



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΚΑΝΤΕΛΕΡ ΧΡΗΣΤΟΥ

Επιβλέπων : Αθανάσιος Παπαθανασίου

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2020

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Παπαθανασίου και τον κύριο Μπαρακίτη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν κατά την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και για τη καθοδήγηση που μου παρείχαν σε κάθε δυσκολία που εμφανίστηκαν στην εκπόνηση της εργασίας.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που πίστεψαν σε μένα και με στήριξαν σε όλα τα μαθητικά και φοιτητικά μου χρόνια.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περίληψη..... | 5 |
| 1 Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας | 7 |
| 1.1 Υδροθερμική Ενέργεια..... | 8 |
| 1.2 Γεωθερμική Ενέργεια..... | 11 |
| 1.3 Ηλιακή Ενέργεια..... | 14 |
| 1.4 Αιολική Ενέργεια | 16 |
| 1.5 Υδατική Ενέργεια..... | 17 |
| 1.6 Βιογενής Ενέργεια | 20 |
| 2 Ανεμογεννήτριες..... | 22 |
| 2.1 Οι ανεμόμυλοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας | 22 |
| 2.2 Τα είδη Ανεμογεννητριών | 25 |
| 2.3 Τα μέρη μίας ανεμογεννήτριας..... | 27 |
| 2.4 Σχεδιασμός της ανεμογεννήτριας..... | 28 |
| 2.5 Ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας | 29 |
| 2.6 Μοντέλο Μηχανικής Ισχύος..... | 31 |
| 3 Η προσομοίωση | 37 |
| 3.1 Η έννοια της προσομοίωσης | 37 |
| 3.2 Τα είδη της προσομοίωσης | 38 |
| 3.3 Η διαδικασία της προσομοίωσης | 39 |
| 3.4 Η ανεμογεννήτρια | 41 |
| 3.5 Η συλλογή της τιμής της ταχύτητας του ανέμου | 44 |
| 3.6 Μοντέλο ισχύος..... | 45 |
| 3.7 Τριφασικό ρεύμα..... | 49 |
| 3.8 Περιστροφή αξόνων | 51 |
| 3.9 Τάση ρότορα | 56 |
| 4 Μετρήσεις και Αποτελέσματα | 62 |
| 4.1 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα | 68 |
| 5 Βιβλιογραφία | 69 |

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση μίας ανεμογεννήτριας για να διερευνηθεί αν θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αστικό περιβάλλον. Η προσομοίωση αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος *LabVIEW* της *National Instruments*. Συγκεκριμένα έγινε η χρήση ενός τυποποιημένου μοντέλου ανεμογεννήτριας το οποίο τροποποιήθηκε ώστε να περιγράφει την ανεμογεννήτρια που προσομοιώθηκε. Το μοντέλο αυτό δέχεται ως μεταβλητή εισόδου την ταχύτητα του ανέμου και υπολογίζει τις επιθυμητές μεταβλητές, όπως ισχύς και βαθμός απόδοσης. Η εισαγωγή της τιμής της ταχύτητας του ανέμου γίνεται μέσω ενός προγράμματος που κατασκευάστηκε στο *LabVIEW*. Το πρόγραμμα συλλέγει σε πραγματικό χρόνο ταχύτητα ανέμου, σε μια περιοχή που μας ενδιαφέρει, από κατάλληλη ιστοσελίδα.

Αρχικά, στην εργασία, γίνεται μία εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με εστίαση στην αιολική ενέργεια, που είναι αυτή που χρησιμοποιείται από τις ανεμογεννήτριες. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία ιστορική αναδρομή από τους ανεμόμυλους στις ανεμογεννήτριες και αναλύονται τα είδη, τα μέρη και ο σχεδιασμός των ανεμογεννητριών. Τέλος, γίνεται μία αναφορά στα είδη και την διαδικασία της προσομοίωσης, ενώ ταυτόχρονα αναλύεται και το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της ανεμογεννήτριας.

Τα ερωτήματα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας ήταν:

- Με ποιον τρόπο θα γίνει η συλλογή της τιμής της ταχύτητας του ανέμου σε πραγματικό χρόνο μέσω του διαδικτύου;
- Μπορεί αυτή η προσομοίωση να χρησιμοποιηθεί για να διερευνηθεί αν μία ανεμογεννήτρια είναι κατάλληλη να τοποθετηθεί σε κάποια περιοχή;

Η συλλογή της τιμής της ταχύτητας του ανέμου πραγματοποιείται μετά από μία σειρά εντολών οι οποίες επιτρέπουν την εφαρμογή του *LabVIEW* να διαβάσει τον κώδικα της ιστοσελίδας που υπολογίζει την ταχύτητα και από αυτόν να βρίσκει το σημείο που εμφανίζεται η επιθυμητή τιμή. Στη συνέχεια, αντιγράφει αυτό το κομμάτι του κώδικα και αφού το μετατρέψει από κείμενο σε αριθμό το εισάγει στο μοντέλο.

Το δεύτερο ερώτημα δεν μπορεί να απαντηθεί ακόμα, διότι σε αυτή την εργασία δημιουργήθηκε μόνο το μοντέλο και υπολογίστηκαν οι θεωρητικές μετρήσεις που μπορεί να δώσει. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων θα χρειαστούν οι πραγματικές μετρήσεις οι οποίες θα υπολογιστούν σε μία δεύτερη εργασία που βρίσκεται υπό εξέλιξη. Μόλις πραγματοποιηθεί η επαλήθευση θα μπορεί το μοντέλο να υπολογίζει τις θεωρητικές αποδόσεις της ανεμογεννήτριας σε βάθος χρόνου, ώστε να αποφασίσει κάποιος αν είναι αποδοτικό να τοποθετήσει την ανεμογεννήτρια, για οικιακή χρήση, στη περιοχή που παίρνει τις μετρήσεις.

1 Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας

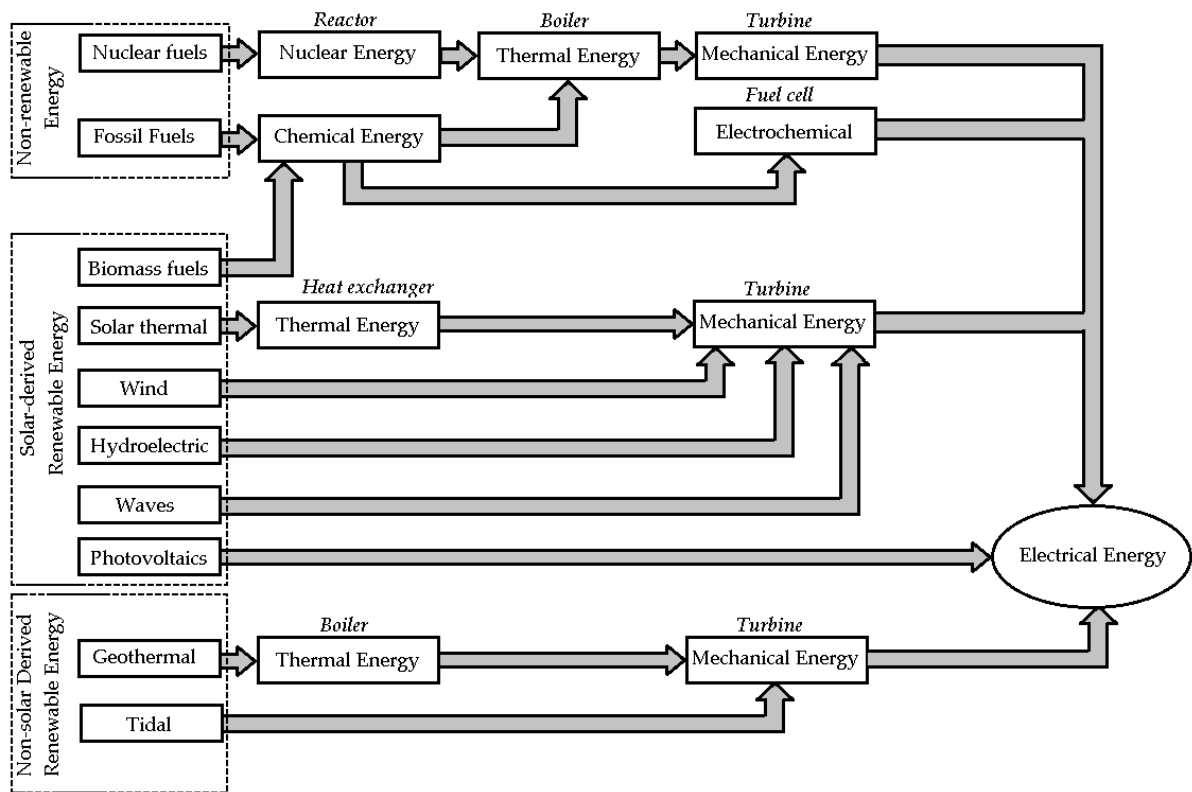
Η ενέργεια μπορεί να έχει πολλές μορφές όπως κινητική, δυναμική, ηλεκτρομαγνητική, πυρηνική, ηχητική, φωτεινή και βαρυτική. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της ενέργειας είναι ότι έχει τη δυνατότητα να μετατραπεί από μία μορφή σε κάποια άλλη. Αυτό μπορεί να γίνει φυσικά, για παράδειγμα χημικές αντιδράσεις, ή τεχνικά μέσα από ανθρωπογενείς τεχνολογίες, για παράδειγμα οι υδροηλεκτρικές γεννήτριες. Στη δεύτερη κατηγορία μετατροπών, οι τεχνολογίες μετατρέπουν μία φυσικά διαθέσιμη μορφή ενέργειας σε μία επιθυμητή μορφή όπως είναι ο ηλεκτρισμός και η θερμότητα.

Ο όρος πόροι ενέργειας αναφέρεται στις φυσικά διαθέσιμες μορφές ενέργειας ενώ οι πηγές ενέργειας αναφέρονται στις παραγόμενες μορφές ενέργειας από τις ανθρωπογενείς τεχνολογίες. Γενικά, οι ενεργειακές τεχνολογίες είναι ανθρωπογενείς συσκευές, εξοπλισμός και συστήματα που χρησιμοποιούνται για να συλλέξουν, μετατρέψουν, αποθηκεύσουν και μεταφέρουν μορφές ενέργειας από τους πόρους. Εναλλακτικές ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμπεριλαμβάνουν τις παραδοσιακές ενεργειακές τεχνολογίες, όπως είναι οι ανεμογεννήτριες, καθώς επίσης και πρωτοποριακές νέες τεχνολογίες, όπως οι μηχανές υδρογόνου εσωτερικής καύσης, και κυψέλες καυσίμων βασισμένες στο υδρογόνο.

Οι διάφοροι τύποι ανανεώσιμων πόρων ενέργειας, που είναι διαθέσιμοι και μπορούν να παράγουν σταθερή ισχύ, είναι:

- η υδροθερμική
- η γεωθερμική
- η ηλιακή
- η αιολική
- η υδατική
- η βιογενής

Στην Εικόνα 1-1 απεικονίζονται οι βασικές διεργασίες μετατροπής ενέργειας σε διάφορες ανανεώσιμες και μη πηγές ενέργειας. Όπως φαίνεται στην εικόνα, οι ανανεώσιμοι πόροι κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την κύρια αιτία τους, ηλιακή και μη-ηλιακή. Το τελικό αποτέλεσμα αυτών των μετατροπών ενέργειας είναι η ηλεκτρική ενέργεια. Για κάθε μετατροπή ενέργειας που παρουσιάζεται υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές για τον τρόπο μετατροπής. Για μία συγκεκριμένη διεργασία μετατροπής ενέργειας, είναι πολλές τεχνολογίες διαθέσιμες, κάθε μία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη αποδοτικότητα, έλεγχο δυνατοτήτων, αξιοπιστία, και σταθερά όπως και λειτουργικά έξοδα. [1]



Εικόνα 1-1 Διεργασίες μετατροπής ενέργειας σε διάφορες πηγές ενέργειας [1]

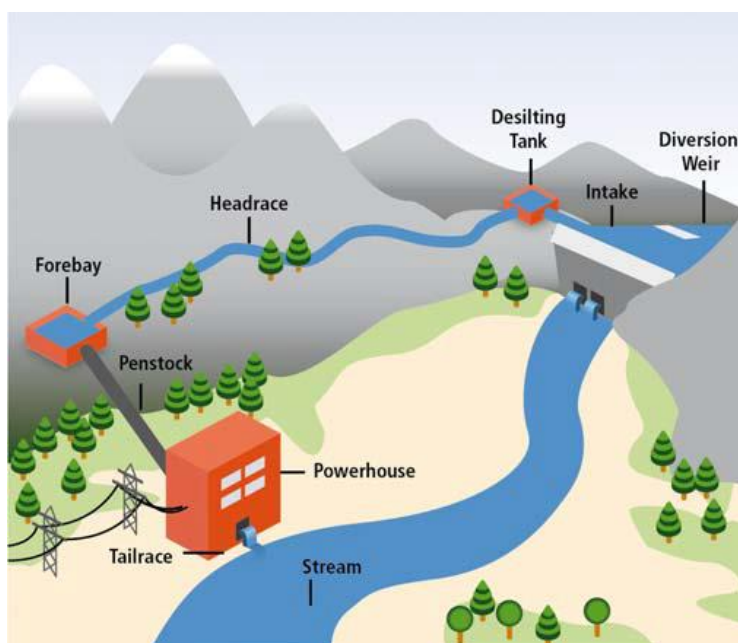
1.1 Υδροθερμική Ενέργεια

Η υδροθερμική ή υδραυλική ενέργεια παράγεται από την κίνηση του νερού στον υδρολογικό κύκλο, η οποία οδηγείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Η εισερχόμενη ακτινοβολία απορροφάται από την επιφάνεια της ξηράς ή της θάλασσας, θερμαίνοντας την επιφάνεια και δημιουργώντας υδρατμούς όπου υπάρχει νερό. Ένα μεγάλο ποσοστό, περίπου το 50% όλης της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, χρησιμοποιείται για να εξατμίσει το νερό και να δημιουργήσει τον υδρολογικό κύκλο. Επομένως, η πιθανή ενέργεια που βρίσκεται σε αυτόν τον κύκλο είναι τεράστια, αλλά μόνο μία περιορισμένη ποσότητα της μπορεί να αναπτυχθεί τεχνικά. Το εξατμισμένο νερό κινείται προς την ατμόσφαιρα και αυξάνει την περιεκτικότητα του αέρα σε υδρατμούς. Από την ηλιακή ενέργεια παράγονται συστήματα ανέμων, σε τοπικό αλλά και παγκόσμιο επίπεδο, και μετακινούν τον αέρα και τους περιεχόμενους ατμούς, πάνω από την επιφάνεια της, σε αποστάσεις που φτάνουν έως και χιλιόμετρα μακριά από την προέλευση της εξατμίσεως. Τελικά, οι ατμοί συμπυκνώνονται και πέφτουν με την μορφή της κατακρήμνισης, περίπου το 78% στους ωκεανούς και το 22% στην ξηρά. Αυτό δημιουργεί ένα δίκτυο μεταφοράς του νερού από τους ωκεανούς στην ξηρά. Η κίνηση του νερού στα ποτάμια είναι αυτή που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της υδροηλεκτρικής ενέργειας, ή πιο συγκεκριμένα η

ενέργεια του νερού όταν κινείται από υψηλότερα σε χαμηλότερα υψόμετρα κατά την επιστροφή του προς τους ωκεανούς, οδηγούμενο από τη δύναμη της βαρύτητας.

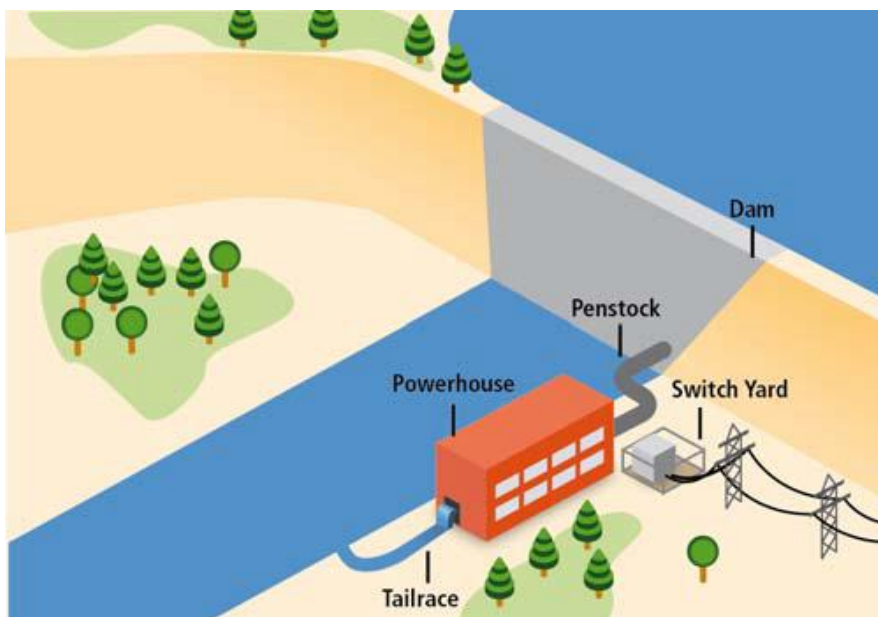
Το δυναμικό των πόρων της υδροηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να παραχθεί από τη συνολική διαθέσιμη ροή πολλαπλασιασμένη από την υψομετρική διαφορά και έναν παράγοντα μετατροπής. Από τη στιγμή που οι περισσότερες κατακρημνίσεις γίνονται σε ορεινές περιοχές, όπου η υψομετρική διαφορά είναι μέγιστη, η μεγαλύτερη δυνατότητα για ανάπτυξη υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι στις ορεινές περιοχές, ή σε ποτάμια που προέρχονται από αυτές τις περιοχές. Η υψομετρική διαφορά και το μέγεθος παρουσιάζονται συχνά ως κριτήρια για την κατηγοριοποίηση των υδροηλεκτρικών εργοστασίων. Οι βασικοί τρόποι παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι οι τεχνολογίες εκτρεπόμενης ροής, αποθήκευσης αποθέματος, άντλησης αποθέματος και παραγωγής πάνω στη ροή. Το μέγεθος του εργοστασίου υδροηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στην εγκατεστημένη χωρητικότητα που μετρείται σε MW. Μικρά εργοστάσια είναι πιο πιθανόν να χρησιμοποιούν την τεχνολογία εκτρεπόμενης ροής, ενώ εργοστάσια μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιούν συνήθως τον τρόπο αποθήκευσης του αποθέματος.

Τα εργοστάσια εκτρεπόμενης ροής αντλούν την ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρισμού από την διαθέσιμη ροή του ποταμού. Αυτά τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια μπορούν να έχουν μικρή χωρητικότητα για αποθήκευση ενέργειας, ωριαία ή ημερήσια, επιτρέποντας την προσαρμογή σε μία απαιτούμενη ενέργεια, αλλά η παραγόμενη ενέργεια θα εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες της ροής του ποταμού. Ως αποτέλεσμα, η παραγωγή ενέργειας θα εξαρτάται από τις κατακρημνίσεις και τις απορροές οι οποίες μπορούν να παρουσιάζουν ημερήσιες, μηνιαίες ή εποχιακές διακυμάνσεις.



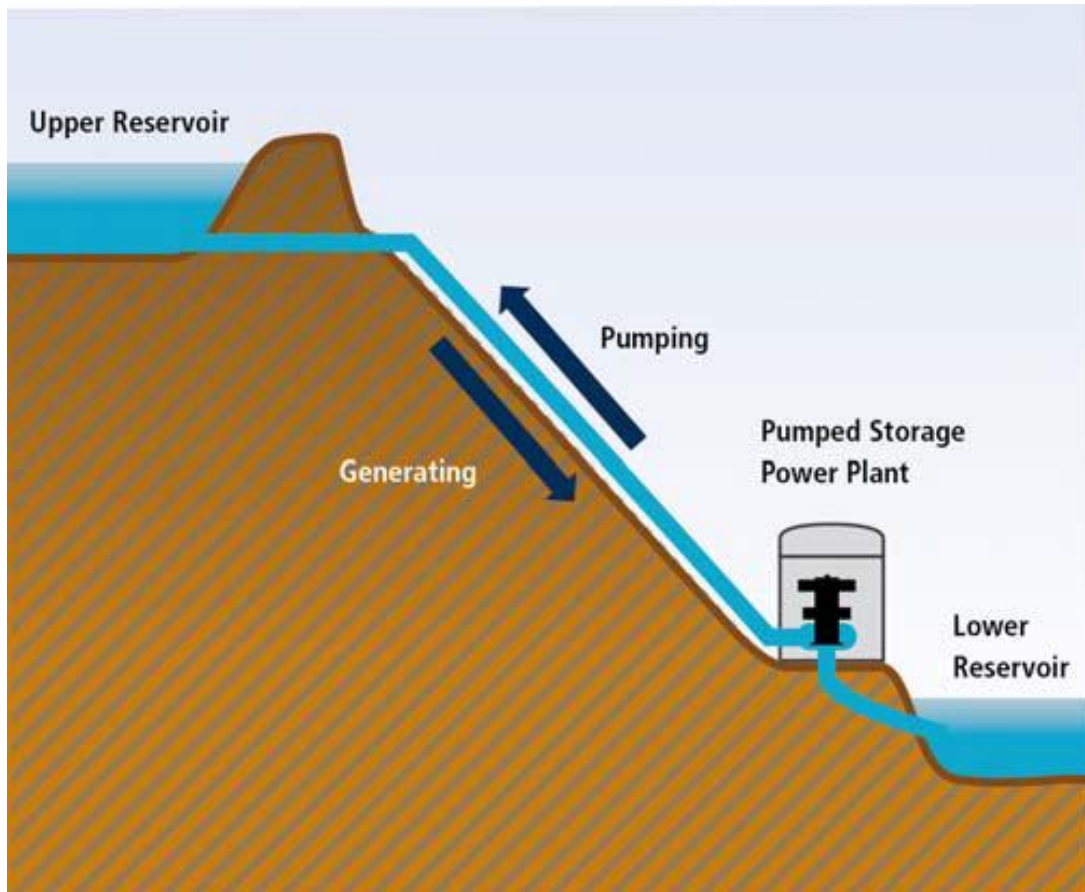
Εικόνα 1-2 Υδροηλεκτρικό εργοστάσιο εκτρεπόμενης ροής [2]

Τα εργοστάσια αποθήκευσης αποθέματος μπορούν να αποθηκεύουν νερό, σε δεξαμενές, για να το χρησιμοποιήσουν αργότερα. Η αποθήκευση μειώνει την εξάρτηση από τις διακυμάνσεις της ροής το. Οι σταθμοί παραγωγής ρεύματος βρίσκονται στο δάπεδο του φράγματος ή πιο κάτω, είναι συνδεδεμένοι με τις αποθήκες μέσα από τούνελ ή σωλήνες. Ο τύπος και ο σχεδιασμός των αποθηκών αποφασίζεται από το τοπίο και σε πολλά μέρη του κόσμου πλημμυρίζονται κοιλάδες και η δεξαμενή είναι μία τεχνητή λίμνη. Σε γεωγραφικές περιοχές με οροπέδια, οι λίμνες υψηλού υψομέτρου αποτελούν ένα άλλο είδος δεξαμενής που συχνά διατηρεί πολλές από τις αρχικές ιδιότητες της λίμνης. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι σταθμοί συνδέονται συνήθως με τις λίμνες, που λειτουργούν ως δεξαμενές, μέσω τούνελ που προέρχονται κάτω από τη λίμνη.



Εικόνα 1-3 Υδροηλεκτρικό εργοστάσιο αποθήκευσης [2]

Τα εργοστάσια άντλησης ενέργειας δεν είναι πηγές ενέργειας, αλλά μηχανές αποθήκευσης της ενέργειας. Σε ένα τέτοιο σύστημα το νερό αντλείται από μία χαμηλότερη δεξαμενή σε μία υψηλότερη, συνήθως σε ώρες αιχμής, ενώ η ροή αντιστρέφεται για να παραχθεί ηλεκτρισμός κατά τη διάρκεια μία ημερήσιας περιόδου μέγιστου φορτίου ή σε άλλες στιγμές που υπάρχει ανάγκη. Παρόλο που οι απώλειες της διαδικασίας άντλησης καθιστούν ένα τέτοιο εργοστάσιο ως καταναλωτής ενέργειας, το εργοστάσιο είναι ικανό να παρέχει συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας. [2]



Εικόνα 1-4 Εργοστάσιο άντλησης ενέργειας [2]

1.2 Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια παράγεται από τη θερμότητα της γης. Πιο συγκεκριμένα η θερμότητα αυτή ακτινοβολείται συνεχώς από το εσωτερικό του πλανήτη και κάθε χρόνο η βροχή και το λιωμένο χιόνι προμηθεύουν τις γεωθερμικές πηγές με αποθέματα. Η παραγωγή ενέργειας από γεωθερμικά πεδία μπορεί να διατηρηθεί για δεκαετίες και σε μερικές περιπτώσεις και για αιώνες και έτσι εξηγείται η ανανεωσιμότητα αυτού του πόρου.

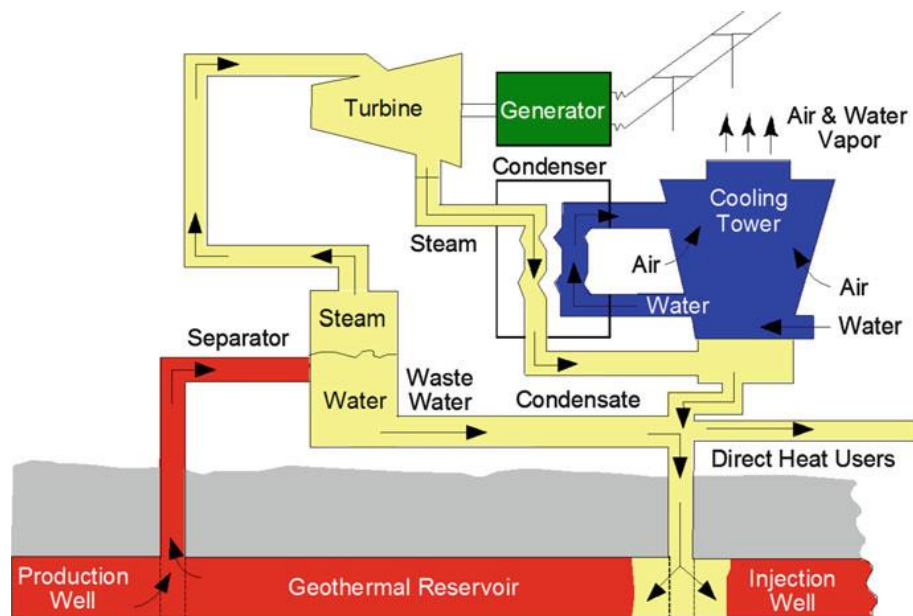
Μία γεωθερμική βαθμίδα εκφράζεται από το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας προς το βάθος από την επιφάνεια της γης. Η μέση γεωθερμική βαθμίδα είναι περίπου $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ανά 100 m . Ωστόσο, οι βαθμίδες σε ενεργές γεωθερμικές περιοχές είναι πολύ υψηλότερες. Τα γεωθερμικά συστήματα βρίσκονται σε περιοχές με φυσιολογικά ή λίγο ψηλότερα από τα φυσιολογικά επίπεδα βαθμίδων, δημιουργώντας χαμηλής έως μεσαίας ενθαλπίας γεωθερμικά αποθέματα με λιγότερο από $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τα αποθέματα υψηλής ενθαλπίας, που οι θερμοκρασίες φτάνουν ως τους $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ή παραπάνω, βρίσκονται σε περιοχές όπου

συναντώνται οι τεκτονικές πλάκες και έχουν υψηλές γεωθερμικές βαθμίδες. Η κυκλοφορία του νερού σε επίγεια γεωθερμικά συστήματα μπορεί να φτάσει σε βάθη έως και 5km.

Υπάρχουν δύο ειδών γεωθερμικά συστήματα, οι αγωγοί και τα αγωγίμα. Τα συστήματα αγωγοί περιέχουν συστήματα που κυριαρχούνται από ατμό και συστήματα που κυριαρχούνται από νερό. Τα αγωγίμα συστήματα αντιπροσωπεύονται από συστήματα θερμού ξηρού βράχου. Για να δημιουργηθεί ένα γεωθερμικό απόθεμα, τρία συστατικά είναι απαραίτητα:

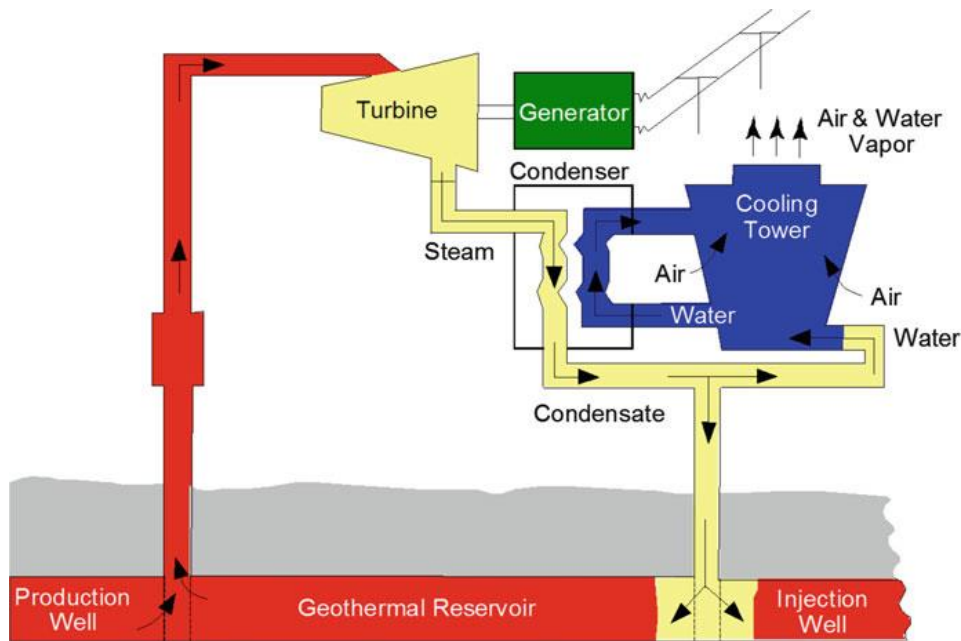
- η θερμότητα να αντιπροσωπεύεται από την θερμική ενέργεια, την αγωγή μεταφορά ενέργειας και τη μεταφορά ενέργειας μέσω συναγωγής,
- τα ρευστά βοηθούν στην μεταφορά θερμότητας μέσω θερμοσυναγωγής,
- διαπερατά μονοπάτια να αφήνουν τα ρευστά να ρέουν μέσα από το πορώδες σύστημα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των γεωθερμικών συστημάτων που κυριαρχούνται από νερό είναι ότι το υγρό νερό ανανεώνεται συνεχώς και η πίεση ελέγχει την αλλαγή των φάσεων. Η θερμοκρασία των αποθεμάτων που κυριαρχούνται από υγρό κυμαίνεται από τους 210 °C έως και πάνω από τους 300°C. Το πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι η ανανεωσιμότητά τους εάν το διαχωρισμένο νερό επανεγχυθεί.



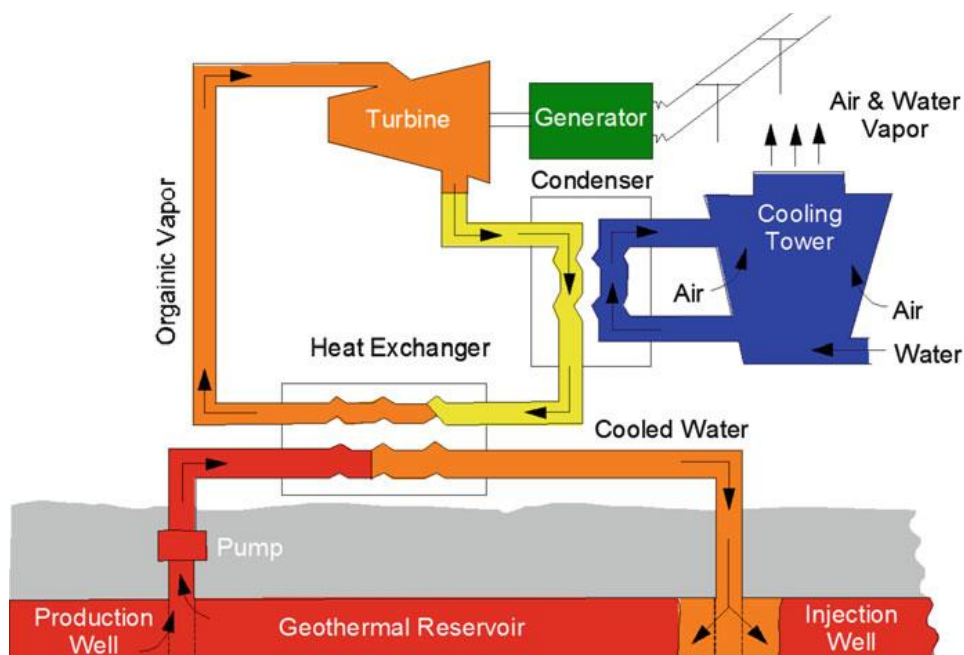
Εικόνα 1-5 Εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιεί γεωθερμικά συστήματα που κυριαρχούνται από νερό. [3]

Στα γεωθερμικά αποθέματα που κυριαρχούνται από ατμούς, το υγρό και οι ατμοί συνυπάρχουν, αλλά οι ατμοί ανανεώνονται συνεχώς και η πίεση ρυθμίζει τις συνθήκες των φάσεων. Τα συστήματα αυτά παράγουν μόνο ξηρούς ατμούς με θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 230 °C ως 260 °C. Το πλεονέκτημα σε αυτά τα συστήματα είναι ότι δεν χρειάζεται η επανέγχυση ατμών.



Εικόνα 1-6 Εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιεί γεωθερμικά συστήματα που κυριαρχούνται από ατμό. [3]

Το βασικό χαρακτηριστικό ενός συστήματος θερμού ξηρού βράχου είναι ότι δεν υπάρχει κάποιο ρευστό για να μεταφέρει τα μεγάλα ποσά θερμότητας, που είναι αποθηκευμένα στο θερμό βράχο, σε κάποιο πηγάδι για απόσπαση. Επιπλέον, οι βράχοι στα αποθέματα είναι συμπαγείς. Πρέπει να δημιουργηθούν τεχνητά ανοίγματα στους βράχους με επαρκή διαπερατότητα και συνδεσιμότητα ώστε να δημιουργήσουν περάσματα από τα οποία το εγχέομενο ρευστό να μπορεί να κυκλοφορεί. Οι θερμοκρασίες σε αυτά τα συστήματα είναι ψηλότερες από 250 °C. [3]



Εικόνα 1-7 Εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιεί σύστημα θερμού ξηρού βράχου σε συνδυασμό με ένα εγχέομενο ρευστό. [3]

1.3 Ηλιακή Ενέργεια

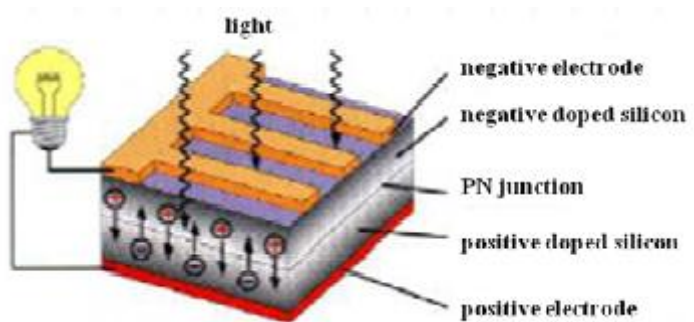
Η ηλιακή θερμότητα είναι το αποτέλεσμα ολόκληρου του ηλιακού φάσματος, και για αυτόν τον λόγο, ακόμα και τα λευκά αμάξια, θερμαίνονται, επειδή ενώ περισσότερο από το ορατό φως αντανακλάται, τα υπόλοιπα μέρη του φάσματος, θερμαίνουν το αμάξι. Παρόλο που οι καθρέπτες αντανακλούν το ευρύ φάσμα του ήλιου, το γυαλί που καλύπτει τον καθρέπτη, ζεσταίνεται. Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό.

Η θερμική μέθοδος βασίζεται στη συγκέντρωση ηλιακής ενέργειας μέσω καθρεπτών ή άλλου είδους αντανακλάσεις για να παράγει υψηλή θερμοκρασία και να δημιουργήσει ατμούς νερού ή κάποιου άλλου υγρού με υψηλή πίεση ώστε να στρέφονται οι γεννήτριες και να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να επιτευχθεί αυτό. Μερικοί χρησιμοποιούν καμπύλους καθρέπτες στο σχήμα παραβολών οι οποίοι ακολουθούν την τροχιά του ήλιου και εστιάζουν τις ηλιαχτίδες σε σωλήνες που είναι γεμάτοι με νερό ή κάποιο υγρό. Άλλα είδη σχεδιασμών χρησιμοποιούν μεγάλους επίπεδους καθρέπτες που είναι πιο οικονομικοί. Το κύριο πλεονέκτημα της μετατροπής ηλιακής ενέργειας με τη θερμική μέθοδο είναι ότι απορροφάται ολόκληρο το ηλιακό φάσμα και για αυτό το λόγο έχει απόδοση μεγαλύτερη από 90% στην ανάκλαση της ηλιακής ενέργειας ενώ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η απόδοση κυμαίνεται από 30% μέχρι 40%.

Η δεύτερη μέθοδος μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι με τη χρήση φωτοβολταϊκών που πραγματοποιούν την μετατροπή απευθείας. Υπάρχουν πολλών ειδών τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για να παράγουν ηλεκτρισμό, βασισμένες στα φωτοβολταϊκά. Η τεχνολογία με κρυσταλλωποιημένο πυρίτιο είναι αυτή που χρησιμοποιείται εμπορικά, ενώ άλλες βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο προκειμένου να παράγουν πιο αποδοτικές ηλιακές κυψελίδες. Η απόδοση των ηλιακών κυψελίδων πυριτίου είναι στο εύρος 13-18%.

Οι κυψελίδες πυριτίου κατασκευάζονται με δύο συνεχόμενα στρώματα. Το πρώτο αποτελείται από πυρίτιο ενισχυμένο με μικρές ποσότητες φωσφόρου, που έχει ένα ηλεκτρόνιο παραπάνω στην εξωτερική στοιβάδα από το πυρίτιο. Όταν ένα άτομο φωσφόρου παίρνει τη θέση του πυριτίου, το περίσσιο ηλεκτρόνιο μεταφέρεται στο κρυσταλλικό πλέγμα. Αυτά τα ηλεκτρόνια που είναι φορτισμένα αρνητικά είναι ελεύθερα να κινηθούν και αυτό το υλικό ονομάζεται πυρίτιο τύπου n. Το δεύτερο στρώμα αποτελείται από πυρίτιο τύπου p, που είναι πυρίτιο θετικά φορτισμένο με βόριο, το οποίο έχει ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο στην εξωτερική του στοιβάδα. Σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχουν αρκετά ηλεκτρόνια ώστε να σχηματιστούν όλοι οι ομοιοπολικοί δεσμοί που χρειάζονται και

έτσι τα ηλεκτρόνια κινούνται για να καλύψουν αυτό το κενό, το οποίο ονομάζεται τρύπα. Όταν τα υλικά τύπου p και τύπου n έρθουν κοντά δημιουργούν μία ένωση τύπου p-n. Τα ηλεκτρόνια και οι τρύπες ελκύονται μεταξύ τους, συγκεντρώνονται στην διεπαφή και αφήνουν τις περιοχές τύπου p και τύπου n αρνητικά και θετικά φορτισμένες, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο. Όταν το φως πέφτει στο κρυσταλλικό πλέγμα, τα ηλεκτρόνια του πλέγματος μπορούν να απελευθερωθούν. Επειδή όμως δεν είναι όλα τα φωτόνια ίδια, μόνο φωτόνια με συγκεκριμένο επίπεδο ενέργειας μπορούν να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια στο υλικό του ημιαγωγού από τον ατομικό δεσμό τους, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 1-8 Τα στρώματα πυριτίου τύπου n και p

Η ενέργεια που εκτοπίζει το ηλεκτρόνιο από τον ομοιοπολικό δεσμό και το επιτρέπει να γίνει μέρος του ηλεκτρικού κυκλώματος ονομάζεται ενέργεια χάσματος. Για να απελευθερωθεί ένα ηλεκτρόνιο η ενέργεια του φωτονίου πρέπει να είναι τουλάχιστον όσο η ενέργεια χάσματος. Ωστόσο, τα φωτόνια με ενέργεια πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια χάσματος θα μετατρέψουν αυτήν την περίσσεια σε θερμότητα καθώς απελευθερώνουν τα ηλεκτρόνια. Το πλέγμα του πυριτίου έχει ενέργεια χάσματος 1,1 eV (ηλεκτρονιοβόλτ), όπου το 1 ηλεκτρονιοβόλτ είναι το ποσό της κινητικής ενέργειας που αποκτάει ένα ηλεκτρόνιο καθώς περνάει από μία ηλεκτροστατική διαφορά δυναμικού 1 V.

Η ηλιακή ενέργεια είναι μέγιστη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού διότι ο ήλιος είναι πιο ψηλά και ελάχιστη το χειμώνα που η θέση του ήλιου είναι χαμηλότερα. Επίσης, όσο μία περιοχή βρίσκεται κοντά στον ισημερινό και όσο ψηλότερο είναι το υψόμετρο της τόσο μεγαλύτερη είναι η ηλιακή λήψη. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό από το υψόμετρο οφείλεται στην απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας από τον αέρα και τα σύννεφα. Το οξυγόνο απορροφάει την ηλιακή ενέργεια στο μήκος κύματος περίπου 780nm, ενώ το νερό απορροφά την ηλιακή ενέργεια σε διάφορα μήκη κύματος που είναι: 920, 01100-1150, 1350-1450, 1800-1950 και 2500-2750nm, για αυτό το λόγο η ηλιακή ενέργεια σε υψόμετρα μεγαλύτερα των 36.000 Km πάνω από την επιφάνεια της γης είναι πολύ ισχυρότερη. Ακόμη, σε ξηρές περιοχές, όπως είναι η μέση ανατολή, ειδικά το καλοκαίρι, η ηλιακή ενέργεια είναι ισχυρή. [4]

1.4 Αιολική Ενέργεια

Ο άνεμος είναι η ατμοσφαιρική κίνηση του αέρα. Η ταχύτητα του αέρα ορίζει την ισχύ του ανέμου και σχετίζεται με την ενέργεια του, που είναι η κινητική ενέργεια. Ωστόσο, η πηγή της αυτής της ενέργειας είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από τον ήλιο θερμαίνει ακανόνιστα την επιφάνεια της γης, πιο πολύ στις τροπικές περιοχές και λιγότερο σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Επίσης, ως αποτέλεσμα της διαφορετικής απορρόφησης του ηλιακού φωτός από το χώμα, τους βράχους, το νερό και τη βλάστηση ο αέρας σε διάφορες περιοχές θερμαίνεται με διαφορετικούς ρυθμούς. Αυτή η άνιση θέρμανση μετατρέπεται μέσω της αγωγής σε κίνηση του αέρα, η οποία ρυθμίζεται από τη περιστροφή της γης. Ο αέρας ωθείται από περιοχές με υψηλή σε περιοχές με χαμηλή πίεση.

Τα συστήματα των ανέμων έχουν ένα μεγάλο εύρος χωρικών κλιμάκων, από την πλανητικής κλίμακας για την παγκόσμια κυκλοφορία, μέχρι την συνοπτική κλίμακα για τα καιρικά συστήματα, την περιφερειακή μεσοκλίμακα και την μικροκλίμακα των τοπικών ανέμων. Το μήκος της πλανητικής κλίμακας είναι 10000km, της συνοπτικής κλίμακας 1000km ενώ της μεσοκλίμακας και της μικροκλίμακας είναι 10-100km και 0,1-1km αντίστοιχα.

Μία λίστα με τύπου ανέμων μπορεί να δημιουργηθεί από επιστημονική και καθημερινά ονόματα διάφορων ανέμων ανά τον κόσμο. Τα συσχετιζόμενα φυσικά φαινόμενα επιτρέπουν μία πιο καλή κατηγοριοποίηση στις χωρικές κλίμακες. Η παραγωγή φυσικών μηχανισμών ορίζει τους γεωστροφικούς ανέμους και τους θερμικούς ανέμους. Οι καταβατικοί και αναβατικοί άνεμοι είναι τοπικοί άνεμοι που δημιουργούνται από την ψύξη και θέρμανση των πλαγιών των βουνών. Στις παραθαλάσσιες περιοχές το θαλασσινό αεράκι και το αεράκι της ξηράς συμβαίνουν τακτικά. Οι καταιγίδες μπορούν να προκαλέσουν παροδικούς καθοδικούς ανέμους, οι οποίοι μπορούν να είναι επικίνδυνοι και δεν συνιστώνται για την παραγωγή ενέργειας. Οι τυφώνες, όπως οι μικρής κλίμακας ανεμοστρόβιλοι είναι παραδείγματα πολύ δυναμικών και καταστρεπτικών συστημάτων ανέμων. Μία μικρής κλίμακας εκδοχή αυτών των ανέμων είναι η δυνατή πνοή ή ριπή του ανέμου και οι μικροβροχές. Τα ατμοσφαιρικά κύματα που προκαλούνται από τη βαρύτητα και ρυθμίζονται από την τοπογραφία είναι κοινά σε πολλά μέρη.

Η μετεωρολογία είναι ο επιστημονικός τομέας που μελετά και εξηγεί τα παραπάνω φαινόμενα. Επιτρέπει τη θεωρητική κατανόηση και την πραγματική πρόβλεψη των δυνατοτήτων του ανέμου. Η στατιστική παρακολούθηση των περιστατικών του ανέμου ορίζουν το κλίμα σε διάφορες περιοχές. Τα μαθηματικά και υπολογιστικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη θεωρητική προσομοίωση, τη διερευνητική αξιολόγηση των πόρων και τη λειτουργική πρόβλεψη των ανέμων. [5]

Ο άνεμος είναι ένας φυσικό πόρος χωρίς όρια, ωστόσο κανείς δεν κατάφερε να εκμεταλλευτεί περισσότερο από ένα μικρό ποσοστό της κινητικής του ενέργειας. Η δύναμη του είναι τόσο ισχυρή για τον ανθρώπινο έλεγχο που έχουν καταγραφεί μύθοι και ιστορίες από πολλούς πολιτισμούς. Όπως είναι άγνωστο το μυστήριο για το ποιος ανακάλυψε τον τροχό, έτσι παραμένει άγνωστο το ποιος ήταν ο πρώτος άνθρωπος που χρησιμοποίησε τον άνεμο για την παραγωγή έργου. Παρόλα αυτά, η υπολογίζεται ότι η πρώτη πιθανή χρήση του ανέμου ήταν το ταξίδι με ιστιοφόρο, 40 χιλιάδες χρόνια πριν όταν οι άνθρωποι μετανάστευσαν από την Ασία στην Αυστραλία. Για τους πρώτους ναυτικούς, ο άνεμος παρείχε την κινητική ενέργεια για την εξερεύνηση και την αποίκηση στα νησιά του Ειρηνικού ωκεανού.

Ενώ το μεγαλύτερο μέρος της ιστορίας της χρήσης της ενέργειας του ανέμου αφορά τη θάλασσα και όχι την ξηρά, σήμερα αυτό δεν ισχύει. Καθώς η σημασία για την ιστιοπλοΐα έχει περάσει σε ψυχαγωγική χρήση, οι χειραίες εφαρμογές του ανέμου έχουν πολλαπλασιαστεί. Από τον 10^ο αιώνα μ.Χ. άρχισε η χρήση των ανεμόμυλων σε περιοχές της Περσίας, το σημερινό Ιράν. Αυτοί οι πρωτόγονοι, για τα σύγχρονα πρότυπα, ανεμόμυλοι χρησιμοποιούσαν κατακόρυφα πανιά δεμένα με καλάμια και ο βασικός σκοπός τους ήταν το άλεσμα του σιταριού και η μετακίνηση του νερού από ρυάκια για το πότισμα των κήπων. Για αιώνες αυτή οι στοιχειώδεις αλλά έξυπνες μηχανές μεταφέρθηκαν σε άλλα μέρη του κόσμου, όπου οι αγρότες τα χρησιμοποίησαν για την άντληση νερού, την άλεση του σιταριού και τη θρυμμάτιση ζαχαροκάλαμων. [6]

1.5 Υδατική Ενέργεια

Οι πηγές της υδατικής ενέργειας είναι η υπεράκτια αιολική ενέργεια, οι παλίρροιες, τα ρεύματα των ωκεανών, τα κύματα, οι θερμικές διαφορές, η βαθμίδα της αλμυρότητας και η βιομάζα. Η δυσκολία αυτής της μορφής ενέργειας είναι το πως θα μεταφερθεί στην ακτή, θα αποθηκευτεί και θα χρησιμοποιηθεί με ένα οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Για να μειωθεί η αβεβαιότητα, νέες καμπάνιες συλλογής δεδομένων από τους ωκεανούς παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη τραχύτητα του βυθού, το ύψος των κυμάτων από την επιφάνεια, τις αναταραχές και τα παλιρροιακά ρεύματα.

Οι παλιρροιακές ροές δημιουργούνται από τις υψομετρικές διαφορές κατά μήκος της παλίρροιας καθώς αυτή περνάει στις παραθαλάσσιες περιοχές. Οι παλίρροιες προκαλούνται από τις βαρυτικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων του νερού στην επιφάνεια της γης και των μαζών της σελήνης και του ηλίου. Οι παλίρροιες είναι πολύπλοκες όσον αφορά τη σχετική κίνηση των ουράνιων σωμάτων, στην επιτάχυνση Coriolis που οφείλεται στην περιστροφή της γης, την παρουσία των μαζών της ξηράς και την επιρροή της τοπικής

τοπογραφίας του βυθού. Παρόλα αυτά, οι παλίρροιες είναι προβλέψιμες, το οποίο είναι ένα πλεονέκτημα της παλιρροιακής ενέργειας. Τα ρεύματά των ωκεανών παράγονται από την κυκλοφορία των ωκεανών και τον άνεμο. Τα ρεύματα των παλιρροιών και των κυμάτων συνήθως ξεπερνούν τις ταχύτητες του 1m/s και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόσπαση ενέργειας. Υπάρχουν ελάχιστες συσκευές που έχουν δημιουργηθεί και δοκιμαστεί για μεγάλη κλίμακα, αλλά υπάρχουν διάφορες πρωτοποριακές συσκευές για την ανάκτηση παλιρροιακής και ωκεάνιας ενέργειας. Τέτοιες συσκευές είναι η γεννήτριας αξονικής ροής, η γεννήτρια εγκάρσιας ροής και γεννήτριες περιστρεφόμενων υδροπτερυγών.

Οι γεννήτριες αξονικής ροής εξάγουν ενέργεια από το κινούμε νερό μέσω περιστρεφόμενων λεπίδων που είναι τοποθετημένες σε έναν ρότορα, όπως οι ανεμογεννήτριες εξάγουν ενέργεια από τον αέρα. Αυτές οι γεννήτριες μπορούν να έχουν οριζόντιο ή κάθετο άξονα περιστροφής αναλόγως τον ρότορα και αποτελούνται από λεπίδες που έρχονται σε άμεση επαφή με το νερό ή βρίσκονται σε έναν αγωγό εκμεταλλευόμενες το φαινόμενο Venturi.

Οι γεννήτριες αξονικής ροής είναι σχεδιασμένες ώστε να πετυχαίνουν απόφραξη υψηλής ροής και ως αποτέλεσμα να μεγιστοποιούν την απόσταση ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση οι λεπίδες έχουν τέτοιο προσανατολισμό ώστε η ροή να περνάει κατά μήκος της λεπίδας. Ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στη ροή, και είναι οριζόντιος ή κάθετος. Οι γεννήτριες νερού εγκάρσιου οριζόντιου άξονα βασίζονται σε αυτή την αρχή.

Οι γεννήτριες περιστρεφόμενων υδροπτερυγών λειτουργούν με την δύναμη ανύψωσης που ασκείται στο υδροπτέρυγο, προκαλώντας ένα βραχίονα να κινηθεί, οδηγώντας το ρευστό σε ένα υδραυλικό σύστημα, και στο τέλος πραγματοποιείται η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια. [7]

Τα κύματα δημιουργούνται από την εναλλαγή ενέργειας μεταξύ του ανέμου με το νερό. Όταν το νερό θερμαίνεται μετατρέπεται σε ατμούς, οι οποίοι στη συνέχεια μετατρέπονται σε αέρα. Ο θερμός αέρας ανυψώνεται και τη θέση του παίρνει ο ψυχρός αέρας, ο οποίος θα θερμανθεί με τη σειρά του από το νερό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία των αέριων ρευμάτων. Αυτά τα ρεύματα κινούν το νερό ενώ η τραχύτητα μεταξύ τους προκαλεί το νερό να επεκταθεί και να προκαλέσει μικρά ρεύματα. Αυτό επηρεάζει την επιφάνεια επαφής μεταξύ νερού και αέρα, η οποία επεκτείνεται και τελικά δημιουργεί μεγάλα κύματα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ένα κύμα μόλις μπορεί να ταξιδέψει για σημαντικές αποστάσεις χωρίς να έχει απώλειες ενέργειας. [8]

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες ακολουθούν τις ίδιες αρχές με τις ανεμογεννήτριες της ξηράς και αποτελούνται και αυτές από τρεις περιστρεφόμενες λεπίδες στο δίσκο του ρότορα. Παρόλο που οι υπεράκτιες τεχνολογίες για την ανάκτηση της αιολικής ενέργειας εφαρμόζονται ευρέως, υπάρχουν αρκετά μηχανικά προβλήματα που πρέπει να

αντιμετωπιστούν. Μερικά από τα προβλήματα είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή των υπεράκτιων θεμελίων και πλωτών υποστηρίξεων που θα στηρίζουν τις κατασκευές στο υδατικό περιβάλλον, η χρήση ειδικών υλικών για τις λεπίδες του ρότορα, η ανάγκη για πιο εξελιγμένα και ανθεκτικά συστήματα ελέγχου, η δυσκολία στην ασφαλή συντήρηση και οι κοινόχρηστες υπεράκτιες υποδομές για την παραγωγή και αποθήκευση της ενέργειας.

Οι ωκεανοί λειτουργούν ως αποθήκες θερμικής ενέργειας, απορροφώντας το 15% της ακτινοβολίας του ήλιου. Η μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ωκεανών εκμεταλλεύεται την διαφορά της θερμοκρασίας της επιφάνειας σε σχέση με το βυθό που είναι τουλάχιστον 20 °C και συνιστάται για χρήση σε τροπικές περιοχές όπου το βάθος του βυθού είναι της τάξης του 1 km. Τα εργοστάσια μετατροπής ενέργειας αποτελούνται από ένα εναλλάκτη θερμότητας με έναν αποστακτήρα και ένα συμπιεστή και προτείνονται διεργασίες ανοιχτού κύκλου, κλειστού κύκλου ή υβριδικών κύκλων. Αυτή τη στιγμή, αυτά τα εργοστάσια είναι πολύ δαπανηρά, αλλά διάφορα εργοστάσια μικρής κλίμακας κλειστού και ανοιχτού κύκλου είναι υπό δοκιμή.

Μία άλλη πηγή ενέργειας του ωκεανού προκύπτει από το χημικό δυναμικό της βαθμίδας της αλμυρότητας εκεί όπου το θαλασσινό νερό συναντά το γλυκό νερό. Οι τεχνολογίες που προτείνονται για την παραγωγή ενέργειας από την διαφορά της αλμυρότητας είναι η παρατεταμένης πίεσης ώσμωση και η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση. Η πρώτη διεργασία χρησιμοποιήθηκε σε ένα εργοστάσιο στην Νορβηγία αλλά διακόπηκε η λειτουργία του λόγω μολύνσεων των μεμβρανών. Η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση άρχισε να χρησιμοποιείται σε πιλοτική κλίμακα από το 2014. Τα τεχνικά προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν ώστε αυτή η διεργασία να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερη κλίμακα είναι η ζημιά των μεμβρανών από τις φυσικές ακαθαρσίες του νερού, το φιλτράρισμα σωματιδίων, επίδραση των πολυσθενών ιόντων στην επίδοση του συστήματος, το αντίκτυπο των θαλάσσιων ειδών κατά τη διαδικασία της άντλησης και ανάγκη της μείωσης της εσωτερικής αντίστασης.

Η θαλάσσια άλγη, όπως είναι τα φύκια, αποτελεί μία πιθανή πηγή υδατικής ενέργειας. Η υδατική βιομάζα μπορεί μέσω της ζύμωσης να παράγει βιο-μεθάνιο ή/και βιο-υδρογόνο. Από την κυκλική οικονομία προκύπτουν εξής στάδια. Η χρήση της υδατικής ενέργειας για τη τροφοδότηση των συστημάτων υπεράκτιων υδατοκαλλιεργειών. Η ανάπτυξη φυκιών κοντά σε περιοχές ιχθυοκαλλιεργειών για τη μείωση του ευτροφισμού. Η συλλογή των φυκιών κατά την περίοδο της ωρίμανσης στο τέλος του καλοκαιριού. Η ενσίρωση των φυκιών για προ κατεργασία και ετήσιο εφοδιασμό πρώτης ύλης σε ένα βιο-χωνευτήρα. Η αντίδραση του υδρογόνου με το βιο-αέριο, με την βοήθεια της περίσσειας της υδατικής ενέργειας, που έχει ως αποτέλεσμα την αναβάθμιση του βιο-αερίου σε βιο-μεθάνιο, διπλασιάζονται σχεδόν την ποσότητα του βιο-μεθανίου ($4\text{H} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$). Τέλος, ενσωμάτωση στο δίκτυο του αερίου για χρήση ως πράσινο αέριο. Στην ουσία, το πράσινο αέριο έγινε ο ενεργειακός φορέας για την κατανομή της υδατικής ενέργειας και της βιο-ενέργειας από τα φύκια. Ο ενεργειακός αυτός φορέας είναι τώρα διαθέσιμος για να μετατραπεί σε θερμική ενέργεια,

σε καύσιμο για τα οχήματα που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ή σε ηλεκτρική ενέργεια. Η χρήση της άλγης, προσφέρει την απάντηση στην αμφιλεγόμενη παραγωγή βιο-ντίζελ και βιο-αιθανόλης από την βιομάζα που παράγεται στη ξηρά, όπου υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ της τροφής, των καυσίμων και άλλου χρήσεων της γης. Η άλγη έχει γρήγορους ρυθμούς ανάπτυξης, μπορεί να λειτουργήσει ως απόθεμα ενέργειας και μπορεί να δεσμεύσει άνθρακα. [7]

1.6 Βιογενής Ενέργεια

Η βιομάζα είναι η οργανική ύλη που παράγεται με τη φωτοσύνθεση, που πραγματοποιείται στην επιφάνεια της γης. Περιλαμβάνει φυτά και δέντρα, καθώς και όλα τα βιο-απόβλητα, όπως αστικά ή ζωικά απόβλητα, δασικά και γεωργικά υπολείμματα και διάφορα εργοστασιακά απόβλητα. Η βιομάζα αποτελεί τον μοναδικό πόρο φυσικής ενέργειας που περιέχει άνθρακα και βρίσκεται σε αρκετή ποσότητα ώστε να γίνει υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων.

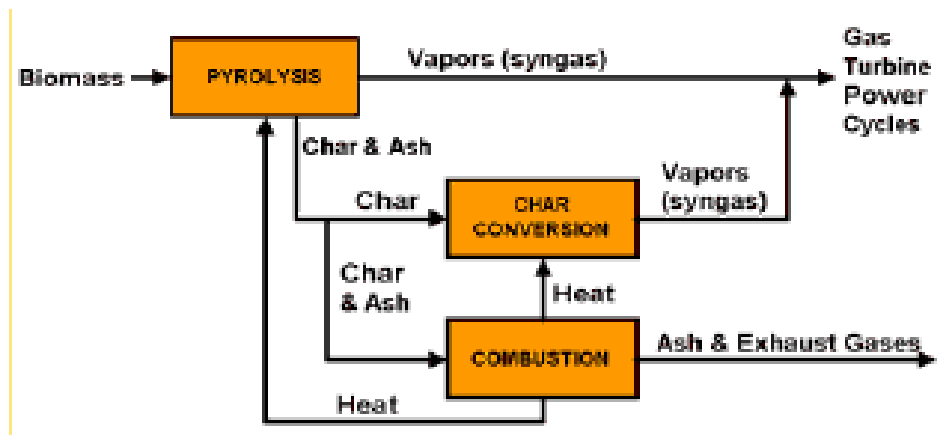
Η ηλιακή ενέργεια προκαλεί τη φωτοσύνθεση στα φυτά, κατά την οποία η χλωροφύλλη μετατρέπει το διοξείδιο του άνθρακα που προσλαμβάνουν τα φυτά από τον αέρα σε νερό και υδατάνθρακες, δηλαδή μόρια που αποτελούνται από άνθρακα, οξυγόνο και υδρογόνο. Στη συνέχεια μετά από μία πολύπλοκη διεργασία οι υδατάνθρακες μετατρέπονται σε βιομάζα, που παίρνει τη μορφή βιο-καυσίμου και αξιοποιείται σε θερμικής ενέργειας και τέλος η θερμική ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε θερμική ενέργεια, σε υγρά, στερεά ή αέρια καύσιμα και άλλα χημικά προϊόντα μέσα από διάφορες διεργασίες. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιο-ενέργειας είναι η απευθείας καύση, η αεριοποίηση, η πυρόλυση, η χώνευση και η ζύμωση.

Η απευθείας καύση είναι η πιο απλή μέθοδος παραγωγής ενέργειας από την βιομάζα. Οι εργοστασιακές εγκαταστάσεις καύσης βιομάζα μπορούν να κάψουν πολλά είδη βιο-καυσίμου όπως ξύλο, αγρονομικά απόβλητα ή αστικά απόβλητα. Η βιομάζα καίγεται για να παράγει ατμό, ο οποίος στρέφει τη γεννήτρια και η γεννήτρια παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Επειδή δημιουργείται στάχτη, με αποτέλεσμα να γεμίζουν τα καζάνια, να μειώνεται η απόδοση και να αυξάνεται το κόστος, δεν χρησιμοποιούνται όλα τα υλικά βιομάζα στην απευθείας καύση.

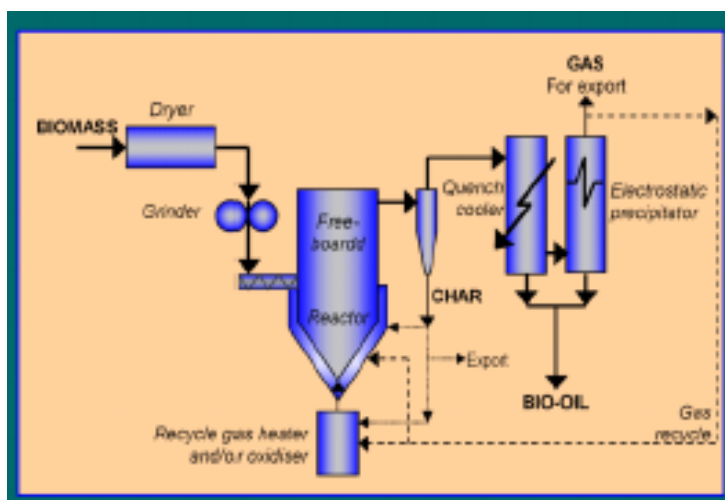
Η αεριοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα στερεό καύσιμο εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες με περιορισμένο οξυγόνο για να μετατραπεί σε αέριο καύσιμο. Το αέριο που παράγεται από τη διεργασία είναι ένα μίγμα από μονοξείδιο του άνθρακα,

διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο, υδρογόνο και μεθάνιο. Η αεριοποίηση έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι στην καύση στερών καυσίμων. Ένα από αυτά είναι ότι το μεθάνιο που παράγεται μπορεί να διαχειριστεί με παρόμοιο τρόπο όπως το φυσικό αέριο, και να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο. Ακόμη, κατά τη διεργασία αυτή το αέριο απομονώνεται από ανεπιθύμητα συστατικά και όταν καίγεται προκαλεί λιγότερα προβλήματα μόλυνσης.



Εικόνα 1-9 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας αεριοποίησης της βιο-μάζας [9]

Η πυρόλυση, στην απλούστερη μορφή της, θερμαίνει τη βιομάζα απομακρύνοντας τα πτητικά συστατικά και αφήνοντας πίσω το ξυλοκάρβουνο. Αυτή η διεργασία διπλασιάζει την ενεργειακή πυκνότητα του αρχικού υλικού επειδή το ξυλοκάρβουνο, που έχει το μισό βάρος της αρχικής βιομάζας, περιέχει το ίδιο ποσό ενέργειας, κάνοντας το καύσιμο πιο φορητό. Το ξυλοκάρβουνο, επίσης, καίγεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από την αρχική βιομάζα και είναι πιο χρήσιμο για τις διεργασίες παραγωγής. Πιο περίπλοκες μορφές πυρόλυσης χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των πτητικών συστατικών που αλλιώς χάνονται από το σύστημα. Αυτά τα συστατικά είναι πλούσια σε υδρογόνο, που είναι πιθανό καύσιμο, και μονοξείδιο του άνθρακα. Τέλος, τα συστατικά αυτά μπορούν να συνδυαστούν σε μεθάνιο, μεθανόλη και άλλους υδρογονάνθρακες.



Εικόνα 1-10 Διαδικασία πυρόλυσης [9]

Η χώνεψη πραγματοποιείται με τη χρήση αναερόβιων βακτηρίων. Αυτοί οι μικροοργανισμοί ζουν στον βυθό των βάλτων ή σε μέρη που δεν υπάρχει αέρας, καταναλώνοντας νεκρή οργανική ύλη για να παράγουν μεθάνιο και υδρογόνο. Τοποθετώντας αυτά τα βακτηρίδια σε δεξαμενές, που λέγονται χωνευτήρια, κι ταΐζοντας τα κοπριές ζώων και ανθρώπινα απόβλητα συλλέγεται το εκπεμπόμενο αέριο και χρησιμοποιείται ως καύσιμο. Αυτή η διεργασία είναι πολύ αποδοτική σε εξαγωγή χρήσιμης ενέργειας από βιομάζα. Μία ακόμα τεχνική είναι η συλλογή μεθανίου από τις χωματερές, όπου καταλήγει μία μεγάλη ποσότητα σπιτικών απόβλητων. Μετά από μία περίοδο αρκετών δεκαετιών, οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί στον πάτο των χωματερών αποσυνθέτουν την οργανική ύλη και εκπέμπουν μεθάνιο. Το αέριο μπορεί να συλλεχθεί και να χρησιμοποιηθεί καλύπτοντας τη χωματερή με ένα αδιαπέραστο στρώμα λάσπης και στην συνέχεια διατρυπώντας το στρώμα με σωλήνες θα φέρουν το αέριο στην επιφάνεια.

Με τη διεργασία της ζύμωσης πολλοί μικροοργανισμοί χρησιμοποιούνται, εδώ και αιώνες, για την παραγωγή αιθανόλης από τα σάκχαρα διάφορων φυτών. Η παραγωγή καυσίμου από βιομάζα με ζύμωση είναι μία προέκταση αυτής της διεργασίας, αν και ένα μεγάλο φάσμα από ζαχαροκάλαμο μέχρι ίνες δέντρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Τα βιο-καύσιμα είναι η βιομάζα που μετατρέπεται σε καύσιμο μεταφοράς όπως αιθανόλη, μεθανόλη, βιο-ντίζελ και πρόσθετα στη βενζίνη. Τα βιο-καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη καθαρή μορφή τους ή σε μείγμα με βενζίνη. [9]

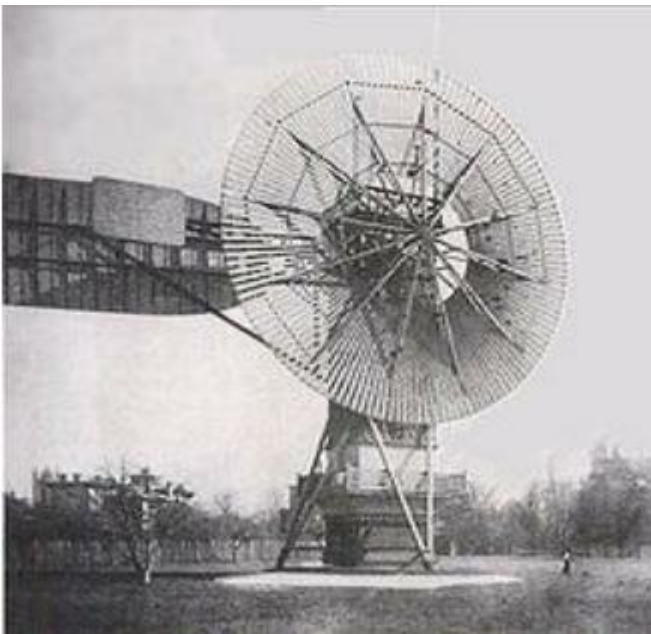
2 Ανεμογεννήτριες

2.1 Οι ανεμόμυλοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η βιομηχανική επανάσταση του τέλους του 19^{ου} αιώνα οδήγησε σε μεγάλη αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από θερμικά εργοστάσια σε κεντρικά σημεία αφενός αύξανε το κόστος από την μεγάλη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και από την άλλη δημιουργούσε την ανάγκη μεταφοράς στην κατανάλωση με αποτέλεσμα απώλειες στο κόστος δικτύου κλπ. Η επιστημονική κοινότητα άρχισε από τότε λοιπόν να στρέφεται σε εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που θα μπορούσαν να αντιμετωπίσουν τα παραπάνω μειονεκτήματα όπως για παράδειγμα το κόστος ορυκτών καυσίμων, παραγωγή της ενέργειας κοντά στο τόπο κατανάλωσής της κλπ, και ένας από αυτούς τους τρόπους είναι και ο άνεμος. Οι δύο πρωτοπόροι στην κατασκευή ανεμογεννητριών ήταν οι Charles F. Brush και Poul LaCour.

Ο Charles F. Brush ο οποίος, το 1888, δημιούργησε έναν ανεμόμυλο που παράγει 12 kW συνεχούς ρεύματος για χρήση στο προσωπικό του κτήμα, ώστε να φωτίζει 350 λαμπτήρες πυρακτώσεως, από τους οποίους χρησιμοποιούσε περίπου τους 100 σε καθημερινή βάση. Ο ανεμόμυλος αποτελούνταν από έναν τροχό οριζοντίου άξονα με 144 λεπίδες διαμέτρου 17 m. Ο τροχός βρισκόταν πάνω σε ένα πύργο ύψους 18 m που στηριζόταν με έναν κεντρικό μεταλλικό στύλο με διάμετρο 36 cm και επεκτεινόταν 2,4 m μέσα στο έδαφος. Για να παρέχει ευστάθεια και στήριξη στον κεντρικό στύλο, σε δυνατούς ανέμους, ο πύργος είχε τέσσερις βραχίονες στις γωνίες με τροχούς στον πάτο που συνδέονταν με μία ομόκεντρη ράγα η οποία βρισκόταν στο έδαφος. Ο ρότορας περιστροφής ήταν ένας συμπαγής τροχός, μία ουρά 18 m επί 6 m και ένα πλευρικό πτερύγιο ώστε να περιστρέφεται κατά τη φορά του ανέμου.

Ο ανεμόμυλος του Brush ήταν ένα ορόσημο για την ιστορία των οργάνων πολλών λεπίδων. Ο Brush εισήγαγε την υψηλή αναλογία στο κιβώτιο γραναζιών, 50:1, ώστε να εκμεταλλευτεί όλη την δυνατότητα μίας γεννήτριας σε ταχύτητα 500 rpm. Ακόμη ήταν η πρώτη προσπάθεια να συνδυαστεί η ήδη ανεπτυγμένη τεχνολογία κατασκευής και αεροδυναμικής των ανεμόμυλων με τη νέα αναπτυσσόμενη τεχνολογία του ηλεκτρικού ρεύματος. Ταυτόχρονα έδειξε ότι η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ήταν απίθανο να επιτευχθεί από ρότορες μικρών ταχυτήτων και πολλών λεπίδων.



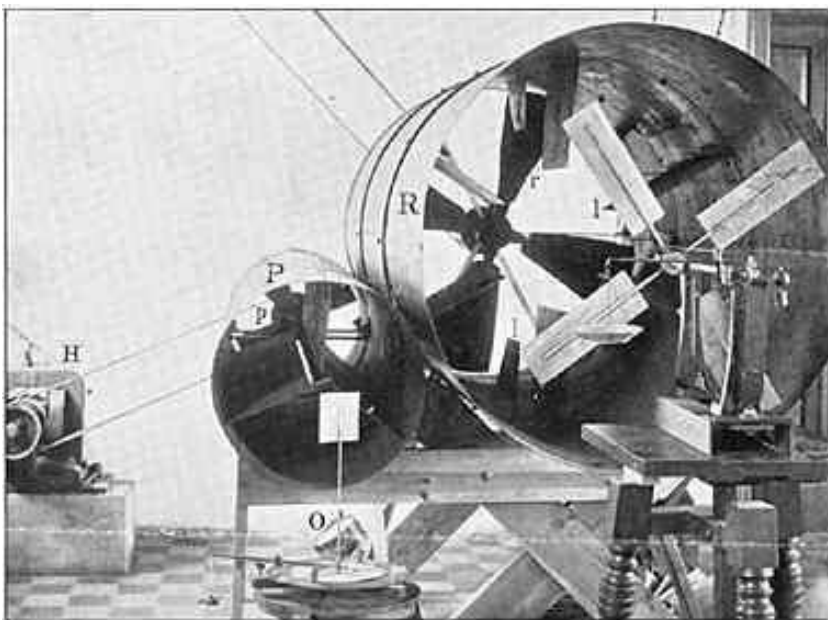
Εικόνα 2-1 Ο ανεμόμυλος του Brush ¹

¹ https://www.researchgate.net/figure/Charles-Brushs-windmill-of_fig1_271770428

Το επόμενο σημαντικό βήμα για τη μετάβαση από τους ανεμόμυλους στις ανεμογεννήτριες το έκανε ο καθηγητής Poul LaCour στην Δανία. Ο LaCour εκμεταλλεύθηκε τις αρχές τις νέας μηχανικής επιστήμης της αεροδυναμικής και ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε την αεροδυναμική σήραγγα.

Οι ρότορες που χρησιμοποιούσε ο LaCour ακολουθούσαν του συμβατικούς ευρωπαϊκούς ανεμόμυλους των τεσσάρων λεπίδων. Μετά από χρόνια πειραμάτων κατάφερε να ορίσει ένα σύνολο κανόνων ώστε να πετύχει την βέλτιστη απόδοση του ρότορα και να αναπτύξει με επιτυχία μία πρακτική συσκευή ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Σχεδίασε αιολικά πάρκα που παρήγαγαν 5 έως 25 kW για αγροτική χρήση και από το 1910 εκατοντάδες τέτοια πάρκα λειτουργούσαν στην Δανία. Στη συνέχεια εμφανίστηκε το ντίζελ και άρχισε η ανάπτυξη των ανεμόμυλων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ή την άντληση νερού.

Η μετάβαση από την παραγωγή μηχανικής ενέργειας των ανεμόμυλων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες πραγματοποιήθηκε τα τελευταία χρόνια του 19^{ου} αιώνα. Ο ανεμόμυλος υψηλής ευστάθειας του Brush και οι πιο πρακτικοί πύργοι χαμηλότερης ευστάθειας του LaCour ήταν πρωτοπόροι για τις αυτόνομες μονάδες παραγωγής συνεχούς ρεύματος για επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. [10]



Εικόνα 2-2 Η αεροδυναμική σήραγγα του LaCour [9]

2.2 Τα είδη Ανεμογεννητριών

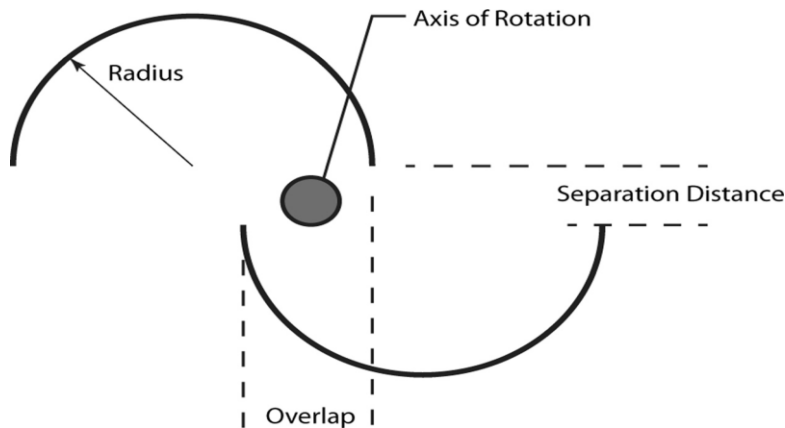
Υπάρχουν διάφορα είδη ανεμογεννητριών. Η πιο συνηθισμένη είναι η ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα περιστροφής. Αυτές οι συσκευές αποτελούνται από μερικές αεροδυναμικά βελτιστοποιημένες λεπίδες, οι οποίες μπορούν να περιστρέφονται γύρω από το μακρύ άξονα τους ρυθμίζοντας την κλίση τους με τον άνεμο. Ένας άλλος πιο οικονομικός τρόπος ρύθμισης είναι ο σχεδιασμός τέτοιων λεπίδων ώστε με τη ροή του αέρα να περιστρέφονται σε συγκεκριμένες ταχύτητες. Το εύρος της ενέργειας που μπορούν να παράγουν κυμαίνεται από 10kW μέχρι μερικά MW και η απόδοσή τους είναι αρκετά υψηλή. Επομένως, για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζεται μηχανές υψηλών ταχυτήτων περιστροφής ώστε να κρατήσει το κιβώτιο μεταφοράς και τη γεννήτρια σε μικρή κλίμακα και χαμηλό κόστος.

Ένας άλλος τύπος παραδοσιακών ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα περιστροφής είναι οι γεννήτριες με πολλές λεπίδες. Η κατασκευή τους ξεκίνησε πριν από 100 χρόνια. Τέτοιου είδους ανεμόμυλοι έχουν υψηλή ροπή έναρξης και είναι κατάλληλοι για την λειτουργία μηχανικών αντλιών νερού. Ο αριθμός των στροφών είναι χαμηλός και οι λεπίδες είναι κατασκευασμένες από ύφασμα με μία απλή γεωμετρία. Για την άντληση νερού η ρύθμιση των στροφών δεν ήταν απαραίτητη, αλλά εγκαταστάθηκαν συστήματα μηχανικής ασφάλειας για να προστατευτούν οι γεννήτριες σε περίπτωση καταιγίδων. Προκειμένου να αυξηθεί ο αριθμός των στροφών αυτές οι γεννήτριες ενισχύθηκαν με αεροδυναμικά πιο αποδοτικές λεπίδες διευκολύνοντας την παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος. Σε αυτή την περίπτωση οι λεπίδες ήταν μικρότερες. Η μηχανική σταθερότητα, αυτών των γεννητριών χαμηλών ταχυτήτων, ήταν πολύ υψηλή και μερικές λειτουργούσαν για περιόδους μεγαλύτερες των 50 χρόνων.

Ο τρίτος τύπος ανεμογεννήτριας είναι μία κατασκευή κάθετου άξονα περιστροφής, γνωστή ως Darrieus. Το πλεονέκτημα τους είναι ότι δεν εξαρτώνται από την διεύθυνση του ανέμου για να λειτουργήσουν. Για την εκκίνηση, είναι χρήσιμη η βοήθεια μίας γεννήτριας που λειτουργεί ως κινητήρας ή ενός ρότορα Savonius ο οποίος είναι τοποθετημένος στη κορυφή του κατακόρυφου άξονα. Δεν είναι συνηθισμένη εκτεταμένη χρήση αυτών των ανεμογεννητριών για την παραγωγή μεγάλων ποσών ενέργειας καθώς είναι πιο θορυβώδεις από τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Ακόμη ένα μειονέκτημα είναι η ταχύτητα του ανέμου η οποία αυξάνεται σημαντικά με το υψόμετρο, καθιστώντας τις δίσκους οριζόντιου άξονα περιστροφής πιο οικονομικούς. Παρόλα αυτά, οι ανεμογεννήτριες Darrieus κατασκευάζονται για την παραγωγή μικρής κλίμακας ενέργειας σε αποκεντρωμένες περιοχές χωρίς ηλεκτρικό δίκτυο, για παράδειγμα σε αγροτικές περιοχές χωρών υπό ανάπτυξη. [11]

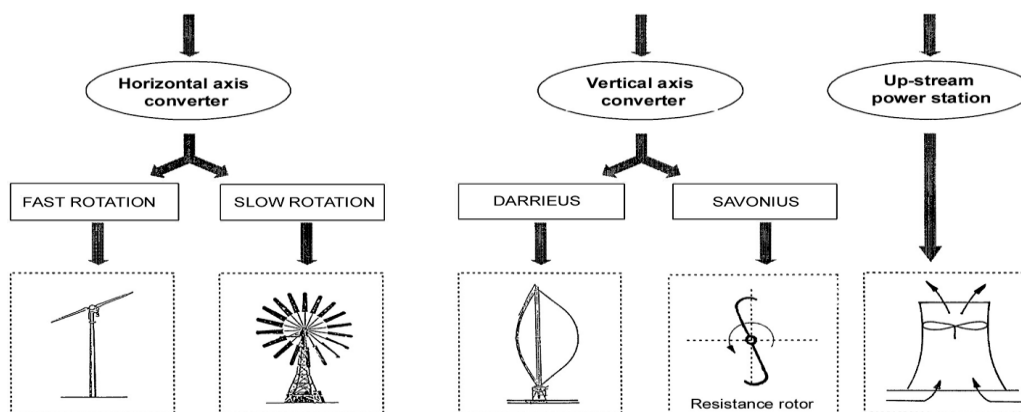
Ο ρότορας Savonius λειτουργεί με την οπισθέλκουσα δύναμη του ανέμου. Η βασική κατασκευή του ρότορα είναι ένας διχοτομημένος κύλινδρος που τα δύο μισά του

τοποθετούνται αντισταθμισμένα γύρω από το κέντρο του άξονα περιστροφής. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του ρότορα είναι η ακτίνα του κυλίνδρου και ο βαθμός της επικάλυψης των δύο μισών, καθώς επίσης μπορεί να υπάρχει μία απόσταση διαχωρισμού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-3. [12]



Εικόνα 2-3 Κάτοψη του ρότορα Savonius [12]

Ο τελευταίος τύπος εξοπλισμού για την εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου είναι ο σταθμός παραγωγής ενέργειας ανοδικής ροής ή θερμικός πύργος. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο συνδυασμό της λειτουργίας μίας ανεμογεννήτριας και ενός συλλέκτη ηλιακής ενέργειας. Στη κορυφή ενός στενού και ψηλού πύργου βρίσκεται ένας τροχός με κατακόρυφο άξονα περιστροφής που κινείται με την άνοδο του θερμού αέρα. Ο αέρας θερμαίνεται από έναν συλλέκτη ηλιακής ενέργειας που είναι τοποθετημένος στη βάση του πύργου. Ο σχεδιασμός του συλλέκτη είναι απλός, και αποτελείται από ένα διαφανές πλαστικό φύλλο που βρίσκεται μερικά μέτρα από το έδαφος σε ένα δακτύλιο γύρω από το πύργο. Επομένως, ο σταθμός χρειάζεται αρκετό χώρο και ο πύργος πρέπει να είναι πολύ ψηλός. Αυτά τα συστήματα δεν έχουν μεγάλη απόδοση, με μόλις 1% αποδοτικότητα. [11]



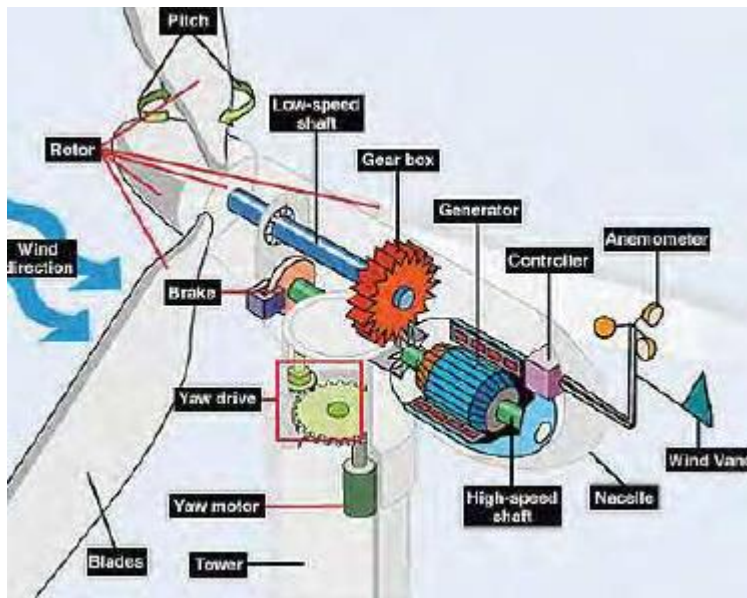
Εικόνα 2-4 Τα είδη των ανεμογεννητριών [11]

2.3 Τα μέρη μίας ανεμογεννήτριας

Μία ανεμογεννήτρια είναι μία περιστροφική συσκευή που αποσπά ενέργεια από τον άνεμο. Η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η ανεμογεννήτρια μπορεί να περιστρέφεται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα, ανεμογεννήτρια οριζόντιο άξονα περιστροφής, ή γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα περιστροφής. Τα βασικά μέρη από το οποία αποτελείται μία ανεμογεννήτρια είναι:

- Οι λεπίδες, που είναι πτερύγια σχεδιασμένα να συλλέγουν την ενέργεια των δυνατών και γρήγορων ανέμων. Οι λεπίδες αποτελούνται από ελαφριά και ανθεκτικά στη διάβρωση υλικά. Τα καλύτερα υλικά προκύπτουν από την σύνθεση γυάλινων ινών και ενισχυμένων πλαστικών.
- Ο ρότορας, ο οποίος κατασκευάστηκε ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής με τον αέρα. Ο ρότορας περιστρέφεται γύρω από την γεννήτρια μέσα από τον άξονα χαμηλής ταχύτητας και το κιβώτιο γραναζιών.
- Το κιβώτιο γραναζιών ή κιβώτιο τροχών, που ενισχύει ή αυξάνει την παραγόμενη ενέργεια του ρότορα. Το κιβώτιο βρίσκεται ανάμεσα στη γεννήτρια και τον ρότορα.
- Η γεννήτρια, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των περιστροφών του ρότορα. Η γεννήτριες έχουν διαφορετικά μεγέθη ανάλογο με την επιθυμητή ενέργεια που παράγεται.
- Μία άτρακτος, στην οποία βρίσκονται τοποθετημένα το κιβώτιο τροχών και η γεννήτρια, για προστασία από τα άλλα στοιχεία.
- Ο πύργος, στον οποίο βρίσκεται η άτρακτος και ο ρότορας. Οι πύργοι για μεγάλες ανεμογεννήτριες μπορεί να κατασκευάζονται σαν σωληνοειδής πύργοι από χάλυβα, τσιμεντένιοι πύργοι ή ως δικτυωτοί πυλώνες. Όσο ψηλότεροι είναι οι πύργοι τόσο πιο ισχυροί είναι οι άνεμοι. Οι άνεμοι που βρίσκονται πιο κοντά στο έδαφος δεν έχουν μόνο χαμηλή ταχύτητα αλλά είναι και πιο ταραχώδης. Οι υψηλοί άνεμοι δεν αλλοιώνονται από εμπόδια και είναι πιο σταθεροί.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα περιστροφής χωρίζονται σε ανοδικές αν ο άνεμος χτυπάει πρώτα τις λεπίδες και μετά το πύργο και σε καθοδικές αν ο άνεμος χτυπάει πρώτα τον πύργο. Τα βασικά πλεονεκτήματα που έχουν οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα περιστροφής είναι ότι η γεννήτρια και το κιβώτιων τροχών μπορούν να τοποθετηθούν στο έδαφος και δεν είναι αναγκαία η χρήση του πύργου. Παρόλα αυτά, η ταχύτητα του ανέμου κοντά στο έδαφος είναι πολύ χαμηλή και, ενώ δεν χρειάζεται ο πύργος, οι ταχύτητες του ανέμου θα είναι πολύ χαμηλότερες στα χαμηλά σημεία του ρότορα, και η συνολική απόδοση δεν θα είναι τόσο σημαντική όσο η απόδοση μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα περιστροφής. [13]



Εικόνα 2-5 Τα μέρη της ανεμογεννήτριας [13]

2.4 Σχεδιασμός της ανεμογεννήτριας

Κατά το σχεδιασμό μίας ανεμογεννήτριας λαμβάνονται υπόψη η δυναμική συμπεριφορά της, οι μηχανικές αντοχές των υλικών που χρησιμοποιούνται και η συνολική κατασκευή της. Οι ανεμογεννήτριες δημιουργήθηκαν για να συλλέγουν την κινητική ενέργεια του αέρα. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες δεν έχουν μεγάλο αριθμό λεπίδων γιατί οι γεννήτριες με πολλές λεπίδες ή φαρδιές λεπίδες υπόκεινται σε μεγάλα φορτία δυνάμεων, καθώς η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλή. Το ενεργειακό περιεχόμενο του ανέμου είναι ανάλογο της τρίτης δύναμης της ταχύτητας του. Οι ανεμογεννήτριες δημιουργήθηκαν για να αντέχουν σε έντονους ανέμους. Για να περιοριστεί η επιρροή των ισχυρών ανέμων και να επιτρέπεται στους ρότορες να περιστρέφονται σε μεγάλες ταχύτητες γενικά προτιμώνται ανεμογεννήτριες με λίγες, μακριές και λεπτές λεπίδες.

Αν μία ανεμογεννήτρια τοποθετηθεί σε ένα κλίμα με πολύ ταραχώδεις ανέμους τότε υπάρχει μεγάλη διακύμανση στους ανέμους και επομένως θα υπάρχει διακύμανση και στις δυνάμεις. Τα στοιχεία της ανεμογεννήτριας όπως οι λεπίδες μπορεί να δημιουργήσουν ρωγμές, μετά από τα επαναλαμβανόμενα λυγίσματα, που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα στο τέλος να σπάσουν. Κατά το σχεδιασμό μίας ανεμογεννήτριας είναι σημαντικό να υπολογίζεται εκ των προτέρων πως τα διάφορα στοιχεία θα δονούνται τόσο μόνα τους, όσο και συνδυαστικά. Είναι, ακόμη σημαντικός ο υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε λυγισμό ή τέντωμα ενός στοιχείου.

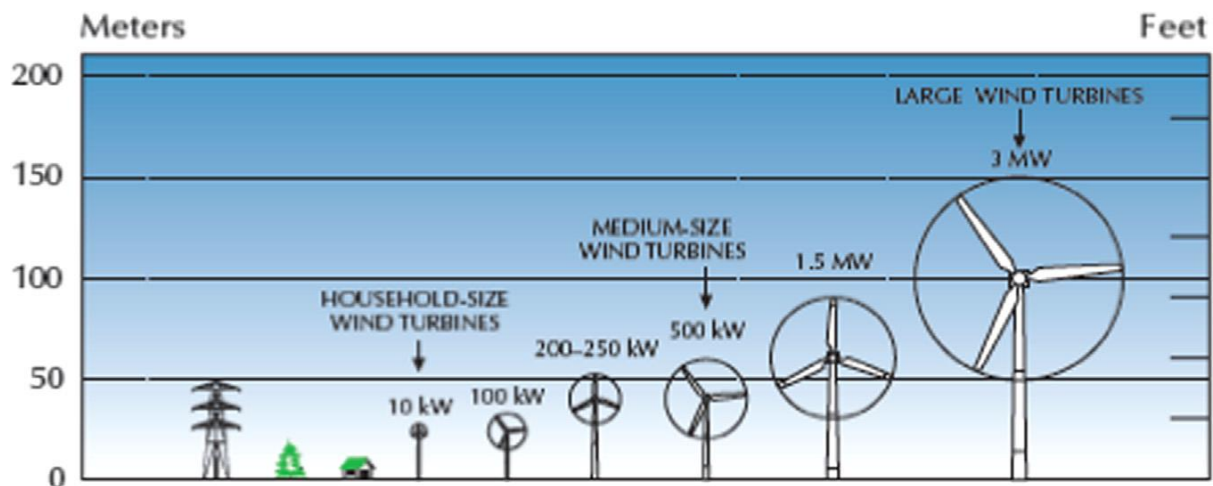
Οι ανοδικές ανεμογεννήτριες έχουν το ρότορα να μπροστά να τον χτυπάει ο άνεμος. Το βασικό πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι ότι αποφεύγεται η επιβράδυνση του ανέμου πίσω από τον πύργο. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν αυτόν τον σχεδιασμό καθώς ο ρότορας στις καθοδικές ανεμογεννήτριες τοποθετείται πίσω από τον πύργο.

Οι περισσότερες σύγχρονες ανεμογεννήτριες αποτελούνται από ρότορες με τρεις λεπίδες με το ρότορα να βρίσκεται μπροστά από τον πύργο και χρησιμοποιώντας ηλεκτρικούς κινητήρες στο μηχανισμό εκτροπής τους. Οι πλειοψηφία των ανεμογεννητριών που πωλούνται στην αγορά έχουν αυτόν τον σχεδιασμό. Οι ανεμογεννήτριες δύο λεπίδων έχουν το πλεονέκτημα της εξοικονόμησης του κόστους μία λεπίδας και του βάρους της. Παρόλα αυτά, δεν έχουν μεγάλη επιτυχία στις αγορές, εν μέρη επειδή απαιτούν υψηλότερη περιστροφική ταχύτητα ώστε να αποδώσουν την ίδια ενέργεια με τις ανεμογεννήτριες τριών λεπίδων.

Οι εκπομπές ήχων από μία ανεμογεννήτρια μπορούν να προέρχονται είτε από μηχανικούς ήχους είτε από αεροδυναμικούς. Οι μηχανικοί ήχοι πηγάζουν από τα μεταλλικά στοιχεία που κινούνται ή χτυπάνε το ένα με το άλλο, μέσα στο κιβώτιο των τροχών ή τη γεννήτρια. Η ηχομόνωση μπορεί να μειώσει τις μεσαίες και υψηλές ηχητικές συχνότητες. Η πηγή των αεροδυναμικών ηχητικών εκπομπών εμφανίζεται όταν ο άνεμος χτυπάει τα διάφορα στοιχεία σε συγκεκριμένη ταχύτητα και αρχίζει να δημιουργείται ένας ήχος. Για παράδειγμα, οι λεπίδες του ρότορα ταλαντώνονται και παράγουν έναν ήχο σε χαμηλές ταχύτητες. Ο προσεκτικός σχεδιασμός των πίσω άκρων και η προσεκτική μεταχείριση των λεπίδων κατά την διάρκεια της τοποθέτησης στους στον ρότορα, έχει γίνει μία πρακτική ρουτίνας στη βιομηχανία.

2.5 Ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας

Ανάλογα με την διάμετρο του ρότορα υπάρχει και η αντίστοιχη κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-6. Μία τυπική ανεμογεννήτριας μεγάλης κλίμακας έχει διάμετρο ρότορα που κυμαίνεται από 50 έως 100 m και η ισχύς που παράγεται βρίσκεται μεταξύ 1 και 3 MW. Οι μικρής κλίμακας ανεμογεννήτριες, συγκρίνοντας τις με τις ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας, έχουν διάμετρο ρότορα από 3 έως 10 m και η ενεργειακή απόδοση τους είναι 1,4 με 20 kW.



Εικόνα 2-6 Κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών με βάση την διάμετρο του ρότορα τους [14]

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών με βάση την παραγόμενη ενέργεια τους. Οι ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας και ονομαστικής ισχύος 50 W παράγουν πιο δαπανηρό ηλεκτρικό ρεύμα από τις ανεμογεννήτριες μεσαίας ή μεγάλης κλίμακας, ειδικότερα σε τοποθεσίες με ασθενείς ανέμους. Είναι όμως, εύχρηστες σε αυτοματοποιημένες εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας. Αυτές οι ανεμογεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μία αξιόπιστη πηγή ενέργειας όταν έχουν το κατάλληλο μέγεθος και χρησιμοποιούνται σε ιδανικές συνθήκες. Μπορούν επίσης να γίνουν η πηγή παραγωγής κοινωνικοοικονομικά πολύτιμης ενέργειας για πολλές υπό ανάπτυξη χώρες. Σε περιοχές απομακρυσμένες από το δίκτυο ισχύος, αυτές οι ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας μπορούν να λειτουργούν ως χρήσιμες πηγές ενέργειας σε ανεπτυγμένες χώρες. Το μέλλον όμως αυτού του είδους ανεμογεννητριών εξαρτάται από το κόστος παραγωγής τους. Δύο παράγοντες αυτής της εξάρτησης είναι το αρχικό κόστος ανά μονάδα ισχύος W και το κόστος ανά κιλοβατώρα kWh που παράγεται. Αν αυτοί οι δύο παράγοντες βρίσκονται σε ένα προσιτό κόστος τότε οι ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας μπορούν να γίνουν πηγή πιθανής παραγωγής ενέργειας. Επομένως αυτές οι ανεμογεννήτριες θα πρέπει να είναι οικονομικά αποδοτικές, και άρα είναι αναγκαίο να μελετηθούν και να κατανοηθούν τα διάφορα είδη ανεμογεννητριών μικρής κλίμακας που είναι διαθέσιμα για χρήση αυτή την στιγμή.

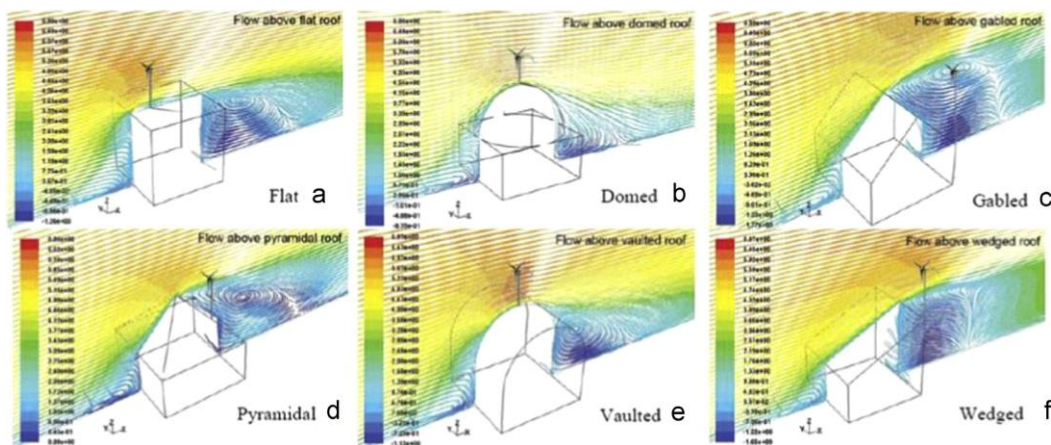
Πίνακας 1 Κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών με βάση την ενεργειακή τους απόδοση [14]

| | | Rotor diameter (m) | | Swept area (m ²) | | Standard power rating (kW) | |
|--------------------|-------------------|--------------------|------|------------------------------|------|----------------------------|------|
| Small scale | Micro | 0.5 | 1.25 | 0.2 | 1.2 | 0.004 | 0.25 |
| | Mini | 1.25 | 3 | 1.2 | 7.1 | 0.25 | 1.4 |
| | Household | 3 | 10 | 7 | 79 | 1.4 | 16 |
| | Small commercial | 10 | 20 | 79 | 314 | 25 | 100 |
| | Medium commercial | 20 | 50 | 314 | 1963 | 100 | 1000 |
| | Large commercial | 50 | 100 | 1963 | 7854 | 1000 | 3000 |

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καλύψουν αποτελεσματικά τις οικιακές ενεργειακές ανάγκες, αλλά πολύ σημαντικό ρόλο για την μέγιστη δυνατή απόδοση παίζει η τοποθεσία τους. Για αυτό το λόγο διεξάγονται πειράματα για τον προσδιορισμό της κατάλληλης τοποθεσίας τέτοιων ανεμογεννητριών.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση είναι οι χαμηλές μέσες ταχύτητες του ανέμου, οι υψηλές αναταραχές και οι αεροδυναμικοί ήχοι που παράγονται από τις γεννήτριες. Αν μία ανεμογεννήτρια υπόκειται σε υψηλές αναταραχές τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα οι λεπίδες να καταρρεύσουν λόγω της μηχανικής κοπώσεως. Η ροή του ανέμου και τα επίπεδα των αναταραχών στην οροφή των κτηρίων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το σχήμα της οροφής.

Σε ένα πείραμα που διεξήχθη για να οριστεί η βέλτιστη θέση στην κορυφή της οροφής λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες συνθήκες, για παράδειγμα το σχήμα της οροφής, η κατεύθυνση του ανέμου και το ύψος του κτηρίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-7, υπολογίστηκε ότι η μέγιστη αναταραχή επεκτείνεται έως και 1,3 φορές το ύψος του κτηρίου. Αυτό σημαίνει ότι η ανεμογεννήτρια θα πρέπει να τοποθετηθεί σε ύψος 1,3 φορές το ύψος του κτηρίου ή μεγαλύτερο. [14]



Εικόνα 2-7 Βέλτιστη θέση τοποθεσίας της ανεμογεννήτριας για διαφορετικά σχήματα οροφών. [14]

2.6 Μοντέλο Μηχανικής Ισχύος

Η κινητική ενέργεια του αέρα, σε αντικείμενο μάζας m , με ταχύτητας v είναι:

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad 2.1$$

Η ισχύς του κινούμενου αέρα θα είναι:

$$P_{wind} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} * \dot{m} * v^2 \quad 2.2$$

όπου \dot{m} ο ρυθμός ροής μάζας ανά δευτερόλεπτό. Όταν ο αέρας περνάει από μία διατομή A , για παράδειγμα το εμβαδόν του δίσκου που διαγράφουν οι λεπίδες της ανεμογεννήτριας, τότε η ισχύς του αέρα μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad 2.3$$

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα.

Η ενέργεια του αέρα, που περιγράφεται από την εξίσωση 2.1 δεν μπορεί να μετατραπεί σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας με απόδοση 100%, από κανένα μετατροπέα ενέργειας. Ακόμη, η ισχύς που τα παραχθεί από την ροή του αέρα, από τον μετατροπέα, θα είναι χαμηλότερη από την συνολική ισχύ του αέρα P_{wind} και τελικά η παραγόμενη ισχύς P_{ww} μπορεί να υπολογισθεί ως τη διαφορά μεταξύ της ισχύος του κινούμενου αέρα πριν και μετά τον μετατροπέα, όπου v_1 και v_2 οι ταχύτητες του αέρα πριν και μετά τον μετατροπέα μπορούν να διαφέρουν.

$$P_{ww} = P_{wind1} - P_{wind2} = \frac{1}{2} * \rho * A * (v_1^3 - v_2^3) \quad 2.4$$

Ο πραγματικός μετατροπέας της ενέργειας θεωρείται ότι είναι ένας τύπος φράγματος. Τότε ο αέρας ασκεί μία δύναμη στο μετατροπέα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πίεση πριν τον μετατροπέα και ταυτόχρονα να μειώνεται η ταχύτητα του αέρα v' .

Η δύναμη που ασκείται είναι ίση με:

$$F = \dot{m} * (v_1 - v_2) \quad 2.5$$

και η ισχύς που συλλέγεται είναι ίση με

$$P_{ww} = F * v' = \dot{m} * (v_1 - v_2) * v' \quad 2.6$$

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις 2.4 και 2.6, υποθέτοντας ότι ο ρυθμός ροής της μάζας είναι σταθερός, προκύπτει ότι η ταχύτητα του αέρα v' είναι:

$$v' = \frac{1}{2} * (v_1 + v_2) \quad 2.7$$

Άρα, η μηχανική ισχύς που εξάγεται από την ροή του αέρα με τον μετατροπέα είναι ίση με:

$$P_{ww} = \frac{1}{4} * \rho * A * (v_1^2 - v_2^2) * (v_1 + v_2) \quad 2.8$$

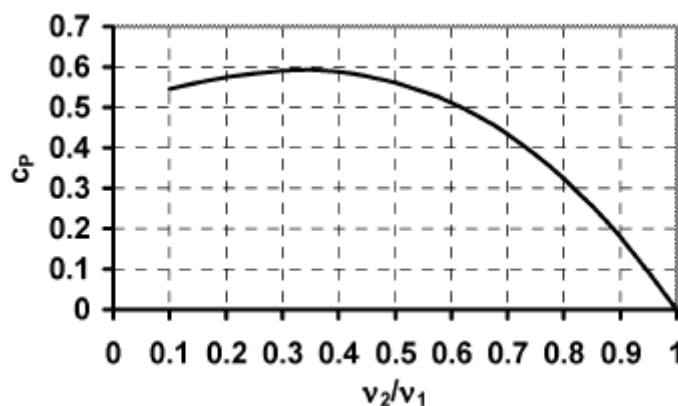
και είναι μικρότερη από την ισχύ της ροής του αέρα, P_{wind} , πριν το μετατροπέα.

Η εξίσωση 2.8 γράφεται συνήθως με την παρακάτω μορφή:

$$P_{ww} = c_p * P_{wind} = c_p * \frac{1}{2} * \rho * A * v_1^3 \quad 2.9$$

Όπου ο συντελεστής $c_p < 1$, ορίζεται ως ο λόγος της μηχανικής ισχύς που εξάγεται από τον μετατροπέα προς την ισχύ του ρεύματος αέρα, ονομάζεται συντελεστής ισχύος, ή αλλιώς παράγοντας του Betz. Ο συντελεστής είναι ίσος με:

$$c_p = \frac{P_{ww}}{P_{wind}} = \frac{1}{2} * \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) * \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \quad 2.10$$



Εικόνα 2-8 Διάγραμμα συντελεστή ισχύος και λόγου ταχυτήτων [15]

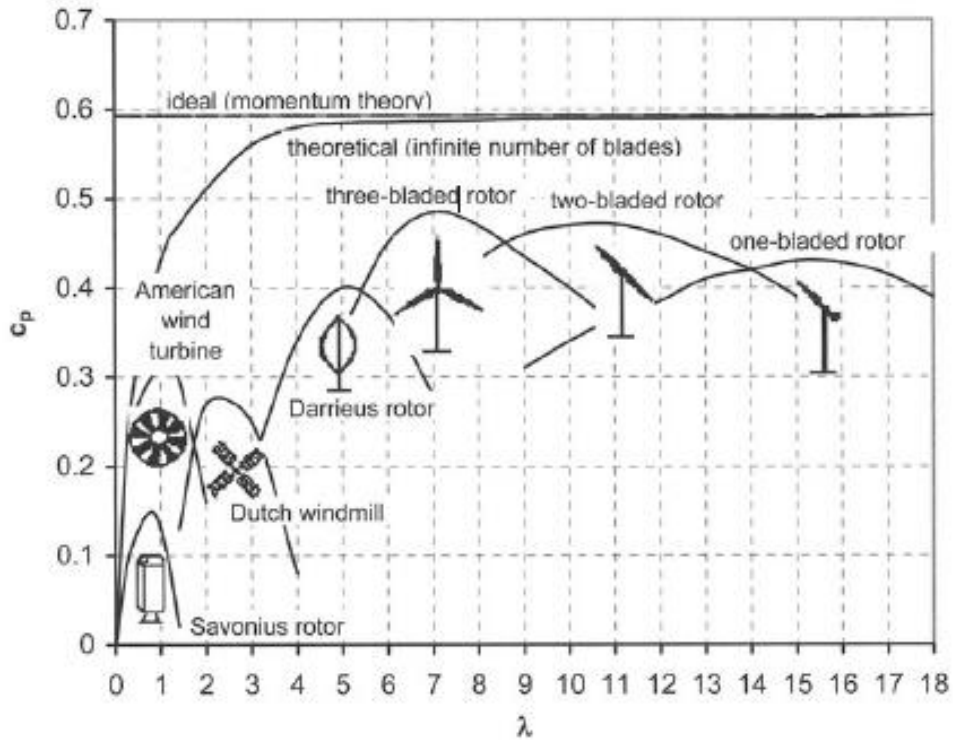
Από την Εικόνα 2-8 παρατηρείται πως η μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος είναι $c_p=0.593$ όταν ο λόγος των ταχυτήτων είναι ίσος με $v_2/v_1=1/3$.

Ο συντελεστής ισχύος σε πραγματικούς μετατροπείς c_p πετυχαίνει χαμηλότερες τιμές από την παραπάνω υπολογισμένη τιμή λόγω των αεροδυναμικών απωλειών που εξαρτώνται από την κατασκευή του ρότορα, δηλαδή τον αριθμό και το σχήμα των λεπίδων, το βάρος, την ακαμψία και άλλα. Ο συντελεστής ισχύος του ρότορα συνήθως δίνεται από μία συνάρτηση δύο παραμέτρων: τον λόγο των ταχυτήτων στη κορυφή της λεπίδας λ και την γωνία της λεπίδας θ . Η γωνία της λεπίδας ορίζεται ως τη γωνία μεταξύ του δίσκου περιστροφής και τη χορδή της λεπίδας στο σημείο τομής τους και ο λόγος των ταχυτήτων δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\omega * R}{v} \quad 2.11$$

Όπου:

- u η εφαιπτομένη ταχύτητα της λεπίδας στη κορυφή,
- ω η γωνιακή ταχύτητα,
- R η ακτίνα του ρότορα, δηλαδή το μήκος της λεπίδας. [15]



Εικόνα 2-9 Συντελεστής ισχύος ρότορα για διάφορους τύπους ρότορα [15]

Η σχέση που συνδέει τον συντελεστή απόδοσης c_p με τον λόγο ταχυτήτων δίνεται από την εξίσωση 2.12.

$$c_p = c_1 * \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 * \beta - c_4 \right) * e^{-\left(\frac{c_5}{\lambda_i}\right)} + c_6 * \lambda \quad 2.12$$

και

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 * \beta} + \frac{0,035}{\beta^{3+1}} \quad 2.13$$

Όπου β είναι η γωνία που σχηματίζει η χορδή της λεπίδας με τον άξονα περιστροφής.

Οι παράμετροι c_1 με c_6 υπολογίζονται εμπειρικά για κάθε ανεμογεννήτρια. Για ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας οι παράμετροι αυτοί δίνονται από τον Πίνακα 2. [16]

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 |
| 0.5 | 116 | 0.4 | 5 | 21 | 0 |

Πίνακας 2 Συντελεστές για τον υπολογισμό του c_p [16]

3 Η προσομοίωση

3.1 Η έννοια της προσομοίωσης

Η προσομοίωση ορίζεται ως η διαδικασία της δημιουργίας ενός μοντέλου ενός συστήματος με τις κατάλληλες εισαγόμενες μεταβλητές και της παρατήρησης των αντίστοιχων εξόδων του μοντέλου. Ένας δεύτερος ορισμός είναι ο σχεδιασμός μοντέλου ενός θεωρητικού συστήματος και η χρήση του για την διεξαγωγή πειραμάτων με σκοπό την κατανόηση την απόδοσης του συστήματος και/ή την αξιολόγηση εναλλακτικών στρατηγικών και διαδικασίας λήψης αποφάσεων με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Ο στόχος της προσομοίωσης περιλαμβάνει την εκτίμηση της απόδοσης, την απόδειξη, την πρόβλεψη, την ανακάλυψη, την εξάσκηση, την ψυχαγωγία και την εκπαίδευση. Οι τεχνικές προσομοίωσης εφαρμόζονται σε διάφορα ερευνητικά πεδία, για παράδειγμα τα συστήματα υπολογιστών, διαδικασίες κατασκευής, κοινωνικά συστήματα, κυβερνητικά συστήματα, οικολογικά συστήματα και άλλες περίπλοκες διαδικασίες και συστήματα. Οι μέθοδοι της προσομοίωσης έχουν εφαρμοστεί σε διεπιστημονικά ερευνητικά πεδία, όπως ο σχεδιασμός συστημάτων μηχανισμών λήψης αποφάσεων ή ο σχεδιασμός διεργασιών ανάπτυξης νέων προϊόντων. [17]

Η χρήση της προσομοίωσης ως ένα εργαλείο κατανόησης δυναμικών συστημάτων δεν είναι η μοναδική τεχνική. Οι αναλυτές προσομοιώσεων μπορούν να πειραματιστούν με το πραγματικό σύστημα τροποποιώντας το χωρίς να ασχοληθούν με την προσομοίωση. Η μελέτη όμως των πραγματικών συστημάτων με αυτό τη προσέγγιση δεν είναι πάντα δυνατή, συνήθως είναι πολύ ακριβή και προκαλεί πολλές διαταραχές. Για παράδειγμα, έστω ότι ένας αναλυτής πρέπει να υπολογίσει τον αριθμό των υποκαταστημάτων που πρέπει να έχει μία τράπεζα. Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση χωρίς προσομοίωση ο αναλυτής θα πρέπει να εξετάσει ένα μεγάλο αριθμό υποκαταστημάτων σε ένα χρονικό διάστημα και να ερευνήσει την απόδοση της εξυπηρέτησης πελατών. Αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να λειτουργήσει σε μικρά και απλά συστήματα όπου οι αλλαγές δεν επηρεάζουν την κανονική λειτουργία του συστήματος. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η μελέτη του συστήματος με μία αναλυτική μέθοδο. Στο προηγούμενο παράδειγμα ο αναλυτής θα μπορούσε να συνοψίσει το πρόβλημα σε μία απλή μαθηματική έκφραση. Αλλά αν ο σκοπός είναι η κατανόηση των τάσεων για τα επόμενα δύο χρόνια τότε η σύνοψη σε μία μαθηματική έκφραση θα ήταν πολύ δύσκολη. Σε αυτή την περίπτωση η προσομοίωση θα ήταν η καλύτερη επιλογή για την κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Η προσομοίωση αποτελεί το κατάλληλο εργαλείο ανάλυσης συστημάτων, όταν τα συστήματα είναι τόσο περίπλοκα ώστε να είναι σχεδόν αδύνατο να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους. [18]

3.2 Τα είδη της προσομοίωσης

Η προσομοίωση μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες, την αναλυτική προσομοίωση, την υπολογιστική προσομοίωση και την υβριδική προσομοίωση. Η αναλυτική ή αλλιώς μαθηματική προσομοίωση αναπαριστά ένα πραγματικό σύστημα σε μορφή εξισώσεων, μαθηματικών τύπων, ανισοτήτων ή αλγορίθμων. Το μοντέλο της οικονομικής ποσότητας παραγγελίας (EOQ) σε ένα απογραφικό σύστημα είναι ένα παράδειγμα αναλυτικής μοντελοποίησης. Ένα αναλυτικό μοντέλο περιγράφει ευρέως ένα σύστημα σε μεγάλο βαθμό και κοστίζει λιγότερο για να αναπτυχθεί. Ένα αναλυτικό μοντέλο είναι και η μοντελοποίηση ανάλυσης μέσης τιμής και είναι χρήσιμη όταν δεν υπάρχουν πολλά δεδομένα για το σύστημα. Ένα αναλυτικό μοντέλο δίνει μία καλή ανάλυση πρώτης ματιάς σε ένα νέο σύστημα που υπάρχουν πολλοί άγνωστοι.

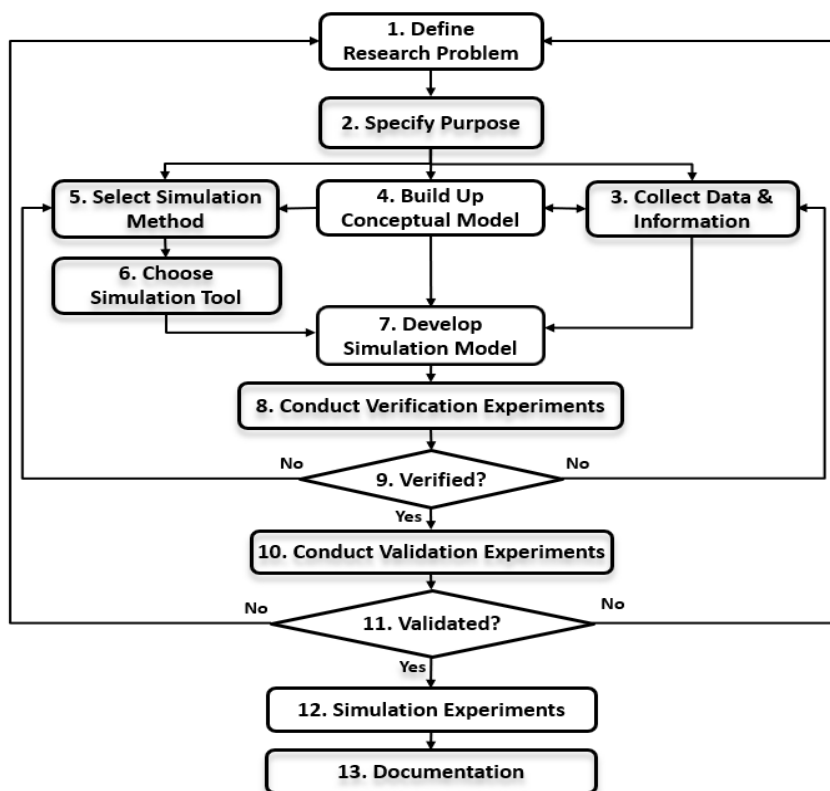
Η υπολογιστική προσομοίωση είναι περιγραφική. Είναι ένα σετ δομικών στοιχείων λογισμικού ή υπο-μοντέλα που περιγράφει ένα περίπλοκο πραγματικό σύστημα. Ένα μοντέλο μπορεί να είναι μία προσομοίωση διακριτού χρόνου ή μια συνεχής προσομοίωση. Αυτό το είδος της προσομοίωσης χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει ένα σύστημα με διάφορα στοιχεία, συνήθως μέσα από δομικά στοιχεία λογισμικού. Περιγράφει την συμπεριφορά του συστήματος με έναν στατιστικό τρόπο αντιγράφοντας την απόδοση ενός συνόλου παρατηρήσεων. Λόγω της λεπτομερούς περιγραφής του συστήματος, το μοντέλο προσομοίωσης χρειάζεται σημαντικά μεγάλους χρόνους ανάπτυξης. Επομένως το κόστος υπολογιστικής προσομοίωσης μπορεί μερικές φορές να είναι πολύ υψηλό. Η υπολογιστική προσομοίωση χρησιμοποιείται όταν όλα τα στοιχεία και τα χαρακτηριστικά τους είναι γνωστά ή μπορούν να εκτιμηθούν. Τυπικά περιλαμβάνει διατύπωση προβλήματος, συλλογή δεδομένων, ανάλυση δεδομένων, διατύπωση μοντέλου, προγραμματισμό, επικύρωση μοντέλου, σχεδιασμό πειραμάτων και ανάλυση αποτελεσμάτων. Εκτός από τις παραπάνω κατηγορίες προσομοίωση υπάρχει μία πιο πρακτική μέθοδος που περιγράφεται στη συνέχεια

Σε διάφορες περιπτώσεις ένα περίπλοκο σύστημα χρειάζεται υπο-μοντέλα που περιγράφουν τις βασικές λειτουργίες του, για παράδειγμα, υπο-μοντέλο λειτουργιών και ελέγχου, υπο-μοντέλο ραντάρ, υπο-μοντέλο επικοινωνιών. Μερικά υπο-μοντέλα ή συγκεκριμένες λειτουργίες σε ένα υπο-μοντέλο μπορούν να περιγραφούν με εξισώσεις ή αλγόριθμους, ενώ την ίδια στιγμή άλλα υπο-μοντέλα και μέρη υπο-μοντέλων πρέπει να προσομοιωθούν. Αυτό ο συνδυασμός του αναλυτικού μοντέλου που βρίσκεται μέσα στο υπολογιστικό μοντέλο λέγεται υβριδική προσομοίωση. Η υβριδική προσομοίωση μπορεί να επίσης να προκύψει σε ένα περιβάλλον όταν στα πρώτα στάδια ενός περίπλοκο νέο σύστημα με σχετικά άγνωστα χαρακτηριστικά μοντελοποιηθεί αρχικά με ένα αναλυτικό μοντέλο. Στη

συνέχεια, καθώς όλο και περισσότερες πληροφορίες γίνονται διαθέσιμες, το σύστημα μοντελοποιείται μέσω μίας προσομοίωσης. Τα αρχικά σετ εξισώσεων μπορούν να ενσωματωθούν στο μοντέλο της προσομοίωσης αν μπορούν να εφαρμοστούν. Όπως παρατηρείται, η υβριδική προσομοίωση αξιοποιεί τα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων από την αναλυτική προσομοίωση καθώς και τα περιγραφικά στοιχεία της υπολογιστικής προσομοίωσης. [19]

3.3 Η διαδικασία της προσομοίωσης

Η διαδικασία της προσομοίωσης, για τη καθοδήγηση της ερευνητικής δραστηριότητας και την μελέτη των πειραμάτων για την επίλυση προβλημάτων στον πραγματικό κόσμο, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-1. Αυτή η διαδικασία αξιολογήθηκε από την εφαρμογή της πάνω σε μία μελέτη που είχε ως στόχο την διερεύνηση της απόδοσης, σε σχέση με το χρόνο, μιας νέας διεργασίας ανάπτυξης ενός προϊόντος, ώστε να εξεταστεί πως χρησιμοποιείται ο χρόνος από τις ομάδες που εργάζονται πάνω στην διαδικασία καθώς και τη πρόταση βελτιωμένων τακτικών διαχείρισης που θα μειώσουν τους χρόνους των κύκλων παραγωγής του προϊόντος. Τα δεκατρία βήματα της διαδικασίας, που εμφανίζονται στην εικόνα, περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω.



Εικόνα 3-1 Η διαδικασία της προσομοίωσης [17]

1. **Ορισμός του προβλήματος της έρευνας:** Αναλύονται τα ενδιαφέροντα της έρευνας μέσα από την μελέτη της υπόθεσης, αναγνωρίζεται το πρόβλημα στον πραγματικό κόσμο και διατυπώνονται οι προσδοκίες των αποτελεσμάτων της έρευνας.
2. **Προσδιορισμός του σκοπού:** προσδιορίζεται ο σκοπός των πειραμάτων της προσομοίωσης ως προς τον στόχο της
3. **Συλλογή δεδομένων και πληροφοριών:** τα δεδομένα και οι πληροφορίες που χρειάζονται για τον ορισμό του εννοιολογικού μοντέλου και του μοντέλου προσομοίωσης προσδιορίζονται και συλλέγονται ως δεδομένα εισαγωγής για το πείραμα της προσομοίωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει μία διαδικασία επαναλαμβανόμενων διαπραγματεύσεων μεταξύ της ομάδας της έρευνας με την ομάδα που μελετάει την υπόθεση διότι είναι αναγκαίο τα δεδομένα να βρίσκονται στην κατάλληλη μορφή και να είναι προσιτά. Ένα δεν συμβαίνει αυτό τότε η ομάδα που μελέτα την υπόθεση μπορεί να συνεργαστεί με την ομάδα της έρευνας ώστε να αναπτύξουν ένα σετ από συνθετικά δεδομένα.
4. **Σχεδιασμός εννοιολογικού μοντέλου:** ορίζεται το εννοιολογικό μοντέλο και σχεδιάζεται αναφορικά με το σκοπό της έρευνας χρησιμοποιώντας τα δεδομένα και τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν, με σκοπό να παρουσιάσει τις σχέσεις που είναι σχετικές με το πρόβλημα της έρευνας.
5. **Επιλογή μεθόδου προσομοίωσης:** η μέθοδος προσομοίωσης επιλέγεται για να εκπροσωπήσει το ορισμένο πρόβλημα της έρευνας. Η επιλογή της μεθόδου προσομοίωσης λαμβάνει υπόψη την βιωσιμότητα και εφικτότητα.
6. **Διαλογή εργαλείου προσομοίωσης:** επιλέγεται το εργαλείο λογισμικού που θα εφαρμοστεί στο μοντέλο προσομοίωσης. Αυτή η διαδικασία επιλογής συμπεριλαμβάνει την εξέταση της διαθεσιμότητας και της ικανότητας προσαρμογής του εργαλείου.
7. **Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης:** αναπτύσσεται ένα υπολογιστικό μοντέλο του εννοιολογικού μοντέλου χρησιμοποιώντας την μέθοδο και το εργαλείο προσομοίωσης.
8. **Διεξαγωγή πειραμάτων επαλήθευσης:** διεξάγονται πειράματα επαλήθευσης του μοντέλου, εστιασμένα στο έλεγχο του μοντέλου αν δίνει αξιόπιστα και αναμενόμενα αποτελέσματα με βάση τα εισαγόμενα δεδομένα σε σενάρια τα οποία είναι γνωστά από την ομάδα μελέτης της υπόθεσης.
9. **Επαλήθευση του μοντέλου προσομοίωσης:** τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από τα πειράματα επαλήθευσης εξετάζονται. Η προσομοίωση και τα αποτελέσματα επαληθεύονται με ορισμένες μεθόδους και δείκτες επαλήθευσης. Αν είναι αναγκαίο, τα βήματα 3, 4, 5, 6, 7 και 8 μπορούν να επαναληφθούν. Αντιμετωπίζοντας σχόλια και προτάσεις από διάφορες

οπτικές, η προσομοίωση βελτιώνεται και αναβαθμίζεται για το επόμενο στάδιο

10. **Διεξαγωγή πειραμάτων επικύρωσης:** διεξάγονται πειράματα επικύρωσης της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας ένα αναθεωρημένο μοντέλο. Τα πειράματα επικύρωσης ελέγχουν εάν το μοντέλο έχει ικανοποιητική ακρίβεια για να εκπροσωπήσει και στην συνέχεια να απευθύνει το πρόβλημα της έρευνας, σε σχέση με το σκοπό της έρευνας.
11. **Επικύρωση του μοντέλου προσομοίωσης:** τα αποτελέσματα από τα πειράματα επικύρωσης επικυρώνονται με ορισμένες μεθόδους και δείκτες επικύρωσης. Αν είναι αναγκαίο, τα προηγούμενα βήματα μπορούν να αναθεωρηθούν.
12. **Προσομοίωση πειραμάτων:** διεξάγονται τα πειράματα προσομοίωσης για να προσομοιωθούν τα σενάρια λειτουργίας στον πραγματικό κόσμο. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναλύονται και συζητούνται. Λαμβάνονται υπόψη οι πιθανές λύσεις διαχείρισης για την αντιμετώπιση των συγκεκριμένων προβλημάτων της έρευνας.
13. **Τεκμηρίωση:** αναπτύσσονται οδηγίες και έγγραφα που υποστηρίζουν το μοντέλο και τα πειράματα της προσομοίωσης, για παράδειγμα πως να λειτουργήσει το μοντέλο προσομοίωσης, πως να τοποθετηθούν οι τιμές των εισαγόμενων δεδομένων, και να αναλυθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου. Αυτό το βήμα είναι απαραίτητο για άλλους χρήστες ώστε να καταλάβουν, να τα τροποποιήσουν ή να βελτιώσουν το μοντέλο της προσομοίωσης αν το θεωρούν αναγκαίο. Επιπλέον, ενισχύεται η εμπιστοσύνη στους χρήστες που χρησιμοποιούν το μοντέλο για να λύσουν προβλήματα του πραγματικού κόσμου. Στην μελέτη της υπόθεσης που χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί αυτή η διαδικασία, αναπτύσσεται ένα εγχειρίδιο για τη λειτουργία της προσομοίωσης. [17]

3.4 Η ανεμογεννήτρια

Η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε για προσομοίωση είναι η FE 1 KW Upwind Turbine της Future Energy και συγκεκριμένα το μοντέλο FE1048U, που έχει μέγιστη ισχύ 1000 W σε ταχύτητα ανέμου 12,5 m/s. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από μία ουρά για την προστασία της ανεμογεννήτριας από υψηλές ταχύτητες του ανέμου, μία γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη, 5 λεπίδες και όλη η συσκευή είναι τοποθετημένη σε έναν γαλβανισμένο στύλο ικριώματος με διάμετρο 50 mm και βρίσκεται σε ύψος 20 m από τον έδαφος.

Features

- Mechanically furling tail fin for high wind protection
- Unique high-spec Permanent Magnet Generator
- 5 top-grade glass filled nylon turbine blades
- Sealed bearings in mast-mounting shaft
- 60 Amp rated slip-ring prevents cable-twisting
- Aerodynamic profile design
- Patented anti-vibration locking washers
- Rugged and simple
- Zinc-plated and Stainless Steel with powder-coated and anodised aluminium for optimal corrosion and weather resistance
- Manufactured in the UK by FutureEnergy

Εικόνα 3-2 Χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας



Εικόνα 3-3 Μοντέλο FE 1 kW Upwind Turbine της Future Energy

Οι λεπίδες της ανεμογεννήτριας είναι κατασκευασμένες από ενισχυμένο νάιλον με ίνες γυαλιού και είναι τοποθετημένες στον δίσκο περιστροφής σε γωνία 25 μοιρών με το επίπεδο του δίσκου. Η ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί σε ταχύτητα ανέμου 2,5 m/s, ενώ σε ταχύτητες μεγαλύτερες από 50 m/s η ουρά της γεννήτριας διπλώνεται και έτσι σταματάει η περιστροφή του δίσκου και η παραγωγή ενέργειας. Οι βέλτιστες ταχύτητες περιστροφής του ρότορα είναι στο εύρος 300 με 900 RPM. Όταν οι ταχύτητα του ανέμου φτάσει στα 12,5 m/s η παραγόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια είναι 1,2 kW.

Technical Specifications

- Nominal Power Output - 1000W (600W / 12v Version)
- Start-Up Wind Speed - 2.5m/s
- Cut-In Wind Speed - 3.2m/s
- Wind Speed at rated power- 11.5 - 12.5m/s (depending on the model)
- Survival Wind Speed - 50m/s
- Rotor Diameter - 1.8m
- Number of Blades – 5
- Generator Type - 3-Phase Perm Magnet (rectified to DC inside the turbine, giving a 2-wire DC output)
- Weight - 22Kgs
- Suitable Tower Diameter - 50mm
- Noise: LAeq 35dB @ 5m/s @ 5m behind rotor and LAeq 54dB @ 7m/s @ 5m behind rotor
- ROHS, CE (LVD, EMC) compliant

Εικόνα 3-4 Τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας

| Wind (m/s) | Wind (mph) | Wind (Beaufort) | Turbine RPM | Output Current (A) | Battery Voltage (V) | Power (W) | Energy/Day (kWh) |
|------------|------------|-----------------|-------------|--------------------|---------------------|-----------|------------------|
| 3.8 | 8.6 | 2-3 | 380 | 0.8 | 52.0 | 42 | 0.998 |
| 4.5 | 10.1 | 3 | 400 | 1.4 | 53.0 | 74 | 1.781 |
| 5.6 | 12.6 | 3-4 | 420 | 2.6 | 54.0 | 140 | 3.370 |
| 6.5 | 14.6 | 4 | 465 | 4.0 | 55.0 | 220 | 5.280 |
| 8.0 | 18.0 | 4-5 | 480 | 7.4 | 56.0 | 414 | 9.946 |
| 9.0 | 20.3 | 5 | 490 | 10.4 | 56.2 | 584 | 14.028 |
| 10.0 | 22.5 | 5-6 | 510 | 14.0 | 56.3 | 788 | 18.917 |
| 11.0 | 24.8 | 5-6 | 520 | 16.5 | 56.4 | 932 | 22.357 |
| 12.5 | 28.1 | 6 | 540 | 20.0 | 56.6 | 1132 | 27.168 |
| 14.0 | 31.5 | 6-7 | 610 | 26.0 | 56.6 | 1472 | 35.318 |

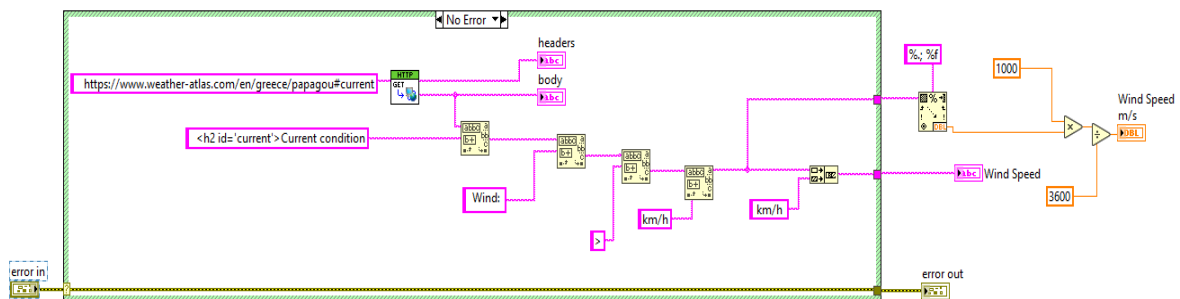
Εικόνα 3-5 Οι αποδόσεις της ανεμογεννήτριας

Για την προσομοίωση της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα της national instruments, LabVIEW 2018. Η κατασκευή του μοντέλου στηρίχθηκε πάνω στο επίσημο παράδειγμα της εταιρείας «Wind Turbine with DFIG – Wind Power Limitation» και μετά από μερικές σημαντικές τροποποιήσεις πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της γεννήτριας.

Η βασική λειτουργία του προγράμματος είναι να συλλέγει την ταχύτητα του ανέμου σε πραγματικό χρόνο και δίνει την ισχύ που αποδίδει η ανεμογεννήτρια για αυτήν την ταχύτητα καθώς και την συνολική ενέργεια που παράχθηκε καθ' όλη την διάρκεια που η εφαρμογή λειτουργούσε. Ο χρόνος λειτουργίας της εφαρμογής ήταν μεταξύ των ημερών 06/04/2020 – 27/04/2020.

3.5 Η συλλογή της τιμής της ταχύτητας του ανέμου

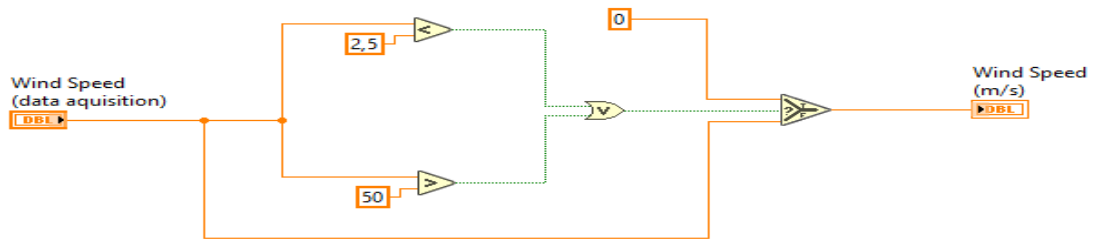
Η συλλογή της τιμής της ταχύτητας του ανέμου πραγματοποιείται μέσω διαδικτύου από την ιστοσελίδα [weather-atlas²](https://www.weather-atlas.com/en/greece/papagou#current) η οποία λαμβάνει τις συνθήκες του καιρού από έναν μετεωρολογικό σταθμό στην περιοχή Παπάγου. Η εφαρμογή είναι προγραμματισμένη να συλλέγει τις μετρήσεις για την ταχύτητα του ανέμου κάθε λεπτό προκειμένου να μην επιβαρυνθεί η μνήμη του προγράμματος όσο αυτό βρίσκεται σε λειτουργία. Για την λήψη της τιμής της ταχύτητας του ανέμου κατασκευάστηκε ένα VI (virtual instrument), που είναι το πρόγραμμα του LabVIEW, το οποίο διαβάζει τον κώδικα html της ιστοσελίδας με την εντολή *GET.vi* και στη συνέχεια με την εντολή *Match Pattern* επιλέγει από τον παραπάνω κώδικα στην τιμή της ταχύτητας κάθε λεπτό. Τέλος, με την εντολή *Scan From String* πραγματοποιείται η μετατροπή της τιμής από κείμενο του κώδικα σε αριθμητική τιμή την οποία μπορεί να διαβάσει η εφαρμογή.



Εικόνα 3-6 Διάγραμμα VI για την συλλογή της τιμής της ταχύτητας του ανέμου

Πριν το σήμα της τιμής της ταχύτητας φτάσει στην εξίσωση της παραγόμενης ισχύος περνάει από ένα δεύτερο VI το οποίο ελέγχει αν η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από 2,5 m/s, ώστε να μπορεί να λειτουργεί η ανεμογεννήτριας, και μικρότερη από 50 m/s, η ταχύτητα δηλαδή που σταματάει να περιστρέφεται η ανεμογεννήτρια για να μην προκληθεί καμία ζημιά. Αν η ταχύτητα του ανέμου βρίσκεται έξω από το παραπάνω διάστημα τότε το πρόγραμμα ορίζει την τιμή της μηδέν, αλλιώς αφήνει την τιμή όπως είναι και συνεχίζει την διαδικασία.

² Το URL της ιστοσελίδας είναι <https://www.weather-atlas.com/en/greece/papagou#current>



Εικόνα 3-7 Διάγραμμα VI για τον έλεγχο της τιμής της ταχύτητας του ανέμου

3.6 Μοντέλο ισχύος

Έχοντας την τιμή της ταχύτητα του ανέμου σε πραγματικό χρόνο υπολογίζεται το ποσό της ισχύς του ανέμου που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ. Αυτό το ποσό δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{ww} = \frac{1}{2} * c_p * \rho * A * u^3 \quad 3.1$$

Όπου c_p είναι ο συντελεστής απόδοσης, ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, A το εμβαδόν του δίσκου περιστροφής και u η ταχύτητα του ανέμου.

Η πυκνότητα του αέρα θεωρείται σταθερά και ισούται με, $\rho=1,15 \text{ kg/m}^3$, και το εμβαδόν του δίσκου περιστροφή της ανεμογεννήτριας, που η ακτίνα της λεπίδας είναι $r=0.9m$, είναι $A=2*\pi*r^2=5.09 \text{ m}^2$.

Ο συντελεστής απόδοσης υπολογίζεται κάθε στιγμή από την εξίσωση 2.12 και 2.13

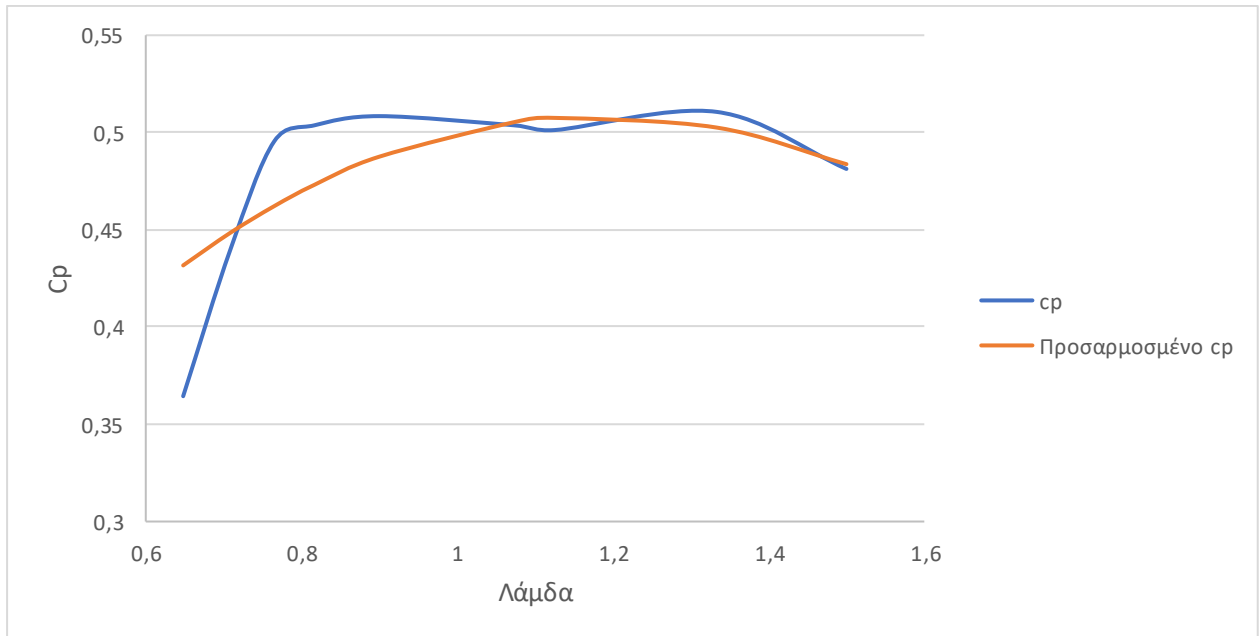
$$c_p = c_1 * \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 * \beta - c_4 \right) * e^{-\left(\frac{c_5}{\lambda_i}\right)} + c_6 * \lambda \quad 3.2$$

και

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08*\beta} + \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad 3.3$$

Όπου η εύρεση των συντελεστών c_1 - c_6 έγινε με προσαρμογή της εξίσωσης 3.2 με βάση τα δεδομένα της εταιρείας για την γεννήτρια, που δίνονται από την Εικόνα 3-5, και τη χρήση του προγράμματος excel.

Για την προσαρμογή της εξίσωσης δημιουργήθηκε ένα γράφημα c_p προς λάμδα και τοποθετήθηκαν εκεί οι τιμές από τα δεδομένα της ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια η σε μορφή συνάρτησης η εξίσωση 3.2, που ήταν γνωστός ο λόγος των ταχυτήτων στην κορυφή των λεπίδων και η γωνιά των λεπίδων, ενώ μεταβαλλόταν οι τιμές των συντελεστών c_1-c_6 . Τέλος με τη βοήθεια του solver υπολογίζονταν οι παραπάνω συντελεστές ώστε η διαφορά του γνωστού c_p και του προσαρμοσμένου c_p να είναι η ελάχιστη. Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του θεωρητικού και προσαρμοσμένου συντελεστή απόδοσης συναρτήσει του λόγου των ταχυτήτων λ .



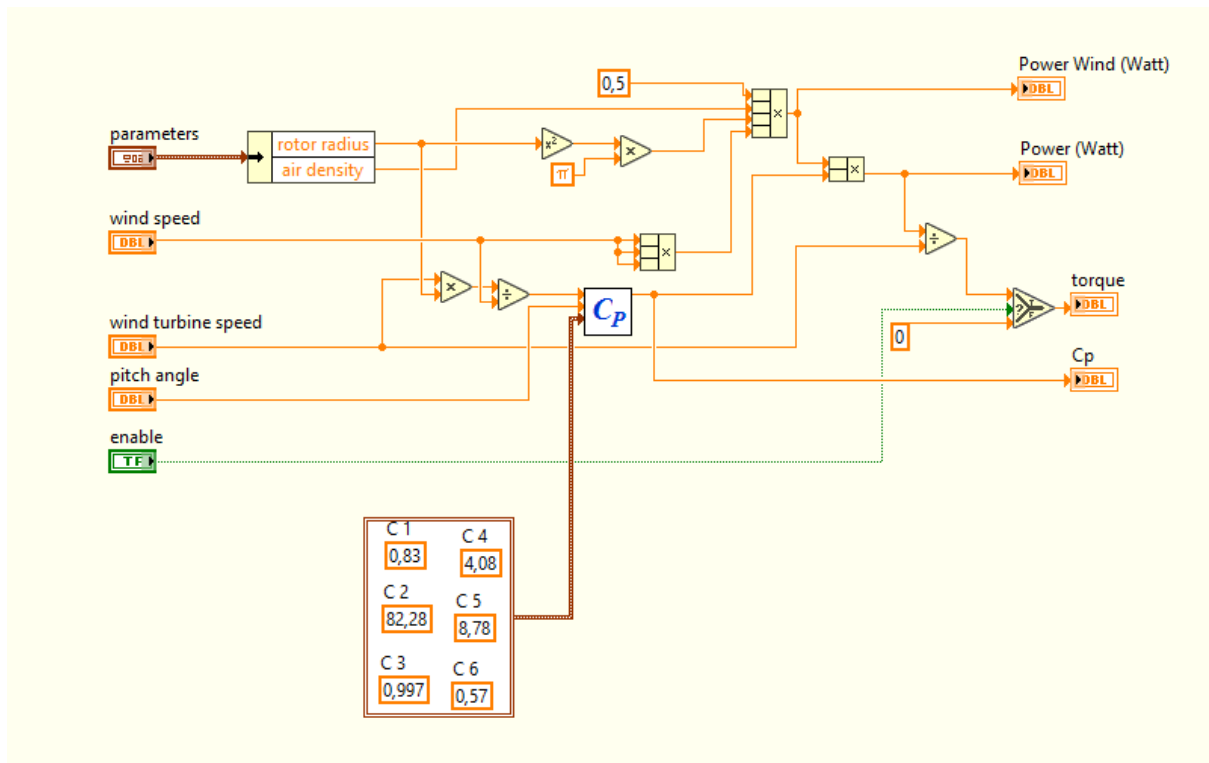
Εικόνα 3-8 Προσαρμογή της εξίσωσης c_p

Οι τελικοί συντελεστές της εξίσωσης του c_p είναι οι εξής:

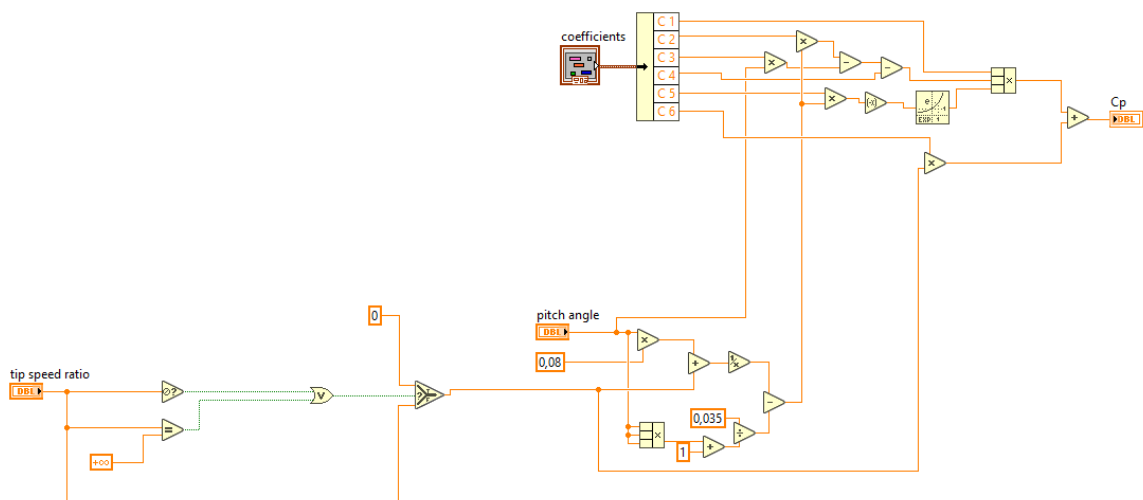
| C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,83 | 82,28 | 0,997 | 4,08 | 8,78 | 0,570 |

Πίνακας 3 Συντελεστές της εξίσωσης c_p για την ανεμογεννήτρια

Για τον υπολογισμό της ισχύος μέσω του LabVIEW δημιουργήθηκαν δύο VI, ένα για να υπολογίσει το c_p σε κάθε χρονική στιγμή και ένα για να υπολογίσει την παραγόμενη ισχύ. Οι εντολές που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις διαδικασίες είναι οι πράξεις πρόσθεσης, πολλαπλασιασμού και ύψωση δύναμης με βάση τον αριθμό e .



Εικόνα 3-9 Διάγραμμα VI για τον υπολογισμό της ισχύος



Εικόνα 3-10 Διάγραμμα VI για τον υπολογισμό του c_p

Κατά τον υπολογισμό του c_p αν ο λόγος των ταχυτήτων στην κορυφή της λεπίδας, λ , ισούται με άπειρο ή δεν είναι αριθμός, δηλαδή NaN, τότε υπάρχει μία εντολή, που ονομάζεται *Select*, που μηδενίζει αυτόν τον όρο για να μην υπάρχει πρόβλημα στις πράξεις υπολογισμού του συντελεστή ισχύος και της ισχύος.

Για τον υπολογισμό του λόγου των ταχυτήτων λ , που $\lambda = \omega * r / u$, είναι γνωστή η ταχύτητα του ανέμου και η ακτίνα των λεπίδων και πρέπει να προσδιοριστεί η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα ω . Ο υπολογισμός γίνεται με την εξίσωση:

$$J_m * \frac{d\omega_m}{dt} + B * \omega_m = \tau_e - \tau_l \quad 3.4$$

Όπου J_m είναι η ροπή αδράνειας της ανεμογεννήτριας, B ο συντελεστής ιξώδους τριβής, τ_e η ηλεκτρομαγνητική ροπή και, τ_l η μηχανική ροπή.

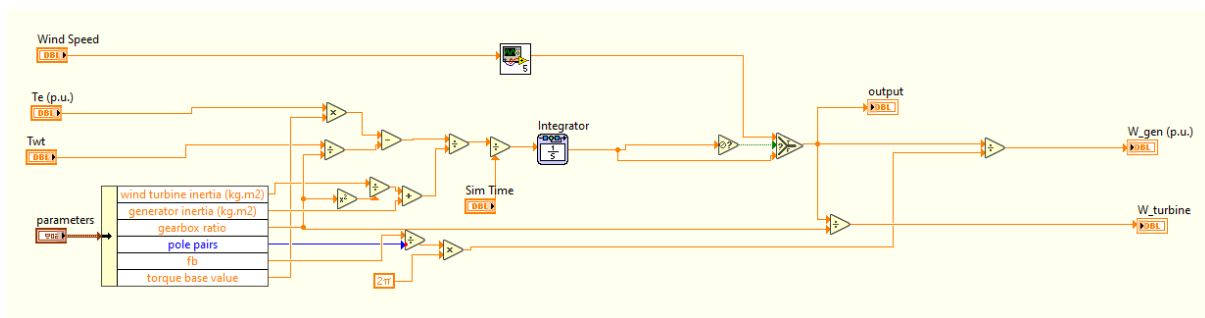
Με την παραδοχή ότι οι λεπίδες είναι ράβδοι στις οποίες κατανέμεται ομοιόμορφα η μάζα της ανεμογεννήτριας υπολογίζεται η ροπή αδράνειας

$$J_m = \sum_{i=1}^5 \frac{1}{12} * m_i * r_i^2 = 5 * \frac{1}{12} * M * r^2 = \frac{5 * 22 * 0.9^2}{12} = 7.425 \text{ kg} * \text{m}^2$$

Η τιμή του συντελεστή ιξώδους είναι πολύ μικρή και θεωρείται αμελητέα. Η μηχανική ροπή υπολογίζεται κάθε χρονική στιγμή από τον τύπο $\tau_l = P_{ww} / \omega$, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνα 3-9. Τέλος ο προσδιορισμός της ηλεκτρομαγνητικής ροπής δίνεται από τον τύπο:

$$\tau_e = K_t * \varphi * i \quad 3.5$$

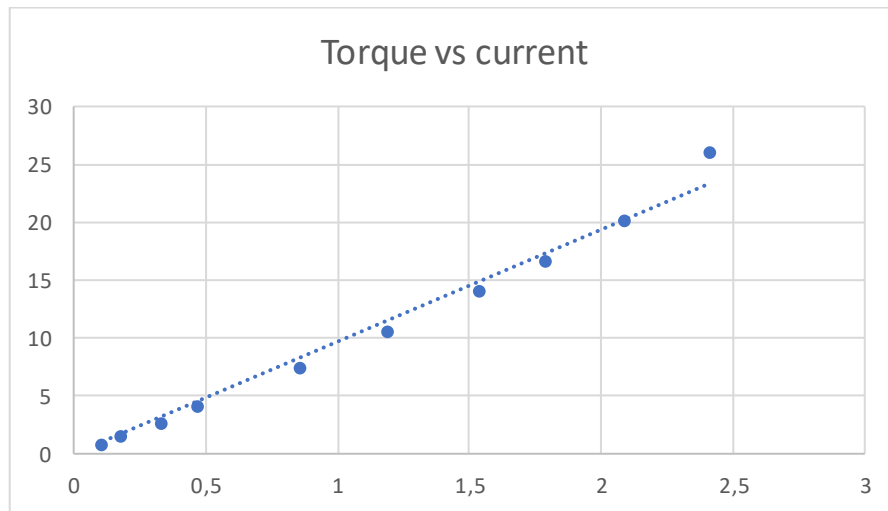
όπου K_t είναι η σταθερά ροπής, φ η ηλεκτρομαγνητική ροπή και i η ένταση του ρεύματος.



Εικόνα 3-11 Διάγραμμα VI υπολογισμού γωνιακής ταχύτητας

Η ολοκλήρωση της εξίσωσης 3.4 γίνεται με την εντολή *Integrator*. Μετά την ολοκλήρωση υπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα του του δίσκου περιστροφής διαιρώντας τη γωνιακή ταχύτητα του ρότορα, δηλαδή το output στο διάγραμμα, με τον λόγο του κιβωτίου των γραναζιών, που σε αυτό το μοντέλο ο λόγος είναι ίσος με 1. Επίσης υπολογίζεται η σύγχρονη ταχύτητα της γεννήτριας από τον τύπο $n_s = f_b * 2 * \pi / P$, όπου f είναι η συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας και είναι ίση με 60Hz και P είναι το ζεύγος πόλων. Επειδή ο τύπος της γεννήτριας είναι μόνιμου μαγνήτη τότε ο αριθμός των ζευγαριών των πόλων θα είναι

ίσος με τον αριθμό των πόλων, δηλαδή 16 πολικά ζεύγη. Τέλος η παράμετρος *torque base value* είναι η σταθερά ροπής και υπολογίζεται από την εξίσωση $K_t = \tau/i$, όταν το δυναμικό φορτίο στη γεννήτρια είναι μηδενικό.

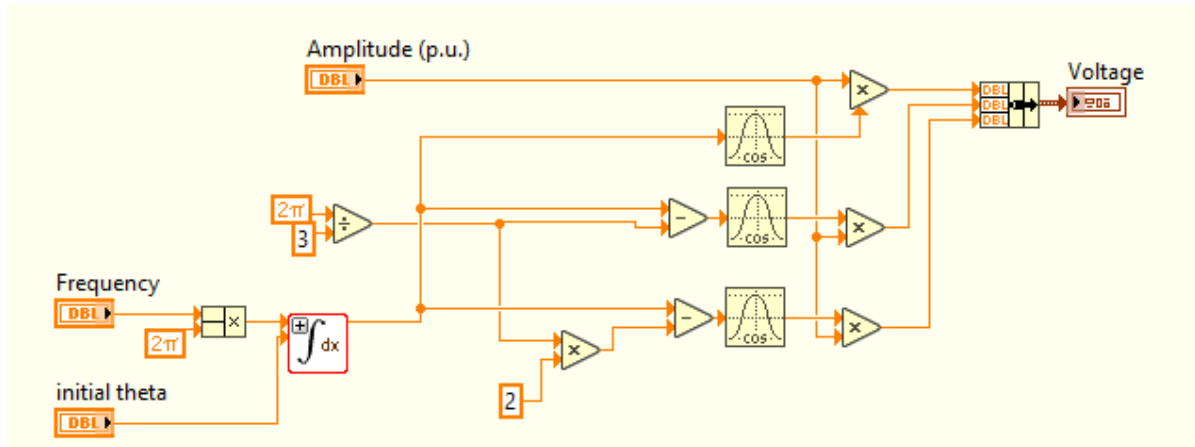


Εικόνα 3-12 Διάγραμμα ροπής με ένταση του ρεύματος

Από τα δεδομένα της Εικόνα 3-5 υπολογίζεται σε κάθε ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται η ροπή της ανεμογεννήτριας και κατασκευάζεται η γραφική παράσταση της ευθείας η οποία είναι της μορφής $\tau = k_t \cdot i$, όπου η κλίση k_t είναι η σταθερά ροπής. Η τελική εξίσωση της ευθείας είναι $\tau = 9,68 \cdot i$, άρα η σταθερά ροπής είναι ίση με $k_t = 9.68 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

3.7 Τριφασικό ρεύμα

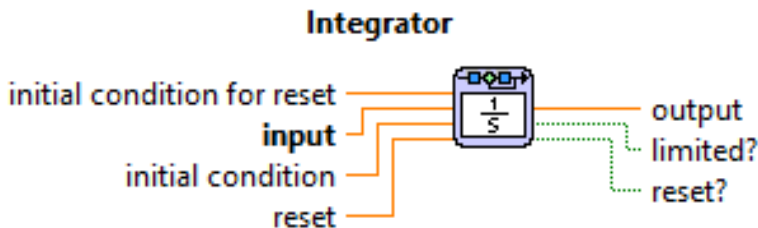
Οι τριφασικές γεννήτριες είναι πηγές ενέργειας των οποίων οι τάσεις είναι ημιτονοειδής συναρτήσεις του χρόνου της ίδιας συχνότητας και σταθερής διαφοράς φάσης 120 μοίρες. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση για το τριφασικό ρεύμα κατασκευάστηκαν μία καμπύλη συνημίτονου, με την εντολή *Cosine*, χωρίς αρχική φάση και άλλες δύο με διαφορά φάσης $+2 \cdot \pi/3$ και $-2 \cdot \pi/3$ ακτίνια από την πρώτη.



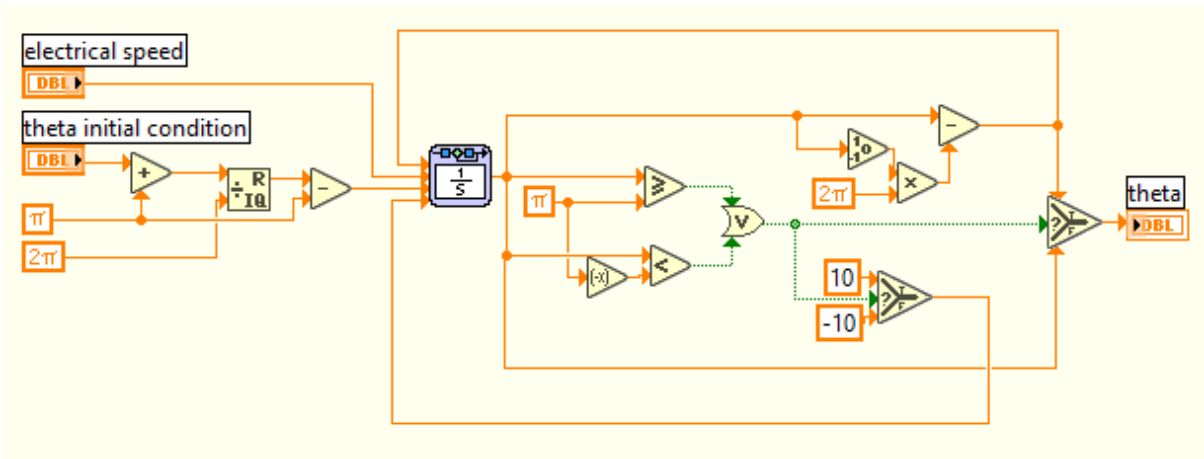
Εικόνα 3-13 Διάγραμμα VI τριφασικού ρεύματος

Ο υπολογισμός της συχνότητας του τριφασικού ρεύματος γίνεται μέσα από ένα VI στο οποίο γίνεται η ολοκλήρωση του γινομένου $2\pi * f$, όπου f είναι η συχνότητα του ρεύματος και στην Ευρώπη ισούται με 50 Hz. Για να πραγματοποιηθεί η ολοκλήρωση ορίζεται μία αρχική τιμή θ στην οποία προστίθεται ένα π και στη συνέχεια διαιρείται με 2π και από το υπόλοιπο της διαίρεσης αφαιρείται ένα π . Μετά την ολοκλήρωση, αν το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερο από π τότε αφαιρούνται από αυτό 2π και αν είναι μικρότερο από $-\pi$ τότε προστίθενται 2π , ενώ αν το αποτέλεσμα βρίσκεται στο διάστημα $[-\pi, \pi]$ τότε η τιμή παραμένει όπως είναι. Στο τέλος της διαδικασίας αν η τιμή είναι μεγαλύτερο από 10 ή μικρότερη από -10 τότε τη διαδικασία επαναλαμβάνεται με νέα αρχική τιμή, το τελικό αποτέλεσμα μετά την πρόσθεση ή αφαίρεση των 2π .

Μετά τον υπολογισμό της συχνότητας του ρεύματος και της δημιουργίας των καμπυλών κάθε συνάρτηση πολλαπλασιάζεται με την τιμή 48, που ορίζεται από το *Amplitude (p.u.)* της Εικόνα 3-13, η οποία είναι η μέση τάση που δίνει η ανεμογεννήτριας που προσομοιάζεται.



Εικόνα 3-14 Εντολή Integrator του LabVIEW



Εικόνα 3-15 Διάγραμμα VI υπολογισμού της συχνότητας του ρεύματος

3.8 Περιστροφή αξόνων

Από τις τάσεις του στάτορα και του ρότορα που υπολογίστηκαν παραπάνω γίνονται οι μετασχηματισμοί dq0 και αβ0. Συγκεκριμένα οι τάσεις του στάτορα μετασχηματίζονται με τη μέθοδο αβ0 σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

$$T_{abc-\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} v_{r\alpha} \\ v_{r\beta} \\ v_{r0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{3}{2} & -\frac{3}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} \quad 3.6$$

Η μετατροπή των τάσεων του στάτορα γίνεται με την μέθοδο dq0.

$$T_{dq0} = \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{s0} \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0-dq0} * T_{abc-\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ v_{s0} \end{bmatrix} \quad 3.7$$

Το θ συνδέεται με τη γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας ω με τη σχέση $\omega = d\theta/dt$.

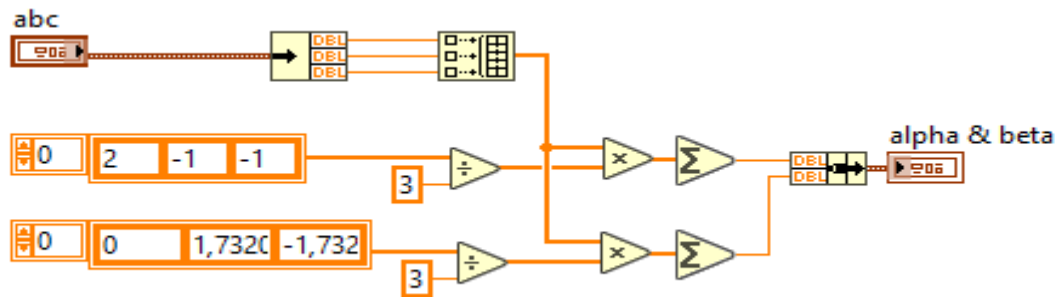
Οπότε οι τάσεις μετασχηματίζονται σε :

$$v_{r\alpha} = \frac{1}{3} * (2 * v_{ra} - v_{rb} - v_{rc}) \quad 3.8$$

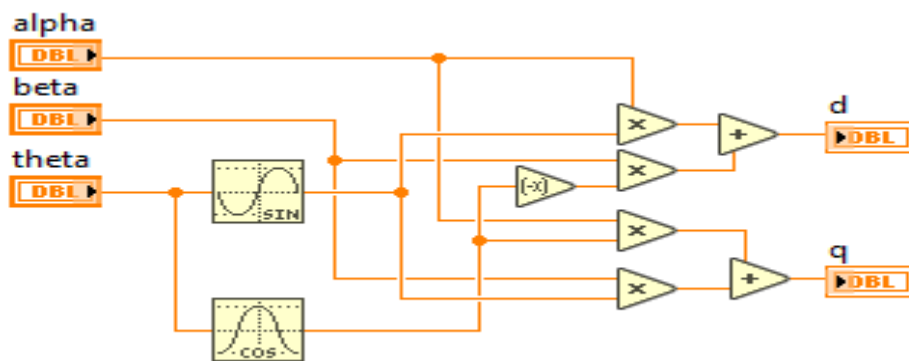
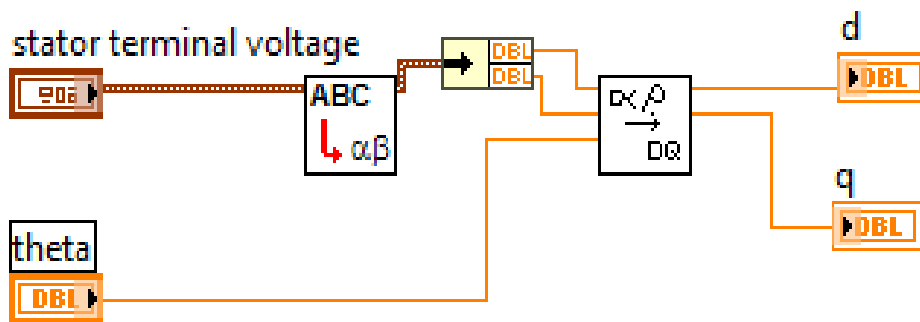
$$v_{r\beta} = \frac{\sqrt{3}}{3} * (v_{rb} - v_{rc}) \quad 3.9$$

$$v_{sd} = v_{sa} * \cos(\theta) + v_{s\beta} * \sin(\theta) \quad 3.10$$

$$v_{sq} = -v_{sa} * \sin(\theta) + v_{s\beta} * \cos(\theta) \quad 3.11$$



Εικόνα 3-16 Διάγραμμα VI για το μετασχηματισμό αβ0 της τάσης του ρότορα.



Εικόνα 3-17 & Εικόνα 3-18 Διαγράμματα VI για το μετασχηματισμό dq0 της τάσης του στάτορα.

Μετά τον μετασχηματισμό των τάσεων υπολογίζονται οι ηλεκτρομαγνητικές ροές φ που δίνονται από τους τύπους :

$$v_{sd} = \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega * \varphi_{sq} + r_s * i_{sd} \quad 3.12$$

$$v_{sq} = \frac{d}{dt} \varphi_{sq} - \omega * \varphi_{sd} + r_s * i_{sq} \quad 3.13$$

$$v_{r\alpha} = \frac{d}{dt} \varphi_{r\alpha} - (\omega - \omega_r) * \varphi_{r\alpha} + r_r * i_{r\alpha} \quad 3.14$$

$$v_{r\beta} = \frac{d}{dt} \varphi_{r\beta} - (\omega - \omega_r) * \varphi_{r\alpha} + r_r * i_{r\beta} \quad 3.15$$

Όπου r_s η αντίσταση του στάτορα, r_r η αντίσταση του ρότορα, ω είναι η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας όπως υπολογίζεται στο διάγραμμα της Εικόνα 3-11, η μεταβλητή εξόδου w_gen (p.u.) και ω_r είναι η σύγχρονη ταχύτητα του ρότορα. Στην κατάσταση ισορροπίας $\omega = \omega_r$.

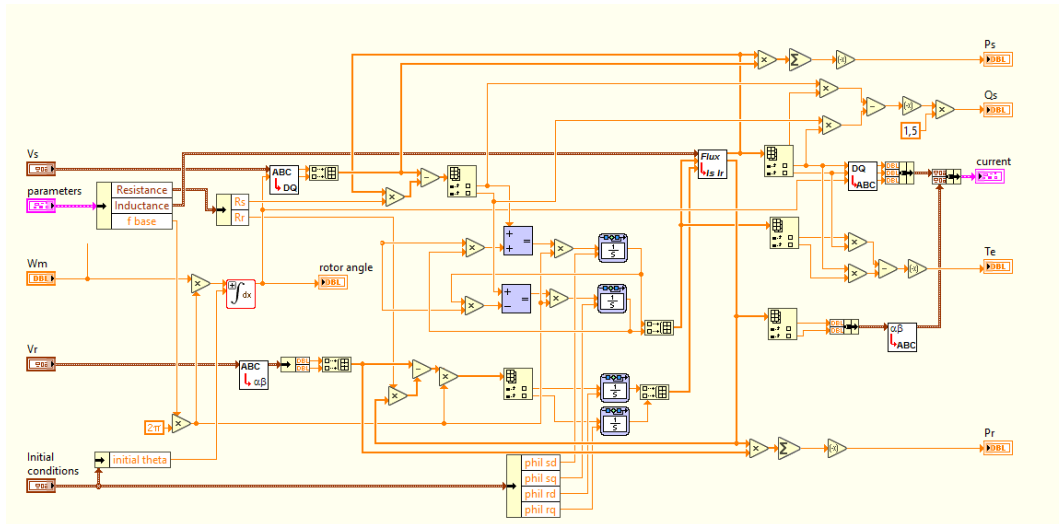
Για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών ροών το πρόγραμμα επιλύει τις εξισώσεις

$$\frac{d}{dt} \varphi_{sd} = v_{sd} + \omega * \varphi_{sq} - r_s * i_{sd} \quad 3.16$$

$$\frac{d}{dt} \varphi_{sq} = v_{sq} + \omega * \varphi_{sd} - r_s * i_{sq} \quad 3.17$$

$$\frac{d}{dt} \varphi_{r\alpha} = v_{r\alpha} - r_r * i_{r\alpha} \quad 3.18$$

$$\frac{d}{dt} \varphi_{r\beta} = v_{r\beta} - r_r * i_{r\beta} \quad 3.19$$



Εικόνα 3-19 Διάγραμμα VI για τον υπολογισμό των μαγνητικών ρών

Στην συνέχεια με τις ηλεκτρομαγνητικές ροές υπολογίζεται το τριφασικό ρεύμα του ρότορα και του στάτορα. Αρχικά υπολογίζονται οι εντάσεις του ρεύματος i_{sd} , i_{sq} , $i_{r\alpha}$, $i_{r\beta}$ και μετατρέπονται σε τριφασικό ρεύμα με την αντίστροφη διαδικασία των μετασχηματισμών dq0 και αβ0. Στον πρώτο κύκλο της προσομοίωσης γίνεται η παραδοχή ότι το ηλεκτρικό ρεύμα είναι 0. Οι εξισώσεις που συνδέουν τις ηλεκτρομαγνητικές ροές με το ρεύμα είναι οι εξής:

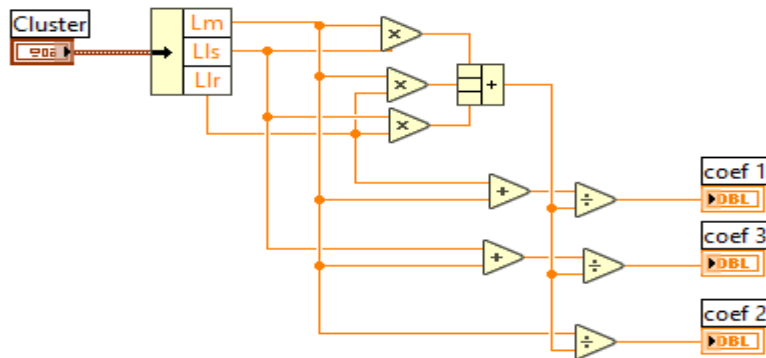
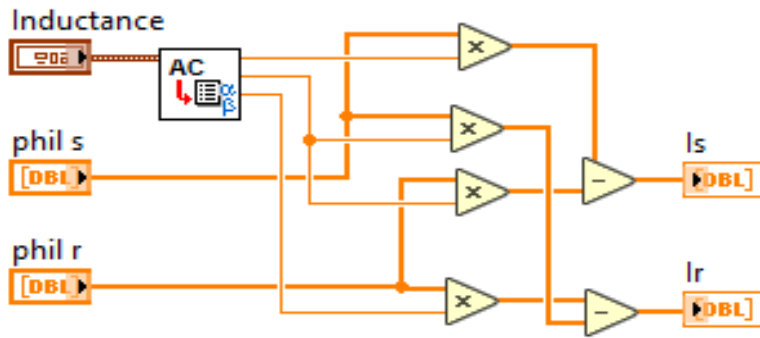
$$\varphi_{sd} = L_m * i_{sd} + L_s * i_{sd} + L_m * i_{r\alpha} \quad 3.20$$

$$\varphi_{sq} = L_m * i_{sq} + L_s * i_{sq} + L_m * i_{r\beta} \quad 3.21$$

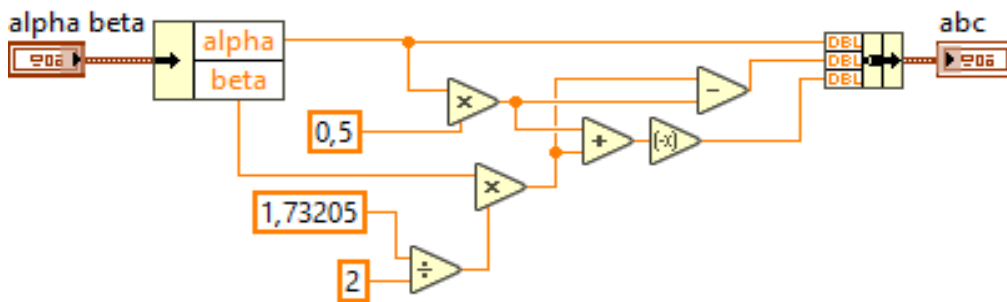
$$\varphi_{r\alpha} = L_m * i_{r\alpha} + L_r * i_{r\alpha} + L_m * i_{sd} \quad 3.22$$

$$\varphi_{r\beta} = L_m * i_{r\beta} + L_r * i_{r\beta} + L_m * i_{sq} \quad 3.23$$

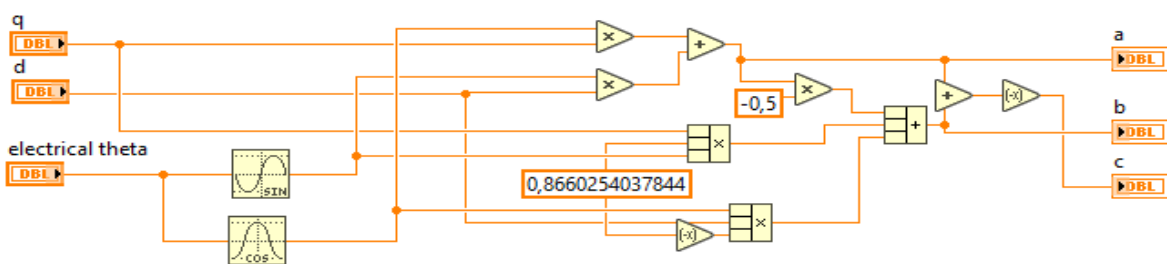
Όπου L_m η αμοιβαία επαγωγή, L_r η επαγωγή του ρότορα, L_s η επαγωγή του στάτορα.



Εικόνα 3-20 & Εικόνα 3-21 Διαγράμματα VI υπολογισμού των εντάσεων του ρεύματος.



Εικόνα 3-22 Διάγραμμα VI αντίστροφου μετασχηματισμού $\alpha\beta\theta$ για τον υπολογισμό της εντάσεως του ρεύματος του ρότορα.



Εικόνα 3-23 Διάγραμμα VI αντίστροφου μετασχηματισμού $dq\theta$ για τον υπολογισμό της εντάσεως του ρεύματος του στάτορα.

Τέλος από την εξίσωση 3.5 υπολογίζεται ο όρος $\varphi * i$, που στο διάγραμμα της Εικόνα 3-19 συμβολίζεται ως T_e , και ισούται με:

$$\varphi * i = \varphi_{sd} * i_{sq} - \varphi_{sq} * i_{sd} \quad 3.24$$

| | |
|-------------------|-----------------------------|
| Αμοιβαία Επαγωγή | $L_m = 1.068 \text{ H}$ |
| Επαγωγή ρότορα | $L_r = 72 \text{ mH}$ |
| Επαγωγή στάτορα | $L_s = 15.29 \text{ H}$ |
| Αντίσταση ρότορα | $R_r = 5 \text{ } \Omega$ |
| Αντίσταση στάτορα | $R_s = 280 \text{ } \Omega$ |

Πίνακας 4 Χαρακτηριστικά της γεννήτριας

3.9 Τάση ρότορα

Από τα ρεύματα και την τάση που ορίστηκαν παραπάνω υπολογίζεται η τάση του ρότορα. Αρχικά οι εντάσεις του ρεύματος, του ρότορα και του στάτορα, στρέφονται με τον μετασχηματισμό $\alpha\beta\theta$ και μετατρέπονται σε μιγαδικό αριθμό. Στη συνέχεια η ένταση του ρεύματος του ρότορα μετασχηματίζεται από την μορφή $\alpha\beta\theta$ σε μορφή $dq\theta$.

Η τάση του στάτορα, μετασχηματίζεται με την μέθοδο $\alpha\beta\theta$ και με την χρήση της ενεργού και άεργου ισχύος μετατρέπεται σε μία ένταση αναφοράς. Τέλος οι εντάσεις που υπολογίστηκαν περνάνε από ένα αναλογικό και ολοκληρωτικό, PI ρυθμιστή και μετατρέπονται σε τάση. Η τάση αυτή είναι της μορφής $dq\theta$, η οποία στρέφεται στη μορφή $\alpha\beta\theta$ και με τον αντίστροφο μετασχηματισμό $\alpha\beta\theta$ προσδιορίζεται η τριφασική τάση του ρότορα. [20]

Η μετατροπή των ρευμάτων σε μιγαδικό αριθμό γίνεται με τους τύπους:

$$Re_i = I_{ra} + I_{sa} * \frac{L_s + L_m}{L_m} \quad 3.25$$

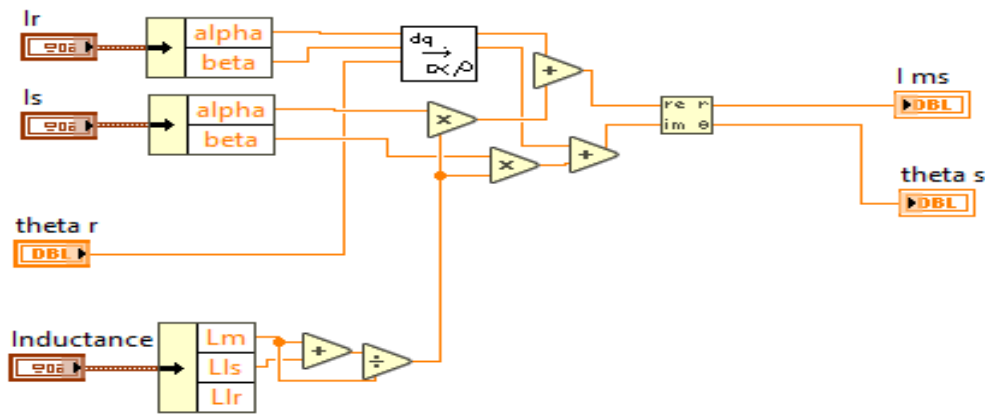
$$Im_i = I_{r\beta} + I_{s\beta} * \frac{L_s + L_m}{L_m}$$

ενώ στη συνέχεια γίνεται μετατροπή σε πολικές συντεταγμένες.

$$r_i = i_{ms} = \sqrt{Re^2 + Im^2}$$

3.26

$$\Theta = \arctan(Im/Re)$$



Εικόνα 3-24 Διάγραμμα VI για την μετατροπή των ρευμάτων σε πολικές συντεταγμένες

Παρόμοια διαδικασία πραγματοποιείται και στην τάση του στάτορα, η οποία αφού μετασχηματιστεί στη μορφή $\alpha\beta 0$, μετατρέπεται σε μιγαδικό αριθμό και τέλος χρησιμοποιείται το μέτρο του μιγαδικού αυτού.

$$Re_u = v_{s\alpha}$$

$$Im_u = v_{s\beta}$$

3.27

$$r_v = \sqrt{Re_v^2 + Im_v^2}$$

Η άεργος ισχύς Q_s υπολογίζονται όπως φαίνεται από το διάγραμμα της Εικόνα 3-19, με βάση τους τύπου:

$$P_s = -\frac{3}{2} * (U_d * I_d - U_q * I_q)$$

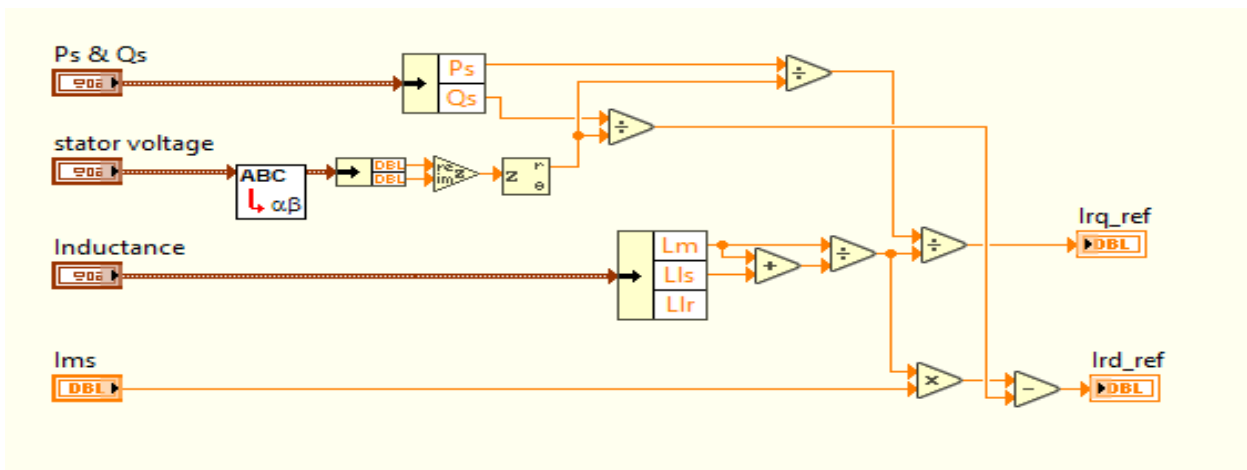
3.28

$$Q_s = -\frac{3}{2} * (U_q * I_d - U_d * I_q) \quad 3.29$$

Μόλις προσδιοριστούν οι παραπάνω τιμές τότε υπολογίζονται οι εντάσεις των ρευμάτων αναφοράς που ισούνται με:

$$I_{rq_{ref}} = \frac{P_s}{r_v} * \frac{L_m + L_s}{L_m} \quad 3.30$$

$$I_{rd_{ref}} = i_{ms} * \frac{L_m}{L_m + L_s} - \frac{Q_s}{r_v} \quad 3.31$$



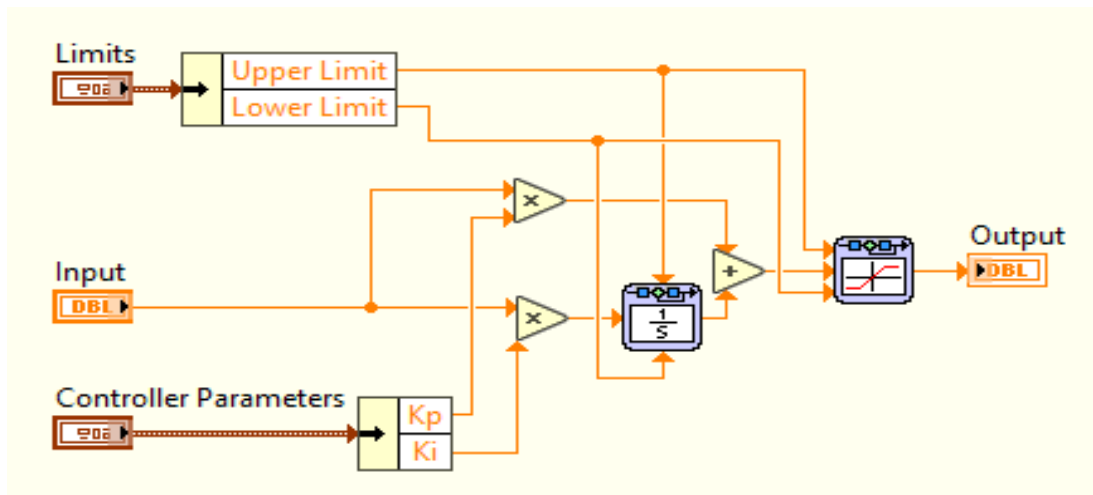
Εικόνα 3-25 Διάγραμμα VI υπολογισμού των εντάσεως των ρευμάτων αναφοράς

Οι δύο ρυθμιστές PI για της τάσεις v_{rq} και v_{rd} υπολογίζονται με τις προσδιορισμένες εντάσεις και εντάσεις αναφοράς του ρεύματος σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$v_d = k_{Id} * \int_0^1 (I_d - I_{d_{ref}}) * d\tau + K_{Pd}(I_d - I_{d_{ref}}) \quad 3.32$$

$$v_q = k_{Iq} * \int_0^1 (I_q - I_{q_{ref}}) * d\tau + K_{Pq}(I_q - I_{q_{ref}}) \quad 3.33$$

Όπου οι σταθερές των ρυθμιστών είναι $K_P=L_r/\tau_i$ και $K_I=K_P * R_r/L_r$.

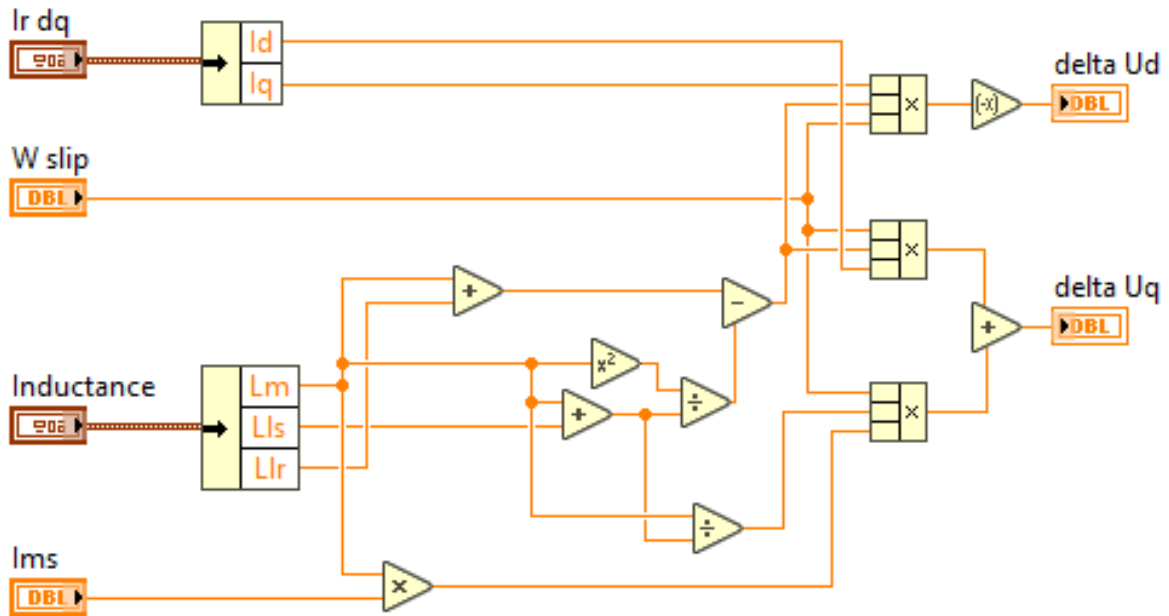


Εικόνα 3-26 Διάγραμμα VI του ρυθμιστή PI για τον υπολογισμό την τάσης του ρότορα

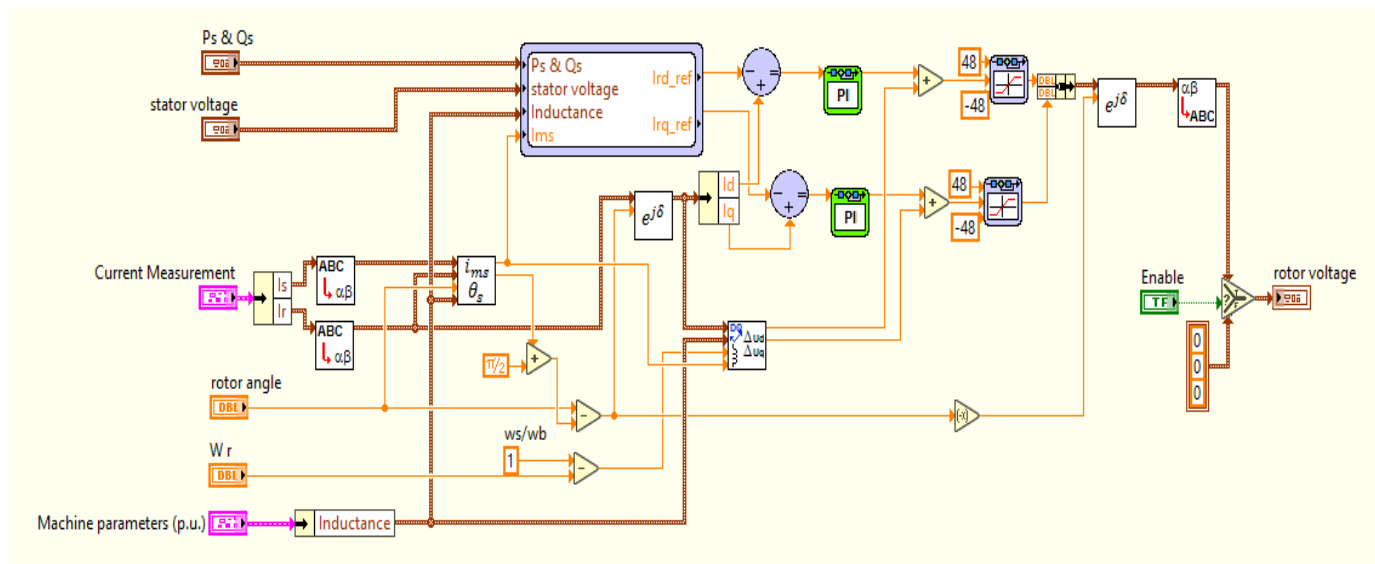
Αμέσως μετά τον ρυθμιστή υπάρχει η εντολή *Saturation*, η οποία περιορίζει την τιμή της τάσης στο διάστημα (-48V, 48V). Στη συνέχεια μετά το ρυθμιστή υπολογίζεται η μεταβολή της τάσης du , η οποία προστίθεται στην υπολογισμένη τάση και στο τέλος η συνολική τάση περνάει μία δεύτερη φορά από την εντολή *Saturation*, όπου γίνεται έλεγχος ώστε η τιμή της να παραμείνει εντός των ορίων του διαστήματος (-48V, 48V). Τέλος η τάση στρέφεται από τον άξονα $dq0$ στον άξονα $\alpha\beta 0$ και μετά μετασχηματίζεται σε τριφασική τάση. [21] [22]

$$du_d = - \left(L_r + L_m - \frac{L_m^2}{L_s + L_m} \right) * \omega * i_{rq} \quad 3.34$$

$$du_q = \left(L_r + L_m - \frac{L_m^2}{L_s + L_m} \right) * \omega * i_{rd} + \frac{(L_s + L_m)}{L_m} * i_{ms} \quad 3.35$$



Εικόνα 3-27 Διάγραμμα VI υπολογισμού Δu_q και Δu_d

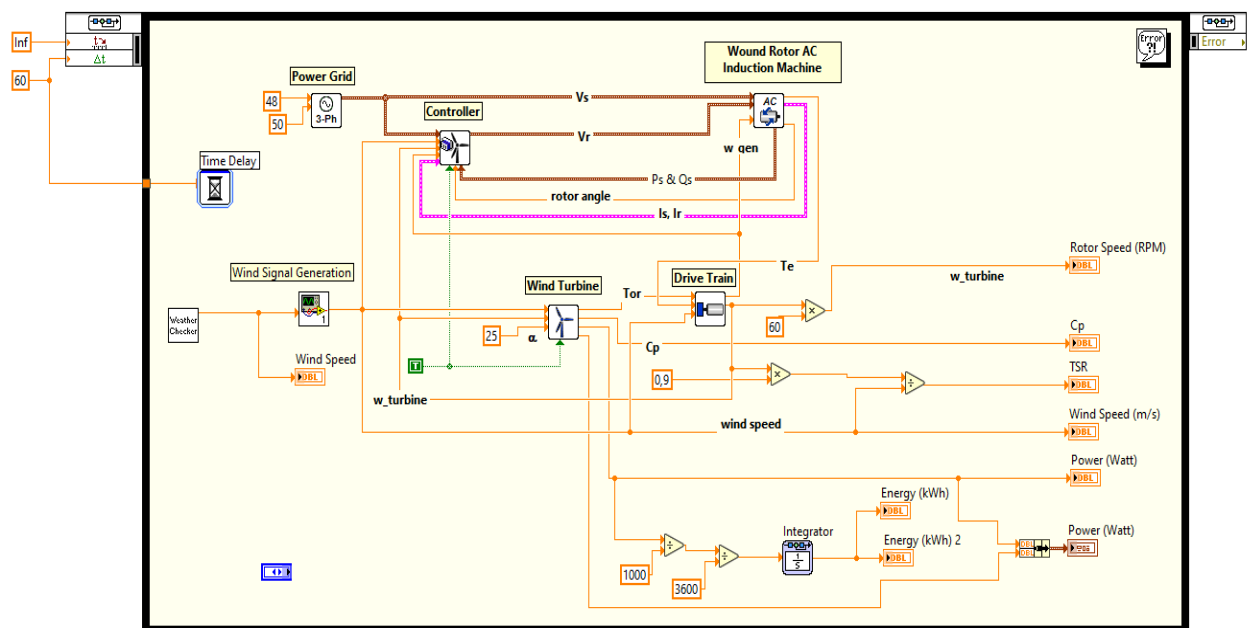


Εικόνα 3-28 Διάγραμμα VI υπολογισμού της τάσης του ρότορα

| | |
|--------------------------------|----------------|
| Σταθερά αναλογικού ρυθμιστή | $K_p = 0.0012$ |
| Σταθερά ολοκληρωτικού ρυθμιστή | $K_i = 0.083$ |

Πίνακας 5 Σταθερές των ρυθμιστών PI

Μόλις ολοκληρωθούν οι πράξεις από τις παραπάνω διεργασίες, όλα τα VIs συνδέονται σε ένα μεγάλο VI που αντιπροσωπεύει την εφαρμογή της ανεμογεννήτριας. Η εφαρμογή λαμβάνει χώρα μέσα στην εντολή *Control & Simulation Loop*, με την οποία η προσομοίωση λειτουργεί και επαναλαμβάνεται διαρκώς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-29.

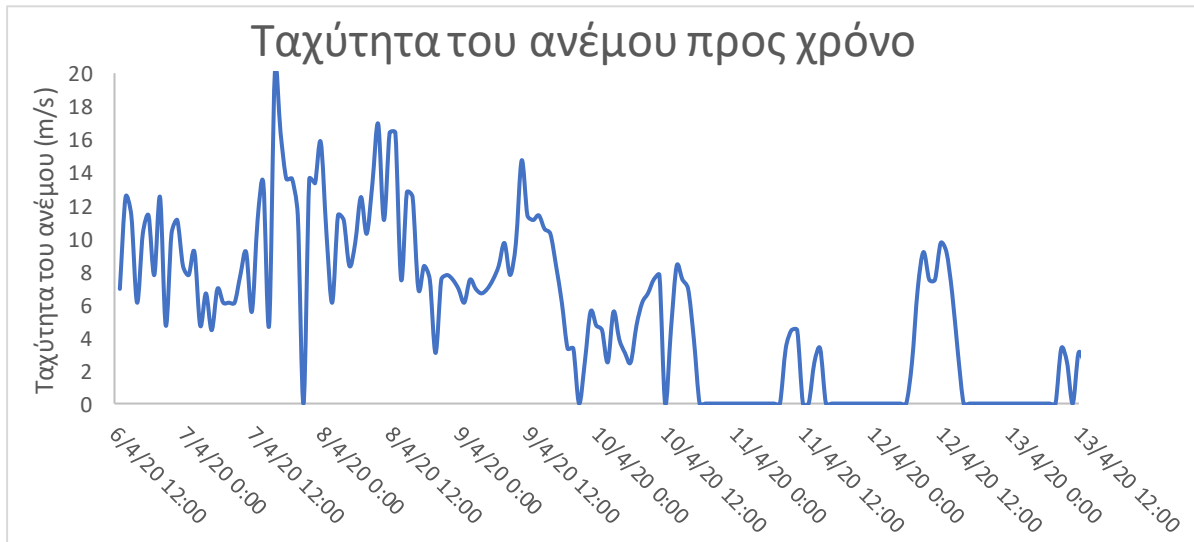


Εικόνα 3-29 Διάγραμμα VI της εφαρμογής της ανεμογεννήτριας

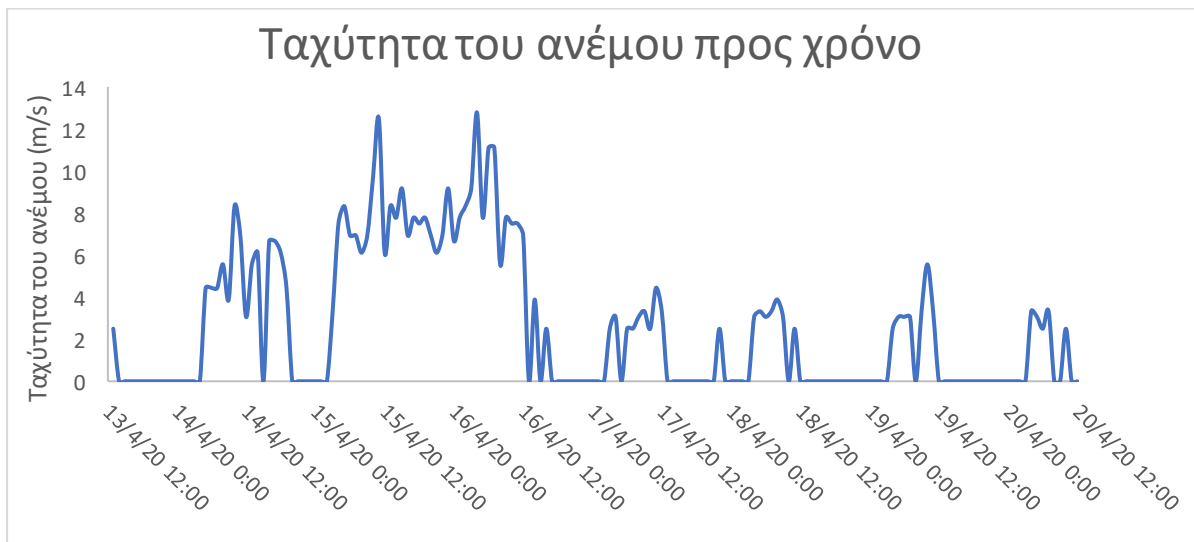
Η παραπάνω εντολή χρειάζεται μερικές μεταβλητές εισόδου για να τρέξει, όπως την μέθοδο επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων, τον χρόνο που θα τρέχει και το χρονικό βήμα για την επίλυση των εξισώσεων. Ο χρόνος που θα λειτουργεί η εφαρμογή ορίστηκε ως *inf*, που σημαίνει ότι η εφαρμογή θα επαναλαμβάνεται συνεχώς μέχρι να τερματιστεί χειροκίνητα. Ως μέθοδος επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων επιλέχθηκε η μέθοδος Euler με χρονικό βήμα 60 δευτερόλεπτα, που είναι και ο χρόνος αναμονής της εφαρμογής για να λάβει την καινούργια ταχύτητα του ανέμου και να ξεκινήσει η διαδικασία ξανά από την αρχή.

4 Μετρήσεις και Αποτελέσματα

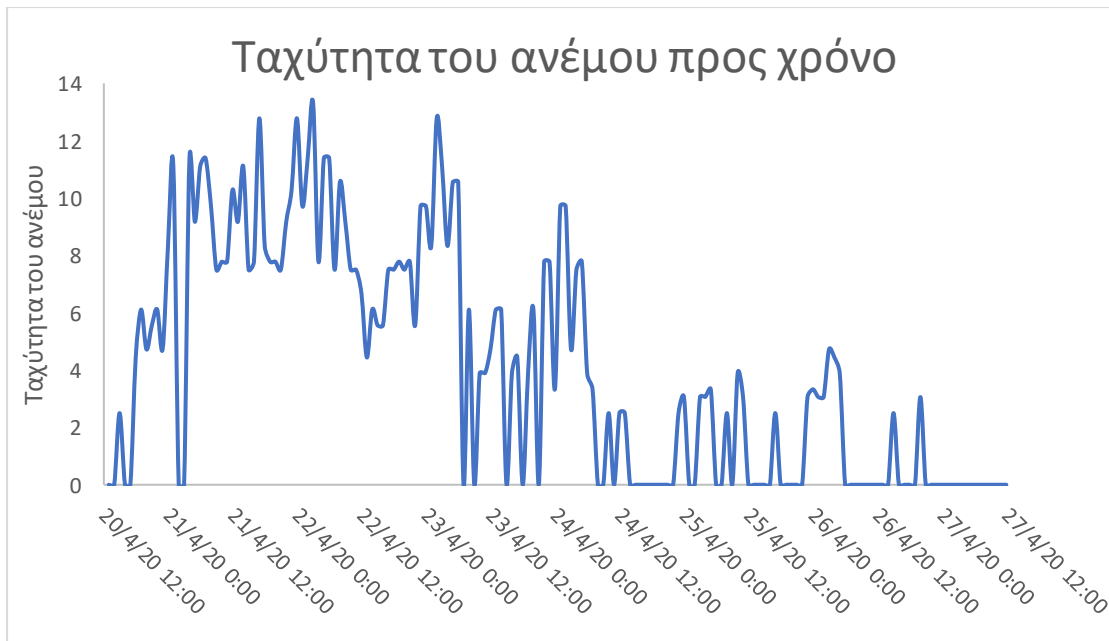
Κατά τη διάρκεια των τριών εβδομάδων που λειτούργησε η εφαρμογή, η ταχύτητα του ανέμου βρισκόταν στο διάστημα από 0 m/s έως 20 m/s.



Εικόνα 4-1 Διάγραμμα της ταχύτητας του ανέμου προς το χρόνο στη χρονική περίοδο 4/4/2020 - 13/4/2020

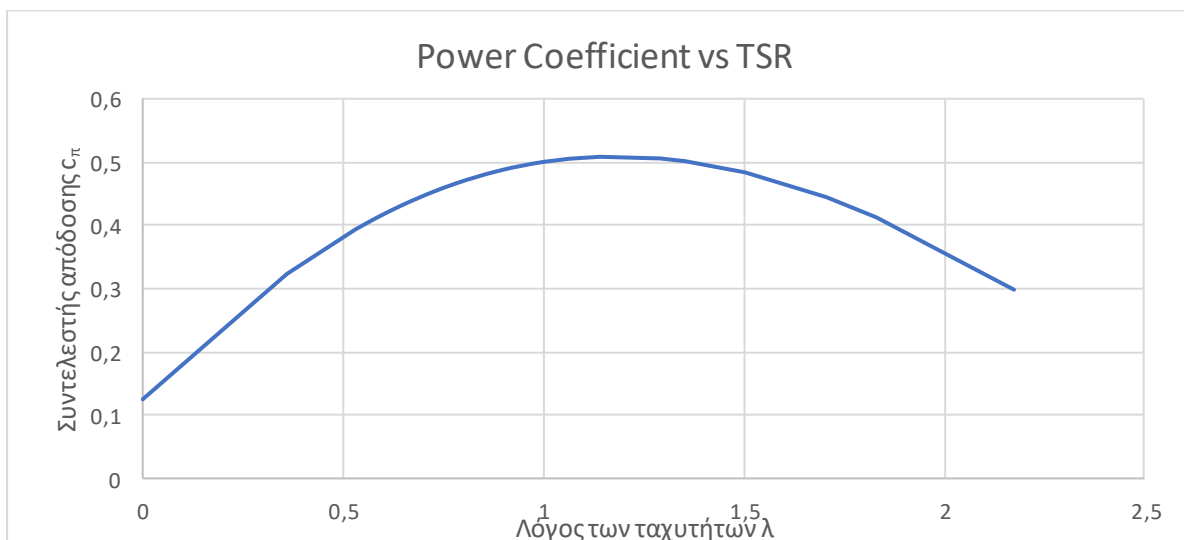


Εικόνα 4-2 Διάγραμμα της ταχύτητας του ανέμου προς το χρόνο στη χρονική περίοδο 13/4/2020 - 20/4/2020



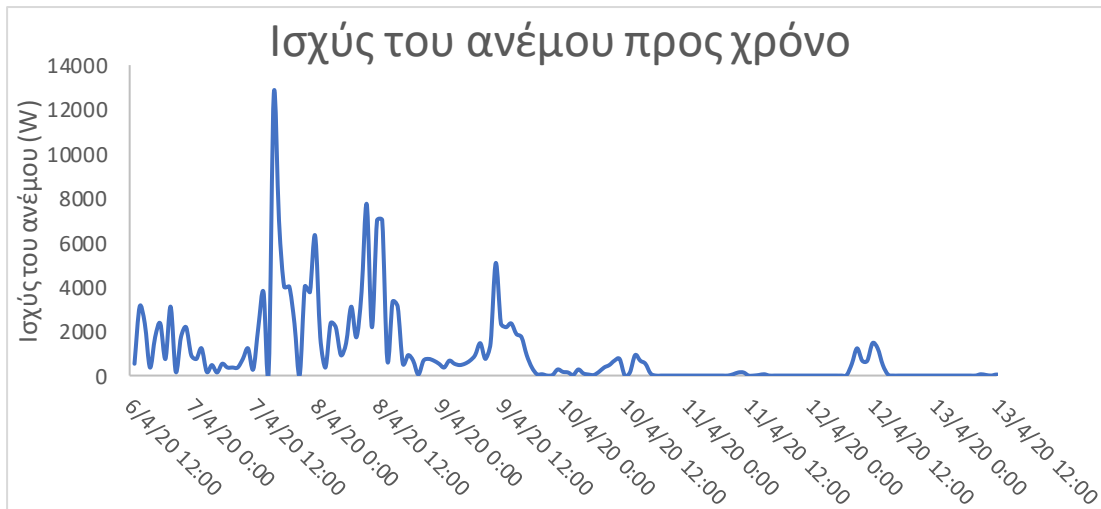
Εικόνα 4-3 Διάγραμμα της ταχύτητας του ανέμου προς το χρόνο στη χρονική περίοδο 20/4/2020 - 27/4/2020

Καθ' όλη τη περίοδο λειτουργίας της εφαρμογής υπολογίστηκαν η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα της ανεμογεννήτριας ω , ο λόγος των ταχυτήτων λ και η απόδοση της ανεμογεννήτριας c_p . Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η απόδοση της ανεμογεννήτριας συναρτήσεως του λόγου των ταχυτήτων.



Εικόνα 4-4 Διάγραμμα του συντελεστή απόδοσης προς λόγο των ταχυτήτων

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω μεταβλητές υπολογίζονται η ισχύς του ανέμου και η ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι ισχύς σε σχέση με το χρόνο λειτουργίας της εφαρμογής.



Εικόνα 4-5 Διάγραμμα της ισχύος του ανέμου προς το χρόνο στη χρονική περίοδο 4/4/2020 - 13/4/2020



Εικόνα 4-6 Διάγραμμα της ισχύος του ανέμου προς το χρόνο στη χρονική περίοδο 13/4/2020 - 20/4/2020



Εικόνα 4-7 Διάγραμμα της ισχύος του ανέμου προς το χρόνο στη χρονική περίοδο 20/4/2020 - 27/4/2020

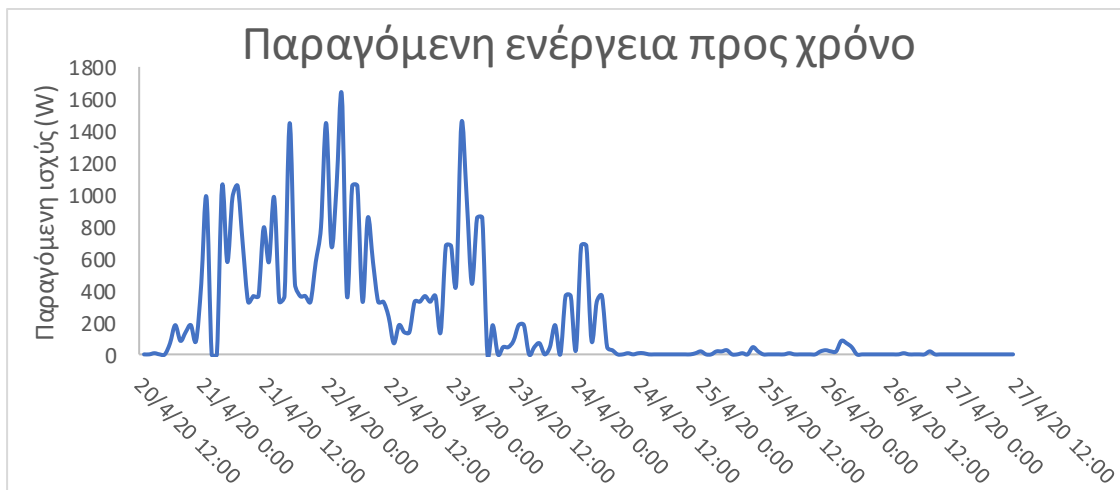
Στα διαγράμματα της ισχύς του ανέμου παρουσιάζονται μεγάλες διακυμάνσεις διότι η ταχύτητα του ανέμου μεταβαλλόταν συνεχώς. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζεται και στα διαγράμματα της παραγόμενης ισχύος, ενώ παρατηρείται ακόμη ότι η ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια είναι μεταξύ 30% και 50% της ισχύος του ανέμου.



Εικόνα 4-8 Διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος προς το χρόνο στην χρονική περίοδο 4/4/2020 -13/4/2020

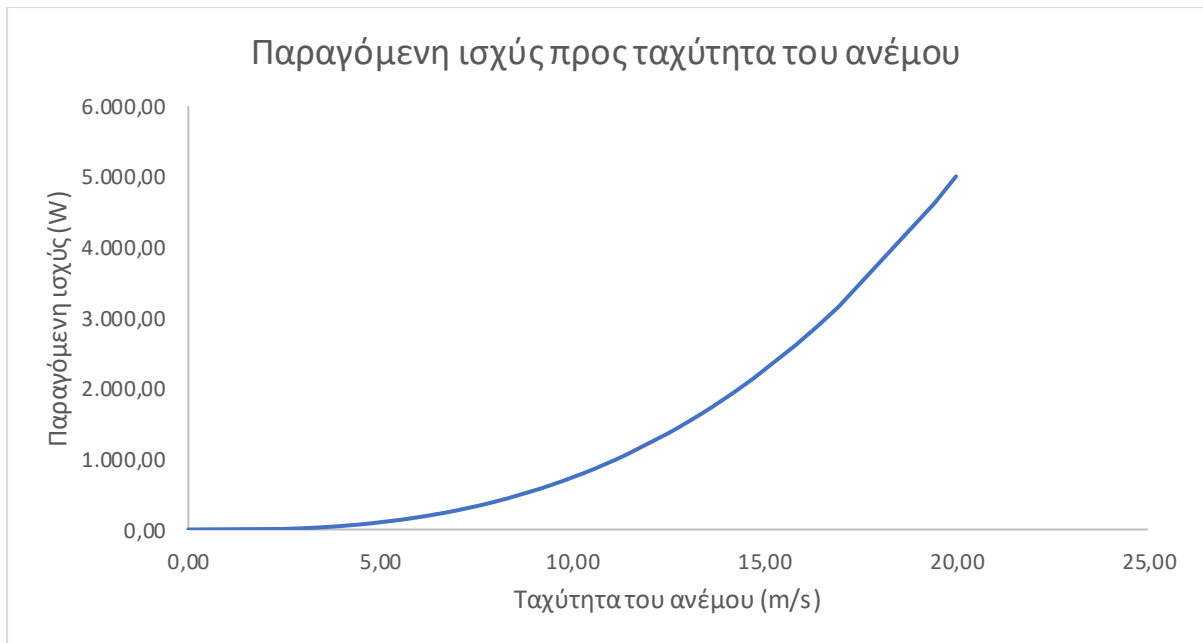


Εικόνα 4-9 Διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος προς το χρόνο στην χρονική περίοδο 13/4/2020-20/4/2020



Εικόνα 4-10 Διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος προς το χρόνο στην χρονική περίοδο 20/4/2020-27/4/2020

Στη συνέχεια, κατασκευάζεται το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύς συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Όπως παρατηρείται, η ισχύς που παράγεται αυξάνεται σημαντικά σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου, αλλά αυτό δε σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα τόσο θα αυξάνεται και η απόδοση. Πιο συγκεκριμένα, η βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται σε ένα εύρος ταχυτήτων 10 - 15 m/s.



Εικόνα 4-11 Διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος προς την ταχύτητα του ανέμου

Τέλος για τον υπολογισμό της ενέργειας που παράχθηκε από την ανεμογεννήτρια στο διάστημα που έτρεχε η εφαρμογή θα χρειαστεί η ολοκλήρωση της παραγόμενης ισχύος από τις 12:00 6/4/2020 μέχρι τη στιγμή του της προσομοίωσης, δηλαδή στις 12:00 27/4/2020. Επειδή χρονική διαφορά μεταξύ δύο τιμών είναι σταθερή και ίση με ένα λεπτό για την ολοκλήρωση θα χρησιμοποιηθεί ο κανόνας του παραλληλογράμμου, σύμφωνα με τον οποίο η θα δημιουργηθούν πολλά παραλληλόγραμμα της μορφής $P \cdot \Delta t$, όπου P η παραγόμενη ισχύς και Δt η χρονική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών της ισχύος. Για κάθε Δt η ισχύς θα θεωρείται σταθερή. Στη συνέχεια, τα υπολογισμένα παραλληλόγραμμα θα αθροιστούν και με αυτόν τον τρόπο θα βρεθεί η παραγόμενη ενέργεια της ανεμογεννήτριας κάθε χρονική στιγμή.

$$E = \int_0^{t_\tau} P * dt = \sum P * \Delta t \quad 4.1$$

Η ολοκλήρωση πραγματοποιείται με βάση τα διαγράμματα των εικόνων 4-8, 4-9 και 4-10 και τελικά η συνολική ενέργεια που παράχθηκε από την ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια των τριών εβδομάδων είναι ίση με $E=131.46 \text{ kW} \cdot \text{h}$.



Εικόνα 4-12 Διάγραμμα της παραγόμενης ενέργειας προς το χρόνο

Η συνολική παραγόμενη ενέργεια των 131,46 kW*h δεν αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα της απόδοσης της ανεμογεννήτριας, διότι την περίοδο που λειτουργούσε η εφαρμογή υπήρχαν ισχυροί άνεμοι. Για να υπάρξουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για την απόδοση της ανεμογεννήτριας θα πρέπει η εφαρμογή να συλλέξει δεδομένα, για μία περιοχή, σε μεγάλη χρονική διάρκεια, για παράδειγμα ενός χρόνου, ώστε να υπάρχουν δεδομένα για το πως ανταποκρίνεται η ανεμογεννήτρια σε όλες τις εποχές του έτους καθώς επίσης και σε ποιες περιόδους του χρόνου είναι πιο αποδοτική η λειτουργία της.

4.1 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Τα επόμενα βήματα για μελλοντική έρευνα μπορούν να συνοψιστούν στις εξής προτάσεις:

- Επαλήθευση των δεδομένων, που υπολογίστηκαν παραπάνω, μέσω σύγκρισης με τις πραγματικές μετρήσεις της ανεμογεννήτριας που βρίσκεται στο εργαστήριο. Αυτή η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί σε μία δεύτερη διπλωματική εργασία που είναι υπό εξέλιξη.
- Δημιουργία ενός μοντέλου που υπολογίζει την απόδοση ενός συστήματος φωτοβολταϊκών και η διασταύρωση αποτελεσμάτων με ένα πραγματικό σύστημα.

5 Βιβλιογραφία

- [1] H. Balcioğlu, K. Soyer and M. EL-Shimy, in *Economics of Variable Renewable Sources for Electric Power Production*, 2017, pp. 17-33.
- [2] A. Kumar, T. Schei, A. Ahenkorah, C. R. Rodriguez, J. M. Devernay, M. Freitas, D. Hall, Å. Killingtveit και Z. Liu, «Hydropower,» σε *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Cambridge University Press, 2012, pp. 437-496.
- [3] H. Saibi, S. Finsterle, R. Bertani και J. Nishijima, *Geothermal Energy*, 2011.
- [4] M. Wasfi, «Solar Energy and Photovoltaic Systems,» 2011.
- [5] A. Kalmikov, «Wind Power Fundamentals,» σε *Wind Energy Engineering*, Academic Press, 2017, pp. 17-24.
- [6] M. Pasqualetti, R. Richter και P. Gipe, «History of Wind Energy,» σε *Encyclopedia of Energy*, Cleveland, Academic Press, 2004, pp. 419-433.
- [7] A. G. L. Borthwick, «Marine Renewable Energy Seascape,» *Engineering*, τόμ. 2, αρ. 1, pp. 69-78, 2016.
- [8] J. S. Randhawa, «Ocean Energy: The Future of Renewable Energy,» 2015.
- [9] S. Khan, V. Paliwal, V. V. Pandey και V. Kumar, «Biomass as Renewable Energy,» σε *IARJSET*, 2015.
- [10] D. G. Shepherd, «Historical Development of the Windmill,» 1990.
- [11] H. J. Wagner, «Introduction to wind energy systems,» 2017.
- [12] J. P. Abraham, B. D. Plourde, G. Mowry, W. J. Minkowycz και E. M. Sparow, «Summary of Savonius wind turbine development and future applications for small-scale power generation,» *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2012.
- [13] C. Ghenai, «Life Cycle Analysis of Wind Turbine,» σε *Sustainable Development - Energy, Engineering and Technologies - Manufacturing and Environment*, 2012, pp. 19-32.

- [14] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indrajaya και V. H. Krishna, «A review on small scale wind turbines,» σε *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, pp. 1351-1371.
- [15] Z. Lubosny, σε *Wind Turbine Operation in Electric Power Systems*, New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003, pp. 73-93.
- [16] N. C. Sahoo, A. Satpathy, N. K. Kishore και B. Venkatesh, «D.C. Motor-Based Wind Turbine Emulator Using LabVIEW for Wind Energy Conversion System Laboratory Setup,» *International Journal of Electrical Engineering Education*, τόμ. 50, pp. 111-126, 2013.
- [17] C. Yin και A. Mckay, «Introduction to Modeling and Simulation Techniques,» 2018.
- [18] P. Sá Silva, A. Trigo, J. Varajão και T. Pinto, «Simulation - Concepts and Applications.,» 2010.
- [19] S. M. Shaikh και M. A. Shaikh, «IMPORTANCE OF MODELING AND SIMULATION: A VITAL SYSTEMS ENGINEERING TECHNIQUE,» *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*, τόμ. 5, αρ. 1, pp. 121-123, 2017.
- [20] «ni.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://forums.ni.com/t5/Example-Code/Designing-Controllers-for-a-Doubly-Fed-Wind-Power-System/ta-p/3996481?profile.language=en>.
- [21] I. C. Konstantakopoulos, M. Bourdoulis και A. Alexandridis, «An Alternative PI Controller Design Approach for PWM-regulated ac/dc three-phase Converters,» σε *International Conference on Industrial Technology*, Athens, 2012.
- [22] K. D. E. Kerrouche, M. Abdelkader και K. Belgacem, «Decoupled Control of Doubly Fed Induction Generator by Vector Control for Wind Energy Conversion System,» *Energy Procedia*, τόμ. 42, pp. 240-248, 2013.
- [23] «https://www.researchgate.net/figure/Charles-Brushs-windmill-of_fig1_271770428,» [Ηλεκτρονικό].