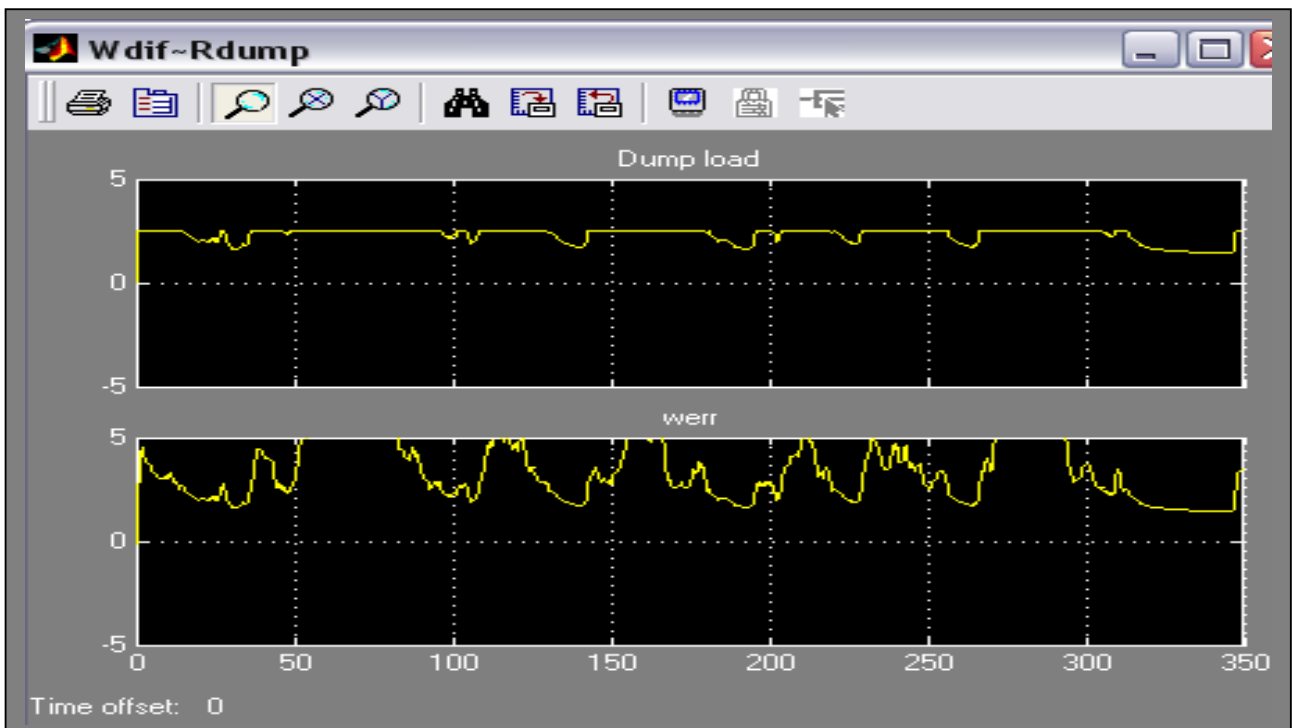
Στο δεύτερο τμήμα του κυκλώματος «Fuzzy logic controller» επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της R_{dump} με απώτερο σκοπό τον μετέπειτα υπολογισμό της R_{total} . Ο

υπολογισμός της R_{dump} πραγματοποιείται ακολουθώντας την εξής διαδικασία: Παίρνοντας την υπολογισμένη από το πρώτο τμήμα W_{des} και σε συνδυασμό με την w_m που προέρχεται από τον generator και με βάση την σχέση που ισχύει μεταξύ τους δηλαδή $W_{err} = W_{des} - w_m$ υπολογίζουμε το σφάλμα W_{err} . Το W_{err} εισέρχεται σε έναν εκλεκτή κόρου (Saturation1), και το αποτέλεσμα της W_{err} από την έξοδο του Saturation1 είναι το Dumpload που αποτελεί το input του Fuzzy logic controller. Το αποτέλεσμα (output) της διαδικασίας που πραγματοποιείται στον Fuzzy logic controller είναι το R_{dump} , που αφαιρείται από την $R_{load} = 10.4 \text{ Ohm}$ προκειμένου να υπολογισθεί η R_{total} .

$$R_{total} = R_{load} - R_{dump}$$

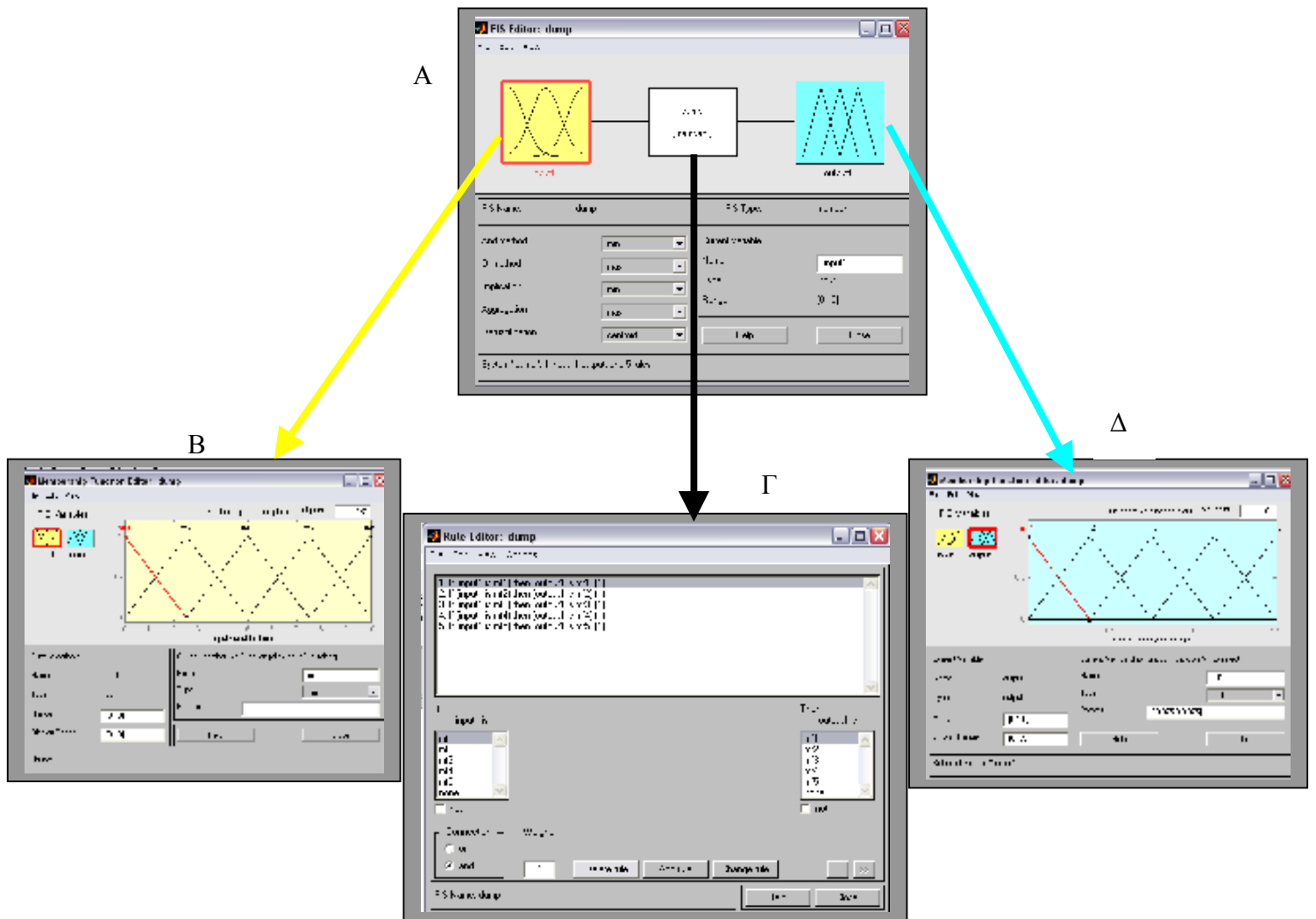
Όπου $R_{load} = 10.4 \text{ Ohm}$

Στο κάτω μέρος της οθόνης του scope ($W_{dif} - R_{dump}$) δείχνεται η κυματομορφή της w_{err} προτού εισέλθει στο Saturation1 το οποίο αφαιρεί όλες τις τιμές που είναι μεγαλύτερες του 2,5 ομαλοποιώντας τη μορφή της καμπύλης η οποία πλέον αποτελεί την καμπύλη του Dumpload (πάνω μέρος της οθόνης).



Ο συγκεκριμένος F/L Controller αποτελείται από μια είσοδο (input), το Dumpload, και μια έξοδο (output), την R_{load} , καθώς και από ένα παράθυρο όπου στοιχειοθετούμε - οριοθετούμε τους κανόνες συμπεριφοράς των αποτελεσμάτων. Τόσο η είσοδος όσο και η έξοδος αποτελούνται από πέντε συναρτήσεις συμμετοχής (membership functions [MF]) οι οποίες είναι τριγωνικής μορφής. Κάθε συνάρτηση συμμετοχής δείχνει τα πιθανά ενδεχόμενα στα οποία μπορεί να βρίσκεται η Dumpload στην είσοδο του FL, και με βάση την κατάσταση και τους κανόνες που έχουμε δώσει, περνούμε την τιμή της R_{load} .

Αναλυτικότερα η δομή του F/L Controller δείχνεται στην παρακάτω εικόνα 38 όπου στο παράθυρο B είναι η είσοδος, στο Δ η έξοδος και το Γ είναι το παράθυρο των κανόνων.



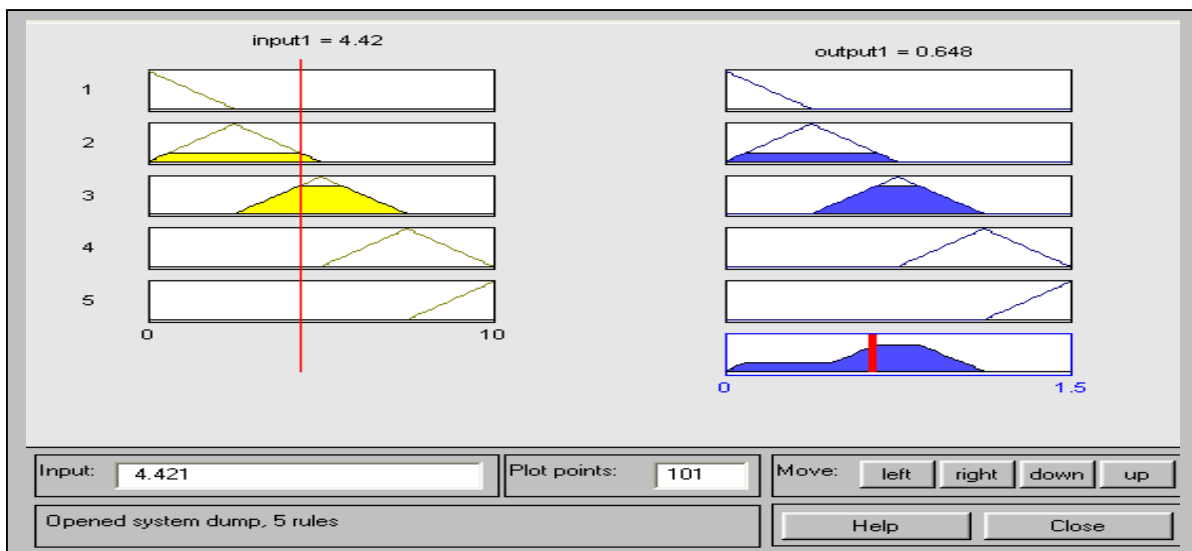
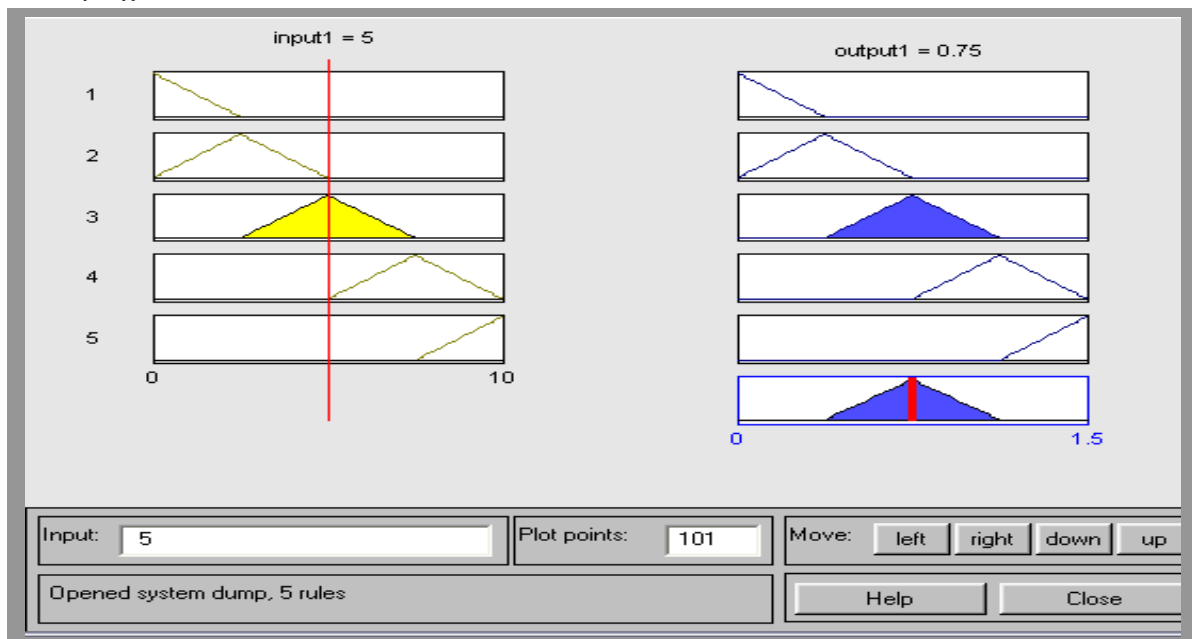
Εικόνα 38. Η δομή του F/L Controller.

Οι κανόνες οι οποίοι ορίστηκαν για το σχεδιασμό του FL είναι οι παρακάτω:

1. IF (INPUT1 IS MF1) THEN (OUTPUT1 IS MF1)
2. IF (INPUT1 IS MF2) THEN (OUTPUT1 IS MF2)
3. IF (INPUT1 IS MF3) THEN (OUTPUT1 IS MF3)
4. IF (INPUT1 IS MF4) THEN (OUTPUT1 IS MF4)
5. IF (INPUT1 IS MF5) THEN (OUTPUT1 IS MF5)

Τα πιθανά αποτελέσματα που μπορούν να προκύψουν από το συνδυασμό των παραπάνω κανόνων είναι πολυάριθμα. Ένα χαρακτηριστικό αποτέλεσμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

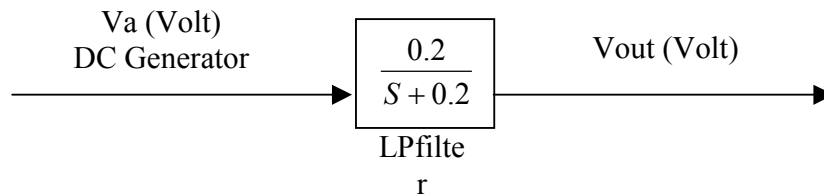
Όταν ο κόκκινος δείκτης βρίσκεται στη συγκεκριμένη περιοχή του input στη MF3 χωρίς να εισχωρεί στις περιοχές των άλλων MF τότε δεν προκύπτει ούτε ένωση, αλλά ούτε και τομή των διαφορετικών περιοχών, και το αποτέλεσμα βάση των κανόνων, είναι αυτό που δείχνει ο έντονος κόκκινος δείκτης στο κάτω δεξί μέρος του παραθύρου της εικόνας 39. Φυσικά κάθε φορά που αλλάζει η ένδειξη στο input θα αλλάζει και το αποτέλεσμα στο output και είναι πιθανόν να προκύψουν συνδυασμοί ένωσης και τομής περιοχών.



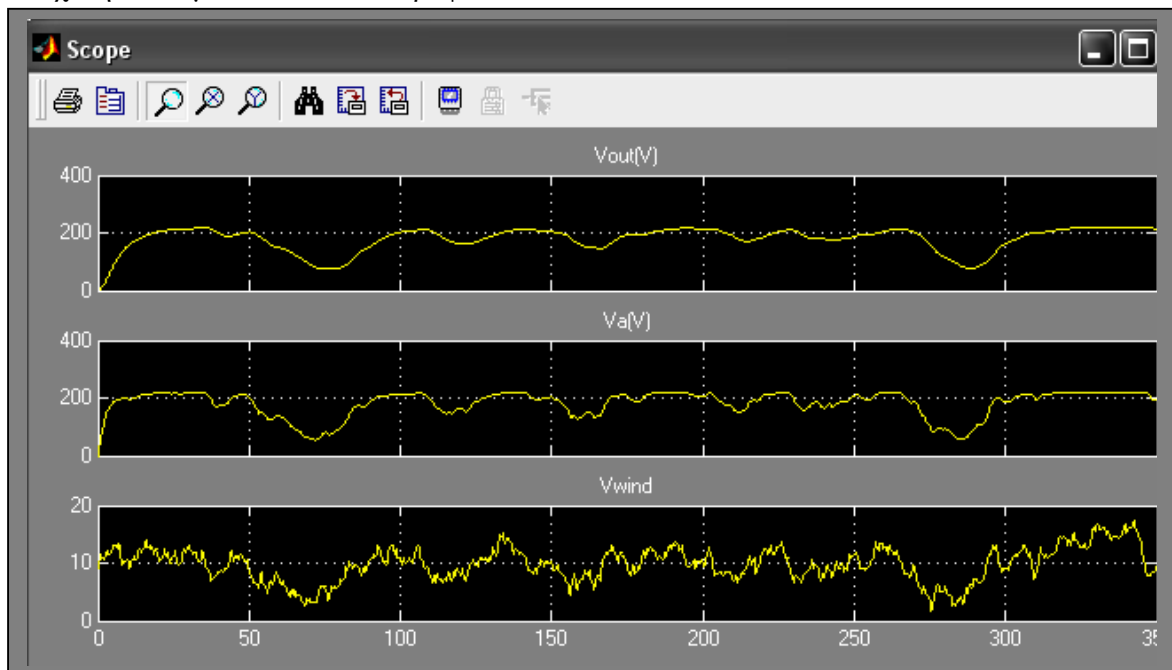
Εικόνα 39. Παράθυρο rules viewer.

4.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΤΕΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοπτικά το τελικό αποτέλεσμα είναι να πάρουμε στην έξοδο την τελική τιμή της V_{out} . Αυτή είναι προερχόμενη από την V_a , την τελική τάση του generator, αφού εισέλθει σε ένα LPfilter όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Το τελικό αυτό αποτέλεσμα της V_{out} διαγράφεται στο παρακάτω scope σε αντιπαράθεση με την V_a του generator και την ταχύτητα του ανέμου V_{wind} . Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την σύγκριση των κυματομορφών είναι ότι και οι τρεις έχουν την ίδια μορφή που πιστοποιεί και την ορθή λειτουργία του μοντέλου της προσομοίωσης μας. Βλέπουμε ότι η Α/Γ δίνει την μέγιστη δυνατή τάση στην μέγιστη ταχύτητα ανέμου και το αντίστροφο.



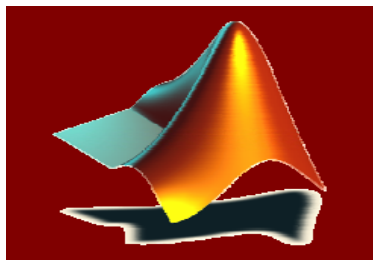
Το σπουδαιότερο συμπέρασμα είναι πόσο και πως η τεχνολογία σε συνεργασία με τη φύση και τα φαινόμενα της, μπορούν να βοηθήσουν στην λύση του ενεργειακού πρόβλημα των ημερών μας. Στην προσπάθεια μας αυτή να δείξουμε την λειτουργία μιας μικρής μηχανής και τι αυτή μπορεί να προσφέρει ενεργειακά, ασχοληθήκαμε με έννοιες που πρότινος μας ήταν άγνωστες ή δεν είχαμε ασχοληθεί, και που έπρεπε να γίνουν κατανοητές για να μπορέσουμε να επιτύχουμε το στόχο μας σε αυτήν την εργασία, όπως η ασαφής λογική, η σημασία των ΑΠΕ, των φυσικών πόρων και την χρήση μιας πτυχής των δυνατοτήτων του λογισμικού που μας έδωσε την δυνατότητα να απεικονίσουμε μια γεννήτρια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Dubois D.J. and Prade H.M. 1980. Fuzzy Sets and Systems. Academic Press, San Diego CA.
- [2] Jang J.-S.R.1993. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23: 3.
- [3] Καλδέλλης Ι.Κ. 1999. Διαχείριση της αιολικής ενέργειας.Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης.
- [4] Manwell J.F., McGowan J.G. and Rogers A.L. Wind Energy Explained. Theory, design and application.University of Massachusetts, Amherst, USA.
- [5] MATLAB 6.5 Manual. The Mathworks. 2002.
- [6] Μπεργελές Γ. 2000. Ανεμοκινητήρες. Εκδόσεις Συμεών.
- [7] Sugeno M. And Yasukawa T. 1993. A Fuzzy-Logic-Based Approach to Qualitive Modeling. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol.1: 1.
- [8] Tagaki T and Sugeno M.1985. Fuzzy Identification of Systems, and Its Applications. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 15: 1.
- [9] Χατζίκος Ε.Β. 2003. MATLAB 6 για Μηχανικούς. Εκδόσεις Τζιόλα.
- [10] Zadeh L.A. 19675. The concept of Linguistic Variable and its Aplication to Approximate Reasoning, Part 1. Information Sciences, vol. 8.
- [11] Zadeh L.A. 1965. Fuzzy Sets, Information and Control, vol. 8.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ MATLAB ~ SIMULINK

Εισαγωγή.



Το MATLAB (Mathworks.) παρέχει ένα δυναμικό, εύχρηστο και ανοικτό υπολογιστικό περιβάλλον για υλοποίηση επιστημονικών εφαρμογών σε ένα μεγάλο φάσμα πεδίων, όπως τη Γραμμική Άλγεβρα, Στατιστική, Εφαρμοσμένα Μαθηματικά, Αριθμητική Ανάλυση και Επιστημονικό Υπολογισμό, Επεξεργασία Σημάτων και Εικόνας, Θεωρία Ελέγχου, Θεωρία Βελτιστοποίησης και Γραφικά. Έχει υλοποιηθεί σε πολλές λειτουργικές πλατφόρμες (όπως Windows, Macintosh OS και Unix) και δύο βασικές εκδόσεις, την επαγγελματική (professional edition) και την εκπαιδευτική (student edition).

Το περιβάλλον του Matlab υποστηρίζει ένα μεγάλο αριθμό ενδογενών λειτουργιών και συναρτήσεων καθώς και εξωτερικές βιβλιοθήκες (Toolboxes) για εξειδικευμένες περιοχές εφαρμογών. Υποστηρίζει επίσης μία ευέλικτη, απλή και δομημένη γλώσσα προγραμματισμού (script language) με πολλές ομοιότητες με την Pascal και παρέχει δυνατότητες εύκολης δημιουργίας, διασύνδεσης και χρήσης βιβλιοθηκών σε κώδικα γραμμένο στη γλώσσα αυτή (M - files).

Το Matlab εκτελεί από απλούς μαθηματικούς υπολογισμούς μέχρι και προγράμματα με εντολές παρόμοιες με αυτές που υποστηρίζει μια γλώσσα υψηλού επιπέδου. Συγκεκριμένα εκτελεί απλές μαθηματικές πράξεις, αλλά εξίσου εύκολα χειρίζεται μιγαδικούς αριθμούς, δυνάμεις, ειδικές μαθηματικές συναρτήσεις, πίνακες, διανύσματα και πολυώνυμα. Μπορεί επίσης να αποθηκεύει και να ανακαλεί δεδομένα, να δημιουργεί και να εκτελεί ακολουθίες εντολών που αυτοματοποιούν διάφορους υπολογισμούς και να σχεδιάζει γραφικά.

Οι λειτουργίες του Matlab διακρίνονται στις τυποποιημένες, δηλαδή σε αυτές που χειρίζονται αριθμητικά δεδομένα και εξάγουν αριθμητικά αποτελέσματα, και στις συναρτήσεις του Symbolic Toolbox, οι οποίες χειρίζονται και υπολογίζουν συμβολικές εκφράσεις, δηλαδή επεξεργάζονται μαθηματικά σύμβολα.

Τι είναι το λογισμικό Matlab.

Το MATLAB είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστών για ανθρώπους που χρησιμοποιούν αριθμητικούς υπολογισμούς, ειδικά στη γραμμική άλγεβρα (πίνακες) και για όλες τις εφαρμογές που έχουν αναφερθεί στην προηγούμενη παράγραφο. Ξεκίνησε ως ένα πρόγραμμα "Εργαστηρίου Πινάκων" ("MATrix LABoratory") που είχε σκοπό να παρέχει αλληλεπιδρώσα προσπέλαση στις βιβλιοθήκες Linpack και Eispack. Αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1970 κυρίως από τον Cleve Moler για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων χωρίς τη γνώση Fortran από το χρήστη. Τη δεκαετία του 1980 επεκτάθηκε με τη προσθήκη υποπρογραμμάτων σε C για τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων. Το 1984 ιδρύεται η εταιρία Mathworks και αναλαμβάνει τη διάθεση στο εμπόριο, την εξέλιξη και την υποστήριξη του λογισμικού ώστε σήμερα αυτό να έχει αναπτυχθεί αρκετά και να αποτελεί ένα ισχυρότατο εργαλείο στην οπτικοποίηση, στον προγραμματισμό, στην έρευνα, στην επιστήμη των μηχανικών και στις επικοινωνίες.

Στο δυναμικό του Matlab συμπεριλαμβάνονται μοντέρνοι αλγόριθμοι, δυνατότητες χειρισμού τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων, και ισχυρά προγραμματιστικά εργαλεία. Το Matlab δεν είναι σχεδιασμένο για συμβολικούς υπολογισμούς, αλλά αντισταθμίζει αυτή την αδυναμία του επιτρέποντας στο χρήστη να συνδέεται άμεσα με το Maple. Η επιφάνεια αλληλεπίδρασης βασίζεται κυρίως σε κείμενο, γεγονός που μπορεί να συγχύσει μερικούς χρήστες.

Συνοπτικά οι δυνατότητες του Matlab είναι οι εξής:

- Λογισμικό υλοποίησης αλγορίθμων και διεξαγωγής υπολογισμών - Έρευνα, ανάπτυξη και επικύρωση αλγορίθμου.
- Σύστημα αλληλεπίδρασης με το χρήστη για πραγματοποίηση επιστημονικών υπολογισμών (πράξεις με πίνακες – επίλυση διαφορικών εξισώσεων- προσέγγιση γραφική απεικόνιση και ανάλυση δεδομένων – προσομοίωση συστημάτων Simulink κ.α.).
- Γλώσσα προγραμματισμού με δυνατότητες εξέλιξης στις απαιτήσεις κάθε χρήστη με προσθήκη βιβλιοθηκών συναρτήσεων και ειδικών εργαλείων (toolboxes).

Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα του Matlab.

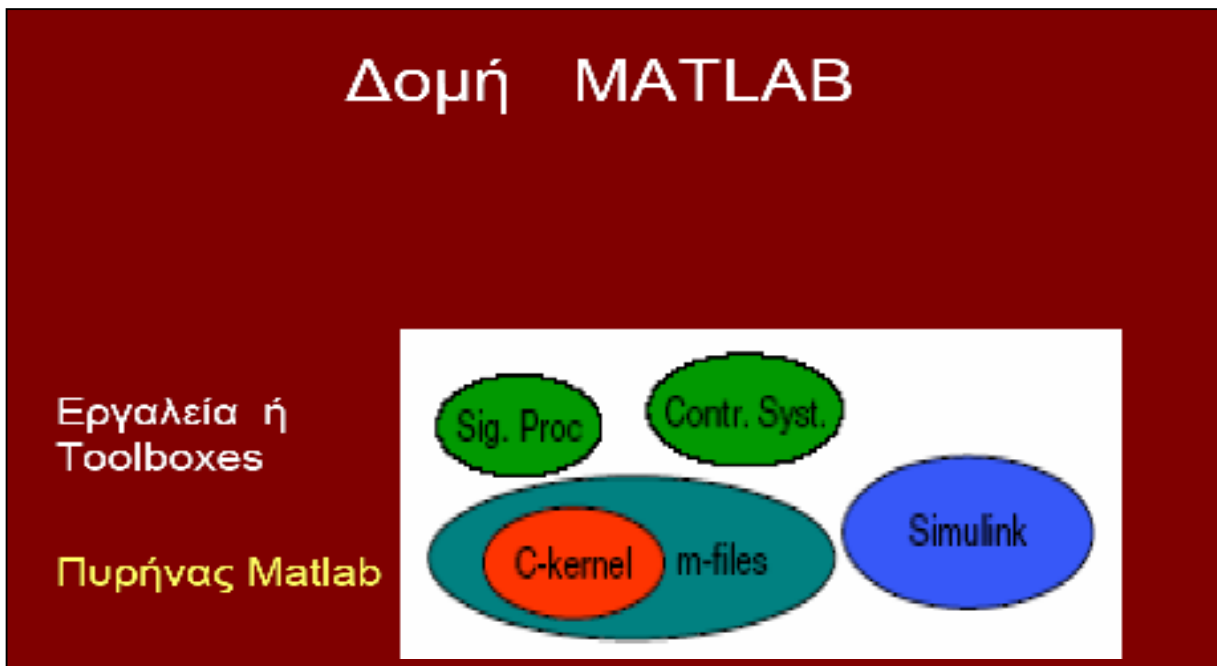
Πλεονεκτήματα:

- Ευκολότερη εκμάθηση από μια γλώσσα προγραμματισμού.
- Βελτιστοποιημένος κώδικας για διεξαγωγή υπολογισμών με πίνακες.
- Γλώσσα προγραμματισμού για ανάπτυξη εφαρμογών και ταυτόχρονα λογισμικό υλοποίησης επιστημονικών υπολογισμών.
- Εύκολος εντοπισμός και διόρθωση λαθών.
- Φιλικό περιβάλλον επικοινωνίας με το χρήστη.

Μειονεκτήματα:

- Εξειδικευμένη γλώσσα προγραμματισμού.
- Το λογισμικό MATLAB αναπτύχθηκε μόνο για διεξαγωγή επιστημονικών υπολογισμών κι έτσι δεν ενδείκνυται ή δεν υποστηρίζει την ανάπτυξη αλλού είδους εφαρμογών, όπως για παράδειγμα επεξεργασίας κειμένου.
- Οι αναπτυσσόμενες εφαρμογές υστερούν σε απόδοση από την άποψη του χρόνου εκτέλεσης σε σχέση με αντίστοιχες που αναπτύσσονται με τις κλασικές γλώσσες προγραμματισμού (C,C++,Fortrant).

Η Δομή του Matlab.



- **Optimization Toolbox.**
- **Robust Control Toolbox.**
- **Signal Processing Toolbox.**
- **Spline Toolbox.**
- **SIMULINK.**

M-Files.

Όταν για την επίλυση ενός προβλήματος έχουμε προς εκτέλεση μία μεγάλη ακολουθία εντολών (scripts), το Matlab δίνει τη δυνατότητα να τις αποθηκεύσουμε σε ένα αρχείο και να το εκτελούμε όποτε αυτό απαιτείται. Τα αρχεία αυτά ονομάζονται 'M-files' και έχουν την προσθήκη '.m'.

Τα M-files πρέπει να αποθηκεύονται σε έναν υποκατάλογο που ανήκει στο μονοπάτι εύρεσης του Matlab.

Δίνοντας το όνομα του αρχείου, αυτόματα το Matlab δέχεται ως είσοδο ακολουθιακά τις εντολές που είναι αποθηκευμένες σ' αυτό, τις οποίες και διερμηνεύει. Οι εντολές αυτές μπορεί να είναι οποιεσδήποτε μπορούν να δοθούν στη γραμμή εντολών του Matlab, οι εντολές ελέγχου ροής της γλώσσας script που είδαμε και κλήσεις άλλων M-files. Τα M-files προσφέρονται ιδιαίτερα για να περιλαμβάνουν συναρτήσεις στη γλώσσα script.

Οι βασικές βιβλιοθήκες δομικών στοιχείων του Simulink.

Βιβλιοθήκη	Δομικό στοιχείο	Λειτουργία
Sources -περιέχει μπλοκ τα οποία είναι πηγές σημάτων (δεν έχουν είσοδο, παράγουν ως έξοδο ένα σήμα)	Constant	Σταθερά
	Step	Βηματική συνάρτηση
	Ramp	Συνάρτηση αναρρίχησης
	Pulse generator	Γεννήτρια παλμών
	Random number	Γεννήτρια τυχαίου σήματος (κανονική κατανομή)
	Sine wave	Γεννήτρια ημίτονου
	Signal generator	Γεννήτρια σημάτων (παράγει διάφορες κυματομορφές)
Sinks -περιέχει μπλοκ τα οποία είναι στοιχεία «απορρόφησης» σημάτων (δεν έχουν έξοδο, δέχονται μόνο είσοδο)	Display	Οθόνη απεικόνισης τιμών
	Scope	Παλμογράφος
	Stop simulation	Τερματισμός προσομοίωσης
	To workspace	Αποθήκευση στο χώρο εργασίας
Continuous -περιέχει μπλοκ για τη μοντελοποίηση γραμμικών συστημάτων συνεχούς χρόνου	Derivative	Παραγωγική
	Integrator	Ολοκλήρωση
	State space	Μοντέλο συστήματος στο χώρο κατάστασης
	Transfer function	Μοντέλο συστήματος συνάρτησης μεταφοράς
	Zero pole	Μοντέλο συστήματος πόλων-μηδενικών
Nonlinear -περιέχει μπλοκ που μοντελοποιούν μη γραμμικά στοιχεία	Saturation	Στοιχείο κόρου
	Manual switch	Χειροκίνητος διακόπτης
	Switch	Διακόπτης
	Quantizer	Κβαντιστής σήματος
Math -περιέχει μπλοκ που μοντελοποιούν μαθηματικές πράξεις και συναρτήσεις	Abs	Απόλυτη τιμή
	Gain	Κέρδος
	Math function	Διάφορες μαθηματικές συναρτήσεις
	Matrix gain	Πίνακας κερδών
	MinMax	Ελάχιστο ή μέγιστο
	Product	Πολλαπλασιασμός ή Διάρθρωση
	Rounding function	Συνάρτηση στρογγύλευσης
	Sign	Εύρεση προσήμου
	Slider gain	Μεταβλητό κέρδος
	Sum	Άθροιση ή αφαίρεση
	Trigonometric function	Τριγωνομετρικές συναρτήσεις
Signals and systems - περιέχει στοιχεία διασύνδεσης σημάτων και συστημάτων	Ln1	Θύρα εισόδου υποσυστήματος ή μοντέλου
	Demux	Αποπλέκτης σημάτων
	Mux	Πολυπλέκτης σημάτων
	Terminator	Τερματισμός ασύνδετων σημάτων (δέχεται μόνο είσοδο)
	Out1	Θύρα εξόδου υποσυστήματος ή μοντέλου
Control Systems Toolbox -περιέχει στοιχεία μοντελοποίησης συστημάτων έλεγχου	LTI System	Μοντελοποίηση γραμμικού χρονικά αναλλοίωτου συστήματος με διάφορους τρόπους (μέσω συνάρτησης μεταφοράς, στο χώρο κατάστασης, αναπαράσταση πόλων-μηδενικών)

Στον πίνακα που ακολουθεί περιγράφονται ορισμένα από τα δομικά στοιχεία των βιβλιοθηκών του Simulink, τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως κατά την μοντελοποίηση γραμμικών χρονικά αναλλοίωτων συστημάτων συνεχούς χρόνου. Πολλά απ' τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και κατά την διάρκεια την μοντελοποίησης του συγκεκριμένου μοντέλου της Α/Γ.

Στοιχειώδεις μαθηματικές συναρτήσεις.

Οι υποστηριζόμενες βασικές συναρτήσεις και η σημασία τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Συνάρτηση Λειτουργίας
sin Ημίτονο
sinh Υπερβολικό ημίτονο
asin Αντίστροφο ημίτονο
asinh Αντίστροφο υπερβολικό ημίτονο
cos Συνημίτονο
cosh Υπερβολικό συνημίτονο
acos Αντίστροφο συνημίτονο
acosh Αντίστροφο υπερβολικό συνημίτονο
tan Εφαπτομένη
tanh Υπερβολική εφαπτομένη
atan Αντίστροφη εφαπτομένη
atanh Αντίστροφη Υπερβολική εφαπτομένη
sec Τέμνουσα
sech Υπερβολική τέμνουσα
asec Αντίστροφη τέμνουσα
asech Αντίστροφη υπερβολική τέμνουσα
csc Συντέμνουσα
csch Υπερβολική συντέμνουσα
acsc Αντίστροφη συντέμνουσα
acsch Αντίστροφη υπερβολική συντέμνουσα
cot Συνεφαπτομένη
coth Υπερβολική συνεφαπτομένη
acot Αντίστροφη συνεφαπτομένη
acoth Αντίστροφη υπερβολική συνεφαπτομένη
exp Εκθετική συνάρτηση e-x
log Νεπέριος (φυσικός) λογάριθμος
log10 Δεκαδικός λογάριθμος
sqrt Τετραγωνική ρίζα
abs Απόλυτη τιμή
angle Γωνίες φάσης στοιχείων μιγαδικού πίνακα

conj	Συζυγής μιγαδικού
imag	Φανταστικό μέρος μιγαδικού
real	Πραγματικό μέρος μιγαδικού
fix	Ακέραιο μέρος
floor	Κάτω ακέραιο μέρος
ceil	Πάνω ακέραιο μέρος
round	Στρογγυλοποίηση
rem	Υπόλοιπο διαίρεσης
sign	Πρόσημο

Οι βασικές συναρτήσεις καλούνται με το όνομα τους. Π.χ. η κλήση $\sin(\pi)$ θα δώσει $\text{ans} = 0.0000$.