

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ



ΦΟΙΤΗΤΕΣ: ΑΣΠΡΟΜΑΛΗΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ  
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΡΟΪΔΗΣ

ΠΑΤΡΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2020



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

”Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή μας κ. Ανδρέα Βούρο για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε, και την υπομονή που έκανε κατά τη διάρκεια υλοποίησης της πτυχιακής εργασίας μας, καθώς επίσης και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του, για να ξεπεράσουμε διάφορα προβλήματα που παρουσιάστηκαν. Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε και την οικογένεια μας και τους ανθρώπους μας για την στήριξη και βοήθεια που μας πρόσφεραν ο καθένας με τον τρόπο του.”

Ασπρομάλης Ευστράτιος  
Κωνσταντίνος Ροΐδης



Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ

**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητών:** Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι Φοιτητές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι Φοιτητές

(Ονοματεπώνυμο)

(Ονοματεπώνυμο)

Ασπρομάλης

Κωνσταντίνος

Ευστράτιος

Ροΐδης

.....

.....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία απαρτίζεται από δυο ενότητες με την εξής δομή:

Στην ενότητα 1 έχουμε το θεωρικό κομμάτι το οποίο περιλαμβάνει την ιστορική αναδρομή όπου αναφέρεται στο πως ξεκίνησε η ανάπτυξη των ανεμογεννητριών, την ταξινόμηση των ανεμογεννητριών όπου βλέπαμε με βάση πια χαρακτηριστικά χωρίζονται οι ανεμογεννήτριες και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε ένα, κατόπιν έχουμε τα εξαρτήματα των ανεμογεννητριών και ανάλυση το καθενός. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η ισχύς του ανέμου και αναλύεται το πως υπολογίζεται, πως μεταβάλλεται ανάλογα με κάποια χαρακτηριστικά κτλ, άμεσος μετά παρουσιάζονται οι καμπύλες ισχύος των ανεμογεννητριών, επίσης γίνεται σύντομη αναφορά για την ταξινόμηση των ανεμογεννητριών κατά IEC, αναφορά γίνεται και για το πώς μετράται ο άνεμος και τέλος παρουσιάζονται οι τύποι των αιολικών πάρκων τα χερσαία και τα υπεράκτια.

Στην ενότητα 2 έχουμε το πρακτικό κομμάτι δηλαδή την διαδικασία που ακολουθείται μέσω του υπολογιστικού λογισμικού Retscreen για μια πραγματική εγκατάσταση αιολικού πάρκου. Το λογισμικό Retscreen αποτελείται από 5 υπολογιστικά φύλλα του excel την εκκίνηση, το ενεργειακό μοντέλο, την ανάλυση κόστους, την ανάλυση εκπομπών και την οικονομική ανάλυση. Αρχικά στην εκκίνηση που αποτελεί το πρώτο φύλλο του προγράμματος τοποθετούνται κάποιες βασικές πληροφορίες για την μελέτη όπως είναι η ονομασία, το μέγεθος της εγκατάστασης, η τοποθεσία του έργου και τα κλιματικά δεδομένα την περιοχής (νήσος Σίφνος). Στο δεύτερο φύλλο του ενεργειακού μοντέλου τοποθετούνται με σειρά η μηνιαία ταχύτητα του ανέμου, που είναι η πιο σημαντική πληροφορία για την μελέτη της εγκατάστασης (καθώς από αυτήν εξαρτάται αν είναι βιώσιμο το έργο), η τιμή πώλησης του ρεύματος, εδώ γίνεται και η επιλογή του μοντέλου και το πλήθος των ανεμογεννητριών και τέλος τοποθετούνται κάποιες πιθανές απώλειες της διάταξης. Από αυτό το φύλλο υπολογίζεται και η παραγόμενη ισχύς. Έπειτα στην ανάλυση κόστους τοποθετούνται κάποιες κατασκευαστικές δαπάνες για την πραγματοποίηση του έργου, όπου προκύπτει το αρχικό κόστος του έργου (επίσης σημαντικό για την υλοποίηση του έργου). Το τέταρτο φύλλο είναι ένα καλό παράδειγμα για να κατανοήσουμε την σημαντική επίδραση που έχουν οι ΑΠΕ στο περιβάλλον, καθώς μας δείχνει πόσοι θα ήταν οι ρύποι που θα εκλύονταν στην ατμόσφαιρα αν για την ίδια παραγόμενη ισχύ από τις ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούσαμε ένα συμβατικό ορυκτό καύσιμο, στην προκειμένη περίπτωση το πετρέλαιο. Τέλος, στο φύλλο της οικονομικής ανάλυσης γίνεται μια συγκέντρωση όλων των προηγούμενων πληροφοριών και προκύπτει το σημαντικό διάγραμμα αθροιστικών χρηματορροών, από το οποίο συμπεραίνουμε αν το έργο μπορεί να υλοποιηθεί και αν μπορεί να είναι βιώσιμο.



## Πίνακας περιεχομένων

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>3</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ</b>	<b>6</b>
<b>Ενότητα 1:Θεωρητικό Μέρος.</b>	<b>8</b>
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.</b>	<b>8</b>
1.1 Ενέργεια	8
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).	8
Πλεονεκτήματα	9
Μειονεκτήματα	9
Αιολική ενέργεια	10
Η κατάσταση στην Ελλάδα	10
Ιστορική αναδρομή	11
1.3 Ταξινόμηση ανεμογεννητριών	12
<b>Κεφάλαιο 2: Εξαρτήματα ανεμογεννητριών: Δρομείς</b>	<b>16</b>
2.1 Κατηγορίες Συστημάτων.	18
2.2 Σύγχρονες Γεννήτριες Σταθερής Ταχύτητας.	19
2.3 Επαγωγική Γεννήτρια Βραχυκυκλωμένου Κλωβού	19
2.4 Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας.	21
2.5 Σύγχρονες Γεννήτριες Μεταβλητής Ταχύτητας	21
<b>Κεφάλαιο 3: Χαρακτηριστικά Ισχύος του ανέμου.</b>	<b>24</b>
3.1 Θερμοκρασία και Ύψόμετρο - Διόρθωση της Πυκνότητας Αέρα.	25
3.2 Επίδραση του Ύψους του Πύργου.	26
3.3 Καμπύλες Ισχύος Ανεμογεννήτριας.	28
3.4 Το Όριο του Betz.	28
3.5 Ιδεατή Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας.	32
3.6 Καμπύλες Πραγματικής Ισχύος.	33
<b>Κεφάλαιο 4 : Θέση εγκατάστασης αιολικού πάρκου.</b>	<b>36</b>
4.1 Μορφολογία εδάφους.	36
4.1.1 Επίπεδη επιφάνεια εδάφους.	36
4.1.2 Ανώμαλη επιφάνεια εδάφους.	38
<b>Κεφάλαιο 5: Ταξινόμηση Αιολικών Πάρκων IEC.</b>	<b>40</b>
5.1 Όργανα μέτρησης ισχύος του ανέμου	40
5.2 Αιολικά Πάρκα.	41
5.3 Χερσαίο Αιολικό Δυναμικό.	42
5.4 Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα.	44
5.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις Α/Γ.	46
<b>Ενότητα 2: Υπολογιστικό Πακέτο RETScreen.</b>	<b>48</b>
<b>Κεφάλαιο 6 Περιβάλλον μελέτης RETScreen.</b>	<b>48</b>
6.1 Εκκίνηση.	48
6.2 Ροδόγραμμα (Wind Rose).	50



Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ

6.3	Ενεργειακό Μοντέλο.	51
6.4	Αξιολόγηση Πηγών.	51
6.5	Εισαγωγή Ανεμογεννήτριας.	52
6.6	Περίληψη.	55
6.7	Ανάλυση Κόστους.	56
6.7.1.	Ρυθμίσεις.	56
6.7.2.	Αρχικό Κόστος.	56
6.7.3	Ετήσια Κόστη.	64
6.7.4.	Περιοδικές Δαπάνες.	66
6.8	Ανάλυση Εκπομπών.	66
6.9	Οικονομική Ανάλυση.	68
6.9.1.	Οικονομικές Παράμετροι.	68
6.9.2.	Πίνακες και Διαγράμματα Οικονομικής Ανάλυσης.	70
<b>Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα.</b>		<b>74</b>
7.1	Σενάριο 1 <sup>ο</sup> Ανεμογεννήτρια Vestas V80 – 2.0 MW – 60m.	74
7.2	Σενάριο 2 <sup>ο</sup> Ανεμογεννήτρια Vestas V90 – 2.0 MW – 105m.	75
7.3	Σενάριο 3 <sup>ο</sup> Ανεμογεννήτρια Vestas V80 – 2.0 MW – 60m - Διασυνδεδεμένο.	75
<b>Παράρτημα</b>		<b>77</b>
<b>Π.1 VESTAS V90-2.0MW</b>		<b>77</b>
	Βέλτιστη απόδοση	77
	Διαστάσεις Πτερυγίων 3 × 44 μέτρα.	78
	Απόδοση.	78
	Τεχνικές προδιαγραφές	79
<b>Βιβλιογραφία</b>		<b>84</b>



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Πηγή: <a href="https://www.green-innovation.gr/wp-content/uploads/2014/02/18_Fot_netzs_330x330.jpg">https://www.green-innovation.gr/wp-content/uploads/2014/02/18_Fot_netzs_330x330.jpg</a> .....	10
Εικόνα 2 Πρώτες ανεμογεννήτριες του Poul la Cour.....	11
Εικόνα 3 Ταξινόμηση ανεμογεννητριών με βάση την φορά του άξονα περιστροφής. ....	13
Εικόνα 4 Διάφορες ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (Savonius-Darrieus-H).....	14
Εικόνα 5 Κύρια εξαρτήματα ανεμογεννητριών.....	15
Εικόνα 6 Η άνωση στο (α) οφείλεται στο ταχύτερο πέρασμα του αέρα στην πάνω πλευρά της αεροτομής. Στο (β) ο συνδυασμός των διανυσμάτων του πραγματικού ανέμου και του ανέμου λόγω της κίνησης του πτερυγίου δημιουργεί μια συνισταμένη που είναι η άνωση. ....	16
Εικόνα 7 Κατηγοριοποίηση συστημάτων αιολικής ενέργειας. ....	18
Εικόνα 8 Κατηγοριοποίηση συστημάτων αιολικής ενέργειας. ....	27
Εικόνα 9 Σχεδιαστική απεικόνιση του σωλήνα ροής. ....	28
Εικόνα 10 Καμπύλες απόδοσης για διάφορους αριθμούς πτερυγίων. ....	31
Εικόνα 11 Ιδεατή καμπύλη ισχύος. Σημεία εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας. ....	32
Εικόνα 12 (α) Αύξηση της διαμέτρου του δρομέα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ισχύς σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου (β) Αύξηση του μεγέθους της γεννήτριας με αποτέλεσμα αύξηση της ισχύος σε υψηλότερες ταχύτητες. ....	34
Εικόνα 13 Επίπεδο έδαφος με δέντρα για εμπόδια. ....	37
Εικόνα 14 Επίπεδο έδαφος με κτίριο για εμπόδιο. ....	37
Εικόνα 15 Απεικόνιση ροής αέρα σε επίπεδο εδάφους με κτίριο και δέντρα για εμπόδια. ....	37
Εικόνα 16 Κατανομή ταχύτητας πάνω από λόφο.....	38
Εικόνα 17 Κατανομή ταχύτητας πάνω από υψίπεδο.....	39
Εικόνα 18 Περιοχή μέγιστης ταχύτητας σε διάσελο. ....	39
Εικόνα 19 Ανεμογεννήτρια από το αιολικό πάρκο του Παναχαϊκού. ....	41
Εικόνα 20 Χερσαίο αιολικό πάρκο με στοιχισμένες ανεμογεννήτριες. ....	43
Εικόνα 21 Χερσαίο αιολικό πάρκο με άτακτη διάταξη των ανεμογεννητριών. ....	43
Εικόνα 22 Υπεράκτιο αιολικό πάρκο.....	44
Εικόνα 23 Τρόποι υποθαλάσσιας έδρασης. ....	45
Εικόνα 24 Απεικόνιση εκκίνησης.....	49
Εικόνα 25 Απεικόνιση εκκίνησης.....	49
Εικόνα 26 Πίνακας μέσης ταχύτητας ανέμου στη νήσο Σίφνο.....	50
Εικόνα 27 Ροδόγραμμα για την νήσο Σίφνο.....	50
Εικόνα 28 Απεικόνιση αξιολόγησης πηγών.....	51
Εικόνα 29 Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας(€ / MWh).....	52
Εικόνα 30 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας.....	53
Εικόνα 31 Πίνακας ενεργειακών δεδομένων ανεμογεννήτριας.....	53
Εικόνα 32 Διάγραμμα ισχύος ενέργειας.....	54
Εικόνα 33 Πίνακας απωλειών.....	55
Εικόνα 34 Συντελεστής ισχύος και ηλεκτρική ενέργεια δικτύου. ....	55
Εικόνα 35 Πίνακας μελέτης σκοπιμότητας.....	58
Εικόνα 36 Πίνακας κόστους κατά την ανάπτυξη του έργου.....	59
Εικόνα 37 Πίνακας μηχανολογικού κόστους.....	61



Πτυχιική Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ

Εικόνα 38 Οδικός χάρτης της Σίφνου και εμφάνιση χώρου τοποθέτησης του έργου. ....	62
Εικόνα 40 Πίνακας τιμών υποσταθμών. ....	62
Εικόνα 41 Πίνακας κόστους των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. ....	63
Εικόνα 42 Πίνακας κόστους ανέγερσης της κατασκευής. ....	64
Εικόνα 43 Πίνακας ετήσιων κοστών. ....	66
Εικόνα 44 Πίνακας περιοδικού κόστους. ....	66
Εικόνα 45 Πίνακας μείωσης εκπομπών ρύπων από την χρήση ΑΠΕ. ....	67
Εικόνα 46 Οικονομικοί παράμετροι έργου. ....	70
Εικόνα 47 Πίνακας ετήσιων εσόδων. ....	70
Εικόνα 48 Συνοπτικός πίνακας αρχικών κοστών. ....	71
Εικόνα 49 Πίνακας οικονομικής βιωσιμότητας. ....	71
Εικόνα 50 Πίνακας ετήσιας χρηματορροής. ....	72
Εικόνα 51 Διάγραμμα αθροιστικών χρηματορροών. ....	72
Εικόνα 52 Διάγραμμα αθροιστικών χρηματορροών 1ου σεναρίου. ....	74
Εικόνα 53 Διάγραμμα αθροιστικών χρηματορροών 2ου σεναρίου. ....	75
Εικόνα 54 Διάγραμμα αθροιστικών χρηματορροών 3ου σεναρίου. ....	76
Εικόνα 55 Πηγή: <a href="https://www.vestas.com/en/about/profile#!">https://www.vestas.com/en/about/profile#!</a> ....	77
Εικόνα 56 Νέο προηγμένο πτερύγιο της VESTAS V90. ....	78
Εικόνα 57 Πηγή: <a href="https://www.vestas.com/en/products/2-mw-platform/v90-2_0_mw#!about">https://www.vestas.com/en/products/2-mw-platform/v90-2_0_mw#!about</a> . ....	79





## Ενότητα 1:Θεωρητικό Μέρος.

### Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.

#### 1.1 Ενέργεια

Κάθε φυσικό σύστημα περιέχει (ή εναλλακτικά αποθηκεύει) μία ποσότητα που ονομάζεται ενέργεια. Ενέργεια, συνεπώς, είναι η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παραγάγει έργο. Οποιαδήποτε μορφή δράσης από την πιο μικρή έως την πιο μεγάλη προϋποθέτει κατανάλωση ενέργειας. Η ενέργεια με την οποία τροφοδοτείται ο πλανήτης μας προέρχεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τον Ήλιο. Η ενέργεια χαρακτηρίζεται, τόσο στη θεωρία όσο και στη πράξη, σαν το ποσό του έργου που απαιτείται προκειμένου το σύστημα να πάει από μια αρχική κατάσταση σε μια τελική. Ακριβώς πόση ενέργεια περιέχεται σε ένα σύστημα μπορεί να υπολογιστεί παίρνοντας το άθροισμα ή το ολοκλήρωμα ενός αριθμού ειδικών εξισώσεων καθεμιά από τις οποίες δίνει την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί κατά έναν ιδιαίτερο τρόπο. Ανάλογα με τον τρόπο που έχει αποκτηθεί, ανταλλαχθεί ή αποθηκευτεί, μπορούμε να μιλήσουμε για πολλές μορφές ενέργειας:

1. **Μηχανική ενέργεια**, που συνδυάζει την κινητική και τη δυναμική.
2. **Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια**, που συνδυάζει την ηλεκτρική και τη φωτεινή ή ενέργεια ακτινοβολίας,
3. **Πυρηνική ενέργεια**
4. **Θερμική ενέργεια**
5. **Χημική ενέργεια**
6. **Υλο-ενέργεια**

Πλέον, η συζήτηση για την ενέργεια έχει πάρει μια διαφορετική μορφή, για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), το Περιβάλλον καθώς και την Αειφόρο ανάπτυξη.

#### 1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

Οι **ανανεώσιμες πηγές ενέργειας** (ΑΠΕ) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Συγκεκριμένα ως ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές θεωρείται η αιολική, ηλιακή, αεροθερμική, γεωθερμική, υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια.

Ως «ανανεώσιμες πηγές» θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας (π.χ. του πετρελαίου ή του άνθρακα), όπως η ηλιακή και η αιολική. Ο χαρακτηρισμός «ανανεώσιμες» είναι κάπως καταχρηστικός, αφού ορισμένες από αυτές τις πηγές, όπως η γεωθερμική ενέργεια, δεν ανανεώνονται σε κλίμακα χιλιετιών. Σε κάθε περίπτωση οι ΑΠΕ έχουν μελετηθεί ως λύση στο πρόβλημα της αναμενόμενης εξάντλησης των (μη ανανεώσιμων) αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων.



### Πλεονεκτήματα

1. Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
2. Δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
3. Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
4. Είναι ευέλικτες εφαρμογές, που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
5. Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει πολύ μεγάλο χρόνο ζωής.
6. Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

### Μειονεκτήματα

1. Έχουν ένα αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.
2. Για τον παραπάνω λόγο προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.
3. Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
4. Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί.
5. Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

### Είδη ανανεώσιμων μορφών ενέργειας.

- **Αιολική ενέργεια.** Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές (π.χ. την άλεση στους ανεμόμυλους). Έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως για ηλεκτροπαραγωγή.
- **Ηλιακή ενέργεια.** Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι) ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος.
- **Υδραυλική ενέργεια.** Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.
- **Βιομάζα.** Χρησιμοποιεί τους υδαάνθρακες των φυτών με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές, που θα χρησιμοποιηθεί πλατιά στο μέλλον.



- **Γεωθερμική ενέργεια.** Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια
- **Ωσμωτική ενέργεια.** Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως συμβαίνει όταν ένα ποτάμι εκβάλλει στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ωσμωτική ενέργεια (ή γαλάζια ενέργεια) και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μια ημιδιαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής.



Εικόνα 1 Πηγή: [https://www.green-innovation.gr/wp-content/uploads/2014/02/18\\_Fot\\_netzs\\_330x330.jpg](https://www.green-innovation.gr/wp-content/uploads/2014/02/18_Fot_netzs_330x330.jpg)

## Αιολική ενέργεια

**Αιολική ενέργεια** ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται ως "ήπια μορφή ενέργειας" και περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές, όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους. Ονομάζεται αιολική γιατί στην ελληνική μυθολογία ο Αίολος ήταν ο θεός του ανέμου. Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Δεν εκλύονται αέρια και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επίσης, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.

## Η κατάσταση στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι μια χώρα με μεγάλη ακτογραμμή και τεράστιο πλήθος νησιών. Ως εκ τούτου, οι ισχυροί άνεμοι που πνέουν κυρίως στις νησιωτικές και παράλιες περιοχές προσδίδουν ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα. Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό σήμερα εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 13,6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας.

Σύμφωνα με την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας, μέχρι το τέλος του 2019 συνδέθηκαν τα περισσότερα νέα αιολικά πάρκα (727,5MW),



τετραπλασιάζοντας σχεδόν τον ετήσιο μέσο όρο της προηγούμενης δεκαετίας (185MW), επίδοση που αποτελεί ρεκόρ για την Ελλάδα.

### Ιστορική αναδρομή

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας έχει ξεκινήσει από τα αρχαία χρόνια παίζοντας σπουδαίο ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας. Καταλαβαίνουμε την σημασία της αιολικής ενέργειας στα αρχαία χρόνια από τις αναφορές της ελληνικής μυθολογίας στο θεό Αίολο. Αντίστοιχες αναφορές σε θεούς ανέμων υπάρχουν και στην μυθολογία της Ιαπωνίας και της Κίνας. Πρακτικά, η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας χρονολογείται ήδη από το 5.000 π.Χ. από τους Αιγυπτίους, για την κίνηση των ιστιοφόρων πλοίων που είχαν κατασκευάσει, ενώ παράλληλα αρχαιολογικές έρευνες έχουν δείξει ότι όλοι οι μεγάλοι αρχαίοι πολιτισμοί (Αιγύπτιοι, Κινέζοι, Έλληνες) χρησιμοποιούσαν ανεμόμυλους για διάφορους σκοπούς, όπως για παράδειγμα άντληση νερού και άλεση σιτηρών.

Στην Ευρώπη οι πρώτοι ανεμόμυλοι έκαναν την εμφάνισή τους περίπου το 1.200 π.Χ. με την πρώτη γραπτή αναφορά να γίνεται σε ένα γαλλικό φορολογικό έγγραφο το 1.125 μ.Χ. Ο τύπος του ήταν οριζόντιου άξονα με τέσσερα πτερύγια. Ένας άλλος τύπος ανεμόμυλου, ο οποίος χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα κυρίως στην Αμερική για την άντληση νερού, είναι ο αργός πολύπτερος.

Η πρώτη ανεμογεννήτρια παγκοσμίως που κατασκευάστηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν από τον Δανό Poul la Cour, το 1891. Αξιοσημείωτο είναι ότι la Cour την ηλεκτρική ενέργεια που παρήγαγε την χρησιμοποιούσε για ηλεκτρόλυση νερού παράγοντας έτσι υδρογόνο για λάμπες αερίου του τοπικού σχολείου. Με βάση αυτήν την τεχνική θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο Δανός ήταν έναν αιώνα μπροστά από την εποχή του, διότι το όραμα πολλών για τον 21ο αιώνα είναι η αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας, της φωτοβολταϊκής και αιολικής ενέργειας με σκοπό τη παραγωγή υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, έτσι ώστε το υδρογόνο να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου.



*Εικόνα 2 Πρώτες ανεμογεννήτριες του Poul la Cour*

Τα πρώτα αιολικά-ηλεκτρικά συστήματα, στις ΗΠΑ, κατασκευάστηκαν στα τέλη του 1890, έως το 1940 χιλιάδες μικρής παραγωγής αιολικά-ηλεκτρικά συστήματα ήταν εν λειτουργία στις αγροτικές περιοχές που δεν εξυπηρετούνταν από το ηλεκτρικό δίκτυο. Το 1941, μπήκε σε παραγωγή μια από τις μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες της εποχής σχεδιασμένη για παραγωγή 1.25 MW, δρομέα 53m και 2 πτέρυγες. Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια άντεξε υψηλές ταχύτητες ανέμου (έως και 50 m/s) πριν καταστραφεί το 1945 από μια μικρή ταχύτητα ανέμου 12 m/s όταν



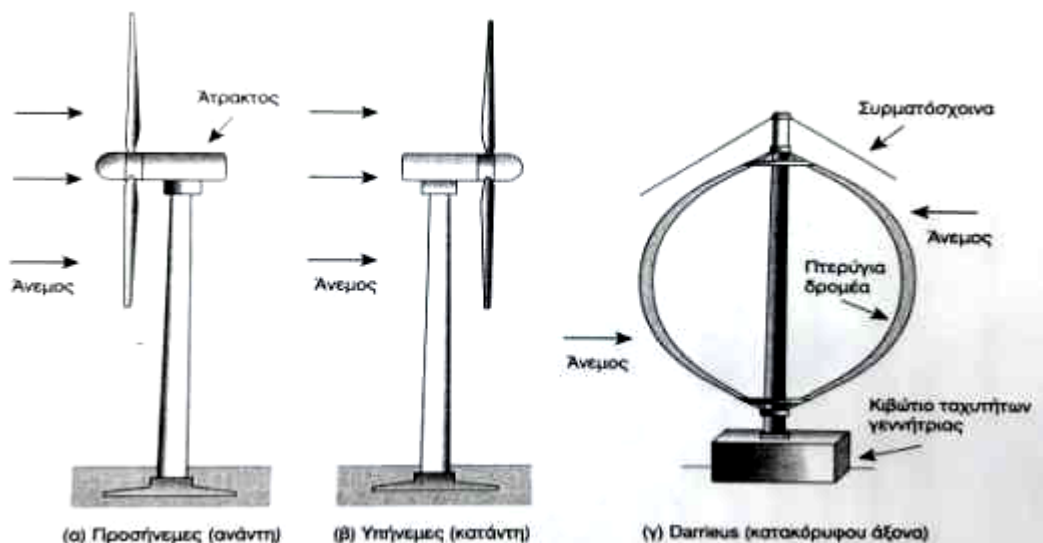
το ένα πτερύγιο (8 m) λύθηκε και εντοπίστηκε 200 m μακριά. Τα επόμενα έτη μειώθηκε το ενδιαφέρον προς τα αιολικά συστήματα καθώς το ηλεκτροδοτικό δίκτυο επεκτάθηκε ραγδαία και ήταν πιο αξιόπιστο και οικονομικό.

Ωστόσο, οι πετρελαϊκές κρίσεις της δεκαετίας του 1970 ήταν η κινητήριος δύναμη για να επανέλθει το ενδιαφέρον στα εναλλακτικά ενεργειακά συστήματα στην ΗΠΑ, και σε συνδυασμό με τα σημαντικά οικονομικά και ρυθμιστικά κίνητρα ήταν πλέον συμφέρουσα λύση. Σχεδόν μέσα σε μία δεκαετία αρκετοί κατασκευαστές εγκατέστησαν χιλιάδες νέες ανεμογεννήτριες, κυρίως στην Καλιφόρνια. Παρόλο που οι περισσότερες μηχανές δεν απέδιδαν όσο αναμενόταν οι φορολογικές εκπτώσεις και άλλα κίνητρα που υπήρχαν τότε αξίζουν την προσοχή μας, γιατί σε αυτά αποδίδεται η μείωση του χρόνου που χρειάζεται για την επικράτηση των καλύτερων τεχνολογιών. Η ραγδαία αυτή ανάπτυξη στην Καλιφόρνια ήταν σύντομη, και όταν οι φοροελαφρύνσεις έπαψαν να υπάρχουν στα μέσα της επόμενης δεκαετίας η εγκατάσταση νέων αιολικών μηχανών σταμάτησε σχεδόν τελείως για μια δεκαετία.

Η ανάπτυξη της αιολικής τεχνολογίας δεν περιορίστηκε μόνο στην ΗΠΑ αλλά συνεχίστηκε και σε Δανία, Γερμανία και Ισπανία. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των ανεμογεννητριών αυξήθηκε κατά δέκα φορές από το 2002 έως το 2012. Το 2012 η παραγωγή ηλεκτρισμού από αιολικά συστήματα ξεπέρασαν το σημείο αναφοράς των 250 GW, το οποίο μέχρι τότε ήταν το σημείο αναφοράς, που ήταν τρεις φορές η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών. Η πιο εντυπωσιακή αύξηση ήταν αυτή της Κίνας η οποία μέσα σε έξι χρόνια ανέβηκε από τα 2.6 GW το 2006 στα 63 GW το 2011.

### 1.3 Ταξινόμηση ανεμογεννητριών

Ένας τρόπος ταξινόμησης των ανεμογεννητριών είναι ο άξονας γύρο από τον οποίο περιστρέφονται τα πτερύγια. Υπάρχουν οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Σχεδόν όλες οι μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι οριζόντιου άξονα (horizontal axis wind turbines – HAWT), αλλά υπάρχουν και κάποιες μικρότερες ανεμογεννήτριες με πτερύγια που περιστρέφονται γύρο από έναν κατακόρυφο άξονα, οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (vertical axis wind turbines – VAWT). Οι HAWT μπορεί να είναι προσήνεμης ή υπήνεμης ροής. Προσήνεμης ροής σημαίνει ότι ο αέρας συναντά πρώτα τον δρομέα και μετά τον πύργο στήριξης, δηλαδή «χτυπάει» την ανεμογεννήτρια από μπροστά ενώ υπήνεμης σημαίνει ότι ο αέρας συναντά πρώτα τον πύργο στήριξης και μετά τον δρομέα. Μια υπήνεμη μηχανή έχει το πλεονέκτημα ότι αφήνει στον ίδιο τον άνεμο τον έλεγχο του προσανατολισμού (την κίνηση αριστερά-δεξιά), ώστε να προσανατολίζεται σωστά με φυσικό τρόπο σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου. Έχουν ένα όμως μειονέκτημα, ότι ο άνεμος «εμποδίζεται» από τον πύργο της ανεμογεννήτριας. Κάθε φορά που ένα πτερύγιο περιστρέφεται πίσω από τον πύργο προκαλεί μια σύντομη περίοδο μείωσης του ανέμου, η οποία κάνει το πτερύγιο να λυγίσει. Αυτή η κάμψη όχι μόνο μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του πτερυγίου λόγω καταπόνησης, αλλά επίσης αυξάνει τον θόρυβο που προκαλεί το πτερύγιο και μειώνει την παραγόμενη ισχύ. Οι προσήνεμες μηχανές, από την άλλη, χρειάζονται πολύπλοκα συστήματα ελέγχου προσανατολισμού για να έχουν συνεχώς τα πτερύγιά τους στραμμένα προς τον άνεμο. Ως αντιστάθμισμα σε αυτή την προστιθέμενη πολυπλοκότητα, οι προσήνεμες μηχανές λειτουργούν πιο ομαλά και παράγουν περισσότερη ισχύ. Κατά βάση, όλες οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι προσήνεμες.



Εικόνα 3 Ταξινόμηση ανεμογεννητριών με βάση την φορά του άξονα περιστροφής.

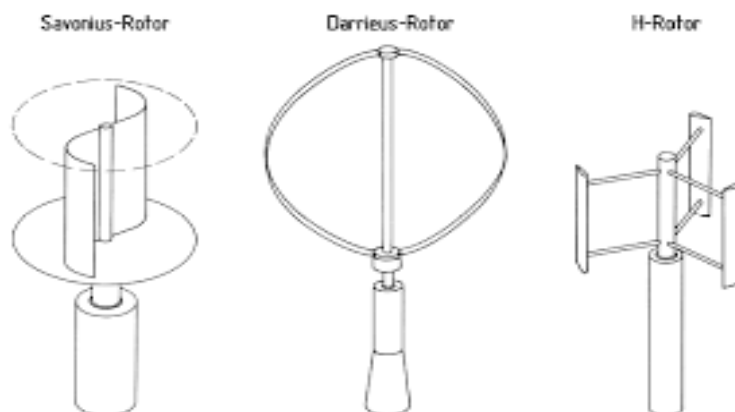
Μια άλλη βασική απόφαση σχεδιασμού για τις HAWT σχετίζεται με τον αριθμό των περιστρεφόμενων πτερυγίων. Ίσως η πιο γνωστή ανεμογεννήτρια για τους περισσότερους ανθρώπους είναι ο ανεμόμυλος με τα πολλά πτερύγια, ο οποίος χρησιμοποιείται για άντληση νερού και συναντάται συχνά σε παλιά αγροκτήματα. Αυτές οι μηχανές είναι εντελώς διαφορετικές από εκείνες που έχουν σχεδιαστεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Για την άντληση νερού, ο ανεμόμυλος πρέπει να έχει την δυνατότητα υψηλής ροπής εκκίνησης για να υπερνικήσει το βάρος και την τριβή του άξονα άντλησης που κινείται πάνω-κάτω στη γεώτρηση. Επίσης, πρέπει να λειτουργεί σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, ώστε να παρέχει σχεδόν συνεχή άντληση νερού όλο τον χρόνο. Σύμφωνα με τον σχεδιασμό του ανεμόμυλου με τα πολλά πτερύγια, μια μεγάλη περιοχή του δρομέα έρχεται σε επαφή με τον άνεμο, κάτι που δίνει τη δυνατότητα στον ανεμόμυλο να αναπτύσσει υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του δρομέα. Από την άλλη μεριά, οι ανεμογεννήτριες με πολλά πτερύγια λειτουργούν με πολύ χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής από ό,τι οι ανεμογεννήτριες με λιγότερα πτερύγια. Καθώς οι στροφές ανά λεπτό της ανεμογεννήτριας αυξάνονται, η τύρβη που προκαλείται από ένα πτερύγιο επηρεάζει την απόδοση του επόμενου. Οι ανεμογεννήτριες με λιγότερα πτερύγια μπορούν να περιστρέφονται γρηγορότερα πριν αυτή η παρεμβολή γίνει εμφανής στο επόμενο, και ένας άξονας που περιστρέφεται πιο γρήγορα σημαίνει ότι οι ανεμογεννήτριες μπορούν να είναι μικρότερες σε μέγεθος.

Κάποτε οι HAWT δύο πτερυγίων ανταγωνίζονταν τις ανεμογεννήτριες τριών πτερυγίων. Οι δρομείς των ανεμογεννητριών δύο πτερυγίων είναι φθηνότεροι στην κατασκευή και μπορούν να υψωθούν πιο εύκολα έως την άτρακτο. Επίσης, μπορούν να περιστρέφονται πιο γρήγορα, το οποίο οδηγεί σε μειωμένο κόστος της ηλεκτρικής γεννήτριας. Από την άλλη μεριά, οι ανεμογεννήτριες τριών πτερυγίων δείχνουν ομαλότερη λειτουργία, εφόσον οι επιπτώσεις από τις παρεμβολές του πύργου και οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με το ύψος μεταφέρονται πιο ομοιόμορφα από τον δρομέα στον άξονα της κίνησης. Επίσης, είναι λιγότερο θορυβώδεις. Όλες οι μεγάλες σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι τριών πτερυγίων.

Το κύριο πλεονέκτημα των μηχανών κατακόρυφου άξονα, όπως ο δρομέας Darrieus είναι ότι η ηλεκτρική γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων, που είναι τα πιο



βαριά εξαρτήματα, και που περιέχονται στην άτρακτο μπορεί να βρίσκονται κάτω στο έδαφος, όπου μπορούν να συντηρηθούν εύκολα. Με δεδομένου ότι ο βαρύς εξοπλισμός δεν είναι στηριγμένος στην κορυφή του πύργου, ο ίδιος ο πύργος δεν χρειάζεται να είναι δομικά τόσο ισχυρός όσο για μια HAWT. Ο πύργος μπορεί να είναι ακόμη πιο ελαφρύς εάν χρησιμοποιηθούν συρματοσχοίνα στήριξης, τα οποία είναι κατάλληλα για τους πύργους που βρίσκονται στην ξηρά, αλλά όχι για υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι δεν χρειάζονται κανένα είδος ελέγχου προσανατολισμού για να κρατηθούν στραμμένες προς τον άνεμο, από όποια κατεύθυνση και αν φυσάει ο άνεμος μπορεί να της περιστρέψει. Τα πτερύγια σε έναν δρομέα Darrieus, καθώς περιστρέφονται, είναι σχεδόν πάντα σε φυσικό εφελκυσμό, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να είναι σχετικά πιο ελαφριά και φθηνά, αφού δεν χρειάζεται να διαχειρίζονται τη συνεχή κάμψη την οποία δέχονται τα πτερύγια των μηχανών οριζόντιου άξονα. Το κύριο μειονέκτημα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα, το οποίο έχει οδηγήσει σε αφανισμό τους σε μεγαλύτερες κλίμακες, είναι ότι τα πτερύγια είναι κοντά στο έδαφος, όπου οι ταχύτητες του ανέμου είναι χαμηλότερες. Όπως θα δούμε και παρακάτω, η παραγόμενη ισχύς των ανεμογεννητριών αυξάνεται ανάλογα με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι, στο επίπεδο του εδάφους οι VAWT δεν έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν σε μεγαλύτερα ύψη με πιο ισχυρούς ανέμους. Μια αγορά στην οποία οι VAWT έχουν κατανάλωση είναι οι ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας με μικρή παραγωγή μόλις λίγων κιλοβάτ που μπορούν να εγκατασταθούν πάνω σε κτίρια ή κοντά σε κτίρια.

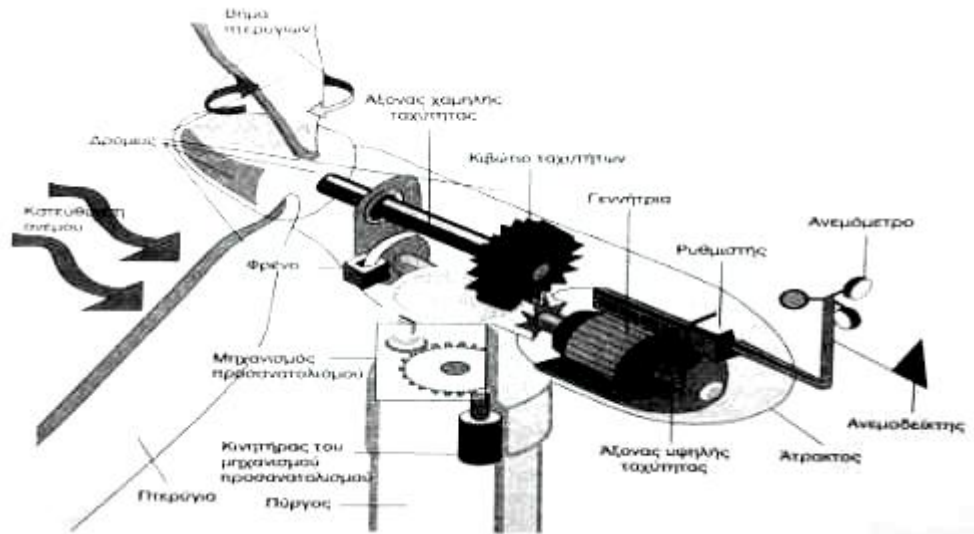


Εικόνα 4 Διάφορες ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (Savonius-Darrieus-H).

Τα βασικά εξαρτήματα των συστημάτων αιολικής ενέργειας φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Η λειτουργία των πτερυγίων είναι να μετατρέψουν την ενέργεια του ανέμου σε κινητική σε έναν περιστρεφόμενο άξονα, ώστε να περιστραφεί μια γεννήτρια που παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Συνήθως η περιστροφή του άξονα είναι πολύ αργή για να ενωθεί απευθείας σε μια γεννήτρια, γι' αυτό παρεμβάλλεται ένα κιβώτιο ταχυτήτων που μεταφέρει την ενέργεια από τον άξονα χαμηλής ταχύτητας στον άξονα υψηλής ταχύτητας που περιστρέφει την ηλεκτρική γεννήτρια. Υποθέτοντας ότι είναι μια μηχανή προσήνεμου τύπου, ένα άλλο κιβώτιο ταχυτήτων και ένας κινητήρας ρυθμίζουν τον προσανατολισμό της, προκειμένου η ανεμογεννήτρια να διατηρεί τα πτερύγια της προς τη φορά του ανέμου κατά την παραγωγή ενέργειας, καθώς και την εκτροπή του δρομέα από τον άνεμο, όταν οι άνεμοι είναι πολύ ισχυροί, για να μην καταστραφεί η μηχανή. Υπό τέτοιες συνθήκες, ένα φρένο χρησιμοποιείται για να κλειδώσουν τα πτερύγια στην θέση τους.



Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ



Εικόνα 5 Κύρια εξαρτήματα ανεμογεννητριών.



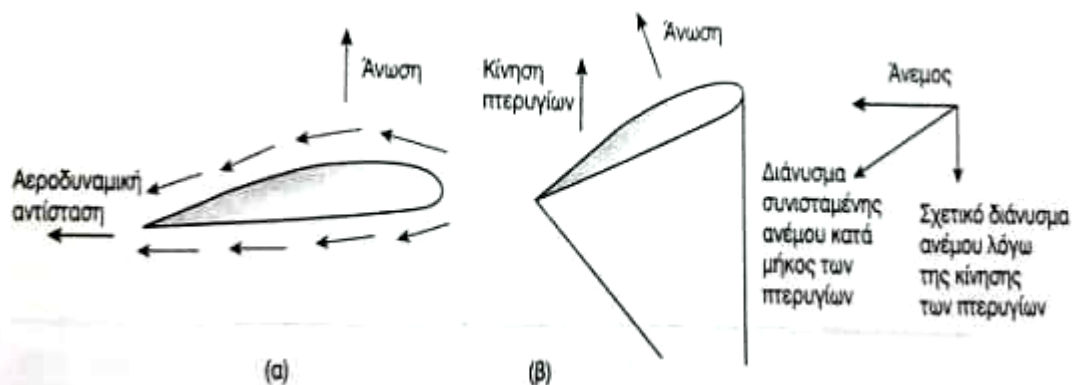


## Κεφάλαιο 2: Εξαρτήματα ανεμογεννητριών: Δρομείς

Η τεχνολογία εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας εξελίχθηκε ραγδαία στις πρώτες δεκαετίες του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Οι ανεμογεννήτριες εκτός του ότι έγιναν σημαντικά μεγαλύτερες βελτιώθηκε σε μεγάλο βαθμό και η απόδοσή τους. Στα τέλη του 20<sup>ου</sup> με αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα οι περισσότερες ανεμογεννήτριες είχαν ονομαστική ισχύ 1-2 MW, ύψους πύργου 50-80 m, και διάμετρο πτερυγίων 80-100 m. Σχεδόν δέκα χρόνια μετά οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες, που ο σχεδιασμός τους ήταν εστιασμένος για τους παράκτιους ισχυρούς ανέμους, ήταν τέτοιου μεγέθους που έφταναν τα 7 MW, με δρομέα διαμέτρου που έφτανε πάνω από 150 m.

Για να μπορέσουμε να καταλάβουμε πως λειτουργεί μια ανεμογεννήτρια, χρειαζόμαστε μια γρήγορη εισαγωγή στον τρόπο που τα πτερύγια του δρομέα παράγουν ενέργεια από τον άνεμο. Γενικά μια αεροτομή (είτε πρόκειται για φτερό αεροπλάνου είτε για πτερύγιο ανεμογεννήτριας) εκμεταλλεύεται την αρχή του Bernoulli για να δημιουργηθεί άνωση. Η ροή του αέρα στην πάνω πλευρά της αεροτομής έχει να διασχίσει περισσότερη απόσταση από τον αέρα που πήγε κάτω από την αεροτομή για να μπορέσουν να ξανασυναντηθούν στο τέλος της. Αυτό μεταφράζεται ότι ο αέρας στην πάνω πλευρά τρέχει με μεγαλύτερη ταχύτητα προκαλώντας χαμηλότερη πίεση από ό,τι κάτω από την αεροτομή δημιουργώντας έτσι μια διαφορά πίεσης προκαλώντας την δύναμη της άνωσης που κρατά ένα αεροπλάνο στον αέρα ή περιστρέφει το πτερύγιο μιας ανεμογεννήτριας.

Η ανάλυση των δυνάμεων σε ένα πτερύγιο ανεμογεννήτριας είναι πιο περίπλοκη από ό,τι σε ένα φτερό αεροπλάνου. Ένα πτερύγιο ανεμογεννήτριας που περιστρέφεται δέχεται αέρα που κινείται προς την κατεύθυνσή του όχι μόνο από τον ίδιο τον άνεμο, αλλά και από τη σχετική κίνηση του πτερυγίου καθώς περιστρέφεται. Ο συνδυασμός των δύο αυτών κινήσεων είναι σαν να προσθέτουμε δύο διανύσματα, και το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι διάνυσμα με κατεύθυνση κατά μήκος της αεροτομής στη σωστή γωνία για την απόκτηση άνωσης με σκοπό την κίνηση του δρομέα. Δεδομένου του ότι το πτερύγιο κινείται πολύ ταχύτερα στην άκρη από ό,τι κοντά στον άξονα, το πτερύγιο πρέπει να συστρέφεται κατά μήκος του, για να διατηρούνται σωστές οι γωνίες αυτές.



Εικόνα 6 Η άνωση στο (α) οφείλεται στο ταχύτερο πέρασμα του αέρα στην πάνω πλευρά της αεροτομής. Στο (β) ο συνδυασμός των διανυσμάτων του πραγματικού ανέμου και του ανέμου λόγω της κίνησης του πτερυγίου δημιουργεί μια συνισταμένη που είναι η άνωση.



Έως ενός κρίσιμου σημείου η αύξηση της γωνίας μεταξύ της αεροτομής και του ανέμου (που ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης) αυξάνει την άνωση σε βάρος την αυξημένης αντίστασης. Όμως η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης πέρα από την κρίσιμη γωνία οδηγεί στο γνωστό φαινόμενο της απώλειας στήριξης. Όταν το πτερύγιο βρίσκεται σε κατάσταση απώλειας στήριξης η ροή του αέρα στην πάνω πλευρά του δεν εφάπτεται πια στην επιφάνεια σχηματίζοντας έτσι στροβιλισμοί (τύρβη) που καταστρέφουν την άνωση.

Η ισχύς που παράγει μια ανεμογεννήτρια αυξάνεται κατακόρυφα με την αύξηση της αιολικής ενέργειας. Σε μια ορισμένη ταχύτητα του ανέμου, η ανεμογεννήτρια φτάνει στο μέγιστο που μπορεί να παράγεται και πρέπει να υπάρχει κάποιος τρόπος για να περιοριστεί η δύναμη του ανέμου, αλλιώς μπορεί να καταστραφεί. Τρεις τρόποι είναι περισσότερο διαδεδομένοι στις μεγάλες μηχανές: ο παθητικός έλεγχος επιβράδυνσης, ένα ενεργητικό σύστημα ελέγχου βήματος πτερυγίων, και ο ενεργός έλεγχος επιβράδυνσης ο οποίος είναι συνδυασμός των δύο των δυο παραπάνω.

Στις μηχανές με παθητικό έλεγχο επιβράδυνσης, τα πτερύγια έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο για την αυτόματη μείωση της απόδοσης τους σε υπερβολικές ταχύτητες ανέμου. Τίποτα δεν περιστρέφεται και κανένας μηχανισμός δεν υπάρχει, όπως συμβαίνει στα ενεργητικού ελέγχου βήματος, εξ' ου και η ονομασία παθητικός έλεγχος. Η αεροδυναμική σχεδίαση των πτερυγίων, και ειδικότερα η συστροφή τους ως συνάρτηση της απόστασης από την πλήμνη, πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά έτσι ώστε να γίνετε σταδιακή μείωση στην άνωση, καθώς ο αέρας αυξάνει και τα πτερύγια περιστρέφονται πιο γρήγορα. Η μέθοδος αυτή είναι απλή και αξιόπιστη, αλλά αφήνει ανεκμετάλλευτη κάποια ισχύ σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου. Είναι δημοφιλής στις ανεμογεννήτριες μικρού μεγέθους περίπου 1MW.

Για ανεμογεννήτριες με έλεγχο βήματος, ένα ηλεκτρονικό σύστημα παρακολουθεί συνεχώς την ισχύ εξόδου της γεννήτριας. Όταν αυτή υπερβεί τις προκαθορισμένες τιμές, η γωνία βήματος των πτερυγίων ρυθμίζεται για να απορρίψει μέρος ανέμου. Ένα υδραυλικό σύστημα περιστρέφει τα πτερύγια γύρο από τους άξονές τους, γυρίζοντας τα κάθε τόσο λίγες μοίρες έτσι ώστε να μειώνει ή να αυξάνει την απόδοση τους ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν εκείνη την στιγμή. Ο στόχος είναι να μειωθεί η γωνία πρόσπτωσης των πτερυγίων όταν οι άνεμοι είναι υψηλοί. Οι περισσότερες μεγάλες ανεμογεννήτριες στηρίζονται σε αυτή την τεχνική για τον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος.

Η τρίτη μέθοδος είναι ένα σύστημα ενεργού ελέγχου επιβράδυνσης στο οποίο τα πτερύγια περιστρέφονται με τον ίδιο τρόπο όπως στην προσέγγιση ελέγχου βήματος. Η διαφορά είναι όταν οι άνεμοι υπερβούν την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου της γεννήτριας, αντί να γίνεται μείωση της γωνίας πρόσπτωσης των πτερυγίων, γίνεται αύξηση για να προκληθεί το φαινόμενο της απώλειας στήριξης και τελικός επιβράδυνση.

Στις ανεμογεννήτριες με έλεγχο βήματος και ενεργητικό έλεγχο επιβράδυνσης, ο δρομέας σταματά περιστρέφοντας τα πτερύγια του γύρο από τον επιμήκη άξονά τους, για να δημιουργήσουν επιβράδυνση. Για ανεμογεννήτριες με παθητικό έλεγχο επιβράδυνσης, συνήθως οι μεγάλες ανεμογεννήτριες έχουν περιστρεφόμενα τμήματα στα άκρα των πτερυγίων τους εφοδιασμένα με ελατήριο. Όταν ενεργοποιηθεί το υδραυλικό σύστημα που διαθέτουν, τα ελατήρια μετατοπίζονται και τα άκρα των πτερυγίων περιστρέφονται 90° από τον άνεμο σταματώντας έτσι την ανεμογεννήτρια μέσα σε λίγες μόνο περιστροφές του δρομέα. Στην περίπτωση που το υδραυλικό σύστημα αποτύχει για οποιοδήποτε λόγο, τα ελατήρια ενεργοποιούνται αυτόματα όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι εκτός ορίων. Την στιγμή που ο δρομέας ακινητοποιηθεί, με οποιονδήποτε από τους παραπάνω μηχανισμούς, ένα μηχανικό



φρένο κλειδώνει τον άξονα του δρομέα, κάτι το οποίο είναι αρκετά σημαντικό για λόγους ασφάλειας και κατά την συντήρηση.

Μικρού μεγέθους ανεμογεννήτριες (της τάξης των kilowatt) είναι δυνατών να έχουν οποιαδήποτε τεχνική ελέγχου επιβράδυνσης. Οι παθητική έλεγχοι προσανατολισμού κάνουν τον άξονα της γεννήτριας να μετατοπίζεται όλο και πιο μακριά από τον άνεμο καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την τοποθέτηση της γεννήτριας ελαφρώς προς την πλευρά του πύργου στήριξης, έτσι ώστε οι ισχυροί άνεμοι να ωθούν την μηχανή γύρω από αυτόν. Μια άλλη απλή και αξιόπιστη τεχνική στηρίζεται στην τοποθέτηση ενός ανεμοδείκτη προσανατολισμού ο οποίος τοποθετείται παράλληλα στο επίπεδο των πτερυγίων. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει η πίεση του, που ασκείται στο πτερύγιο, αυξάνει περιστρέφοντας έτσι την μηχανή μακριά από την κατεύθυνση του ανέμου.

## 2.1 Κατηγορίες Συστημάτων.

Μία μορφή κατηγοριοποίησης των συστημάτων αιολικής ενέργειας γίνεται με γνώμονα το αν ο δρομέας τους περιστρέφεται με σταθερή ή μεταβλητή ταχύτητα. Όπως γνωρίζουμε, υπάρχει ένα μέγιστο σημείο απόδοσης για τους δρομείς στο οποίο η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίδια με την τρέχουσα ταχύτητα του ανέμου. Αυτό όμως δεν είναι πάντα εφικτό λόγο του ότι η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται συνεχώς, για μέγιστη λοιπόν απόδοση θα πρέπει η ταχύτητα του δρομέα να είναι μεταβλητή, κάτι που κοστίζει αρκετά. Οι ανεμογεννήτριες με σταθερή ταχύτητα προσφέρουν μια απλή προσέγγιση με χαμηλότερο κόστος, αλλά δεν προσφέρουν τη δυνατότητα να λειτουργεί η ανεμογεννήτρια συνέχεια στο μέγιστο σημείο παραγωγής ισχύς της. Επίσης, οι μηχανικές καταπονήσεις που προκαλούνται από της απότομες διακυμάνσεις του ανέμου είναι πιο έντονες για τις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας, οι οποίες έχουν ισχυρότερο σχεδιασμό.



Εικόνα 7 Κατηγοριοποίηση συστημάτων αιολικής ενέργειας.

Τα χαρακτηριστικά διάκρισης των ανεμογεννητριών περιλαμβάνουν αν οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν με σταθερή ή μεταβλητή ταχύτητα, κατά πόσο οι γεννήτριες είναι σύγχρονες ή επαγωγικές, και αν υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων ή όχι.



Το πιο προηγμένο σύστημα που υπάρχει αυτή την στιγμή είναι ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας, χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων, που χρησιμοποιεί σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet synchronous generator - PMSG). Αυτές οι ανεμογεννήτριες είναι οι μεγαλύτερες και πιο αποδοτικές που σχεδιάστηκαν ειδικά για υπεράκτιες εφαρμογές.

## 2.2 Σύγχρονες Γεννήτριες Σταθερής Ταχύτητας.

Οι σύγχρονες γεννήτριες, παράγουν σχεδόν το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Αναφέρονται και ως γεννήτριες σταθερής ταχύτητας, καθώς περιστρέφονται σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής που καθορίζεται από τον αριθμό των πόλων του δρομέα  $p$  και τη συχνότητα  $f$  (Hz) της τριφασικής τάσης οπλισμού που παρέχεται από το δίκτυο.

$$N(\text{rpm}) = \frac{120f}{p}$$

Το ρεύμα οπλισμού δημιουργεί ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο εντός της γεννήτριας, το οποίο αλληλεπιδρά με ένα δεύτερο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον ίδιο τον δρομέα. Το πεδίο που δημιουργεί ο δρομέας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με μόνιμους μαγνήτες (PMSG) πάνω στον δρομέα είτε με ένα ρεύμα πεδίου που διοχετεύεται μέσω δακτυλίων ολίσθησης στα τυλίγματα πάνω στον ίδιο τον δρομέα. Η τελευταία διάταξη αναφέρεται ως επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG).

## 2.3 Επαγωγική Γεννήτρια Βραχυκυκλωμένου Κλωβού

Στις περισσότερες περιπτώσεις ανά τον κόσμο χρησιμοποιούν επαγωγικές γεννήτριες αντί για τις σύγχρονες μηχανές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Σε αντίθεση με τις σύγχρονες γεννήτριες, οι επαγωγικές μηχανές δεν περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα, γι' αυτό και συχνά περιγράφονται ως ασύγχρονες γεννήτριες. Παρόλο που οι επαγωγικές γεννήτριες συνήθως δεν χρησιμοποιούνται σε συστήματα παραγωγής ισχύος εκτός των ανεμογεννητριών, οι κινητήρες επαγωγής είναι οι πιο διαδεδομένοι κινητήρες, που χρησιμοποιούνται σχεδόν στο ένα τρίτο του συνόλου της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται παγκοσμίως. Οι επαγωγικές γεννήτριες λειτουργούν με βάση ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στις περιελίξεις του οπλισμού (τυλίγματα του στάτη), αλλά η ταχύτητα τους μπορεί να είναι διαφορετική από τη σταθερή ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες μηχανών επαγωγής: εκείνες με δακτυλιοφόρους δρομείς [επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor induction generators – WRIG)], και επίσης εκείνες που έχουν δρομείς που ονομάζονται δρομείς βραχυκυκλωμένου κλωβού [επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-cage induction generators- SCIG)]. Οι γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού απαρτίζονται από έναν αριθμό χάλκινων ή αλουμινένιων



ράβδων βραχυκυκλωμένων στα άκρα τους, σχηματίζοντας έναν κλωβό. Ο κλωβός αυτός στη συνέχεια ενσωματώνεται σε έναν σιδερένιο πυρήνα που αποτελείται από μονωμένα λεπτά (0.5mm) χαλύβδινα ελάσματα, για να βοηθήσει στον έλεγχο των απωλειών λόγω των δινορευμάτων. Το βασικό πλεονέκτημα των SCIG (επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού) είναι ότι οι δρομείς τους δεν χρειάζονται διέγερση, ψήκτρες και δακτυλίους ολίσθησης, όπως συμβαίνει με τις WRIG (επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα). Με μια διαφορετική ματιά, μπορεί να θεωρηθεί ότι το πεδίο του στάτη είναι σταθερό και ότι ο αγωγός κινείται προς τα αριστερά, περνώντας μέσα από τις γραμμές της μαγνητικής ροής. Ικανοποιείται έτσι ο νόμος του Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή που αναφέρει ότι κινούμενος αγωγός μέσα σε μαγνητικό πεδίο παράγει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη (electromotive force – emf) στα άκρα του περνώντας έτσι ρεύμα μέσα από αυτόν.

Στην πραγματικότητα, ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού έχει αγώγιμες ράβδους με πολύ μικρή αντίσταση, κάτι που τον καθιστά ικανό να μπορεί να ρέει εύκολα αρκετό ρεύμα μέσα από αυτόν. Το ρεύμα του δρομέα θα δημιουργήσει το δικό του μαγνητικό πεδίο, το οποίο εμφανίζεται γύρω από τον αγωγό. Στη συνέχεια, το μαγνητικό πεδίο του δρομέα αλληλεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο του στάτη και παράγουν μια δύναμη που προσπαθεί να κινήσει τον αγώγιμο κλωβό προς μια κατεύθυνση. Δηλαδή ο δρομέας προσπαθεί να περιστραφεί προς την ίδια κατεύθυνση και με ίδια ταχύτητα με αυτήν του περιστρεφόμενου πεδίου.

Καθώς ο στάτης μιας επαγωγικής μηχανής τροφοδοτείται με τριφασικό ρεύμα διέγερσης και ο άξονας είναι συνδεδεμένος με μια ανεμογεννήτρια, όταν ο άνεμος αρχίζει να φυσάει, το σύστημα τίθεται σε λειτουργία αυξάνοντας τις στροφές προς τη σύγχρονη ταχύτητα του. Όταν τελικά η ταχύτητα του ανέμου είναι επαρκής για να αναγκάσει τον άξονα της γεννήτριας να υπερβεί τη σύγχρονη ταχύτητα, η επαγωγική μηχανή αλλάζει αυτόματα σε τριφασική γεννήτρια που παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα πίσω στις περιελίξεις του στάτη της. Η σχετική ταχύτητα μεταξύ του μαγνητικού πεδίου του στάτη και του ίδιου του δρομέα ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης  $s$  και ορίζεται ως:

$$s = \frac{N_s - N_R}{N_s} = 1 - \frac{N_s}{N_R}$$

Όπου,

$N_s$  η σύγχρονη ταχύτητα χωρίς φορτίο και

$N_R$  η ταχύτητα του δρομέα

Η ολίσθηση θεωρείται θετική όταν ο δρομέας κινείται με μικρότερη ταχύτητα από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη, δηλαδή η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας. Αντίθετα όταν ο δρομέας κινείται γρηγορότερα από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, η ολίσθηση είναι αρνητική και η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια.

Στις επαγωγικές μηχανές οι οποίες είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο, η ολίσθηση δεν είναι συνήθως περισσότερη από το  $\pm 1\%$ . Το οποίο σημαίνει για γεννήτρια με 4 πόλους στα 60 Hz ότι περιστρέφεται με ταχύτητα:

$$\begin{aligned} N_R &= (1-s)N_s = (1-s) \cdot \frac{120f}{p} \\ &= [1 - (-0.01)] \cdot \frac{120 \times 60}{4} = 1818rpm \end{aligned}$$



Εάν σε αυτό το σημείο θεωρήσουμε ότι το κιβώτιο ταχυτήτων έχει σχέση μετάδοσης 100:1, τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας θα αναγκαστούν να περιστραφούν κοντά στις 18 rpm.

Με μια έξυπνη καλωδίωση των περιελίξεων του στάτη, είναι εφικτό να μεταβληθεί εξ αποστάσεως ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας. Για τον δρομέα, ο αριθμός των πόλων στον στάτη δεν έχει σημασία. Δηλαδή, ο στάτης μπορεί να έχει εξωτερικές συνδέσεις που να αλλάζουν τον αριθμό των πόλων, χωρίς όμως να χρειάζεται καμία αλλαγή στον δρομέα. Για παράδειγμα, μια γεννήτρια 60 Hz τεσσάρων πόλων περιστρέφεται με περίπου 1800 rpm όπως δείξαμε παραπάνω, ενώ με έξι πόλους θα περιστρέφεται με 1200 rpm. Επίσης με ένα κιβώτιο ταχυτήτων 100:1, οι δρομείς θα μπορούσαν να περιστρέφονται με 12 ή 18 rpm. Αυτή η τεχνική εναλλαγής των πόλων είναι συχνή σε κινητήρες οικιακών συσκευών, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται σε πλυντήρια και ανεμιστήρες απαγωγής, για να δίνεται η δυνατότητα λειτουργίας δύο ή τριών ταχυτήτων στην συσκευή.

## 2.4 Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας.

Η επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG), χωρίς ηλεκτρικές συνδέσεις στον δρομέα, έχει το σημαντικό πλεονέκτημα της απλότητας και της στιβαρότητας. Από την άλλη, είναι μια μηχανή σταθερής ταχύτητας, της οποίας η ταχύτητα περιστροφής διαφέρει ελάχιστα από εκείνη μιας σύγχρονης γεννήτριας. Ακόμη και αυτές οι μικρές διακυμάνσεις όμως βοηθούν όταν πρόκειται για την απαλοιφή των <<κραδασμών>> που προκαλούνται από τις απότομες διακυμάνσεις των ανέμων.

Η επιπλέον πολυπλοκότητα μιας επαγωγικής γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα, η οποία χρειάζεται δακτυλίους ολίσθησης για να ενεργοποιήσει τον δρομέα, είναι πολλές φορές περισσότερη από αυτή που μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της προστιθέμενης ευελιξίας που μπορεί να μας παρέχει στον έλεγχο της ταχύτητας του δρομέα. Μία από τις πιο δημοφιλείς διατάξεις των ανεμογεννητριών στηρίζεται στην επονομαζόμενη ως επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα διπλής τροφοδοσίας (doubly-fed induction generator – DFIG). Το τμήμα του στάτη ενός συστήματος DFIG είναι συμβατικό. Δηλαδή, από το δίκτυο παρέχετε τριφασική τάση που δημιουργεί το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Η ισχύς που παράγεται σε αυτόν τροφοδοτείται και πάλι στο δίκτυο με τον ίδιο τρόπο. Η διαφορά σε αυτήν την τεχνική είναι ότι ο δρομέας έχει ρυθμιστεί έτσι ώστε να επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ισχύος προς ή από το δίκτυο. Όταν ο δρομέας δηλαδή περιστρέφεται με συχνότητα μικρότερη της σύγχρονης (υπο-σύγχρονη), η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, επιβραδύνοντας την ανεμογεννήτρια και τραβώντας ενέργεια από το δίκτυο. Όταν βρίσκεται σε υπερ-σύγχρονη λειτουργία, περιστρέφεται πιο γρήγορα από τη σύγχρονη ταχύτητα, η ισχύς που παράγεται από τον ίδιο τον δρομέα, τροφοδοτείται και πάλι πίσω στο δίκτυο.

## 2.5 Σύγχρονες Γεννήτριες Μεταβλητής Ταχύτητας

Η διάταξη DFIG (επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα διπλής τροφοδοσίας) που αναφέρθηκε παραπάνω χρησιμοποιεί για την λειτουργία της έναν σχετικά μικρό μετατροπέα τάσης, με ονομαστική ισχύ περίπου 30% της πλήρους



ισχύος της ανεμογεννήτριας. Και έχει την δυνατότητα για περίπου ίδιου μεγέθους ρυθμίσεις ταχυτήτων.

Το επόμενο στάδιο που πρέπει να καλύψουμε είναι να αποκτήσουμε τον πλήρη έλεγχο της ταχύτητας με μετατροπέα πλήρους δυναμικότητας που τροφοδοτεί την σύγχρονη γεννήτρια. Η γεννήτρια μπορεί να είναι είτε δακτυλιοφόρου δρομέα, που σε αυτή την τεχνική όπως είπαμε χρειαζόμαστε δακτυλίους ολίσθησης και ένα κύκλωμα διέγερσης, είτε -για να αποφύγουμε αυτές τις προσθήκες- μπορεί να κατασκευαστεί με δρομέα μόνιμου μαγνήτη. Όταν μια PMSG είναι εφοδιασμένη με έναν πολύ μεγάλο αριθμό πόλων, τότε το κιβώτιο ταχυτήτων μπορεί να παραλειφθεί. Παρόλα αυτά οι μόνιμοι μαγνήτες, είναι κατασκευασμένοι από υλικά σπάνιων γαιών, όπως το νεοδύμιο, που και αυτά παρουσιάζουν διάφορα προβλήματα. Η διαθεσιμότητα αυτών των υλικών είναι εξαιρετικά σπάνια και, εκτός αυτού, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν ένα ιδιαίτερο πρόβλημα, το οποίο είναι να χάνουν μόνιμα την ένταση του μαγνητικού τους πεδίου όταν εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Οι ανεμογεννήτριες που δεν χρησιμοποιούν γρανάζια εμφανίζουν σημαντικές επιπτώσεις στο σχήμα της ατράκτου. Δεν υπάρχει λόγο να είναι πολύ μακριά, δεδομένου ότι δεν υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων, αλλά δημιουργείται η ανάγκη για μια μεγαλύτερη διάμετρο για να μπορεί να στεγάσει τη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη με τους πολλούς πόλους. Η επιπλέον πολυπλοκότητα των συστημάτων αυτών αυξάνει σημαντικά το κόστος τους, αλλά μειώνει τις απαιτήσεις συντήρησής τους. Η πρώτη εμφάνισή τους στην αγορά ήταν σε πολύ μεγάλες γεννήτριες σε υπεράκτια συστήματα.



**Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ**





### Κεφάλαιο 3: Χαρακτηριστικά Ισχύος του ανέμου.

Θεωρείται ένα <<πακέτο>> αέρα μάζας  $m$  που κινείται με ταχύτητα  $v$ . Η κινητική ενέργειά του ( $KE$ ) δίνεται από τη γνωστή σχέση:

$$KE = \frac{1}{2}mv^2$$

Με δεδομένο ότι η ισχύς είναι η ποσότητα της ενέργειας που παράγεται ή χρησιμοποιείται στη μονάδα του χρόνου, η ισχύς που παράγεται από μια μάζα αέρα που κινείται με ταχύτητα  $v$  διαμέσου από μια επιφάνεια  $A$  θα είναι:

$$A = \frac{\text{Ενέργεια}}{\text{Χρόνος}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\text{Μάζα}}{\text{Χρόνος}} \right) v^2$$

Ο ρυθμός με τον οποίο η μάζα  $m$  περνά μέσα από την επιφάνεια με εμβαδό  $A$  είναι το γινόμενο της πυκνότητας  $\rho$  του αέρα, της ταχύτητας  $v$  και της επιφάνειας  $A$ :

$$\frac{\text{Μάζα μέσω της επιφάνειας } A}{\text{Χρόνος}} = m = \rho Av$$

Συνδυάζοντας της δύο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει μια σημαντική σχέση:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Δουλεύοντας στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) έχουμε:

$P_w$ : ισχύς του ανέμου σε watt

$\rho$ : πυκνότητα του αέρα σε  $\text{kg/m}^3$  η οποία παίρνει την τιμή 1.225 στους 15 °C και 1atm

$A$ : επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής μέσω της οποίας διέρχεται ο αέρας σε  $\text{m}^2$

$v$ : ταχύτητα του ανέμου σε  $\text{m/s}$

Σε αρκετές περιπτώσεις η ισχύς εκφράζεται ανά μονάδα επιφάνειας ( $\text{W/m}^2$ ) και ονομάζεται ειδική ισχύς ή πυκνότητα ισχύος.

Αξιοσημείωτο είναι το εξής σημαντικό, όπως παρατηρούμε στην προηγούμενη εξίσωση, η ισχύς του ανέμου αυξάνει με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό πολύ γρήγορα σημαίνει ότι σε περίπτωση διπλασιασμού της ταχύτητας του ανέμου η ισχύς θα αυξηθεί κατά οκτώ φορές. Από μια άλλη σκοπιά, για να κατανοήσουμε την σημαντικότητα αυτής της λεπτομέρειας, είναι ότι η ενέργεια που παράγεται από ταχύτητες ανέμου της τάξης των 20  $\text{km/h}$  για 1 ώρα είναι ίση με αυτή που παράγεται σε ταχύτητες ανέμου 10  $\text{km/h}$  για 8 ώρες που ακόμα ισούται με εκείνη που παράγεται από ταχύτητα 5  $\text{km/h}$  για 64 ώρες. Γενικά οι περισσότερες ανεμογεννήτριες δεν ξεκινούν να περιστρέφονται σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου χωρίς ωστόσο να έχουν σημαντική απώλεια στο σύνολο της ενέργειας που θα μπορούσαν να παράγουν αν δούλευαν.



Επίσης στην ίδια εξίσωση παρατηρούμε ότι η αιολική ενέργεια είναι ανάλογη με την επιφάνεια σάρωσης του δρομέα της ανεμογεννήτριας, το οποίο μας οδηγεί κατευθείαν στην γνωστή σχέση  $A=(\pi/4)D^2$  (κυρίως για ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα) που συνεπάγεται ότι η αιολική ενέργεια είναι ανάλογη με το τετράγωνο της διαμέτρου της επιφάνειας σάρωσης των πτερυγίων. Είναι φανερό λοιπόν ότι ο διπλασιασμός αυτής της διαμέτρου αυξάνει τη διαθέσιμη ισχύ κατά τέσσερις φορές. Αυτός είναι ο λόγος που οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες είναι αρκετά ακριβότερες από της μικρότερες. Το κόστος μιας ανεμογεννήτριας αυξάνει ανάλογα με τη διάμετρο των πτερυγίων, αλλά η ισχύς είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της διαμέτρου, οπότε οι μεγαλύτερες μηχανές έχουν αποδειχθεί πιο αποδοτικές.

### 3.1 Θερμοκρασία και Υψόμετρο - Διόρθωση της Πυκνότητας Αέρα.

Όταν παρουσιάζονται δεδομένα αιολικής ενέργειας, σχεδόν πάντα θεωρείται ότι η πυκνότητα του αέρα είναι  $1.225 \text{ kg/m}^3$ . Δηλαδή, γίνεται η παραδοχή ότι η θερμοκρασία του αέρα είναι  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $59 \text{ F}$ ) και η πίεση είναι  $1 \text{ atm}$  (στο επίπεδο της θάλασσας). Χρησιμοποιώντας όμως τον νόμο των ιδανικών αερίων, μπορούμε εύκολα, γρήγορα και απλά να βρούμε την πυκνότητα του αέρα κάτω από άλλες συνθήκες.

$$PV = nRT$$

Όπου,

P η απόλυτη πίεση σε atm

V ο όγκος σε  $\text{m}^3$

n η μάζα σε mol

R η παγκόσμια σταθερά των αερίων ( $8.2056 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

T η απόλυτη θερμοκρασία σε K

Εάν συμβολίσουμε με MB το μοριακό βάρος του αερίου (g/mol), μπορούμε να γράψουμε την παρακάτω σχέση για την πυκνότητα του αέρα  $\rho$ :

$$\rho(\text{kg} / \text{m}^3) = \frac{n(\text{mol}) \cdot \text{MB}(\text{g} / \text{mol}) \cdot 10^{-3}(\text{kg} / \text{g})}{V(\text{m}^3)}$$

Με δεδομένο ότι εργαζόμαστε με τον αέρα, μπορούμε να προσδιορίσουμε το ισοδύναμο μοριακό του βάρος κοιτάζοντας τα συστατικά μόρια που τον απαρτίζουν, τα οποία είναι άζωτο (78.08%), οξυγόνο (20.95%), ένα μικρό ποσοστό αργού (0.93%), διοξείδιο του άνθρακα (0.039%), κ.ο.κ. Χρησιμοποιώντας τα μοριακά βάρη των συστατικών ( $\text{N}_2=28.02$ ,  $\text{O}_2=32.00$ ,  $\text{CO}_2=44.01$ ) βρίσκουμε το ισοδύναμο μοριακό βάρος του αέρα:

$$\text{MB}(\text{αέρα}) = 0.781 \times 28.02 + 0.2095 \times 32.00 + 0.0093 \times 39.95 + 0.00039 \times 44.01 = 28.97$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω εξισώσεις με την τιμή του μοριακού βάρους του αέρα που βρήκαμε, καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση



$$\rho = \frac{p \times MB}{RT} = \frac{p(atm)}{T(K)} \times \frac{28.97 g/mol \times 10^{-3} kg/g}{8.2056 \times 10^{-5} m^3 \cdot atm/(K \cdot mol)}$$

$$\rho(kg/m^3) = \frac{353.1 p(atm)}{T(K)}$$

Για παράδειγμα, σε 1 atm και 30 C, η πυκνότητα του αέρα είναι

$$\rho = \frac{353.1 \times 1}{30 + 273.15} = 1.165 kg/m^3$$

η οποία έχει υποστεί μια μείωση 5% σε σχέση με την πυκνότητα αναφοράς των 1.225 kg/m<sup>3</sup>. Επειδή η ισχύς είναι ανάλογη προς την πυκνότητα, έχει επίσης υποστεί μια μείωση 5% η ισχύς του ανέμου.

Η πυκνότητα του αέρα, και κατά συνέπεια η ισχύς του ανέμου, εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση καθώς επίσης και από την θερμοκρασία. Αφού η πίεση του αέρα είναι συναρτήσεως του υψόμετρου, είναι χρήσιμο να έχουμε έναν παράγοντα διόρθωσης για να μας διευκολύνει στην εκτίμηση της αιολικής ενέργειας σε περιοχές ψιλότερα από την επιφάνεια της θάλασσας.

### 3.2 Επίδραση του Ύψους του Πύργου.

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου, η οικονομική επίπτωση ακόμα και σε μικρές αυξήσεις στην ταχύτητα του ανέμου μπορεί να είναι σημαντική. Ένας απλός τρόπος για να επιτύχουμε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου είναι να τοποθετήσουμε την ανεμογεννήτρια σε έναν ψηλότερο πύργο. Σε ύψη μερικών εκατοντάδων μέτρων από το έδαφος ο αέρας επιβαρύνεται από την τριβή του με την επιφάνεια της γης (όπως γνωρίζουμε από την μηχανική των ρευστών για ροή αέρα πάνω από μια επιφάνεια δημιουργείτε ένα οριακό στρώμα που στην ουσία επιβραδύνει τον αέρα μέχρι κάποιο ύψος όπου ο αέρας μένει ανεπηρέαστος, όσο πιο τραχιά είναι η επιφάνεια τόσο μεγαλύτερο είναι το οριακό στρώμα και άρα και η επιβράδυνση του αέρα). Λείες επιφάνειες, όπως η επιφάνεια της θάλασσα, δεν προσδίδουν μεγάλη αντίσταση και η μεταβολή της ταχύτητας με το υψόμετρο είναι αρκετά μικρότερη. Στην άλλη ακραία περίπτωση, οι άνεμοι στην επιφάνεια ενός δάσους ή μίας πόλης επιβραδύνονται σημαντικά από ψηλά εμπόδια.

Μία σχέση που είναι χρήσιμη και χρησιμοποιείτε συχνά για να βρούμε το μέγεθος της επίδρασης της ταχύτητας λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας είναι η παρακάτω:

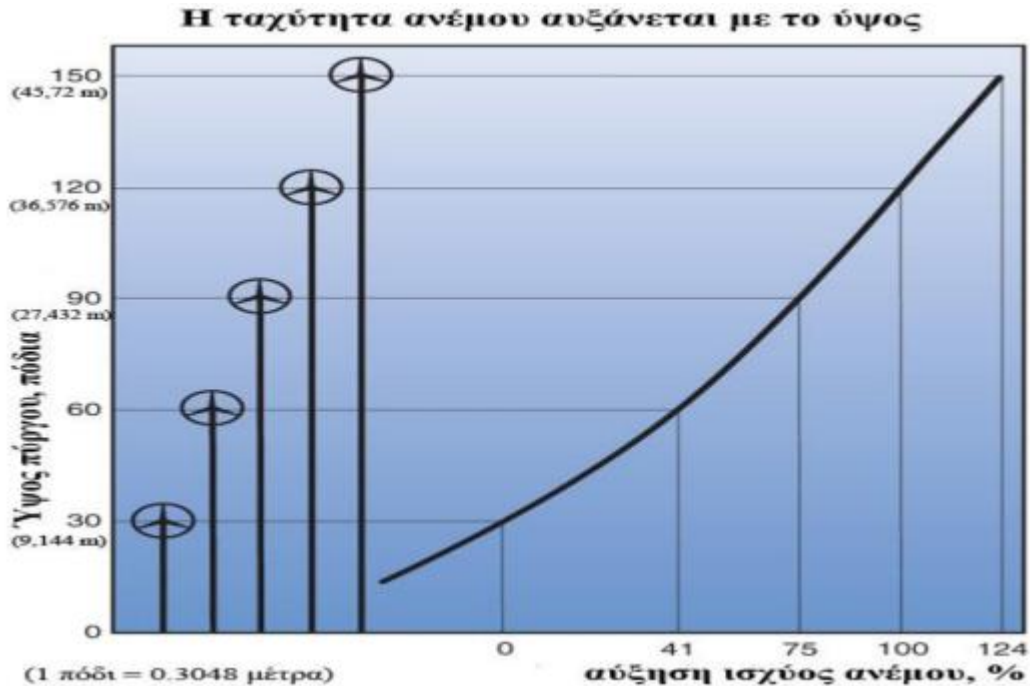
$$\frac{v}{v_0} = \left( \frac{H}{H_0} \right)^a$$

Όπου,

v η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H

v<sub>0</sub> η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H<sub>0</sub> (συνήθως χρησιμοποιείτε ένα ύψος αναφοράς 10m)

a ο συντελεστής τριβής



Εικόνα 8 Κατηγοριοποίηση συστημάτων αιολικής ενέργειας.

Ο συντελεστής τριβής  $\alpha$  είναι μια συνάρτηση του εδάφους πάνω στο οποίο «τρέχει» ο άνεμος. Συνηθέστερα, για προσεγγιστικούς υπολογισμούς σε κάπως ανοιχτά εδάφη, μια τιμή  $1/7$  (ο κανόνας του ενός εβδόμου) χρησιμοποιείται για τον  $\alpha$ .

Η εξίσωση που αναφέρθηκε νωρίτερα συνηθέστερα χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ, στην Ευρώπη υπάρχει μια εναλλακτική διατύπωση η οποία είναι:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\ln(H/l)}{\ln(H_0/l)}$$

Όπου,  $l$  το ονομαζόμενο μήκος τραχύτητας

Η εξίσωση αυτή προτιμάται έναντι της πρώτης διότι έχει μια θεωρητική βάση αεροδυναμικής. Όταν η ατμόσφαιρα είναι θερμικά ουδέτερη (δηλαδή, ψύχεται με ρυθμό  $-9.8 \text{ C/km}$ ), η ροή του αέρα μέσα στο οριακό στρώμα θεωρητικά μεταβάλλεται λογαριθμικά, ξεκινώντας με μηδενική ταχύτητα ανέμου σε μια απόσταση πάνω από το έδαφος ίση με το μήκος τραχύτητας. Προφανώς, τόσο ο εκθετικός όσο και η λογαριθμική εκδοχή μας δίνουν μόνο μια πρώτη προσέγγιση για τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με το υψόμετρο έτσι ώστε να είναι δυνατό μια προμελέτη. Στην πραγματικότητα, τίποτα δεν είναι καλύτερο από τις πραγματικές μετρήσεις της περιοχής.

Με δεδομένο ότι η ισχύς του ανέμου μεταβάλλεται με τον κύβο της ταχύτητας του, μπορούμε να ξαναγράψουμε την εκθετική εξίσωση για να δείξουμε τη σχετική ισχύ του ανέμου στο ύψος  $H$  σε σχέση με την ισχύ στο ύψος αναφοράς  $H_0$ .

$$\frac{P}{P_0} = \left( \frac{1/2 \rho A v^3}{1/2 \rho A v_0^3} \right) = \left( \frac{v}{v_0} \right)^3 = \left( \frac{H}{H_0} \right)^{3\alpha}$$



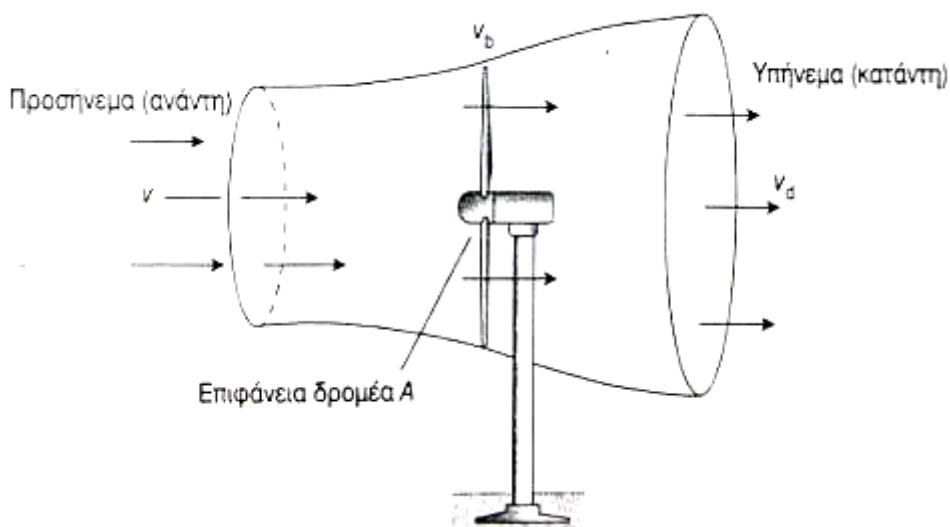
Η αιολική ισχύς σε άλλα υψόμετρα σε σχέση με εκείνη στα 10m δείχνει τη δραματική επίδραση της εκθετικής σχέσης μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της ισχύος. Ακόμη και για μια ομαλή επιφάνεια του εδάφους, για παράδειγμα, για μια υπεράκτια περιοχή, η ισχύς διπλασιάζεται όταν το ύψος αυξάνεται από τα 10 στα 100m. Για μια τραχιά επιφάνεια με συντελεστή τριβής  $\alpha=0.3$ , η ισχύς οκταπλασιάζεται στα 100m.

### 3.3 Καμπύλες Ισχύος Ανεμογεννήτριας.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες της μηχανές έχουμε μια σειρά από θεμελιώδεις περιορισμούς που μας περιορίζουν την μέγιστη απόδοση μετατροπής μιας μορφής ενέργειας σε μία άλλη. Για παράδειγμα, στις θερμικές μηχανές έχουμε την απόδοση Carnot που μας δείχνει το μέγιστο έργο που μπορούμε να πάρουμε από μια μηχανή που δουλεύει μεταξύ μιας θερμής και μιας ψυχρής δεξαμενής. Για τα φωτοβολταϊκά είναι το ενεργειακό διάκενο των στοιχείων του υλικού, για τις κυψέλες καυσίμου είναι η ελεύθερη ενέργεια του Gibbs. Παρακάτω θα γίνει μια διερεύνηση για τον αντίστοιχο περιορισμό στις ανεμογεννήτριες δηλαδή στο να μετατρέψει την κινητική ενέργεια σε μηχανική.

### 3.4 Το Όριο του Betz.

Η πρώτη διατύπωση της σχέσης για τον υπολογισμό της μέγιστης ισχύος που μια ανεμογεννήτρια μπορεί να εκμεταλλευτεί από τον άνεμο δόθηκε από τον Γερμανό φυσικό, τον Albert Betz, ο οποίος διατύπωσε για πρώτη φορά τη σχέση το 1919. Ξεκινάμε την ανάλυση σκεφτόμενοι το τι συμβαίνει στον άνεμο καθώς περνά μέσα από τον δρομέα της ανεμογεννήτριας. Ο άνεμος πλησιάζει από την αριστερή πλευρά και η ταχύτητα του μειώνεται λόγω του ότι ένα μέρος της κινητικής ενέργειάς του αφαιρείται από τη γεννήτρια. Ο άνεμος πίσω από την ανεμογεννήτρια (κατάντη) έχει χαμηλότερη ταχύτητα και πίεση, γι' αυτό και διαστέλλεται. Αν σχεδιάσουμε το περίγραμμα γύρο από τη μάζα του αέρα που περνά μέσα από την ανεμογεννήτρια, δημιουργείται ο επονομαζόμενος σωλήνας ροής.



Εικόνα 9 Σχεδιαστική απεικόνιση του σωλήνα ροής.



Με βάση αυτήν την αρχική ανάλυση δημιουργείται αμέσως το ερώτημα γιατί η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί όλη την κινητική ενέργεια του ανέμου. Αν συνέβαινε αυτό ο αέρας πίσω από την ανεμογεννήτρια θα έπρεπε να έρθει σε πλήρη ακινησία με αποτέλεσμα να μην μπορεί να πάει πουθενά αποτρέποντας έτσι νέο αέρα να περάσει μέσα από τον δρομέα. Οπότε καταλήγουμε ότι η κατάντη ταχύτητα δεν μπορεί να είναι μηδέν και επίσης δεν θα ήταν λογικό να είναι ίδια με την ανάντη ταχύτητα, διότι αυτό θα σήμαινε ότι από την ανεμογεννήτρια δεν παράγεται καθόλου ενέργεια από τον άνεμο. Άρα, πρέπει να υπάρχει ένα ιδανικό σημείο επιβράδυνσης του ανέμου που θα μας οδηγήσει σε εξαγωγή της μέγιστης ισχύος από την ανεμογεννήτρια. Ο Betz έδειξε ότι το ιδανικό για μια ανεμογεννήτρια είναι να επιβραδύνει τον άνεμο στο ένα τρίτο της αρχικής του ταχύτητας.

$$P_b = \frac{1}{2} m(v^2 - v_d^2)$$

Όπου,

$P_b$  η ισχύς που εξάγεται από τα πτερύγια και είναι ίση με τη διαφορά της κινητικής ενέργειας μεταξύ της ανάντης και της κατάντης ροής του αέρα

$m$  ρυθμός ροής της μάζας του αέρα μέσα στον σωλήνα ροής που είναι παντού ο ίδιος

$v$  η ανάντη ταχύτητα του αδιατάρακτου ανέμου

$v_b$  η ταχύτητα του ανέμου διά μέσου των πτερυγίων του δρομέα

Το ευκολότερο σημείο για να προσδιορίσουμε το ρυθμό ροής της μάζας  $m$  είναι στο επίπεδο του δρομέα, όπου γνωρίζουμε ότι το εμβαδόν της διατομής είναι μόνο η επιφάνεια σάρωσης  $A$  του δρομέα. Ο ρυθμός ροής της μάζας είναι:

$$m = \rho A v_b$$

Αν κάνουμε τώρα την παραδοχή ότι η ταχύτητα του ανέμου μέσα από το επίπεδο του δρομέα είναι απλώς ο μέσος όρος της υπήνεμης και της προσήνεμης ταχύτητας (ο νόμος του Betz δείχνει πραγματικά ότι αυτό είναι αλήθεια), τότε με ευκολία μπορούμε να γράψουμε:

$$P_b = \frac{1}{2} \rho A \left( \frac{v + v_d}{2} \right) (v^2 - v_d^2)$$

Για διευκόλυνση στις πράξεις ορίζουμε τον λόγο της κατάντης προς την ανάντη ταχύτητα ως  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{v_d}{v}$$

Κάνοντας αντικατάσταση προκύπτει:



$$P_b = \frac{1}{2} \rho A \left( \frac{v + \lambda v}{2} \right) (v^2 - \lambda^2 v^2) = \frac{1}{2} \rho A v^3 \times \left[ \frac{1}{2} (1 + \lambda) (1 - \lambda^2) \right]$$

Από την τελευταία εξίσωση προκύπτει ότι η ισχύς που εξάγεται από τον άνεμο είναι ίση με την ανάντη ισχύ του ανέμου επί το περιεχόμενο της αγκύλης. Το περιεχόμενο της αγκύλης είναι επομένως το ποσοστό της ισχύος του ανέμου που εξάγεται από τα πτερύγια, το οποίο ονομάζεται απόδοση του δρομέα και συνήθως ορίζεται ως  $C_p$ .

$$\text{Απόδοση δρομέα} = C_p = \frac{1}{2} (1 + \lambda) (1 - \lambda^2)$$

Άρα, η θεμελιώδης σχέση για την ισχύ που μεταφέρεται από τον δρομέα μετατρέπεται:

$$P_b = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot C_p$$

Εάν θέλουμε να βρούμε τη μέγιστη δυνατή απόδοση του δρομέα, απλά παίρνουμε την παράγωγο της τελευταίας εξίσωσης σε σχέση με το  $\lambda$  και το θέτουμε ίσο με το μηδέν:

$$\begin{aligned} \frac{dC_p}{d\lambda} &= \frac{1}{2} [(1 + \lambda)(-2\lambda) + (1 - \lambda^2)] = \frac{1}{2} [(1 + \lambda)(-2\lambda) + (1 + \lambda)(1 - \lambda)] \\ &= \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - 3\lambda) = 0 \end{aligned}$$

$$\text{Και καταλήγουμε: } \lambda = \frac{v_d}{v} = \frac{1}{3}$$

Με άλλα λόγια, η απόδοση των πτερυγίων θα είναι μέγιστη, αν ο άνεμος επιβραδυνθεί στο ένα τρίτο της αδιατάρακτης ανάντη ταχύτητας.

Τώρα αντικαθιστώντας το  $\lambda=1/3$  στην σχέση για την απόδοση του δρομέα βρίσκουμε την θεωρητικά μέγιστη απόδοση των πτερυγίων:

$$\text{Μέγιστη απόδοση πτερυγίων} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{3} \right) \left( 1 - \frac{1}{3^2} \right) = \frac{16}{27} = 0.5926 \approx 59.3\%$$

Το αποτέλεσμα αυτό, δηλαδή ότι η μέγιστη απόδοση του δρομέα είναι 59,3%, ονομάζεται όριο του Betz. Το ερώτημα που γενάτε τώρα είναι πόσο κοντά στο όριο αυτό είναι οι σύγχρονοι δρομείς των ανεμογεννητριών. Υπό ιδανικές συνθήκες λειτουργίας, μπορούν να φτάσουν στο 80% αυτού του ορίου, το οποίο μας δίνει εύρος απόδοσης περίπου 45%-50% στη μετατροπή της ισχύος του ανέμου σε ισχύ στον περιστρεφόμενο άξονα της γεννήτριας.



Για μία συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου, η απόδοση του δρομέα είναι συνάρτηση του ρυθμού με τον οποίο περιστρέφεται ο δρομέας. Αν ο δρομέας στρέφεται πολύ αργά, η απόδοση μειώνεται, διότι τα πτερύγια αφήνουν πάρα πολύ αέρα να περάσει ανεκμετάλλευτος. Στην αντίθετη περίπτωση αν ο δρομέας περιστρέφεται πολύ γρήγορα, η απόδοση μειώνεται, καθώς η διαταραχή που προκαλείται από ένα πτερύγιο επηρεάζει όλο και περισσότερο το πτερύγιο που ακολουθεί. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για να απεικονίσουμε την απόδοση του δρομέα είναι να την παρουσιάσουμε ως μια συνάρτηση του λόγου της ταχύτητας ακροπτερυγίου (tip speed ratio- TSR). Ο TSR είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται το εξωτερικό άκρο του πτερυγίου διαιρούμενη με την ταχύτητα του ανέμου:

Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου

$$(TSR) = \frac{\text{Ταχύτητα ακροπτερυγίου}}{\text{Προσήμετη ταχύτητα ανέμου}} = \frac{rpm \times \pi D}{60v}$$

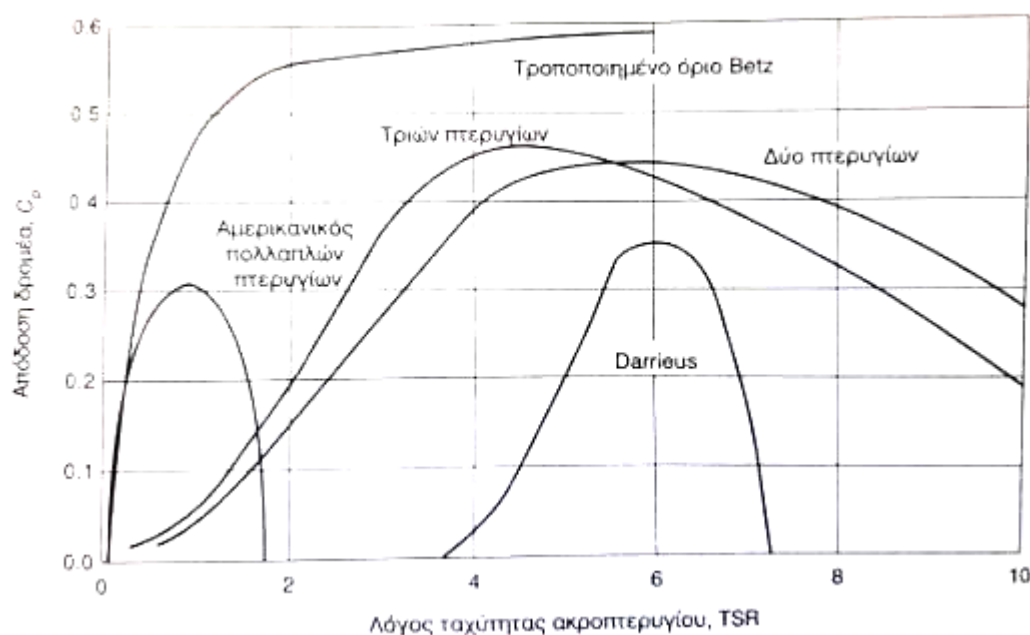
Όπου,

rpm οι στροφές ανά λεπτό του δρομέα

D η διάμετρος του δρομέα (m)

v η ανάντη ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Ένα διάγραμμα της ιδανικής απόδοσης του δρομέα για διαφόρους τύπους δρομέα ως συνάρτηση του TSR φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Οι δρομείς με πολλά πτερύγια περιστρέφονται σχετικά αργά, με βέλτιστο TSR περίπου 1.0 και μέγιστη απόδοση μόλις πάνω από 30%. Οι δρομείς με δύο και τρία πτερύγια περιστρέφονται πολύ πιο γρήγορα, με βέλτιστο εύρος TSR 4-6 και μέγιστη απόδοση περίπου 40%-50%. Επίσης φαίνεται μια καμπύλη που αντιστοιχεί στο όριο Betz τροποποιημένη, για να ληφθούν υπόψη οι στροβιλισμοί (τύρβες) που τα πτερύγια δημιουργούν στον αέρα, τις οποίες ο Betz δεν λαμβάνει υπόψη, καθώς επίσης το γεγονός ότι ένας αργά περιστρεφόμενος δρομέας δεν συλλαμβάνει όλο τον άνεμο, κάτι το οποίο μειώνει τη μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα κάτω από το όριο Betz.



Εικόνα 10 Καμπύλες απόδοσης για διάφορους αριθμούς πτερυγίων.

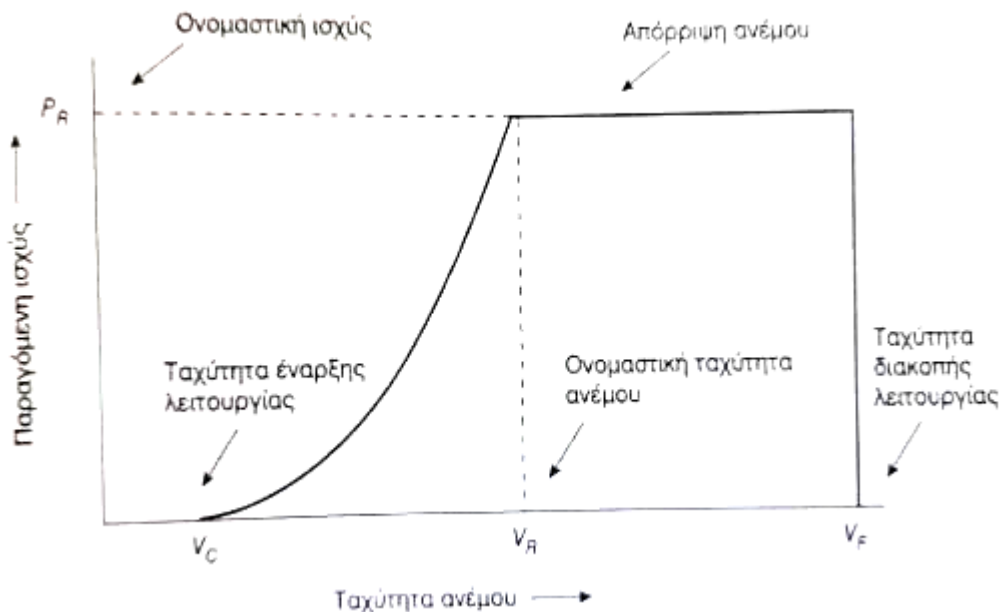




Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες λειτουργούν καλύτερα όταν το TSR τους είναι στο εύρος 4-6, δηλαδή όταν η άκρη του πτερυγίου τους κινείται τέσσερις έως έξι φορές γρηγορότερα από την ταχύτητα του ανέμου. Στην ιδανική περίπτωση, για μέγιστη απόδοση, τα πτερύγια θα πρέπει να αλλάζουν την ταχύτητά τους καθώς αλλάζει η ταχύτητα του ανέμου, και για αυτό τον λόγο οι γεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας είναι αποδοτικότερες.

### 3.5 Ιδεατή Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας.

Μια βασική πληροφορία που δίνουν οι κατασκευαστές για τις ανεμογεννήτριές τους είναι ένα γράφημα που δείχνει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της ηλεκτρικής ισχύος που αναμένεται από το πλήρες σύστημα, συμπεριλαμβανομένων των πτερυγίων, του κιβωτίου ταχυτήτων και της γεννήτριας. Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας ή αποκοπής (cut-in-wind speed): Όταν έχουμε ανέμους με χαμηλή ταχύτητα το πιο πιθανόν είναι να μην έχουν αρκετή ισχύ για να ξεπεράσουν τις τριβές στο σύστημα κίνησης της ανεμογεννήτριας και, ακόμη αν αυτό συμβεί και η γεννήτρια περιστρέφεται, η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται μπορεί να μην είναι αρκετή για να αντισταθμίσει την ισχύ που απαιτείται από τις περιελίξεις πεδίου της γεννήτριας. Η ταχύτητα έναρξης παραγωγής  $V_c$  είναι η ελάχιστη ταχύτητα που απαιτείται για την παραγωγή <<καθαρής>> ηλεκτρικής ισχύος. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει ενέργεια που παράγεται σε ταχύτητες ανέμου κάτω από την  $V_c$ , αυτό το μέρος της ενέργειας του ανέμου δεν το εκμεταλλεύεται η ανεμογεννήτρια. Ευτυχώς, δεν υπάρχει πολλή ενέργεια σε αυτές τις χαμηλές ταχύτητες του ανέμου ούτως ή άλλως, οπότε δεν χάνεται πολλή ενέργεια.



Εικόνα 11 Ιδεατή καμπύλη ισχύος. Σημεία εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας.

Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (rated wind speed): Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται και περνώντας την ταχύτητα έναρξης παραγωγής, η ισχύς που παρέχεται από την γεννήτρια αυξάνεται με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου, όπως φαίνεται στην



ιδανική καμπύλη ισχύος. Όταν η ταχύτητα του ανέμου φθάσει στην ονομαστική ταχύτητα  $V_R$ , η γεννήτρια παρέχει τόση ισχύ όση έχει σχεδιαστεί για να παρέχει (ονομαστική ισχύς). Πάνω από την  $V_R$  πρέπει να υπάρχει κάποιος τρόπος απόρριψης της πλεονάζουσας ισχύος του ανέμου, αλλιώς η γεννήτρια μπορεί να υποστεί ζημιά.

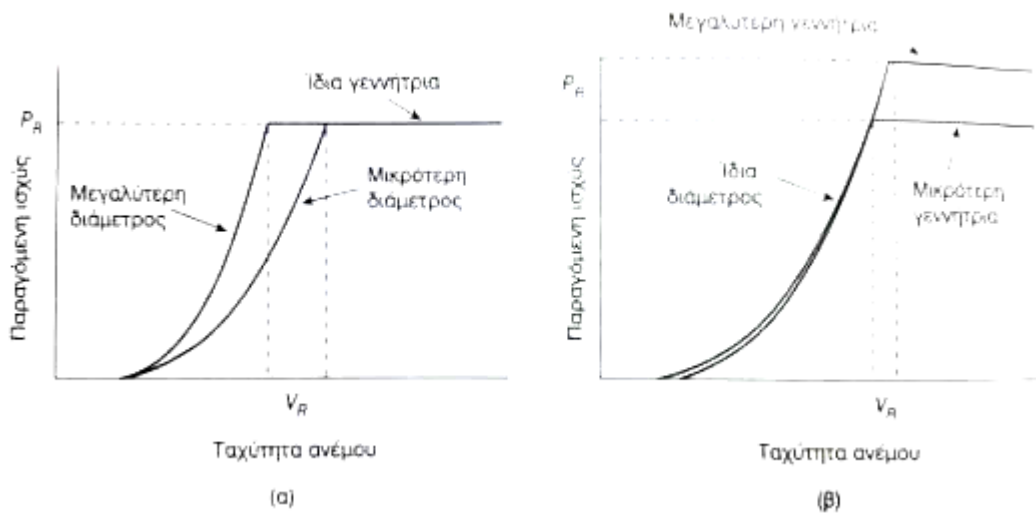
Για ανεμογεννήτριες με έλεγχο ισχύος με μεταβολή του βήματος των πτερυγίων (pitch-controlled turbines), ένα υδραυλικό σύστημα περιστρέφει αργά τα πτερύγια γύρω από τους άξονές τους, γυρίζοντας τα λίγες μοίρες για να μειώσουν ή να αυξήσουν την απόδοσή τους όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν. Ο στόχος της μεθόδου αυτής είναι να μειωθεί η γωνία πρόσπτωσης των πτερυγίων όταν οι άνεμοι είναι υψηλοί. Για μηχανές με παθητικό έλεγχο ισχύος με απώλεια στήριξης (passive stall-controlled machines), τα πτερύγια έχουν σχεδιαστεί προσεκτικά για να μειώνουν αυτόματα την απόδοσή τους όταν οι άνεμοι είναι υψηλοί. Τέλος, με το ενεργητικό σύστημα ελέγχου ισχύος απώλειας στήριξης (active stall-controlled machines), τα πτερύγια περιστρέφονται ακριβώς όπως κάνουν με την προσέγγιση του ελέγχου βήματος, αλλά αντί να μειώσουν την γωνία πρόσπτωσης των πτερυγίων σε ισχυρούς ανέμους την αυξάνουν για να ενισχύσουν την απώλεια στήριξης (stall).

Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας (cut-out or furling wind speed): Σε κάποιο σημείο, ο άνεμος είναι τόσο ισχυρός που υπάρχει μεγάλος κίνδυνος καταστροφής της ανεμογεννήτριας. Σε αυτή την ταχύτητα του ανέμου  $V_F$ , που ονομάζεται ταχύτητα διακοπής λειτουργίας ('furling' wind speed), η μηχανή θα πρέπει να τερματίσει τη λειτουργία της. Πάνω από την  $V_F$ , τα μηχανικά φρένα κλειδώνουν τον άξονα του δρομέα στη θέση του, έτσι ώστε η ισχύς εξόδου να είναι μηδενική.

### 3.6 Καμπύλες Πραγματικής Ισχύος.

Η ιδεατή καμπύλη ισχύος παρέχει ένα εργαλείο με το οποίο μπορούν να εξεταστούν διάφοροι συνδυασμοί μεταξύ της διαμέτρου του δρομέα και του μεγέθους της γεννήτριας ως τρόποι για να αυξηθεί η ενέργεια που παρέχεται από μια ανεμογεννήτρια. Αυξάνοντας τη διάμετρο του δρομέα και κρατώντας την ίδια ηλεκτρική γεννήτρια, η καμπύλη ισχύος μετατοπίζεται προς τα αριστερά, με αποτέλεσμα η ονομαστική ισχύς να επιτυγχάνεται σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου. Η μέθοδος αυτή αυξάνει την ισχύ εξόδου για χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου. Από την άλλη μεριά, διατηρώντας τον ίδιο δρομέα αλλά αυξάνοντας το μέγεθος της ηλεκτρικής γεννήτριας επιτρέπουμε στην καμπύλη ισχύος να συνεχίσει την ανοδική της πορεία μέχρι μια νέα ονομαστική ισχύ. Για μικρές ταχύτητες ανέμου, δεν υπάρχει μεγάλη αλλαγή, αλλά σε μια περιοχή με υψηλές ταχύτητες ανέμου, η αύξηση της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας είναι μια καλή στρατηγική.

Οι κατασκευαστές συνήθως προσφέρουν μια ποικιλία από ανεμογεννήτριες με διάφορες διαμέτρους δρομέα και διαφορετικά μεγέθη γεννητριών έτσι ώστε οι πελάτες να μπορούν να επιλέξουν την κατάλληλη για να ταιριάξουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου με την κατάλληλη μηχανή. Σε περιοχές με σχετικά χαμηλές ταχύτητες ανέμου συχνά χρησιμοποιούμε ανεμογεννήτριες με μεγαλύτερη διάμετρο δρομέα. Σε περιοχές με σχετικά υψηλές ταχύτητες ανέμου, είναι καλύτερο να αυξηθεί το μέγεθος της γεννήτριας.



Εικόνα 12 (α) Αύξηση της διαμέτρου του δρομέα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ισχύς σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου (β) Αύξηση του μεγέθους της γεννήτριας με αποτέλεσμα αύξηση της ισχύος σε υψηλότερες ταχύτητες.



**Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ**



## Κεφάλαιο 4 : Θέση εγκατάστασης αιολικού πάρκου.

Οι κύριοι παράγοντες για την επιλογή της θέσης εγκατάστασης ενός συστήματος ανεμογεννητριών είναι οι ακόλουθοι:

- Αιολικό δυναμικό. Όσο καλύτερη γνώση της συμπεριφοράς του ανέμου (ένταση, διακυμάνσεις σε ταχύτητα και διεύθυνση, ριπές).
- Η εγκατάσταση να μην επηρεάζει αρνητικά το περιβάλλον. Η επιλογή της θέσης να γίνεται σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς όρους.
- Η λειτουργία του συστήματος να είναι συμβατή (εγγύτητα, διασύνδεση) με τη λειτουργία του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου.
- Να έχουν ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή της θέσης εγκατάστασης τα πιθανά ακραία καιρικά φαινόμενα (πάγος, θυελλώδεις άνεμοι, έντονος κυματισμός κ.λπ.). Ο πάγος συγκεκριμένα καθώς επικάθεται στις κατασκευές αυξάνει σημαντικά τα στατικά και δυναμικά φορτία με αποτέλεσμα όλα τα συστήματα της ανεμογεννήτριας και οι γραμμές μεταφοράς να πρέπει να έχουν υπολογιστεί ώστε να αντέχουν. Επίσης, όταν επικάθονται μεγάλες ποσότητες πάγου στα πτερύγια υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εκτοξευθεί κάποιο κομμάτι πάγου καθώς τα πτερύγια περιστρέφονται. Το αποτέλεσμα όλων αυτών είναι όταν υπάρχει πάγος η ανεμογεννήτρια να σταματά για να καθαριστεί το οποίο έχει μεγάλη επίπτωση στην παραγωγή ενέργειας ιδίως όταν αυτή ή αυτές είναι σε περιοχή που αποκλείονται συχνά από το χιόνι.

### 4.1 Μορφολογία εδάφους.

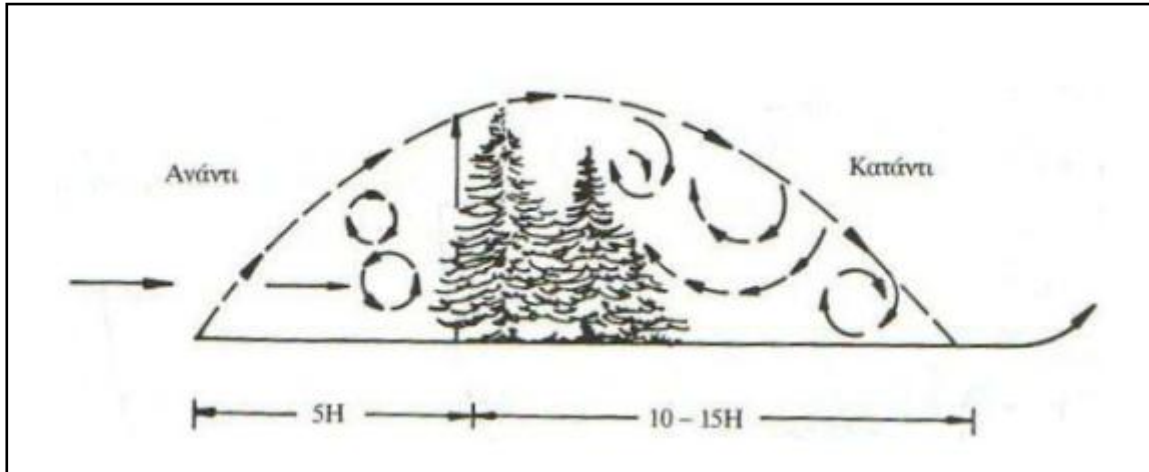
Η θέση εγκατάστασης είναι κρίσιμη για την αποδοτική λειτουργία ενός συστήματος ανεμογεννητριών. Είναι συχνό φαινόμενο η μη καλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας αν και έχει εγκατασταθεί σε περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό. Αυτό γίνεται γιατί τις περισσότερες από τις φορές η ανεμογεννήτρια λειτουργεί κάτω από έντονο μεταβαλλόμενο πεδίο ροής λόγω της υψηλής τύρβης που επικρατεί στην περιοχή. Η τύρβη οφείλεται στην ύπαρξη μεμονωμένων κτηρίων ή άλλων εμπόδιων αλλά και από την τραχύτητα του εδάφους. Ο σχεδιαστής λοιπόν πρέπει να γνωρίζει ορισμένες αρχές που ισχύουν ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους.

Οι δύο μορφολογικές κατηγορίες εδάφους που πρέπει να μελετηθεί μια εγκατάσταση είναι οι εξής:

- Η μορφολογία του εδάφους να είναι επίπεδη (επίπεδο έδαφος ή θάλασσα)
- Η μορφολογία του εδάφους να είναι ανώμαλη (λόφοι, βουνά, υψίπεδα, διάσελα)

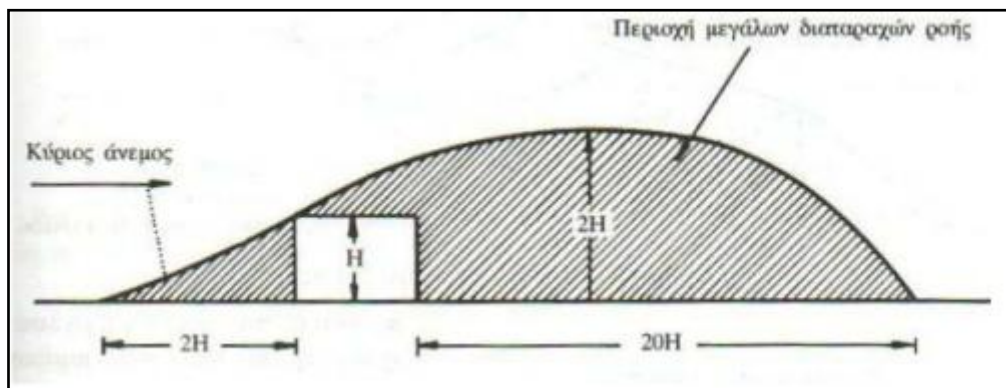
#### 4.1.1 Επίπεδη επιφάνεια εδάφους.

Στην περίπτωση αυτή πρέπει να ελέγξουμε την ύπαρξη τυχόν ανεμοφρακτών οι οποίοι «προστατεύουν» από τους δυνατούς ανέμους που επικρατούν. Τέτοιοι είναι τα δέντρα των οποίων η παρουσία τους έχει ως αποτέλεσμα σχεδόν τον μηδενισμό της ταχύτητας του ανέμου μέχρι και το ύψος της κορυφή τους, ενώ το οριακό στρώμα φαίνεται να αναπτύσσεται από το ύψος της κορυφής τους και κατόπιν όπως φαίνεται παρακάτω στην εικόνα.

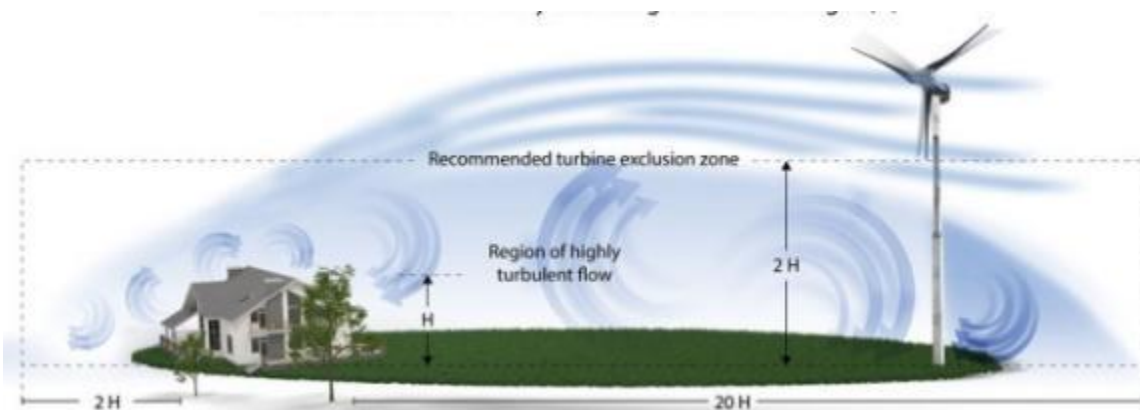


Εικόνα 13 Επίπεδο έδαφος με δέντρα για εμπόδια.

Αλλα τέτοιοι εμπόδια μπορεί να είναι κτήρια τα όποια αποτελούν και αυτά αποτελούν ένα είδος εμπόδιων καθώς η παρουσία τους διαταράσσει σε σημαντική έκταση το πεδίο ροής του ανέμου.



Εικόνα 14 Επίπεδο έδαφος με κτίριο για εμπόδιο.



Εικόνα 15 Απεικόνιση ροής αέρα σε επίπεδο εδάφους με κτίριο και δέντρα για εμπόδια.



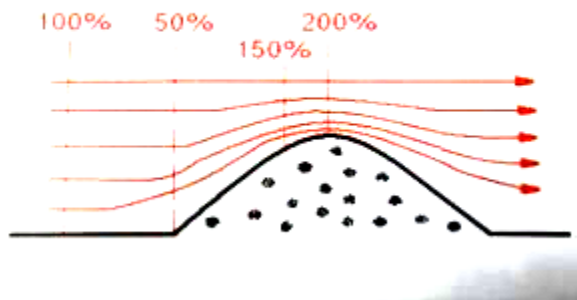
#### 4.1.2 Ανώμαλη επιφάνεια εδάφους.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν υπάρχει σαφής τρόπος εξέτασης του εδάφους επειδή κάθε περίπτωση είναι ξεχωριστή. Ο τρόπος για να ξεπεράσουμε το πρόβλημα αυτό είναι η δημιουργία ανάγλυφου της περιοχής μέσα σε αεροδυναμική σήραγγα ή με εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων μέσω υπολογιστών.

Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες συγκεκριμένες τοπογραφικές κατηγορίες σε αυτή την μορφολογία του εδάφους που συναντάτε συχνά και μπορούν να τυποποιηθούν και να χρησιμοποιηθούν ως κατευθυντήρια γραμμή. Αυτές είναι:

##### 1. Λόφοι-βουνά

Η μορφολογία του εδάφους που περιλαμβάνει μια σειρά από λόφους σχηματίζει μια επιμήκης σειρά. Τότε εάν ο άνεμος έχει κάθετη κατεύθυνση προς την επιμήκη σειρά από λόφους αναγκάζεται να περάσει από πάνω με αποτέλεσμα την επιτάχυνση του (σαν να περνάει μέσα από ακροφύσιο) αφού δεν μπορεί να περάσει από τα πλάγια όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Επίσης στο σχήμα απεικονίζεται και η επιτάχυνση του ανέμου, όπου στην κορυφή έχουμε διπλασιασμό της ταχύτητας το οποίο συνεπάγεται περίπου οκταπλασιασμό της αποδιδόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια. Εάν ο άνεμος δεν φυσάει στην κάθετη κατεύθυνση αντί να περάσει από πάνω, θα περάσει κυρίως από τα πλάγια. Αποτελέσματα μελετών έδειξαν ότι η ιδανική λοφοσειρά είναι αυτή που παρουσιάζει κλίση  $16^\circ$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ενώ λιγότερο ικανοποιητική με πολύ μικρή κλίση των  $3^\circ$ . Σε χώρες όπως η Ελλάδα, με έντονο ανάγλυφο τα αιολικά πάρκα στήνονται κατά κύριο λόγο σε κορυφογραμμές και λίγο πριν από αυτές προς την μεριά που πνέουν οι άνεμοι. Μελέτες επίσης έδειξαν ότι κατάλληλα μέρη για την εγκατάσταση συστήματος ανεμογεννητριών είναι η επιμήκης σειρά από λόφους ύψους 100-600μ και διεύθυνση άξονα παράλληλη προς αυτή της ακτογραμμής.



Εικόνα 16 Κατανομή ταχύτητας πάνω από λόφο.

##### 2. Υψίπεδα

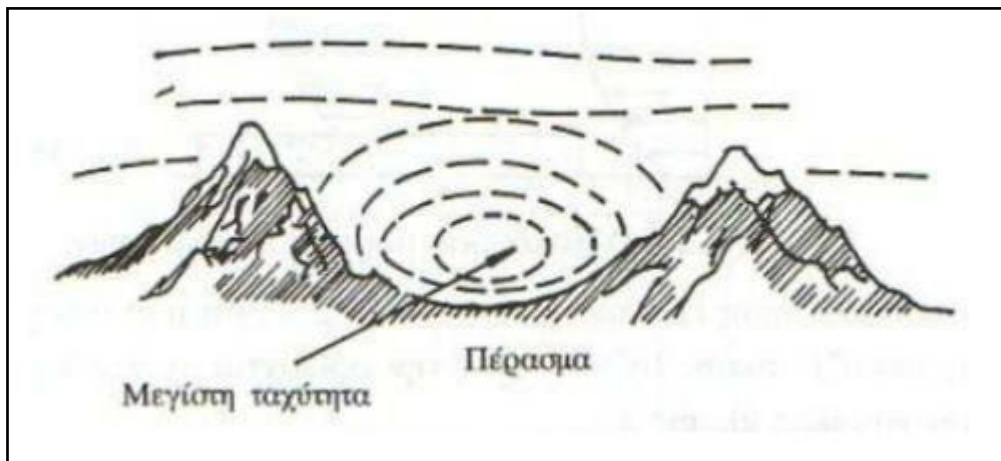
Παρόλο που τα υψίπεδα παρέχουν καλύτερες συνθήκες στην κατασκευή της εγκατάστασης ενός αιολικού συστήματος, δεν είναι κατάλληλα όσο αναφορά το αιολικό δυναμικό. Η μείωση της ταχύτητας είναι αρκετά μεγάλη και για να ξεπεράσουμε το πρόβλημα αυτό πρέπει να βάλουμε μια ανεμογεννήτρια με πάρα πολύ ψηλό πυλώνα για να δέχεται ο ρότορας «καθαρό» αέρα.



Εικόνα 17 Κατανομή ταχύτητας πάνω από υψίπεδο.

### 3. Διάσελα.

Πολύ καλή θέση για τοποθέτηση ανεμοκινητήρων είναι τα περάσματα και τα διάσελα ειδικά αν η ροή του ανέμου είναι τέτοια ώστε να διέρχεται μέσα από το άνοιγμα. Οι θέσεις αυτές είναι εύκολες ως προς την πρόσβαση τους και προσφέρουν ιδανικές υψηλές ταχύτητες ανέμου. Οι θέσεις αυτές αρχικά εξετάζονται για το αν είναι δυνατή η τοποθέτηση του ανεμοκινητήρα και στην συνέχεια στο εργαστήριο γίνεται λεπτομερής μελέτη σε ομοίωμα μέσα σε αεροδυναμική σήραγγα. Όσο πιο ψηλά είναι τα βουνά που δημιουργούν το πέρασμα τόσο πιο ευνοϊκή είναι η θέση και όσο πιο ομαλή είναι η επιφάνεια του εδάφους του περάσματος τόσο καλύτερη είναι η ενεργειακή απόδοση του ανεμοκινητήρα.



Εικόνα 18 Περιοχή μέγιστης ταχύτητας σε διάσελο.





## Κεφάλαιο 5: Ταξινόμηση Αιολικών Πάρκων IEC.

Οι προδιαγραφές των ανεμογεννητριών δεν περιέχουν μόνο δεδομένα σχετικά με την καμπύλη ισχύος, αλλά περιλαμβάνουν και τα προφίλ του ανέμου για τα οποία οι ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί να αντέξουν. Η σειρά προτύπων IEC 61400 καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα θεμάτων ασφάλειας και απόδοσης για τη βιομηχανία της αιολικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων θεμάτων όπως τα μηχανικά φορτία, η ακουστική, η ποιότητα ισχύος, η ασφάλεια κατασκευών κ.τ.λ. Οι ανεμογεννήτριες έχουν καθοριστεί για να καλύπτουν τα πρότυπα IEC μέσα σε ένα συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης που βασίζεται στη μέση ταχύτητα του ανέμου, στις ακραίες ταχύτητες και στις ριπές του ανέμου των τελευταίων 50 ετών και στην ένταση της διαταραχής (τύρβης). Η ένταση της διαταραχής είναι ο λόγος της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας του ανέμου προς τη μέση ταχύτητα των 10min.

Οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών προσφέρουν συνήθως διαφορετικά μοντέλα ανεμογεννητριών που έχουν σχεδιαστεί για διαφορετικά ύψη ατράκτου και IEC ταξινομήσεων. Για παράδειγμα, τα φορτία σχεδιασμού για μία ανεμογεννήτρια IEC Κατηγορίας IIA θα είναι υψηλότερα από εκείνα για ένα παρόμοιο μοντέλο σχεδιασμένο για λιγότερες απαιτητικές συνθήκες Κατηγορίας IIIB. Η ανεμογεννήτρια κατηγορίας IIIB ενδέχεται να έχει την ίδια γεννήτρια αλλά με μεγαλύτερο δρομέα, το οποίο σημαίνει ότι θα έχει υψηλότερο συντελεστή χωρητικότητας (capacitor factor – CF) και θα παρέχει περισσότερη ενέργεια.

### 5.1 Όργανα μέτρησης ισχύος του ανέμου

Η διερεύνηση για τον άνεμο ξεκινά από το να συγκεντρώσουμε πολλά στοιχεία για την τοποθεσία ώστε να είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε τη μέση ταχύτητα του ανέμου. Αυτό μπορεί πλέον να γίνει εύκολα με ένα σύνηθες ανεμόμετρο το οποίο περιστρέφεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Τα περισσότερα μακροχρόνια δεδομένα του ανέμου στον κόσμο βασίζονται σε αυτές ή παρόμοιες συσκευές τύπου «προπέλας». Αλλά με τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι απαραίτητες πολύ πιο λεπτομερείς πληροφορίες για τον άνεμο, προκειμένου οι ανεμογεννήτριες να σχεδιαστούν με ασφάλεια και να προβλεφθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η απόδοσή τους και η οικονομική αξία. Σήμερα, υπάρχουν δύο πιο προηγμένα είδη ανεμόμετρων που χρησιμοποιούνται ευρέως στα σύγχρονα αιολικά συστήματα. Το πρώτο βασίζεται σε ηχητικές μετρήσεις και το άλλο βασίζεται στο φαινόμενο Doppler.

Τα ηχητικά ανεμόμετρα στέλνουν τρία ηχητικά κύματα υπερήχων στον χώρο μέτρησής τους κατόπιν μετριέται η απόκλιση του χρόνου με την οποία οι ήχοι φτάνουν σε αντίθετους αισθητήρες. Δεδομένου ότι η ταχύτητα του ήχου αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με το αν κινείται στη φορά του ανέμου ή αντίθετα από αυτήν, ο χρόνος απόκλισης καθιστά δυνατό τον υπολογισμό τόσο της ταχύτητας όσο και της κατεύθυνσης του ανέμου μέσω του οποίου διέρχεται ο ήχος. Για παράδειγμα, εάν ο άνεμος είναι ήρεμος, όλα τα ηχητικά κύματα φτάνουν στους τρεις αισθητήρες ταυτόχρονα. Μπορούν να συλλέξουν ταχέως μεταβαλλόμενα δεδομένα ανέμου σε πραγματικό χρόνο σε δύο ή και σε τρεις διαστάσεις, πράγμα που τα καθιστά κατάλληλα για μετρήσεις διαταραχών (τύρβης). Μπορούν να τοποθετηθούν σε μετεωρολογικούς σταθμούς καθώς και πάνω στην άτρακτο της ίδιας της ανεμογεννήτριας.



Τα ανεμόμετρα ακουστικής ηχοβόλισης (ground-mounting, sonic detection and ranging- SODAR) μεταδίδουν ηχητικούς «παλμούς» στον αέρα. Το χρονικό διάστημα μεταξύ του οποίου ένας παλμός χρειάζεται για να αναπηδήσει στα ατμοσφαιρικά σωματίδια και να επιστρέψει πίσω σε έναν δέκτη παρέχει πληροφορίες σχετικά με το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται τα σωματίδια που ανακλούν τους παλμούς.

Εάν τα σωματίδια κινούνται, η κίνηση αυτή θα ανιχνευθεί από το φαινόμενο Doppler της αλλαγής της συχνότητας στα λαμβανόμενα σήματα. Με την εγκατάσταση τριών ηχητικών κώνων πάνω από τον πομπό, μια ανάλυση του διανύσματος των σημάτων καθιστά δυνατό τον υπολογισμό της οριζόντιας και της κατακόρυφης ταχύτητας του ανέμου, καθώς και της κατεύθυνσής του. Τα συστήματα σκόπευσης και ανίχνευσης φωτός (light detection and ranging – LIDAR) είναι παρόμοια με τα SODAR, αλλά χρησιμοποιούν το φως αντί του ήχου. Τα ανεμόμετρα SODAR και LIDAR είναι απολύτως χρήσιμα για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου σε υψόμετρα των μεγάλων ανεμογεννητριών, δηλαδή περίπου 50-200 m. Οι περισσότεροι μετεωρολογικοί σταθμοί επί των ποιών είναι συνήθως τοποθετημένα τα συμβατικά ανεμόμετρα σε ύψος μικρότερο από 60 m.

## 5.2 Αιολικά Πάρκα.

Εκτός από την περίπτωση που έχουμε μόνο μια ανεμογεννήτρια για μια συγκεκριμένη τοποθεσία, όπως ένα σπίτι εκτός δικτύου στην εξοχή, συχνά όταν ανακαλύψουμε μια τοποθεσία με καλό αιολικό δυναμικό, είναι λογικό να εγκαταστήσουμε μεγάλο αριθμό ανεμογεννητριών σε αυτήν, το επονομαζόμενο *αιολικό πάρκο* ή *αιολική εγκατάσταση*. Προφανώς και προκύπτουν αρκετά πλεονεκτήματα από την ομαδοποίηση των ανεμογεννητριών σε μια ανεμώδη τοποθεσία. Μερικοί σημαντικοί παράγοντες είναι το μειωμένο κόστος ανάπτυξης της τοποθεσίας, οι απλοποιημένες συνδέσεις σε γραμμές μεταφοράς, η εύκολη πρόσβαση για τον έλεγχο λειτουργίας και τη συντήρηση.



*Εικόνα 19 Ανεμογεννήτρια από το αιολικό πάρκο του Παναχαϊκού.*



### 5.3 Χερσαίο Αιολικό Δυναμικό.

Είναι φυσικό να προκύπτουν ερωτήματα σχετικά με την επάρκεια του αιολικού δυναμικού, δηλαδή κατά πόσο μπορεί να ικανοποιεί σημαντικό μέρος της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας, και σχετικά με την επάρκεια των αρκετά μεγάλων εκτάσεων που απαιτούνται για να γίνει αυτό. Για την απάντηση του ερωτήματος αυτού, το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory – NREL) άρχισε να κατασκευάζει χάρτες αιολικού δυναμικού στις ΗΠΑ από την δεκαετία του 1980. Με αυτούς τους χάρτες ως σημείο αναφοράς, το NREL έχει επιχειρήσει να εκτιμήσει το συνολικό αιολικό δυναμικό της χώρας σε εδάφη εκτός των ζωνών άγριας φύσης, των πάρκων, των αστικών περιοχών, και άλλων περιοχών που δεν είναι δυνατόν να γίνει ανάπτυξη τέτοιων πάρκων.

Σίγουρα λοιπόν, για να έχει σημαντικό αντίκτυπο στις τρέχουσες και μελλοντικές απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια, το αιολικό δυναμικό πρέπει να είναι επαρκές. Σε μια έκθεση του το NREL παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας σημαντικής μελέτης των πραγματικών αναγκών κάποιων περιοχών για μεγάλο αριθμό έργων αιολικής ενέργειας στις ΗΠΑ. Για να οργανώσουν την μελέτη τους, οι ερευνητές έκαναν διαχωρισμό μεταξύ άμεσων και έμμεσων χρήσεων της γης. Οι άμεσες χρήσεις της γης αφορούν μόνιμες παρεμβάσεις, όπως δρόμοι πρόσβασης και βάσεις θεμελίωσης των γεννητριών, τα οποία θα παραμείνουν κατά το κύκλο ζωής του έργου, καθώς επίσης και περιοχές που επηρεάζονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής του έργου, αλλά οι οποίες μπορούν να μετατραπούν σε άλλες χρήσεις μετά την ολοκλήρωσή του. Οι περιοχές έμμεσης χρήσης είναι κυρίως εκείνες που απαιτούνται ως αποστάσεις μεταξύ των γεννητριών και ως άλλοι χώροι γύρω από τα πάρκα. Η μελέτη τους κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα τυπικά έργα έχουν μόνιμες περιοχές άμεσης χρήσης περίπου 0.74 acres ανά MW εγκαταστημένης ισχύος, οι περισσότερες εκ των οποίων είναι για δρόμους, συν άλλα 17 ac/MW για προσωρινή άμεση χρήση. Και στις δύο αυτές τιμές υπάρχει πολύ μεγάλη αβεβαιότητα. Οι περιοχές αυτές δεν περιλαμβάνουν την απαραίτητη απόσταση μεταξύ των γεννητριών, η οποία μπορεί να είναι της τάξης των 5-10 διαμέτρων δρομέα μεταξύ των πύργων, ανάλογα με τη διάταξη, μαζί με άλλους χώρους γύρω από τα πάρκα.

Αναμφίβολα, οι ανεμογεννήτριες που είναι πολύ κοντά μεταξύ τους θα έχουν ως αποτέλεσμα παρεμβολή στις πίσω ανεμογεννήτριες από τον άνεμο που λαμβάνεται από τις μπροστινές τους. Καθώς ενέργεια εξάγεται από τους δρομείς, ο άνεμος επιβραδύνεται και μειώνεται η διαθέσιμη ισχύς που δέχονται οι από πίσω μηχανές. Μετά από μια ορισμένη απόσταση περίπου δέκα διαμέτρων δρομέα πίσω από μια ανεμογεννήτρια, η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να ανακτήσει σχεδόν την αρχική τιμή της, το οποίο σημαίνει πως μια άλλη σειρά ανεμογεννητριών θα μπορούσε να εγκατασταθεί. Ανάλογα με την απόσταση μεταξύ των δρομέων, οι απώλειες από μια σειρά σε μια άλλη πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Στην πραγματικότητα, για ένα αιολικό πάρκο απαιτείται προσεκτική αξιολόγηση των διευθύνσεων του ανέμου που επικρατούν, οι εκτιμήσεις των ανωμαλιών του εδάφους, οι δρόμοι πρόσβασης, οι εγκαταστάσεις μεταφοράς ενέργειας και σύνδεσης με το δίκτυο, οι τρέχουσες και προβλεπόμενες χρήσεις της γης για τις περιοχές μεταξύ των πύργων, κ.τ.λ. Αυτοί οι περιορισμοί, τουλάχιστον για επίγεια έργα, συχνά οδηγούν σε μακριές σειρές ανεμογεννητριών ή σε συμπλέγματα ανεμογεννητριών εγκαταστημένα άτακτα, δηλαδή χωρίς σειρές και στήλες. Όταν έχουν εγκατασταθεί κατάλληλα σε σειρές και στήλες, η απόσταση κατά μήκος μιας γραμμής κάθετα προς τους ανέμους είναι συχνά της τάξης των πέντε διαμέτρων του δρομέα, ενώ η απόσταση μεταξύ των



σειρών είναι μεγαλύτερη των 10 διαμέτρων. Οπότε η διάταξη αυτή περιγράφεται ως μια 5D\*10D διάταξη.



*Εικόνα 20 Χερσαίο αιολικό πάρκο με στοιχισμένες ανεμογεννήτριες.*



*Εικόνα 21 Χερσαίο αιολικό πάρκο με άτακτη διάταξη των ανεμογεννητριών.*

Λιγότερο από το 1% της συνολικής επιφάνειας καταλαμβάνεται από τις θεμελιώσεις ανεμογεννητριών, από δρόμους και άλλες μόνιμες δεσμεύσεις της γης. Η ίδια η συστοιχία των γεννητριών καλύπτει περίπου το ένα τρίτο της συνολικής έκτασης, ενώ τα υπόλοιπα δύο τρίτα είναι ουδέτερες ζώνες.

Με το 99% της συνολικής επιφάνειας του αιολικού πάρκου να είναι εν δυνάμει διαθέσιμο για συμβατική γεωργία ή κτηνοτροφία, οι ευκαιρίες για αμοιβαία χρήση της γης είναι άφθονες. Οι αγρότες είναι πιθανό να θέλουν να διατηρούν και να εκμεταλλεύονται ένα αιολικό πάρκο, αλλά μπορούν να εξασφαλίσουν σημαντικές



ροές εσόδων από τη μίσθωση της γης τους σε έναν επενδυτή αιολικού πάρκου. Οι ετήσιες πληρωμές μπορεί να υπολογίζονται ανά acre ή ανά ανεμογεννήτρια, ή μπορεί οι δυο τους να μοιράζονται τα έσοδα από τις MWh ενέργειας που παράγονται.

Τα αιολικά πάρκα είναι αρκετά συμβατά με τη συμβατική γεωργία, κυρίως με την εκτροφή βοοειδών, και τα προστιθέμενα έσοδα που μπορεί να λάβει ένας γεωργός από τη μίσθωση της γης σε έναν ιδιοκτήτη αιολικού πάρκου είναι συχνά μεγαλύτερα από την αξία των γεωργικών προϊόντων που συγκομίζονται από την ίδια τη γη. Ως αποτέλεσμα, οι κτηνοτρόφοι και οι αγρότες μπορεί να γίνουν οι μεγαλύτεροι υποστηρικτές της αιολικής ενέργειας, δεδομένου ότι τους βοηθά να αποκομίζουν κέρδη παραμένοντας στην κύρια δραστηριότητά τους.

#### 5.4 Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα.

Παρόλο που τα χερσαία αιολικά πάρκα ήταν η μεγαλύτερη πηγή αιολικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, η μικρή στις μέρες μας αλλά γρήγορα αναπτυσσόμενη υπεράκτια αγορά παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες για το μέλλον. Τα πλεονεκτήματα στην υπεράκτια αιολική ενέργεια περιλαμβάνουν την εγγύτητα σε μεγάλα παράκτια μητροπολιτικά κέντρα φορτίου, ώστε να μπορεί να αποφευχθεί το κόστος μεταφοράς. Για παράδειγμα, πάνω από το μισό πληθυσμού των ΗΠΑ ζουν σε περιοχές κοντά σε ωκεανούς ή σε μεγάλες λίμνες, και πολιτείες με παράκτια σύνορα χρησιμοποιούν τα τρία τέταρτα της ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ.

Επιπλέον, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως τείνει να είναι υψηλότερη στις παράκτιες περιοχές, γι' αυτό το λόγο η αιολική ενέργεια έχει ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Οι υπεράκτιοι άνεμοι τείνουν επίσης να είναι ισχυρότεροι, σταθερότεροι και λιγότερο τυρβώδεις, και συχνά πνέουν το απόγευμα, όταν η ισχύς είναι πολύτιμη. Εάν οι ανεμογεννήτριες είναι τοποθετημένες αρκετά μακριά από την ακτή, η οπτική όχληση και ο θόρυβος αποτελούν μικρότερα προβλήματα σε σύγκριση με τα επίγεια αιολικά πάρκα. Από τη άλλη μεριά, το θαλάσσιο περιβάλλον είναι πολύ πιο απαιτητικό, η πρόσβαση για συντήρηση είναι αρκετά δύσκολη, και τα κόστη είναι σημαντικά υψηλότερα συγκριτικά με αυτά των χερσαίων εγκαταστάσεων. Το NREL (Musial & Ram, 2010), για παράδειγμα, υποστηρίζει ότι το σταθμισμένο κόστος της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι περίπου διπλάσιο από αυτό των χερσαίων αιολικών πάρκων.



Εικόνα 22 Υπεράκτιο αιολικό πάρκο.



Η οικοδόμηση των υπερράκτιων αιολικών πάρκων εξαρτάται όχι μόνο από την ταχύτητα του ανέμου, αλλά και από το βάθος του νερού και την απόσταση από την ακτή. Πιο μικρούς περιορισμούς αποτελούν τα κύματα, τα ρεύματα του ωκεανού, η ένταση των καταιγίδων, καθώς και η πιθανότητα το πάρκο να παρεμβαίνει στις θαλάσσιες οδούς και στα παραδοσιακά αλιευτικά πεδία. Συνηθέστερα τα υπερράκτια αιολικά πάρκα είναι σε ύδατα βάθους μικρότερου από 30 μέτρα, το οποίο επιτρέπει σε μεμονωμένες ανεμογεννήτριες να στηριχτούν σε έναν πύργο, ο οποίος υποστηρίζεται από έναν μόνο χαλύβδινο πύργο που καταλήγει βαθιά στον πυθμένα της θάλασσας. Σε αυτά τα ρηχά ύδατα χρησιμοποιείται επίσης προεντεταμένο σκυρόδεμα για βάρος στη βάση. Αυτά που αναφέρονται ως μεταβατικά ύδατα, βάθους 30-60 m, έχουν δομές παρόμοιες με εκείνες που αναπτύχθηκαν από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου με περίβλημα (πλέγμα), όπως επίσης χρησιμοποιούν πολλές εκδόσεις της μονοπασάλου υποδομής και είναι αποσυνδεδεμένες από τον πυθμένα.



*Εικόνα 23 Τρόποι υποθαλάσσιας έδρασης.*

Δεν είναι μόνο το βάθος του νερού ένα σοβαρό ζήτημα, είναι και η απόσταση από την ακτή που δημιουργεί πρόβλημα στον σχεδιασμό. Για να μειώσουμε τις απώλειες μεταφοράς, σε κάθε πύργο τοποθετούνται μετασχηματιστές και διακόπτες που μετατρέπουν την τάση της γεννήτριας από περίπου 690 V σε 30-36kV. Για σχετικά μικρές εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε απόσταση περίπου 30 χιλιομέτρων από την ακτή, η τάση είναι αρκετή και επιτρέπει να συνδεθούν σειρές γεννητριών με πολλά υποθαλάσσια καλώδια εναλλασσόμενου ρεύματος απευθείας με τον υποσταθμό που βρίσκεται στην ξηρά. Για μεγαλύτερες όμως συστοιχίες και μεγαλύτερες αποστάσεις, αυτές οι σειρές ενώνονται με υπερράκτιους μετασχηματιστές που ανυψώνουν την τάση συνήθως από τα 33 kV στα 132 kV.

Η μεταφορά από υπερράκτιους μετασχηματιστές σε υποσταθμούς στην ξηρά γίνεται με υποβρύχια τριφασικά καλώδια. Εφόσον αυτοί οι μεμονωμένοι αγωγοί σε αυτά τα καλώδια είναι τόσο κοντά μεταξύ τους, έχουν πολύ μεγάλη συμφύη παράλληλη χωρητικότητα από ότι συνήθεις εναέριες γραμμές μεταφοράς στην ξηρά. Ενώ οι εναέριες γραμμές είναι εκ φύσεως επαγωγικές και ως εκ τούτου απορροφούν άεργο ισχύ, τα υποβρύχια τριφασικά καλώδια δημιουργούν άεργο ισχύ (VAR). Για να



αντισταθμιστεί, χρειάζεται ειδικός εξοπλισμός αντιστάθμισης άεργου ισχύος, ο οποίος απαιτείται τόσο για την υπεράκτια πλατφόρμα όσο και για τον υποσταθμό στην ξηρά. Τα υποθαλάσσια τριφασικά καλώδια λειτουργούν συχνά ως επιμήκεις πυκνωτές, οι οποίοι πρέπει να φορτιστούν και να αποφορτιστούν σε κάθε κύκλο. Αυτό το ρεύμα φόρτισης μειώνει το πραγματικό ρεύμα που μπορεί να διανεμηθεί σε φορτία, το οποίο σημαίνει ότι υπάρχουν όρια στο μήκος των υποβρύχιων καλωδίων.

Για τα μεγάλα αιολικά πάρκα που βρίσκονται μακρύτερα από τα 50 km ανοικτά της θάλασσας, η μεταφορά με υψηλή τάση DC (high voltage DC transmission – HVDC) αποτελεί βιώσιμη επιλογή, ενώ πέρα από τα 100 km είναι η μόνη επιλογή. Αυτό σημαίνει ότι ένας υπεράκτιος μετατροπέας AC σε DC είναι απαραίτητος μαζί με έναν χερσαίο αντιστροφέα DC σε AC για να συνδεθεί στον υποσταθμό στην ξηρά. Ενώ αυτός ο επιπλέον εξοπλισμός αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος και το κόστος, υπάρχουν μερικά εγγενή πλεονεκτήματα στη μεταφορά DC. Καταρχήν επιτρέπει στις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας να συνδέονται με το δίκτυο σταθερής συχνότητας. Επίσης, μειώνει τις απώλειες μεταφοράς σε σχεδόν αμελητέα ποσότητα ακόμη και για μεγάλες αποστάσεις. Ακόμη, δεδομένου ότι τα καλώδια μπορούν να μεταφέρουν περισσότερο DC από AC, τα καλώδια τώρα χρησιμοποιούνται για ένα μεσαίου μεγέθους αιολικό πάρκο AC, αλλά στο μέλλον θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για ένα πολύ μεγαλύτερο αιολικό πάρκο με την προσθήκη ενός μετατροπέα. Τέλος, τα ηλεκτρονικά ισχύος στους μετατροπείς επιτρέπουν μεγαλύτερο έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος, όπως γίνεται και στις συμβατικές σύγχρονες γεννήτριες που τροφοδοτούνται από ατμοστρόβιλους.

## 5.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις Α/Γ.

Τα αιολικά συστήματα έχουν αρνητικές και θετικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι αρνητικές αφορούν:

- Θανάτους πουλιών
- Θόρυβο
- Έργα πολιτικού μηχανικού
- Αισθητικές επιπτώσεις και
- Ρύπανση που συνδέεται με την αρχική ενέργεια για την κατασκευή των γεννητριών.

Έχει παρατηρηθεί ότι πουλιά συγκρούονται με ανεμογεννήτριες, όπως συμβαίνει με αυτοκίνητα, πύργους κινητής τηλεφωνίας, γυάλινα παράθυρα και γραμμές υψηλής τάσης. Ωστόσο οι θάνατοι των πουλιών που προκαλούνται από τις ανεμογεννήτριες είναι πολλοί λιγότεροι σε σχέση με τα παραπάνω εμπόδια που βάζουν οι άνθρωποι στον δρόμο τους, παρόλα αυτά εξακολουθεί να είναι ένα ζήτημα. Μελέτες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι τα πουλιά προσαρμόζουν τις περισσότερες των περιπτώσεων τις διαδρομές που ακολουθούν, πολύ πριν συναντήσουν μια ανεμογεννήτρια, και έτσι το ποσοστό των θανάτων που έχουν αναφερθεί είναι μικρό. Στην Καλιφόρνια υπήρξαν αρκετές αναφορές για θανάτους πουλιών, όταν μια ολόκληρη σειρά από γρήγορα περιστρεφόμενες ανεμογεννήτριες εμπόδισαν το πέρασμα τους, αλλά πλέον η περιστροφή των σύγχρονων μεγάλων ανεμογεννητριών είναι τόσο αργή, ώστε τα πουλιά πλέον μπορούν εύκολα να τις αποφεύγουν. Πειράματα σε υπεράκτια αιολικά πάρκα στη Δανία έφθασαν στο συμπέρασμα ότι οι πάπιες αποφεύγουν τις ανεμογεννήτριες, ακόμα και στην



περίπτωση που χρησιμοποιήθηκαν δολώματα για την προσέλκυση τους στην γύρω περιοχή.

Η αντίληψη των ανθρώπων για την αισθητική των αιολικών πάρκων είναι η πιο σημαντική για την τοποθέτηση των μηχανών. Η σωστή διαφήμιση μπορεί να κάνει τις ανεμογεννήτριες πολύ πιο αποδεκτές. Επιπλέον η τακτοποίηση των ανεμογεννητριών ίδιου μεγέθους σε ενιαίες γραμμές και στήλες, καθώς και ο χρωματισμός τους με ανοιχτό γκρι χρώμα για συνδυασμό με τον ουρανό φαίνεται να βοηθά. Οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες περιστρέφονται πιο αργά και έτσι δεν αποσπούν τόσο την προσοχή του ανθρώπινου ματιού.

Ένα άλλο αμφισβητούμενο φαινόμενο είναι ο θόρυβος από μια ανεμογεννήτρια ή ένα αιολικό πάρκο καθώς οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να απαλύνουν αυτόν τον θόρυβο. Ο θόρυβος που προκαλείται με την περιστροφή των πτερυγίων λόγω της κίνησης του αέρα είναι μεγαλύτερος από τον θόρυβο κατά την λειτουργία της γεννήτριας. Σε αρκετά μικρή απόσταση μακριά από μια ανεμογεννήτρια, το επίπεδο του ήχου είναι συγκρίσιμο με το θρόισμα των φύλλων ενός δέντρου.

Οι θετικές επιπτώσεις προκύπτουν από την υποκατάσταση των άλλων ρυπογόνων ενεργειακών συστημάτων.

Το μοναδικό αλλά μεγάλης αξίας πλεονεκτήματα των συστημάτων αιολικής ενέργειας είναι, εκτός από την πολύ μέτρια αρχική ενέργεια για την κατασκευή τους, ότι δεν εκπέμπουν κανένα από  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $CO$ , καμία πτητική οργανική ένωση και κανένα σωματίδιο όπως θα γινόταν με την καύση ορυκτών καυσίμων. Φυσικά, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν σχεδόν καθόλου εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τα οικονομικά οφέλη των αιολικών συστημάτων θα αυξηθούν, εάν και όταν οι πηγές που εκπέμπουν παράγωγα του άνθρακα αρχίσουν να φορολογούνται.





## Ενότητα 2: Υπολογιστικό Πακέτο RETScreen.

### Κεφάλαιο 6 Περιβάλλον μελέτης RETScreen.

Το **Λογισμικό Διαχείρισης Καθαρής Ενέργειας RETScreen** είναι ένα λογισμικό που δημιουργήθηκε στον Καναδά. Το λογισμικό επιτρέπει την ολοκληρωμένη αναγνώριση, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της τεχνικοοικονομικής βιωσιμότητας έργων που προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ενεργειακής απόδοσης, καθώς επίσης τη μέτρηση και επαλήθευση της πραγματικής απόδοσης των εγκαταστάσεων και την αναγνώριση των περιπτώσεων εξοικονόμησης και παραγωγής ενέργειας. Το RETScreen ενσωματώνει μια σειρά από βάσεις δεδομένων για να βοηθήσει το χρήστη, συμπεριλαμβανομένης μιας παγκόσμιας βάσης δεδομένων κλιματολογικών συνθηκών που λαμβάνονται από 6.700 επίγειους σταθμούς και δορυφορικά δεδομένα της NASA.

Ουσιαστικά πρόκειται για μια επέκταση του Excel και αποτελείται από έξι φύλλα εργασίας:

- Εκκίνηση
- Ενεργειακό Μοντέλο
- Ανάλυση κόστους
- Ανάλυση εκπομπών
- Οικονομική Ανάλυση
- Ανάλυση Επικινδυνότητας

Το καθένα φύλλο εργασίας θα αναλυθεί παρακάτω αναλυτικά καθώς περιέχουν μεγάλο όγκο πληροφοριών εκτός από το τελευταίο φύλλο εργασίας (Ανάλυση Επικινδυνότητας) το οποίο είναι προαιρετικό για τον υπολογισμό της εξοικονόμησης/παραγωγής ενέργειας καθώς και τον χρόνο απόσβεσης του έργου.

#### 6.1 Εκκίνηση.

Σε αυτό το παράρτημα βάζουμε τις βασικές πληροφορίες για την εκκίνηση της μελέτης όπως την ονομασία και την τοποθεσία του έργου καθώς και άλλες πληροφορίες που αφορούν τον τύπο έργου, την τεχνολογία, τον τύπου δικτύου, το νόμισμα και τις μονάδες που θα χρησιμοποιηθούν για την μελέτη. Τέλος και πολύ σημαντικό σ'αυτή την καρτέλα είναι η επιλογή του τύπου ανάλυσης από την αναπτυσσόμενη λίστα. Εάν επιλεγεί η "Μέθοδος 1", απαιτούνται λιγότερες λεπτομερείς πληροφορίες (δηλαδή τα περισσότερα φύλλα εργασίας κλείνουν) ενώ εάν επιλεγεί η "Μέθοδος 2", απαιτούνται πιο λεπτομερείς πληροφορίες. Συνήθως, η Μέθοδος 1 χρησιμοποιείται πρώτα για να προσδιοριστεί εάν δικαιολογείται ανάλυση της μεθόδου 2. Εδώ επιλέγεται η "Μέθοδος 2" για να γίνει μια πιο λεπτομερή μελέτη.



**Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ**

Όνομασία έργου	10000 KW
Τοποθεσία έργου	ΣΙΦΝΟΣ
Συντάχθηκε για	ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Συντάχθηκε από	ΡΟΪΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ - ΑΣΠΡΟΜΑΛΗΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ
Τύπος έργου	Παραγωγή ηλεκτρισμού
Τεχνολογία	Ανεμογεννήτρια
Τύπος δικτύου	Κεντρικό δίκτυο
Τύπος ανάλυσης	Μέθοδος 2
Θερμογόνος ικανότητα αναφοράς	Ανώτερη Θερμογόνος Ικανότητα (ΑΘΙ)
Δείξε ρυθμίσεις	<input checked="" type="checkbox"/>
Γλώσσα	Greek - Ελληνικά
Εγχειρίδιο Χρήστη	English - Anglais
Νόμισμα	Σύμβολο Ευρώ
Μονάδες	Μονάδες μετρικού συστήματος

**Εικόνα 24 Απεικόνιση εκκίνησης**

Αρχικά να αναφερθεί ότι στο παρακάτω τμήμα φαίνονται τα κλιματικά δεδομένα από την νήσο Μήλο καθώς η βιβλιοθήκη του RetScreen περιέχει δεδομένα για αυτή και όχι για την Σίφνο, επομένως επιλέγεται ως την πιο κοντινή (γεωγραφικά και κλιματολογικά) με την δική μας περίπτωση. Τα βασικά κλιματολογικά δεδομένα είναι η θερμοκρασία αέρα, η θερμοκρασία εδάφους, η ατμοσφαιρική πίεση και η ταχύτητα ανέμου. Εδώ δεν αλλάζουμε τίποτα παρά μόνο την τοποθεσία του έργου.

Μονάδα	Θέση κλιματολογικών δεδομένων		Τοποθεσία έργου
	Μονάδα	Μονάδα	
Γεωγραφικό πλάτος	°B	36,7	37,0
Γεωγραφικό μήκος	°A	24,5	24,7
Υψόμετρο	m	183	600
Θερμοκρασία θέρμανσης βάσει σχεδιασμού	°C	5,1	
Θερμοκρασία ψύξης βάσει σχεδιασμού	°C	31,7	
Πλάτος (διακύμανση) θερμοκρασίας εδάφους	°C	7,2	

Μήνας	Ημερήσια							
	Θερμοκρασία αέρα	Σχετική υγρασία	ηλιακή ακτινοβολία - kWh/m <sup>2</sup> /ημ	Ατμοσφαιρική ή πίεση kPa	Ταχύτητα ανέμου m/Δευτερόλεπτο	Θερμοκρασία εδάφους °C	Βαθμό-ημέρες θέρμανσης °C-ημ	Βαθμο-ημέρες ψύξης °C-ημ
Ιανουάριος	10,5	72,4%	2,30	101,4	8,3	13,8	226	22
Φεβρουάριος	10,0	71,2%	3,17	101,3	8,6	13,5	210	14
Μάρτιος	11,0	70,1%	4,62	101,2	7,5	14,2	192	56
Απρίλιος	13,0	65,6%	6,19	101,0	5,9	15,9	90	150
Μαΐος	14,0	60,4%	7,36	101,0	5,2	18,6	0	285
Ιούνιος	19,5	54,6%	8,36	100,9	5,2	21,7	0	420
Ιούλιος	21,5	55,8%	8,31	100,7	6,5	23,4	0	496
Αύγουστος	22,5	59,5%	7,50	100,7	6,6	24,0	0	487
Σεπτέμβριος	20,5	64,1%	6,05	101,0	5,5	22,8	0	396
Οκτώβριος	18,0	69,8%	4,21	101,3	6,5	20,5	0	291
Νοέμβριος	15,0	73,2%	2,58	101,3	6,9	17,5	93	147
Δεκέμβριος	12,0	73,4%	1,96	101,4	8,3	15,1	189	59
Ετήσιο	15,7	65,8%	5,23	101,1	6,7	18,4	1.001	2.823
Μετρημένο σε	m				10,0	0,0		

**Εικόνα 25 Απεικόνιση εκκίνησης**



Παρακάτω φαίνονται οι μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου για την Σίφνο, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς.

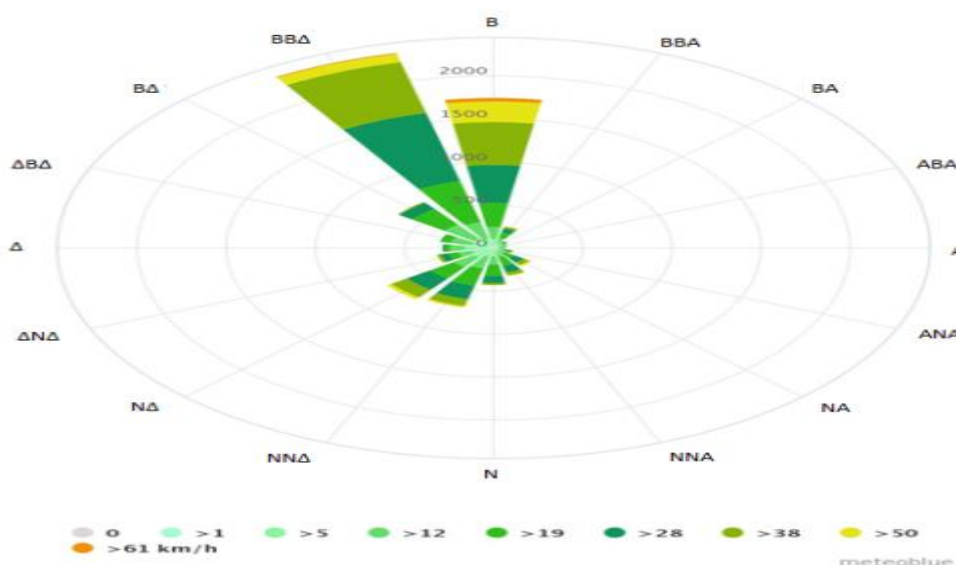
Μήνας	Ταχύτητα ανέμου m/Δευτερόλεπτο
Ιανουάριος	8,1
Φεβρουάριος	7,6
Μάρτιος	8,8
Απρίλιος	5,9
Μαΐος	5,6
Ιούνιος	6,2
Ιούλιος	8,5
Αύγουστος	7,4
Σεπτέμβριος	6,4
Οκτώβριος	7,5
Νοέμβριος	6,5
Δεκέμβριος	8,0
Ετήσιο	7,2

Εικόνα 26 Πίνακας μέσης ταχύτητας ανέμου στη νήσο Σίφνο

## 6.2 Ροδόγραμμα (Wind Rose).

Το Ροδόγραμμα (wind rose) είναι ένα διάγραμμα που απεικονίζει, τη διανυσματική κατανομή της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου, για μια συγκεκριμένη θέση και για μια ορισμένη χρονική περίοδο συνήθως μια ημέρα μπορεί και μήνα. Εμφανίζεται κυρίως ως ένα πολύγωνο, όπου το μήκος των διανυσμάτων κατανέμεται προς διάφορες κατευθύνσεις και είναι ανάλογο με την συχνότητα εμφάνισης των ανέμων προς αυτές τις κατευθύνσεις. Όσο μεγαλύτερο είναι το διάνυσμα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η συχνότητα εμφάνισης των ανέμων από τη συγκεκριμένη κατεύθυνση στην καθορισμένη χρονική περίοδο.

Τώρα θα δειχθεί το ροδόγραμμα για την συγκεκριμένη περιοχή που όπως φαίνεται και από το διάγραμμα το μεγαλύτερο διάνυσμα είναι από την κατεύθυνση ΒΒΔ(Βόρειο Βόρειο Δυτικά), δηλαδή την μεγαλύτερη περίοδο ο άνεμος έχει διεύθυνση 342 μοίρες κατεύθυνση (εκκίνηση 0 μοίρες από βορά), το αμέσως μικρότερο διάνυσμα είναι από την διεύθυνση του Βορά, εδώ παρατηρούνται έντονα χρώματα, πράγμα που σημαίνει ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι πιο μεγάλη, άρα και η παραγόμενη ενέργεια περισσότερη. Τέλος ένα μικρό ποσοστό ανέμων είναι με νοτιοδυτική διεύθυνση που αξίζει να σημειωθεί ότι οι νότιοι άνεμοι είναι συνήθως πιο ισχυροί.



Εικόνα 27 Ροδόγραμμα για την νήσο Σίφνο



### 6.3 Ενεργειακό Μοντέλο.

Σε αυτό το φύλλο υπάρχουν διαθέσιμοι 3 μέθοδοι ανάλυσης εάν επιλεγεί η "Μέθοδος 1", πραγματοποιείται μια απλοποιημένη ανάλυση βάσει της χωρητικότητας και του συντελεστή ισχύος της ανεμογεννήτριας. Εάν επιλεγεί η "Μέθοδος 2", πραγματοποιείται μια πιο λεπτομερής ανάλυση με βάση τα ετήσια δεδομένα του κλίματος και τα δεδομένα του εξοπλισμού της ανεμογεννήτριας. Εάν επιλεγεί η "Μέθοδος 3", πραγματοποιείται ακόμη πιο λεπτομερής ανάλυση με βάση τα μηνιαία δεδομένα του κλίματος και τα δεδομένα του εξοπλισμού της ανεμογεννήτριας. Επιλέχτηκε η μέθοδος 3 καθώς είναι πιο αναλυτική από τις άλλες. Η μέθοδος 3 περιέχει τις εξής υποκατηγορίες:

- 1) Αξιολόγηση πηγών
- 2) Ανεμογεννήτρια
- 3) Περίληψη

Παρακάτω αναλύονται οι κατηγορίες ξεχωριστά καθώς και τι περιέχει το κάθε κελί, αναλύοντας βέβαια τον τρόπο υπολογισμού.

### 6.4 Αξιολόγηση Πηγών.

Παρακάτω φαίνονται με σειρά μια στήλη με την μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s) της Σίφνου που υπολογίστηκε από δεδομένα του Meteoblue. Η διπλανή στήλη είναι η μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου της Μήλου και τοποθετείται αυτόματα από το λογισμικό καθώς στο προηγούμενο υπολογιστικό φύλλο είχε επιλεχτεί η Μήλος ο λόγος ο οποίος εξηγείται παραπάνω. Αυτή η στήλη δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς αλλά πρόκειται για ένα καλό μέτρο σύγκρισης των ταχυτήτων μεταξύ των δύο νησιών και αποδεικνύεται με γυμνό μάτι οι ταχύτητες των ανέμων που επικρατούν στην Σίφνο είναι παρόμοιες της Μήλου.

Μέθοδος (εκτίμησης) φυσικών πόρων	Μήνας	Ταχύτητα ανέμου m/Δευτερόλεπτο	Milos m/Δευτερόλεπτο	Τιμή πωλούμενου ηλεκτρισμού €/MWh	Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο MWh
	Ιανουάριος	8,1	8,3	99,5	2.497
	Φεβρουάριος	7,6	8,6	99,5	2.050
	Μάρτιος	8,8	7,5	99,5	2.772
	Απρίλιος	5,9	5,9	99,5	1.346
	Μαΐος	5,6	5,2	99,5	1.230
	Ιούνιος	6,2	5,2	99,5	1.462
	Ιούλιος	8,5	6,5	99,5	2.543
	Αύγουστος	7,4	6,6	99,5	2.071
	Σεπτέμβριος	6,4	5,5	99,5	1.556
	Οκτώβριος	7,5	6,5	99,5	2.161
	Νοέμβριος	6,5	6,9	99,5	1.641
	Δεκέμβριος	8,0	8,3	99,5	2.443
	Ετήσιο	7,2	6,7	99,5	23.771
Μετρημένο σε		m	10,0		10,0

Εικόνα 28 Απεικόνιση αξιολόγησης πηγών



Στην επόμενη ακριβώς στήλη αναγράφονται οι τιμές πώλησης του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος σε €/MWh ανά μήνα στο ποσό των 99,45 €/MWh όπως προκύπτει από την αναπροσαρμογή των τιμολογίων του άρθρου 5 του Ν.3851/2010/ΦΕΚ.Α'85

Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από:	Τιμή Ενέργειας (€/MWh)	
	Διασυνδεδεμένο Σύστημα	Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά
Αιολική ενέργεια που αξιοποιείται με χερσαίες εγκαταστάσεις ισχύος > 50 kW	87,85	99,45

Εικόνα 29 Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας(€/ MWh)

Στην τελευταία στήλη φαίνεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο ανά μήνα που προκύπτει μετά από υπολογισμό του λογισμικού για την δεδομένη ταχύτητα ανέμου στη Σίφνο. Η μέση ταχύτητα ανέμου θα έχει συνήθως μετρηθεί σε ύψος από 3 έως 100 m, με τα 10 m να είναι πιο συνηθισμένα. Οποιαδήποτε μέτρηση σε ύψος μικρότερο από 3 m πρέπει να επιβεβαιώνεται από άλλη πηγή δεδομένων δεδομένης της έντονης επιρροής της τραχύτητας του εδάφους και των εμποδίων που θα έχουν στις μετρήσεις που βρίσκονται κοντά στο έδαφος.

## 6.5 Εισαγωγή Ανεμογεννήτριας.

Σε αυτή την υποκατηγορία επιλέγεται η ανεμογεννήτρια που θα χρησιμοποιηθεί με βασικό κριτήριο την παραγόμενη ισχύ ανά στρόβιλο μέσα από μια μεγάλη γκάμα ανεμογεννητριών που περιέχει το λογισμικό στην βάση δεδομένων του. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται η VESTAS V90 και παρακάτω φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά της. Πιο συγκεκριμένα ισχύς ανά στρόβιλο 2.000 kW, αριθμός στροβίλων 5 προκειμένου να επιτευχθεί αιολικό πάρκο ισχύος 10MW, ύψος πυλώνων 80m, διάμετρος ρότορα 90m και επιφάνεια σάρωσης ανά στρόβιλο 6.362m<sup>2</sup>. Το μόνο που τροποποιείται από τον χρήστη είναι οι καμπύλες ενεργειακών δεδομένων, εδώ επιλέγεται “Τυποποιημένο”, καθώς με την επιλογή “Εξατομικευμένη λύση” θα πρέπει να τοποθετηθεί και ο αδιάστατος αριθμός στο κελί παράγων σχήματος εδώ ο χρήστης εισάγει μια τιμή για τον συντελεστή σχήματος που είναι ένα χαρακτηριστικό της κατανομής Weibull, αλλά λόγω έλλειψης πληροφοριών για τον συγκεκριμένο αριθμό αφήνεται η επιλογή τυποποιημένη και αυθαίρετα επιλέγεται από το πρόγραμμα ο αριθμός 2. Συνήθως ο συντελεστής σχήματος θα κυμαίνεται από 1 έως 3. Για δεδομένη μέση ταχύτητα ανέμου, ένας χαμηλότερος συντελεστής σχήματος δείχνει μια σχετικά μεγάλη κατανομή των ταχυτήτων ανέμου γύρω από τον μέσο όρο, ενώ ένας υψηλότερος συντελεστής σχήματος δείχνει μια σχετικά στενή κατανομή των ταχυτήτων ανέμου γύρω από τον μέσο όρο.

Ένας χαμηλότερος συντελεστής σχήματος είναι ενδεικτικός μιας υψηλότερης πυκνότητας αιολικής ενέργειας για δεδομένη μέση ταχύτητα ανέμου. Αυτό κανονικά θα οδηγήσει σε υψηλότερη παραγωγή ενέργειας, εκτός από περιοχές με υψηλή μέση ταχύτητα ανέμου, οπότε η παραγωγή ενέργειας θα μειωθεί λόγω της μεγαλύτερης εμφάνισης ταχύτητας ανέμου υψηλότερης από την ταχύτητα ανέμου στρόβιλου.



**Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ**

**Ανεμογεννήτρια**

Ισχύς ανά στρόβιλο  
Κατασκευαστής  
Μοντέλο  
Αριθμός στροβίλων  
Ηλεκτρική ισχύς  
Υψος πυλών  
Διάμετρος ρότορα ανά στρόβιλο  
Επιφάνεια σάρωσης ανά στρόβιλο  
Καμπύλες ενεργειακών δεδομένων  
Παράγων σχήματος

kW	2.000,0	
	Vestas	
	VESTAS V90-2.0 MW - 80m	
	5	
kW	10.000,0	
m	80,0	8,4 m/Δευτερόλεπτο
m	90	
m <sup>2</sup>	6.362	
	Τυποποιημένο	
	2,0	

*Εικόνα 30 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας*

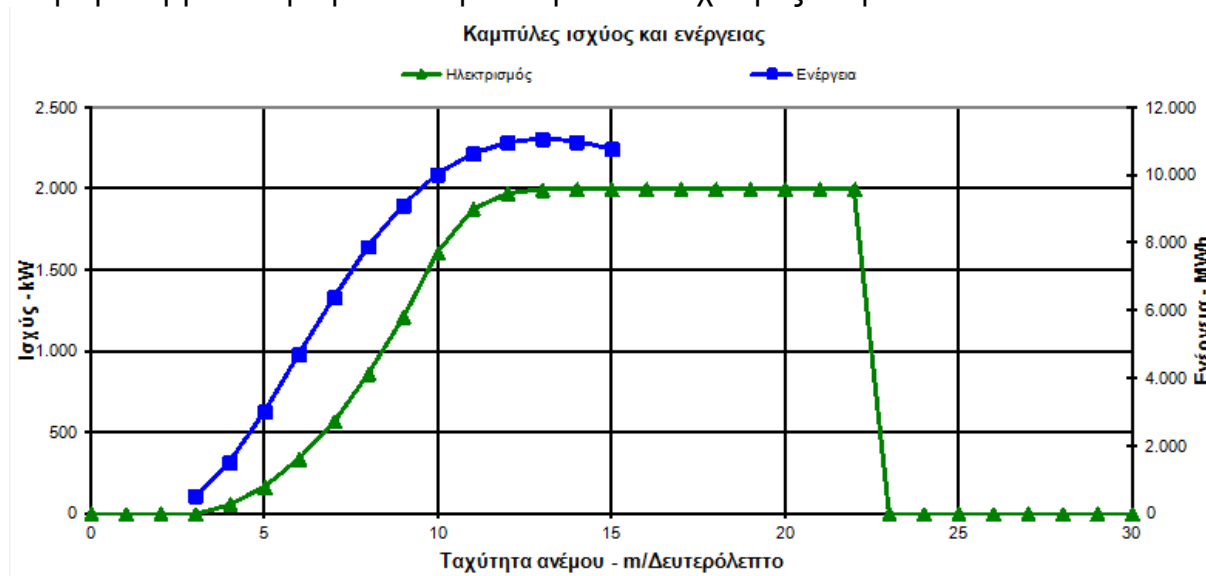
Ο χρήστης επιλέγει την πηγή δεδομένων της καμπύλης ενέργειας για να καθορίσει τον τρόπο υπολογισμού των δεδομένων καμπύλης ενέργειας. Οι επιλογές από την αναπτυσσόμενη λίστα είναι: "Τυπική" και "Προσαρμοσμένη". Η αλλαγή της επιλογής σε αυτό το πεδίο επηρεάζει τον υπολογισμό για τα δεδομένα ενεργειακής καμπύλης. Τα δεδομένα ενεργειακής καμπύλης υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας και την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου. Όταν επιλεγεί η επιλογή "Τυπική", το μοντέλο θα υπολογίσει τα δεδομένα ενεργειακής καμπύλης με βάση την κατανομή ταχύτητας ανέμου με την εξίσωση Rayleigh. Για μια πρώτη προσέγγιση, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει την τυπική επιλογή εάν η κατανομή ταχύτητας ανέμου στην τοποθεσία δεν είναι γνωστή. Σημειώστε ότι η κατανομή Rayleigh είναι μια ειδική περίπτωση της κατανομής Weibull για την οποία ο συντελεστής σχήματος ισούται με 2. Όταν επιλεγεί η επιλογή "Προσαρμοσμένη", το μοντέλο θα υπολογίσει τα δεδομένα ενεργειακής καμπύλης με βάση την κατανομή ταχύτητας ανέμου Weibull. Αυτή η κατανομή χρησιμοποιείται συχνά στη μηχανική αιολικής ενέργειας, καθώς συμμορφώνεται καλά με την παρατηρούμενη μακροπρόθεσμη κατανομή των μέσων ταχυτήτων ανέμου για μια σειρά τοποθεσιών. Σε αυτήν την περίπτωση, ο χρήστης καθορίζει τον συντελεστή σχήματος που θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς. Εδώ επιλέχτηκε η επιλογή "Τυπική".

Ταχύτητα ανέμου m/Δευτερόλεπτο	Δεδομένα καμπύλης ισχύος kW	ενεργειακών δεδομένων MWh
0	0,0	
1	0,0	
2	0,0	
3	0,0	
4	56,0	517,1
5	165,0	1.525,8
6	339,0	3.012,6
7	570,0	4.719,1
8	863,0	6.401,9
9	1.215,0	7.925,7
10	1.606,0	9.243,3
11	1.878,0	10.350,9
12	1.974,0	11.258,1
13	1.995,0	11.974,6
14	2.000,0	12.509,5
15	2.000,0	12.873,9
16	2.000,0	13.082,3
17	2.000,0	
18	2.000,0	
19	2.000,0	
20	2.000,0	
21	2.000,0	
22	2.000,0	
23	2.000,0	
24	2.000,0	
25 - 30	2.000,0	

*Εικόνα 31 Πίνακας ενεργειακών δεδομένων ανεμογεννήτριας.*



Το γράφημα βασίζεται σε τιμές από τις στήλες δεδομένων καμπύλης ισχύος και δεδομένων καμπύλης ενέργειας. Αυτό το γράφημα παρέχει μια αναπαράσταση της ισχύος (σε kW) και της ενέργειας (σε MWh) που παρέχεται από την επιλεγμένη ανεμογεννήτρια και μετράται σε μια σειρά από ταχύτητες ανέμου.



Εικόνα 32 Διάγραμμα ισχύος ενέργειας

Παρατηρείται ότι από 15m/s και μετά η καμπύλη ενέργειας διακόπτεται αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά από τέτοιες ταχύτητες η ανεμογεννήτρια φρενάρει για λόγους ασφαλείας. Επίσης μετά από 13 – 15 m/s η ισχύς που παράγεται παραμένει σταθερή στην μέγιστη τιμή της, επομένως περαιτέρω αύξηση της ταχύτητα του ανέμου καταπονεί την ανεμογεννήτρια. Τέλος φαίνεται ότι από 0 – 3m/s δεν παράγεται ισχύς και επομένως ενέργεια αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ταχύτητες αυτές δεν είναι ικανές να περιστρέψουν τον στρόβιλο της ανεμογεννήτριας. Τέτοιες ταχύτητες ανέμου ειδικά στην περιοχή της Σίφνου δεν επικρατούν σχεδόν ποτέ.

- Απώλειες διάταξης.

Οι απώλειες αυτές οφείλονται στην αλληλεπίδραση πολλών ανεμογεννητριών μεταξύ τους. Παρατηρείται μια απώλεια έργου όταν οι ανεμογεννήτριες βρίσκονται αρκετά κοντά και ο στροβιλός τους είναι στο ίδιο ύψος και κατεύθυνση με τον εμπρόσθιο τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μπροστινές ανεμογεννήτριες παίρνουν την σωστή ποσότητα και κατεύθυνση ανέμου αλλά λόγω του φαινομένου του ροϊκού σωλήνα που αναφέρεται παραπάνω ο αέρας μετα το πέρασμα του από τον στρόβιλο αλλοιώνεται με αποτέλεσμα η επόμενες ανεμογεννήτριες δεν παραλαμβάνουν τον «σωστό» άνεμο σε σχέση με αυτόν με τον οποίο υπολογίζεται η παραγωγή ενέργειας. Οι τυπικές τιμές για ένα καλά σχεδιασμένο αιολικό πάρκο κυμαίνονται από 0% έως 20%. Οι απώλειες διάταξης για μία εγκατάσταση στροβίλου είναι 0%, ενώ ένα καλά σχεδιασμένο σύμπλεγμα μικρότερο από 8 έως 10 στροβίλων θα πρέπει να διατηρεί τις απώλειες διάταξης κάτω από 5%.

- Απώλειες πτερυγίου.

Οι απώλειες αυτές οφείλονται στην καταπόνηση της ανεμογεννήτριας από την φύση, η προσκόλληση σκόνης και πάγου επηρεάζουν την αεροδυναμική αλλά και την



λειτουργία του περυγίου. Οι απώλειες αυτές αντιμετωπίζονται με καθαρισμό και θέρμανση των πετρυγίων κατά την χειμερινή περίοδο. Επομένως οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από την θερμοκρασία, το υψόμετρο τοποθέτησης, και γενικά το κλίμα που επικρατεί στην περιοχή. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από 1% - 10%. Το κλίμα της Σίφνου είναι αρκετά θερμό επομένως οι απώλειες λόγω πάγου είναι ελάχιστες, άρα επιλέγεται ένα 3%.

- **Λοιπές απώλειες.**

Αυτές οφείλονται σε διακοπή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας λόγω υψηλών ταχυτήτων καθώς και απρόσμενες απώλειες κατά την μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος από τη τοποθεσία του πάρκου προς το κεντρικό δίκτυο. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από 2% έως 6%, επιλέγεται το 2% καθώς το νησί είναι αρκετά μικρό και δεν υπάρχει μεγάλη απόσταση μεταφοράς της ενέργειας. Ένα 16% το οποίο προσθέεται με το 2% οφείλεται στο γεγονός ότι πρόκειται για απομονωμένο δίκτυο.

- **Διαθεσιμότητα.**

Είναι το ποσοστό που εκμεταλλευόμαστε από την παραγωγή ενέργειας φυσικά δεν είναι 100% καθώς υπάρχουν διακοπές στην λειτουργία του πάρκου για προγραμματισμένη συντήρηση, η πιθανής βλάβης. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από 93% έως 98%, επιλέγεται ένα 94%. Όσο βέβαια πιο δύσβατη είναι η τοποθεσία και πιο ακραίες οι κλιματικές συνθήκες τόσο πιο χαμηλό θα είναι το ποσοστό διαθεσιμότητας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα ποσοστά που έχουν επιλεχτεί και που έχουν εξηγηθεί παραπάνω.

Απώλειες διάταξης	%	4,0%
Απώλειες περυγίου	%	3,0%
Λοιπές απώλειες	%	18,0%
Διαθεσιμότητα	%	94,0%

Εικόνα 33 Πίνακας απωλειών.

## 6.6 Περίληψη.

Στην τελευταία υποενότητα του φύλλου «ενεργειακού μοντέλου» αναγράφονται ο συντελεστής ισχύος και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο παραπάνω στην παράγραφο «αξιολόγηση πηγών». Το μοντέλο υπολογίζει τον συντελεστή ισχύος για ολόκληρο το αιολικό πάρκο, το οποίο αντιπροσωπεύει την αναλογία της μέσης ισχύος που παράγεται από τον σταθμό παραγωγής ενέργειας για ένα χρόνο προς την ονομαστική του ισχύ. Οι τυπικές τιμές για τον συντελεστή ισχύος μιας αιολικής εγκατάστασης κυμαίνονται από 20 έως 40%. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το κομμάτι της περίληψης.

<b>Περίληψη</b>		
Συντελεστής ισχύος	%	27,1%
Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο	MWh	23.771

Εικόνα 34 Συντελεστής ισχύος και ηλεκτρική ενέργεια δικτύου.





## 6.7 Ανάλυση Κόστους.

Το συγκεκριμένο φύλλο εργασίας του προγράμματος βοηθά τον χρήστη να υπολογίσει το κόστος που απαιτείται για το έργο. Σ αυτό το φύλλο εργασίας χωρίζονται αναλυτικά σε κατηγορίες τα κόστη τα οποία είναι απαραίτητα για την υλοποίηση του έργου, πιο αναλυτικά οι κατηγορίες είναι:

- Ρυθμίσεις
- Αρχικό κόστος
- Ετήσια κόστη
- Περιοδικά κόστη

Παρακάτω αναλύονται ξεχωριστά οι παραπάνω κατηγορίες.

### 6.7.1. Ρυθμίσεις.

Εδώ το RetScreen δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει ανάμεσα σε δυο μεθόδους υπολογισμού των δαπανών. Η μέθοδος 1 είναι πιο λιτή από την μέθοδο 2 όπου απαιτείται μια πιο αναλυτική πληροφόρηση των κοστών. Επιλέγεται η μέθοδος 2 καθώς είναι πιο αναλυτική και προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η επιλογή των δαπανών του έργου.

### 6.7.2. Αρχικό Κόστος.

Το αρχικό κόστος χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα όπως, η μελέτη σκοπιμότητας, ανάπτυξη, τα μηχανολογικά μέρη, τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και το ισοζύγιο συστήματος και διάφορα.

Παρακάτω γίνεται ανάλυση των τμημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

#### 1. Μελέτη σκοπιμότητας.

Στην μελέτη αυτή περιλαμβάνονται οι πρώτες ενέργειες που απαιτούνται για την έγκριση υλοποίησης του έργου. Οι ενέργειες αυτές είναι:

- Έρευνα στο χώρο.

Αφού γίνει μια γενική επιλογή του χώρου που θα τοποθετηθούν οι ανεμογεννήτριες, χρειάζεται επίσκεψη από ειδικό προσωπικό, κυρίως ένα μετεωρολόγο για να βρει τα σημεία όπου οι ανεμογεννήτριες αποδίδουν τα μέγιστα. Συνήθως μια μέρα αρκεί και οι αμοιβές των ατόμων κυμαίνονται από 300 έως 1000€.

- Αξιολόγηση πόρων.

Η μέτρηση των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του ανέμου σε ύψος που προσεγγίζει το ύψος της ανεμογεννήτριας κρίνεται απαραίτητη για την υλοποίηση των αιολικών πάρκων καθώς παρέχει την δυνατότητα επαλήθευσης των εκτιμήσεων της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχονται από προγράμματα όπως το RetScreen. Επίσης παρέχει την δυνατότητα να αξιολογηθούν οι μεταβολές του ανέμου στην περιοχή που σαρώνεται από τα πτερύγια και να εντοπισθούν πιθανά φαινόμενα κόπωσης. Οι μετρήσεις αυτές γίνεται με μετεωρολογικούς ιστούς και απαιτεί περίπου ένα χρόνο μετρήσεων. Μια ετήσια μέτρηση ιστού κοστολογείται περίπου με 50000€. Στην δική μας περίπτωση 4 ιστοί επαρκούν για μια καλή αξιολόγηση.



- Περιβαλλοντική αξιολόγηση.

Οι ανεμογεννήτριες επιβαρύνουν το περιβάλλον, όσο και αν φαίνεται περίεργο, τέτοια προβλήματα είναι η ηχορύπανση, η ακαλαισθησία και συνέπειες στην χλωρίδα και πανίδα του χώρου που θα τοποθετηθούν. Οι παραπάνω περιβαλλοντικές επιπτώσεις κρίνουν αν θα πραγματοποιηθεί το έργο, για αυτό χρειάζονται κάποιοι ειδικοί να το κρίνουν αυτό η να δώσουν λύση σε κάποια από τα παραπάνω προβλήματα. Το προσωπικό αυτό θα αποτελείται από 3 άτομα που θα αμειφθούν με 850€.

- Προκαταρκτικός σχεδιασμός έργου.

Απαιτείται ένας προκαταρκτικός σχεδιασμός από κάποιο εμπειρογνώμονα που θα εκτιμήσει το χρόνο υλοποίησης του έργου. Το προσωπικό αυτό θα αποτελείται από 5 άτομα με αμοιβή 850€ έκαστος.

- Αναλυτική εκτίμηση κόστους.

Η αναλυτική εκτίμηση του κόστους βασίζεται στα αποτελέσματα των προηγούμενων ερευνών που πραγματοποιήθηκαν την μελέτη σκοπιμότητας. Οι υπηρεσίες του μηχανικού είναι περίπου 850€ ανά άτομο. Ένα επαρκές προσωπικό το 10 ατόμων θα μας προσφέρει μια αναλυτική εκτίμηση κόστους.

- Μελέτη αναφοράς εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου.

Το κόστος για μια μελέτη παρακολούθησης εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου, είναι αρκετά μεγάλο της τάξης των 50000€ για αυτό σε πολλές περιπτώσεις, που οι αιολικοί σταθμοί δεν ξεπερνούν τα 15MW αυτή η μελέτη παραλείπεται.

- Διαχείριση έργου

Το κόστος της διαχείρισης έργου εξαρτάται από το χρόνο που απαιτείται από έναν εμπειρογνώμονα για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας. Ένα 5μελές προσωπικό με αμοιβή 850€ ο καθένας είναι αρκετό.

- Ταξίδια και διαμονή

Σε αυτά τα έξοδα περιλαμβάνονται η μεταφορά, η διαμονή σε ξενοδοχεία και τις ημερήσιες ανάγκες του προσωπικού που ταξιδεύει. Για απομονωμένες περιοχές όπως η Σίφνος 250€ ανά ταξίδι είναι επαρκές, βέβαια όσο πιο απομονωμένος είναι ο προορισμός τόσο πιο μεγάλο είναι το ποσό αυτό.

- Τελική έκθεση

Απαιτείται μια λεπτομερής έκθεση της μελέτης σκοπιμότητας με τις διαπιστώσεις και συστάσεις της. Συνήθως για το μέγεθος του πάρκου 3 άτομα με 850€ ανά άτομο είναι αρκετό. Παρακάτω φαίνονται συνοπτικά οι δαπάνες για την μελέτη σκοπιμότητας όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Σε όλες τις εργασίες πάρθηκε όσο το δυνατόν ή πιο ακριβή επιλογή για να επαληθευτεί η βιωσιμότητα του έργου.



Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ

Διερεύνηση χώρου	ανά ημέρα	1	€ 850	€	850
Αξιολόγηση πτηγών	έργο	4	€ 50.000	€	200.000
Περιβαλλοντική αξιολόγηση	ανά ημέρα	3	€ 850	€	2.550
Προκαταρκτικός σχεδιασμός	ανά ημέρα	5	€ 850	€	4.250
Αναλυτική εκτίμηση κόστους	ανά ημέρα	10	€ 850	€	8.500
Μελέτη σεναρίου αναφοράς ΑΤΘ & ΜΡ	έργο	0		€	-
Προετοιμασία έκθεσης	ανά ημέρα	3	€ 850	€	2.550
Διαχείριση έργου	ανά ημέρα	5	€ 850	€	4.250
Ταξίδια & Διαμονή	ανά-ταξίδι	5	€ 250	€	1.250
Οριζόμενο από τον χρήστη	κόστος			€	-
				€	-
Υπο-σύνολο:				€	224.200 1,4%

Εικόνα 35 Πίνακας μελέτης σκοπιμότητας

Οι μελέτες σκοπιμότητας αποτελούν συνήθως το 1 με 5% του συνολικού έργου. Στην δική μας μελέτη το ποσοστό είναι 1,4% και βρισκόμαστε μέσα στα όρια των θεωρητικών τιμών.

## 2. Ανάπτυξη.

Αφού επιτευχθεί το σχέδιο για την υλοποίηση του έργου από την μελέτη σκοπιμότητας, θα προβούμε σε ενέργειες που θα αφορούν την ανάπτυξη του σχεδίου. Παρακάτω αναλύονται τα τμήματα της ανάπτυξη καθώς και η αιτιολόγηση των επιλεχθέντων τιμών.

- Διαπραγματεύσεις συμβολαίου.

Αφού περάσει από έγκριση το σχέδιο της μελέτης σκοπιμότητας, ο εργοδότης του έργου θα πρέπει να διαπραγματευτεί μια σύμβαση με τους ενδιαφερόμενους φορείς του έργου. Το κόστος για τις υπηρεσίες των ατόμων που θα διαπραγματευτούν την σύμβαση κυμαίνεται από 300 έως 1500€ και το πλήθος του προσωπικού από 1 έως 30 ανάλογα το μέγεθος του έργου. Στην δικιά μας περίπτωση επιλέγονται 5 άτομα με αμοιβή 1000€ τον καθένα.

- Άδειες και εγκρίσεις.

Περιλαμβάνουν περιβαλλοντικές εγκρίσεις, άδειες για την εκμετάλλευση γης και υδάτων. Εδώ συγκαταλέγονται και οι ηλεκτρολόγοι, οικοδόμοι, δασοφύλακες και πυροσβέστες. Το κόστος όλων των παραπάνω κυμαίνεται από 300 έως 1000€ και τα άτομα μπορεί να φτάσουν ακόμη και τα 400 ανάλογα το έργο. Εδώ επιλέγονται 20 με αμοιβή 800€.

- Επισκόπηση χώρου και δικαιώματα γης

Αν θα γίνει επισκόπηση χώρου θα εξαρτηθεί από την κατάσταση του, τον προγραμματισμό της χωροθέτησης και πιθανά νομικά προβλήματα. Σίγουρα απαιτείται όμως επισκόπηση για τον δρόμο, τις γραμμές μεταφοράς και την τοποθέτηση του υποσταθμού. Μια έρευνα από 1 έως 10 εκτάρια θεωρείται απλή και κοστολογείται με 750€. Η τοποθέτηση 5 ανεμογεννητριών απαιτεί λιγότερα από 10 εκτάρια και με την πρόσληψη 3 ατόμων με αμοιβή 850€, το κόστος αυτό ανέρχεται στα 3300€.



- Διαπίστευση και καταχώρηση ΑΤΘ (Αέρια Του Θερμοκηπίου).

Αυτό το ποσό θεωρείται αμελητέο και δεν συμπεριλαμβάνεται, καθώς αφορά μια πιστοποίηση ότι το έργο πληροί τις προδιαγραφές που απαιτούνται για την λειτουργία.

- Χρηματοδότηση έργου.

Το κόστος χρηματοδότησης του έργου υπολογίζεται με βάση τις υπηρεσίες που απαιτούνται, για την εξάλειψη των υποχρεώσεων (χρέος και μετοχές). Για τις άνωθεν υπηρεσίες απαιτούνται 3 έως 100 άτομα με μέγιστη αμοιβή 1500€. Εδώ επιλέχθηκαν 20 άτομα με αμοιβή 1300€ ανά ημέρα.

- Νομικές και λογιστικές υπηρεσίες.

Οποιαδήποτε έργο απαιτεί νομική και λογιστική υποστήριξη για να αναπτυχθεί. Τέτοια θέματα είναι η έκθεση οικονομικής κατάστασης του έργου, λογιστικά θέματα κ.α. Όσο για τα νομική υποστήριξη εξαρτάται από την πολυπλοκότητα και την δυσκολία κλεισίματος συμβάσεων και συμφωνιών. Προσεγγιστικά επιλέχθηκαν 10 άτομα ανά ημέρα με 1300€ αμοιβή.

- Διαχείριση έργου.

Το κόστος διαχείρισης έργου θα πρέπει να ξεπερνά τα υπόλοιπες φάσεις της ανάπτυξης του έργου. Συνήθως απαιτούνται 50 άτομα ανά ημέρα και με προτεινόμενη αμοιβή 850€.

- Ταξίδια και διαμονή.

Κατά την διάρκεια της ανάπτυξης του έργου χρειάζονται κάποιες επισκέψεις και συναντήσεις. Επιλέχθηκαν 10 ταξίδια με έξοδα το καθένα 250€.

Ανάπτυξη							
Διαπραγματεύσεις συμβολαίου	ανά ημέρα	5	€	1.000	€	5.000	
Άδειες & εγκρίσεις	ανά ημέρα	20	€	800	€	16.000	
Επισκόπηση χώρου & δικαιώματα γης	ανά ημέρα	3	€	1.600	€	4.800	
Διαπίστευση & καταχώρηση ΑΤΘ	έργο	0			€	-	
Χρηματοδότηση έργου	ανά ημέρα	20	€	1.300	€	26.000	
Νομικές & Λογιστικές υπηρεσίες	ανά ημέρα	10	€	1.300	€	13.000	
Διαχείριση έργου	ανά ημέρα	50	€	850	€	42.500	
Ταξίδια & Διαμονή	ανά-ταξίδι	10	€	250	€	2.500	
Οριζόμενο από τον χρήστη	κόστος				€	-	
					€	-	
Υπο-σύνολο:					€	109.800	0,7%

Εικόνα 36 Πίνακας κόστους κατά την ανάπτυξη του έργου.

### 3. Μηχανολογικά.

Αυτή η φάση περιλαμβάνει τα κόστη για την μελέτη του χώρου και τον σχεδιασμό της δομής του, επίσης περιλαμβάνονται ο μηχανολογικός, ο ηλεκτρολογικός και ο οικοδομικός σχεδιασμός, καθώς και οι συμβάσεις και η επίβλεψη της κατασκευής. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα τμήματα καθώς και ο τρόπος εκλογής του για την φάση των μηχανολογικών.



- Τοποθεσία και σχεδιασμός κτηρίου.

Εδώ περιλαμβάνεται η εργασία του πολιτικού μηχανικού, του μετεωρολόγου και ειδικών στην προσομοίωση και μοντελοποίηση του έργου. Το κόστος αυτών εξαρτάται από την πολυπλοκότητα των χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης περιοχής (ανωμαλίες εδάφους, μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμων κλπ). Ο αριθμός του προσωπικού μπορεί να φτάσει τους 300 και οι αμοιβές κυμαίνονται από 300 έως 1000€. Για το δικό μας αιολικό πάρκο 30 άτομα ανά ημέρα είναι υπεραρκετά και με αμοιβή 850€ μέγιστη.

- Μηχανικός σχεδιασμός.

Το κόστος του μηχανικού σχεδιασμού εξαρτάται από το χρόνο που χρειάζονται οι ειδικοί για να τον πραγματοποιήσουν. Συνήθως χρειάζονται 30 άτομα ανά ημέρα για το συγκεκριμένο μέγεθος αιολικού πάρκου. Η αμοιβή τους θα είναι 850€.

- Ηλεκτρολογικός σχεδιασμός.

Ο ηλεκτρολογικός σχεδιασμός περιλαμβάνει όλα τις απαραίτητες εργασίες για την ασφαλή ένταξη μιας νέας πηγής παραγωγής στο δίκτυο. Ανάλογα το μέγεθος του έργου οι εργαζόμενοι μπορεί να φτάσουν και τους 300. Για μικρά αιολικά πάρκα 20 εργαζόμενοι ανά ημέρα είναι αρκετοί και με αμοιβή 850€.

- Οικοδομικός σχεδιασμός.

Το κύριο έργο του πολιτικού μηχανικού είναι να κατασκευάσει τα κτήρια, τους οδούς πρόσβασης και άλλους επίγειους δρόμους για την τοποθέτηση γραμμών μεταφοράς των καλωδίων. Ο πολιτικός μηχανικός αμείβεται συνήθως με 850€ και το δικός μας πάρκου που είναι μικρό 15 άτομα είναι αρκετά.

- Διαγωνισμοί και συμβάσεις.

Μετά την έκθεση των προσφορών προς το αγοραστικό κοινό, χρειάζονται κάποιοι να συνάψουν συμβάσεις και να διαπραγματευτούν για την υλοποίηση του έργου. Για τα μικρά αιολικά πάρκα ο μέγιστος αριθμός ατόμων είναι 20. Εδώ επιλέγονται 15 ανά ημέρα με αμοιβή 850€.

- Επίβλεψη κατασκευής.

Το προσωπικό που θα επιβλέπει την κατασκευή του έργου παρέχεται είτε από τον υπεύθυνο του έργου είτε από τον προμηθευτή υλικών. Το κόστος του παραπάνω προσωπικού εξαρτάται από το χρονοδιάγραμμα του έργου. Τα άτομα επίβλεψης της κατασκευής μπορούν να φτάσουν μέχρι και τα 500 αλλά λόγω μεγέθους του έργου 10 άτομα είναι αρκετά ανά ημέρα με αμοιβή 850€.

Συνοπτικά τα παραπάνω απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα της εικόνας.



Μηχανολογικά					
Τοποθεσία & σχεδιασμός κτηρίου	ανά ημέρα	30	€	850	€ 25.500
Μηχανολογικός Σχεδιασμός	ανά ημέρα	30	€	850	€ 25.500
Ηλεκτρολογικός Σχεδιασμός	ανά ημέρα	30	€	850	€ 25.500
Οικοδομικός Σχεδιασμός	ανά ημέρα	15	€	850	€ 12.750
Διαγωνισμοί & συμβάσεις	ανά ημέρα	15	€	850	€ 12.750
Επίβλεψη κατασκευής	ανά ημέρα	10	€	850	€ 8.500
Οριζόμενο από τον χρήστη	κόστος				€ -
					€ -
Υπο-σύνολο:			€	110.500	0,7%

Εικόνα 37 Πίνακας μηχανολογικού κόστους

#### 4. Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει το κομμάτι της ανεμογεννήτριας, τα έργα οδοποιίας, την γραμμή μεταφοράς, τον υποσταθμό και τα μέτρα ενεργειακής απόδοσης που σχετίζονται με την επιμέρους ενέργεια. Παρακάτω αναλύονται χωριστά τα τμήματα του συστήματος ισχύος.

- Ανεμογεννήτρια.

Ο χρήστης εισάγει μόνο το κόστος ανά μονάδα χωρητικότητας σε kW καθώς η χωρητικότητα εισάγεται αυτόματα από το προηγούμενο φύλλο εργασίας του «ενεργειακό μοντέλο» στο συγκεκριμένο κελί όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Προκύπτει από το την επιλογή του μοντέλου της ανεμογεννήτριας σε συνδυασμό με την ποσότητα των στροβίλων που θα τοποθετηθούν. Επομένως η τιμή που θα τοποθετήσουμε περιλαμβάνει τον εξοπλισμό και το κόστος εγκατάστασης.

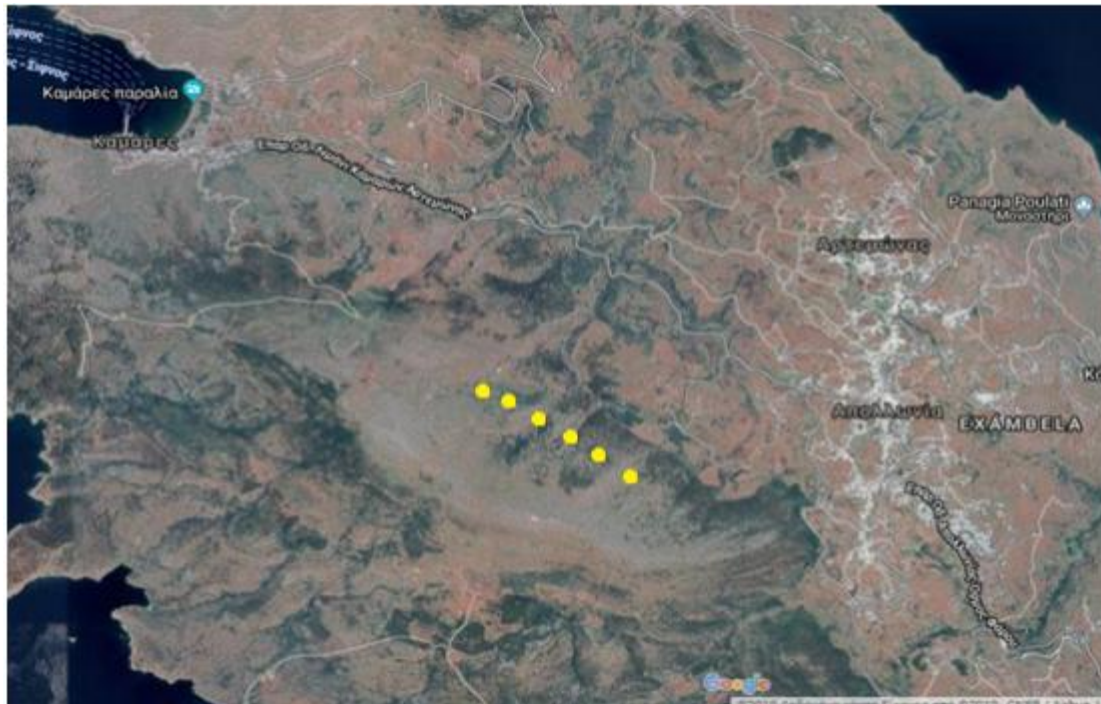
Το κόστος αυτό τυπικά όσο μεγάλη είναι η χωρητικότητα τόσο πιο μικρό θα προκύπτει. Το επενδυτικό κόστος, για την εγκατάσταση ενός στροβίλου είναι περίπου 1.100 €/kW ποσό προσεγγιστικό με βάση τις τελευταίες πληροφορίες για την Ευρώπη.

- Έργα οδοποιίας.

Όπως φαίνεται από τον χάρτη υπάρχει διαθέσιμος δρόμος για τις κορυφές του νησιού, επομένως τα έργα που θα απαιτηθούν για το άνοιγμα δρόμου έως την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών δεν θα είναι πάνω από 3 km. Το κόστος ανά χιλιόμετρο εξαρτάται από την πολυπλοκότητα της μορφολογίας του εδάφους. Στην Σίφνο όπως φαίνεται και από τον χάρτη είναι αρκετά απλή χωρίς απότομες κορυφές, επομένως επιλέγεται κόστος ανά χιλιόμετρο 7.000€.

- Γραμμή μεταφοράς ηλεκτρισμού.

Το κόστος εγκατάστασης της γραμμής μεταφοράς του ηλεκτρισμού εξαρτάται από τον τύπο, το μήκος, την τάση, την τοποθεσία της γραμμής και την ισχύ του αιολικού πάρκου. Για την περίπτωση της Σίφνου οι αποστάσεις είναι αρκετά μικρές επιλέγεται προσεγγιστικά μήκος γραμμής μεταφοράς 2 km που θεωρούνται υπεραρκετά και κόστος ανά χιλιόμετρο 10.000€.



Εικόνα 38 Οδικός χάρτης της Σίφνου και εμφάνιση χώρου τοποθέτησης του έργου.

- Υποσταθμός.

Η ηλεκτρική ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες φτάνει στον υποσταθμό, εκεί γίνεται υποβιβασμός της τάσης με τη βοήθεια μετασχηματιστών και μεταφέρεται μέσω γραμμών διανομής στο κεντρικό δίκτυο, με περαιτέρω υποβιβασμό τάσης μπορεί να γίνει κατάλληλη και για οικιακή χρήση. Επομένως το κόστος κατασκευής του υποσταθμού εξαρτάται από την χωρητικότητα του πάρκου και την τάση που δέχεται. Έτσι για χωρητικότητα μεγαλύτερη των 5 MW η τιμή του υποσταθμού είναι 2.000.000 CAD που με μετατροπή σε ευρώ γίνεται 1.440.000€ όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

RETScreen			
Capacity (MW)	Voltage (kV)	Transmission line (\$/km)	Substation (\$)
0 – 2	25	\$55,000	\$250,000
2 – 5	44	\$65,000	\$600,000
> 5	115	\$100,000	\$2,000,000

Note: Typical installed cost values in Canadian \$ as of January 1, 2006.  
Approximate exchange rate at time was 1 CAD = 0.86 USD and 1 CAD = 0.72 EUR

Εικόνα 39 Πίνακας τιμών υποσταθμών.

- Μέτρα ενεργειακής απόδοσης.

Συμπεριλαμβάνονται τα κόστη για τον εξοπλισμό και την εγκατάσταση. Τα μέτρα ενεργειακής απόδοσης εξαρτώνται από την αυστηρότητα των μέτρων καθώς και τα



τ.μ. της εγκατάστασης. Για το συγκεκριμένο μέγεθος του έργου τα κόστος των μέτρων ανέρχεται στο ύψος των 1000€. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα κόστη όπως αναλύθηκαν παραπάνω.

Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας						
Ανεμογεννήτρια	kW	10.000,00	€	1.100	€	11.000.000
Εργα οδοποιίας	km	3	€	7.000	€	21.000
Γραμμή μεταφοράς ηλεκτρισμού	km	2	€	10.000	€	20.000
Υποσταθμός	έργο	1	€	1.440.000	€	1.440.000
Μέτρα ενεργειακής απόδοσης	έργο	1	€	1.000	€	1.000
Οριζόμενο από τον χρήστη	κόστος	1	€	10.000	€	10.000
					€	-
Υπο-σύνολο:			€			12.492.000
						82,0%

Εικόνα 40 Πίνακας κόστους των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

##### 5. Ισοζύγιο συστήματος και διάφορες δαπάνες.

Το ισοζύγιο συστήματος και διάφορες δαπάνες περιλαμβάνουν τα ειδικά κόστη, τις κατασκευές των ανεμογεννητριών και χρήσιμων κτηρίων, ανταλλακτικά και διάφορες δαπάνες που μπορεί να προκύψουν κατά την εξέλιξη του έργου. Παρακάτω αναλύονται αναλυτικά τα κόστη του προαναφερθέντος τμήματος.

- Ειδικά κόστη έργου.

Εδώ το μόνο που έχει να κάνει ο χρήστης είναι να επιλέξει τον τύπο του έργου που θέλει να υλοποιήσει, καθώς με την αντίστοιχη επιλογή διαφοροποιούνται τα παρακάτω κελιά του τμήματος.

- Θεμελίωση ανεμογεννήτριας.

Τα θεμέλια των ανεμογεννητριών περιλαμβάνουν τα εργατικά κόστη και το κόστος των υλικών. Στις μεγάλες ανεμογεννήτριες αυτά τα κόστη κυμαίνονται από 10.000 έως 50.000€, οι Vestas V90 είναι αρκετά μεγάλες και το κόστος ανά στρόβιλο ορίστηκε προσεγγιστικά με 40.000€.

- Ανέγερση ανεμογεννήτριας

Η ανέγερση ανεμογεννητριών περιλαμβάνει το κόστος εργασίας και του απαραίτητου εξοπλισμού. Συνήθως το κόστος της ανέγερσης αποτελεί το 4% του συνολικού εξοπλισμού ισχύος. Το κόστος του εξοπλισμού ισχύος είναι 11.000.000€ επομένως το 4% είναι 440.000€, δηλαδή το κόστος ανέγερσης ανά στρόβιλο αντιστοιχεί σε 88.000€.

- Κατασκευή κτηρίων και περιβόλου.

Επειδή το αιολικό πάρκο είναι μικρό αυτή η εργασία παραλείφθηκε.

- Ανταλλακτικά.

Το κόστος των ανταλλακτικών αποτελεί συνήθως το 3% του κόστους του εξοπλισμού ισχύος για μεγάλα αιολικά πάρκα. Για μικρά μπορεί να φτάσει και το 30%. Για το δικό μας πάρκο ένα 10% του συνολικού κόστους ισχύος είναι αντιπροσωπευτικό.





Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ

- **Μεταφορά.**

Τα έξοδα για την μεταφορά του εξοπλισμού και των υλικών διαφοροποιούνται ανάλογα τον τρόπο μεταφοράς και την τοποθεσία του έργου. Ενδεικτικά επιλέχτηκε το ποσό των 10.000€.

- **Εκπαίδευση και θέση σε λειτουργία.**

Για κάθε τμήμα 50 ανεμογεννητριών απαιτούνται 6 τεχνικοί συντήρησης. Για μικρά απομονωμένα αιολικά πάρκα ένα τεχνικός συντήρησης είναι αρκετός. Για κάποιες όμως προγραμματισμένες συντηρήσεις χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό 2 έως 10 εργαζομένων. Η θέση σε λειτουργία απαιτεί από 1 έως 8 άτομα ανάλογα το έργο. Αθροιστικά επιλέχτηκαν 8 άτομα εκ των οποίων 1 τεχνικός συντήρησης, 5 εργαζόμενοι του εξειδικευμένου προσωπικού και 2 άτομα για την θέση σε λειτουργία οι οποίοι θα αμείβονται με 850€.

- **Απρόβλεπτα.**

Τα απρόβλεπτα υπολογίζονται με ένα ποσοστό από το συνολικό κόστος του έργου. Μια προσεγγιστική τιμή είναι 10%.

- **Τόκος κατά την κατασκευή**

Εδώ εισάγεται το επιτόκιο (%) και ο χρόνος που απαιτείται για την κατασκευή του έργου. Επιλέγεται επιτόκιο 3% το οποίο μπορεί να κυμαίνεται κατά την υλοποίηση του έργου φτάνοντας ακόμα και την τιμή 15%. Ο εκτιμώμενος χρόνος κατασκευής του έργου επιλέχτηκε ένας χρόνος (12 μήνες). Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές που αναλύθηκαν παραπάνω.

Ισοζύγιο συστήματος & διάφορα		Εγκατάσταση ανεμογεννήτριας			
Ειδικά κόστη έργου					
Θεμελίωση ανεμογεννήτριας	στρόβιλος	5	€	40.000	€ 200.000
Ανέγερση ανεμογεννήτριας	στρόβιλος	5	€	88.000	€ 440.000
Κατασκευή κτιρίων και περιβόλου	m <sup>2</sup>				€ -
Ανταλλακτικά	%	10,0%	€	11.000.000	€ 1.100.000
Μεταφορά	έργο	1	€	10.000	€ 10.000
Εκπαίδευση & θέση σε λειτουργία	ανά ημέρα	8	€	850	€ 6.800
Οριζόμενο από τον χρήστη	κόστος				€ -
Απρόβλεπτα	%	10,0%	€	14.684.800	€ 1.468.480
Τόκος κατά την κατασκευή	3,00%	12 μήνας(ες)	€	16.153.280	€ 242.299
Υπο-σύνολο:				€	€ 3.467.579 21,1%
<b>Συνολικά αρχικά κόστη</b>				€	€ 16.395.579 100,0%

Εικόνα 41 Πίνακας κόστους ανέγερσης της κατασκευής

### 6.7.3 Ετήσια Κόστη.

Υπολογίζονται κάποιες ετήσιες δαπάνες που χρειάζονται για να λειτουργεί ένα έργο. Αυτές οι δαπάνες περιλαμβάνουν ενοικιάσεις γης, φόροι ιδιοκτησίας, ασφάλιστρα, κοινωνικά οφέλη και έξοδα που αφορούν τμήματα και εργασία, παρακολούθηση και επικύρωση των αερίων του θερμοκηπίου και διοικητικά.



Παρακάτω αναλύονται όλα αυτά τα κόστη που αναφέρθηκαν και ακολουθεί πίνακας με τις επιλογές πάρθηκαν.

- Ενοικίαση γης και πηγής.

Εάν η γη δεν αγοράζεται απαιτείται ένα ετήσιο κόστος ενοικίασης. Επομένως μετά από κατάλληλη διαπραγμάτευση με τον ιδιοκτήτη ο χρήστης εισάγει το κόστος του ενοικίου και στην προκειμένη περίπτωση είναι το ποσό των 5.000€ ανάλογα πάντα με το μέγεθος του έργου.

- Φόρος ιδιοκτησίας.

Συχνά υπολογίζεται ως ποσοστό που προκύπτει από το αρχικό κόστος του έργου. Προσεγγιστικά επιλέχτηκε το ποσό των 5.000€.

- Ποσοστό ασφαλίσεων.

Το κόστος αυτό όπως και του φόρου ιδιοκτησίας προκύπτει και αυτό ως ποσοστό του συνολικού αρχικού κόστους. Απαιτούνται κάποιες ασφαλίσσεις για πιθανές υλικές ζημιές, ατυχήες εξοπλισμού και διακοπές λειτουργίας. Το ποσό των 5.000€ είναι αντιπροσωπευτικό.

- Τμήματα και εργασία.

Το κόστος για τα ανταλλακτικά και την απαιτούμενη εργασία υπολογίζεται ανάλογα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δηλαδή σε kWh/€. Η ετήσια παραγωγή ενέργειας του αιολικού πάρκου είναι 23.800.000 kWh επί 0,015€, που είναι μια αρκετά λογική τιμή για μικρά αιολικά πάρκα, μας κάνει το ποσό των 360.000€.

- Παρακολούθηση και επικύρωση των αερίων του θερμοκηπίου.

Λόγω το μέγεθος του αιολικού πάρκου οι εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου προς την ατμόσφαιρα θεωρείται αμελητέα. Επομένως δεν απαιτείται προσωπικό για την παρακολούθησή τους, άρα το συγκεκριμένο κελί θα παραμείνει κενό.

- Κοινωνικά οφέλη.

Αφορούν συνήθως μεγάλα αιολικά πάρκα καθώς χαλάνε την αισθητική του τόπου και προκειμένου να εξισορροπηθεί αυτή δυσαρέσκεια, πραγματοποιούνται κάποιες δωρεές σε κέντρα ευαισθητοποίησης του κοινού, σε φιλανθρωπικές διοργανώσεις κλπ. Στην προκειμένη περίπτωση εκτός ότι πρόκειται για μικρό αιολικό πάρκο, η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών θα φέρει πολλά οφέλη στο νησί. Επομένως και εδώ δεν εισάγεται κάποια τιμή.

- Γενικά και διοικητικά.

Τα ετήσια γενικά και διοικητικά περιλαμβάνουν το κόστος των λογιστικών, των ετήσιων δηλώσεων, τα τραπεζικά έξοδα κλπ. Το κόστος αυτό υπολογίζεται ως ποσοστό των συνολικών ετήσιων δαπανών, κυμαίνεται από 1% έως 20%, ένα 2% στην προκειμένη περίπτωση είναι αντιπροσωπευτικό.



- Απρόβλεπτα

Τέλος τοποθετήθηκε στο κελί των απρόβλεπτων ένα ποσοστό 1% που και αυτό προκύπτει από το συνολικό κόστος των δαπανών και μας δίνει μεγαλύτερη ασφάλεια.

Παρακάτω στον πίνακα φαίνονται οι τιμές που αναλύθηκαν παραπάνω.

Ετήσια κόστη (πιστώσεις)	Μονάδα	Ποσότητα	Μονάδα κόστους	Ποσό
<b>Λειτουργία &amp; Συντήρηση</b>				
Ενοίκιαση γης & ενοίκιαση πηγής	έργο	1	€ 5.000	€ 5.000
Φόρος ιδιοκτησίας	έργο	1	€ 5.000	€ 5.000
Ποσοστό ασφαλιστρων	έργο	1	€ 5.000	€ 5.000
Τμήματα & Εργασία	έργο	1	€ 360.000	€ 360.000
Παρακολούθηση και επικύρωση ΑΤΘ	έργο			€ -
Κοινωνικά οφέλη	έργο			€ -
Γενικά & Διοικητικά	%	2,0%	€ 375.000	€ 7.500
Οριζόμενο από τον χρήστη	κόστος			€ -
Απρόβλεπτα	%	1,0%	€ 382.500	€ 3.825
Υπο-σύνολο:				€ 386.325

Εικόνα 42 Πίνακας ετήσιων κοστών

#### 6.7.4. Περιοδικές Δαπάνες.

Σε αυτή τη ενότητα προσδιορίζονται οι περιοδικές δαπάνες, οι οποίες σχετίζονται με την λειτουργία του συστήματος, κατά την διάρκεια της ζωής του. Περιοδικό κόστος θεωρείται εκείνο που απαιτείται ανά τακτικά χρονικά διαστήματα, για την διατήρηση σε κατάσταση λειτουργίας του έργου. Ορίστηκαν 10 χρόνια με δαπανώμενο ποσό σε αυτά 100.000€, όπως φαίνεται στον πίνακα.

Περιοδικά κόστη (πιστώσεις)	Μονάδα	Ετος	Μονάδα κόστους	Ποσό
Οριζόμενο από τον χρήστη	κόστος	10	€ 100.000	€ 100.000
				€ -
Τέλος διάρκειας ζωής έργου	κόστος			€ -

Εικόνα 43 Πίνακας περιοδικού κόστους.

#### 6.8 Ανάλυση Εκπομπών.

Η ύπαρξη αυτού του φύλλου εργασίας είναι πολλή χρήσιμη όχι τόσο για τον υπολογισμό της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου, αλλά είναι χρήσιμη για την υγεία του περιβάλλοντος, καθώς μας δείχνει την ποσότητα των αερίων του θερμοκηπίου που θα εκλύονταν στην ατμόσφαιρα εάν δεν πραγματοποιούνταν το έργο. Με λίγα λόγια αυτή η μελέτη υποδεικνύει πόσο διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) εκλύεται στην ατμόσφαιρα εάν για την ίδια παραγόμενη ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούσαμε κάποιο καύσιμο. Το συγκεκριμένο φύλλο παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει ανάμεσα σε 3 μεθόδους



**Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ**

πραγματοποίησής του. Η μέθοδος 1 είναι μια απλοποιημένη ανάλυση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η μέθοδος 2 χρησιμοποιεί πολλές προκαθορισμένες παραμέτρους στους υπολογισμούς, ενώ η μέθοδος 3 απαιτεί από τον χρήστη να εισαγάγει αυτές τις παραμέτρους. Επιλέχτηκε η μέθοδος 1 για ευκολία καθώς όπως είπαμε παραπάνω το συγκεκριμένο φύλλο είναι προαιρετικό για τον υπολογισμό, απλώς πρόκειται για ένα καλό μέτρο σύγκρισης.

Στην μέθοδο 1 το μόνο που εισάγει ο χρήστης είναι μια χώρα αναφοράς (επιλέχτηκε η Ελλάδα) και για καύσιμο επιλέχτηκε ο άνθρακας καθώς στην Ελλάδα αποτελεί το κυριότερο καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι το πρόγραμμα θα υπολογίσει την εκπομπή σε τόνους CO<sub>2</sub> ανά έτος. Όπως φαίνεται παρακάτω στον πίνακα η καθαρή ετήσια μείωση εκπομπών ΑΤΘ είναι 24.364 τόνοι CO<sub>2</sub> που ισοδυναμεί με την ποσότητα που εκλύεται από 4.462 αυτοκίνητα το χρόνο. Άρα καταλαβαίνει κάποιος πόσο σημαντική είναι η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όχι μόνο για το περιβάλλον αλλά και για την μείωση της κατανάλωσης καυσίμων.

**Βασική περίπτωση συστήματος ηλεκτρισμού (Σενάριο Αναφοράς)**

Κράτος - περιφέρεια	Τύπος Καυσίμου	Συντελεστής εκπομπής ΑΤΘ (εξαιρούνται Μ&Δ) tn CO <sub>2</sub> /MWh	Απώλειες Μ&Δ %	Συντελεστής εκπομπής ΑΤΘ tn CO <sub>2</sub> /MWh
Greece	Ανθρακας	1,025		1,025

Αλλαγές στο Σενάριο Αναφοράς κατά τη διάρκεια ζωής του έργου

**Περίληψη εκπομπών ΑΤΘ βασικού σεναρίου (σεναρίου αναφοράς)**

Τύπος Καυσίμου	Μίγμα καυσίμου %	Κατανάλωση καυσίμου	Συντελεστής εκπομπής ΑΤΘ	Εκπομπές ΑΤΘ
		MWh	tn CO <sub>2</sub> /MWh	tn CO <sub>2</sub>
Ηλεκτρική ενέργεια	100,0%	23.771	1,025	24.383,8
Σύνολο	100,0%	23.771	1,025	24.383,8

**Περίληψη εκπομπών ΑΤΘ προτεινόμενης περίπτωσης (Έργο ηλεκτροπαραγωγής)**

Τύπος Καυσίμου	Μίγμα καυσίμου %	Κατανάλωση καυσίμου	Συντελεστής εκπομπής ΑΤΘ	Εκπομπές ΑΤΘ
		MWh	tn CO <sub>2</sub> /MWh	tn CO <sub>2</sub>
Αιολικό	100,0%	23.771	0,000	0,0
Σύνολο	100,0%	23.771	0,000	0,0
Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο	MWh	23.771	Απώλειες Μ&Δ	
			0	0,0
			Σύνολο	0,0

**Σύνοψη μείωσης εκπομπών ΑΤΘ**

	Εκπομπές ΑΤΘ βασικής περίπτωσης tn CO <sub>2</sub>	Εκπομπές ΑΤΘ προτεινόμενης περίπτωσης tn CO <sub>2</sub>	Μικτή ετήσια μείωση εκπομπών ΑΤΘ tn CO <sub>2</sub>	Τέλη συναλλαγών πιστώσεων εκπομπών ΑΤΘ %	Καθαρή ετήσια μείωση εκπομπών ΑΤΘ tn CO <sub>2</sub>
Έργο ηλεκτροπαραγωγής	24.383,8	0,0	24.383,8		24.383,8
Καθαρή ετήσια μείωση εκπομπών ΑΤΘ	24.364	tn CO <sub>2</sub>	ισοδυναμεί με 4.462 Αυτοκίνητα και ελαφριά φορτηγά δεν χρησιμοποιούνται		

**Εικόνα 44 Πίνακας μείωσης εκπομπών ρύπων από την χρήση ΑΠΕ.**



## 6.9 Οικονομική Ανάλυση.

Αυτό το υπολογιστικό φύλλο είναι το σημαντικότερο από όλα τα προηγούμενα του προγράμματος, καθώς συμπεριλαμβάνει όλα τα προηγούμενα δεδομένα και με κάποια ακόμα πρόσθετα χρηματοοικονομικά που θα αναλυθούν παρακάτω, μας δείχνει την βιωσιμότητα του έργου, δηλαδή αν θα επιτευχθεί απόσβεση σε επιτρεπόμενο χρονικό διάστημα. Το συγκεκριμένο φύλλο χωρίζεται σε 6 κατηγορίες.

- Οικονομικοί παράμετροι,
- Ετήσια έσοδα,
- Σύνοψη κόστους έργου και αποταμιεύσεων/εσόδων,
- Οικονομική βιωσιμότητα,
- Ετήσια χρηματοροχή,
- Διάγραμμα αθροιστικών χρηματοροών.

### 6.9.1. Οικονομικές Παράμετροι.

Η κατηγορία οικονομικοί παράμετροι είναι η μοναδική από τις έξι στην οποία μπορούν να εισαχθούν στοιχεία από τον χρήστη και χωρίζεται σε τρεις υποκατηγορίες, τα γενικά, χρηματοδότηση και ανάλυση φόρου εισοδήματος.

#### 1. Γενικά

Σε αυτή την υποκατηγορία εισάγονται γενικά στοιχεία όπως, ο κυλιόμενος φόρος κόστους καυσίμου, τιμή πληθωρισμού στην χώρα, επιτόκιο αναγωγής και η διάρκεια ζωής του έργου. Παρακάτω γίνεται ανάλυση αυτών καθώς και η αιτιολόγηση των επιλογών.

- Κυλιόμενος φόρος κόστους καυσίμου.

Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει το ποσοστό πληθωρισμού του κόστους καυσίμου ο οποίος μπορεί να διαφέρει από χώρα σε χώρα. Τα ποσοστά κλιμάκωση του πληθωρισμού του κόστους καυσίμου στην Αμερική κυμαίνονται από 0% έως 5%. Μια μέση τιμή όπως είναι ένα 3% είναι αντιπροσωπευτικό.

- Τιμή πληθωρισμού.

Εδώ εισάγεται ο προβλεπόμενος ετήσιος ρυθμός πληθωρισμού (%) κατά την διάρκεια ζωής του έργου. Στην Αμερική για τα επόμενα χρόνια προβλέπεται πληθωρισμός της τάξεως 2% με 3%. Επιλέχτηκε ένα 2.5% ως μια μέση τιμή.

- Επιτόκιο αναγωγής

Ο χρήστης εισάγει το επιτόκιο προεξόφλησης του έργου (%). Το συγκεκριμένο επιτόκιο χρησιμοποιείται από το λογισμικό προκειμένου να υπολογίζει το την ετήσια εξοικονόμηση κύκλου ζωής. Στην Αμερική τα επιτόκια προεξόφλησης κυμαίνονται από 3% έως 18% επιλέγεται προσεγγιστικά μια μέση τιμή 9%. Η οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική.



- Διάρκεια ζωής έργου.

Ο χρήστης ορίζει την διάρκεια ζωής του έργου σε έτη, η οποία είναι και αυτή στην οποία καθορίζεται η βιωσιμότητα. Η διάρκεια ζωής εξαρτάται από την ποιότητα των υλικών, από το χρέος και από την συμφωνία της πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος. Συνήθως τα αιολικά πάρκα έχουν διάρκεια ζωής 25 χρόνια, μπορεί να φτάσουν και τα 50 κάτω υπό ορισμένες προϋποθέσεις.

## 2. Χρηματοδότηση.

Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται τα κίνητρα και οι επιχορηγήσεις, το τοκοχρεολύσιο, το χρέος, η μετοχή, το επιτόκιο δανεισμού, η περίοδος τους χρέους και οι πληρωμές του.

- Κίνητρα και επιχορηγήσεις.

Εδώ εισάγονται οποιαδήποτε οικονομικά κίνητρα, επιχορηγήσεις και επιδοτήσεις που μπορεί να υπάρχουν και δίνονται για το αρχικό κόστος. Στην δική μας περίπτωση θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχουν επιχορηγήσεις και τοποθετήθηκε στο συγκεκριμένο κελί η τιμή 0(€).

- Τοκοχρεολύσιο.

Ο χρήστης εισάγει το δείκτη του χρέους (%) που προκύπτει από τον λόγο του χρέους προς την μετοχή του έργου. Επιλέχτηκε 50% στο συγκεκριμένο παράδειγμα καθώς οι τιμές αυτές κυμαίνονται από 50% έως και 90%.

- Χρέος.

Το μοντέλο υπολογίζει μόνο του το χρέος που προκύπτει από το κόστος της αρχικής επένδυσης, για την υλοποίηση του έργου και όπου θα αποπληρωθεί με δάνειο.

- Μετοχή.

Το μοντέλο υπολογίζει το μετοχικό κεφάλαιο που αποτελεί μέρος του αρχικού κόστους και που καλείται να πληρώσει άμεσα ο ιδιοκτήτης. Εδώ όπως και από πάνω για την περίπτωση του χρέους ο χρήστης δεν εισάγει τίποτα.

- Επιτόκιο δανεισμού.

Ο χρήστης εισάγει το ετήσιο επιτόκιο (%) που καταβάλλεται στον κάτοχο του χρέους. Το συγκεκριμένο είναι χρήσιμο προκειμένου να υπολογίσει παρακάτω το πρόγραμμα την πληρωμή του χρέους.

- Περίοδος χρέους.

Ο χρήστης εισάγει τα έτη που απαιτούνται για να αποπληρωθεί όλο το χρέος. Λογικά δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την διάρκεια ζωής του έργου (25 έτη), επομένως επιλέχτηκαν 15 έτη.

- Πληρωμές χρέους

Το μοντέλο υπολογίζει τις ετήσιες πληρωμές του χρέους, που προκύπτει μέσα από υπολογισμούς των κεφαλαίων και των τόκων που καταβάλλονται ετησίως.



### 3. Ανάλυση φόρου εισοδήματος.

Η συγκεκριμένη κατηγορία είναι προαιρετική για την οικονομική ανάλυση καθώς και να συμπεριληφθεί δεν την επηρεάζει. Παρακάτω στον πίνακα φαίνονται όλοι οι παράμετροι που αναλύθηκαν παραπάνω.

<b>Οικονομικοί Παράμετροι</b>		
<b>Γενικά</b>		
Κυλιόμενος φόρος κόστους καυσίμου	%	3,0%
Τιμή πληθωρισμού	%	2,5%
Επιτόκιο αναγωγής	%	9,0%
Διάρκεια ζωής έργου	έτος	25
<b>Χρηματοδότηση</b>		
Κίνητρα και επιχορηγήσεις	€	0
Τοκοχρεολύσιο	%	50,0%
Χρέος	€	8.197.790
Μετοχή	€	8.197.790
Επιτόκιο δανεισμού	%	10,00%
Περίοδος χρέους	έτος	15
Πληρωμές χρέους	€/έτος	1.077.794
<b>Ανάλυση φόρου εισοδήματος</b>		<input type="checkbox"/>

Εικόνα 45 Οικονομικοί παράμετροι έργου

### 6.9.2. Πίνακες και Διαγράμματα Οικονομικής Ανάλυσης.

Αυτή η τιμή υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο με το ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ετήσια αξία των εσόδων από την εξαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κλιμακώνεται με τον ρυθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο κελί του κυλιόμενου φόρου πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας δεν συμπληρώθηκε τίποτα καθώς οι τιμές για απομονωμένα δίκτυα δεν μεταβάλλεται πολύ και θεωρείται αμελητέα οποιαδήποτε αλλαγή. Παρακάτω στο πίνακα φαίνονται αναλυτικά.

<b>Ετήσια έσοδα</b>		
<b>Εσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας</b>		
Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο	MWh	23.771
Τιμή πωλούμενου ηλεκτρισμού	€/MWh	99,45
Εσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας	€	2.364.006
Κυλιόμενος φόρος πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας	%	

Εικόνα 46 Πίνακας ετήσιων εσόδων

Στην σύνοψη κόστους έργου και αποταμιεύσεων/εσόδων ουσιαστικά γίνεται μια συγκεντρωτική έκθεση των τιμών από το φύλλο εργασίας της «ανάλυσης κόστους».



Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ

Σύνοψη κόστους έργου και αποταμιεύσεων/εσόδων			
<b>Αρχικά κόστη</b>			
Μελέτη σκοπιμότητας	1,4%	€	224.200
Ανάπτυξη	0,7%	€	109.800
Μηχανολογικά	0,6%	€	102.000
Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	76,2%	€	12.492.000
<hr/>			
Ισοζύγιο συστήματος & διάφορα	21,1%	€	3.467.579
<b>Συνολικά αρχικά κόστη</b>	<b>100,0%</b>	<b>€</b>	<b>16.395.579</b>
<hr/>			
<b>Ετήσια κόστη και πληρωμές χρέους</b>			
Λειτουργία & Συντήρηση		€	386.325
Κόστος καυσίμου - προτεινόμενη περίπτωση		€	0
Πληρωμές χρέους - 15 έτη		€	1.077.794
<b>Συνολικά ετήσια κόστη</b>		<b>€</b>	<b>1.464.119</b>
<hr/>			
<b>Περιοδικά κόστη (πιστώσεις)</b>			
Οριζόμενο από τον χρήστη - 10 έτη		€	100.000
<hr/>			
<b>Ετήσιες αποταμιεύσεις και έσοδα</b>			
Κόστος καυσίμου - βασική περίπτωση		€	0
Εσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας		€	2.364.006
<hr/>			
<b>Συνολικές ετήσιες αποταμιεύσεις και εισόδημα</b>		<b>€</b>	<b>2.364.006</b>

Εικόνα 47 Συνοπτικός πίνακας αρχικών κοστών.

Στον παρακάτω πίνακα της οικονομικής βιωσιμότητας φαίνεται ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (internal rate of return- IRR) που είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο το οποίο εξισώνει την παρούσα αξία των πρόσθετων ετήσιων ταμειακών ροών μετά από φόρους οι οποίες προέρχονται από το πρόγραμμα, με το αρχικό κόστος του προγράμματος. Με άλλα λόγια, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο το οποίο μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία του προγράμματος. Εάν ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος ή ίσος με την απαιτούμενη απόδοση, η επένδυση γίνεται αποδεκτή. Στην αντίθετη περίπτωση, η πρόταση απορρίπτεται.

Οικονομική Βιωσιμότητα		
Εσωτερικός συντελεστής απόδοσης προ φόρων - μετοχές (IRR) προ φόρου - περιουσιακά στοιχεία	%	10,8%
(IRR) μετά-φόρου - μετοχές	%	4,2%
(IRR) μετά φόρου - περιουσιακά στοιχεία	%	10,8%
(IRR) μετά φόρου - περιουσιακά στοιχεία	%	4,2%
Απλή αποπληρωμή	έτος	8,3
Αποπληρωμή Μετοχών	έτος	9,8
Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)	€	1.469.498
Ετήσιες αποταμιεύσεις κύκλου ζωής	€/έτος	149.604
Αναλογία Οφέλους-Κόστους (Ο-Κ)		1,18
Κάλυψη δανειακών υποχρεώσεων		1,82
Κόστος παραγωγής ενέργειας	€/MWh	93,16
Κόστος μείωσης εκπομπών ΑΤΘ	€/tCO <sub>2</sub>	(8)

Εικόνα 48 Πίνακας οικονομικής βιωσιμότητας.





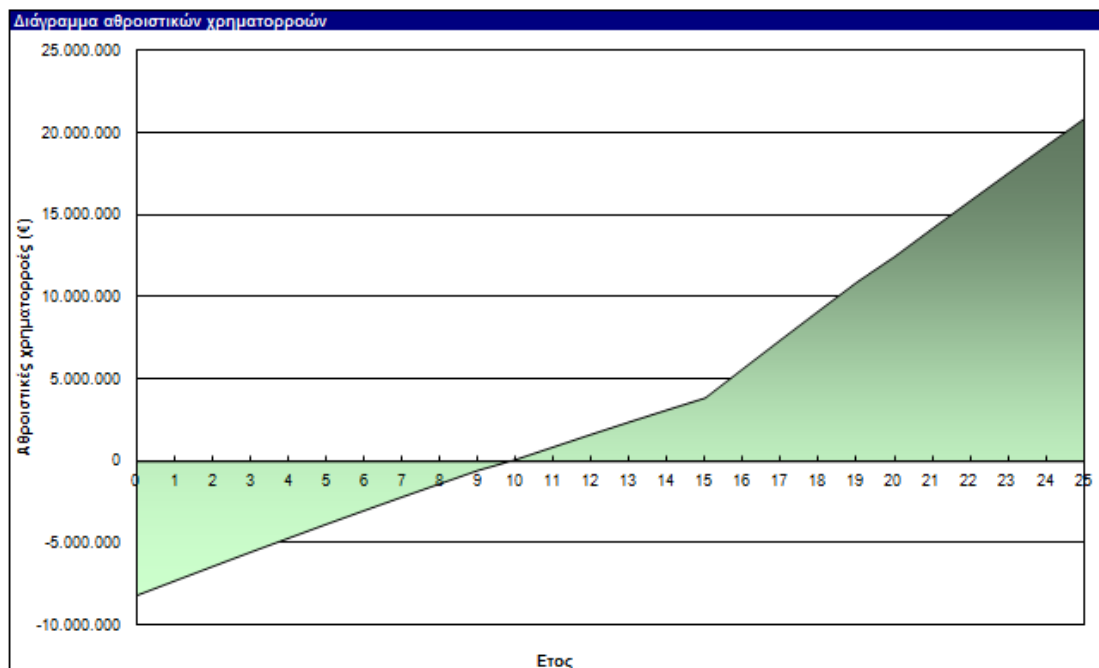
Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ

Το μοντέλο υπολογίζει τις σωρευτικές ταμειακές ροές, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις καθαρές ροές μετά από φόρους που συσσωρεύονται από το έτος 0. Χρησιμοποιεί τις καθαρές ροές για τον υπολογισμό των σωρευτικών ροών.

Ετήσια χρηματορροή			
Ετος	Προ-φόρων	Μετά-φόρων	Αθροιστικά
#	€	€	€
0	-8.197.790	-8.197.790	-8.197.790
1	890.228	890.228	-7.307.562
2	880.328	880.328	-6.427.233
3	870.181	870.181	-5.557.052
4	859.781	859.781	-4.697.271
5	849.120	849.120	-3.848.151
6	838.193	838.193	-3.009.958
7	826.992	826.992	-2.182.966
8	815.512	815.512	-1.367.454
9	803.744	803.744	-563.710
10	663.674	663.674	99.964
11	779.319	779.319	879.283
12	766.647	766.647	1.645.930
13	753.658	753.658	2.399.588
14	740.344	740.344	3.139.932
15	726.697	726.697	3.866.630
16	1.790.504	1.790.504	5.657.133
17	1.776.166	1.776.166	7.433.300
18	1.761.470	1.761.470	9.194.770
19	1.746.407	1.746.407	10.941.177
20	1.567.105	1.567.105	12.508.283
21	1.715.141	1.715.141	14.223.424
22	1.698.919	1.698.919	15.922.343
23	1.682.292	1.682.292	17.604.636
24	1.665.250	1.665.250	19.269.885
25	1.647.781	1.647.781	20.917.666

Εικόνα 49 Πίνακας ετήσιας χρηματορροής.

Οι αθροιστικές ταμειακές ροές απεικονίζονται σε σχέση με το χρόνο στο γράφημα ταμειακών ροών. Αυτές οι ταμειακές ροές κατά τη διάρκεια του έργου υπολογίζονται στο μοντέλο και αναφέρονται στον πίνακα ετήσιων ταμειακών ροών.



Εικόνα 50 Διάγραμμα αθροιστικών χρηματορροών.



**Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ**



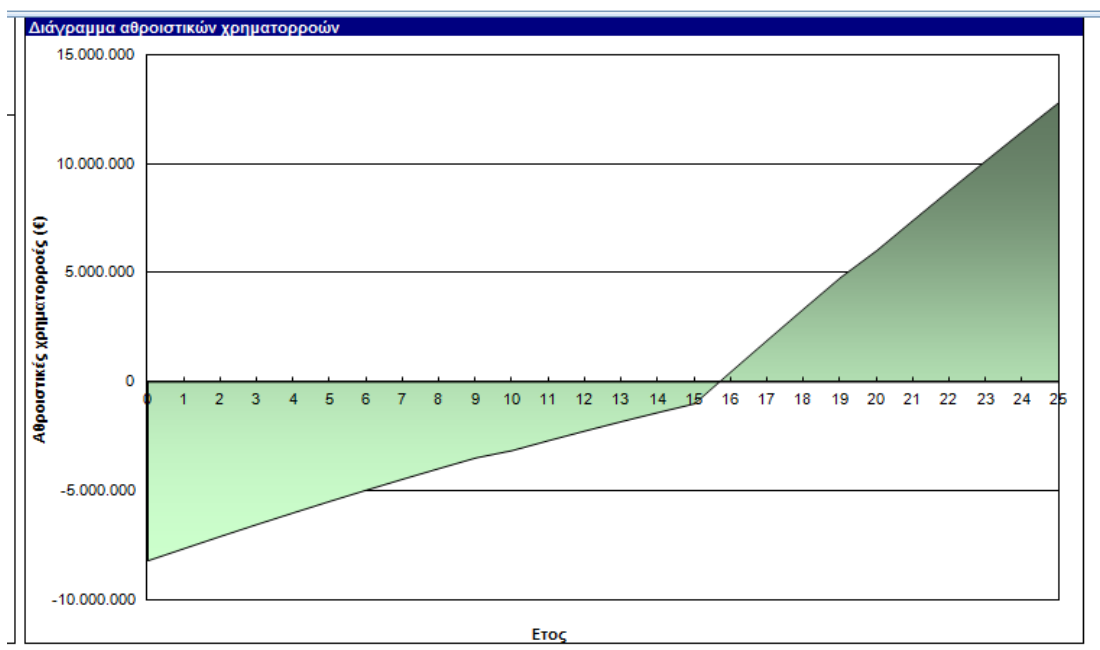
## Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα.

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση και από τους πίνακες γίνεται φανερή η οικονομική βιωσιμότητα του έργου. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα αθροιστικών χρηματορροών η απόσβεση του αρχικού κόστους του έργου πραγματοποιείται στα 10 έτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε καμία ενότητα του λογισμικού Retscreen δεν τοποθετήθηκαν πλαστά δεδομένα προκειμένου να αλλοιωθεί το αποτέλεσμα.

Στη συνέχεια δίνονται κάποια σενάρια εγκατάστασης ανεμογεννητριών με σταθερά δεδομένα την ισχύ του πάρκου (10 MW), το πλήθος ανεμογεννητριών (5) και προφανώς ίδια τοποθεσία. Τα σενάρια αναφέρονται στο μέγεθος της ανεμογεννήτριας που θα τοποθετηθεί (κυρίως ύψος και κατ'επέκταση διάμετρος δρομέα) καθώς και τον τρόπο διασύνδεσης του δικτύου.

### 7.1 Σενάριο 1<sup>ο</sup> Ανεμογεννήτρια Vestas V80 – 2.0 MW – 60m.

Για αυτό το συγκεκριμένο μοντέλο ανεμογεννήτριας παρατηρείται ότι αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος απόσβεσης (περίπου 6 χρόνια παραπάνω), αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν εκμεταλλευόμαστε την ίδια ποσότητα αέρα, λόγω χαμηλότερου ύψους και μικρότερης διαμέτρου δρομέα με αποτέλεσμα η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να μειώνεται δραματικά. Διαπιστώνει κανείς ότι μια τόσο θεωρητικά μικρή αλλαγή στην επιλογή της ανεμογεννήτριας μπορεί να μας οδηγήσει σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα, επομένως πρέπει να είναι σωστά μελετημένη η εκλογή της κατάλληλης ανεμογεννήτριας. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα απόσβεσης.

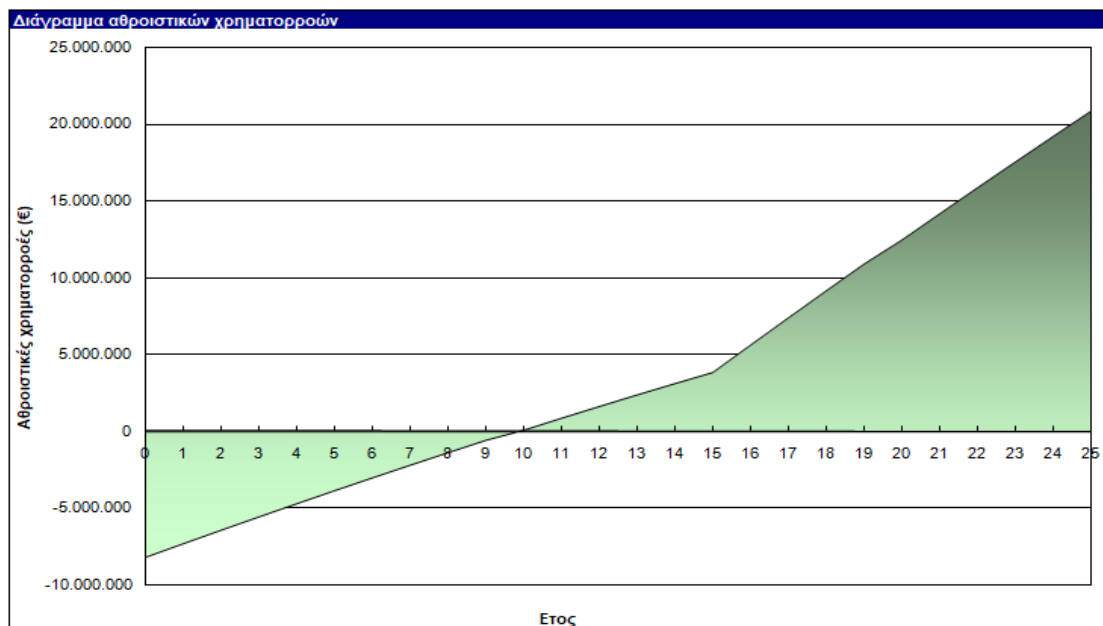


Εικόνα 51 Διάγραμμα αθροιστικών χρηματορροών 1ου σεναρίου.



## 7.2 Σενάριο 2° Ανεμογεννήτρια Vestas V90 – 2.0 MW – 105m.

Στο δεύτερο παράδειγμα χρησιμοποιήσαμε την αμέσως υψηλότερη ανεμογεννήτρια. Παρατηρούμε στο διάγραμμα αθροιστικών χρηματορροών ότι δεν υπάρχει αξιοσημείωτη διαφορά με την αρχική μελέτη. Αυτό οφείλεται ότι είμαστε ήδη σε αρκετό υψόμετρο (80m) το οποίο σημαίνει ότι η ανεμογεννήτρια είναι εκτός των παρεμβολών της ζώνης του οριακού στρώματος, οπότε όσο ψηλότερη και αν τοποθετήσουμε δεν θα έχουμε ιδιαίτερη αύξηση των εσόδων και μείωσης της απόσβεσης. Αντιθέτως, θα έχουμε αύξηση του αρχικού κόστους λόγω των ακριβότερων ανεμογεννητριών.



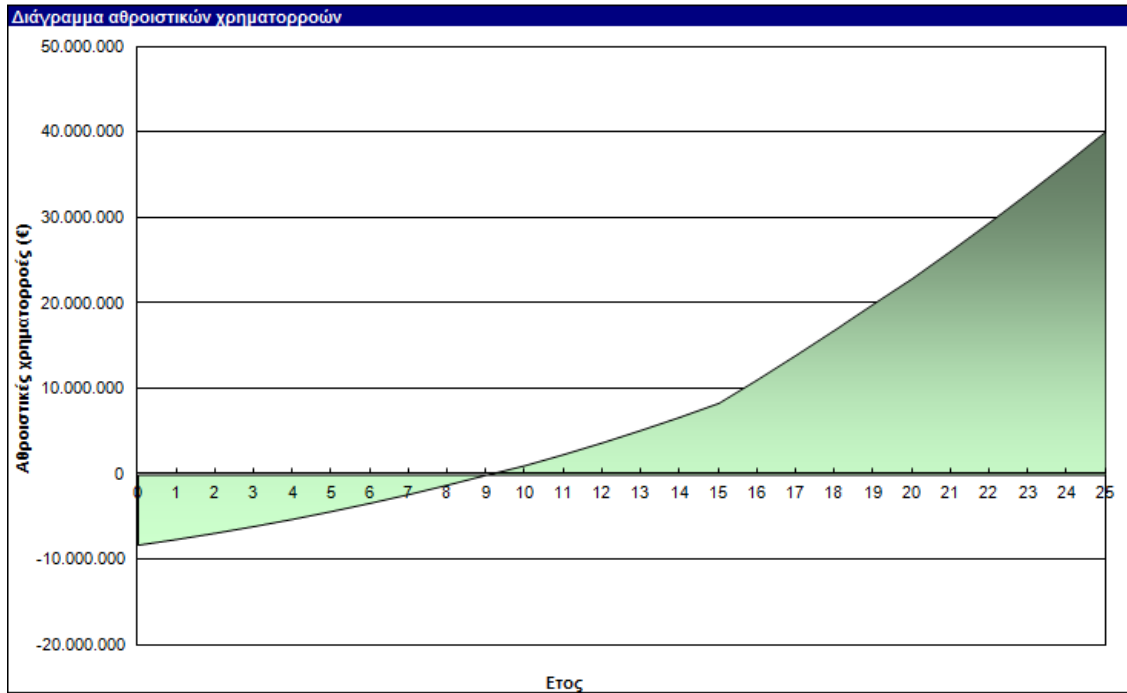
Εικόνα 52 Διάγραμμα αθροιστικών χρηματορροών 2ου σεναρίου.

## 7.3 Σενάριο 3° Ανεμογεννήτρια Vestas V80 – 2.0 MW – 60m - Διασυνδεδεμένο.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα εξεταστεί η περίπτωση το πάρκο να ήταν διασυνδεδεμένο στο σύστημα. Αν ίσχυε αυτό, πράγμα που είναι πρακτικά αδύνατο, καθώς πρόκειται για αιολικό πάρκο σε νησί, η τιμή πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος ανά μήνα θα ήταν 87,85€/MW. Αναμενόμενο θα ήταν ο χρόνος απόσβεσης του έργου να αυξηθεί, αλλά θα πρέπει να υπολογιστεί το γεγονός ότι η εγκατάσταση του έργου σε μια σχετικά προσιτή περιοχή, θα είναι οικονομικότερη. Επομένως, παρατηρείται ο χρόνος απόσβεσης του έργου να μειώθηκε κατά ένα χρόνο από την αρχική μελέτη.



Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ



Εικόνα 53 Διάγραμμα αθροιστικών χρηματοροών 3ου σεναρίου.



## Παράρτημα

Στο παράρτημα που ακολουθεί αναφέρονται σημαντικές πληροφορίες για την ανεμογεννήτρια αναφοράς της μελέτης, όπως η νέα τεχνολογική εξέλιξη των V90 και οι τεχνικές προδιαγραφές από το φυλλάδιο της VESTAS.

### Π.1 VESTAS V90-2.0MW



Εικόνα 54 Πηγή: <https://www.vestas.com/en/about/profile#!>

### Βέλτιστη απόδοση

Οι γεννήτριες OptiSpeed® στα V90-1,8 MW και στα V90-2.0 MW έχουν προσαρμοστεί από την επιτυχημένη τουρμπίνα V80 της Vestas. Στο OptiSpeed® οφείλεται μια σημαντική αύξηση της απόδοσης της ανεμογεννήτριας, καθώς επιτρέπει στον ρότορα μια ταχύτητα που κυμαίνεται σε εύρος περίπου 60% σε σχέση με τις ονομαστικές στροφές ανά λεπτό. Αυτό σημαίνει ότι με το OptiSpeed®, δίνεται η δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας έως και 30%. Ο σκοπός του είναι απλός: μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας. Αυτό το κάνει καθώς ακόμα και στις αργές και μεταβαλλόμενες ταχύτητες ανέμου, αποθηκεύει περίσσεια ενέργειας σε περιστροφική μορφή αλλάζοντας την ταχύτητα των πτερυγίων σε μια αποδεκτή ταχύτητα, έτσι εκμεταλλεύεται την πλήρη δύναμη των παροδικών ριπών. Συνολικά, το OptiSpeed® αποδεδειγμένα ενισχύει την ετήσια παραγωγή ενέργειας. Ως πρόσθετο πλεονέκτημα, το OptiSpeed® είναι η μείωση της φθοράς στο κιβώτιο ταχυτήτων, στα πτερύγια και στον πύργο λόγω του χαμηλότερου φορτίου. Επιπλέον, καθώς ο θόρυβος του στροβίλου είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, οι



χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής που επιτυγχάνονται από το OptiSpeed® μειώνουν φυσικά τα επίπεδα ήχου. Τέλος, το OptiSpeed® βοηθά τις V90 να προσφέρουν καλύτερη ποιότητα ισχύς στο δίκτυο, με γρήγορο συγχρονισμό, αρμονική παραμόρφωση και λιγότερο τρεμόπαιγμα.

### **Διαστάσεις Πτερυγίων 3 × 44 μέτρα.**

Τα πτερύγια Vestas ήταν πάντα από τις πιο ελαφριές στην αγορά, και με τους στροβίλους V90, έχουν ανεβάσει για άλλη μια φορά το πήχη. Αποτελούνται από αρκετά νέα ελαφριά υλικά, κυρίως ανθρακονήματα. Όχι μόνο οι ίνες άνθρακα είναι ελαφρύτερες από τις ίνες γυαλιού που χρησιμοποιούνται σε προηγούμενους τύπους πτερυγίων, αλλά η αντοχή και η ακαμψία τους έχουν επίσης κατέστη δυνατή τη μείωση της απαιτούμενης ποσότητας υλικού. Αυτό σημαίνει ότι παρόλο που οι V90 έχουν 27% περισσότερη περιοχή σάρωσης από τις V80, άρα και μεγαλύτερες λεπίδες ζυγίζουν περίπου το ίδιο. οι λεπίδες V90 έχουν επίσης ένα νέο προφίλ που είναι αεροδυναμικά ανώτερο από την προηγούμενη γενιά. Οι μηχανικοί της Vestas ανέπτυξαν με αυτό το τεχνολογικά προηγμένο προφίλ βελτιστοποίησαν την συνολική επίδραση φορτίου στη τουρμπίνα και τη ισχύ που παράγεται ετησίως. Επίσης το νέο προφίλ της πτέρυγας είναι λιγότερο ευαίσθητο σε βρωμιά.



*Innovations in blade technology*

*Εικόνα 55 Νέο προηγμένο πτερύγιο της VESTAS V90*

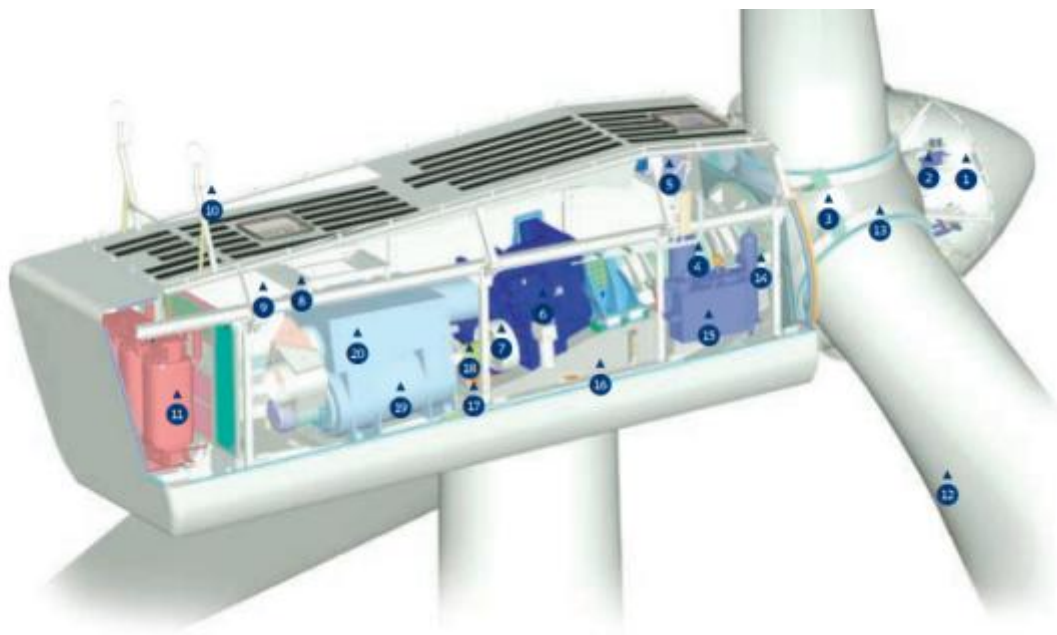
### **Απόδοση.**

Οι εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας απαιτούν σημαντικές επενδύσεις και η διαδικασία μπορεί να είναι πολύ περίπλοκη. Για να βοηθήσει στην αξιολόγηση και την διαδικασία της αγοράς, η Vestas έχει εντοπίσει τέσσερις παράγοντες που είναι κρίσιμοι για την ποιότητα της ανεμογεννήτριας αυτοί είναι: παραγωγή ενέργειας, λειτουργική διαθεσιμότητα, ποιότητα ισχύος και επίπεδο ήχου. Αφιερώνουν μήνες δοκιμών και τεκμηρίωσης αυτών αποδόσεων για όλες τις τουρμπίνες Vestas. Όταν είναι τελικά ικανοποιημένοι, απευθύνονται και σε έναν ανεξάρτητο οργανισμό δοκιμών για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων - μια πρακτική που αποκαλείται "Αποδεδειγμένη Απόδοση".



Εικόνα 56 Πηγή: [https://www.vestas.com/en/products/2-mw-platform/v90-2\\_0\\_mw#!about](https://www.vestas.com/en/products/2-mw-platform/v90-2_0_mw#!about)

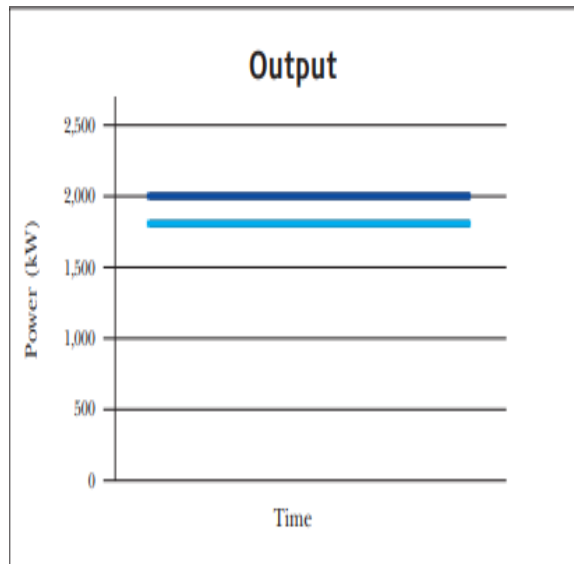
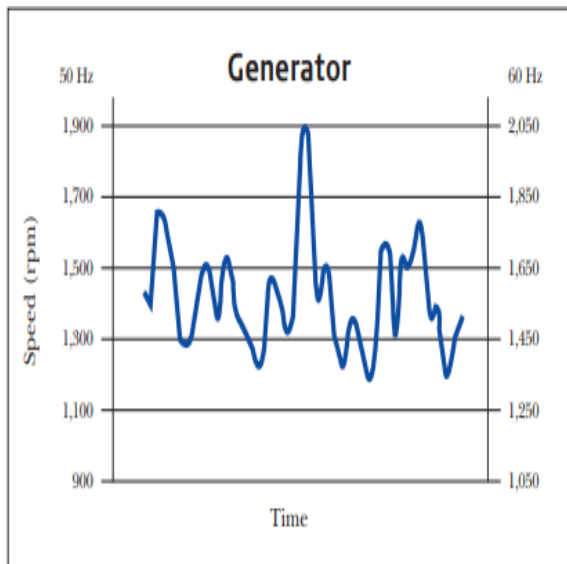
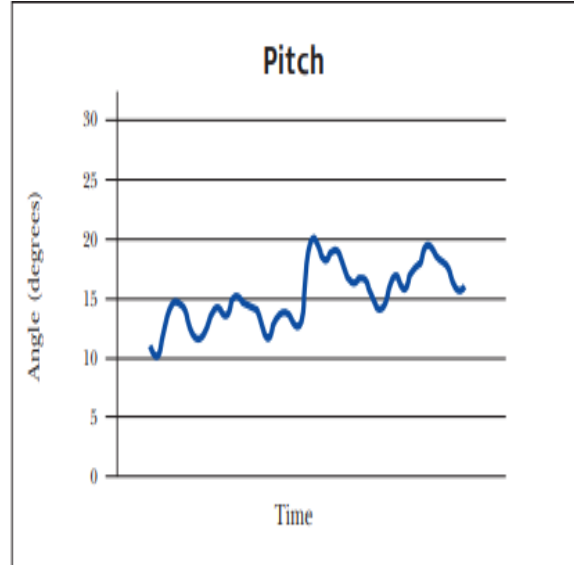
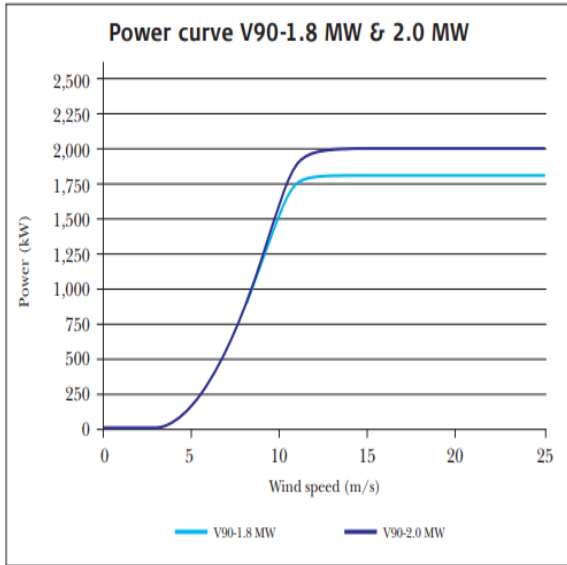
### Τεχνικές προδιαγραφές







Πτυχιική Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ





## Rotor

Diameter:	90 m
Area swept:	6,362 m <sup>2</sup>
Nominal revolutions:	14.9 rpm
Operational interval:	9.0-14.9 rpm
Number of blades:	3
Power regulation:	Pitch/Optispeed
Air brake:	Full blade pitch by three separate hydraulic pitch cylinders

## Tower

Hub height:	80 m, 95 m, 105 m
-------------	-------------------

## Operational data

	IEC IIA:	IEC IIIA/DIBt II:
Cut-in wind speed:	3.5 m/s	2.5 m/s
Nominal wind speed:	12 m/s	13 m/s
Cut-out wind speed:	25 m/s	25 m/s / 21 m/s

## Generator

	IEC IIA:	IEC IIIA/DIBt II:
Type:	Asynchronous with Optispeed	Asynchronous with Optispeed
Nominal output:	1,800 kW	2,000 kW
Operational data:	50 Hz/60 Hz 690 V	50 Hz/60 Hz 690 V

## Gearbox

Type:	Planetary/helical stages
-------	--------------------------

## Control

Type:	Microprocessor-based control of all the turbine functions with the option of remote monitoring. Output regulation and optimisation via OptiSpeed and OptiTip pitch regulation.
-------	--

## Weight

Nacelle:	68 t		
Rotor:	38 t		
Towers:			
Hub height:	IEC IIA	IEC IIIA	DIBt II
80 m	150 t	150 t	-
95 m	-	-	200 t
105 m	-	-	225 t

t = metric tonnes



Πτυχιική Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
 ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
 ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ

**OPERATIONAL DATA**

Rated power	2,000 kW/2,200 kW
Cut-in wind speed	4 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Re cut-in wind speed	23 m/s
Wind class	IEC IIA; IEC S
Operating temperature range standard turbine	-20 °C to 40 °C
Operating temperature range low temperature turbine	-30 °C to 40 °C

**SOUND POWER**

Maximum	104 dB*
	* Noise modes available

**ROTOR**

Rotor diameter	90 m
Swept area	6,362 m <sup>2</sup>
Air brake	full blade feathering with 3 pitch cylinders

**ELECTRICAL**

Frequency	50/60 Hz
Generator type	4-pole (50 Hz)/6-pole (60 Hz) doubly fed generator, slip rings

**GEARBOX**

Type	one planetary stage and two helical stages
------	--

**TOWER**

Type	tubular steel tower
Hub heights	80 m (IEC IIA), 95 m (IEC IIA) and 105 m (IEC IIA)

**NACELLE DIMENSIONS**

Height for transport	4 m
Height installed (incl. CoolerTop®)	5.4 m
Length	10.4 m
Width	3.5 m

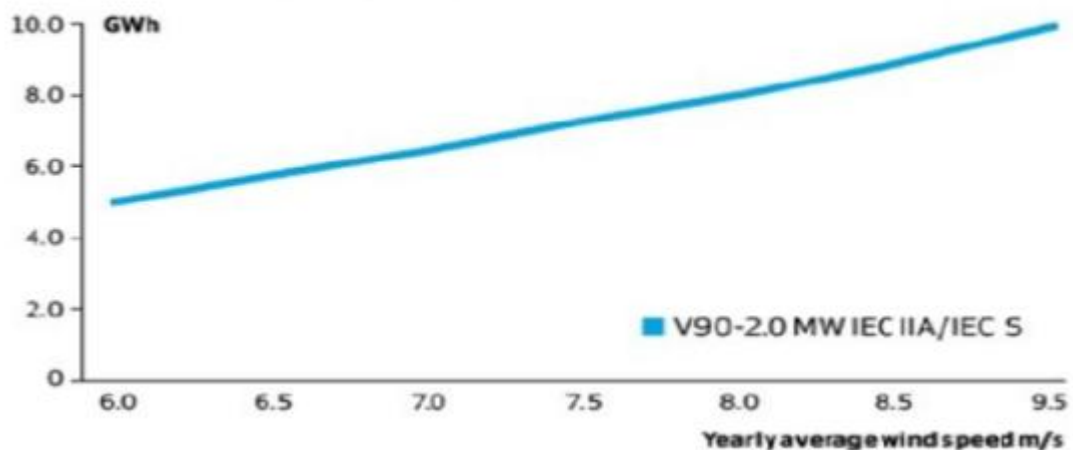
**HUB DIMENSIONS**

Max. transport height	3.4 m
Max. transport width	4 m
Max. transport length	4.2 m

**BLADE DIMENSIONS**

Length	44 m
Max. chord	3.9 m
Max. weight per unit for transportation	70 tonnes

**AEP Curve**





**Πτυχιακή Εργασία Ασπρομάλη Ευστράτιου- Ροΐδη Κωνσταντίνου  
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΗ  
ΝΗΣΟ ΣΙΦΝΟ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ**



## Βιβλιογραφία

- Ενέργεια (Wikipedia)  
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1>
- Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Wikipedia)  
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CF%8E%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B5%CF%82\\_%CF%80%CE%B7%CE%B3%CE%AD%CF%82\\_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CF%8E%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B5%CF%82_%CF%80%CE%B7%CE%B3%CE%AD%CF%82_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82)
- Ανεμογεννήτριες Διδάσκων: Δρ. Βαφειάδης Κυριάκος  
<https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH283/%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%AC%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82/3.%20%CE%91%CE%9D%CE%95%CE%9C%CE%9F%CE%93%CE%95%CE%9D%CE%9D%CE%97%CE%A4%CE%A1%CE%99%CE%95%CE%A3.pdf>
- Αιολική Ενέργεια Wikipedia  
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AE\\_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1)
- Ροδόγραμμα Νήσου Σίφνου  
[https://www.meteoblue.com/el/%CE%BA%CE%B1%CE%B9%CF%81%CF%8C%CF%82/historyclimate/climatemodelled/%ce%a3%ce%af%cf%86%ce%bd%ce%bf%cf%82\\_%ce%95%ce%bb%ce%bb%ce%b7%ce%bd%ce%b9%ce%ba%ce%ae-%ce%94%ce%b7%ce%bc%ce%bf%ce%ba%cf%81%ce%b1%cf%84%ce%af%ce%b1\\_253923](https://www.meteoblue.com/el/%CE%BA%CE%B1%CE%B9%CF%81%CF%8C%CF%82/historyclimate/climatemodelled/%ce%a3%ce%af%cf%86%ce%bd%ce%bf%cf%82_%ce%95%ce%bb%ce%bb%ce%b7%ce%bd%ce%b9%ce%ba%ce%ae-%ce%94%ce%b7%ce%bc%ce%bf%ce%ba%cf%81%ce%b1%cf%84%ce%af%ce%b1_253923)
- Διπλωματική Εργασία Δημητρίου Γκίκα του Δημητρίου  
<https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/5049/1/Diplwmatiki.pdf>
- ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ
- <http://www.gaiacomm.gr/Greek%20Version/Masts.html>
- <http://www.rae.gr/geo/?tab=panel-1386>
- Εγχειρίδιο RetScreen  
[https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/MECH1166/Enxeiridio\\_RETSCR\\_EEN.pdf](https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/MECH1166/Enxeiridio_RETSCR_EEN.pdf)
- Ορισμός Ροδογράμματος  
<https://meteocharilaou.gr/wind-rose/>
- Μελέτη Εγκατάστασης Ανεμογεννήτριας στη Νήσο Σίφνο, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΣΑΜΗ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Πάτρα 2018
- Συστήματα αιολικής ενέργειας Ι. Καούρης, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πάτρα 2016
- Κλιματικά δεδομένα Σίφνου  
<http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/TOTEE-20701-3-Final-TEE%202nd.pdf>
- RetScreen Wikipedia  
<https://el.wikipedia.org/wiki/RETScreen>



- ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ  
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%83%CF%89%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82\\_%CE%B2%CE%B1%CE%B8%CE%BC%CF%8C%CF%82\\_%CE%B1%CF%80%CF%8C%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7%CF%82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%83%CF%89%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82_%CE%B2%CE%B1%CE%B8%CE%BC%CF%8C%CF%82_%CE%B1%CF%80%CF%8C%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7%CF%82)
- V90-1.8 MW & 2.0 MW Built on experience  
<https://www.edprnorthamerica.com/wp-content/uploads/2014/04/V90.pdf>
- OptiSpeed Τεχνολογία  
[http://control-design.de/home\\_eng/Applications/Windenergy/body\\_windenergy.html](http://control-design.de/home_eng/Applications/Windenergy/body_windenergy.html)
- Vestas V90-2.0 MW  
[https://www.vestas.com/en/products/2-mw-platform/v90-2\\_0\\_mw#!](https://www.vestas.com/en/products/2-mw-platform/v90-2_0_mw#!)
- Vestas  
<https://www.vestas.com>
- Φυλλάδιο τεχνικών προδιαγραφών Vestas V90-2.0MW  
<http://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/2MWbrochure/2MWProductBrochure/?page=8>
- Ρευστοδυναμικές μηχανές Στροβιλομηχανές-Υδροδυναμικές μηχανές του Απόστολου Πολυζάκη